

博士論文

温度ひび割れ照査方法の変遷から見た現状の課題とその改善方法に関する研究

杉橋直行

目 次

第1章 序論	1
1.1 本研究の背景および目的	1
1.2 本論文の構成	2
第2章 既往の研究	5
2.1 ひび割れ照査方法の確立	5
2.2 ひび割れ発生確率図の変遷	15
2.2.1 ひび割れ発生確率図の成立	15
2.2.2 平成3年（1991年）版	18
2.2.3 平成8年（1996年）制定版	18
2.2.4 平成11年（1999年）版	19
2.2.5 2012年制定版	20
2.2.6 ひび割れ発生確率図の変遷	21
2.3 ひび割れ指数と安全係数，制御目標値	23
2.4 引張強度	30
2.5 有効ヤング係数	38
2.6 断熱温度上昇特性	43
2.7 物性の温度依存性，有効材齢	51
2.8 物性のばらつきとひび割れ発生確率	52
第3章 ひび割れ発生確率図の分析と現状の課題	58
3.1 ひび割れ発生確率図と引張強度の関係	58
3.1.1 ひび割れ発生確率図の変遷における引張強度	58
3.1.2 構造物中の引張強度と割裂引張強度	64
3.2 ひび割れ発生確率曲線のワイブル分布関数化	72
3.3 解析条件の改訂とその影響	75
3.3.1 引張強度と有効ヤング係数	75
3.3.2 断熱温度上昇特性の影響	84
3.4 ひび割れ発生確率図の適用範囲	93
3.4.1 ひび割れ発生確率図の意味	93
3.4.2 ひび割れ発生確率図作成データの標準性と有意性，棄却	96
3.4.3 高品質な構造物	100
3.4.4 構造物内の応力と強度のばらつき，平均値	101
3.4.5 長スパンの構造物	103
3.5 現状の課題	106
第4章 ひび割れ発生現象の確率論	108

4.1 ひび割れ発生現象の確率論	108
4.1.1 ひび割れの確率論的解釈	108
4.1.2 ひび割れ発生確率の定義	109
4.1.3 期待値と標準偏差, 変動係数, 特性値, 安全係数, 修正係数	110
4.2 ひび割れ発生確率の算定方法	113
4.2.1 引張強度が引張応力を超える確率	113
4.2.2 ひび割れ発生確率とひび割れ指数	114
4.2.3 変動係数がひび割れ発生確率曲線に与える影響	115
4.2.4 安全係数がひび割れ発生確率曲線に与える影響	118
4.3 ひび割れ照査方法改善の方向性	119
第5章 新たなひび割れ照査方法	120
5.1 ひび割れ発生確率の算定方法の一般化	120
5.2 ひび割れ発生確率図の有用性	121
5.3 変動係数の標準値	126
5.3.1 平成8年制定版と2012年制定版の変動係数の推定	126
5.3.2 引張強度の変動係数の標準値の設定	129
5.3.3 応力の変動係数の設定	133
5.3.4 コンクリート材齢と変動係数	135
5.3.5 材齢による変化を考慮した変動係数の設定	136
5.4 安全係数の標準値	139
5.5 高品質な構造物のひび割れ発生確率	140
5.6 長スパン構造物のひび割れ発生確率	141
5.7 新たなひび割れ照査方法	143
5.7.1 標準的なひび割れ照査方法	143
5.7.2 汎用的なひび割れ照査方法	145
第6章 結論	149
謝 辞	153
付 録-1 引張強度と有効ヤング係数の改訂の影響	156
付 録-2 断熱温度上昇特性の改訂の影響	166
付 録-3 長スパン構造物のひび割れ発生確率	176
参考文献	278

第1章 序論

1.1 本研究の背景および目的

(公社)土木学会編コンクリート標準示方書において、マスコンクリートのひび割れ照査方法が昭和61年(1986年)に初めて示されてから、既に30年が経過し、安全係数とひび割れ発生確率の関係図(以降、ひび割れ発生確率図と呼ぶ)を用いたひび割れ照査方法が一般化していると言って過言ではない。この照査法は、構造物に許容するひび割れ発生確率を設定し、ひび割れ発生確率図から対応する安全係数を求めて、検討期間内のいずれの材齢においても式(1.1-1)を満足するようにひび割れ制御方法を検討するものである。

$$I_{cr}(t) \geq \gamma_{cr} \quad (1.1-1)$$

ここに、 $I_{cr}(t)$: ひび割れ指数 $I_{cr}(t) = f_{tk}(t) / \sigma_t(t)$

$f_{tk}(t)$: 材齢 t 日におけるコンクリート引張強度

$\sigma_t(t)$: 材齢 t 日におけるコンクリート最大主引張応力度

γ_{cr} : ひび割れ発生確率に関する安全係数

ひび割れ発生確率図は、ひび割れ発生確率から安全係数、ひいてはひび割れ指数を一義的に設定可能とする、ひび割れ照査に欠かせないものになっている。

しかしながら、一方で確率論的には、引張強度と引張応力にばらつきを考えて、引張応力が引張強度よりも大きくなる確率をひび割れ発生確率としてこれを算定した場合、ひび割れ指数を一つ決めても、本来ひび割れ発生確率は一義的に決まらない。これは、図 1.1-1 に示すように、同一のひび割れ指数で

も、ばらつきが異なる無数の母集団を想定することが可能であり、確率が一義的に決まらないためである。強度と応力にばらつきを考えた場合、ひび割れ指数は、強度の母集団の期待値と応力の母集団の期待値の比と定義せざるをえない概念的なものになるからでもある。

前述のコンクリート標準示方書に示されるひび割れ発生確率図は、この図 1.1-1 の概念を表現できていない。この理由は、ひび割れ発生確率図は、確率論から算定されるひび割れ発生確率を示したのではなく、実際の構造物のひび割れの発生確率をひび割れ指数と対応づけて示しているために生じている。このため、示方書ではひび割れ発生確率図について、その改訂の都度、確率論との整合を意識した、様々な合理的仮定や理由が説明されてきた。しかし 30 年の時間の経過と 3 回の改訂の結果、理解が困難になってきている側面がある。

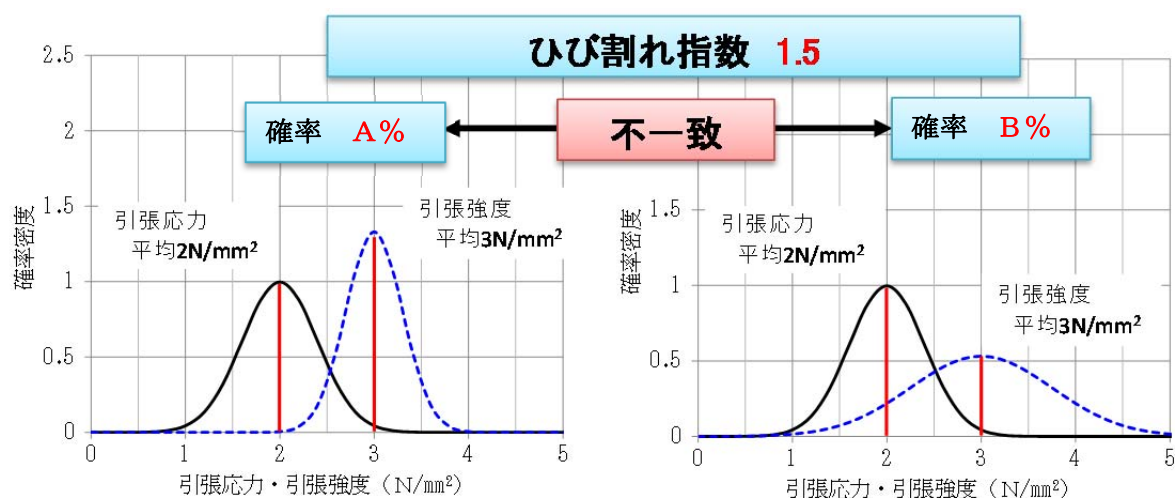


図 1.1-1 ひび割れ指数一定値で想定できる母集団

このため本論文では、土木構造物のマスコンクリートのひび割れ発生確率図を中心に、ひび割れ照査法の変遷を、改訂の要因と対応、関連する物性や制御目標値等に着眼して整理を行い、この観点から、現状のひび割れ照査方法の課題を明らかにすることを試みた。

さらに、近年、山口県ではコンクリートのひび割れ抑制に関する取組みが行われ、これらの取組みが行われた構造物群では、同一指数でひび割れ発生確率図に示される曲線の下側、ひび割れ発生確率が小さくなるプロットがほとんどであること等が明らかになっている¹⁻¹⁾。すなわち、ひび割れ発生確率図に示される曲線（以降、ひび割れ発生確率曲線と呼ぶ）には、品質管理の方法によっては適用できない場合があることが示唆されたものと考えられる。

このようなことから、本研究は、ひび割れ照査方法の変遷を整理した上で、現状の課題を明らかにし、確率論に照らして説明性が高く、品質管理の方法等によらず一貫してより広範で汎用的な、新たなひび割れ照査法を提案することを目的に各種検討を行ったものである。

1.2 本論文の構成

本論文の第2章以降の構成と内容は概略以下のとおりである。

第2章では、土木構造物のマスコンクリートにおける、これまでのひび割れ照査方法の変遷を整理した。土木構造物のマスコンクリートにおけるひび割れの照査が始まった経緯を、1936年（昭和11年）に鉄筋コンクリート標準示方書が初めて表された時点から、時代背景と合わせて整理した。次に、2017年現在に至るまでひび割れ照査方法の核となっているひび割れ発生確率図がどのように改訂されてきたか、その要因と対応を明らかにした。このひび割れ発生確率図の改訂に合わせて、①制御目標値、②引張強度、③有効ヤング係数、④断熱温度上昇特性、⑤各種物性の温度依存性がどのように改訂されてきたかを明らかにした。さらに、ひび割れ問題を確率的に捉え、ひび割れ発生確率を数値的に算出している研究を整理した。

第3章では、ひび割れ発生確率図の分析を行い、ひび割れ照査の課題を検討した。第2章のひび割れ照査方法の変遷を踏まえ、現状のひび割れ発生確率図、照査方法の課題を明らかにした。

第4章では、ひび割れ発生現象を確率論の観点から整理し、引張強度を引張応力が超える確率をひび割れ発生確率と定義して、これを算定する方法を明らかにした。また、この方法を利用し、現状のひび割れ発生確率図に適合しない、①山口県の高品質コンクリート構造物群のデータプロット群、②2012年制定版コンクリート標準示方書のひび割れ発生確率図の元データである、指数1.85でひび割れ発生確率が18%程度のプロット等をどのように考えるべきか検討し、これらのプロットも適切に扱えるひび割れ発生確率の算定方法を検討した。

第5章では、第4章で示されたひび割れ発生確率の算定方法を利用し、確率論に照らして説明性が高く、品質管理の方法等によらず一貫してより広範で汎用的に利用できる、新たなひび割れ照査法を提案した。

第6章では、各章で得られた主要な結論をまとめることにより、本論文の結論とした。

第2章 既往の研究

2.1 ひび割れ照査方法の確立

マスコンクリートのひび割れ制御技術の基礎を初めて確立したのは、米国開拓局が1933～1936年に建設したHooverダム（高さ220m）であるとされる²⁻¹⁾。Hooverダムは、1930年に建設されたArielダムや1932年に建設されたOwyheeダムにおいて実験的に検討が行われていたパイプクーリングを、本格的に採用し、柱状式工法を完成させた。Hooverダム建設の30年後、1973年にACI207委員会が「Effect of Restraint, Volume Change and Reinforcement on Cracking of Massive Concrete」²⁻²⁾を示し、温度応力の制御方法についてオーソライズしたとされる。

我が国では、土木学会が昭和6年（1931年）に初めての鉄筋コンクリート標準示方書²⁻³⁾を表し、この中の「第15章 荷重および温度変化 第69条温度変化および硬化収縮」で、「硬化収縮を考慮する必要がある場合には、これを温度降下量で15℃相当の影響を仮定すること」を規定している。さらに、普通の構造物のコンクリート部材では、最初の1年間に1mにつき、0.2～0.3mm程度の収縮が実験的に確認されているとし、これらの温度収縮が拘束されることにより応力が発生することに留意するように解説している。また、この0.2～0.3mm程度の収縮量を鉄筋比1%のコンクリート断面で温度降下量を逆算すると、25℃程度になるが、環境条件によっても相違することから、ドイツの標準示方書で温度降下量を15℃相当としている規定にならったことが示されている。残念ながら当時のドイツの示方書の規定が調査できていないが、米国での現状を考えても、我が国で1931年の時点でコンクリートの硬化収縮に関する規定を設けていたことは、世界的に見ても先進的なものであったことは間違い無いであろう。ただ

し、硬化収縮に関する留意規定であり、マスコンクリートの概念での留意規定では無かった。

第六十九條 溫度變化及硬化收縮

(2) 硬化収縮の影響を考慮する必要がある場合には、之を溫度低下 15°C に相當する影響あるものと假定すべし。

(2) に就て

コンクリートは空氣中で硬化する時收縮するものであつて、普通の構造物に於けるコンクリート部材の状態に於ては、實驗の結果に依ると、最初の一年間に1mにつき0.2mm乃至0.4mm位、平均0.3mm位の收縮をなすものと考へることが出来る。之がために、鐵筋コンクリート部材の鐵筋には壓應力、コンクリートには張應力を生ずる。之が鐵筋コンクリート部材の固有初應力と稱せられるものであつて、此の固有初應力の爲めに、部材は變形を生ずる。若し、鐵筋コンクリート部材が(例へば單桁の様な靜定構造)自由に此の變形をなしうるものであれば、構造物全體として、固有初應力の爲めに應力を生ずることがない。然し、若し部材が自由に變形をなし得ざる様に他の部材と結合されて居る不靜定構造の一部である様な場合には、部材が自由に變形をなし得ざるために、構造物全體に應力を生ずるものである。之を固有初應力と區別して、構造物全體としての初應力と稱する。

本項は、構造物全體としての此の初應力を計算する場合に適用されるものである。不靜定構造に於ける此の初應力は、固有初應力による鐵筋コンクリート部材の變形を、溫度の變化に依る變形に換算し、構造物が之丈の溫度の變化を受けたものとして其の構造物全體として生ずる應力を計算するのが一般のやり方である。

固有初應力に依る部材の變形は、鐵筋全斷面の重心がコンクリート斷面の重心と合致する時は、部材の軸方向のみに於て起るが、然らざる時には部材の軸方向の變形の外に、彎曲を生ずる。軸方向の變形は、部材が全體として ϵ_0 なる溫度變化を受ける時に相當し、彎曲變形は部材の上下側にて $\Delta\epsilon$ なる溫度の差を有する等變の溫度變化を受ける場合に相當する。

コンクリートの硬化中に生ずる收縮を長さ1mにつき0.3mmとし、鐵筋量がコンクリート斷面の1%乃至1.5%位の時について計算してみると、 ϵ_0 は 25°C 位、 $\Delta\epsilon$ は鐵筋の配置によつて零乃至 15°C 位に相當する。

然し、以上の計算は相當の假定を含むもので、實際に於ては種々の事情の爲めに、斯くの如き溫度變化に相當する變形が生ずるものではない様である。それで獨逸の標準示方書にも ϵ_0 を溫度低下 15°C に取ることに規定してあるから、本示方書も之に倣つたのである。不靜定構造物に於ては、 $\Delta\epsilon$ の影響を小ならしめるために、鐵筋總斷面積の重心を成可くコンクリート斷面の重心に合致する様に設計するが、さうすると $\Delta\epsilon$ は零に近くなる。本示方書には $\Delta\epsilon$ についての標準が示してないから、設計者の判斷により適當に決定する必要がある。

図 2.1-1 昭和6年土木学会コンクリート標準示方書解説抜粋²⁻³⁾

昭和6年(1931年)に画期的な硬化収縮の規定がなされた土木学会のコンクリート標準示方書は、2017年3月の現在に至るまでに、表2.1-1に示すとおり全18回改訂されている。この中で、硬化収縮やマスコンクリート、温度ひび割れに関連する記述に大きな改訂があったのは、表2.1-1に青いハッチで示すとおり、昭和24年版(1949年)、昭和49年版(1974年)、昭和61年制定版(1986年)、平成8年制定版(1996年)、平成11年版(1999年)、2012年制定版(2013年)の6回と考えられる。

この6回の示方書の改訂のうち、本2.1節では、現在の照査方法の根幹となる、ひび割れ指数(後には安全係数)とひび割れ発生確率の関係を示す図(以降、ひび割れ発生確率図と呼ぶ)を使用するに至る昭和61年制定版までの、硬化収縮やマスコンクリート、温度ひび割れに関する記述の変遷を整理する。

表 2.1-1 土木学会編コンクリート標準示方書の改訂履歴

版	年月	示方書	概要
1	1931年9月	鉄筋コンクリート標準示方書	硬化収縮の留意規定
2	1936年10月	昭和11年土木学会鉄筋コンクリート標準示方書	
3	1940年3月	昭和15年土木学会 鉄筋コンクリート標準示方書	
4	1949年7月	昭和24年土木学会制定 コンクリート標準示方書	硬化収縮の規定を削除
5	1951年6月	昭和24年土木学会制定 コンクリート標準示方書(昭和26年版)	
6	1956年11月	昭和31年土木学会制定 コンクリート標準示方書	
7	1958年11月	昭和31年土木学会制定 コンクリート標準示方書(昭和33年版)	
8	1967年3月	土木学会制定 コンクリート標準示方書【昭和42年版】	
9	1974年9月	昭和49年度版 コンクリート標準示方書	マスコンクリートの留意規定
10	1977年3月	昭和49年制定 コンクリート標準示方書【昭和52年版】	S49年版の微修正: マスコンクリートの対象拡大
11	1980年4月	昭和49年制定 コンクリート標準示方書【昭和55年版】	
12	1986年10月	昭和61年制定 コンクリート標準示方書【施工編】	温度ひび割れ発生確率図による照査法
13	1991年9月	平成3年版 コンクリート標準示方書【施工編】	S61年版の微修正: 温度ひび割れ指数の定義
14	1996年3月	平成8年制定 コンクリート標準示方書【施工編】	温度ひび割れ発生確率図を変更 引張強度を割裂引張強度の0.8倍に変更
15	2000年1月	平成11年版 コンクリート標準示方書 -耐久性照査型-【施工編】	H8年版の修正 温度ひび割れ発生確率図を変更 引張強度を割裂引張強度に変更
16	2002年3月	2002年制定 コンクリート標準示方書【施工編】	
17	2008年3月	2007年制定 コンクリート標準示方書【設計編】	初期ひび割れとして設計編で扱う
18	2013年3月	2012年制定 コンクリート標準示方書【設計編】	温度ひび割れ発生確率図を3次元FEM用に追加変更

*水色ハッチはマスコンクリートに関する規定の大幅改訂

昭和6年に初めて制定されたコンクリート標準示方書は、その18年後の昭和24年版(1949年)において、硬化収縮の規定が削除される改訂がなされる²⁻⁴⁾。その間、昭和11年(1936年)、昭和15年(1940年)の2回の示方書改訂では、硬化収縮についての規定は昭和6年(1931年)のまま変更されなかった。この昭和24年(1949年)の改訂では、それまでの鉄筋コンクリート標準示方書から体系を大幅に見直し、①無筋コンクリート、②鉄筋コンクリート、③コンクリート道路、④重力ダムコンクリートの4編構成のコンクリート標準示方書とした。この改訂では、無筋と鉄筋コンクリート編の「16章荷重 94条温度変化」が規定されているものの、硬化収縮についての規定ではなくっている。「(1)ラーメン、アーチ、

等の不静定構造物の設計では温度応力を考えなければならない」とし、解説には、「普通の建物では温度応力を考えないのが普通であるが、不静定構造物では一般に温度応力が大きいからこれを考える」とあるが、次の条文で「温度変化の範囲を地方的状況に応じてこれを定める」としている。このこと等から、この条文を、これまで規定されていた「硬化収縮」についての規定と読むことは困難で、外気温度のようなコンクリート外部からの温度変化に対する留意規定と考えられる。つまり、「硬化収縮」の留意規定が無くなってしまったものと考えられる。

94条 温度変化

(1) ラーメン、アーチ、等の不静定構造物の設計では、温度応力を考えなければならない。

(2) 温度応力は一般は、構造物に様な温度の昇降があるものとして計算する。

煙突のような構造物では、特に温度の部分的変化の影響を考えなければならない。

(3) 設計に用いる温度変化の範囲は、地方的状況に応じて、これを定める。

普通の場合、温度の昇降はそれぞれ 15°C を標準とする。

断面の最小寸法が 70cm 以上である場合は、前記の標準を 10°C としてよい。箱形断面のような中空断面の最小寸法としては、完全に囲まれていて外気に接しない内空部分の寸法を差し引かなくてもよい。

(4) コンクリートおよび鉄筋の膨脹係数は 1°C について $10/1000000$ とする。

【解説】 (1) について 普通の建物では温度応力を考えないのが普通であるが、土木に用いられる、ラーメン、アーチ、等の不静定構造物では、一般に温度応力が大きいから、これを考えなければならないのである。

(2) について 実際の構造物では部材の内部と外面とで温度差があるが、これを考えて設計計算をすることは面倒であるし、また正確に計算することもむずかしいので、設計計算では、一般に構造物に様な温度の昇降があるものと仮定するのである。しかし、煙突、高温の流体をいれるタンク、等では部材の内面と外面との温度差が大きくなるから、温度の部分的変化の影響を考えなければならないのである。

(3) について 構造物にたいして温度変化の影響を考える必要がある場合に、どの位の温度変化を考えるのが適当であるかは、地方的状況、コンクリート施工の時期、構造物の断面寸法または被覆、等によるので、各個の場合について設計者が判定しなければならない事柄である。

ここに示した $\pm 15^{\circ}\text{C}$ という標準の値は、最低月平均気温と最高月平均気温との差を 30°C とし、それらの平均を基準に温度が上下すると仮定した場合に相当する値である。

一般に、最高、最低の気温の差は北方ほど、また内陸ほど、大きくなるもので、わが国では、設計計算に用いる温度の昇降を $\pm 15^{\circ}\text{C}$ にとれば普通の場所では、十分安全であるが、北海道の内陸その他ではこの値を $\pm 20^{\circ}\text{C}$ にとるのがよい。

しかし、設計計算に用いる温度変化の範囲を定めるときには、単に外気の温度変化の範囲を考えるだけではなく、施工時の気温、部材断面寸法または被覆、等も加味して考えなければならない。一般の場合、施工時の気温をあらかじめ定めることは困難であり、また長年のうちには、コンクリートの温度応力は年平均気温を基準として上下に変化すると考えればよいようになるので、施工時の気温について特に考える必要はないが、ただ特に酷暑が長期にわたるような場合に施工するときは、収縮の影響が大きいから温度降下を $5\sim 10^{\circ}\text{C}$ 増すのが安全である。

アーチ、リブ、屋根版、擁壁、等で特に厚さが $30\sim 40\text{cm}$ よりも小さい場合で被覆を施していないときには、 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 増すのが安全である。これに反して被覆の厚い場合であるとか、この条に規定してあるように断面寸法が 70cm より大きい場合には $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 減らしてもよい。また、安全に水中または地中にあつて温度応力が小さいとみなされる場合には温度応力を全然考えなくともよいのである。

(4) について この値は従来一般にみとめられている値で、空中における場合にも水中における場合にも適用できる値である。

図 2.1-2 昭和 24 年土木学会鉄筋コンクリート標準示方書解説抜粋²⁻⁴⁾

序に示されているように、わずか数ヶ月で改訂案をまとめたからか、未だあまり大型のマスコンクリートの構造物も少なく、温度応力が問題となるような事が少なかったためであると考えられる。「硬化

収縮」の代わりに「乾燥収縮」が規定されていることから「硬化収縮」があまり留意されていなかったと想定される。

一方、初めて示されたダム編では、打込み高さを 1.5m 以下、ブロック長を 15m 以下とする等、温度収縮によるひび割れ抑制のための留意規定が示されている。これらは、未だ経験則から規定されたものであったが、温度ひび割れの留意に関する概念は、唯一ここで引き継がれることとなった。ダム編に関してはこの後、温度規制、パイプクリーニング、プレクリーニング等が規定されることとなるが、一般のマスコンクリートとは全く別の体系となっていく。ひび割れ発生確率図を用いるような照査体系は現在でも採用しておらず、独自の体系をとり、ダム毎に個別の性能照査的な対応がとられるようになっていく。このため、ダム編についての詳細については、以降ここでは特に扱わない。

41条 1区画の大きさ

1区画の辺の長さは 15m を標準とする。

【解 説】 ダム全体を打継目なしのコンクリートで造ればコンクリートの収縮によつて各所にひびわれができるおそれがある。ダム軸方向の収縮にたいしては、ダム軸に直角の収縮継目を設けて、ダム軸に直角な方向の収縮にたいしては、ダム軸に平行な区画割りにコンクリートを打つて熱の発散を促進し、ひびわれのできるのを防ぐのである。

従来経験によると、1区画の大きさを 15m 位にすれば満足な結果がえられ、外国でもこの程度を標準としているのでこのように定めたのである。

なお、ダムの両岸えの取付部では、ひびは鉛直よりも岸の斜面に直角の方向にでる傾向があるから、この部分では、間隔を小さくするのが適当である。

42条 1リフトの高さおよび打上がりの速度

(1) 1リフトの高さは、0.75m 以上 1.5m 以下とする。

(2) 岩盤上に打ち込む1リフトの高さは 0.75m を標準とする。

(3) 岩盤上または材令 30 日以上コンクリートに打ち継ぐときは、0.75m のリフトを数リフト打つがよい。

(4) 旧コンクリートの材令が、0.75m リフトの場合3日、1.5m リフトの場合5日、に達した後でなければ新コンクリートを打ち継いではならない。

(5) コンクリートの打ち上がり速度は5日につき 1.5m をこえてはならない。

【解 説】 (1) について 1区画における1リフトは、余り厚くすると、コンクリートの硬化熱の発散が十分に行われないので、ひびわれの危険が多くなり、また、型わくについて不便もある。余り薄くすると、水平打継目の数が多くなり、打継目の表面処理費が大きくなる。上記のことを考えて、1リフトの高さの標準を 0.75~1.5m としたのである。

(2)(3) について 岩盤、または、材令 30 日以上コンクリートの上に余り厚いコンクリートを打ち込むと、岩盤または旧コンクリートと新しいコンクリートとの温度差が大きくなって、ひびわれができるおそれがある、だから、リフトを小さくし、温度差を少なくするため1リフトを 0.75m としたのである。

(4)(5) について コンクリートの打込み速度を速くすると硬化熱の発散割合が小さくなり、温度上昇が大きくなって、ひびわれのでるおそれが多くなる。このため打込み速度の制限が必要になるのである。この条では従来一般に適当とされている打込み速度を規定したものである。

図 2.1-3 昭和 24 年土木学会 重量ダムコンクリート標準示方書解説 抜粋²⁻⁴⁾

硬化収縮に関する記述は、この 25 年後の昭和 49 年（1974 年）の改訂で、初めてマスコンクリート

の規定がなされるまで、何も無くなってしまったと言える。

昭和49年度版(1974年)²⁻⁵⁾においてマスコンクリートの章が新設された。ここでは、部材厚さが1m以上のものをマスコンクリートの目安とし、これらにおいては温度上昇、ひび割れ防止が重要であることを指摘し、構造上差支えない場合は継手を設けることや打込み温度を25℃以下とすること等を規定している。さらに、単位セメント量が10kg/m³増減すると、マスコンクリートの内部温度は1℃増減するとして、単位セメント量をできるだけ少なくすることを規定している。

20 章 マスコンクリート

159 条 総 則

マス コンクリートの施工は、打込み後の温度上昇が なるべく少なくなるようにし、ひびわれを生じないようにしなければならない。

【解 説】 最近、土木構造物の規模が大型化するのに伴いダム以外の工事でもマスコンクリートを施工する場合が増加している。マスコンクリートの施工方法はダムとそれ以外の場合とで同一にできない点が多いので、特にこの章を設けたのである。

この章は、ダム以外のコンクリート工事で、セメントの水和熱による温度上昇が大きく、このため ひびわれ を発生しやすい場合に、施工上注意すべき点を示すものである。このような工事の例をあげると、スパンの長い橋梁の橋台、橋脚等の下部構造物、擁壁、箱型ラーメン、トンネルライニング等の地下構造物、原子力炉関係の構造物、断面の大きなプレストレスト コンクリート構造物、各種生産施設の基礎、水門、浄水池、配水池 等の水理構造物、厚い舗装版などがある。

これらの工事で、マスコンクリートとして扱う寸法の限度を一律に定めることは困難であるが、断面厚が1m以上である構造物は、マスコンクリートとして施工方法を検討しなければならない。

マスコンクリートの施工において、ひびわれの発生をできるだけ防止するには、セメントおよびその他の材料の選定 ならびに配合の決定にあたって、水和熱による温度上昇が少なくなるように配慮し、不利な温度変化が生じないように打込み および 養生の方法に注意することが大切であり、また、設計においても、工程の各段階で不利な温度応力が生じないように配慮し、大きな温度応力を生じるおそれのある箇所には鉄筋を配置することなども必要である。

このように、水和熱による ひびわれ を防止する方法の基本は、ダムコンクリートの場合と同じである。しかし、先にあげた各種の構造物は、コンクリートダムと形状や規模が異なり、運搬、打込み、締固め、養生等の方法もダムと同じにはできない場合が多い。また、大粒の粗骨材を使用することや、スランプの小さいコンクリートを採用するのが困難な場合が多く、長期強度の発現を期待できない場合も少なくないので、単位セメント量の削減にも限度がある。そこでマスコンクリートの施工にあたっては、ダムコンクリートの施工方法を十分に参考にすると同時に、その工事に固有の条件をよく検討し、ひびわれをできるだけ防止しなければならない。

このほか、マスコンクリートではコンクリートの打込み量が大きくなるので、これに対処して打込み作業が円滑に行なわれるように考慮することも必要である。

図 2.1-4 昭和49年度版コンクリート標準示方書解説抜粋 (1) ²⁻⁵⁾

160 条 単位セメント量

単位セメント量は、所要のワーカビリティおよび強度が得られる範囲内で、できるだけ少なくなるようこれを定めなければならない。

【解 説】 セメントの水和熱に基づくコンクリートの硬化時の発熱量は単位セメント量に比例するので、単位セメント量をできるだけ少なくするのが温度上昇の減少に有利である。マスコンクリートの内部における温度上昇は単位セメント量 10 kg/m^3 の増減に応じて、約 1°C の割合で増減する。

単位セメント量を少なくするためには、打込み作業に支障をきたさない範囲でスランプを小さくし、粗骨材の最大寸法を大きくするのがよい。良質な減水剤や混和材などを使用して有利な結果が得られることも多い。また、荷重が作用するまでの養生期間が長い場合には、28 日より長い材令を設計基準強度の材令とすれば、単位セメント量をかなり削減することができる。このような場合には、一般に、中庸熱ポルトランドセメントや混合セメントなど、長期強度の増進が大きいセメントを使用するのが有利である。早強ポルトランドセメントをマスコンクリートに用いるのは一般に好ましくない。

161 条 継 目

継目の位置および構造は、1 回に打込むコンクリート量および ひびわれ発生その他を考慮して定めなければならない。

【解 説】 マスコンクリートでは、大量のコンクリートを区画に分割して打込むので、構造物に継目を設けなければならない場合が多い。継目の位置および構造は、温度上昇による ひびわれを抑制するのに大きな影響があるので、その設計および施工にあたっては、特に注意する必要がある（131 条 および ダムコンクリート標準示方書 8 章 参照）。

162 条 コンクリート打ち

（1） 打込み時のコンクリート温度が 25°C 以上になるおそれのあるときは、適当な処置をとらなければならない。

（2） コンクリートを 1 回に打込む区画の大きさ および新しいコンクリートを打継ぐ時期は十分に注意して定めなければならない。

【解 説】 （1） について 打込み時のコンクリートの温度が高いほど温度上昇が増し、最高上昇温度と最終安定温度との温度差が大きくなって、ひびわれ発生の危険が増大する。そこで、打込み時のコンクリート温度は 25°C 以下 となるようにするのが望ましい。やむをえず 25°C 以上のコンクリートを打込む場合には、パイプクーリングなどの方

図 2.1-5 昭和 49 年度版コンクリート標準示方書解説抜粋 (2) ²⁻⁵⁾

法により温度上昇を少なくすることが必要である。

(2) について マスコンクリートでは1回に打込むコンクリートの量が多くなるので、コンクリートの製造、運搬および打込みの能力をよく検討し、大量のコンクリートが円滑に打込めるようにしなければならない。打込み作業を長時間継続する必要がある場合には、締固め作業が支障なく行なえるように、凝結遅延剤を使用するのがよい。

1回に打込む区画の大きさおよび新しいコンクリートを打継ぐ時期は、ひびわれの発生に影響を及ぼすので、ダムコンクリートの施工方法に関する条項を参考にして定めるのがよい。

163 条 養 生

コンクリートは打込み後、表面に急激な温度変化ならびに乾燥が起こらないように、これを保護しなければならない。

【解 説】 マスコンクリートでは打込み後、かなりの大きさの温度上昇と、これに続いて温度降下が生じるのを避けることができない。表面の温度降下が急激であるほどひびわれが生じやすくなるので、養生にあたってはできるだけゆるやかに温度降下が起こるように注意するのが望ましい。また、マスコンクリートの表面が早く乾燥することもひびわれの原因となるので、局所的な急冷が起こらないようにして散水する方法により、所定の養生期間、湿潤状態に保たなければならない。

図 2.1-6 昭和 49 年度版コンクリート標準示方書解説抜粋 (3) ²⁻⁵⁾

1974 年当時、1970 年にトヨタ自動車がデミング賞を受賞して Total Quality Control(TQC)の重要性が日本で認識されると、ゼネコン各社でも一斉にデミング賞受賞に向けて、品質と施工との定量的関連性の把握のために膨大なデータ収集が行われるようになっていた。その品質としてコンクリートのひび割れ、特にマスコンクリートのひび割れ制御がゼネコン各社で着目されるようになった。このような社会情勢も、1974 年にマスコンクリートの章が新設される契機となった理由であろう。

その後、昭和 52 年 (1977 年) 改訂版 ²⁻⁶⁾においては、マスコンクリートの対象を拡大する趣旨の改訂が行われ、「部材厚さが 1m 以上のものをマスコンクリート」という記述が削除されることになった。

20 章 マスコンクリート

159 条 総 則

マスコンクリートの施工は、打込み後の温度上昇がなるべく少なくなるようにし、ひびわれを生じないようにしなければならない。

【解 説】 最近、土木構造物の規模が大型化するのに伴いダム以外の工事でもマスコンクリートを施工する場合が増加している。マスコンクリートの施工方法はダムとそれ以外の場合とで同一にできない点が多いので、特にこの章を設けたのである。

この章は、ダム以外のコンクリート工事で、セメントの水和熱による温度上昇が大きく、このため ひびわれ を発生しやすい場合に、施工上注意すべき点を示すものである。スパンの長い橋梁の橋台、橋脚等の下部構造物、断面の大きな箱型ラーメン、各種工場施設の基礎等でコンクリート部材断面が大きい場合にはひびわれを生じやすいので、マスコンクリートとして施工方法を検討しなければならない。

マスコンクリートの施工において、ひびわれの発生をできるだけ防止するには、セメントおよび その他の材料の選定 ならびに配合の決定にあたって、水和熱による温度上昇が少なくなるように配慮し、不利な温度変化が生じないように打込み および 養生の方法に注意することが大切であり、また、設計においても、工程の各段階で不利な温度応力が生じないように配慮し、大きな温度応力を生じるおそれのある箇所には鉄筋を配置することなども必要である。

このように、水和熱による ひびわれ を防止する方法の基本は、ダムコンクリートの場合と同じである。しかし、上に示したような各種の構造物は、コンクリートダムと形状や規模が異なり、運搬、打込み、締固め、養生等の方法もダムと同じにはできない場合が多い。また、大粒の粗骨材を使用することや、スランプの小さいコンクリートを採用するのが困難な場合が多く、長期強度の発現を期待できない場合も少なくないので、単位セメント量の削減にも限度がある。そこでマスコンクリートの施工にあたっては、ダムコンクリートの施工方法を十分に参考にすると同時に、その工事に固有の条件をよく検討し、ひびわれをできるだけ防止しなければならない。

このほか、マスコンクリートではコンクリートの打込み量が大きくなるので、これに対処して打込み作業が円滑に行なわれるように考慮することも必要である。

図 2.1-7 昭和 49 年制定 土木学会コンクリート標準示方書解説（昭和 52 年版）抜粋²⁻⁶⁾

その次の昭和 55 年版（1980 年）で改訂はされず、次の昭和 61 年（1986 年）制定版で、現在のひび割れ照査法の基礎体系となる、ひび割れ発生確率図を利用する方法に大改訂される。昭和 61 年当時、TQC により集積された膨大な施工と品質に関する定量的なデータの相関や要因を分析する時代に入っていた。遡ること 5 年、昭和 56 年（1981 年）には、日本コンクリート工学会（旧工学協会、以降、JCI と呼ぶ）にマスコンクリートの温度応力研究委員会が組織され、温度応力発生メカニズム、応力算定方法について広範に議論がされている。さらに、昭和 58 年（1983 年）には土木学会からコンクリート構造物の限界状態設計法指針（案）が示されることになり、強度等の特性値の考え方や定式化が図られたことで、温度ひび割れを数値的に捉え、解析的に評価するという機運が高まっていた。パソコンの進歩がその解

析的なひび割れ評価をより簡易にした。さらに、ダム以外、大断面富配合のコンクリート構造物、例えば LNG タンクや発電所の底版、原子力施設の燃料ピット、大断面橋脚、橋桁等温度ひび割れが発生しやすく、かつひび割れの補修を余儀なくされる重要構造物が増えてくるようになっていた。

このような背景もあり、温度ひび割れに関する研究は、図 2.1-8²⁻⁷⁾のように昭和 49 年から昭和 60 年まで右肩上がりに増加し、昭和 61 年 3 月に JCI が刊行したマスコンクリートのひび割れ制御指針の基礎研究となった。このひび割れ制御指針では、未だひび割れ発生確率図は示されていなかったものの、ひび割れ指数が定義され、コンクリートの熱特性、力学特性が提示、温度応力算定方法が体系化されるに至った。

これらの研究成果を踏まえ、前述のとおり昭和 61 年 10 月に示方書がひび割れ発生確率図を用いたひび割れ照査体系に大改訂された。温度ひび割れ指数を算出すれば、ひび割れ発生確率を一義的に決定できるようになったことで、ひび割れ制御方法の相対的比較や制御効果の評価が可能となった。このひび割れ発生確率図を用いた照査方法が、2017 年現在においても基本的に用いられている。ひび割れを制御した品質の良い構造物の構築に著しい貢献を果たした照査方法であったと評価できる。

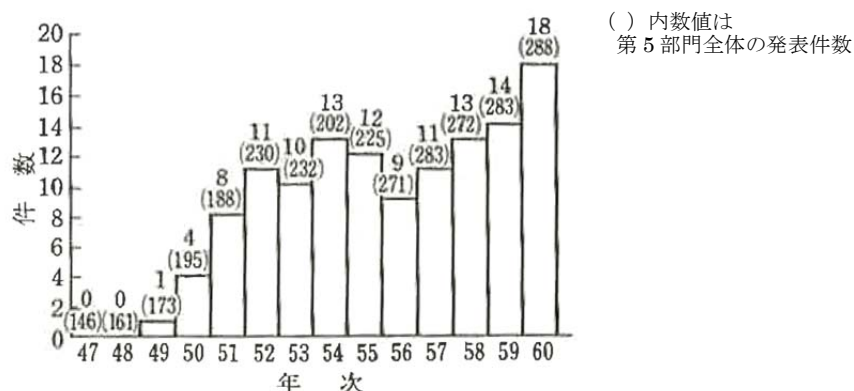


図 2.1-8 土木学会年次講演会におけるマスコンクリート温度応力関係の発表件数²⁻⁷⁾

2.2 ひび割れ発生確率図の変遷

2.2.1 ひび割れ発生確率図の成立

昭和 61 年制定版コンクリート標準示方書における，初めてのひび割れ発生確率図²⁻⁸⁾を図 2.2-1 に示す．図 2.2-1 は，ひび割れ指数を算出することでひび割れ発生確率を評価するもので，昭和 61 年以降現在に至るまで利用されるひび割れ照査方法の原形である．この場合の温度ひび割れ指数は，(2.2-1)式のとおり求められ，一種の安全指数の意味を持ち，指数が大きいほど温度ひび割れに対して安全となるように定めていると説明されている．

$$\text{温度ひび割れ指数} = f_t / \sigma_r \quad (2.2-1)$$

ここで， σ_r ：水和熱に起因して生じた部材内の温度応力の最大値

f_t ： σ_r を算定した時刻におけるコンクリートの引張強度で材齢および養生温度を考慮して決める

温度ひび割れ指数は材齢によって変化するので一番小さくなる値を材齢を変化させて求めなければならない

さらに，内部拘束が卓越する場合

$$\text{温度ひび割れ指数} = 15 / \Delta T_i$$

ここに， ΔT_i ：最高温度時の内外温度差

外部拘束が卓越する場合

$$\text{温度ひび割れ指数} = 10 / R \Delta T_0$$

ここに， R ：外部拘束度 (≥ 0.4)

ΔT_0 ：部材平均最高温度と外気温平行時温度との差

として，簡易的に求める方法も示されている．

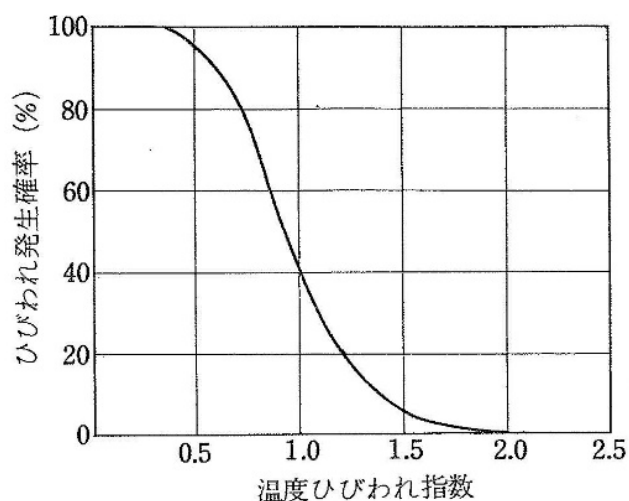


図 2.2-1 昭和 61 年制定版のひび割れ発生確率²⁻⁸⁾

図 2.2-1 は，森本ら²⁻⁹⁾による FEM を用いたひび割れ指数とひび割れ発生確率を比較した 26 例の結果と (図 2.2-2 参照)，大崎ら²⁻¹⁰⁾のひび割れ発生有無に関する調査結果 150 件 (図 2.2-3 参照)，吉岡等

2-11)の同調査結果 56 件 (図 2.2-4～図 2.2-6 参照) を合わせて、それぞれが個別の方法で算出したひび割れ指数相当の値との関係から設定された。それぞれ別々の方法で算出したひび割れ指数を同一の横軸として確率分布を評価するという整理ではあったものの、温度ひび割れ指数を算出すれば、ひび割れ発生確率を一義的に決定できるようになったことで、ひび割れ制御方法の相対的比較や制御効果の評価が可能となった。

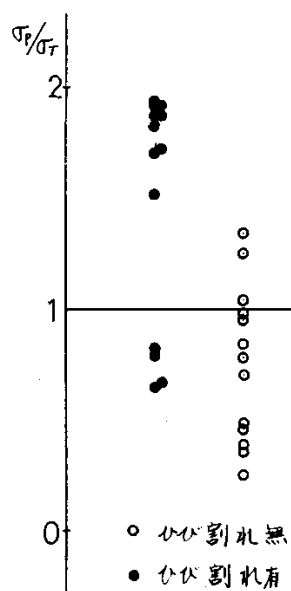


図 2.2-2 森本らによる指数とひび割れ有無²⁻⁹⁾

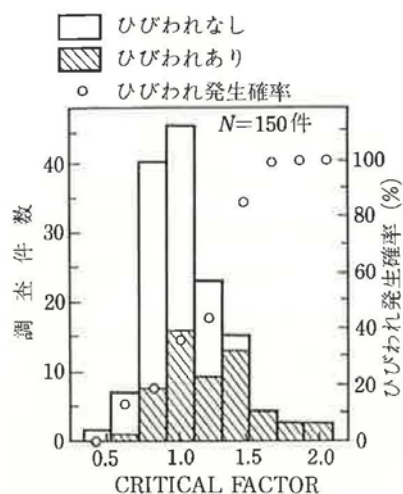
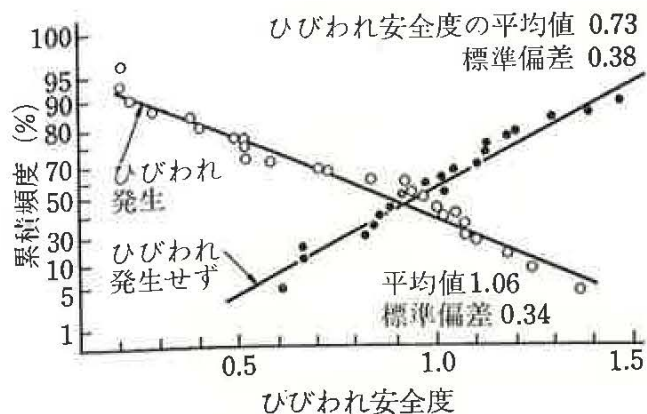
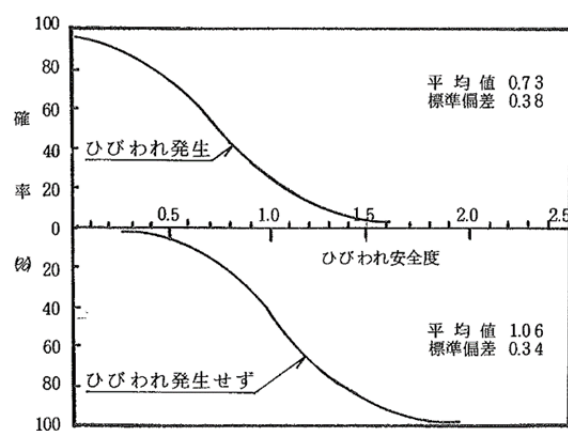
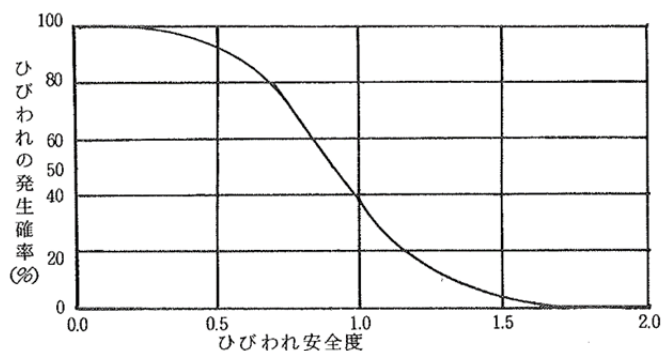


図 D-1.4 大崎による C.F. とひびわれ発生確率⁴⁾

大崎の C.F. (Critical Factor) は本示方書のひびわれ指数の逆数であることに注意されたい

図 2.2-3 大崎による C.F (Critical Factor : ひび割れ指数の逆数) とひび割れ発生確率²⁻¹⁰⁾

図 2.2-4 吉岡によるひび割れ安全度(ひび割れ指数と同意)とひび割れ発生確率²⁻¹¹⁾図 2.2-5 吉岡によるひび割れ安全度(ひび割れ指数と同意)とひび割れ発生確率²⁻¹¹⁾図 2.2-6 吉岡によるひび割れ安全度(ひび割れ指数と同意)とひび割れ発生確率²⁻¹¹⁾

前項のとおり，昭和 61 年制定版コンクリート標準示方書において，初めてひび割れ発生確率図が示されたが，それ以降現在までひび割れ発生確率図は，数回の見直し改訂が実施されてきた．ここではこのひび割れ発生確率図の改訂を中心に，ひび割れ照査方法の変遷を示す．

なお，コンクリート標準示方書の「版」の記載方法については，原著に「〇年制定版」と「〇年版」との両方があるため，ここでは，原著の記載方法のまま記載することとした．

2.2.2 平成3年（1991年）版

平成3年（1991年）版²⁻¹²⁾では、制御目標値が変更され、クリープの補完方法が追記される改正が行われたものの、ひび割れ発生確率図の見直しは行われなかった。

2.2.3 平成8年（1996年）制定版

平成8年制定版²⁻¹³⁾では、ひび割れ発生確率図に用いる新たな全てのデータについて、有限要素法による温度解析、CP法による応力解析を、示方書に示される入力パラメータで実施し、図 2.2-7²⁻¹³⁾に示されるひび割れ発生確率図に改訂された。ここでは、ひび割れ指数を算出するための引張強度を構造体の引張強度として、試験により得られた値を2割程度低減して用いることとしている。これは、ひび割れ指数が1.0の場合にひび割れ発生確率が50%となるのが合理的であるのに対して、例えば、図 2.2-8²⁻¹⁴⁾に示すとおり、実構造物では、温度ひび割れ指数が1.27程度でひび割れ発生確率が50%となったため、試験により得られた値を0.8倍すること（すなわち、温度ひび割れ指数1.27を1.0とすることに同義）で構造物内の強度を評価できるとして便宜上取扱うこととした²⁻¹⁵⁾と説明されている。

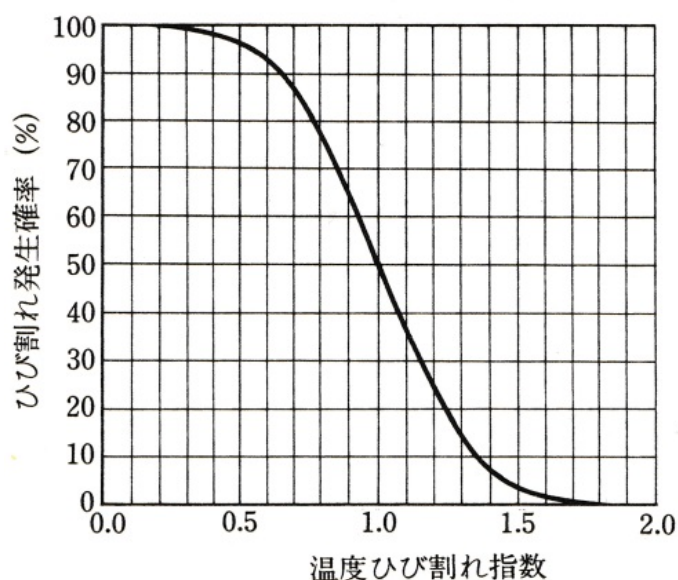


図 2.2-7 平成8年制定版のひび割れ発生確率²⁻¹³⁾

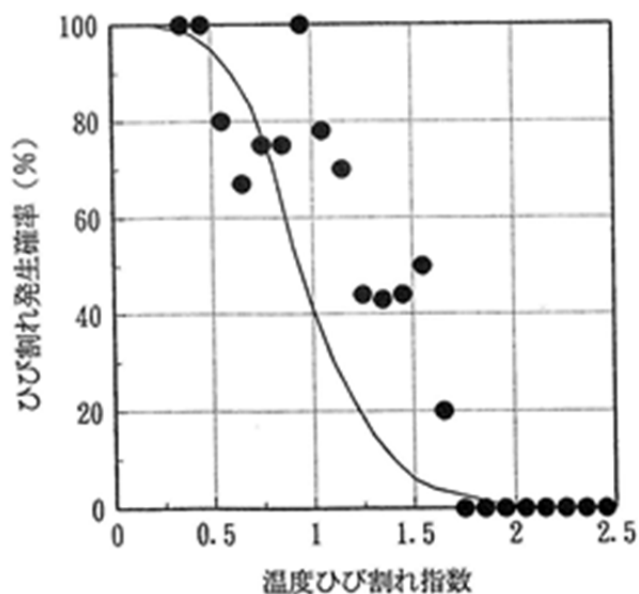


図 2.2-8 マスコンクリート技術の現状と動向のひび割れ発生確率²⁻¹⁴⁾

確率論では当然、ひび割れ指数が 1.0 の場合にひび割れ発生確率が 50%となることから、この整合を図るために、構造物中の引張強度とひび割れ指数に使用される割裂引張強度との差を持ち出すことで、一つの説明を加えたのである。

2.2.4 平成 11 年（1999 年）版

このような事に加えて、さらに、仕様規定型から性能照査型への移行という大きな時代背景から、平成 11 年版では構造物の引張強度を直接利用せずに、引張強度の特性値をひび割れ指数の算出する図 2.2-9²⁻¹⁶⁾に示されるひび割れ発生確率図に改訂されている。

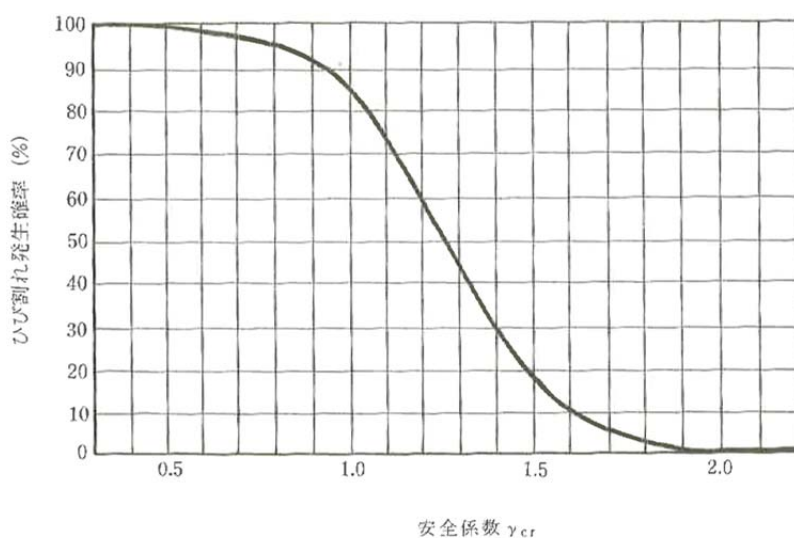


図 2.2-9 平成 11 年版のひび割れ発生確率²⁻¹⁶⁾

平成8年制定版で利用された構造物中の引張強度は、供試体強度である割裂引張強度を、安全係数の一つである材料係数（前項の説明では1.25相当）で低減した強度に相当している。すなわち、性能照査型に移行するために、強度は供試体の試験値から求めるという限界状態設計法における概念を活かし、材料係数を外だしにするため、平成11年版では、構造物中の強度ではなくて、供試体強度とする必要があったものと推察される。

図2.2-9のひび割れ発生確率図は基本的には図2.2-7の横軸を1/0.8倍して曲線を右にシフトしていると説明されている²⁻¹⁷⁾。すなわち、ひび割れ指数の算定に使用する引張強度を割裂引張強度の特性値を0.8倍せずにそのまま利用すれば、平成8年制定版とひび割れ発生確率はほぼ変わらないものとなる。この平成11年版のひび割れ発生確率図が2002年制定版、2007年制定版でそのまま利用され、2012年制定版で改訂されるまで、約13年間利用されることとなる。

2.2.5 2012年制定版

JCIではひび割れ制御指針(1986年)を約20年ぶりに「マスコンクリートのひび割れ制御指針2008²⁻¹⁸⁾」(以降、JCIマスコン指針2008と呼ぶ)として改定し、ここで新たに図2.2-10のひび割れ発生確率図を示した。2012年制定版(H24年)²⁻¹⁹⁾では図2.2-11のとおり、図2.2-10のひび割れ発生確率図をそのまま掲載することとなった。このひび割れ発生確率図の改訂は、パソコン計算能力の飛躍的な向上で3次元有限要素法による温度、応力の解析が一般的に用いられることになった時代の要請に応えたものであることが改訂資料で説明されている²⁻²⁰⁾。新たに65件の実構造物の724の部材について、3次元有限要素法による温度応力解析で算出した最小のひび割れ指数と実際のひび割れ発生確率とをひび割れ指数0.05刻みで整理し、図2.2-12²⁻¹⁸⁾のとおりワイブル分布として回帰した曲線を示した。このひび割れ指数の算定における引張強度は、平成11年版と同様、割裂引張強度であることが明記された。また、従前の正規分布から説明を行っていたが、ワイブル分布に確率モデルを変更した理由として、数学モデルとしての説明性と回帰適合性の高さからと説明されている²⁻¹⁸⁾。回帰式を示し、安全係数からひび割れ発生確率を算定できるようにした。

しかし、ひび割れ指数が1の時のひび割れ発生確率は50%であるが、割裂引張強度を使用してひび割れ指数を算定しており、従来の説明と整合していないように考えられる。

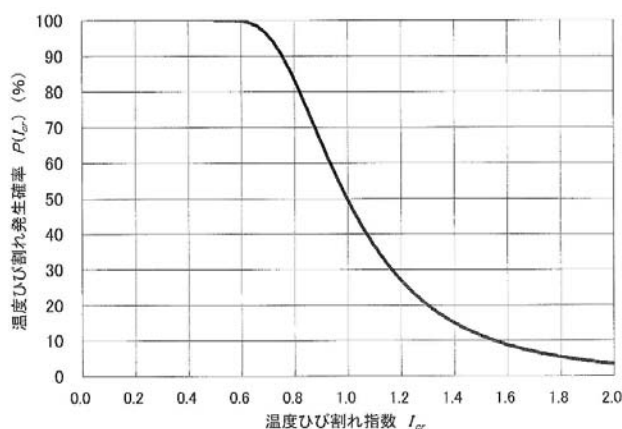
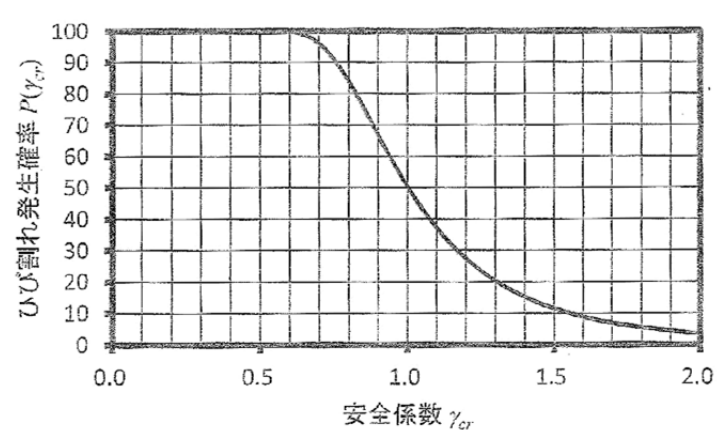
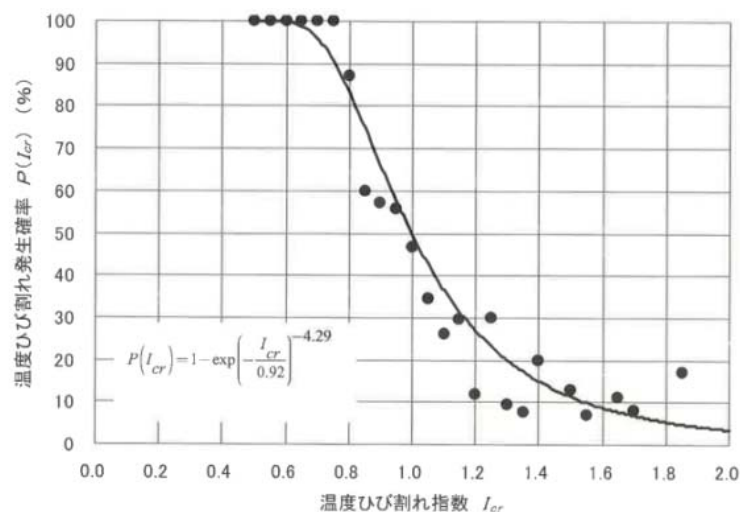


図 2.2-10 温度ひび割れ指数と温度ひび割れ発生確率との関係²⁻¹⁸⁾

図 2.2-11 安全係数とひび割れ発生確率²⁻¹⁹⁾図 2.2-12 ワイブル分布による発生確率の整理²⁻¹⁸⁾

2.2.6 ひび割れ発生確率図の変遷

これまでのひび割れ発生確率図の変遷を図 2.2-13 にまとめる。

ひび割れ発生確率図では、引張強度と引張応力が等しくなる、ひび割れ指数が 1 の時、ひび割れ発生確率は 50% になる（図 2.2-13 の赤丸プロット）という、通常概念に対して、40%、50%、85%、50% というように変更されている。

さらに、ひび割れ発生確率図の変遷に合わせて、温度や応力の解析方法についても、時代と共に高度化、精度向上が図 2.2-13 に示されるとおり図られてきた。

また、ひび割れ指数の算定に用いられる引張強度も、ひび割れ発生確率図の変遷に大きくかかわっている。

これらのひび割れ発生確率図の変遷の大きな特徴については、正確にその意味を、3 章において再度、丁寧に考えていくこととする。

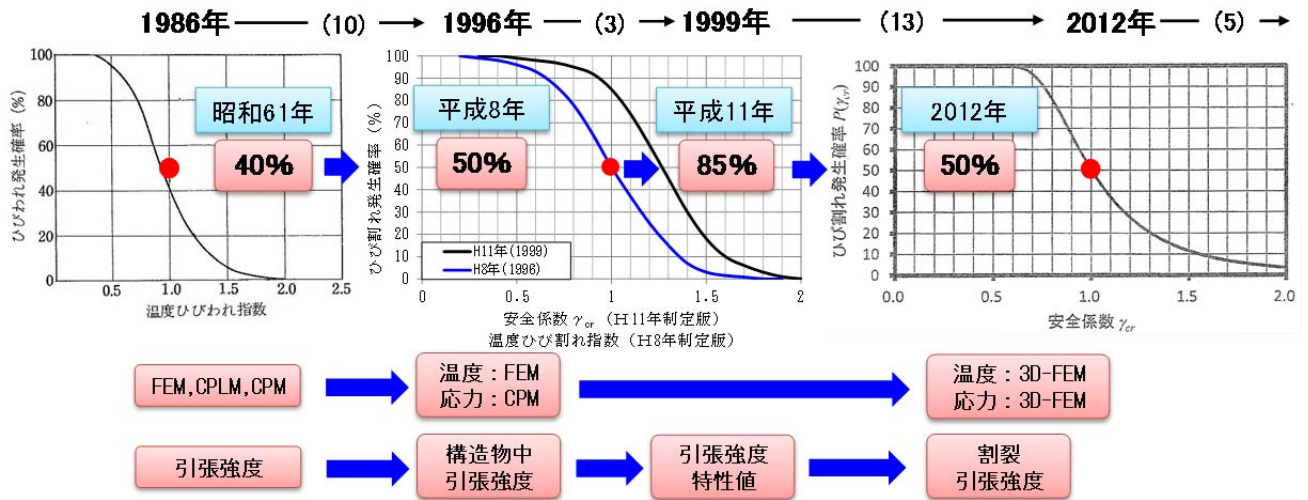


図 2.2-13 ひび割れ照査方法の変遷

2.3 ひび割れ指数と安全係数，制御目標値

昭和 61 年制定版のコンクリート標準示方書では，温度ひび割れの発生の検討を，①実績による評価，②温度ひび割れ指数による評価のいずれかの方法により行うものとしている．この場合の温度ひび割れ指数は，(2.3-1)式のとおり表される．

$$\text{温度ひび割れ指数} = f_t / \sigma_r \quad (2.3-1)$$

ここで， σ_r ：水和熱に起因して生じた部材内の温度応力の最大値

f_t ： σ_r を算定した時刻におけるコンクリートの引張強度で材齢および養生温度を考慮して決める

温度ひび割れ指数は材齢によって変化するので一番小さくなる値を，材齢を変化させて求めなければならない

温度ひび割れ指数は，構造物の重要度，必要な機能，環境条件等に基づいてひび割れ発生確率図を参考に定めるとしているが，一般的な配筋の構造物における標準的な温度ひび割れ指数として以下が示されている．

ひび割れを防止したい場合	1.5 以上
ひび割れの発生を許すがその幅および数を制限したい場合	1.2～1.4
上記以外の場合	0.7～1.1

この場合のひび割れ発生確率をひび割れ発生確率図から読み取ると以下のようになる．

ひび割れを防止したい場合	5%程度以下
ひび割れの発生を許すがその幅および数を制限したい場合	10%～25%程度
上記以外の場合	35%～85%程度

これらの目標値は，昭和 61 年制定版の改訂資料²⁻⁷⁾ではひび割れ発生確率図を設定した研究から決めたものであることを示している．①森本らの研究²⁻⁹⁾によって指数が 1.6 以上になるとひび割れが生じたケースがないようであること，②吉岡らの研究²⁻¹¹⁾でひび割れ指数が 1.5 で数%，1 で約 40%，0.5 で 90% 以上のひび割れ発生確率となること，③大崎らの研究²⁻¹⁰⁾でもひび割れ指数が 1.5 で 10%以下，1 で約 40%，0.5 でほぼ 100%となることを例示している．ひび割れを防止したい場合について，ここでは触れられていないが，限界状態設計法の流れがある中での改訂であり，確率統計論において 95%信頼区間のような形で有意な水準として示される一般的で慣用的な 5%程度以下も念頭においていたと想定される．

次の平成 3 年版では，温度ひび割れ指数の参考値に空白がないように配慮して²⁻²¹⁾，次のとおり改訂されている．昭和 61 年制定版では，例えば，1.4 と 1.5 の間の評価がよく分からなかったためである．

ひび割れを防止したい場合	1.5 以上
ひび割れの発生を制限したい場合	1.2 以上 1.5 未満
有害なひび割れの発生を制限したい場合	0.7 以上 1.2 未満

この場合のひび割れ発生確率をひび割れ発生確率図から読み取ると以下のようになる．

ひび割れを防止したい場合	5%程度以下
ひび割れの発生を制限したい場合	5%程度以上 20%程度未満

有害なひび割れの発生を制限したい場合 20%程度以上 85%程度未満

さらに昭和 61 年制定版では、どのような意味があるのか、よく理解できなかった「上記以外の場合」との文言を修正し、「有害なひび割れの発生を制限したい場合」に修正している。一方で、「ひび割れの発生を許すがその幅および数を制限したい場合」を「ひび割れの発生を制限したい場合」に文言を修正している。こちらの文言の修正については、今度は、「防止」と「発生を制限」の意味の切分けが難しくなったため、後年の改訂でこの文言については、さらに修正されることとなる。

また、有害な温度ひび割れの発生が予測される場合にはそのひび割れ幅に対する適切な制御をおこなわなければならないことが S61 年版にも示されていたが、H3 年版では、さらに具体的に過去の事例から、鉄筋比と温度ひび割れ指数から最大ひび割れ幅を示す図 2.3-12²⁾を例示している。ひび割れ指数と鉄筋比で最大ひび割れ幅が設定できるものである。これにより、有害なひび割れの発生とひび割れ指数、ひび割れ幅の関係性が有る程度イメージが共有できることとなった。

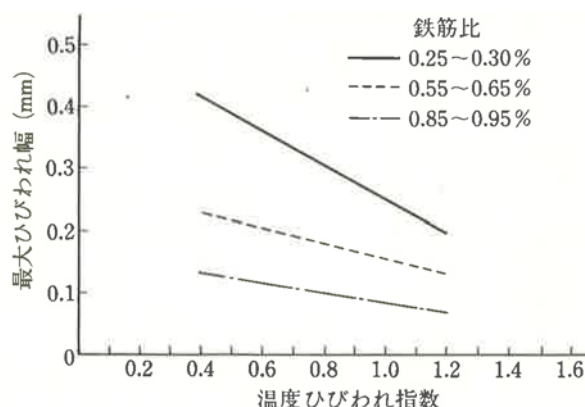


図 2.3-1 H3 年版 温度ひび割れ指数と最大ひび割れ幅²⁻¹²⁾

なお、この時のひび割れ指数の定義は、(2.3-2)式のとおり修正を加えている。

$$\text{温度ひび割れ指数 } I_{cr}(t) = f_t(t) / \sigma_r(t) \quad (2.3-2)$$

ここに、 $\sigma_r(t)$ ：材齢 t 日における水和熱に起因して生じた部材内の温度応力の最大値

$f_t(t)$ ：材齢 t 日におけるコンクリートの引張強度で材齢および養生温度を考慮して求める

(2.4-2)式は、S61 年版における温度ひび割れ指数の算定式と同意であるが、 $I_{cr}(t)$ や $\sigma_r(t)$ 、 $f_t(t)$ のように、これらが材齢 t 日の関数であることを強調する記述としたと改訂資料²⁻²¹⁾に説明されている。

さらに、この温度ひび割れ指数の参考値は、平成 8 年制定版では、ひび割れ発生確率図が改訂されたために、以下のとおり改訂された。

ひび割れを防止したい場合	1.5 以上
ひび割れの発生をできるだけ制限したい場合	1.2 以上
ひび割れの発生を許容するが、ひび割れ幅が過大とならないように制限したい場合	0.7 以上
この場合のひび割れ発生確率をひび割れ発生確率図から読み取ると以下のようになる。	
ひび割れを防止したい場合	5%以下
ひび割れの発生をできるだけ制限したい場合	25%以下
ひび割れの発生を許容するが、ひび割れ幅が過大とならないように制限したい場合	85%以下

この平成8年制定版の改訂では、ひび割れ指数の目標値は、上限を示さずにある数値以上としている。区切りはこれまでと変わらず、3区画 1.5, 1.2, 0.7 でこれらの下限値は従来とおりである。参考値の文言は、「ひび割れの発生を制限したい場合」から「ひび割れの発生をできるだけ制限したい場合」と「有害なひび割れの発生を制限したい場合」から「ひび割れの発生を許容するが、ひび割れ幅が過大とならないように制限したい場合」と変更している。

ひび割れ発生確率図が変更されたものの、ひび割れ指数の目標値に対応する、ひび割れ発生確率はあまり変わっていない。このことから、この時の改訂で実務上の混乱はあまり起こらなかった。

温度ひび割れ指数と最大ひび割れ幅の関係図については、温度ひび割れ指数の見直しに伴って、ひび割れ幅との関係を図 2.3-2 に示すように修正したとしている。H3 年版よりも直線の傾きが大きくなっており、ひび割れ指数の変化に対してひび割れ幅が大きく変化する事になった。

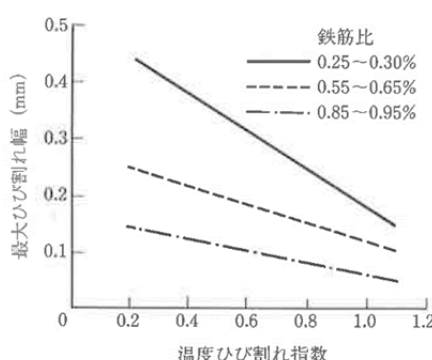


図 2.3-2 平成 8 年制定版 温度ひび割れ指数と最大ひび割れ幅²⁻¹³⁾

しかし、次の平成 11 年版では、前述のとおり割裂引張強度をそのまま利用することで、ひび割れ発生確率図を大幅に変更し、横軸を温度ひび割れ指数から安全係数としたことで、その目標値も大きく変わることになった。さらに、「マスコンクリート章における温度ひび割れの発生の検討」から、「施工段階におけるひび割れ照査」として新たに章構成を変えて、性能照査型の記述に修正されている。

このため条文から、「(1) セメントの水和に起因するひび割れに関する照査は、温度解析によって算定される温度分布に基づく体積変化と自己収縮による体積変化を求め、これらを取り入れた応力解析によって算定されたコンクリートの応力によって、有害なひび割れが発生しないことを確かめることにより行うことを原則とする。」と大きく変更された。温度だけではなく、自己収縮も積算して、セメントの水和に起因するひび割れの照査としている。

これを踏まえた次の条文で、「(2) (2.3-3)式が満足されれば、一般にこの照査に合格したとしてよい」とした。

$$I_{cr}(t) \geq \gamma_{cr} \quad (2.3-3)$$

ここに、 $I_{cr}(t)$: ひび割れ指数 $I_{cr}(t) = f_{tk}(t) / \sigma_t(t)$

$f_{tk}(t)$: 材齢 t 日におけるコンクリート引張強度の特性値

$\sigma_r(t)$: 材齢 t 日におけるコンクリートの最大主引張応力度

γ_{cr} : ひび割れ発生危険度およびひび割れ指数の精度に係る安全係数

一般に 1～1.8 としよ。

ここで規定されている算定方法を用いる場合、安全係数 γ_{cr} とひび割れ発生確率との関係が前出、図 2.2-9 となり、ひび割れ発生確率を 5%、25%、85% とする場合、安全係数 γ_{cr} をそれぞれ、1.75、1.45、1.0 とすればよいとしている。一般的な配筋の構造物における標準的な γ_{cr} の参考値を以下のとおり示している。なお、参考値の切り分けの文言は平成 8 年制定版から、修正されていない。

ひび割れを防止したい場合 1.75 以上

ひび割れの発生をできるだけ制限したい場合 1.45 以上

ひび割れの発生を許容するが、ひび割れ幅が過大とならないように制限したい場合 1.0 以上

このように大きく改訂されたために、実務的には、改訂の本質的な理由について理解があまり進まない中で、これが 2007 年版まで使い続けられることになった。

温度ひび割れ指数と最大ひび割れ幅の関係図については、温度ひび割れ指数の見直しに伴って、ひび割れ幅との関係を図 2.3-3²⁻¹⁶⁾に示すように修正している。基本的には、ひび割れ指数をひび割れ発生確率に対して平行移動したのと同様に、平成 8 年制定版のひび割れ指数と最大ひび割れ幅の直線を平行移動している。

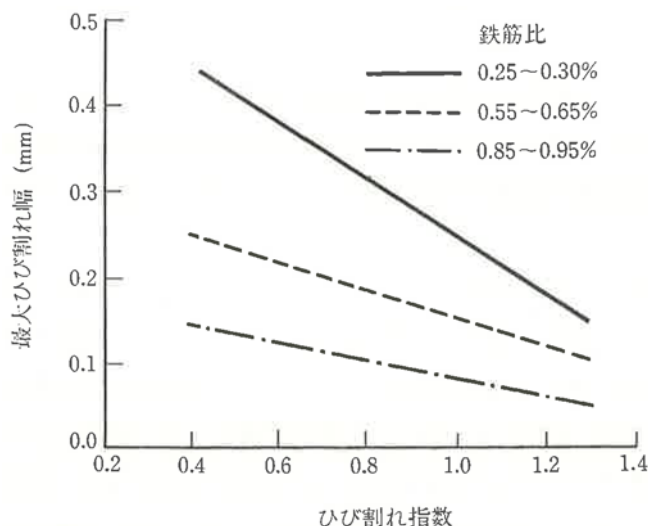


図 2.3-3 平成 11 年版 温度ひび割れ指数と最大ひび割れ幅²⁻¹⁶⁾

2012 年制定版においては、ひび割れ発生確率図が 3 次元 FEM 用に大幅に改訂された。これに伴い、「ひび割れに対する対策レベルに応じて、表 2.3-12¹⁹⁾に示すひび割れ発生確率と安全係数を目標として定めるものとする」と参考から、目標に格上げした変更となっている。対策レベルの切り分けの文言は、従来と同一であるが、ひび割れの発生を許容するが、ひび割れ幅が過大とならないように制限したい場合のひび割れ発生確率は、従来の 85% 程度から 50% 程度に低減されている。一方で、この場合の安全係数は 1.0 で従来と同一である。すなわち、ひび割れ発生確率図の変更にとまって、ひび割れ発生確率の参考値を変更したことになる。このあたりの整合についての説明は無い。

温度ひび割れ指数と最大ひび割れ幅の関係図については、温度ひび割れ指数の見直しに伴って、ひび割れ幅との関係を図 2.3-4 に示すように修正している。ひび割れ指数が 1.85 の時に最大ひび割れ幅 0.05mm の点を通るように、鉄筋比 0.25～0.28% のひび割れ幅の実験データとその際の最小ひび割れ指数

との関係を回帰して、最大ひび割れ幅が 0mm になる最小ひび割れ指数を 2.04 と定めた。この最小ひび割れ指数 2.04 で最大ひび割れ幅 0mm の点を通して回帰式をその他の鉄筋比について求めたとしている。特に、従来の「ひび割れの発生を許容するが、ひび割れ幅が過大とならないように制限したい場合」のひび割れ発生確率が従来の 85% から 50% に変更された事による、最小ひび割れ指数と最大ひび割れ幅の整合を図っていない。

表 2.3-1 一般的な配筋の構造物における標準的なひび割れ発生確率と安全係数²⁻¹⁹⁾

対策レベル	ひび割れ発生確率	安全係数 γ_{cr}
ひび割れを防止したい場合	5 (%)	1.85 以上
ひび割れの発生をできる限り制限したい場合	15 (%)	1.40 以上
ひび割れの発生を許容するが、ひび割れ幅が過大とならないように制限したい場合	50 (%)	1.0 以上

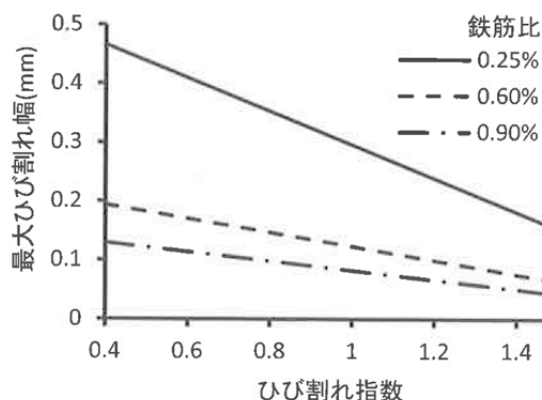


図 2.3-4 2012 年制定版 温度ひび割れ指数と最大ひび割れ幅²⁻¹⁹⁾

ひび割れ制御の目安、目標値の変遷をに、ひび割れ指数と最大ひび割れ幅の関係の変遷を図 2.3-5 に示す。2012 年制定版におけるひび割れ制御目標値の確率が大きく違うことが顕著である。一方、ひび割れ幅が過大とならないように制限したい場合において、表 2.3-2 の指数の目標を満足していれば、図 2.3-5 に示される範囲で鉄筋比が最も小さい場合でも、最大ひび割れ幅は 0.3mm 以下となっている。塩害環境下等の耐久性上、厳しい環境下ではなくて、止水性が求められない場合に、一般的に用いられている最大ひび割れ幅の目標値 0.3mm 以下を満足する指数が、ひび割れ幅が過大とならないように制限したい場合における目標値として設定されているとも考えられる。

表 2.3-2 ひび割れ制御の目安、目標値の変遷のまとめ

制定年		S61年	H3年版	H8年版	H11年版	2012年版
ひび割れ発生確率図		新設	⇒	改訂	改訂	改訂
ひび割れを防止したい場合	指数	1.5以上	⇒	⇒	1.75以上	1.85以上
	確率	5%以下	⇒	⇒	⇒	5%
ひび割れの発生をできるだけ制限したい場合	指数	1.2～1.4	1.2以上～1.5未満	1.2以上	1.45以上	1.40以上
	確率	10～25%	5～20%以下	25%以下	⇒	15%
ひび割れの発生を許容するが、 ひび割れ幅が過大とならないように制限したい場合	指数	0.7～1.1	0.7以上～1.2未満	0.7以上	1.0以上	1.0以上
	確率	35～85%	20～85%以下	85%以下	⇒	50%

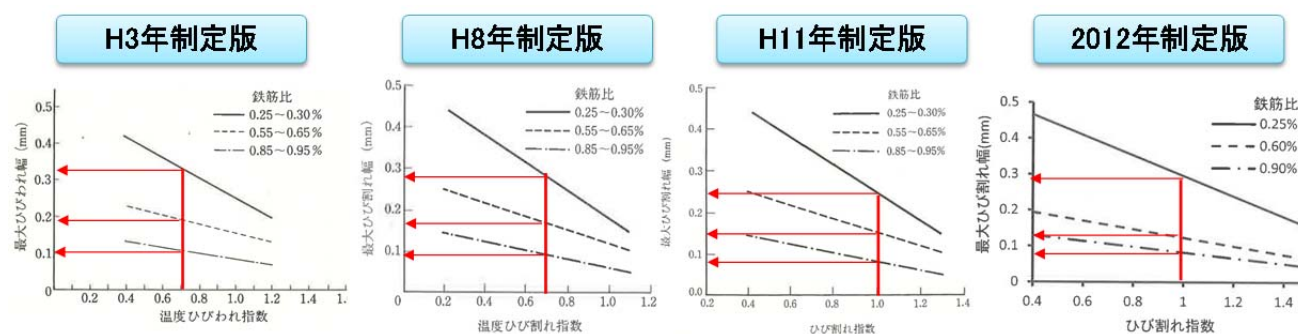


図 2.3-5 2012 年制定版 温度ひび割れ指数と最大ひび割れ幅の変遷

土木学会の動きとは別に、建築学会の動きを見ると、2008 年 2 月に「マスコンクリートの温度ひび割れ制御設計・施工指針（案）・同解説」²⁻²²⁾が刊行された。同指針（案）が刊行されるまで、建築学会では、マスコンクリートの温度ひび割れの制御や対策に関する指針類は緩硬されていなかったことが同序に示されている。同指針（案）では、漏水抵抗性を確保するためのひび割れの許容状態として、貫通ひび割れが生じないこととして、応力強度比（土木学会基準で言う温度ひび割れ指数の逆数）によって、ひび割れを制御する場合は、その設計値を 0.8 以下（ひび割れ指数換算では 1.25 以上）とすることを標準と規定している。

これは、部材の温度ひび割れ発生強度をコンクリート供試体の割裂引張強度の 0.85 倍とした場合を前提としていて、部材の温度応力がコンクリート供試体の割裂引張強度の 0.68 倍（ 0.8×0.85 ）以下となることを規定していると説明している。図 2.3-6 によると、ひび割れ発生材齢が 30 日以上になった場合に応力強度比は 0.85 で推移している。このことは、試験体内外の乾燥収縮ひずみの勾配が断面内で大きい場合には、見かけ上の応力強度比が小さいこと、また乾燥が進行して、内外の乾燥収縮ひずみが均一に近づいた場合の応力強度比が 0.85 程度に近づくことを表している。マスコンクリート部材において、本設計の対象となる部材内部は乾燥の影響を受けにくい状況ではあるが、均一な応力状態における応力強度比という観点では、図 2.3-6 における材齢 30 日以上値が対応しているものと考えられえらるため、本指針（案）では 0.85 を採用したとされている。しかし、0.8 以下であればひび割れが発生しないのかという、それを保証することは難しい。マスコンクリートのひび割れ発生に関する実験は極めて少なく、マスコンクリート部材において、応力強度比がいくつであれば温度ひび割れが発生しないのかの定量的データはほとんどなく、今後実験データを蓄積し、見直していくことが必要としている。

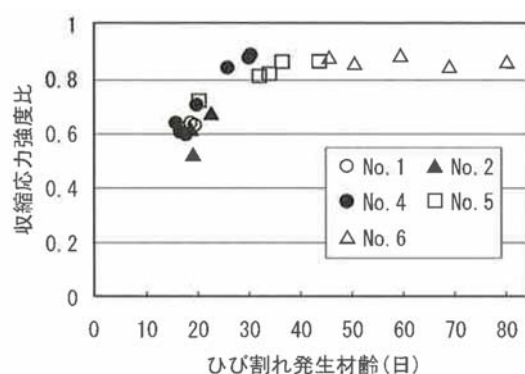


図 2.3-6 建築学会収縮ひび割れ指針（案）収縮ひび割れ時の応力強度比²⁻²²⁾

また、この応力強度比は、温度ひび割れ発生強度と温度応力の予測値の比である。温度ひび割れ発生強度は、「部材にひび割れが発生する時に生じているコンクリートの引張応力を温度ひび割れ発生強度としている。温度ひび割れ発生強度は、部材における引張強度ともいうべきもので、JIS A 1113（コンクリートの割裂引張強度試験方法）によるコンクリート供試体の割裂引張強度よりも小さくなることが予想される。本指針（案）では、割裂引張強度の 0.85 倍を温度ひび割れ発生強度の標準値としている。」と説明されている。

2.4 引張強度

コンクリートは、基本的に圧縮材として用いられ引張強度を積極的に活用する物ではない。このため、コンクリートの引張強度は、古くから圧縮強度の 1/10 程度というように定性的に扱われてきた。我が国でコンクリートの引張強度が定式化され、最初にオーソライズされたのは、昭和 61 年制定版コンクリート標準示方書（設計編）²⁻²³⁾においてと考えられる。セメント協会 F-5 委員会のデータ²⁻²⁴⁾を岡村ら²⁻²⁵⁾が定量的に定式化し、これを設計基準強度として与えた(2.4-1)式である。

$$f_{td} = 0.5f'_{ck}{}^{2/3} / \gamma_c \quad (2.4-1)$$

ここに、 f_{td} ：設計引張強度 (kgf/cm²)

f'_{ck} ：コンクリートの圧縮強度の特性値（設計基準強度）(kgf/cm²)

γ_c ：コンクリートの材料係数

限界状態設計法における材料の設計強度を与える式としてオーソライズされている。この式は 2017 年の現在に至るまで設計的には変更されずに（単位系は変わっているものの）使用されている。

一方、マスコンクリートのひび割れを照査するための引張強度は、コンクリートを打ち込んで直ぐの材齢初期におけるひび割れも議論にすることから、設計基準強度とは別の変遷をたどっている。こちらのマスコンクリートのひび割れ照査用の引張強度が、最初にオーソライズされたのは、日本コンクリート工学協会編：マスコンクリートのひび割れ制御指針（1986 年）²⁻²⁶⁾において示された(2.4-2)式と考えられる。

$$f_t(t_e) = 1.4 \times \sqrt{f'_c(t_e)} \quad (2.4-2)$$

ここに、 $f_t(t_e)$ ：有効材齢 t 日における引張強度 (kgf/cm²)

$f'_c(t_e)$ ：有効材齢 t 日における圧縮強度 (kgf/cm²)

t_e ：有効材齢（日） $= \sum \frac{T_m + 10}{30} \Delta t$

T_m ：コンクリートの平均温度（℃）

Δt ：コンクリートの温度が T_m ℃である日数（日）

(2.4-2)式は、ACI 基準²⁻²⁾による平方根式を準用するが、当時の我が国における骨材事情の悪化からくる引張強度の低下を考慮して定められたことが説明されている。この ACI 基準には、割裂引張強度が $6.7 \times \sqrt{f'_c}$ (psi : pounds per square inch) となることが示されており、これを CGS 単位系に変換すると、 $1.776 \times \sqrt{f'_c}$ (kgf/cm²) となる。さらに、この係数 1.776 に 0.788 を乗じると、係数 1.4 が導かれる。ACI 基準では、エポキシの例ではあるが、直接引張強度は割裂引張強度よりも 25%程度小さいことを示し、構造体コンクリートも割裂引張強度より小さいことを記載し、説明しているが、ここで 0.788 を乗じて、係数を 1.4 に低減したのは、あくまでも我が国の骨材事情によるもので、我が国の割裂引張強度を推定する式が(2.4-2)式と考えられる。

この(2.4-2)式がコンクリート標準示方書（施工編）においても引き継がれ、温度ひび割れ指数とひび割れ発生確率図による照査が始まった、昭和 61 年（1986 年）版～平成 8 年（1997 年）版まで (2.4-2)式と同様の (2.4-3)式を用いている。(2.4-3)式には有効材齢を用いていない事が(2.4-2)式との相違である。

$$f_t(t) = c \sqrt{f'_c(t)} \quad (2.4-3)$$

ここに、 $f_t(t)$ ：材齢 t 日のコンクリートの引張強度 (kgf/cm²)

$f'_c(t)$ ：材齢 t 日のコンクリートの圧縮強度 (kgf/cm²)

c : コンクリートの乾燥の程度によって異なるが、**1.4** を標準とする

また、これらの強度は一般に配合強度によるが、設計段階等やむを得ない場合には設計基準強度に基づいて行う

なぜ有効材齢を用いないかについて、説明はとくにされていないが、当時のパソコン等の計算機の能力では、そこまで厳密に検討ができない状況にあり、また結果となる、部材温度や応力、指数、ひび割れ発生確率の算定精度の要求もあまり高くは無かったこと、土木マスコンクリートであり、内部温度上昇を考慮すれば部材平均 20℃以上になる場合が多いと想定され、有効材齢を用いない方が安全側の検討となる場合が多いこと等の理由ではないかと推測される。

これが、平成 8 年（1997 年）版では、(2.4-4)式のとおり SI 単位系への変更にともない係数 c が 1.4 から 0.35 に変更され、その説明が修正された。まず、条文の解説において「構造物中のコンクリートの引張強度は乾燥状態、載荷速度および寸法の相違等により試験で得られた値より低下する傾向にある。そこで、試験により得られた値を 2 割程度低減して用いるのが望ましい」と説明される。

$$f_t(t) = c \sqrt{f'_{ct}(t)} \quad (2.4-4)$$

ここに、 $f_t(t)$: 材齢 t 日のコンクリートの引張強度 (N/mm²)

$f'_{ct}(t)$: 材齢 t 日のコンクリートの圧縮強度 (N/mm²)

c : コンクリートの乾燥の程度によって異なるが、**0.35** を標準とする

なお、温度ひび割れが平均的な引張強度よりも弱い引張強度の箇所で生じる可能性があり、また構造物中のコンクリートの引張強度が乾燥状態、載荷速度および寸法の相違等により、試験で得られた値より低下する傾向にある。従って、 c の値として 2 割程度低減した値をとることが安全であることから、**0.35** を標準とした。圧縮強度の推定式における 91 日圧縮強度は、一般には配合強度を意味するが、設計段階等やむを得ない場合には設計基準強度としてもよい。

このように、係数 c の意味も長く丁寧に説明されている。これは、次の理由による。平成 8 年制定版（1997 年）のひび割れ発生確率図は、ひび割れ指数が 1 の時にひび割れ発生確率が 50% となるように変更された。しかし、実際の構造物から収集したデータでは、割裂引張強度試験結果等を用いて算出したひび割れ指数が 1 の時に、ひび割れ発生確率が 50% とならなかったのに対して、割裂引張強度試験結果を 2 割程度低減してひび割れ指数を算出すれば、ひび割れ指数が 1 の時にひび割れ発生確率が 50% となる。このため、引張強度については、試験結果を 2 割程度低減した値を用いることとして、前述の説明を付記したものである。一方、引張強度推定式は単位系しか変更されていないことから、昭和 61 年制定版から同式で求まる引張強度は「構造物中のコンクリートの引張強度」であり、「試験で得られた値の 2 割程度低減した値」を推定している式であることを、この平成 8 年において正確に説明したことにもなる。昭和 61 年当時には、推定式が求めている強度は構造物中の引張強度か試験により求まる割裂引張強度のようなものかについては、明確に示されていなかったと言える。

さらにこれが、平成 11 年（1999 年）版において、温度ひび割れ発生確率図の変更に伴って、係数 c が 0.35 から 0.44 に修正された引張強度の推定式(2.2-5)式が提示された。

$$f_{tk}(t) = c \sqrt{f'_{ck}(t)} \quad (2.4-5)$$

$$f_{td}(t) = f_{tk}(t) / \gamma_c \quad (2.4-6)$$

ここに、 $f'_{ck}(t)$: 材齢 t 日におけるコンクリート圧縮強度特性値 (N/mm²)

$f_{tk}(t)$: 材齢 t 日におけるコンクリート引張強度特性値 (N/mm^2)

$f_{td}(t)$: 材齢 t 日におけるコンクリート引張強度設計用値 (N/mm^2)

t : 材齢 (日)

c : コンクリートの乾燥の程度によって異なるが、**0.44** を標準とする

γ_c : コンクリートの材料係数: コンクリートの設計引張強度 (構造物)

とその特性値 (試験体) との相違を考慮する安全係数

ここでの変更は、ひび割れ指数の算定に用いる引張強度を、構造物中の引張強度ではなくて、引張強度の特性値そのもの、すなわち試験値のばらつきを考慮したうえで、大部分の試験値がその値を下回らないことを保証される値にしたことである。どのような値を採用すべきかについて、明確に示されることとなったが、従来よりも $0.44/0.35 \div 1.26$ 倍、引張強度が大きく算定されることとなった。この引張強度算定式が 2012 年制定版で改訂されるまで、13 年間使用された。

ただし、次の 2002 年制定版では推定式の係数は変わらなかったものの、条文の文言や、安全係数についての説明が削除された。推定式を(2.2-7)式に示す。

$$f_{tk}(t) = c \sqrt{f'_c(t)} \quad (2.4-7)$$

$$f'_c(t) = [t / (a + bt)] \times d(i) f'_{ck} \quad (2.4-8)$$

ここに、 $f'_c(t)$: 材齢 t 日におけるコンクリート圧縮強度 (N/mm^2)

$f_{tk}(t)$: 材齢 t 日におけるコンクリート引張強度 (N/mm^2)

f'_{ck} : コンクリートの設計基準強度 (N/mm^2)

t : 材齢 (日)

c : コンクリートの乾燥の程度によって異なるが、**0.44** を標準とする

$a, b, d(i)$: 圧縮強度の材齢との関係を表す係数

平成 11 年 (1999 年) 版の条文は、図 2.4-12¹⁶⁾に示すとおり、「実構造物中の強度を下回る確率が十分小さくなるように、これを定めなければならない」としているが、これが 2002 年制定版では、「供試体を用いた割裂引張強度試験により定めることを標準とする」に変更されている。さらに、2002 年制定版の解説では、JISA1113 による供試体の割裂引張強度としてよいと説明されている。この文章を端的に理解するなら、特性値から平均値に変更された事になり、同じ推定式であるものの、解釈が大幅に変更されたことになる。また、2002 年制定版ではこの式が、普通強度のコンクリートに対しては十分な実績と信頼性を有しているが、最近用いられる例が増えつつある設計基準強度 50N/mm^2 以上の高強度コンクリートの場合は、実験結果等を参考に別途定める必要があるとして、式の適用範囲として、強度範囲を初めて示した。2007 年版は 2002 年制定版と同一で変更はなく、2012 年制定版の改訂に至る。

4.2.5 コンクリートの力学的特性の設計値

(1) ひび割れ指数の算定に用いるコンクリートの設計引張強度は、実構造物中の強度を下回る確率が十分小さくなるように、これを定めなければならない。

(2) 温度応力を計算するためのコンクリートの有効ヤング係数は、材齢や乾燥状態などの影響を考慮して、これを定めなければならない。

図 2.4-1 平成 11 年版 力学的特性の設計値条文²⁻¹⁶⁾

4.2.5 コンクリートの力学的特性の設計値

(1) ひび割れ指数の算定に用いるコンクリートの引張強度は、供試体を用いた割裂引張強度試験により定めることを標準とする。

(2) 温度応力を計算するためのコンクリートの有効ヤング係数は、材齢や乾燥状態などの影響を考慮して、これを定めなければならない。

図 2.4-2 2002 年制定版 力学的特性の設計値条文²⁻²⁷⁾

そして 2017 年現在において利用されているのが、2012 年制定版における最後の改訂で示された (2.4-9) 式である。

$$f_{tk}(t') = C_1 \cdot f'_c(t')^{C_2} \quad (2.4-9)$$

ここに、 $f'_c(t')$ ：有効材齢 t' 日におけるコンクリート圧縮強度 (N/mm²)

$f_{tk}(t')$ ：有効材齢 t' 日におけるコンクリート引張強度 (N/mm²)

C_1, C_2 ：養生方法によって決まる定数で $C_1=0.13, C_2=0.85$ を標準とする。

t' ：有効材齢 (日)

$$t' = \sum_{i=1}^n \Delta t_i \cdot \exp \left[13.65 - \frac{4000}{273 + T(\Delta t_i)/T_o} \right]$$

Δt_i ：温度が T (°C) である期間の日数 (日)

T_o ：1°C

2012 年制定版でも、割裂引張強度試験により定めることを標準としているが、推定式は大幅に変更されている。この理由の詳細は示されていないが、同式の出典となるマスコンクリートのひび割れ制御指針 2008 では、図 2.4-3²⁻¹⁸⁾を示して同式が実験データによく適合していると説明がある。

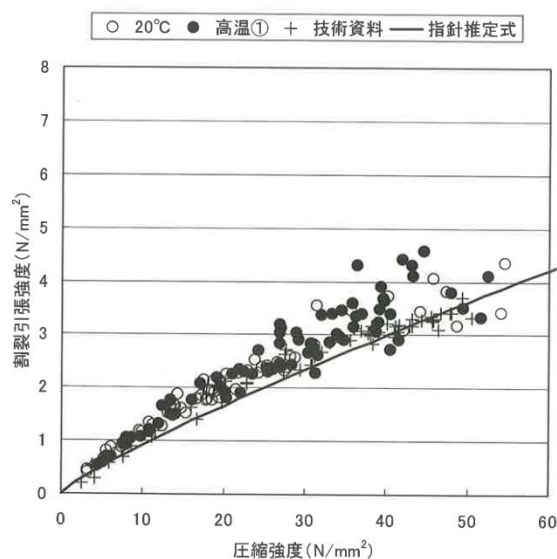


図 2.4-3 マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008 参考資料²⁻¹⁸⁾

また、有効材齢を使用している点も従来と大きく変わった点である。解析方法として、3次元有限要素法を基本としており、パソコン能力が向上したことで、要素毎の温度変化を精度よく推定することが可能となったこと等から、解析精度を向上させるためにも、有効材齢を使用することは理にかなっている。

以上、土木学会コンクリート標準示方書における、ひび割れ指数を算定するために用いる引張強度の推移を図 2.4-4 に、その式と係数の説明を整理すると表 2.4-1 のとおりとなる。

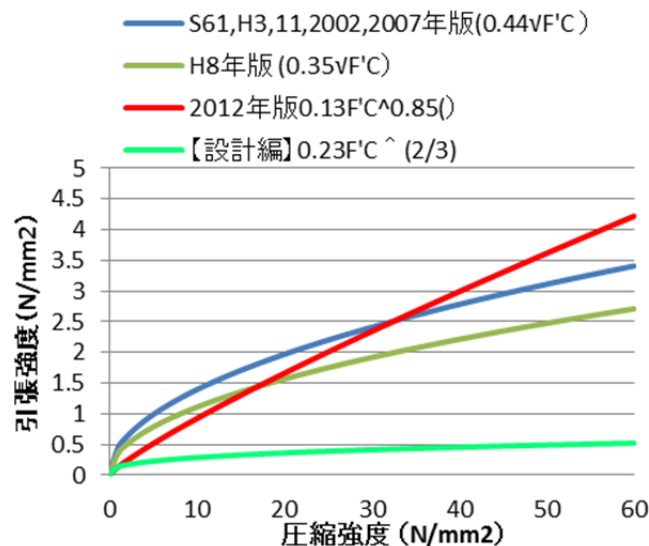


図 2.4-4 引張強度の推移

表 2.4-1 引張強度推定式とその説明

示方書 制定年	推定式	係数	説明
S61	$f_t(t) = c \sqrt{f'_c(t)}$	$C = 1.4 \text{ (kgf/cm}^2\text{)}$	試験により求める, 配合強度 不明確
H3	同上	同上	同上
H8	同上	$C = 0.35 \text{ (N/mm}^2\text{)}$	構造物中のコンクリートの引張強度 試験により得られた値の8割程度
H11	$f_{tk}(t) = c \sqrt{f'_{ck}(t)}$	$C = 0.44 \text{ (N/mm}^2\text{)}$	引張強度特性値
2002	同上	同上	割裂引張強度
2007	同上	同上	同上
2012	$f_{tk}(t') = C_1 \cdot f'_c(t')^{c_2}$	$C_1 = 0.13, C_2 = 0.85 \text{ (N/mm}^2\text{)}$	同上

土木学会の動きとは別に、建築学会の動きを見ると、前出の「マスコンクリートの温度ひび割れ制御設計・施工指針（案）・同解説」²⁻²⁸⁾では、応力強度比によって、ひび割れの照査を行うことを規定している（適用範囲は設計基準強度 $18 \sim 36 \text{ N/mm}^2$ と限定）。この応力強度比は、温度ひび割れ発生強度と温度応力の予測値の比（土木学会基準で言う温度ひび割れ指数の逆数）である。温度ひび割れ発生強度は、「部材にひび割れが発生する時に生じているコンクリートの引張応力を温度ひび割れ発生強度としている。温度ひび割れ発生強度は、部材における引張強度ともいふべきもので、JIS A 1113（コンクリートの割裂引張強度試験方法）によるコンクリート供試体の割裂引張強度よりも小さくなることが予想される。本指針（案）では、割裂引張強度の 0.85 倍を温度ひび割れ発生強度の標準値としている。」と説明されている。

この応力強度比に用いられる、温度ひび割れ発生強度 $f_{cr}(t_e)$ は、(2.4-10)式で表される。

$$f_{cr}(t_e) = f_t(t_e) \times \kappa \quad (2.4-10)$$

ここに、 $f_{cr}(t_e)$ ：材齢 t 日におけるひび割れ発生強度（ N/mm^2 ）

$f_t(t_e)$ ：材齢 t 日における割裂引張強度（ N/mm^2 ）

κ ：ひび割れ発生低減係数 0.85 を標準とする

さらに、割裂引張強度 $f_t(t_e)$ は、(2.4-11)式²⁻²⁹⁾、または信頼できる資料もしくは実験により予測するとした。この割裂引張強度推定式は各社セメント資料等を用いてセメント毎に、有効材齢と圧縮強度、割裂引張強度の関係式を得たもので、図 2.4-5²⁻²⁷⁾のような予測状況だと説明されている。

$$f_t(t_e) = 0.18 \times f_c(t_e)^{0.75} \quad (2.4-11)$$

ここに、 $f_c(t_e)$ ：有効材齢 t_e 日におけるコンクリート圧縮強度（ N/mm^2 ）

t_e ：有効材齢（日）

$$t_e = \sum_{i=1}^n \Delta t_i \cdot \exp \left[13.65 - \frac{4000}{273 + T(\Delta t_i)/t_o} \right]$$

Δt_i : 温度 T (°C) が継続する期間 (日)

$T(\Delta t_i)$: Δt の間継続するコンクリート温度 (°C)

t_o : 材齢を無次元化する値で 1 日

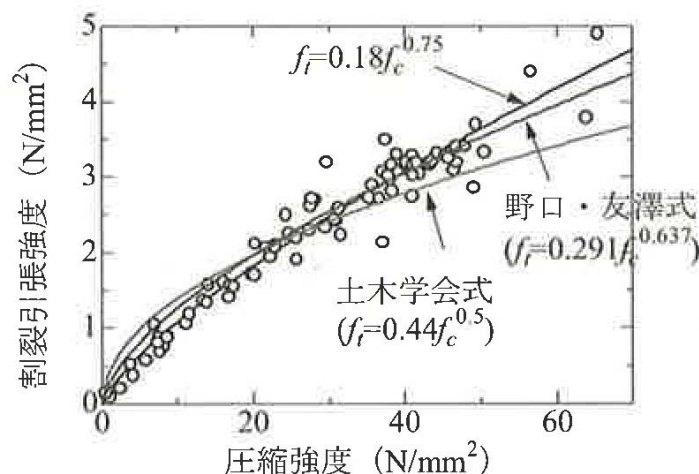


図 2.4-5 圧縮強度と割裂引張強度²⁻²⁷⁾

割裂引張強度を 0.85 倍に低減して、温度ひび割れ発生強度としていることは、土木学会の平成 11 年版の考え方に類似している。割裂引張強度を 0.85 倍とする理由として、ひび割れ発生材齢が 30 日以上になった場合に応力強度比が図 2.4-6 に示すとおり 0.85 程度で推移していることを挙げている。

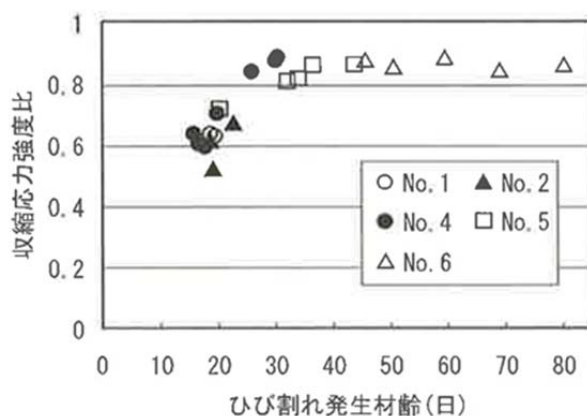


図 2.4-6 建築学会指針（案）ひび割れ発生材齢と収縮応力強度比²⁻²⁷⁾

また、鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ制御 設計施工指針（案）同解説²⁻³⁰⁾には、割裂引張強度の推定式として(2.4-12)式が示されている。

$$f_t(t_e) = 0.291 \times f'_c(t')^{0.63} \quad (2.4-12)$$

ここに、 $f'_c(t')$: 有効材齢 t' 日におけるコンクリート圧縮強度 (N/mm²)

t_e : 有効材齢 (日)

(2.4-12)式は、図 2.4-7²⁻³¹⁾に示す粗骨材種類を問わず圧縮強度と割裂引張強度との関係を最小二乗法による回帰分析を行った関係式である。

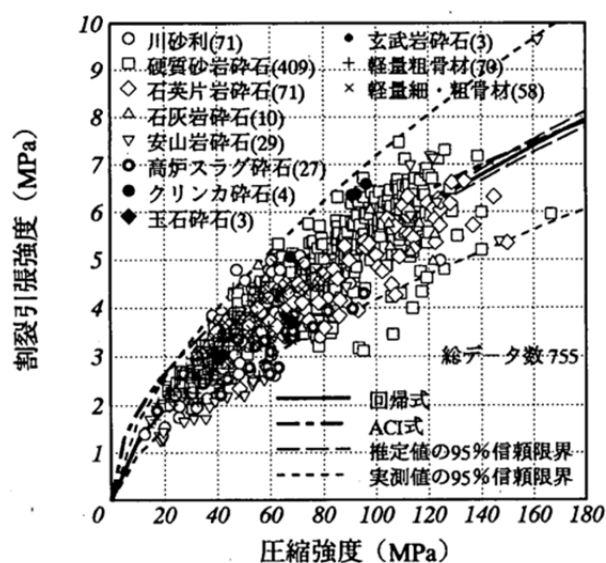


図 2.4-7 粗骨材種類別の圧縮強度と割裂引張強度²⁻³¹⁾

これらの引張強度と圧縮強度との関係を図 2.4-8 に示す。圧縮強度が 20N/mm^2 程度以下となる若材齢時の引張強度は 2012 年制定版推定式によるものが最も小さくなっている。土木学会 2012 年式，建築学会「マスコン指針」式は割裂引張強度の推定式としては，2007 年版までの土木学会の推定式，建築学会「収縮ひび割れ制御指針」の推定式よりかなり小さい値を算定すると言える。

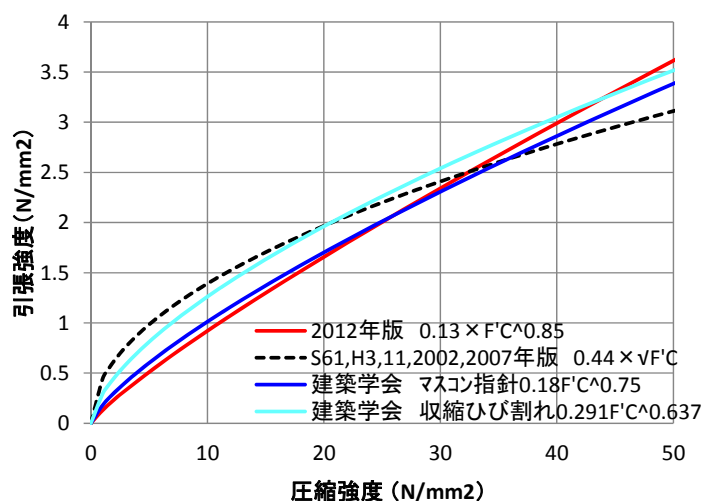


図 2.4-8 引張強度の推移（建築学会含む）

2.5 有効ヤング係数

マスコンクリートのひび割れ照査用の弾性係数を最初に定式化してオーソライズしたのは、日本コンクリート工学協会編：マスコンクリートのひび割れ制御指針（1986年）^{2・32)}において示された(2.5-1)式と考えられる。(2.5-1)式はACI318-83^{2・33)}の基準を参考に決定されたことが示されている。

$$E_c(t_e) = 1.53 \times 10^4 \times \sqrt{f'_c(t_e)} \quad (2.5-1)$$

ここに、 $E_c(t_e)$ ：有効材齢 t 日における弾性係数 (kgf/cm²)

$f'_c(t_e)$ ：有効材齢 t 日における圧縮強度 (kgf/cm²)

t_e ：有効材齢 (日) = $\sum \frac{T_m + 10}{30} \Delta t$

T_m ：コンクリートの平均温度 (°C)

Δt ：コンクリートの温度が T_m °Cである日数 (日)

さらにここでは、有効弾性係数として、クリープ係数 Φ_c として、温度降下時 0.5～0.6 程度を用いて(2.5-2)式により求めてよいとしている。クリープ係数は、温度上昇時は降下時の 2～3 倍としている。

$$E_e = \frac{1}{1 + \Phi_c} E_c \quad (2.5-2)$$

ここに、 E_e ：有効弾性係数 (kgf/cm²)

E_c ：クリープを考慮しない弾性係数 (kgf/cm²)

Φ_c ：クリープ係数

すなわち、実質的に温度降下時のクリープ係数 $\Phi_c = 0.55$ とすると、温度降下時の有効弾性係数は(2.5-3)式で表されることができると考えることができる。

$$E_e(t_e) = 0.987 \times 10^4 \times c \sqrt{f'_c(t_e)} \quad (2.5-3)$$

これらを参考に土木学会コンクリート標準示方書の昭和 61 年制定版（1986 年）では、(2.5-4)式が示された。

$$E_e(t) = 1.1 \times 10^4 \times \sqrt{f'_c(t)} \quad \dots \dots \dots (\text{材齢 3 日まで}) \quad (2.5-4)$$

$$E_e(t) = 1.5 \times 10^4 \times \sqrt{f'_c(t)} \quad \dots \dots \dots (\text{材齢 3 日以降})$$

ここに、 $E_e(t)$ ：材齢 t 日における有効ヤング係数 (kgf/cm²)

$f'_c(t)$ ：材齢 t 日の圧縮強度の推定値 (kgf/cm²)

以降では、コンクリート標準示方書の改定に伴う有効ヤング係数の変化を示す。昭和 61 年制定版（1986 年）の次の改定となる平成 3 年版（1991 年）では、(2.5-5)式のとおり修正された。

$$E_e(t) = \phi(t) \times 1.5 \times 10^4 \times \sqrt{f'_c(t)} \quad (2.5-5)$$

ここに、 $E_e(t)$ ：材齢 t 日における有効ヤング係数 (kgf/cm²)

$f'_c(t)$ ：材齢 t 日の圧縮強度の推定値 (kgf/cm²)

$\phi(t)$ ：温度上昇時におけるクリープ影響が大きいことによるヤング係数の補正係数

材齢 3 日まで $\phi(t) = 0.73$

材齢 5 日以降 $\phi(t) = 1.0$

材齢 3 日から 5 日までは直線補間してよい

この次の改定となった平成 8 年制定版（1996 年）では、SI 単位系への変更に伴って(2.5-6)式のとおり

修正された。この(2.5-6)式は、2012年制定版で改定されるまでの16年間利用されることとなった。

$$E_e(t) = \phi(t) \times 4.7 \times 10^3 \times \sqrt{f'_c(t)} \quad (2.5-6)$$

ここに、 $E_e(t)$ ：材齢 t 日における有効ヤング係数 (N/mm²)

$f'_c(t)$ ：材齢 t 日の圧縮強度の推定値 (N/mm²)

$\phi(t)$ ：温度上昇時におけるクリープ影響が大きいことによるヤング係数の補正係数

材齢 3 日まで $\phi(t) = 0.73$

材齢 5 日以降 $\phi(t) = 1.0$

材齢 3 日から 5 日までは直線補間してよい

これが平成 11 年版では、式そのものは(2.5-7)式に示すとおり、変更されていないが、圧縮強度の推定値が圧縮強度の特性値に変更されている。

$$E_e(t) = \phi(t) \times 4.7 \times 10^3 \times \sqrt{f'_{ck}(t)} \quad (2.5-7)$$

ここに、 $E_e(t)$ ：材齢 t 日における有効ヤング係数 (N/mm²)

$f'_{ck}(t)$ ：材齢 t 日の圧縮強度の特性値 (N/mm²)

$\phi(t)$ ：温度上昇時におけるクリープ影響が大きいことによるヤング係数の補正係数

材齢 3 日まで $\phi(t) = 0.73$

材齢 5 日以降 $\phi(t) = 1.0$

材齢 3 日から 5 日までは直線補間してよい

さらに、これが 2002 年制定版では、また式そのものは(2.5-8)式に示すとおり、変更されていないが、圧縮強度の特性値が圧縮強度に変更されている。

$$E_e(t) = \phi(t) \times 4.7 \times 10^3 \times \sqrt{f'_c(t)} \quad (2.5-8)$$

ここに、 $E_e(t)$ ：材齢 t 日における有効ヤング係数 (N/mm²)

$f'_c(t)$ ：材齢 t 日の圧縮強度 (N/mm²)

$\phi(t)$ ：温度上昇時におけるクリープ影響が大きいことによるヤング係数の補正係数

材齢 3 日まで $\phi(t) = 0.73$

材齢 5 日以降 $\phi(t) = 1.0$

材齢 3 日から 5 日までは直線補間してよい

2017 年現在利用されているのは、2012 年制定版で改定された (2.5-9)式である。

$$E_e(t') = \phi_e(t') \times 6.3 \times 10^3 \times f'_c(t')^{0.45} \quad (2.5-9)$$

ここに、 $E_e(t')$ ：有効材齢 t' 日における有効ヤング係数 (N/mm²)

$f'_c(t')$ ：有効材齢 t' 日の圧縮強度 (N/mm²)

$\phi_e(t')$ ：クリープの影響を考慮するためのヤング係数の低減係数

最高温度に達する有効材齢まで (ただし、複数リフト等で温度の増減が複数回生じる場合には、最初のピーク温度時の有効材齢まで)： $\phi_e(t') = 0.42$

最高温度に達する有効材齢+1 有効材齢 (日) 以降： $\phi_e(t') = 0.65$

最高温度に達する有効材齢後の1有効材齢（日）までは直線補完する
すなわち、2012年制定版で式が大幅に改定されるまでは、昭和61年制定版(1986年)における式が基本的に利用されてきている。ただし、平成3年版（1991年）ではクリープ係数が修正される等、微修正や説明が表2.5-1のとおり推移している。

表 2.5-1 ヤング係数推定式とその説明

示方書 制定年	推定式	$\phi(t)$ 温度上昇時におけるクリープ影響が 大きいことによるヤング係数の補正係数	推定変数の説明
S61	$E_e(t) = 1.1 \times 10^4 \times \sqrt{f'_c(t)} \dots (\text{材齢3日まで})$ $E_e(t) = 1.5 \times 10^4 \times \sqrt{f'_c(t)} \dots (\text{材齢3日以降})$ (kgf/cm ²)	—	圧縮強度の推定値
H3	$E_e(t) = \phi(t) \times 1.5 \times 10^4 \times \sqrt{f'_c(t)}$ (kgf/cm ²)	材齢3日まで $\phi(t) = 0.73$ 材齢5日以降 $\phi(t) = 1.0$ 材齢3日から5日までは直線補間してよい	同上
H8	$E_e(t) = \phi(t) \times 4.7 \times 10^3 \times \sqrt{f'_c(t)}$ (N/mm ²)	同上	同上
H11	$E_e(t) = \phi(t) \times 4.7 \times 10^3 \times \sqrt{f'_c(t)}$ (N/mm ²)	同上	圧縮強度特性値
2002	同上	同上	圧縮強度
2007	同上	同上	同上
2012	$E_e(t') = \phi_e(t') \times 6.3 \times 10^3 \times f'_c(t')^{0.45}$ (N/mm ²)	最高温度に達する有効材齢まで： $\phi_e(t') = 0.42$ 最高温度に達する有効材齢+1有効材齢（日） 以降： $\phi_e(t') = 0.65$	同上

今回、引張強度の推定式と同様、有効材齢を使用している点も従来と大きく変わった点である。

クリープの影響を除外した弾性係数の圧縮強度との関係の推移を図2.5-1に示す。従来式よりも2012年式の方がヤング係数は小さめに推定されている。

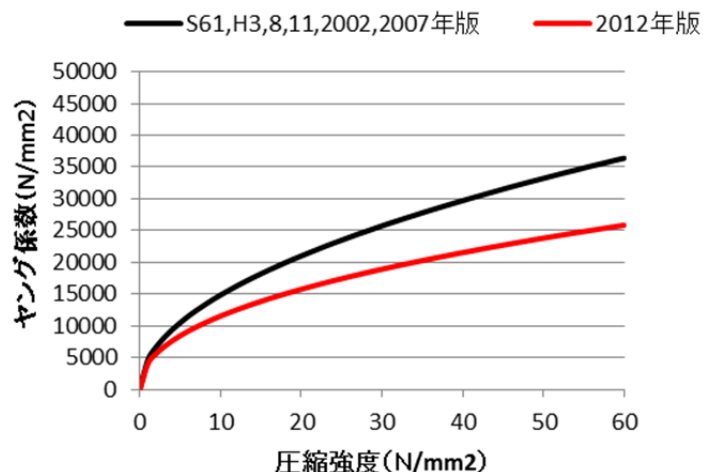


図 2.5-1 ヤング係数の推移

また、ここでも建築学会の前出の「マスコンクリートの温度ひび割れ制御設計・施工指針（案）・同解説」²⁻²⁸⁾では、ヤング係数を図 2.5-2²⁻²⁸⁾のとおり規定している。材齢 1 日未満の若材齢時のデータも検討すると、(4.6) 式が鉄筋コンクリート構造計算基準・同解説に示される（解 4.6）式よりも適合性が高いことを、図 2.5-3²⁻²⁸⁾により説明している。

(3) ヤング係数

コンクリートのヤング係数は、(4.6)式によって予測するか、あるいは、試験または信頼のできる資料に基づき予測することとする。

$$E(t_e) = 3.35 \times 10^4 \times k_1 \times k_2 \times \left(\frac{\gamma}{2.4} \right)^2 \times \left(\frac{f_c(t_e)}{60} \right)^{1/3} \quad (4.6)$$

ここに、	$E(t_e)$	：コンクリートのヤング係数 (N/mm ²)
	t_e	：コンクリートの有効材齢 (日)
	γ	：コンクリートの気乾単位容積質量 (t/m ³)
	$f_c(t)$	：コンクリートの圧縮強度 (N/mm ²)
	k_1, k_2	：骨材、混和材による係数
	$k_1=0.95$	：石英片岩碎石、安山岩碎石、玉石碎石、玄武岩碎石、粘板岩碎石
	$=1.2$	：石灰岩碎石、か焼ボーキサイト
	$=1.0$	：その他の粗骨材
	$k_2=0.95$	：シリカフューム、高炉スラグ微粉末、フライアッシュ起源微粉末
	$=1.1$	：フライアッシュ
	$=1.0$	：混和材を使用しない場合

(3) コンクリートのヤング係数は、あらかじめ材齢および温度の影響を考慮した式を用いる必要がある。一般的には、コンクリートのヤング係数が圧縮強度と大きい相関を持つことを利用し、温度および材齢の影響を考慮して圧縮強度を評価し、その圧縮強度から圧縮強度-ヤング係数関係式によってヤング係数を評価することが一般的である。解説図 4.9 は、材齢 1 日未満の実験結果も含む圧縮強度・ヤング係数関係であり、図中には (4.6) 式と本会鉄筋コンクリート構造計算基準・同解説 (1991) (以下 RC 基準 1991) による (解 4.6) 式を記載している。いずれも、材齢によらず圧縮強度とヤング係数の関係を良好に評価可能であるが、特に若材齢を評価する場合には、(4.6) 式の方が良好である。

$$E(t) = 2.1 \times 10^4 \times \left(\frac{\gamma}{2.3} \right)^{1.5} \times \left(\frac{f_c(t)}{20} \right)^{0.5} \quad (\text{解 4.6})$$

ここに、 $E(t)$: コンクリートのヤング係数 (N/mm^2)

t : コンクリートの材齢 (日)

γ : コンクリートの気乾単位容積質量 (t/m^3)

$f_c(t)$: コンクリートの圧縮強度 (N/mm^2)

図 2.5-2 建築学会指針 (案) ヤング係数式²⁻²⁷⁾

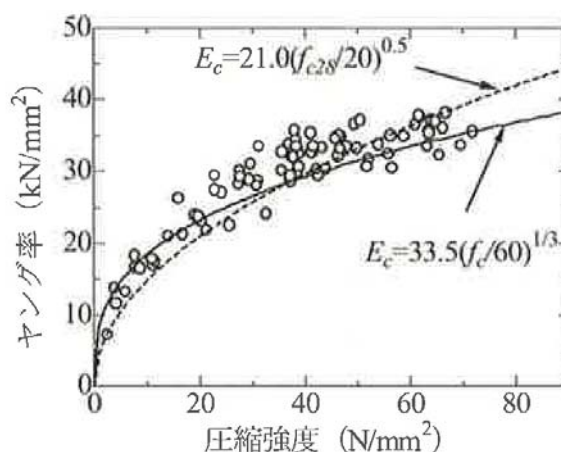


図 2.5-3 建築学会の RC 基準とマスコン指針 (案) のヤング係数式の比較²⁻²⁷⁾

2.6 断熱温度上昇特性

コンクリートの断熱温度上昇特性式は温度解析を実施する上で重要な特性式であるが、昭和61年制定版（1986年）のコンクリート標準示方書²⁻⁸⁾では(2.6-1)式により表されている。

$$Q(t) = Q_{\infty} (1 - \exp(-\gamma t)) \quad (2.6-1)$$

ここに、 Q_{∞} ：終局断熱温度上昇量

γ ：温度上昇速度に関する定数

その他にも特性式は色々と提案されているが、コンクリート標準示方書においては現在においても基本的に(2.6-1)式が利用されている。この(2.6-1)式の Q_{∞} と γ の推移を確認する。昭和61年制定版（1986年）では、表2.6-1、表2.6-2のとおりである。

表 2.6-1 Q_{∞} の標準値（昭和61年制定版）²⁻⁸⁾

セメントの種類	打込み 温度 T_D (°C)	終局断熱温度上昇量 Q_{∞} と単位 セメント量 C との関係 $Q_{\infty}(C) = AC + B$	
		A	B
普通ポルトランドセメント	10	0.11	9.0
	20	0.10	10.0
	30	0.07	16.0
中庸熱ポルトランドセメント	10	0.10	4.0
	20	0.08	11.0
	30	0.11	5.0
フライアッシュセメントB種*	20	0.13	-0.4
高炉セメントB種**	10	0.13	5.0
	20	0.08	15.0
	30	0.10	9.0

* フライアッシュの混入率は20%

** スラグの混入率は45%の場合、混入率が45%以外の場合については既往のデータあるいは試験により求めるのがよい。

表 2.6-2 γ の標準値（昭和61年制定版）²⁻⁸⁾

セメントの種類	打込み 温度 T_D (°C)	温度上昇速度に関する実験定数 r と単位セメント量 C との関係 $r(C) = aC + b$	
		$a(\times 10^{-3})$	b
普通ポルトランドセメント	10	1.6	-0.017
	20	1.6	0.409
	30	3.7	0.273
中庸熱ポルトランドセメント	20	2.4	0.0032
	30	2.5	0.160
フライアッシュセメントB種	20	0.2	0.746
高炉セメントB種	20	0.2	0.746
	30	1.5	0.341

しかし、これらの値を使用してコンクリート構造物の温度を推定すると、実際の構造物の温度を低く推定することが多いと指摘されていたために、平成3年版（1991年）では、表2.6-3²⁻¹²⁾のとおり温度上昇量が大きくなるように修正された。昭和61年制定版では、試験方法が定められていない諸試験機関での断熱温度上昇試験結果の平均値を使用していた事が、実際よりも温度が低く推定された理由として、平成3年版改訂資料²⁻³⁴⁾に示されている。改訂資料には、表2.6-3で示された標準値は、1サンプルのセメントについての試験結果で、ロット、銘柄等のばらつきは考慮されていないことが示されている。このため、有効数字の桁数を少なくして標準としたとしている。昭和61年制定版と平成3年版との断熱温度上昇の相違を図2.6-1に示す。昭和61年制定版に比べて平成3年版（1991年）では、4～6℃断熱温度上昇量が高くなっていることが分かる。この値がこの後、2007年版まで16年間使用されることとなる。

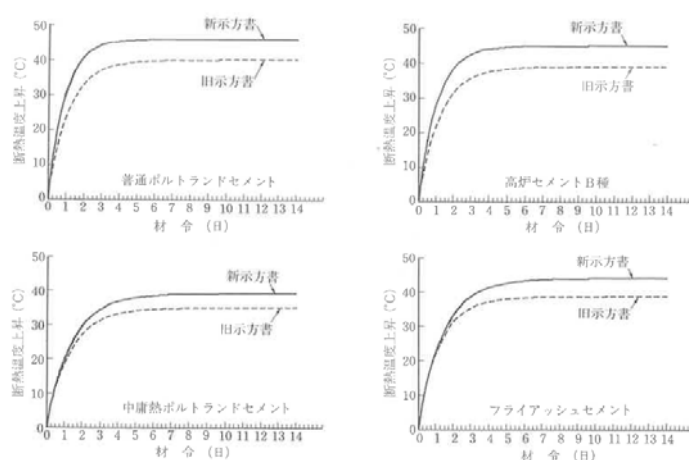
表 2.6-3 Q_{∞} と γ の標準値（平成3年版）²⁻¹²⁾

セメントの種類	打込み 温 度 (℃)	$Q(t)=Q_{\infty}(1-e^{-\gamma t})$			
		$Q_{\infty}(C)=aC+b$		$\gamma(C)=gC+h$	
		a	b	$g(\times 10^{-3})$	h
普通ポルトランドセメント	10	0.12	11.0	1.5	0.135
	20	0.11	13.0	3.8	-0.036
	30	0.11	12.0	4.0	0.337
中庸熱ポルトランドセメント	10	0.11	6.0	0.3	0.303
	20	0.10	9.0	1.5	0.279
	30	0.11	9.0	2.1	0.299
高炉セメントB種*	10	0.11	14.0	1.4	0.073
	20	0.10	15.0	2.5	0.207
	30	0.10	15.0	3.5	0.332
フライアッシュセメントB種**	10	0.15	-3.0	0.7	0.141
	20	0.12	8.0	2.8	-0.143
	30	0.11	11.0	3.0	0.059

C : kg/m³

* スラグの混入率は40%の場合。混入率が40%以外の場合については既往のデータあるいは試験により求めるのがよい。

** フライアッシュの混入率は20%。

図 2.6-1 昭和61年制定版と平成3年版との断熱温度上昇の相違²⁻³⁴⁾

2007年制定版では、高炉セメントB種、フライアッシュセメントB種の係数を見直し、低熱ポルトランドセメントを用いた場合の推定値を追加し表 2.6-4²⁻³⁵⁾のとおり改訂している。これらの改訂は、(社)日本コンクリート工学協会「マスコンクリートのひび割れ制御指針」改訂委員会の断熱温度上昇特性の見直しを考慮して、実施したことが改訂資料²⁻³⁶⁾で説明されている。

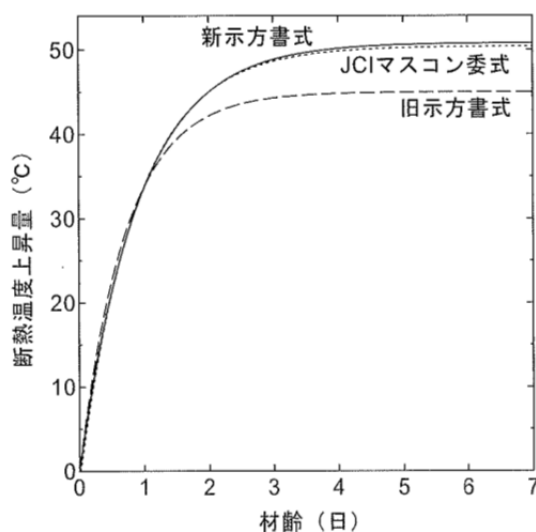
表 2.6-4 Q_{∞} と γ の標準値 (2007年制定版)²⁻³⁵⁾

セメントの種類	打込み時の温度	$Q(t) = Q_{\infty}(1 - e^{-rt})$			
		$Q_{\infty} = aC + b$ 注1)		$r = gC + h$ 注1)	
		a	b	g	h
普通ポルトランドセメント	10	0.12	11.0	0.0015	0.135
	20	0.11	13.0	0.0038	-0.036
	30	0.11	12.0	0.0040	0.337
中庸熱ポルトランドセメント	10	0.11	6.0	0.0003	0.303
	20	0.10	9.0	0.0015	0.279
	30	0.11	9.0	0.0021	0.299
早強ポルトランドセメント	10	0.13	15.0	0.0016	0.478
	20	0.13	12.0	0.0025	0.650
	30	0.13	10.0	0.0014	1.720
低熱ポルトランドセメント	10	0.11	4.2	0.0006	0.105
	20	0.10	8.0	0.0012	0.071
	30	0.10	9.4	0.0019	0.055
高炉セメントB種 ^{注2)}	10	0.13	13.2	0.0013	0.034
	20	0.13	11.9	0.0018	0.148
	30	0.13	10.9	0.0023	0.396
フライアッシュセメントB種 ^{注3)}	10	0.15	3.7	0.0011	0.107
	20	0.14	4.5	0.0019	0.213
	30	0.14	4.5	0.0030	0.487

注1) C : 単位セメント量 (kg/m^3)

注2) 高炉スラグの混入率が40% (ブレン値: $4200\text{cm}^2/\text{g}$) の場合、混入率が40%以外の場
合については、既往のデータあるいは試験により求めるのがよい。

注3) フライアッシュの混入率は18%

図 2.6-2 従来版 (平成3年版) と2007年版の断熱温度上昇の相違²⁻³⁶⁾

さらに、2012 年制定版²⁻¹⁹⁾では、JCI マスコン指針 2008 の提案する回帰式(2.6-2)式を示して、従来よりさらに精度よく断熱温度上昇特性を表現できると説明している。

$$Q(t) = Q_{\infty} [1 - \exp(-\gamma (t - t_0)^s)] \quad (2.6-2)$$

ここに、 Q_{∞} および γ は表 2.6-5 により推定することができるとしている。また、 t_0 、 s はそれぞれ温度上昇材齢の原点、温度上昇速度に関するパラメータであり、打込み温度に応じて変化する。低熱ポルトランドセメント以外では、 $s=1$ である。低熱ポルトランドセメントの場合の s は表 2.6-5²⁻¹⁹⁾の下に注記されている。表 2.6-5 のポルトランドセメントの係数は、平均的なクリンカーの鉱物組成を仮定して、複合水和発熱モデルから求めた推定値を実測値の代用として (2.6-2) 式に当てはめて係数を算定し、さらにその係数を単位セメント量と打込み温度の関数として定式化したものである²⁻³⁷⁾と説明されている。

表 2.6-5 Q_{∞} と γ の標準値 (2012 年制定版)²⁻¹⁹⁾

セメントの種類	$Q(t) = Q_{\infty}(1 - e^{-rt})$			
	$Q_{\infty} = a + b \times T_a$ ^{注1)}		$r = g + h \times T_a$ ^{注1)}	
	a	b	g	h
普通ポルトランドセメント	17.5+0.113×C ^{注2)}	-0.146+0.000308×C	-0.426+0.00207×C	0.0471+0.0000188×C
中庸熱ポルトランドセメント	8.0+0.118×C	0.0709-0.00016×C	-0.101+0.000811×C	0.00679+0.0000631×C
早強ポルトランドセメント	15.9+0.135×C	-0.106+0.0000257×C	-0.601+0.0031×C	0.0989-0.0000688×C
低熱ポルトランドセメント ^{注3)}	12.2+0.0912×C	0.0946-0.000159×C	0.218+0.0003×C	-0.00179+0.0000598×C
高炉セメント B 種 ^{注4)}	17.9+0.115×C	-0.149+0.000314×C	-0.325+0.00156×C	0.0216+0.000039×C
フライアッシュセメント B 種 ^{注5)}	3.03+0.138×C	0.0741-0.00016×C	-0.0212+0.00033×C	0.00762+0.00013×C

注 1) T_a : 打込み時の温度 (°C)

注 2) C : 単位セメント量 (kg/m^3), $250\text{kg}/\text{m}^3 \leq C \leq 400\text{kg}/\text{m}^3$

注 3) 低熱ポルトランドセメントを使用する場合、断熱温度上昇曲線は、 $Q(t) = Q_{\infty}\{1 - \exp(-rt^s)\}$ で近似する。ただし、 s は断熱温度上昇速度に関する係数であり、以下の式より求められる。

$$s = (0.302 + 0.00104 \times C) + (0.00293 - 0.0000216 \times C) \times T_a$$

注 4) 高炉スラグの混入率が 40% (ブレン値 : $4200\text{cm}^2/\text{g}$) の場合、混入率が 40% 以外の場合については、既往のデータあるいは試験により求めるのがよい。

注 5) フライアッシュの混入率は 18%

普通ポルトランドセメントと高炉セメント B 種について、打込み温度が 20°C、単位セメント量が 250 ~ 400 kg/m^3 の範囲で、終局断熱温度上昇量 Q_{∞} と断熱温度上昇速度に関する係数 γ が、S61 年版からの改訂に伴いどのように推移したかを、図 2.6-3 と図 2.6-4 に示す。

この場合、終局断熱温度上昇量は、S61 年から改訂に伴い推定値が最も高くなり、2012 年制定版の終局断熱温度上昇量が一番高くなっている。断熱温度上昇速度に関する係数は、昭和 61 年制定版がその他の版と相違が大きく、当時の推定精度が低かったことが推察される。

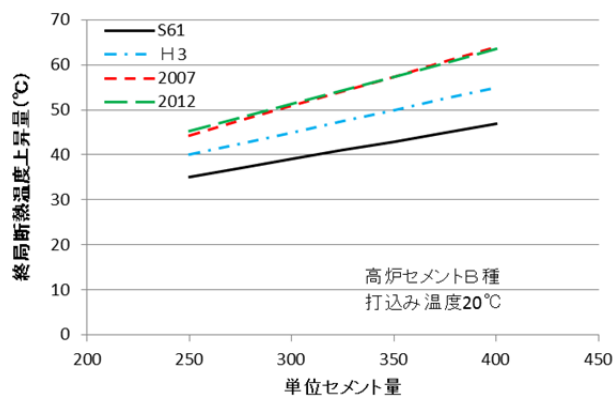
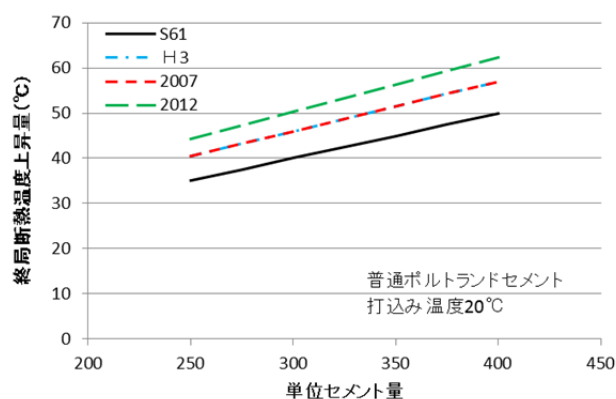


図 2.6-3 終局断熱温度上昇量の推移

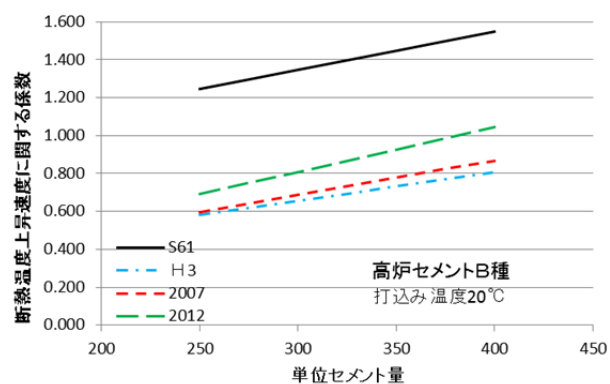
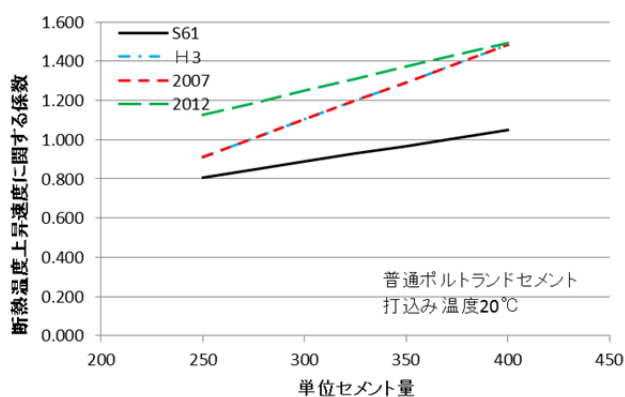


図 2.6-4 断熱温度上昇速度に関する係数の推移

また、ここでも建築学会での動きと比較すると、前出の「マスコンクリートの温度ひび割れ制御設計・施工指針（案）・同解説」²⁻²⁸⁾では、断熱温度上昇特性を(2.6-3)式と(2.6-4)式、

表 2.6-6, 表 2.6-7 のとおり規定している.

$$Q(t) = K [1 - \exp(-\alpha t)] \quad (2.6-3)$$

$$K = p(aC + b), \quad \alpha = q(gC + h) \quad (2.6-4)$$

ここに, K : 最終断熱温度上昇量

α : 温度上昇速度に関する定数

C : 単位セメント量 (kg/m^3)

a, b, g, h, p, q : K および α を求めるための係数

表 2.6-6 打ち込み温度 20℃のK値と α （建築学会指針（案））²⁻²⁸⁾

セメント種類	$K=aC+b$		$\alpha=gC+h$	
	a	b	g	h
普通ポルトランドセメント	0.121	13.6	0.0029	0.197
フライアッシュセメントB種	0.122	9.0	0.0025	-0.024
高炉セメントB種	0.110	16.8	0.0018	0.234
中熱ポルトランドセメント	0.099	14.5	0.0023	-0.077
低熱ポルトランドセメント	0.089	13.8	0.0014	-0.094
早強ポルトランドセメント	0.121	14.9	0.0031	0.419

（ただし、本式の適用範囲として、単位セメント量 C の上限値を 450kg/m³とする。）

表 2.6-7 打ち込み温度 20℃のK値と α に対する補正係数一覧（建築学会指針（案））²⁻²⁸⁾

セメント種類	$K=aC+b$		$\alpha=gC+h$	
	a	b	g	h
普通ポルトランドセメント	0.121	13.6	0.0029	0.197
フライアッシュセメントB種	0.122	9.0	0.0025	-0.024
高炉セメントB種	0.110	16.8	0.0018	0.234
中熱ポルトランドセメント	0.099	14.5	0.0023	-0.077
低熱ポルトランドセメント	0.089	13.8	0.0014	-0.094
早強ポルトランドセメント	0.121	14.9	0.0031	0.419

（ただし、本式の適用範囲として、単位セメント量 C の上限値を 450kg/m³とする。）

普通ポルトランドセメントと高炉セメントB種の断熱温度上昇量と断熱温度上昇速度に関する係数が土木学会と建築学会とでどのように相違するか、図 2.6-3 と図 2.6-4 に建築学会の推定式を用いた場合の値を追記して、図 2.6-5 と図 2.6-6 で比較した。

図 2.6-6 の左図に示される、普通ポルトランドセメントの断熱温度上昇速度に関する係数以外は、建築学会指針（案）は土木学会 2012 年制定版に比較的近い数値となっている。

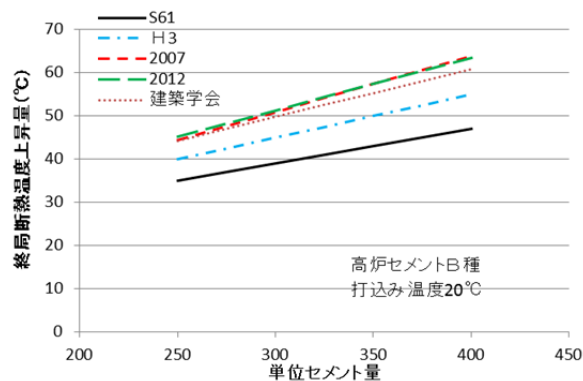
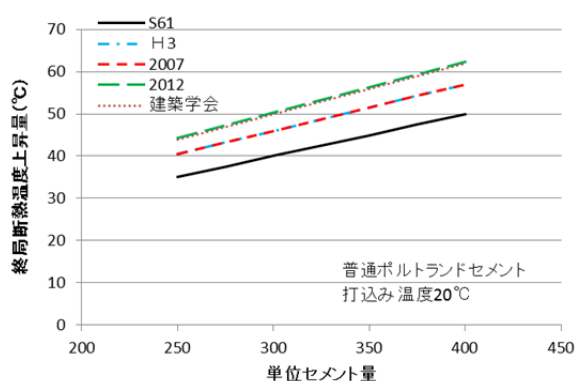


図 2.6-5 断熱温度上昇量の比較（建築学会式）

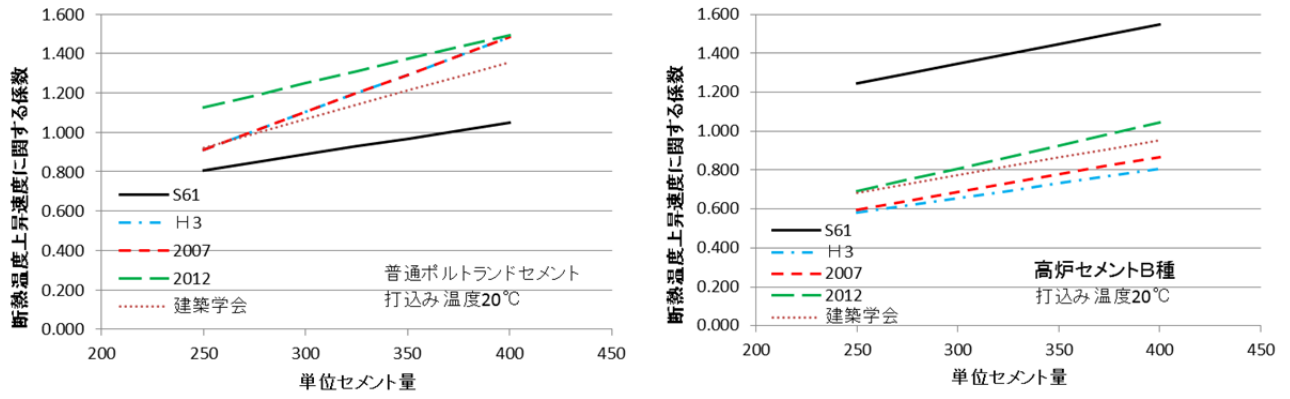


図 2.6-6 断熱温度上昇速度に関する係数の比較（建築学会式）

2.7 物性の温度依存性，有効材齢

1986年に初めて温度ひび割れ照査用の引張強度が示された，日本コンクリート工学協会編：マスコンクリートのひび割れ制御指針（1986年）²⁻²⁶⁾では，割裂引張強度を推定する(2.4-2)式（再掲）に有効材齢を用いることで，その温度依存性が考慮されていた．ヤング係数も同じ有効材齢の関数であり，温度依存性が考慮されていた．

$$f_t(t_e) = 1.4 \times \sqrt{f'_c(t_e)} \quad (2.4-2) \quad (\text{再掲})$$

ここに， $f_t(t_e)$ ：有効材齢 t 日における引張強度（kgf/cm²）

$f'_c(t_e)$ ：有効材齢 t 日における圧縮強度（kgf/cm²）

t_e ：有効材齢（日） $= \sum \frac{T_m + 10}{30} \Delta t$

T_m ：コンクリートの平均温度（℃）

Δt ：コンクリートの温度が T_m ℃である日数（日）

しかし，昭和61年制定版のコンクリート標準示方書では，これらの有効材齢による温度依存性は考慮されていなかったことは前述のとおりである．この理由として，筆者は，当時のパソコン等の計算機的能力では，そこまで厳密に検討ができない状況にあり，また結果となる，部材温度や応力，指数，ひび割れ発生確率の算定精度の要求もあまり高くは無かったこと，土木マスコンクリートであり，内部温度上昇を考慮すれば部材平均20℃以上になる場合が多いと想定され，有効材齢を用いない方が安全側の検討となる場合が多いこと等を挙げた．

これが，2012年制定版のコンクリート標準示方書では，「マスコンクリートのひび割れ制御指針2008」²⁻¹⁸⁾に準じて，割裂引張強度と有効ヤング係数の推定式に有効材齢(2.7-1)式を取り入れることで，それらの温度依存性を初めて評価するようになった．

$$t' = \sum_{i=1}^n \Delta t_i \cdot \exp \left[13.65 - \frac{4000}{273 + T(\Delta t_i)/T_o} \right] \quad (2.7-1)$$

t' ：有効材齢（日）

Δt_i ：温度が T （℃）である期間の日数（日）

T_o ：1℃

(2.7-1)式は，ある温度における材齢をアレニウス式，(2.7-2)式により，基準温度 T_s （20℃）の材齢に等価換算したもので，アレニウス式において気体定数 R （8.314 J/mol），活性化エネルギー E （33.5kJ/mol）としたものである．コンクリートの等価材齢（有効材齢）を算定する式として活用したのは，CEB Model Code90²⁻³⁸⁾からであり，JCIで当初説明された有効材齢よりも熱力学的な理論に準じており説明性は高い．

$$t' = \sum_{i=1}^n \Delta t_i \cdot \exp \left[-\frac{E}{R} \left(\frac{1}{T(\Delta t_i)} - \frac{1}{T_s} \right) \right] \quad (2.7-2)$$

基本的には全ての物性がセメント水和反応による温度に依存していると考えられるので，これにより構造物中の温度の相違が各種物性に与える影響を解析的に評価できることになる．現在，実務的には，汎用的になっている3次元有限要素法を用いた解析条件において，同式で有効材齢を使用する指定をするだけで，各要素における物性に温度依存を考慮できる事になっている．解析精度の向上に寄与する方法を2012年制定版からは標準とすることとなった．

2.8 物性のばらつきとひび割れ発生確率

マスコンクリートのひび割れは、昭和 61 年制定版のコンクリート標準示方書から、温度ひび割れ指数法によって確率的に扱われるようになる。ひび割れ指数は、ひび割れの確率的な性質を考慮し得るようにしたものである。これは、仮に、コンクリートの真の強度が与えられ、また、計算から算出される温度応力が正しいときでも、温度ひび割れ指数が 1.0 すなわち、引張強度＝引張応力の場合に対するひび割れ発生の確率は 50% であり、このことからひび割れは確率的な性質をとると昭和 61 年制定版の改訂資料²⁻⁷⁾で説明されている。

これは、実構造物でのひび割れの有無を確率として捉え、この確率をひび割れ指数で評価できるとしたものである。

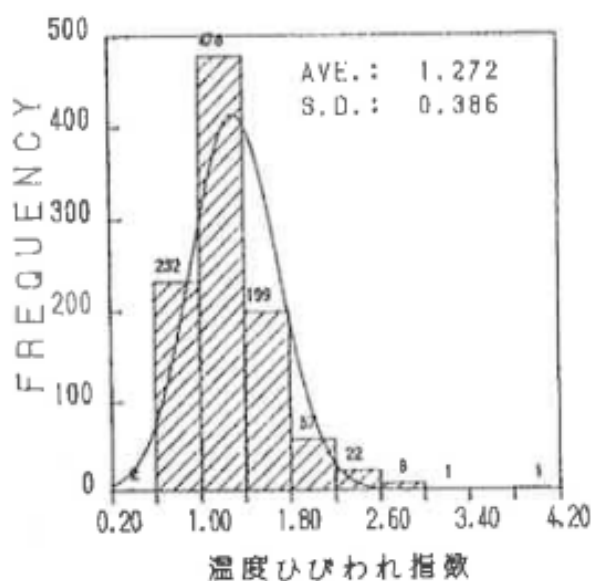
ひび割れを材料等のばらつきから確率的に扱った基礎的な研究が松井ら²⁻³⁹⁾、中村ら²⁻⁴⁰⁾により行われている。松井らは、表 2.8-1 に示す解析パラメータが正規分布しているとしてばらつきを持たせて、モンテカルロ法を利用してパラメータ 1000 とおり設定し、表 2.8-2 の確定条件と共に用いて温度応力解析を行っている。解析の結果、ひび割れ指数を図 2.8-1 のとおり算出し、ひび割れ指数が 1 以下になる頻度の割合をひび割れ発生確率として与えた。解析条件が表 2.8-1 のとおりばらついていたとすると、図 2.8-1 のとおり、ひび割れ発生確率は約 25% になることを示した。確率論を利用して、ひび割れ発生確率を算出した初めての論文である。しかしながら、確率算定的方法的に取扱いが難しく、時間を要する方法であったために、一般化されなかったと考えられる。

表 2.8-1 解析条件（変動因子の特性値）²⁻³⁶⁾

項	目	基準値	標準偏差
コンクリートの熱伝導率	(kcal/mh℃)	2.50	0.50
コンクリートの比熱	(kcal/kg℃)	0.31	0.031
断熱温度上昇実験定数	$Q_{\infty}(^{\circ}\text{C})$	42.0	5.0
	γ	1.0	0.3
コンクリートと外気温の間の熱伝達率	(kcal/m ² h℃)	10.0	1.0
コンクリートの熱膨張係数	(1/℃)	10.0×10^{-6}	20.0×10^{-7}
材令91日のコンクリートの圧縮強度	(kgf/cm ²)	350.0	35.0
式(15)の ε^*		0.0	0.1

表 2.8-2 その他の解析条件²⁻³⁶⁾

項	目	定 数
コンクリートの密度	(kg/m ³)	2312.0
岩盤の熱伝導率	(kcal/mh℃)	1.94
岩盤の密度	(kg/m ³)	2600.0
岩盤の比熱	(kcal/kg℃)	0.25
外気温	(℃)	20.0
固定温度境界面の岩盤温度	(℃)	15.0
コンクリートの打設温度	(℃)	20.0
岩盤の初期温度	(℃)	17.5
軸拘束係数： R_N		0.5
曲げ拘束係数： R_M	(ピーク前)	1.0
曲げ拘束係数： R_M	(ピーク後)	1.0

図 2.8-1 松井らによる温度ひび割れ指数の変動²⁻³⁶⁾

さらに、引張応力が引張強度を超える確率をひび割れ発生確率として、R-S モデルを利用した中村らの研究²⁻³⁷⁾が 1995 年に発表されている。中村らは、マット状（上面からだけ熱伝達）、壁状、スラブ状（上面、側面から熱伝達）の 3 種類の構造物について、表 2.8-3～表 2.8-5 に示すように温度応力解析入力値の変動係数に幅を持たせて入力値をパラメトリックに扱い、2 次元有限要素法により温度応力解析を実施し、ひび割れ発生確率を算出している。この結果、ひび割れ指数に対するひび割れ発生確率の変動係数による変化を図 2.8-2 のとおり示している。ひび割れ発生確率を正規分布から求めた画期的な論文であるが、既にコンクリート標準示方書にひび割れ発生確率図が示されてから 7 年経過していたために、①ひび割れ指数に対してひび割れ発生確率曲線は一義的に決まる、②実際の構造物におけるひび割れ発生

有無（ひび割れ発生確率）とひび割れ指数の単純な対比から求まる，というような定見が技術者の間に広まっており，本論文で示している R-S モデルの意味の本質的理解が進まなかったと考えられる．すなわち，ひび割れ発生確率は，引張応力と引張強度のばらつきを与えれば，引張応力が引張強度を上回る確率として，理論的に算出できるという事を理解できなかったのである．中村らは論文の主眼をパラメータのばらつきとその際のひび割れ発生確率の変動にしていたために，具体的なひび割れ発生確率の算定例までは解説しておらず，実務者の理解が進まなかったものと推察される．

表 2.8-3 マット状構造物の解析条件²⁻³⁷⁾

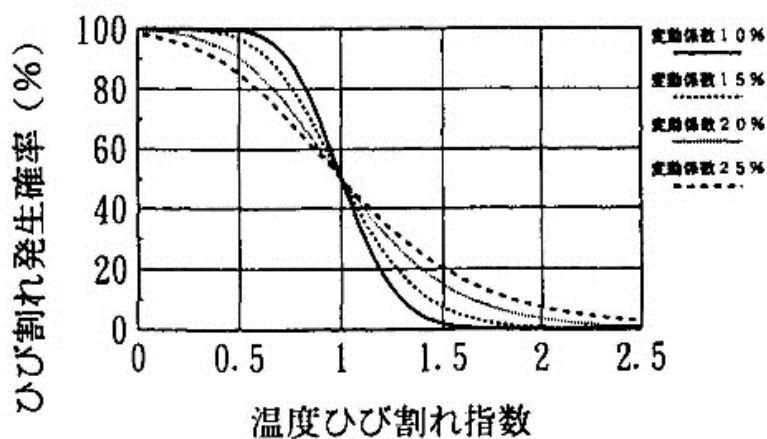
	コンクリート	地盤	ばらつき
比熱 kcal/kg°C (J/kg°C)	0.25 (1047)	0.36 (1507)	変動係数 10~25%
熱伝導率 kcal/mh°C (W/m°C)	2.06 (2.40)	1.26 (1.47)	変動係数 10~25%
密度 (kg/m³)	2350	1600	変動係数 10~25%
初期温度 (°C)	21	15	——
熱伝達率 kcal/m²h°C (W/m²°C)	3.6 (4.2) 12.0 (14.0)	t < 5 日 t ≥ 5 日	変動係数 10~25%
断熱温度上昇特性	Q(t) = Q _∞ (1 - e ^{-γt})	Q _∞ = 45.6 γ = 0.812	変動係数 10~25%
外気温 (°C)	18		5~12.5°C の変動
熱膨張係数 (1/°C)	10 × 10 ⁻⁶		変動係数 10~25%
圧縮強度 kgf/cm²	f _c (t) = $\frac{t}{4.5 + 0.95t}$ f _c (91) (f _c (91) = 225kgf/cm²)		——
引張強度 kgf/cm²	f _t (t) = 1.4√f _c (t)		変動係数 10~25%
有効ヤング係数 kgf/cm²	E _e (t) = ψ(t) × 1.5 × 10 ⁴ √f _c (t) t < 3 日 : ψ(t) = 0.73 3 < t < 5 日 : ψ(t) = 0.135t + 0.325 t > 5 日 : ψ(t) = 1.0		変動係数 10~25%
外部拘束係数 R _N	0.01		——
R _N (ピーク前)	0.7		——
R _N (ピーク後)	1.1		——

表 2.8-4 壁状構造物の解析条件²⁻³⁷⁾

	期待値	ばらつき
比 熱 kcal/kg°C (J/kg°C)	0.23 (963)	変動係数 10~25%
熱伝導率 kcal/mh°C (W/m°C)	1.80 (2.10)	変動係数 10~25%
密 度 (kg/m³)	2300	変動係数 10~25%
打込み温度 (°C)	24	—
新コンクリート熱伝達率 kcal/m²h°C (W/m²°C)	5.0 (5.8) $t < 2$ 日 10.0 (11.6) $t \geq 2$ 日	変動係数 10~25%
基礎コンクリート熱伝達率 kcal/m²h°C (W/m²°C)	10.0 (11.6)	変動係数 10~25%
断熱温度上昇式	$Q(t) = Q_{\infty}(1 - e^{-\gamma t})$ $Q_{\infty} = 40.5$ $\gamma = 0.914$	変動係数 10~25%
外 気 温 (°C)	18.0	5~12.5°C の変動
熱膨張係数 (1/°C)	10×10^{-6}	変動係数 10~25%
圧縮強度 kgf/cm²	$f_c(t) = \frac{t}{4.5 + 0.95t} f_c(91)$ ($f_c(91) = 322 \text{ kgf/cm}^2$)	—
引張強度 kgf/cm²	$f_t(t) = 1.4 \sqrt{f_c(t)}$	変動係数 10~25%
有効ヤング係数 kgf/cm²	$E_e(t) = \psi(t) \times 1.5 \times 10^4 \sqrt{f_c(t)}$ $t < 3$ 日: $\psi(t) = 0.73$ $3 < t < 5$ 日: $\psi(t) = 0.135t + 0.325$ $t > 5$ 日: $\psi(t) = 1.0$	変動係数 10~25%
コンクリート基礎のヤング係数 kgf/cm² (MPa)	2.1×10^4 (20593)	変動係数 10~25%
外部拘束係数 R_w	0	—
R_w (ピーク前)	1.0	—
R_w (ピーク後)	1.0	—

表 2.8-5 スラブ状構造物の解析条件²⁻³⁷⁾

	コンクリート	地盤	ばらつき
比熱 kcal/kg°C (J/kg°C)	0.31 (1298)	0.25 (1047)	変動係数 10~25%
熱伝導率 kcal/mh°C (W/m°C)	2.50 (2.91)	1.94 (2.26)	変動係数 10~25%
密度 (kg/m³)	2312	1600	変動係数 10~25%
初期温度 (°C)	15.0	15.0	—
熱伝達率 kcal/m²h°C (W/m²°C)	5.0 (t<2日) 12.0 (t>2日)	12.0 (14.0)	変動係数 10~25%
断熱温度上昇特性	$Q(t) = Q_{\infty}(1 - e^{-\gamma t})$		$Q_{\infty} = 56.5$ $\gamma = 0.9$ 変動係数 10~25%
外気温 (°C)	15.0		5~12.5°C の変動
熱膨張係数 (1/°C)	10×10^{-6}	10×10^{-6}	変動係数 10~25%
ポアソン比	0.167	0.2	変動係数 10~25%
圧縮強度 kgf/cm²	$f_c(t) = \frac{t}{4.5 + 0.95t} f_c(91)$ $(f_c(91) = 322 \text{ kgf/cm}^2)$		—
引張強度 kgf/cm²	$f_t(t) = 1.4 \sqrt{f_c(t)}$		変動係数 10~25%
有効ヤング係数 kgf/cm²	$E_c(t) = \psi(t) \times 1.5 \times 10^4 \sqrt{f_c(t)}$ $t < 3 \text{ 日} : \psi(t) = 0.73$ $3 < t < 5 \text{ 日} : \psi(t) = 0.135t + 0.325$ $t > 5 \text{ 日} : \psi(t) = 1.0$		変動係数 10~25%
地盤ヤング係数 kgf/cm²	—	5.0×10^3	変動係数 10~25%

図 2.8-2 中村によるひび割れ指数とひび割れ発生確率 (マット)²⁻³⁷⁾

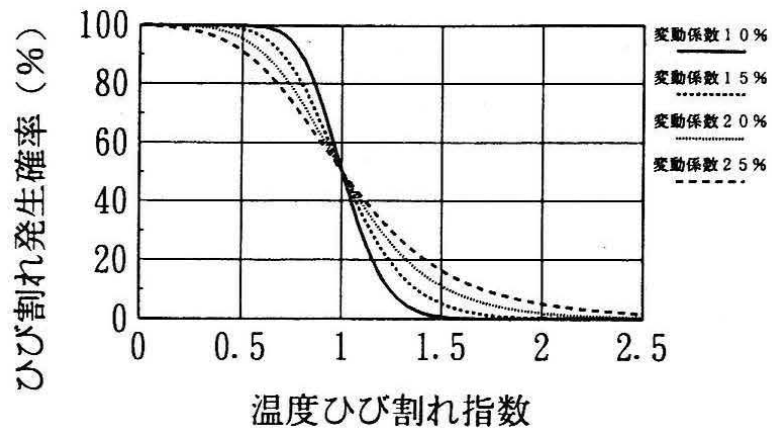


図 2.8-3 中村によるひび割れ指数とひび割れ発生確率（壁）²⁻³⁷⁾

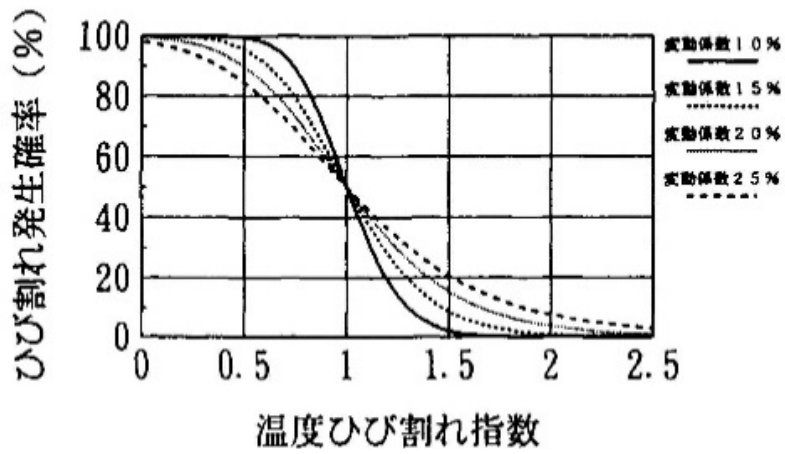


図 2.8-4 中村によるひび割れ指数とひび割れ発生確率（壁）²⁻³⁷⁾

第3章 ひび割れ発生確率図の分析と現状の課題

3.1 ひび割れ発生確率図と引張強度の関係

3.1.1 ひび割れ発生確率図の変遷における引張強度

2章で示したとおり、これまでのひび割れ発生確率図を図 3.1-1 のとおり並べて見ると、ひび割れ指数 1.0 の時のひび割れ発生確率は、40%（昭和 61 年制定版）⇒50%（平成 8 年制定版）⇒85%（平成 11 年版）⇒50%（2012 年制定版）と変遷していることが分かる。

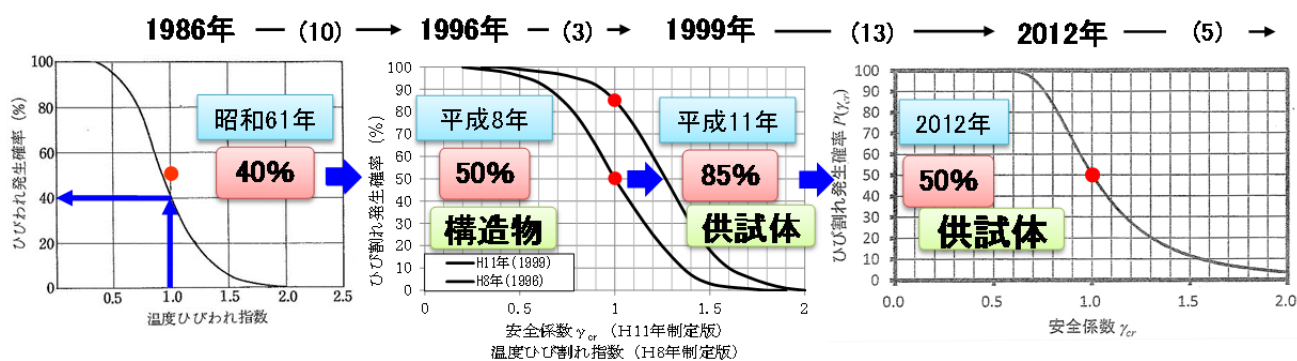


図 3.1-1 ひび割れ発生確率図の変遷と指数 1.0 の時のひび割れ発生確率, 引張強度

コンクリートにひび割れが発生するのは、引張応力が引張強度を超えた時であり、引張応力と引張強

度が一致する時、すなわちひび割れ指数が1の時にひび割れが発生する確率は50%になることは直観的に当然である。非常に重要な概念になるのは、「ひび割れ指数が1の時にひび割れ発生確率が50%となるのは、構造物中の引張強度と引張応力でひび割れ指数を求めた時である」ということである。すなわち、割裂引張強度のような供試体強度を直接利用してひび割れ指数を求めた場合には、ひび割れ指数が1でもひび割れ発生確率は50%にならずに、50%よりも大きくなるのである。この理由は、後に詳述するように、構造物中の引張強度が割裂引張強度よりも小さくなるのが前提にある（構造物中と供試体との温度差の影響は、別途考慮した上での比較の話である）。ここでの、ひび割れ発生確率は、あくまで実構造物における現象の評価であり、供試体の現象を扱うものではない。ひび割れ指数が1でひび割れ発生確率が50%となるのは、概念的な引張強度の定義をひび割れが発生する時の強度としているためであり、すなわち、供試体ではなくて、実構造物の引張強度を扱う必要があるのである。このため、供試体強度を直接利用してひび割れ指数を求めた場合には、ひび割れ指数が1でもひび割れ発生確率は50%よりも大きくなってしまうのが当然である。

それではなぜ2012年制定版のひび割れ発生確率は50%でよいのであろうか。2012年制定版では、割裂引張強度を利用しているのに、ひび割れ指数が1の時にひび割れ発生確率50%を示しており、上記の説明と整合していない。この点を考えるために、もう一度、このひび割れ発生確率図の改訂を引張強度との関係から丁寧に見ていく。

昭和61年制定版から平成8年制定版への改訂の経緯を図3.1-2に示す。

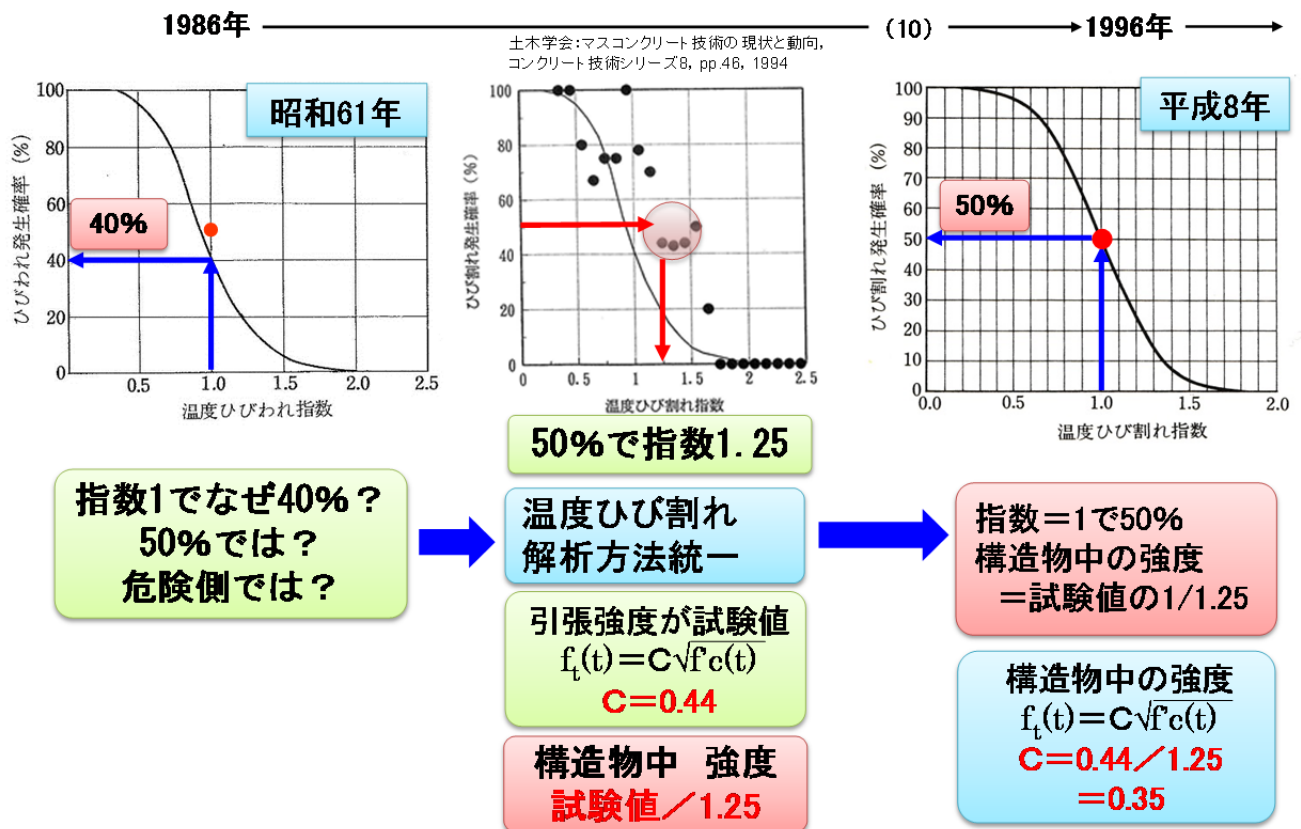


図 3.1-2 昭和61年制定版から平成8年制定版への改訂の経緯

昭和 61 年制定版のひび割れ発生確率図は、異なる研究者のひび割れ指数とひび割れ発生確率の関係のデータ 230 件余りをまとめて再整理して、作成された図であった。このため、ひび割れ指数の解析条件や方法が研究者毎に相違する等の課題が残っていた。また、昭和 61 年制定版のひび割れ発生確率図では、ひび割れ指数 1 の時のひび割れ発生確率は 40% となっている。このため、ひび割れ指数 1 の時のひび割れ発生確率が 50% にならない理由や危険側の確率ではないかとの指摘に対する説明性を向上させる趣旨もあり、ひび割れ指数の算出方法を統一し、データを再整理したものが、「マスコンクリート技術の現状と動向、コンクリート技術シリーズ 8」で示された図 3.1-2 の中央の図³⁻¹⁾である。これは、壁状構造物を対象とした昭和 61 年制定版のデータやその時点のアンケート調査結果等、47 ケースを整理したものと説明がある。この図では、ひび割れ発生確率が 50% の時にひび割れ指数は 1.25 程度となっていることが分かる。この時のひび割れ指数の算定にはコンクリート標準示方書で示された算定式、割裂引張強度を推定している(3.1-1)式が用いられている (SI 単位系に換算, CGS 単位系では 0.44 が 1.4 となる)。

$$f_t(t) = 0.44 \sqrt{f'_c(t)} \quad (3.1-1)$$

ここに、 $f_t(t)$: 材齢 t 日のコンクリートの引張強度 (N/mm²)

$f'_c(t)$: 材齢 t 日のコンクリートの圧縮強度 (N/mcm²)

このようなデータ等から、構造物中の強度を割裂引張強度の 1/1.25 倍と想定すれば、ひび割れ指数が 1 の時にひび割れ発生確率は 50% になると説明している。詳細なデータは明らかにされていないが、平成 8 年制定版はこのような考え方で図 3.1-2 の右図に改訂された事は、その改訂資料から読み取ることができる。このため、平成 8 年制定版に示されるひび割れ指数を算定するための、引張強度推定式の係数は、(3.1-2)式のとおりの 0.44 から 0.35 に変更された。

$$f_t(t) = 0.35 \sqrt{f'_c(t)} \quad (3.1-2)$$

ここに、 $f_t(t)$: 材齢 t 日のコンクリートの引張強度 (N/mm²)

$f'_c(t)$: 材齢 t 日のコンクリートの圧縮強度 (N/mm²)

この理由を、条文では、「構造物中のコンクリートの引張強度は乾燥状態、載荷速度および寸法の相違等により試験で得られた値より低下する傾向にある。そこで、試験により得られた値を 2 割程度低減して用いるのが望ましい」、式の解説では「温度ひび割れが平均的な引張強度より弱い引張強度の箇所で生じる可能性があり、また構造物中のコンクリートの引張強度が乾燥状態、載荷速度および寸法の相違等により、試験でえられた値を 2 割低減した値をとることが安全であることから、0.35 を標準とした」と重ねて説明したのである。

平成 8 年制定版では、引張強度として構造物中の引張強度を使用することで、ひび割れ指数が 1 の時のひび割れ発生確率を 50% と設定し、引張強度と応力が等しい時のひび割れ発生確率の直観的な説明性を担保したのである。

しかし、平成 11 年版では、あえてこれを 85% にまた変更している。平成 11 年版のひび割れ発生確率図は図 3.1-3 の左図に示すとおり、平成 8 年制定版のひび割れ発生確率図の横軸を $1/0.8 = 1.25$ 倍して曲線を右にシフトしていると説明されている³⁻²⁾。この平成 8 年制定版から平成 11 年版への改訂では、引張強度推定式の係数も、(3.1-3)式のとおりの 0.35 から 0.44 にまた変更された。

$$f_t(t) = 0.44 \sqrt{f'_c(t)} \quad (3.1-3)$$

ここに、 $f_t(t)$: 材齢 t 日のコンクリートの引張強度 (引張強度特性値)

$f'_c(t)$: 材齢 t 日のコンクリートの圧縮強度 (圧縮強度特性値)

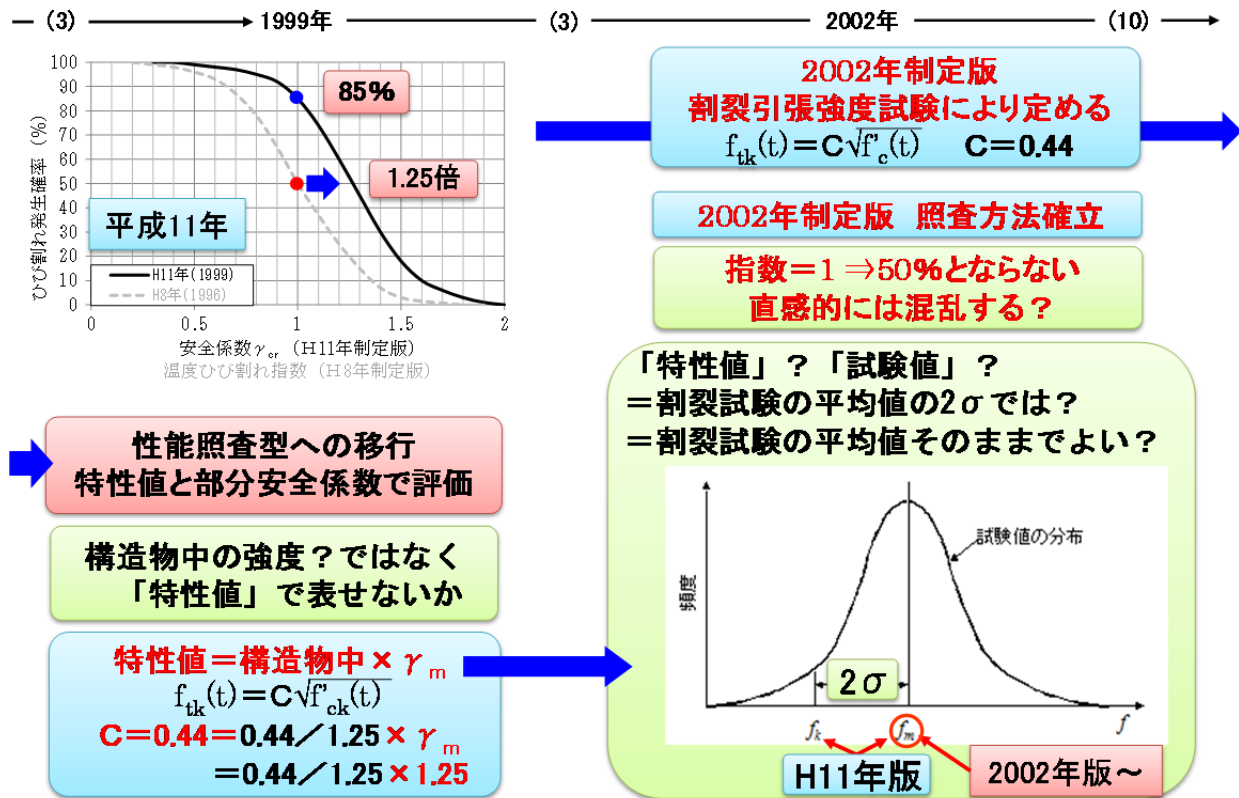


図 3.1-3 平成 11 年版、2002 年制定版のひび割れ発生確率図と引張強度の改訂経緯

平成 8 年制定版で、引張強度を割裂引張強度の 0.8 倍（1.25 で除す）する扱いに関して、実務者の理解があまり進まなかったことから、平成 11 年版では分かり易くするために、図 3.1-3 に示すように割裂引張強度をそのまま（1.25 で除さず）に使用する事に、改訂したと考えられる。あるいはそれ以上の理由として、性能照査型へ移行するために、限界状態設計法との整合を意識して、構造物中の強度は供試体の試験値から設定する特性値を材料係数で除したものであるという概念を、温度ひび割れ照査における引張強度にも適用を図ったものと解釈できる。すなわち、平成 11 年版では、構造物中の引張強度は、平成 8 年制定版のように直接これを引張強度とするのではなくて、供試体の割裂引張強度から設定する特性値（これを引張強度とする）を材料係数（ここでは 1.25 相当）で除した値で推定されるという、限界状態設計法における一般的な考え方のステップに合わせたものと推察される。

しかし、この(3.1-3)式の引張強度の改訂は、実務者には、さらにその意味の理解を難しくしてしまったと考えられる。昭和 61 年制定版から利用されている(3.1-3)式において、①係数 c の度重なる変更、②配合強度、③設計基準強度、④試験で得られた値を 2 割低減、⑤特性値、⑥割裂引張強度、⑦構造物中の引張強度等、実務レベルではその用語の意味の理解と使い分けが困難であったと考えられる。

特に、平成 11 年版において、引張強度を特性値としている扱いについては、混乱が大きくなった。一般的に特性値は、図 3.1-3 の右図に示される f_k のように、特性値 f_k よりも試験値が小さくなる相対頻度（確率）を許容できる大きさとなるように、標準偏差 σ にある倍数を乗じて設定するものである。例えば、圧縮強度の特性値は 5% 以下の確率となるように平均値 f_m から 2σ 小さい値に設定されるのが、一

一般的である。この例のように、平成11年版の引張強度の特性値を読むと、割裂引張強度の試験（平均値）より、 2σ 小さい値を特性値として、さらにこの f_k よりも0.8倍（1.25で除）した値が構造物中の引張強度と実務者に捉えられた。これは、引張強度推定式に使用される圧縮強度が、圧縮強度特性値と明記されていたことから、そのように理解されるのが一般的であったと推察される。

ところが、平成11年版における特性値は、本来、平均値を指していた。すなわち、50%危険率を許容した割裂引張強度の期待値そのものを、特性値と意図したものである。

このことは、次の2002年制定版の改訂において示される。2002年制定版の引張強度推定式が示される箇所において、式や係数は変更せずに、平成11年版の引張強度特性値から、割裂引張強度試験値を用いるというように、文言だけが改訂された一方で、ひび割れ指数の定義の解説文においては、引張強度（特性値）と構造物中の引張主応力（算定値）の比としてひび割れ指数を定義するとの文言がある。すなわち意図としては、引張強度の推定式の引張強度は割裂引張強度試験値（平均値）を使用するが、これは特性値を示している、というような理解が可能なのである。すなわち、平成11年版の特性値の本来の意味を理解する助けとなる一文と読むことができる。本来、特性値は、構造物の破壊等に直結する終局状態を考慮するような場合においては、5%以下にならないようにするために、 2σ まで低減するが、ひび割れ現象のような使用状態の評価を行う場合は期待値そのままを特性値とするという限界状態設計法における思想がある。この引張強度の記述の変遷はこのような背景の理解の混乱の整理だったと考えられる。

ここにおいて、引張強度に何をを用いた時に、どのようなひび割れ発生確率図、ひび割れ発生確率曲線になるか、という対応が完全に整理されたと考えられる。この2002年制定版のひび割れ発生確率図と引張強度が、この後2012年制定版まで用いられることになる。しかしながら、このように、ひび割れ発生確率図と引張強度との関係性の説明が完全に整理された2002年制定版においても、ひび割れ指数が1の時にひび割れ発生確率が50%にならずに、85%をとるという、直観的には理解しづらい側面が残ったことが、次に説明する2012年制定版での混乱の遠因になったとも考えられる。

このように、2002年制定版においてひび割れ発生確率図と引張強度との関係性の整理は完成されたと言えるが、2002年制定版においても、温度応力解析方法は温度解析を2次元有限要素法、応力解析をCP法で行うことを標準として制定した平成8年制定版の曲線が元となっていることは、前述の経緯から明らかである。一方、実務者の間では、解析精度の向上、手法の説明性の高さ、解析ユーザーにとってのインターフェースの便利さ、さらにパソコン性能の向上による解析時間の短縮によって、温度応力解析を一貫して3次元有限要素法により実施することが一般的になってきていた。このような状況に合わせて、2012年制定版では、新たに728構造物の実際のひび割れデータを収集し直し、これらの温度応力解析を3次元有限要素法により実施し、割裂引張強度を使用してひび割れ指数を求めて、ひび割れ発生確率図を図3.1-4のとおり改訂した。ただし、この際の割裂引張強度の推定式も従来式から(3.1-4)式に変更している。

$$f_{tk}(t') = C_1 \cdot f'_c(t')^{c_2} \quad (3.1-4)$$

ここに、 $f'_c(t')$ ：有効材齢 t' 日におけるコンクリート圧縮強度（N/mm²）

$f_{tk}(t')$ ：有効材齢 t' 日におけるコンクリート引張強度（N/mm²）

C_1 、 C_2 ：養生方法によって決まる定数で $C_1=0.13$ 、 $C_2=0.85$ を標準とする。

t' ：有効材齢（日）

$$t' = \sum_{i=1}^n \Delta t_i \cdot \exp \left[13.65 - \frac{4000}{273 + T(\Delta t_i)/T_o} \right]$$

Δt_i : 温度が T (°C) である期間の日数 (日)

T_o : 1°C

—— (13) ———→ 2012年

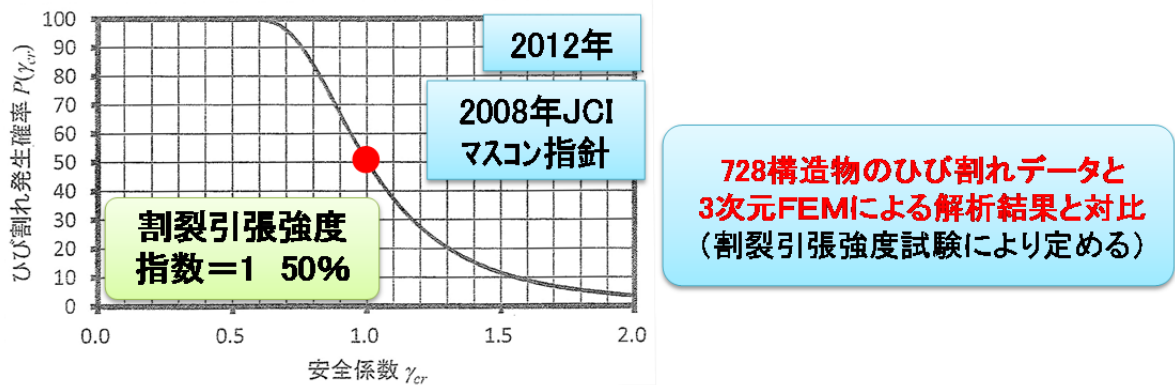


図 3.1-4 2012 年制定版のひび割れ発生確率図と引張強度

この 2012 年制定版のひび割れ発生確率図では、図 3.1-4 に示されるとおり、割裂引張強度を使用したひび割れ指数が 1 の時にひび割れ発生確率が 50%になっている。改訂経緯を見てくると、このことは、割裂引張強度と構造物中の強度が等しいことを意味していることがわかる。しかしながら、これもまた前述のとおり、あるいはまた後ほど詳述することも含め、割裂引張強度の方が構造物中の引張強度よりも大きいことが一般的である。すなわち、実際上の標準的な施工を行った構造物において、このひび割れ発生確率図は現実的ではないことが分かる。すなわち、実際に割裂引張強度試験を行い、その結果を用いてひび割れ指数を算定し、2012 年制定版のひび割れ発生確率図を利用して、構造物中のひび割れ発生確率を予測した場合、実際よりも小さいひび割れ発生確率を算定する結果となり、危険側の曲線になっている、このことは、過去の改訂の経緯から明らかである。

平成 11 年版と 2012 年制定版ともに割裂引張強度を用いてひび割れ指数を算定している。しかし、ひび割れ指数が 1 の時のひび割れ発生確率は、平成 11 年版では 85%，2012 年制定版では 50%と大幅に相違する。ひび割れ発生確率が 85%から 50%と飛躍的に向上する契機は材料、施工の観点からは乏しく、このような危険側のひび割れ発生確率図の曲線が選定されたのは、引張強度の推定式が変更されたことが理由の一つではないかと考えている。2012 年制定版の引張強度推定式は、JCI マスコン指針 2008^{3・3)}にその改訂理由となるデータが図 3.1-5 黒実線のとおり示されている。しかし、推定された曲線（黒実線）は、プロットデータの下限を通っているように見える。筆者らが目視であるが、このプロット中心を通るように図 3.1-5 上に赤実線で回帰した曲線^{3・4)}をおおよそ 1/1.25 倍すると、2012 年制定版の引張強度推定式にほぼ一致する。このことは、2012 年版の引張強度推定式が、実際の割裂引張強度のちょうど 1/1.25 倍程度小さい値を推定していた可能性を示唆している。すなわち、2012 年版の引張強度推定式は割裂引張強度の 1/1.25 倍程度、従来、構造物中の引張強度とみなされていた値を推定していたように推察できる。この引張強度を使用して（実際上は構造物中の引張強度相当を割裂引張強度として）、

ひび割れ指数を算定したことが、ひび割れ指数が1の時にひび割れ発生確率が50%となるひび割れ発生確率図となった一因ではないかと考える。

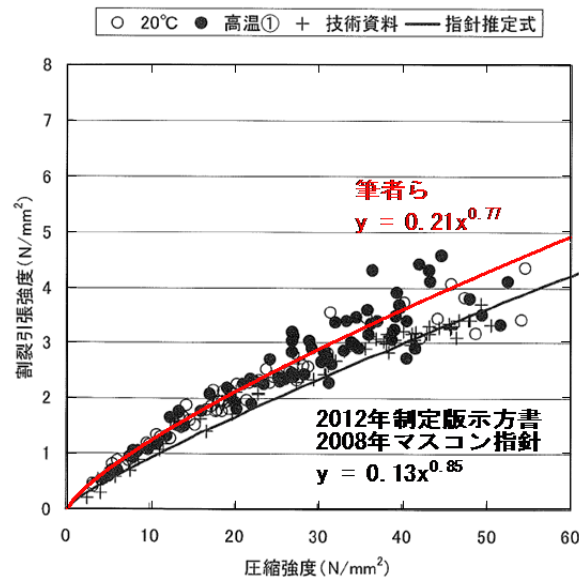


図 3.1-5 2012 年制定版の引張強度の説明図³⁻³⁾に筆者らの推定式を追記³⁻⁴⁾

過去のひび割れ発生確率図の改訂の経緯があまり振り返られず、温度応力解析手法の変更への対応に主眼が置かれたために、ひび割れ指数が1の時にひび割れ発生確率が50%の曲線に、割裂引張強度試験結果の推定式を組み合わせってしまったのではないかと推察される。

3.1.2 構造物中の引張強度と割裂引張強度

ひび割れ発生確率図を考える上で、構造物中の引張強度が供試体の割裂引張強度とどのような関係にあるかが重要であることを、ここまで述べてきた。特に、前項での議論は割裂引張強度が構造物中の引張強度よりも大きいことが前提となっている。ここでは、この関係性について再度確認していく。

土木学会編「最新のマスコンクリート技術、コンクリート技術シリーズ14 1996」³⁻⁵⁾では、割裂引張強度を圧縮強度の平方根に定数を乗じた式により近似した場合、その定数の値に及ぼす種々の影響が調査、整理されている。調査の結果、乾燥状態、載荷速度および寸法の影響を受けることを図3.1-6～図3.1-12に示すような実験データにより示している。これらの実験データから構造物中のコンクリート引張強度の条件を想定した場合、全ての条件が割裂引張強度を低下させる方向の条件であり、構造物中のコンクリート引張強度の方が割裂引張強度よりも低下するとまとめている。これらの結果や温度ひび割れは、弱い引張強度の箇所に生じる可能性があることを考慮して、試験により得られた値を2割程度低減して用いることを提案している。

これらの図の解釈を割裂引張強度の推定式の定数に与える影響という観点ではなくて、構造物の引張強度と割裂引張強度とが相違する条件という観点から、筆者が再度その意味をここで整理して示す。

まず、構造物中の引張強度と割裂引張強度で大きく相違する条件として、乾燥の程度が考えられる。水中養生した場合と気中養生した場合の割裂引張強度を図3.1-6 a), b)³⁻⁶⁾に示す。

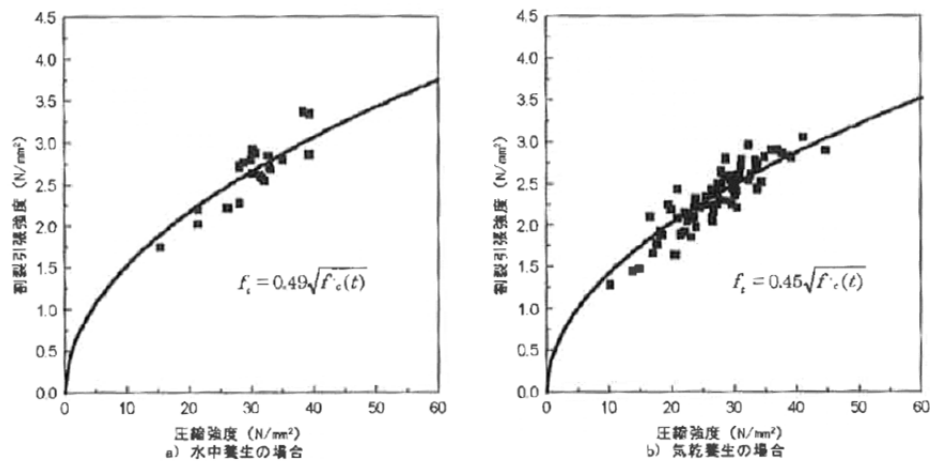


図 3.1-6 水中養生と気中養生の違いによる割裂引張強度³⁻⁶⁾

気乾養生の場合の方が割裂引張強度は小さくなり、回帰曲線は1割弱小さい値を算定する。割裂引張強度試験の供試体のように水中養生よりも、ほとんどの場合（水中構造物を除いて）構造物中の方が乾燥は進むと考えられるので、構造物中の引張強度の方が割裂引張強度よりも小さくなる要因の一つと言える。

また、構造物中の引張強度と割裂引張強度では、载荷条件が大きく相違する。構造物における温度応力のうち引張応力は数日から数十日かけてゆっくりと発生する。一方、JIS A1113 割裂引張強度試験(2006)では、引張応力度の増加率が毎秒 $0.06 \pm 0.04 N/mm^2$ となるように载荷することとしている。構造物中の引張強度が $3 N/mm^2$ 程度あったとしても、これに達するのに割裂引張強度試験では、最も遅い毎秒 $0.04 N/mm^2$ で引張応力度を増加するように载荷をしたとしても、2.5分で割裂引張破壊する。

载荷速度の影響を図 3.1-7³⁻⁷⁾と図 3.1-8³⁻⁸⁾に示す。図 3.1-7では、応力強度比が0.75でも5～10日間载荷し続ければ破断に至る場合があることを示すデータである。一方、割裂引張強度試験で同等の荷重まで载荷しても破断しないことは、明らかである。図 3.1-8でもこの影響は顕著である。

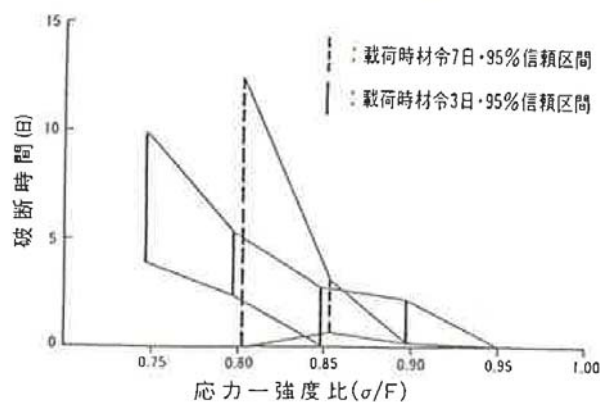


図 3.1-7 破断が生じるまでの時間と応力強度比³⁻⁷⁾

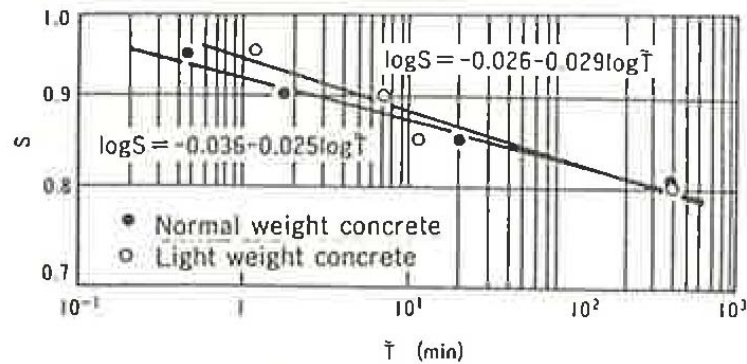


図 3.1-8 載荷速度の違いによる割裂引張強度³⁻⁸⁾

すなわち、構造物中の温度応力のように、割裂引張強度試験の載荷速度よりも引張応力がゆっくりと作用する場合には、より小さな引張強度でひび割れに至ることは容易に想像できる。載荷速度の観点からも、構造部中の引張強度は、割裂引張強度よりも小さくなると想定される。

構造物と供試体の最も大きな相違はその寸法、大きさである。一般に、供試体では大きくても 30cm 程度の寸法が最大であり、マスコンクリートはその定義から考えてもこれよりは大きくなる構造物である。割裂引張強度に寸法が与える影響を図 3.1-9³⁻⁹⁾、直接引張強度に寸法が与える影響を図 3.1-10³⁻¹⁰⁾、図 3.1-11³⁻¹¹⁾示す。割裂引張強度、直接引張強度に関わらず、寸法が大きくなると強度は小さくなる。すなわち、ここでも、構造部中の引張強度は、割裂引張強度よりも小さくなると言える。

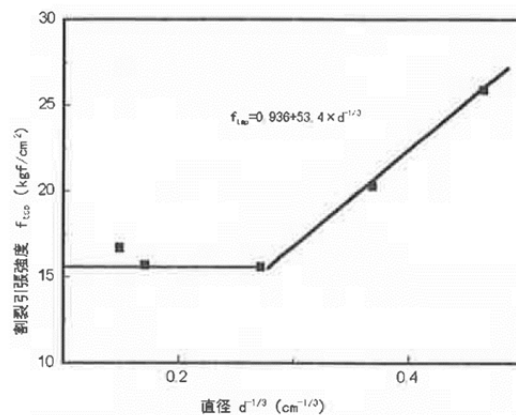
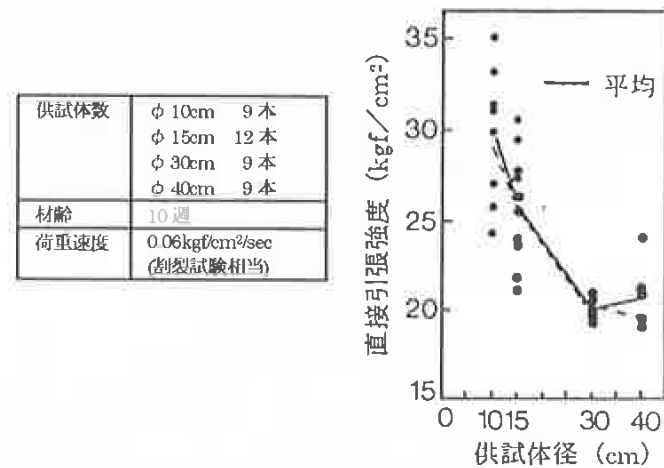
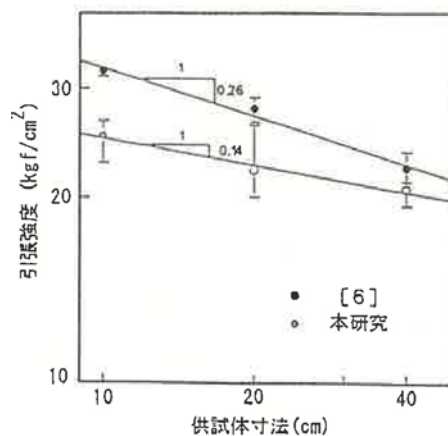


図 3.1-9 供試体直径の違いによる直接引張強度³⁻⁹⁾


図 3.1-10 供試体径の違いによる割裂引張強度³⁻¹⁰⁾

図 3.1-11 直接引張強度の寸法効果³⁻¹¹⁾

ここまで、土木学会編「最新のマスコンクリート技術、コンクリート技術シリーズ14 1996」で整理された調査結果について、構造物中の条件との相違に着目して再考した。全ての場合について、構造物中の引張強度が割裂引張強度よりも小さくなる方向の結果を示している。

近年では、この中で示された寸法が大きくなると強度が小さくなる理由やメカニズムに関する研究が進んでいる。この理由やメカニズムとして、①材料の不均質性と変動、②欠陥が多くなる事、③2次曲げの影響、④破壊エネルギーの影響、⑤試験メカニズムの影響、⑥2軸応力の影響等が挙げられている。

材料の不均質性と変動については、②～④の影響の遠因でもあり大きな影響がある。

欠陥は、寸法が大きくなれば、必然的あるいは確率的に、できやすくなることは理解できる。構造物中の方が供試体より欠陥が多くなるとすれば、引張強度は小さくなる傾向があると考えられる。

2次曲げとは、荷重の偏心作用に起因する曲げモーメントの影響である。荷重の偏心作用に起因する曲げモーメントは、割裂引張試験では①載荷時の試験的影響、②材料自体の不均質性の二つが考えられるが、このうち②に起因して発生するものが、一般に2次曲げと呼ばれている。秋田ら³⁻¹²⁾は、2次曲げを骨材による局所的なクラックアレスト効果により発生するとして図3.1-12³⁻¹²⁾を示した。図3.1-12は横軸に断面内の最急勾配の角度、縦軸には正確な引張強度と観測された引張強度の比をとっている。最急

勾配の角度が急になると、すなわち、2次曲げが大きくなると、引張強度の低下が著しいことを示している。

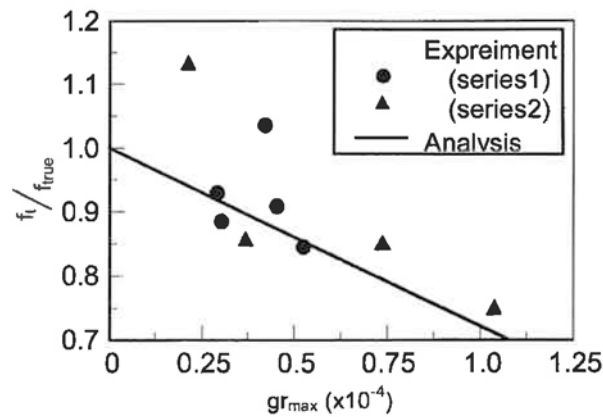


図 3.1-12 2次曲げによる引張強度の低下³⁻¹²⁾

しかしながら、骨材密度は供試体と構造物で基本的には同じため、その影響をどちらが受けやすいかについては、理解が難しい。構造物における骨材の分布などを検討する必要があるためである。このような骨材の空間的な分布を考慮した解析的な検討は数例^{3-13), 3-14)}しかない。このうち、田中ら³⁻¹⁴⁾は、モンテカルロ法を利用して材料強度分布の異なる有限要素メッシュを複数作成し、それぞれ構造解析を実施、解析結果の平均と分散を求めて評価する手法を利用して、割裂引張強度の寸法による影響を評価した。この結果を図 3.1-13³⁻¹⁴⁾に示す。材料の不均質性を考慮していない $COV_{md}=0\%$ の場合でも、500mm 以上の場合、割裂引張強度の実験値を解析が過大評価している。また、田中ら³⁻¹⁴⁾は同時に破壊エネルギーが割裂引張強度に与える影響について、支圧板の大きさを3種類にした場合図 3.1-14³⁻¹⁴⁾のとおり検討している。割裂引張強度試験の解析結果は、破壊エネルギーが非常に小さい場合には、引張強度を過小評価しているが、一般的な範囲では過大評価している。これらの結果から、割裂引張強度の寸法効果は、小径試験体では破壊エネルギーによる影響が勝るが、大型試験体では材料の不均質性による影響が大きくなるとしている。

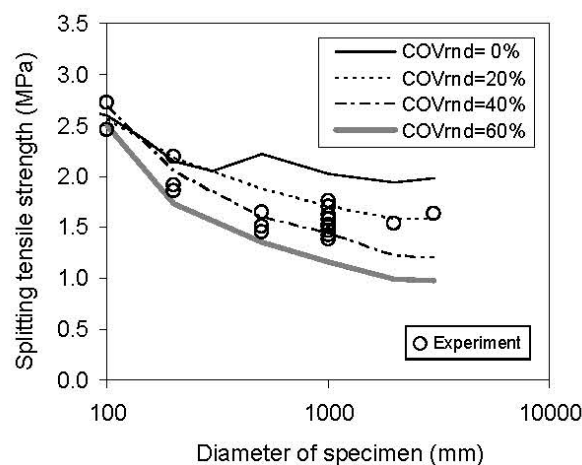


図 3.1-13 割裂引張試験の寸法効果に関する実験値³⁻⁷⁾と解析結果の比較³⁻¹⁴⁾

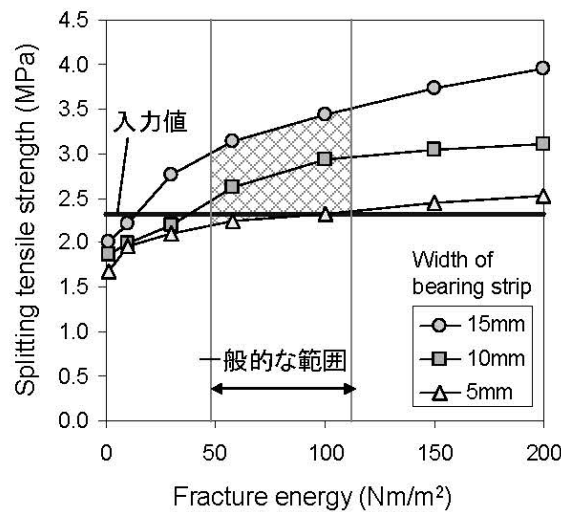


図 3.1-14 破壊エネルギーと割裂引張強度の関係 ($d=100\text{mm}$, $f_t=2.32\text{MPa}$)³⁻¹⁴⁾

このことから、構造物中の引張強度は、材齢初期の破壊エネルギーが小さい時には、同材齢で割裂引張強度試験を実施したとすれば、割裂引張強度試験結果と同等かそれ以上の可能性もあるが、ほとんどの場合、材料の不均質性に起因して割裂引張強度よりも小さな値であることが推定される。

割裂引張強度試験は図 3.1-15³⁻¹⁵⁾に示すとおり、载荷軸面には一様な引張応力が生じ、それと垂直な面にはこれより大きな圧縮応力が生じる。このような 2 軸圧縮-引張応力下のひび割れ強度は、例えば図 3.1-16³⁻¹⁴⁾、³⁻¹⁶⁾のようにポアソン分の強度低下がモデル化される。しかし、コンクリートの引張強度は圧縮強度に比べて十分に小さいことから、これらの影響は、実質上無視できると考えられていた。

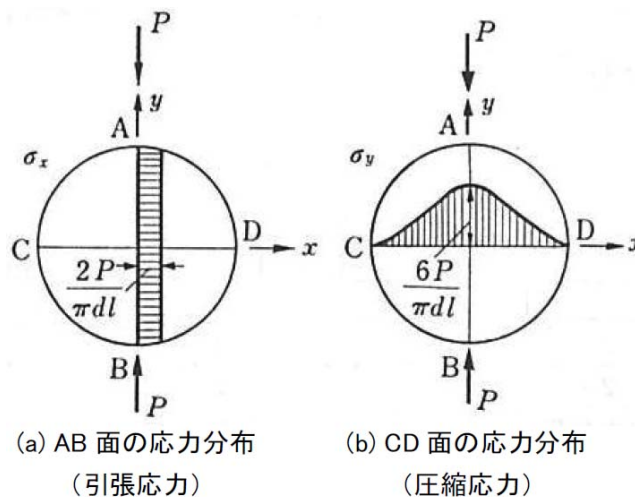


図 3.1-15 弾性円板の内部応力分布³⁻¹⁵⁾

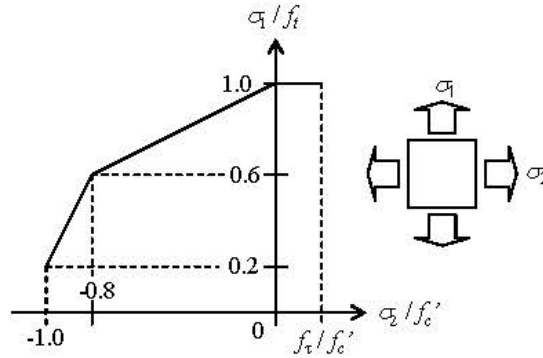


図 3.1-16 2軸圧縮-引張応力下のひび割れ強度モデル例^{3-14) 3-16)}

このようなこともあり、従前、構造物中のひび割れを評価するための引張強度には、直接引張強度試験の方がモデルとして適しているという議論が多かったようにみられる．ところが、コンクリートの直接引張強度を求める試験方法は、その難しさ等から現在に至るまでオーソライズされていない．また、理論的には図 3.1-15 のとおり、直接引張強度の方が割裂強度より大きくなるはずが、実験上はその逆、あるいは同等というようなデータも、例えば、図 3.1-17³⁻¹⁷⁾、図 3.1-18³⁻¹⁸⁾のように示されてきた．このような試験方法の観点から考えると、実際の構造物中の応力状態に合わせた載荷方法とすることが適切であることは疑いない．しかし、実際の応力状態は非常に複雑であり、この応力状態を再現して、人工的に載荷することは現状では未だ困難である．従って、比較的簡易な試験で、既に実績データも多い、割裂引張強度試験結果を有意に利用する方法を考えるべきである．

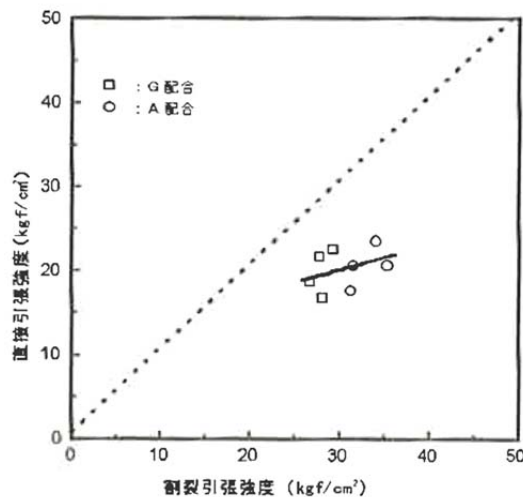


図 3.1-17 割裂引張強度と直接引張強度³⁻¹⁷⁾

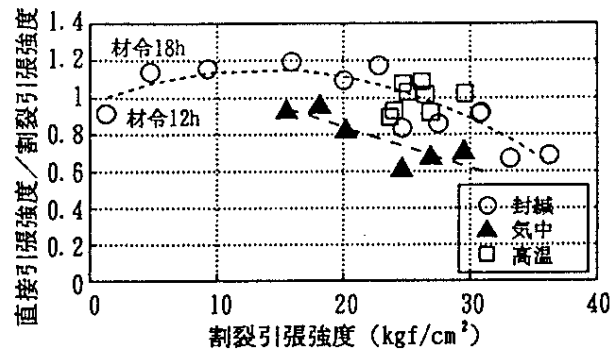


図 3.1-18 割裂引張強度と直接引張強度 ³⁻¹⁸⁾

以上より，基本的には，構造物中の引張強度は割裂引張強度よりも小さくなると考えられる．マスコンクリートの温度ひび割れの照査に利用する引張強度は，割裂引張強度を実構造物の条件を考慮して低減して利用するのが，最も現実的で真値に近いところで，照査を行える可能性が高いと考える．

3.2 ひび割れ発生確率曲線のワイブル分布関数化

2012年制定版のひび割れ発生確率図の改訂では図 3.2-1 のとおりワイブル分布として回帰した曲線をひび割れ発生確率曲線として示している。これは、JCI マスコン指針 2008³⁻¹⁹⁾で示されたとおり改訂されたものであることは前述のとおりである。従前のデータを回帰した曲線からワイブル分布曲線に変更した理由としては、数学モデルとしての説明性とデータの回帰適合性の高さであることが同指針で説明されている。

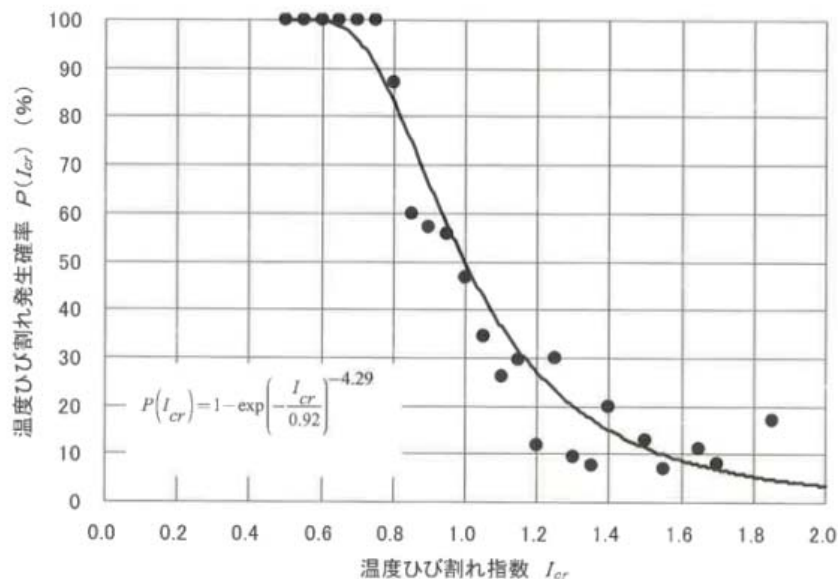


図 3.2-1 ワイブル分布による発生確率の整理（再掲）³⁻¹⁹⁾

しかしながら、ワイブル分布とは、例えば図 3.2-2 に示される自転車のチェーンの故障率のように、時間軸に対して故障率が変わる分布を適切に表現できる分布モデルとされており、式(3.2-1)の累積分布関数を持ち、形状係数 m が1 かそれより小さいか大きいかに次のような意味を持たせた分布モデルである。

① $m > 1$: 故障率は時間とともに増加し、故障数はある時間で極大値を持つ。② $m = 1$: 故障率は一定で、故障数は指数関数的に減少していく。③ $m < 1$: 故障率は時間とともに減少し、故障数は初期に集中する。しかしながら、マスコン指針でのワイブル分布の適用結果は、その一般論で説明しがたい箇所がある。図 3.2-1 の左下に示される回帰式は式(2)と同じ関数形であるが、式(3.2-1)は累積分布関数（一般には関数 $F(x_1)$ は x_1 より小さくなる確率を与える）であり、ひび割れ指数 0.05 刻みで整理したひび割れ発生確率を返す式として適用した意味の説明が難しい。例えば、図 3.2-1 の左下回帰式から温度ひび割れ指数 $I_{cr} = 1$ の時に温度ひび割れ発生確率 50%と算定できる（プロットはマスコン指針の参考資料の説明では、0.05 刻みの温度ひび割れ指数毎のひび割れ発生確率で指数 0.975~1.025 のひび割れ発生確率ではないか）、一方でワイブル分布の累積分布関数の意味から考えれば温度ひび割れ指数が 1 以下の時にひび割れ発生確率が 50%と読めるのである。

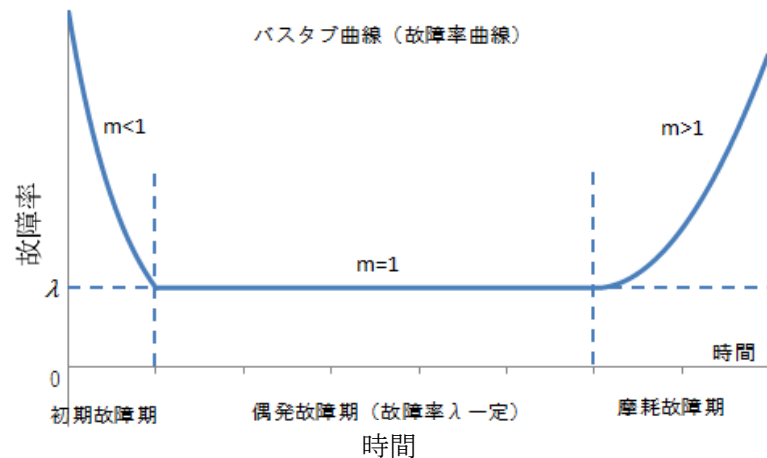


図 3.2-2 ワイブル分布の故障率曲線

$$F(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x}{\alpha}\right)^m\right] \quad (3.2-1)$$

ここに、

$F(x)$: ワイブル分布の累積分布関数

x : 一般には時間 (寿命)

m : 形状係数

α : 尺度係数

故障率 : $m x^{(m-1)} / \alpha^m$

加えてマスコン指針の式は、式(2)の $\alpha^m = 0.92$, $m = -4.29$, $\gamma_{cr} = x$ とした式であるが、形状係数 m は負の値で、故障率が負となる意味が不明で、定義も変数 x が分母となり、ワイブル分布と呼べる関数ではなくなる。このような事を考え合わせると、同図のプロットの回帰関数にワイブル分布の累積分布関数を適用した今回のアプローチは、関数形は同じものの、ワイブル分布の数学的意味は失われていると考える。

また回帰関数として正規分布と比較してデータプロットとの適合性の高さが示されている。このデータは、新たに 65 件の実構造物の 724 の部材について、3 次元有限要素法による温度応力解析で算出した最小のひび割れ指数と、実際のひび割れ発生確率とをひび割れ指数 0.05 刻みで整理してプロットされたものである。しかし、正規分布の回帰適合性が小さくなった理由は、ひび割れ指数が 1.6 以上と大きい場合でも、ひび割れ発生確率が 10% 程度以上と大きいプロットが存在するためである事が、図 3.2-3 に示す過去のひび割れ発生確率図との比較からイメージできる。

このようにひび割れ指数が大きい範囲でひび割れ発生確率が従前よりも大きくなっている理由は見当たらない。標準的な施工を行った結果としてのひび割れ発生であるかどうか、標準的な範囲のばらつきに収まっていないデータが 2012 年版ではプロットされ、このプロットへの適合性に曲線形そのものがひっばられていないか検討する必要がある。

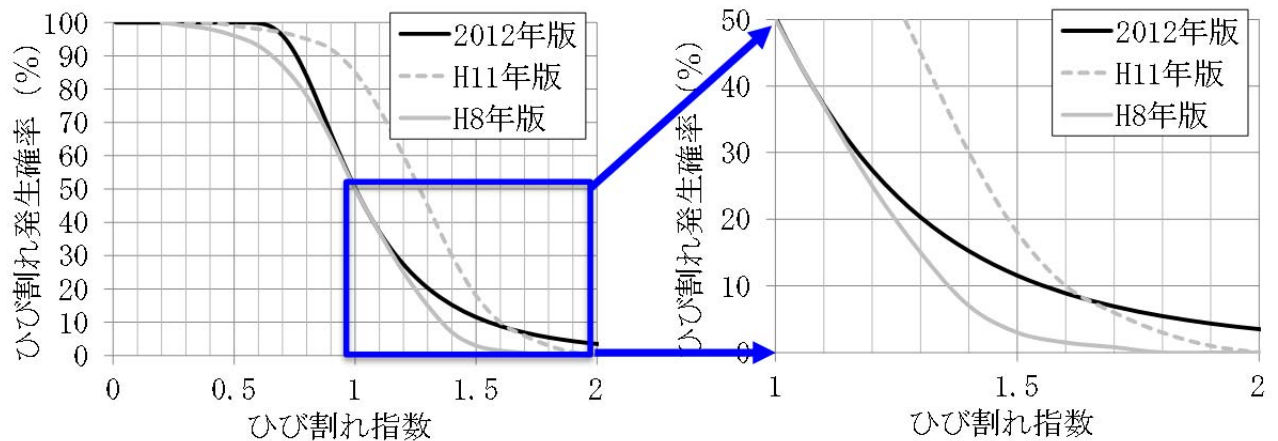


図 3.2-3 H8 年制定版と H11 年版，2012 年制定版の比較

平成 11 年版が平均的標準的な施工結果かどうかの議論はあるが，図 3.2-1 にあるひび割れ指数 1.85 でひび割れ発生確率 20% 弱のプロット等は標準的的施工結果から外れていると扱って良いように思われ，このようなプロットにひび割れ発生確率曲線形状全体が影響を受けるのは，ひび割れ発生確率をひび割れ指数に対して一義的に決定する趣旨（これは後述するが，ある指数におけるひび割れ発生確率の標準を示しているという趣旨）から考えて好ましくはないと考えられる。

3.3 解析条件の改訂とその影響

3.3.1 引張強度と有効ヤング係数

示方書における引張強度の変遷を図 3.3-1 に示す。2012 年制定版の引張強度は、圧縮強度が 30N/mm^2 程度以下の場合に平成 11 年版を下回る。

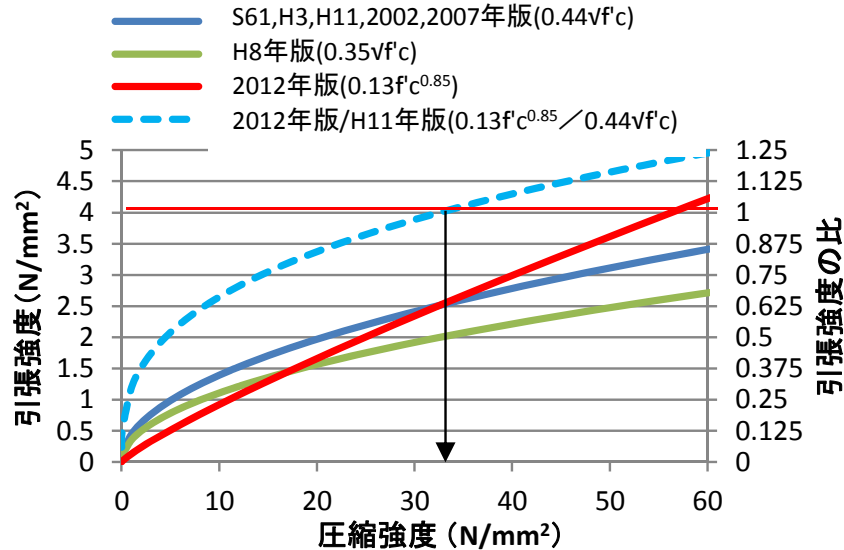


図 3.3-1 温度ひび割れ指数の算定に用いる引張強度

一方、有効ヤング係数は現在まで 2 回しか改訂されていない。クリープ影響が変化する材齢を圧縮強度 15N/mm^2 程度までと仮定して、それ以降の材齢（それ以上の圧縮強度）で 2012 年制定版有効ヤング係数は、図 3.3-2 のとおり圧縮強度に関わらず平成 11 年版の 0.7 倍程度となっている。2012 年制定版では、従来よりも応力も小さめに算定される傾向があると推察される。

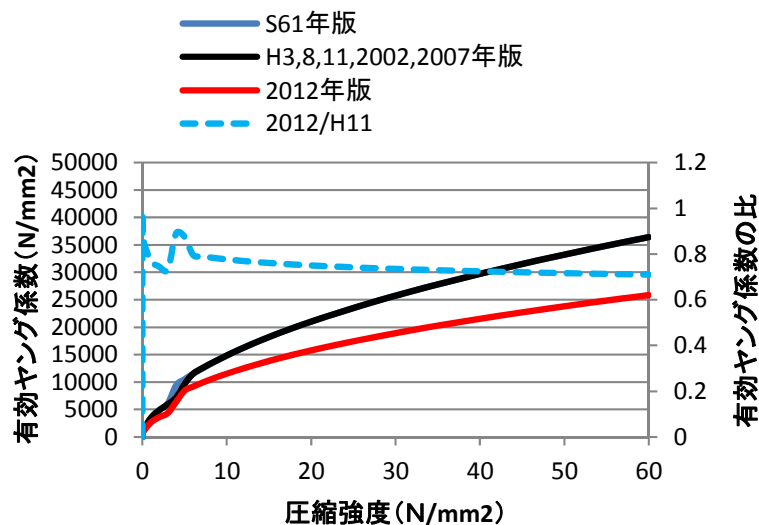


図 3.3-2 温度ひび割れ指数の算定に用いる有効ヤング係数

これら引張強度と有効ヤング係数の改訂は、ひび割れ指数にそのまま影響を与える。2012年制定版と平成11年版の引張強度と有効ヤング係数をそれぞれ用いて、拘束ひずみを同一と考えた場合に、算定されるひび割れ指数の比を図3.3-3に示す。クリープ影響が変化する材齢に依存するものの、圧縮強度が15 N/mm²程度以下と小さい場合に、2012年制定版のひび割れ指数は平成11年版よりも小さくなる傾向がある。

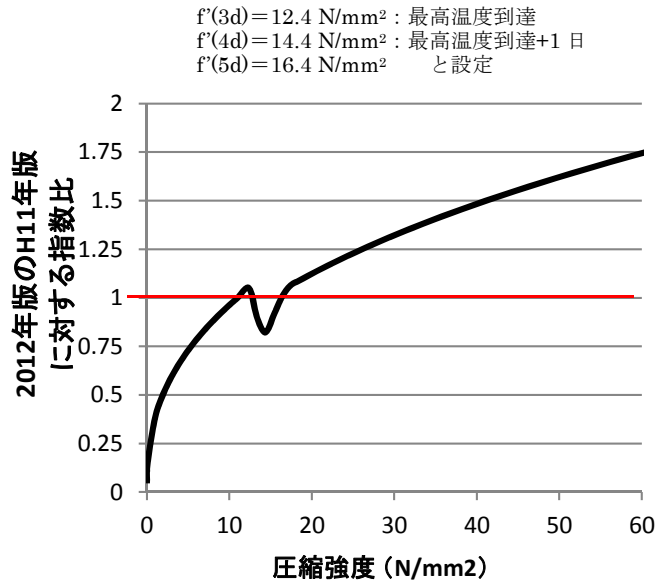


図 3.3-3 2012 年制定版の平成 11 年版に対する指数比

ここでさらに、延長 20m、壁厚 1.0m の図 3.3-4 に示すボックスカルバートについて、全て 2012 年制定版の解析条件によって解析した場合と、そこから引張強度と有効ヤング係数だけを 2007 年制定版のパラメータ（基本的に平成 11 年版と同一）として解析した場合とで比較解析を実施した。解析の詳細は、付録-1 に示すこととして、ここでは結果についてだけを示す。

底版と壁の温度解析結果と応力解析結果、ひび割れ指数の解析結果を図 3.3-5～図 3.3-9 に示す。底版の最小ひび割れ指数は、2012 年制定版で 1.37（材齢 1.2 日）、2007 年制定版で 1.68（材齢 1.5 日）となり、2012 年制定版では 2007 年制定版の 8 割程度と、最小ひび割れ指数が小さくなっており、前述までの傾向が確認された。一方の、壁では、2012 年制定版で 1.03（材齢 10.7 日）、2007 年制定版で 1.00（材齢 12 日）とほとんど変わらない。これは材齢が大きくなった時点において最小ひび割れ指数をとるため、図 3.3-3 に示すように圧縮強度も 20N/mm²程度以上になっていたためと考えられる。

前述までの結果と考え合わせると、2012 年制定版のひび割れ発生確率図のプロットは壁状 282、スラブ状 63、層状 349、柱状 34、全 728 の解析データが元になっているとの説明があり³⁻¹⁹⁾、スラブ状、層状構造物のデータがひび割れ発生確率図を危険側にシフトした元データになっている可能性を示唆している。

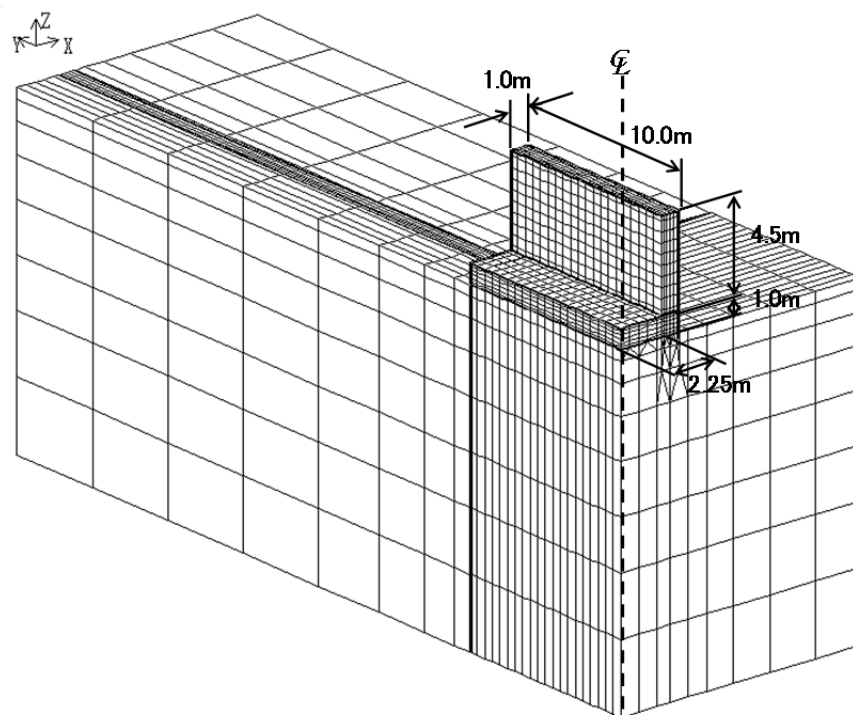


図 3.3-4 解析モデル

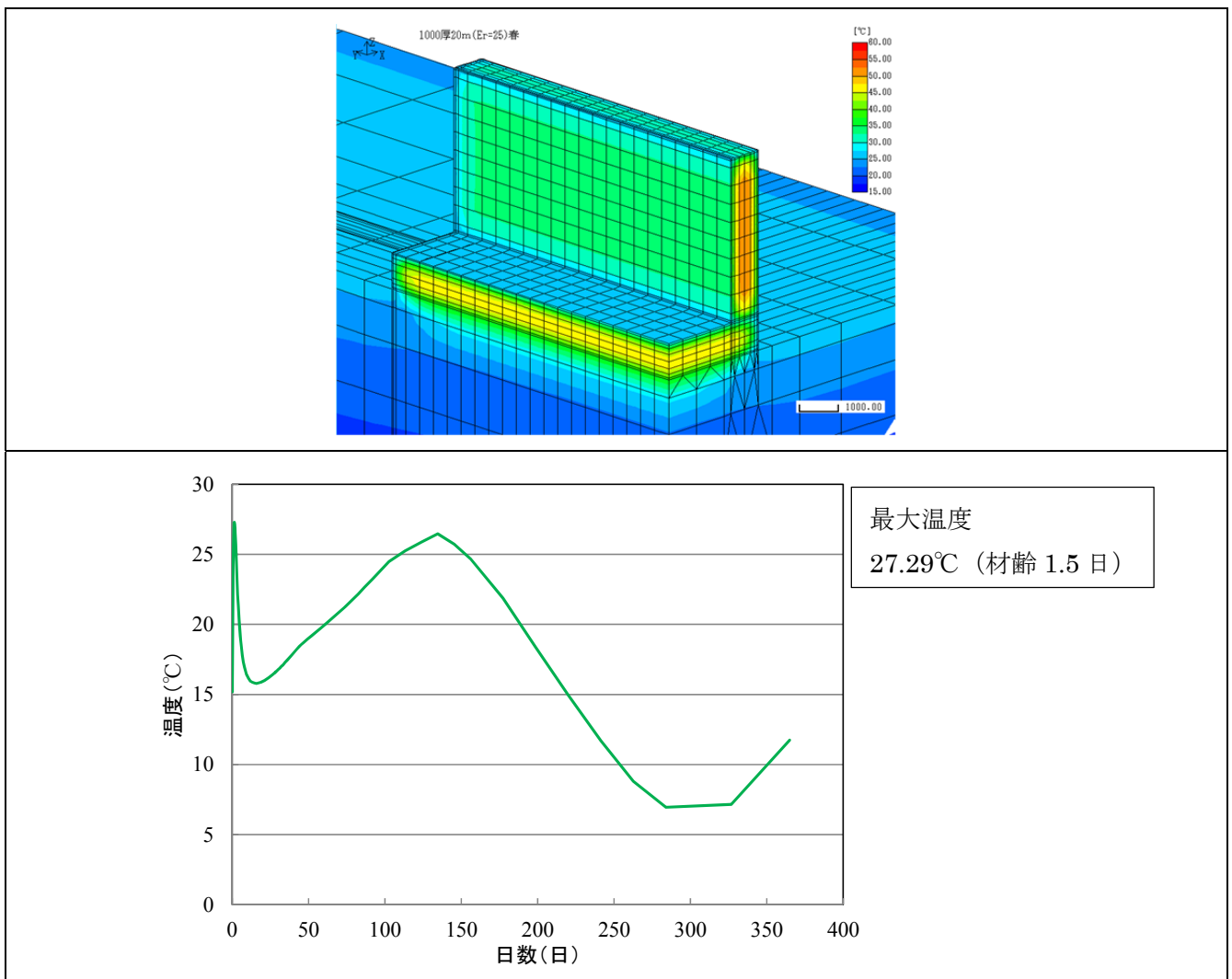


図 3.3-5 底版の温度解析結果

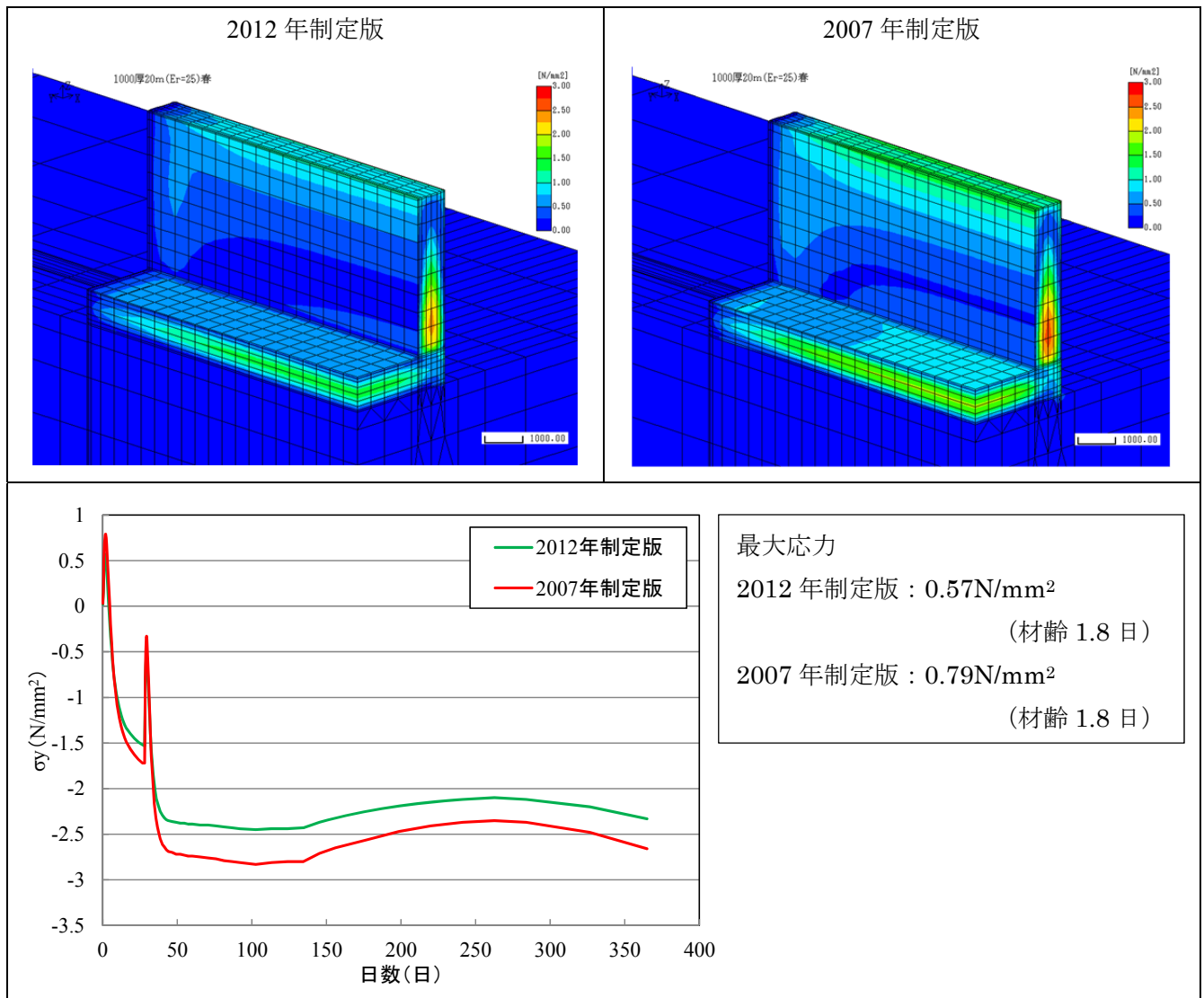


図 3.3-6 底版の応力解析結果

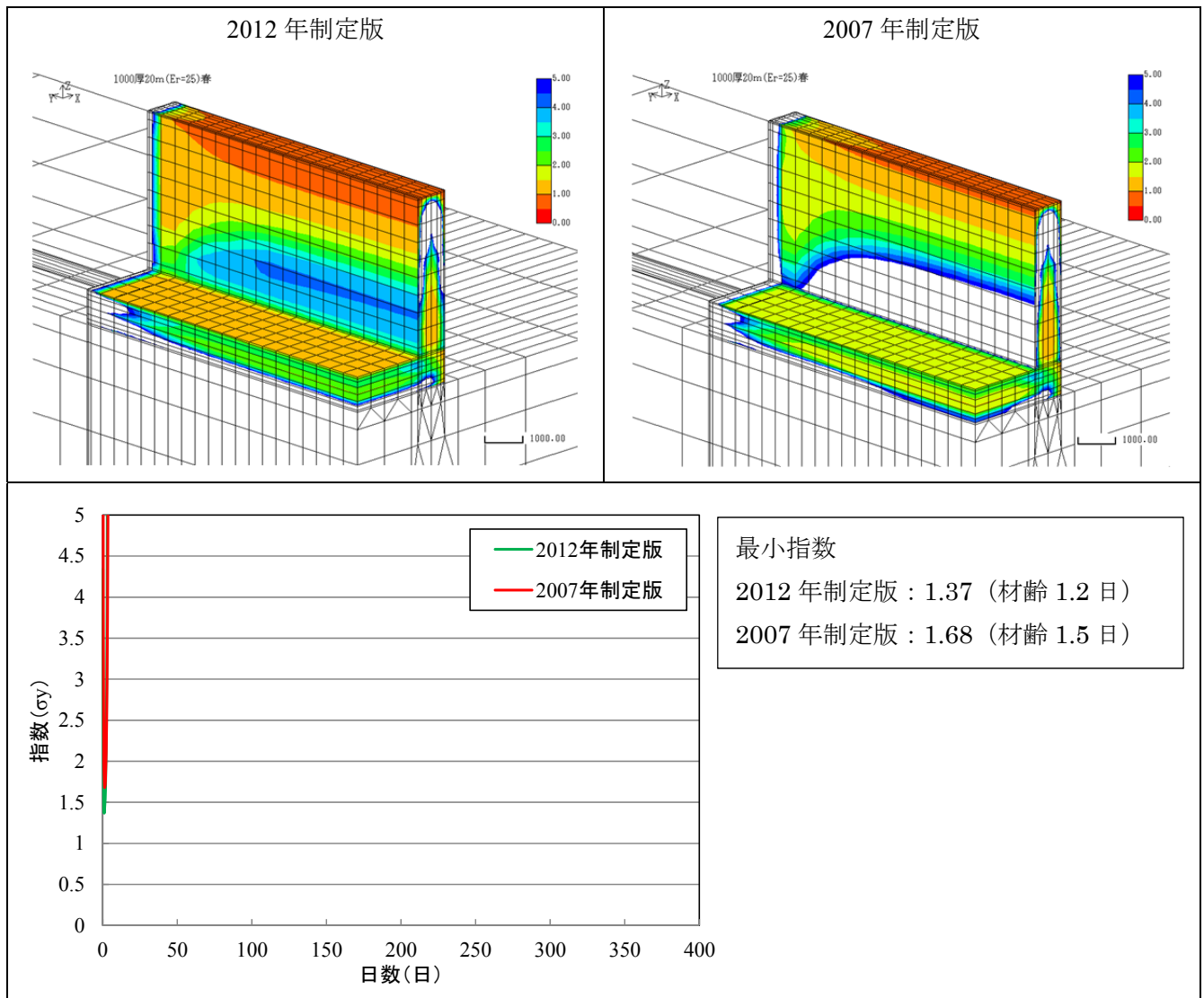


図 3.3-7 底版のひび割れ指数解析結果

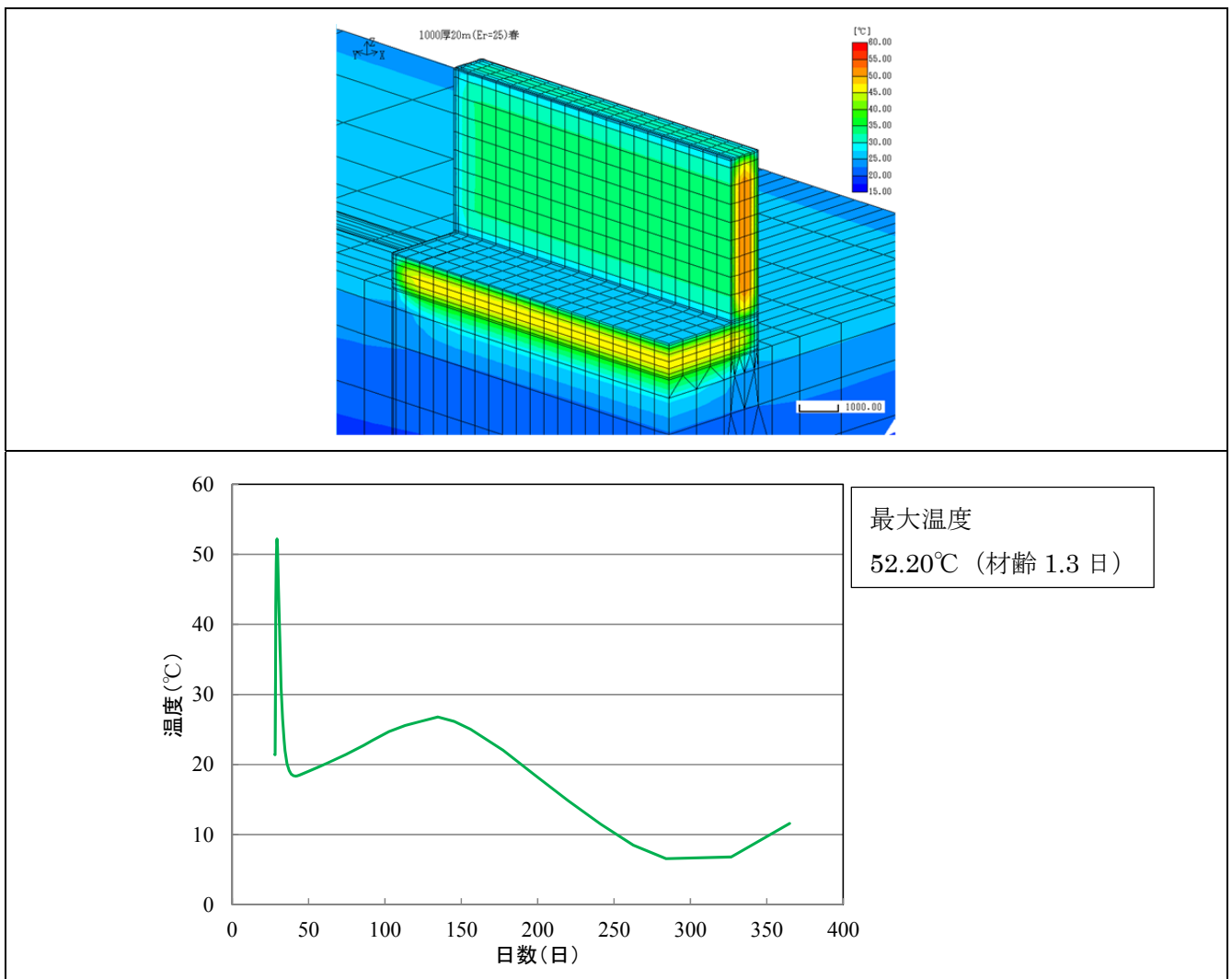


図 3.3-8 壁の温度解析結果

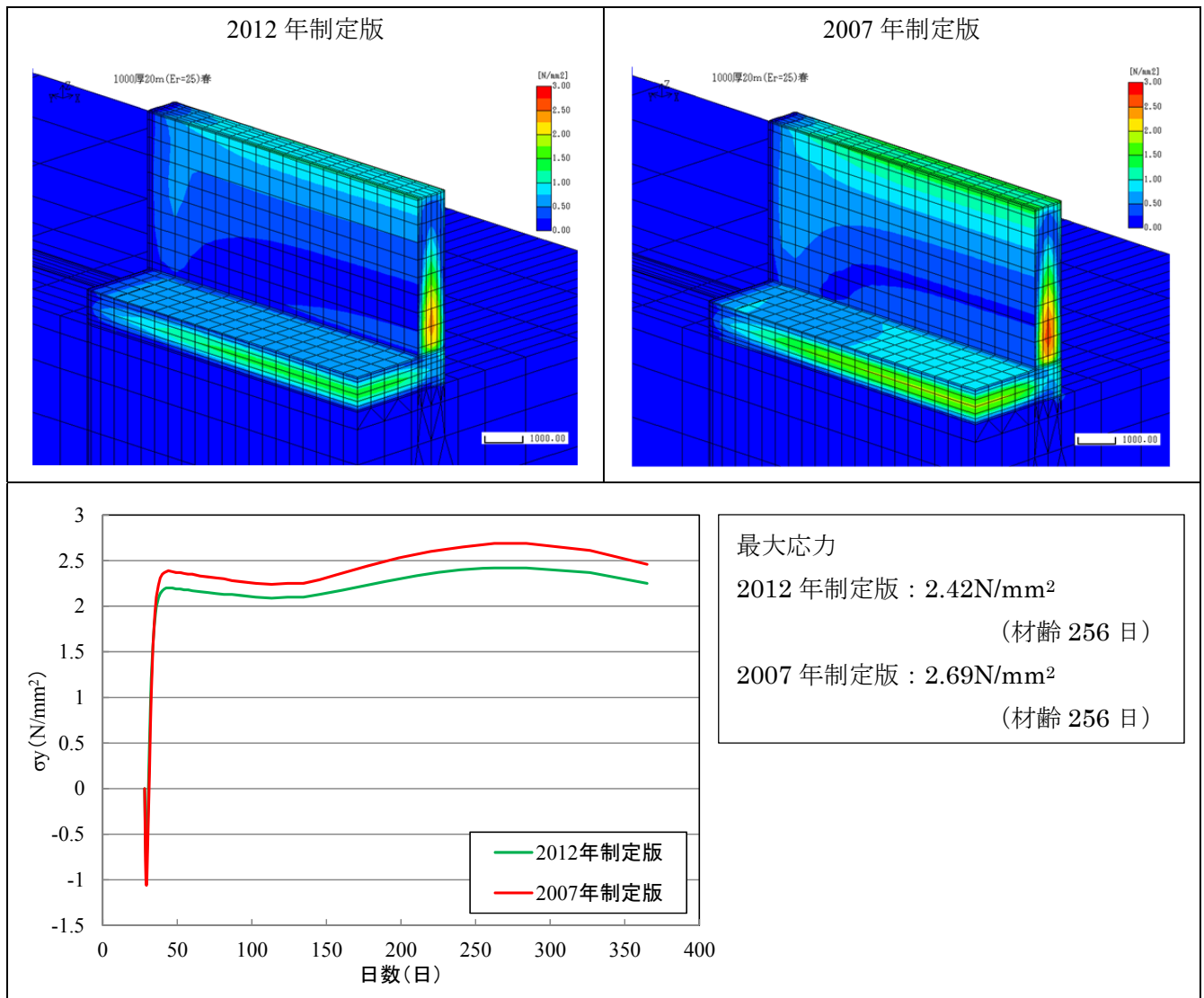


図 3.3-9 壁の応力解析結果

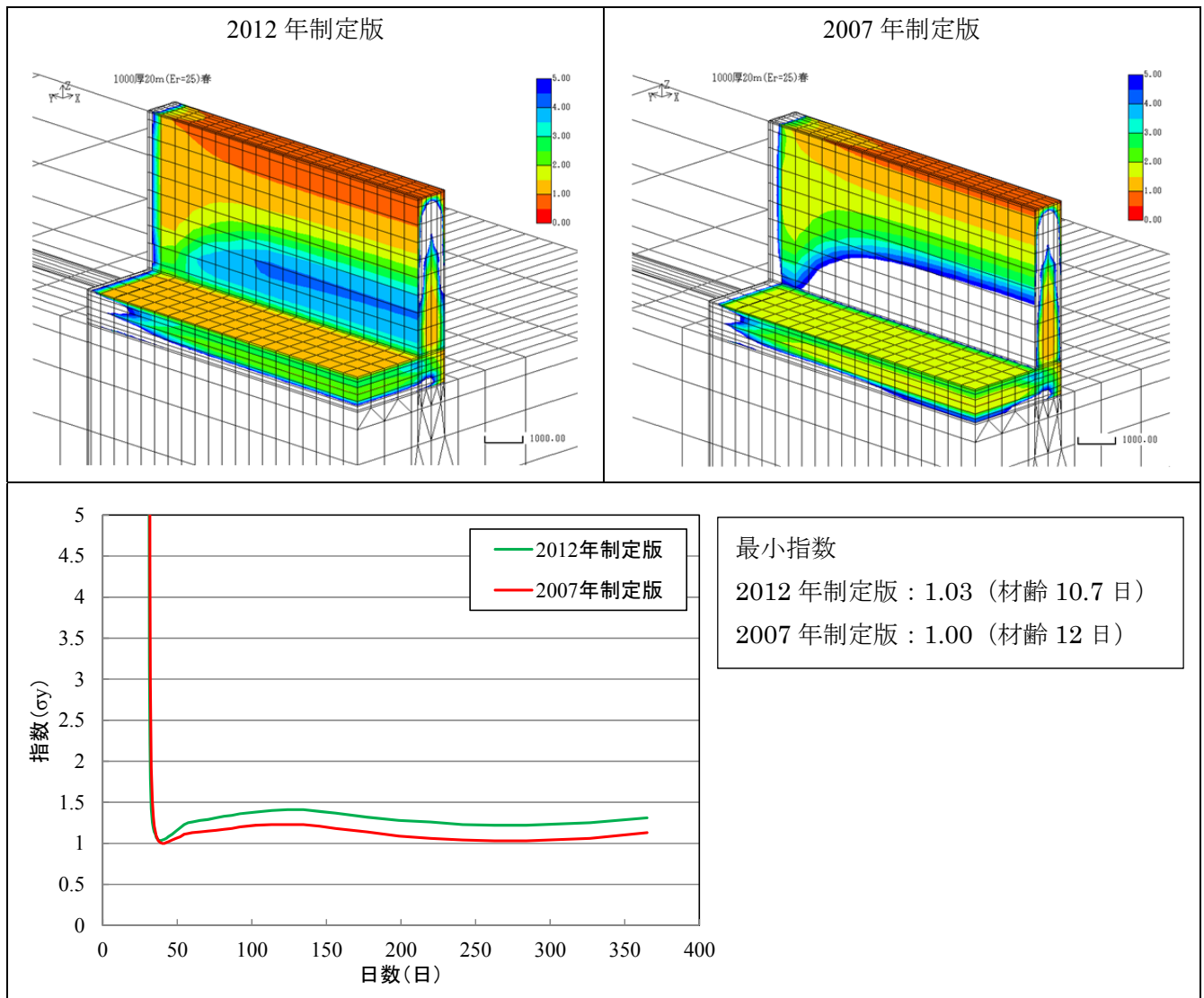


図 3.3-10 壁のひび割れ指数解析結果

3.3.2 断熱温度上昇特性の影響

示方書における断熱温度上昇特性の変遷を図 3.3-11 に示す。2012 年制定版と 2007 年制定版とを図 3.3-11 において、単位セメント量 300kg/m^3 で比較すると、2012 年制定版では終局断熱温度上昇量 Q_{∞} が 50.4°C 、終局断熱温度上昇速度に関する係数 α が 1.25 であるのに対して、2007 年制定版では Q_{∞} が 46.0°C 、 α が 1.104 と 2012 年制定版の断熱温度上昇量が大きく、速度も速くなっている。

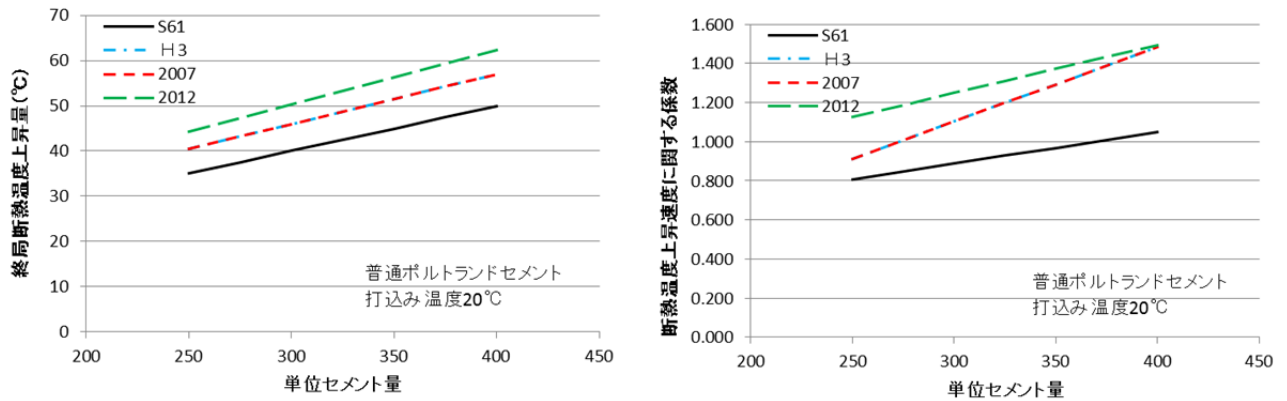
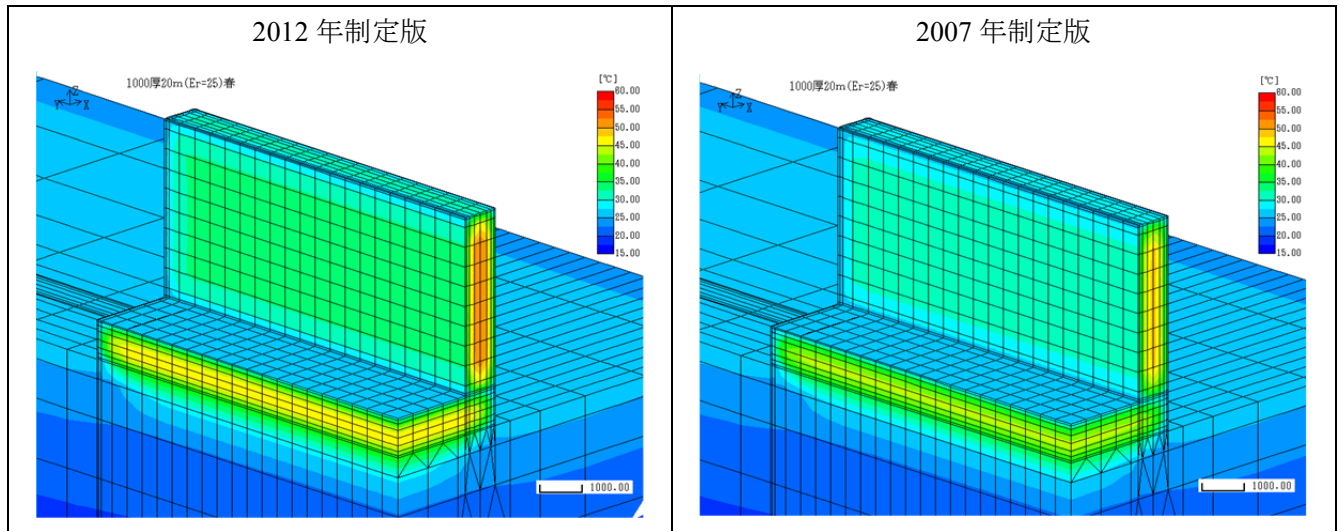


図 3.3-11 断熱温度上昇特性の改訂の影響 (20°C 普通ポルトランドセメント)

この断熱温度上昇特性の改訂がひび割れ指数にどの程度影響するか、一例として解析的に検討した。

延長 20m、壁厚 1.0m の図 3.3-12 に示すボックスカルバートについて、全て 2012 年制定版の解析条件によって解析した場合と、そこから断熱温度上昇特性値だけを 2007 年制定版のパラメータとして解析した場合とで比較解析を実施した。詳細は付録-2 に示すが、ここでは結果についてだけを示す。底版と壁の温度解析結果と応力解析結果、ひび割れ指数の解析結果を



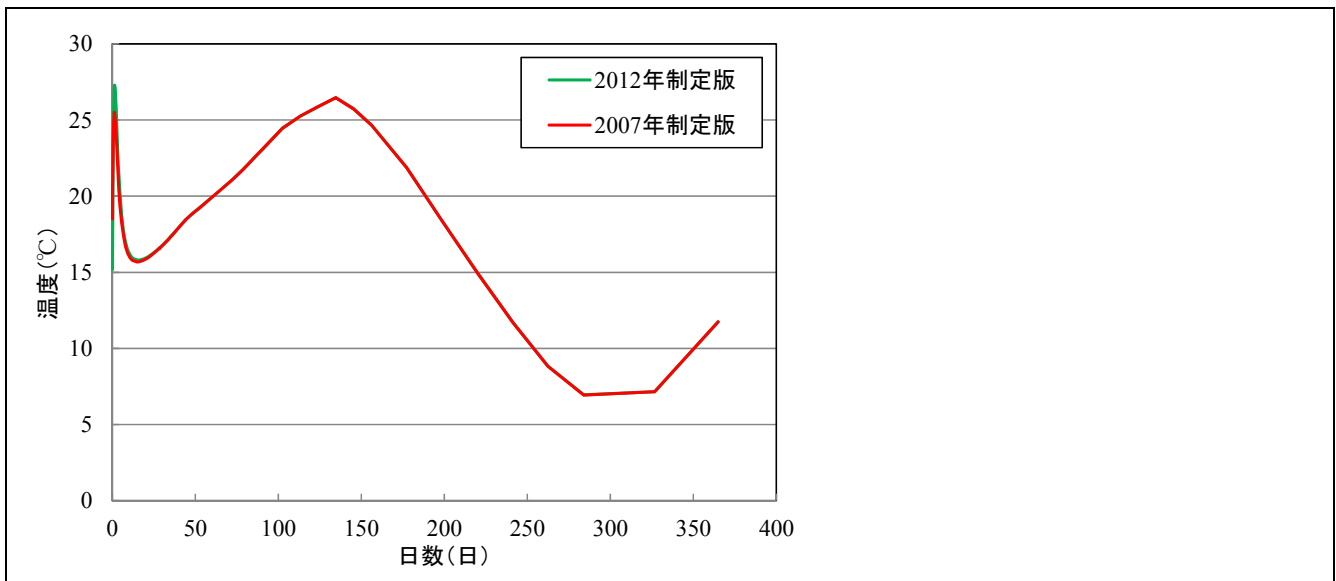


図 3.3-13～図 3.3-18 に示す。

2007 年制定版の断熱温度上昇特性を使用した場合と比較して、全て 2012 年制定版の解析条件で実施した場合に、最高温度は底版で 2°C、壁で 4°C 程度、高くなった。

底版の最小ひび割れ指数は、2012 年制定版で 1.37 (材齢 1.2 日)、2007 年制定版で 1.63 (材齢 1.5 日) となり、2012 年制定版では 2007 年制定版の 8 割程度と、最小ひび割れ指数が小さくなった。ちょうど引張強度と有効ヤング係数の改訂と同程度の影響である。

一方、壁では 2012 年制定版で 1.03 (材齢 10.7 日)、2007 年制定版で 1.10 (材齢 10.7 日) であり底版ほど影響はないことが分かった。

2012 年制定版では、特にスラブ状、層状の構造物で従来よりも厳しい解析結果となることが明らかとなった。

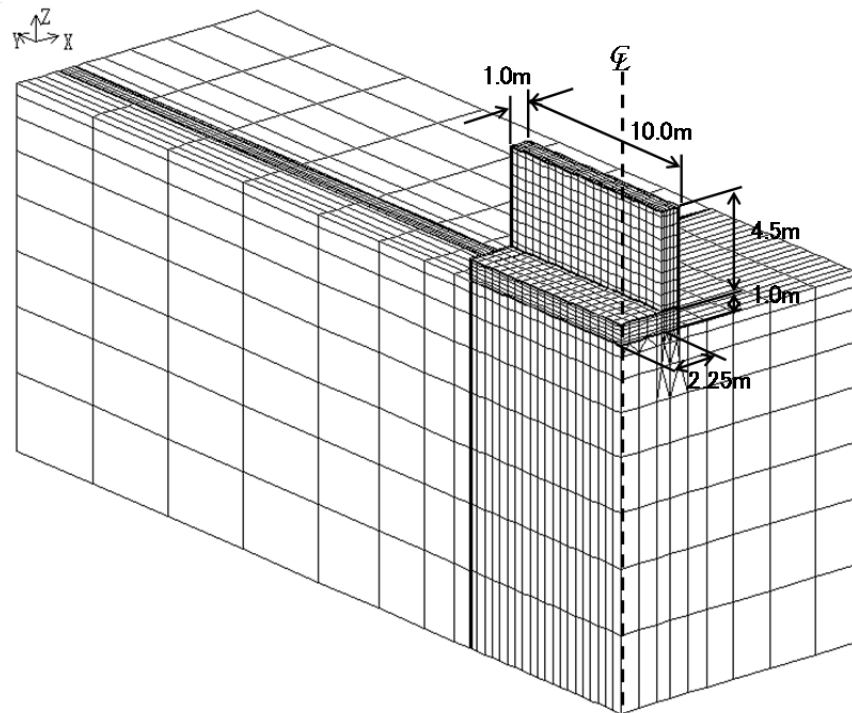


図 3.3-12 解析検討モデル

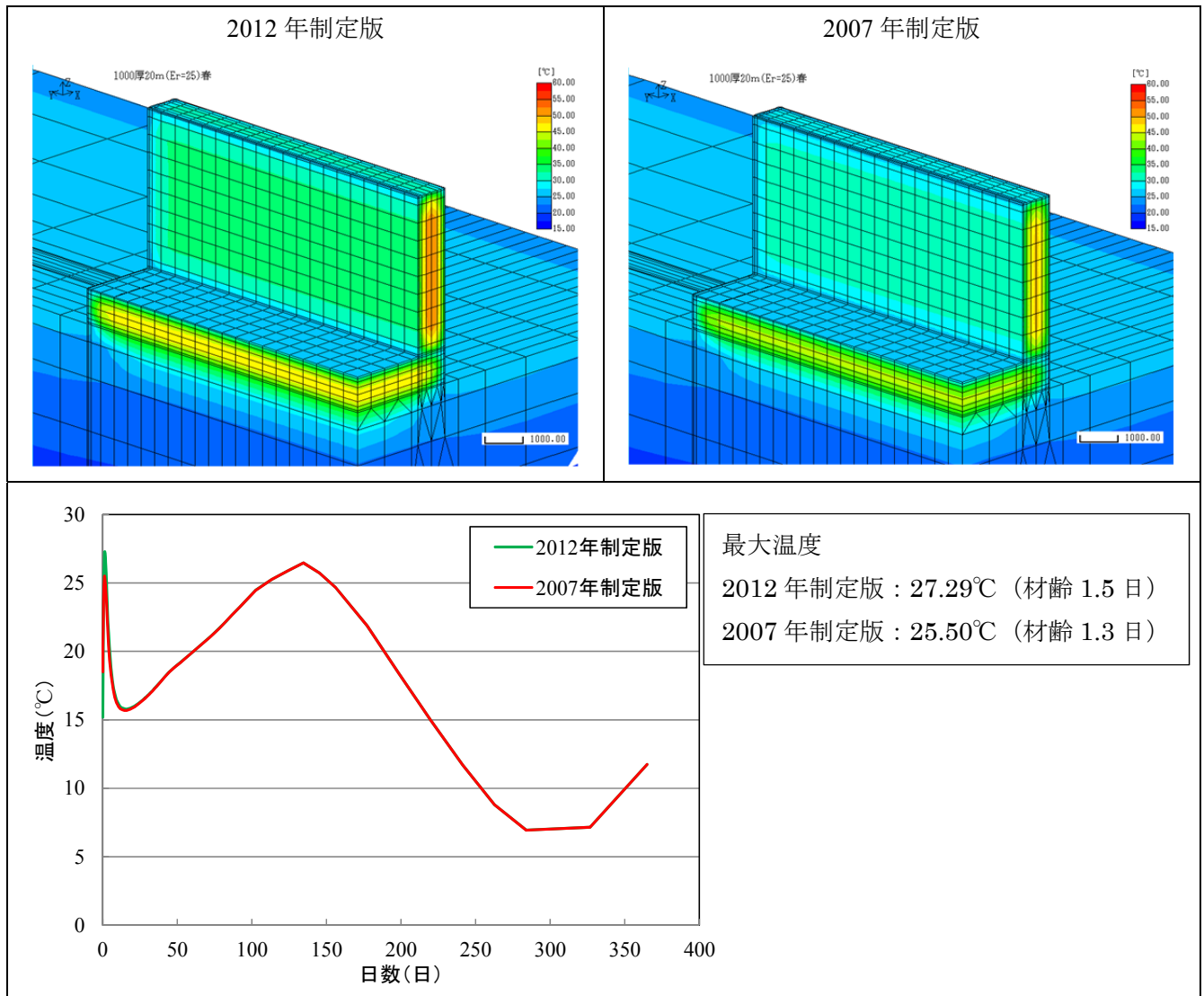


図 3.3-13 底版の温度解析結果

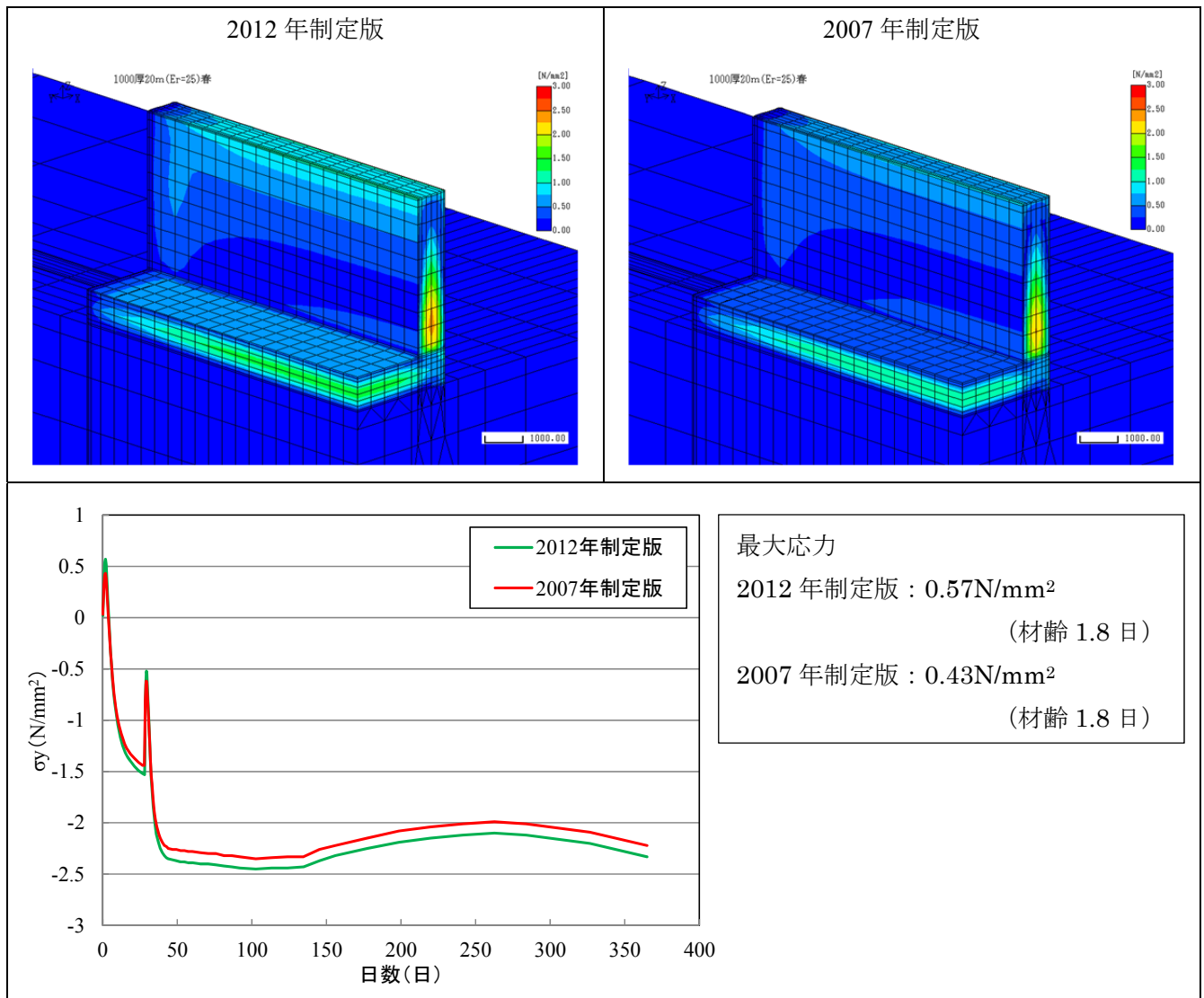


図 3.3-14 底版の応力解析結果

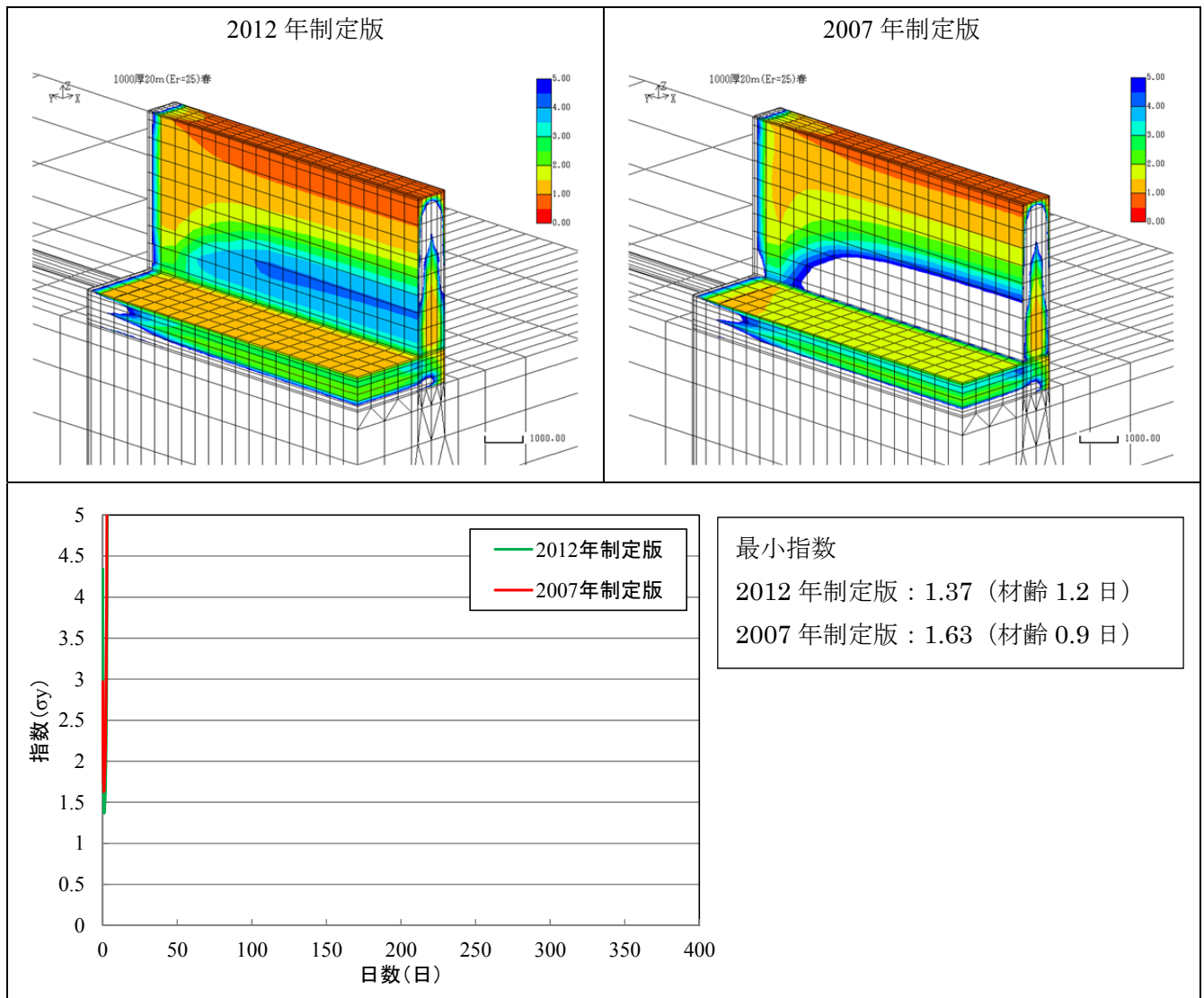


図 3.3-15 底版のひび割れ指数解析結果

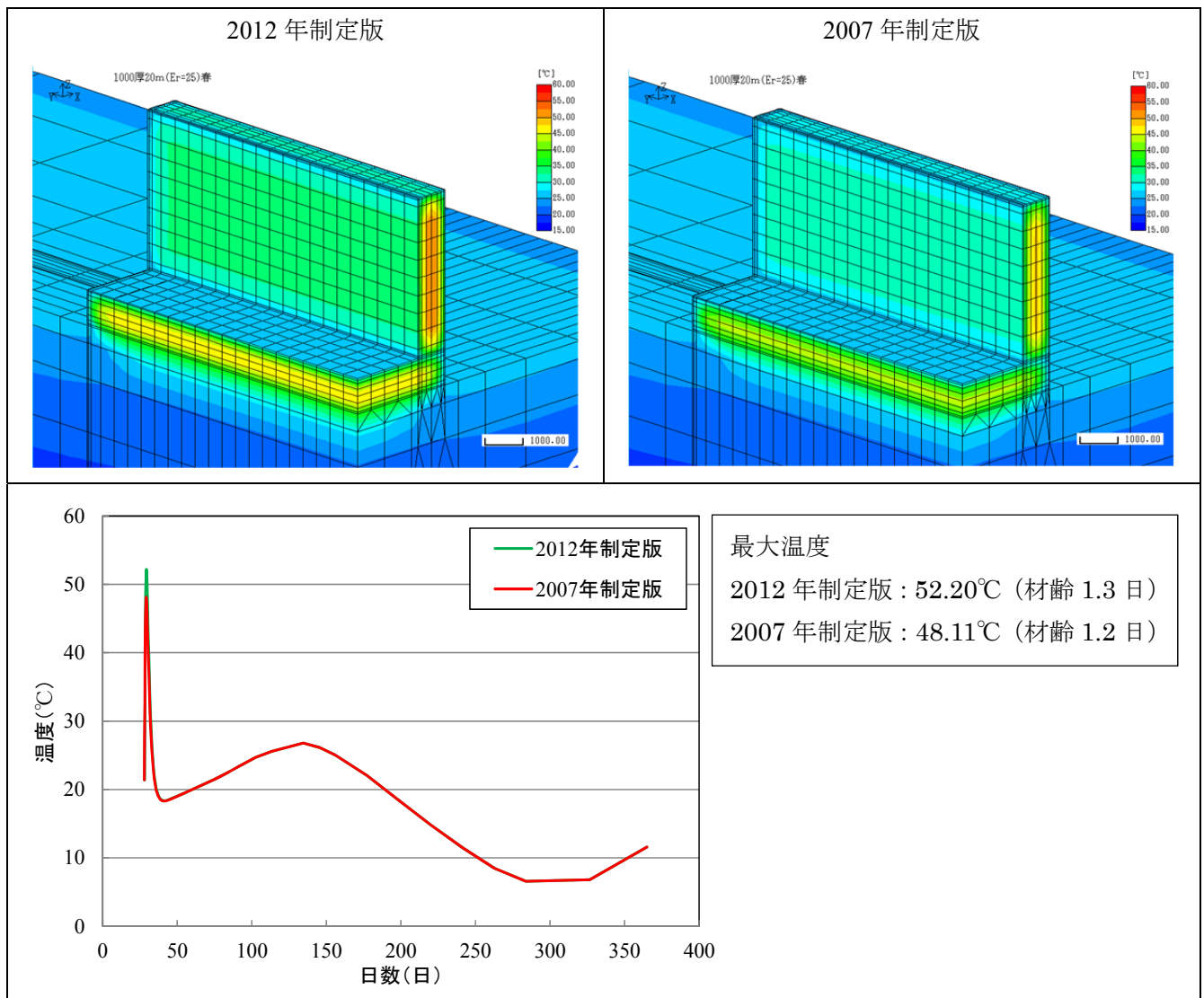


図 3.3-16 壁の温度解析結果

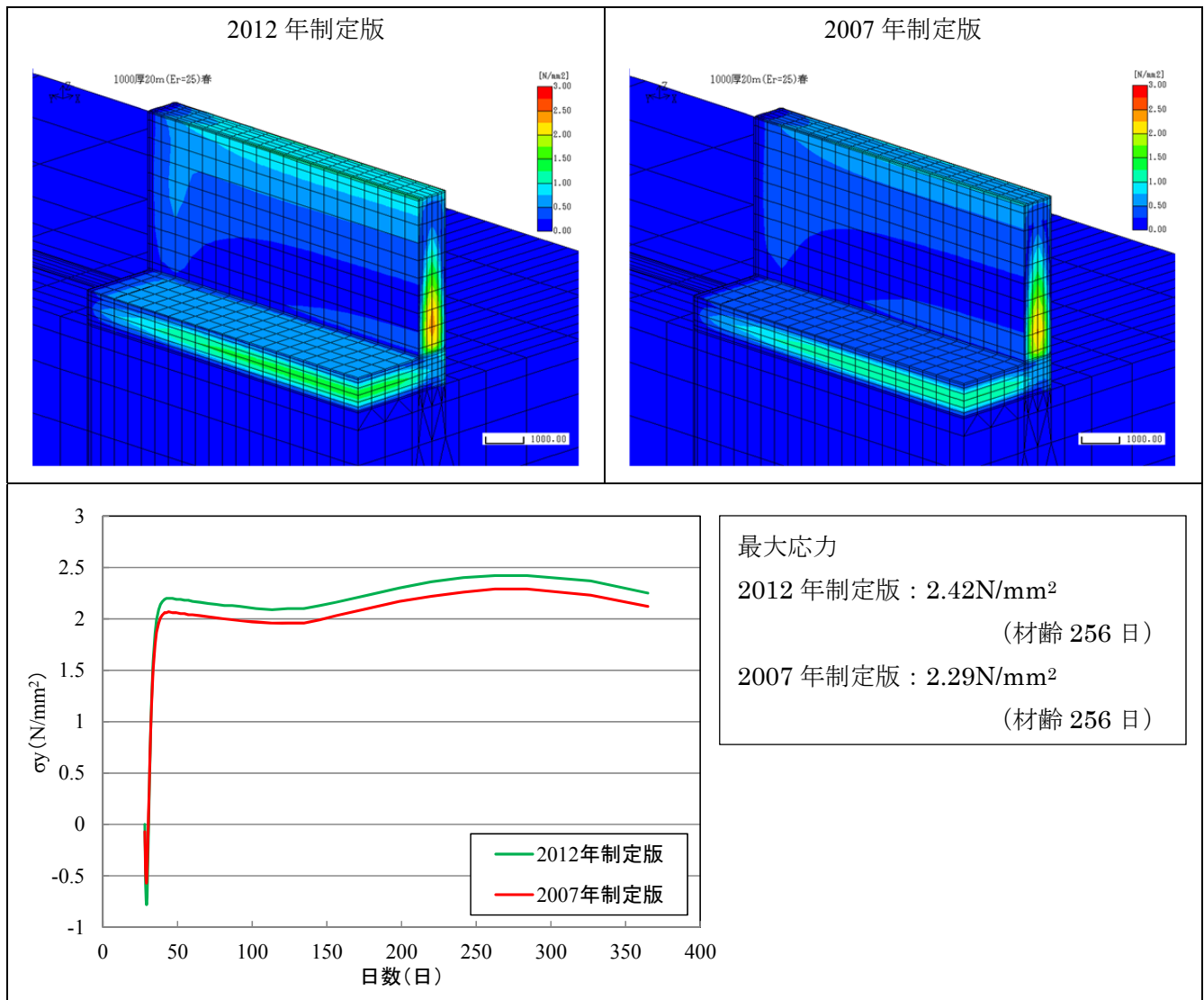


図 3.3-17 壁の応力解析結果

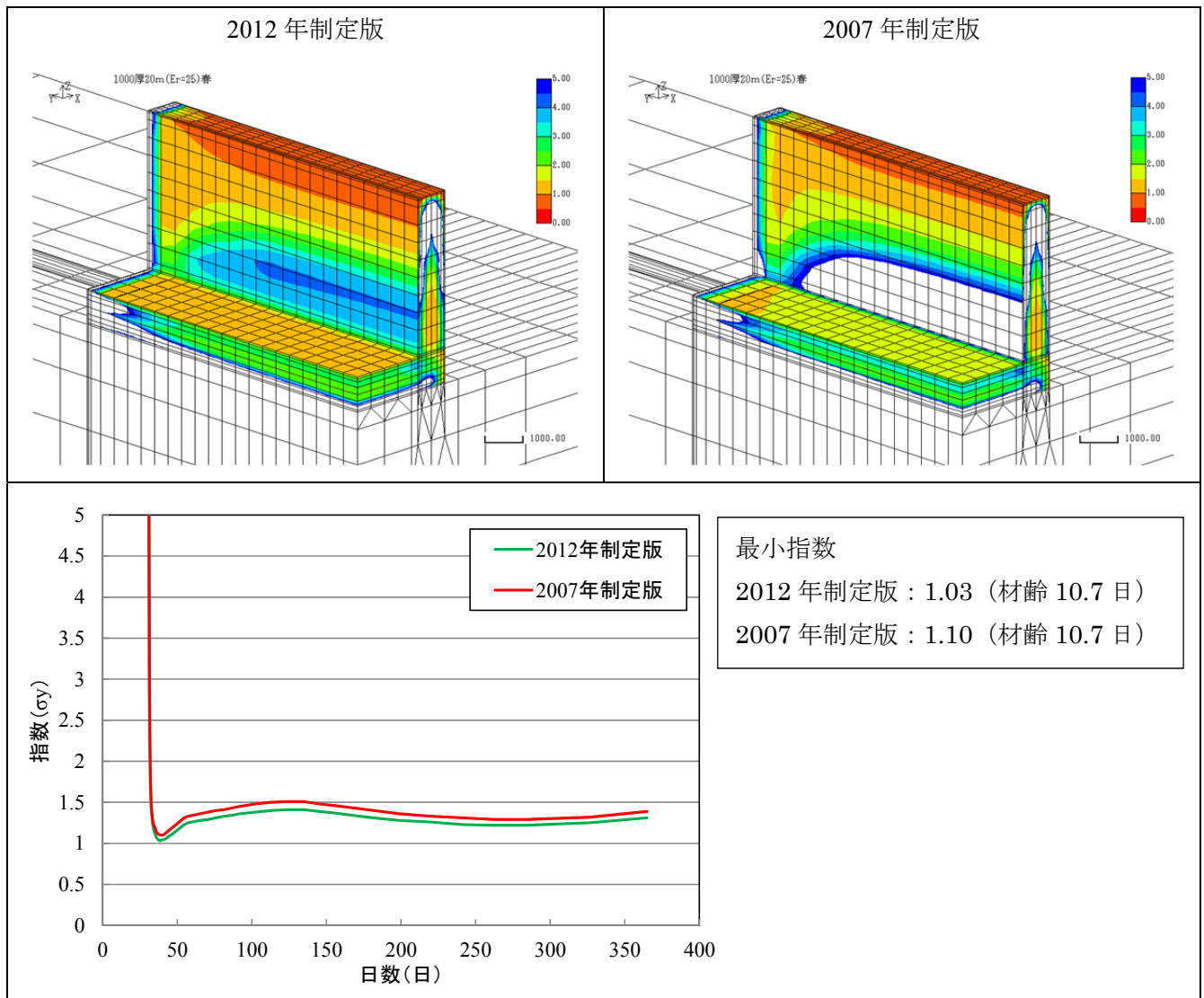


図 3.3-18 壁のひび割れ指数解析結果

3.4 ひび割れ発生確率図の適用範囲

3.4.1 ひび割れ発生確率図の意味

ひび割れ発生確率は、引張強度を引張応力が超える確率であると説明すると直感的に理解しやすいが、この概念とひび割れ発生確率図の意味あるいは考え方とは整合しない部分がある。ひび割れ指数が 1.5（強度 3 N/mm^2 、応力 2 N/mm^2 と仮定）の場合における引張強度と引張応力の分布例を二つ、図 3.4-1 に示す。ひび割れ発生確率図では、ひび割れ指数が 1.5 におけるひび割れ発生確率は 12%，というように、ひび割れ指数に対して一義的にひび割れ発生確率が決定される。しかし、図 3.4-1 の二つの分布例を比較した場合、左側の引張強度のばらつきの場合は、右側の引張強度のばらつきが小さい場合に比較して、ひび割れ発生確率は大きくなることは、視覚的に明らかである。このことは、ひび割れ指数が 1.5 でもひび割れ発生確率は一義的に決まらないことを示している。

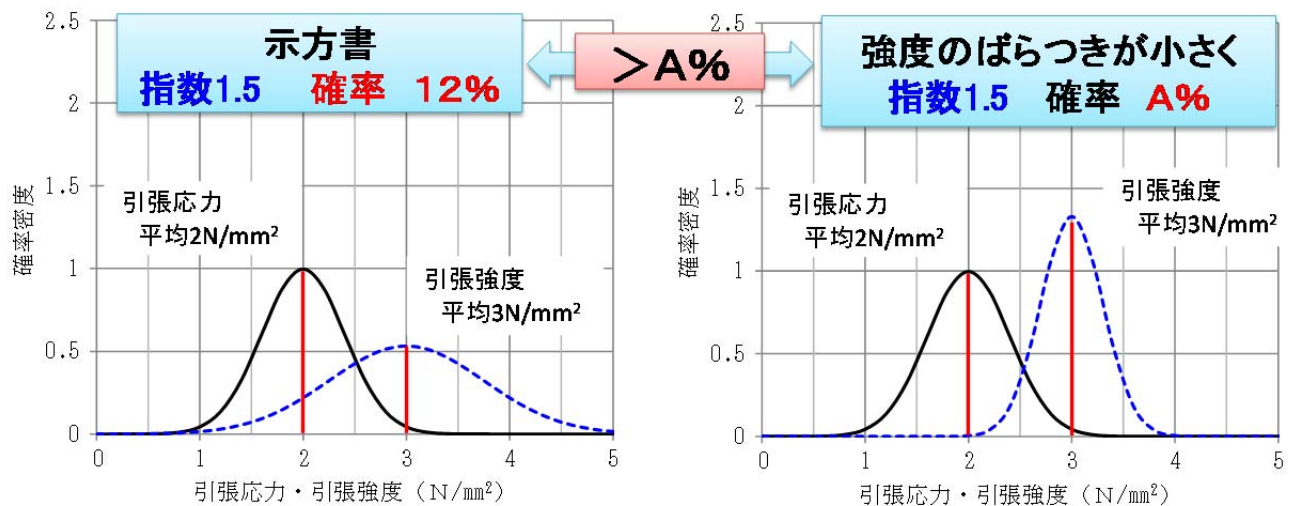


図 3.4-1 ひび割れ指数 1.5 の場合における引張強度と応力の分布例

さらに、ひび割れ発生確率を考えるということは、前述のとおり強度と応力にばらつきを考える必要があり、ばらつきを考えた場合、強度と応力の組合せは無限となり、ひび割れ指数も無限に存在することとなる。ひび割れ発生確率を考えると、本来的には、ひび割れ指数の意味もよく理解ができなくなってしまう。

前述のひび割れ発生確率図の改訂の歴史は、このような観点とひび割れ発生確率図とを整合させるための説明性を担保するための改訂であったとも言える。

このような観点からひび割れ発生確率図の説明を行ったのは、平成 11 年版の改訂資料である。構造体に発生する引張応力 μ_s 、引張強度 μ_R のばらつきを正規分布として与え、図 3.4-2³⁻²⁰⁾の S-R モデルを用いた説明を加えている。図 3.4-2 に示されるとおり構造体の引張応力の平均値 μ_s と解析による予測値 σ_t との差を考慮する修正係数 ρ_p と、構造体の引張強度の平均値 μ_R と割裂引張強度の特性値 f_{tk} との差を考慮した修正係数 ρ_c を導入し、ひび割れ指数 I_{cr} を引張強度の特性値 f_{tk} と引張応力の予測値 σ_t との比と再定義した。さらに性能照査型への移行という時代背景に合わせ、ひび割れ指数を安全係数 γ_{cr} 以上にするという照査法に改訂し、ここで式(3.4-1)の表現とした。このため、ひび割れ発生確率図は、許容す

るひび割れ発生確率を設定し、その際の安全係数を設定する図として、横軸がひび割れ指数から安全係数 γ_{cr} に変わることとなった。

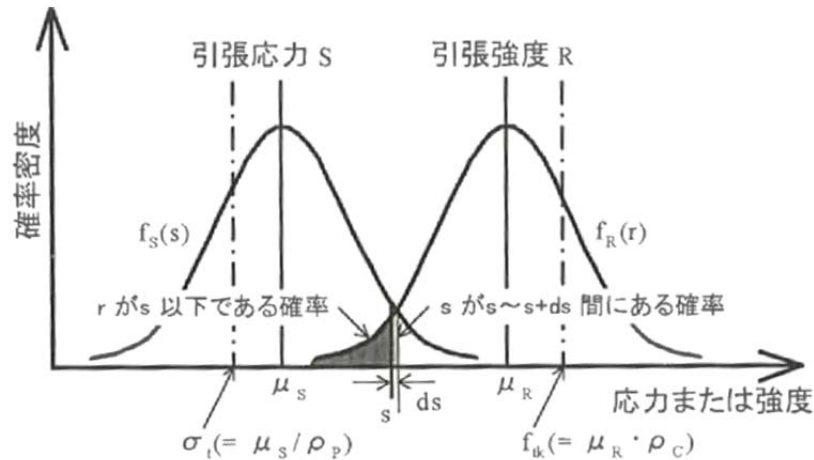


図 3.4-2 S-R モデルによるひび割れ発生確率の説明³⁻²⁰⁾

$$I_{cr}(t) \geq \gamma_{cr} \quad (3.4-1)$$

ここに、 $f_{ik}(t)$ ：材齢 t 日におけるコンクリート供試体の引張強度（特性値）

$\sigma_t(t)$ ：材齢 t 日における構造物中の最大主引張応力度

$I_{cr}(t)$ ：ひび割れ指数 $I_{cr}(t) = f_{ik}(t) / \sigma_t(t)$

γ_{cr} ：ひび割れ発生確率に関する安全係数

ここにおいて初めて、ひび割れが発生する確率は、引張応力と引張強度のばらつきをモデル化して（平成 11 年版の改訂資料では正規分布であるが）、引張応力が引張強度よりも大きくなる確率をひび割れ発生確率とする確率論的な説明をひび割れ発生確率図に与えた。さらに、ここでの説明を深く考えれば、ひび割れ指数は、引張強度と引張応力のそれぞれの平均値の比であることが理解できる。すなわち、例えばひび割れ指数が 1.5 であるとは、想定される強度と応力の無数のそれぞれの母集団のうち、平均値の比が 1.5 になる、無数の母集団の組合せを想定していると理解できるのである。

一方で、この S-R モデルによる研究は、前述の前出の中村らの研究³⁻²¹⁾であり、前年の 1995 年に発表されている。ここでは、応力解析の入力値をパラメトリックに扱い、ひび割れ指数に対するひび割れ発生確率の変化を図 3.4-3 のとおり示している。ひび割れ指数が 1 の時、ひび割れ発生確率は 50% と一義的に決まるのに対して、その他のひび割れ指数では、変動係数によってひび割れ発生確率が一義的に決まらないことを端的に表している。前述の改定資料における、ひび割れ発生確率図において、ひび割れ指数によりひび割れ発生確率を一義的に決めている説明として、引張応力も引張強度も変動係数が 0.28、 ρ_c を 1.26、 ρ_p を 1 とする説明がある。 ρ_c を 1.26 とするのは、割裂引張強度が構造物中の引張強度の差 1.26 倍程度となるからという説明があり、 ρ_p は便宜上 1 としているとしている。しかし変動係数については、ひび割れ発生確率図から逆に算定されると説明しているが、その意味に言及はない。

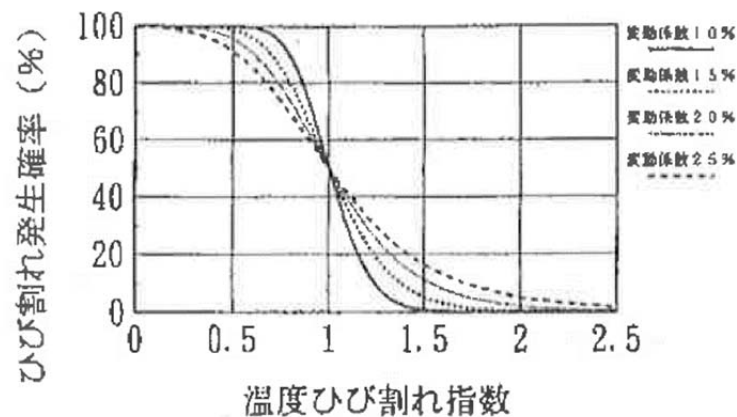


図 3.4-3 中村によるひび割れ指数とひび割れ発生確率（再掲）^{3-20), 3-21)}

ひび割れ発生確率図から変動係数が逆算されることの意味は、変動係数がひび割れ発生確率に対して一つに決まることを示している。ここで重要な事は、ひび割れ発生確率曲線は、実際の施工の結果を回帰して求めたひび割れ発生確率を表す曲線であり、これから逆算して推定した変動係数がある一定値で示されることは、実施工の結果が、引張強度も引張応力もある一定のばらつき（変動係数）になることを示唆している。つまり、我が国の平均的な技術と倫理を有する施工者がコンクリート標準示方書により施工した場合のひび割れ発生確率であり、この場合、改訂資料によれば引張応力も引張強度も変動係数が 0.28 程度になっていることを示していると考えられる。

逆に、ひび割れ発生確率図は、平均的ばらつきを有する標準的施工結果のひび割れ発生確率を示しているとすれば、ひび割れ指数に対してひび割れ発生確率を一義的に決めるための標準図ということになるのである。

平成 11 年版における改訂では、構造体の引張強度を直接利用せずに、引張強度の特性値をひび割れ指数の算出に用いるため、その差を考慮する修正係数 ρ_c の影響をひび割れ発生確率図に取り込んだことになる。その後、2012 年の改訂では、ひび割れ発生確率図にこの修正係数を取り込まれているという理解がなく改訂されたと推察され、このことが、現在用いられているひび割れ発生確率図の課題と考えられる。

また、このように引張強度と引張応力に様々な分布を考えて、引張強度を引張応力が超える確率をひび割れ発生確率として計算したとしても、ひび割れ指数が 1 の時だけは、ひび割れ発生確率は 50% に一義的に決まる。ひび割れ指数が 1 の時、引張強度と引張応力の平均値は等しく、この場合はどのような分布をとっても引張強度を引張応力が超える確率は、例えば図 3.4-4 に示すとおり 50% になるのである。ひび割れ発生確率図において、このことの整合をとるために行った、構造物中の引張強度と割裂引張強度の相違、ひび割れ発生確率曲線のシフトといった方法が、よく理解されずにいたことが、現在の混乱の一因になったと考えられる。

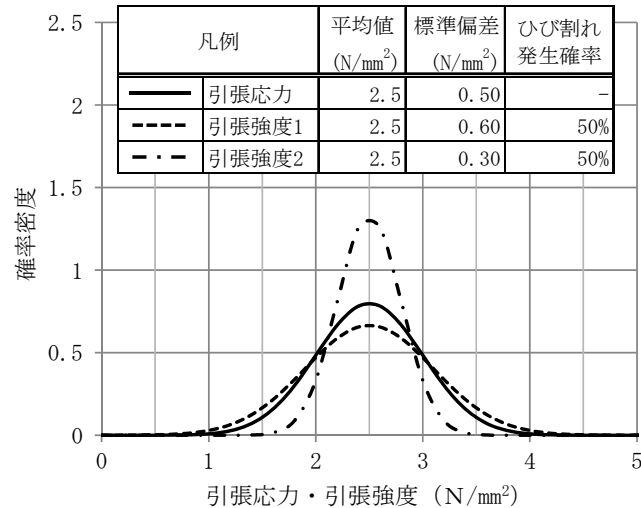


図 3.4-4 ひび割れ指数 1.0 の時の引張応力・引張強度のばらつきとひび割れ発生確率

3.4.2 ひび割れ発生確率図作成データの標準性と有意性、棄却

コンクリート標準示方書のひび割れ発生確率曲線は、実際の構造物のひび割れ発生有無とひび割れ指数とを対比させて、これに適合するような曲線を作成したものである。2012年制定版では、新たに65件の実構造物の724の部材について、3次元有限要素法による温度応力解析で算出した最小のひび割れ指数と実際のひび割れ発生確率とをひび割れ指数0.05刻みで整理し、図3.4-5のとおりワイブル分布として回帰した曲線を示したものであることをこれまで説明してきた。ここでは、ひび割れ発生確率図が大きく変更される一因と考えられるデータである、ひび割れ指数が大きい場合でもひび割れ発生確率が大きいプロット、具体的には、ひび割れ指数1.85でひび割れ発生確率15%程度になっている図3.4-5に示されるプロットの取扱いについて検討する。

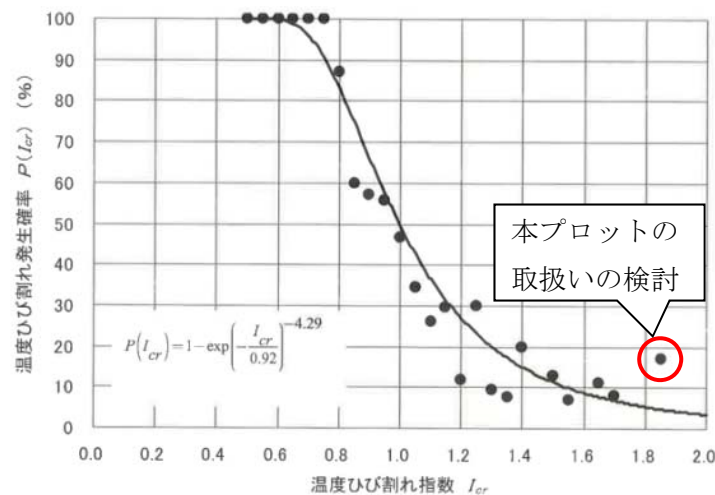


図 3.4-5 ワイブル分布による発生確率の整理（再掲）

まず、ひび割れ指数に対するひび割れ発生確率を次のとおり考えることとする。始めに、引張強度の分布と引張応力の分布を検討する。議論を簡単にするために、供試体の割裂強度と引張応力の算定値で

はなくて、構造体の引張強度と引張応力の分布を直接考えることとする。さらに、それぞれの分布は最も一般的な確率分布モデルと考えられる正規分布になると仮定する。この場合、ひび割れ発生確率は、引張強度を引張応力が超える確率と定義すれば、簡単な計算から求めることができる。それぞれが正規分布している場合の差の分布もまた正規分布となる性質を利用する。引張強度<引張応力となる確率は、引張強度－引張応力<0となる確率を求めることと同義であるから、先の仮定から、引張強度－引張応力も正規分布することになるので、引張強度－引張応力の正規分布で0より小さくなる確率を求めれば、これがひび割れ発生確率となる。ここで、ひび割れ指数とは、引張強度の平均値 μ_R の引張応力の平均値 μ_S に対する比となる。

このような方法でひび割れ指数が1.85で一般的な管理状態にあるひび割れ発生確率を具体的に算定してみる。

構造物に発生する引張応力の平均値 μ_S を1.5 (N/mm²)と仮定する。通常の精度であれば変動係数は15%程度であるので、変動係数を15%と仮定、ここから逆算すると標準偏差は0.225 (N/mm²)と設定できる。また、ひび割れ指数は1.85であるから、引張強度の平均値 μ_R は引張応力の平均値 $\mu_S \times 1.85 = 2.775$ (N/mm²)と設定できる。ここでも、通常の施工の管理状態と考えて変動係数を15%と仮定すると、標準偏差は0.416 (N/mm²)と逆算できる。このように仮定、設定すると、それぞれの分布は図3.4-6のとおり示すことができる。この場合の引張強度と引張応力の差の正規分布の累積確率分布が図3.4-7のとおり示され、これが0以下となる場合、すなわち、ひび割れ発生確率が0.352%と算定することができる。

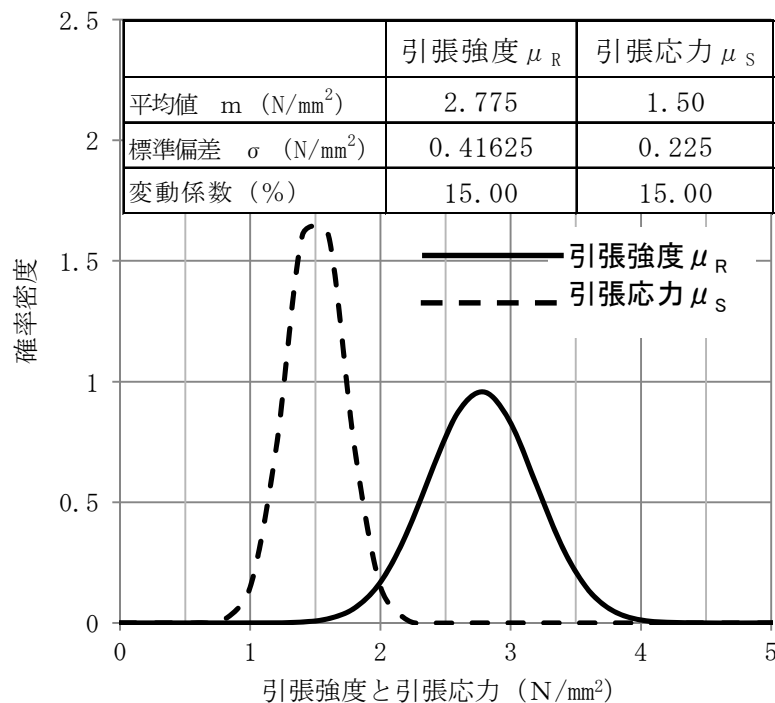


図 3.4-6 引張強度と引張応力の分布（変動係数 15%）

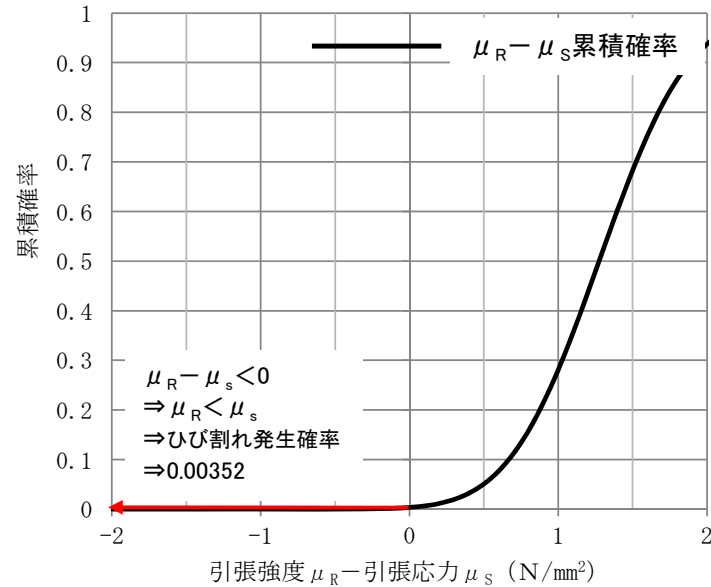


図 3.4-7 引張強度と引張応力の差 ($\mu_R - \mu_S$) の累積確率分布 (図 3.4-6 の場合)

次に、このようにして求めることができるひび割れ発生確率が、逆に 15% になるような、ひび割れ指数が 1.85 の時の引張強度と引張応力の「分布」を具体的に検討する。先の例と同様に、引張応力の平均値 μ_S を 1.5 (N/mm²)、その変動係数は 15%、標準偏差を 0.225 (N/mm²) とすると、ひび割れ指数が 1.85 であれば、引張強度の平均値 μ_R も 2.775 (N/mm²) のままになる。すなわち、図 3.4-6 の分布に対して、ひび割れ発生確率が 15% になるには、引張強度の変動係数、標準偏差がどの程度になればよいかを逆算した。この結果を図 3.4-8、図 3.4-9 に示す。

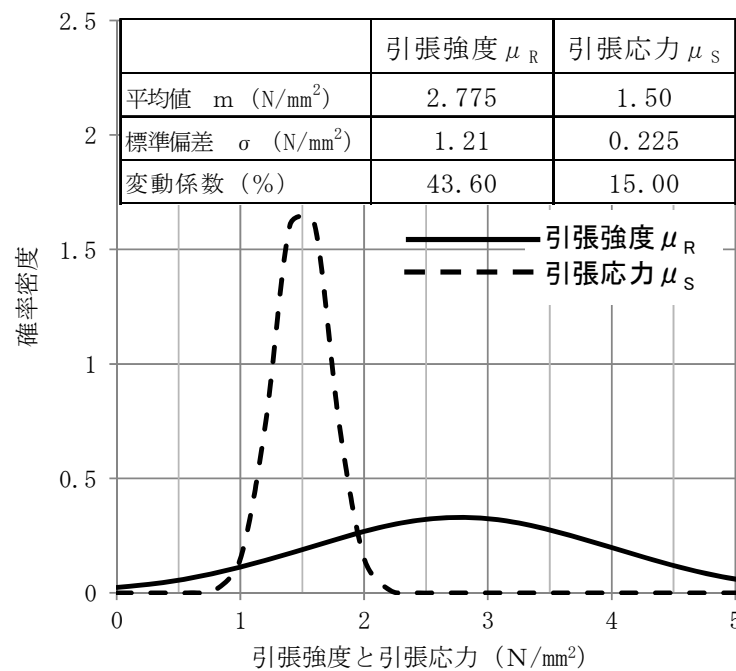


図 3.4-8 引張強度と引張応力の分布 (ひび割れ発生確率が 15% になる場合)

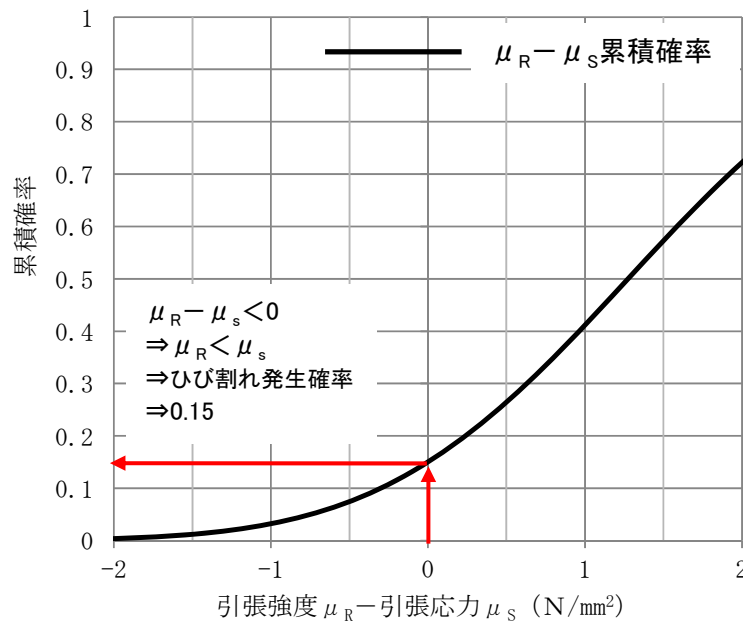


図 3.4-9 ひび割れ発生確率が 15%になる（図 3.4-8 の場合）
引張強度と引張応力の差（ $\mu_R - \mu_s$ ）の累積確率分布

引張強度の変動係数は 43.6%，標準偏差は 1.21（ N/mm^2 ）となった。変動係数が 43.6%になるのは、少なくとも良好な管理状態、標準的な管理状態にあるとは言えない。すなわち、平均的な施工者の施工によるある一定範囲のばらつきに収まっていないデータとなっている事が明らかとなった。

以上の議論により、先のプロットはコンクリート標準示方書で示されるひび割れ発生確率図を作成するためのプロットとしては、適していないことを示すことができたと考えられる。このようなプロットはひび割れ発生確率図の曲線を検討する場合には、棄却すべきデータと考えられる。

同様に、引張応力の変動係数を 15%とした想定した場合に、引張強度の変動係数が 25%程度以上になるプロットを算定して、図 3.4-10 に示す。かなりのプロットの変動係数は 25%程度以上になっている。前項で述べたように、ひび割れ発生確率図は、平均的ばらつきを有する標準的施工結果のひび割れ発生確率を示す標準図ということであれば、変動係数が 25%程度以上になるような管理状態を、標準として捉えて良いのかという議論になる。このような観点についても今後検討を加えていく必要がある。

また、なぜこのようなプロットが増えたのかについての議論もある。これらのデータは、延長 65.8m もある層状構造物や 34.6m もある壁状構造物のデータも含まれていることが表 3.4-13²²⁾のとおり示されている。後述するが、このような長スパンの構造物のひび割れ発生確率は、現在のひび割れ照査方法では正確に算定できないと考えられ、そのようなデータが前述のようなデータが増加した一因の可能性はある。

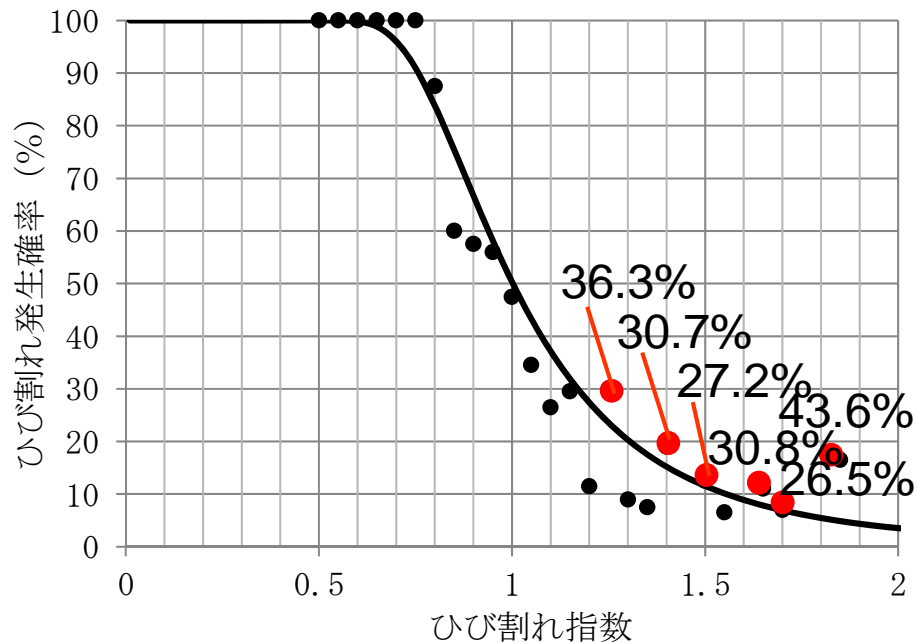


図 3.4-10 2012 年制定版の作成時プロットの変動係数の逆算例

表 3.4-1 ひび割れ発生確率を求めるために用いた調査構造物諸元³⁻²²⁾

種 別		幅 (m)	長さ (m)	高さ (m)
壁状構造物	最小	0.3	3.0	0.8
	最大	5.4	34.6	7.2
	部材寸法	<u>0.3</u> ×12.0×1.1	1.0× <u>3.0</u> ×5.5	2.4×14× <u>0.8</u>
		<u>5.4</u> ×9.0×3.0	1.0× <u>34.6</u> ×1.4	2.0×31.9× <u>7.2</u>
層状構造物 (砂防堰堤, 治山ダム)	最小	3.0	2.3	0.4
	最大	44.6	65.8	5.2
	部材寸法	<u>3.0</u> ×12.3×1.0	15.0× <u>2.3</u> ×8.0	15.0×6.8× <u>0.4</u>
		<u>44.6</u> ×4.0×3.8	15.0× <u>65.8</u> ×0.75	24.0×12.7× <u>5.2</u>
柱状構造物 (橋脚)	最小	2.0	2.3	1.5
	最大	15.5	19.0	5.8
	部材寸法	<u>2.0</u> ×19.0×2.0	14.4× <u>2.3</u> ×3.6	10.9×12.0× <u>1.5</u>
		<u>15.5</u> ×3.4×3.4	2.0× <u>19.0</u> ×2.0	6.5×5.5× <u>5.8</u>
スラブ状構造物	最小	2.8	6.3	0.3
	最大	45.4	34.6	5.0
	部材寸法	<u>2.8</u> ×8.9×1.3	7.7× <u>6.3</u> ×1.8	6.6×13.5× <u>0.3</u>
		<u>45.4</u> ×9.0×3.8	18.0× <u>34.6</u> ×1.2	18.0×18.0× <u>5.0</u>

部材寸法は、被拘束体の幅×長さ×高さを示し、それぞれ幅、長さ、高さが最大・最小（下線）の時の寸法を示す。

3.4.3 高品質な構造物

打設管理記録のデータベースを活用し、各種のひび割れ抑制対策を採用した山口県の高品質な構造物

群において、そのひび割れ指数とひび割れ発生確率とを整理すると、図 3.4-11³⁻²³⁾のとおりになることが示されている。この時のひび割れ発生確率は、同一指数で比較すると、図 3.4-11 中のマスコン指針の曲線より、ひび割れ発生確率が小さくなっていることが分かる。

コンクリート標準示方書（マスコン指針）で示されるひび割れ発生確率図は、前章で示しているとおり平均的なばらつきを有する標準的施工結果におけるひび割れ発生確率を示していると解釈すれば、山口県の高品質な構造物群では、それらと同一指数で比較すると、ひび割れ発生確率が小さくなることは想像に難くない。ひび割れ発生確率図は、高品質な構造物群のひび割れ発生確率を示しているものではなく、このような高品質な構造物群を集めた場合には、ひび割れ発生曲線が相違することを示している検証データとも言えるのである。

このことは、コンクリート標準示方書（あるいはマスコン指針）で示されているひび割れ発生確率図による、ひび割れ発生の評価あるいはひび割れ制御検討手法の適用限界を示していると言える。これは、コンクリート標準示方書（あるいはマスコン指針）で示されているひび割れ発生確率図では、一義的にひび割れ発生確率曲線を示していることを原因としているものである。標準的で平均的なばらつきを持つコンクリートの施工で発生するひび割れを扱っていることに対する、その他の施工状態への適用性の問題である。

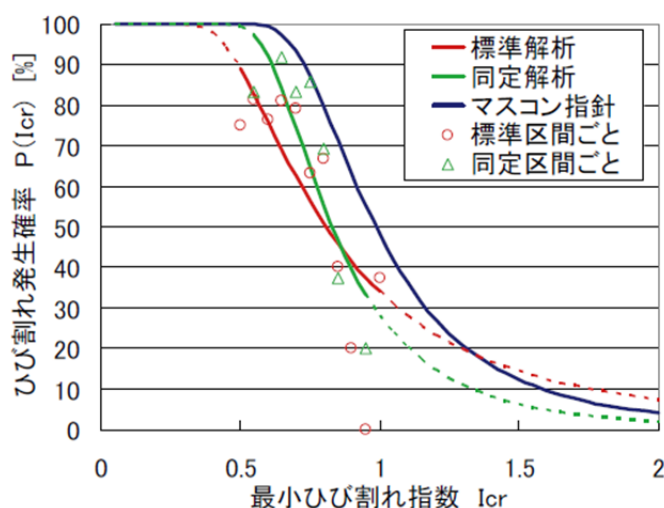


図 3.4-11 山口県の構造物群のひび割れ発生確率³⁻²³⁾

3.4.4 構造物内の応力と強度のばらつき、平均値

前項の山口県の高品質な構造物群の図 3.4-11 に示されるプロットの同定解析の曲線は、マスコン指針の曲線と比較すると、傾きが大きくなっていることが分かる。これは、前述の中村等の研究³⁻²¹⁾で図 3.4-12 に示されているとおり、変動係数がマスコン指針の曲線よりも小さくなったと見ることができる。山口県の高品質な構造物群の施工や品質管理システムによって、引張強度と引張応力のばらつきが、小さくなったと考えれば、妥当な結果である。

しかし、さらに、山口県の高品質な構造物群の同定解析結果と、中村等による図 3.4-12 で示されているひび割れ発生曲線とをよく比較してみると、標準解析も同定解析の結果も、マスコン指針の曲線に比べて変動係数が小さくなることで、ひび割れ発生確率曲線の傾きが大きくなるというよりも、むしろ曲

線を左側に平行移動したように見える。

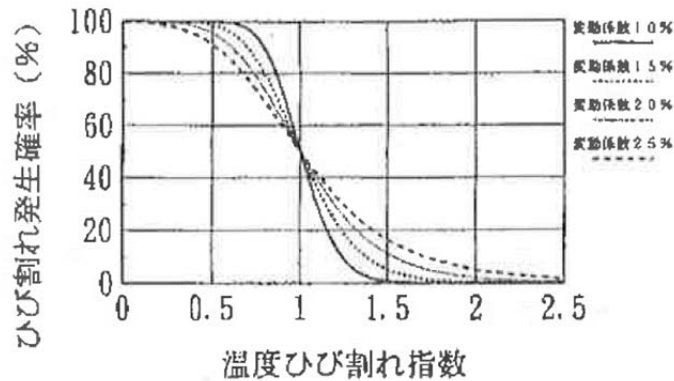


図 3.4-12 中村によるひび割れ指数とひび割れ発生確率（再掲） 3-20), 3-21)

この理由は次のとおり説明することができる。ひび割れ指数は、図 3.4-13 の S-R モデルで示されるとおり構造物の引張強度 μ_R と引張応力 μ_S の比であり、これらは応力の推定値 σ_t と割裂引張強度 f_{tk} からそれぞれ修正係数 ρ_p と ρ_c を用いて求められることを思い出す必要がある。図 3.4-11 の同定解析結果ではマスコン指針に準じて応力解析を実施しており、山口県の高品質な構造物群の引張応力の推定精度はマスコン指針のものと変わらないと言える。すなわち、応力の推定値 σ_t の修正係数 ρ_p は、マスコンクリート指針と変わらず、推定されている μ_S もマスコン指針と変わらないと考えられる。一方で、山口県の高品質な構造物群の引張強度 μ_R は管理状態が高いために、一般的な施工管理での引張強度よりも大きく、割裂引張強度 f_{tk} に近づくことが自然である。つまり、マスコン指針で設定されている ρ_c に比べて、山口県の高品質な構造物群の ρ_c は実際には大きくかつ 1 に近づく。しかし、割裂引張強度を従来とおり推察した（従来と同一の ρ_c を用いた）同定解析では、構造物の引張強度 μ_R は実際よりも小さく推定される。これらのことから、山口県の高品質な構造物群のひび割れ指数は、実際よりも小さく算定されてしまうのである。

整理すると、山口県の高品質な構造物群のひび割れ発生確率曲線がマスコン指針の同曲線を左側に平行移動したように見えるのは、山口県の高品質な構造物群の引張強度の修正係数 ρ_c をマスコン指針と同一にしか取り扱えず、引張強度 μ_R が実際よりも小さく推定されるため、ひび割れ指数が実際よりも小さく算定されているためであると言える。

すなわち、構造物中の引張強度を、標準的な管理状態より良い品質管理を行い、割裂引張強度に近いような場合、現在のひび割れ発生確率図を使用した照査方法では、この評価をすることができないのである。

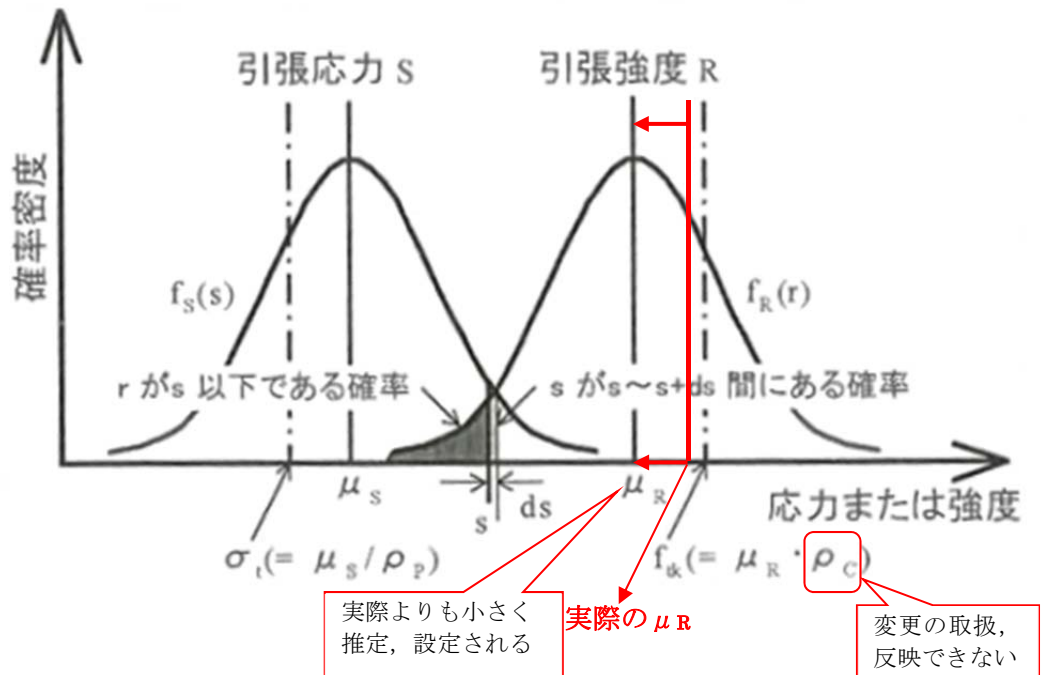


図 3.4-13 S-R モデルによるひび割れ発生確率の説明（図 3.4-2 に加筆）

3.4.5 長スパンの構造物

長スパン構造物において、温度応力はスパン方向で変わらなくなる。例えば、図 3.4-14 に示すように、壁厚 1.0m、スパン 20m のスパン中央断面とそこから両側 2.5m 区間（端部から 7.5m 位置）の断面とを比較すると、ほとんど断面最高応力点（図中の丸がついている点）の値は変わっていないことが分かる。

内空、幅 4.5m、高さ 4.5m のボックスカルバートについて、壁厚を様々に変えた場合、スパン長に対するひび割れ発生確率をパラメータ解析した結果を図 3.4-15 に示す。

解析の詳細と全てのケースの解析結果は付録-3 に示す。ひび割れ発生確率の算出は、2012 年制定版のコンクリート標準示方書に準じて 3 次元有限要素法により、温度応力解析を実施し、温度ひび割れ指数を算出し、壁部材中全ての位置、全材齢で、最小となるひび割れ指数に対応するひび割れ発生確率を、ひび割れ発生確率図から算定したものである。入力パラメータとして、コンクリート標準示方書に示される以外の物性としては、東京の外気温度で 4 月打ち込みとし、打込温度は外気温度+5℃、設計基準強度 24 N/mm² 相当の普通ポルトランドセメントを使用した場合の配合を想定し、断熱温度上昇特性、圧縮強度、弾性係数を設定した。

図 3.4-15 によると、どの壁厚でもスパン 15m 以上になると、スパンを長くしてもひび割れ発生確率は、ほとんど変わっていないことが分かる。現在の照査方法では、15m の構造物を 100m に延長してもほぼ同一のひび割れ発生確率になってしまうのである。

あるスパン長以上の構造物では、スパン長方向に断熱になり、温度分布が不変となることから、温度応力はスパンが長くなっても、あるスパン長から不変となる。このため、ひび割れ指数も不変となり、現状のひび割れ発生確率図では、この場合のひび割れ発生確率も不変となる。すなわち、ひび割れ発生確率はあるスパン長以上では不変となるのである。

しかしながら、実際には温度応力が高い区間がスパン長の増加と共に、長くなるため、ひび割れ発生

確率もこれに伴い大きくなることは明らかである。100mと15mの構造物が同じひび割れ発生確率にならないことは明らかである。

現状のひび割れ照査方法では、このように長スパン構造物のひび割れ発生確率を正しく評価できていない。

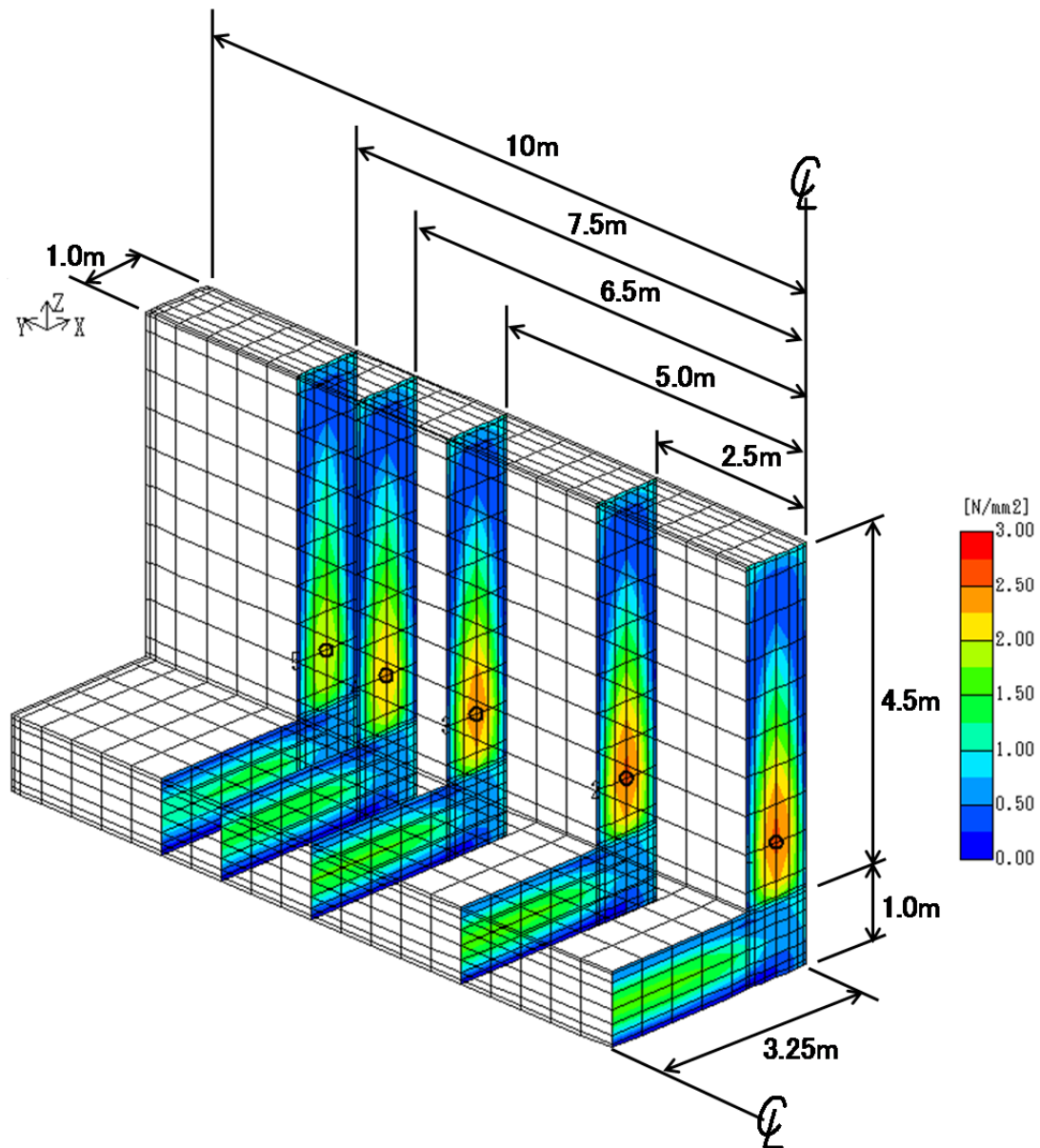


図 3.4-14 スパン 20mのボックスカルバートの底版と壁の温度応力分布(1/4 断面)

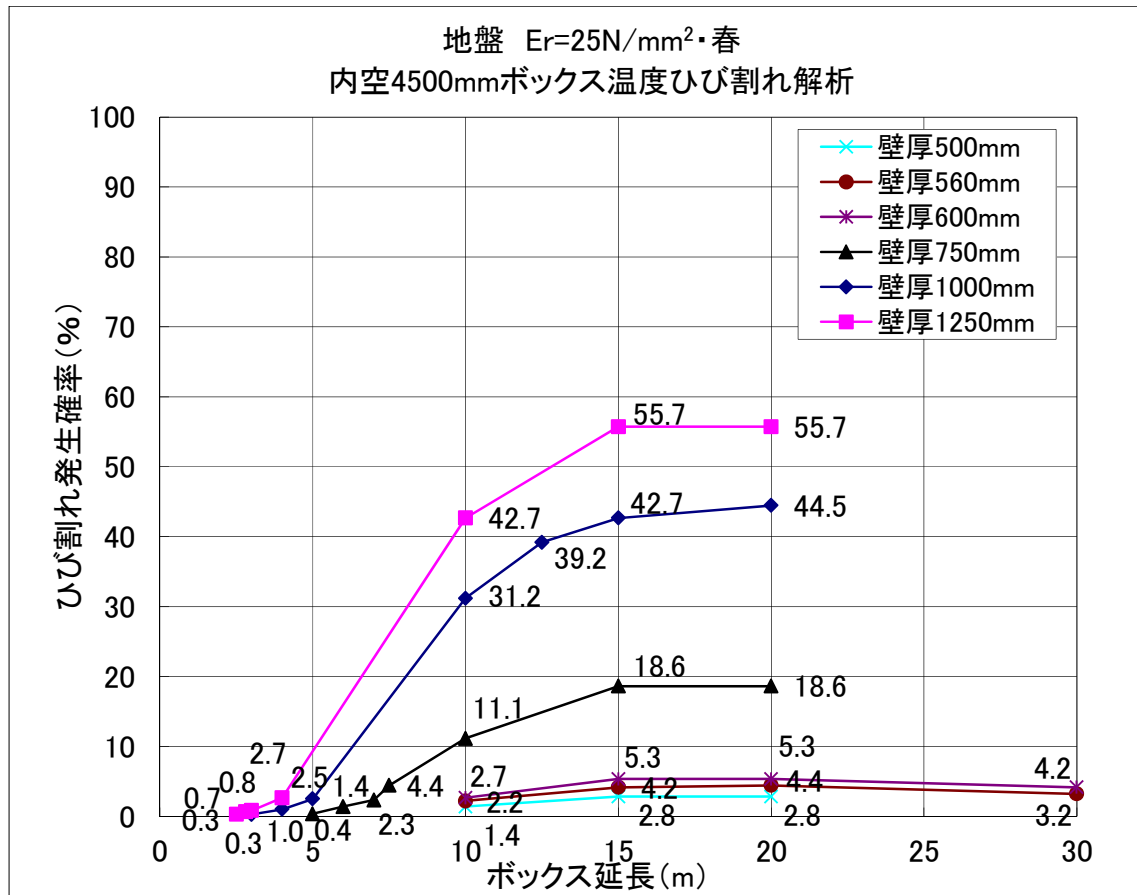


図 3.4-15 スパン長とひび割れ発生確率

3.5 現状の課題

3章で示してきた現状の課題は以下のとおり整理できる。

- ①2012年制定版のひび割れ発生確率図は、割裂引張強度試験値そのものを用いた場合、安全係数1近辺では、実際よりも小さい危険側のひび割れ発生確率を返す。
- ②2012年制定版のひび割れ発生確率図のひび割れ発生確率曲線は、数学モデルとしてワイブル分布とは言えず、曲線の関数式の説明性がない。
- ③ひび割れ指数が同じでも、引張強度と引張応力のばらつきが異なれば、ひび割れ発生確率は異なるが、現状のひび割れ発生確率図を利用した方法では、これを評価できない。
- ④2012年制定版のひび割れ発生確率図のひび割れ発生確率曲線は、安全係数が2でひび割れ発生確率が数%と裾野が広い曲線になっているが、作成元となったプロットの標準性が疑問視される。
- ⑤高品質な構造物のひび割れ発生確率の推定には、現在のひび割れ発生確率図は適用できない。
- ⑥構造物中の引張強度を割裂引張強度に近づけるような良い品質管理を行い、ひび割れ発生確率を低減することができても、現在のひび割れ発生確率図を利用したひび割れ照査方法ではこれを評価できない。
- ⑦長スパン構造物に一樣にひび割れ発生確率図を適用することには限界がある。

ここまでで、ひび割れ発生確率図においてひび割れ発生確率曲線が一義的に決まっていることの意義とその適用限界を示した。現在のひび割れ発生確率図は、我が国の平均的な技術と倫理を有する施工者が、引張強度と引張応力のある一定のばらつきの範囲で、標準的に施工した場合のひび割れ発生確率を示すものであることを明らかにした。このひび割れ発生確率図の適用の限界はすなわち標準的な施工方法でのひび割れ発生確率を示していることであり、それ以外の例えば山口県の高品質な構造物群のひび割れ発生確率や、平均的な施工者の施工によるある一定範囲のばらつきに収まっていないひび割れ発生確率は、現状のひび割れ発生確率図において取り扱うことができないことを示した。その理由として、現状のひび割れ発生確率図では、引張強度と引張応力の変動係数、ばらつきの取扱いと引張強度の修正係数の取扱いができないためであることを示した。

コンクリート標準示方書のように、ひび割れ発生確率を一義的に示すことにより、標準的な施工、品質の管理状態におけるひび割れ発生の評価や制御方法の検討を行えたことは、これまでのコンクリート構造物の品質向上に大きく寄与してきたことは間違いない。しかしながら昨今、引張強度のばらつきや構造物と供試体強度との差を小さくするような、施工、品質管理方法の向上も可能となり、それらの技術の差別化やインセンティブの付与のためにも、それらの状態をより反映できるひび割れ照査方法、発生確率の算定方法が必要である。

また、現状のひび割れ照査方法では、あるスパン長以上の構造物になると、ひび割れ発生確率が変わらなくなる課題を示した。あるスパン長以上の構造物では、スパン長方向に断熱になり、温度分布が不変となることから、温度応力はスパンが長くなってもあるスパン長から不変となる。このため、ひび割れ指数も不変となり、現状のひび割れ発生確率図では、この場合のひび割れ発生確率も不変となる。すなわち、ひび割れ発生確率はあるスパン長以上では不変となる。しかしながら、実際には温度応力が高い区間がスパン長の増加と共に、長くなるため、ひび割れ発生確率もこれに伴い大きくなる。現状では、これを評価できていないことが課題であることを示した。

今後、さらに山口県の高品質な構造物群や長スパン構造物等も一貫して扱うことができるように、ひび割れ照査法を改善することを提案する。

どのような管理状態のコンクリートでもひび割れ発生確率を正確に算定できるようにするため、まず次の4章ではひび割れ発生現象の確率論として、引張強度と引張応力のばらつきや特性値、標準偏差や変動係数、安全係数、ひび割れ指数とひび割れ発生確率との関係性などを整理することとした。

第4章 ひび割れ発生現象の確率論

4.1 ひび割れ発生現象の確率論

4.1.1 ひび割れの確率論的解釈

マスコンクリートのひび割れは，昭和 61 年制定版のコンクリート標準示方書⁴⁻¹⁾から，温度ひび割れ指数を介して確率的に扱われるようになる．昭和 61 年制定版の改訂資料⁴⁻²⁾では，仮に，コンクリートの真の強度が与えられ，また，計算から算出される温度応力が正しいときでも，温度ひび割れ指数が 1.0 すなわち，引張強度＝引張応力の場合に対するひび割れ発生の確率は 50%であり，このことからひび割れは確率的な性質をとると説明されている．

確率の定義は，JIS Z8101-1 1999「統計－用語及び記号－第 1 部：一般統計用語及び確率で用いられる用語」では，「確率はある試行を同じ条件の下で長く続けたとき，一定の結果が生起する相対頻度の極限值．より一般的にはランダムな事象に割り当てられている $[0, 1]$ の範囲の実数値と定義される．一般に事象 A の確率を $\Pr(A)$ で表す．」とされている．この解釈でひび割れ発生確率図を考えると，「温度ひび割れ指数が一定条件下で，ひび割れが発生する相対頻度の極限值を示している図」というような説明ができる．ここで，相対頻度の「極限值」になっているかどうかについては，確率論では，標本空間における相対頻度が母集団を表しているかの議論につながる．すなわち，ひび割れ発生確率図を作成する際には，ひび割れ指数が一定値の複数の構造物をサンプリングし，この中でひび割れが発生した相対頻度を調査するが，これが，ひび割れ指数があるその一定値の場合における，ひび割れ発生の相対頻度を代表できているかという議論である．

このような標本調査結果が母集団を代表しているかを検証するために、確率論的には検定という方法が取られる。

ひび割れ発生確率図において、ひび割れ指数が I_0 の時にひび割れ発生確率 p_0 となる意味は、ひび割れ指数が I_0 で同一の m 個の構造物のうち、ひび割れが n 回発生したことが分かれば、ひび割れ発生確率 p_0 を n/m であると推定できることを意味している。このひび割れ発生確率 n/m が、全ての構造物（母集団）を代表する有意で正しい確率と証明するには、2項検定を行うのがよい。例えば、ひび割れ指数 1.2 の 30 体の構造物で、6 体ひび割れが発生したひび割れ発生確率は、 $6/30=0.2$ であることが有意水準 5% であると言えるか、2項検定を行うとする。

実際には分からないが、ひび割れ指数 1.2 の構造物の真のひび割れ発生確率が 0.05 であるとする、この場合、2項分布 $B(30, 0.05)$ を使えば、ひび割れが 1 体しか発生しない確率、2 体しか発生しない確率というように、30 体の確率分布が図 4.1-1 のように求めることができる。この際、6 体でひび割れ発生した事が棄却域 5% のところになれば、これらの構造物群のひび割れ発生確率は、5% の有意水準で正しいと言える。図 4.1-1 においては、ひび割れ発生確率が 5 体以下となるのが 99.67%，6 体以上となるのが 0.033% であり、5% の有意水準で 6 体（以上）ひび割れが発生することは、棄却される。すなわち、このデータは正しくないと検定される。このように、そもそものひび割れ発生確率の想定ができれば、データの有意性の検定が可能である。

ひび割れ発生確率図は確率論的には、有意であることが検定できない図であるということもできる。

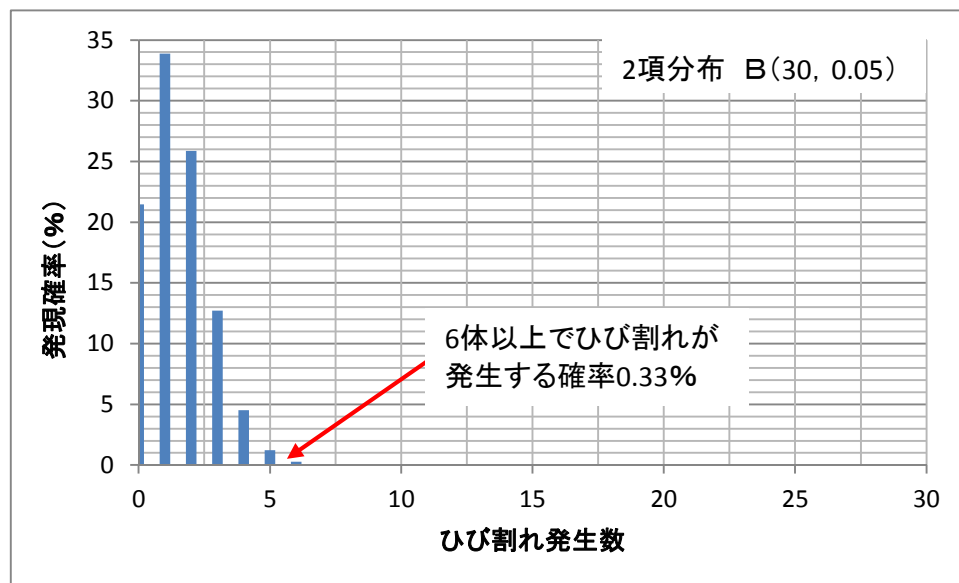


図 4.1-1 2項検定の例

このようなことから、標本調査結果を基本としたひび割れ発生確率図の考え方とは別に、ひび割れの定義に遡って、ひび割れ発生確率の意味を考えていく必要があると考える。

4.1.2 ひび割れ発生確率の定義

ひび割れ発生確率を考えるには、ひび割れの定義を考える必要がある。

ひび割れには、いわゆるヘアークラックと呼ばれる幅 0.04mm 程度のひび割れや 1mm 以上ある構造的なひび割れ、内部拘束ひび割れのように表面だけで部材を貫通しないひび割れ、外部拘束ひび割れのように貫通しているひび割れ、のように色々なものがある。最大引張ひずみ量で定義すべきであるとか、幅 0.04mm 程度以下の見えないようなひび割れをどこまでひび割れと呼ぶのか、ひび割れの定義だけでも議論はつきない。

このような議論も踏まえた上で、あえてここでは、ひび割れは引張応力が引張強度を超えた場合に発生するものと定義する。

この場合、構造物内のある 1 点での引張応力と引張強度の大小関係を定義している事になり、例えば部材中心のような場所で表面部までひび割れが達せず、構造物としては、ひび割れが見えない場合も、ひび割れと考えていることになる。しかしながら、ひび割れの議論は、構造物にとって品質上有害になるかどうか大きな論点であり、ここでの定義であれば、ひび割れが発生しない場合、構造物内のどのような点でも引張応力が引張強度を下回ることから、非常に保守側の定義と言える。逆に言えば、構造物内のある 1 点でも引張応力が引張強度を超えた場合には、その点でひび割れが発生し、これが応力集中の観点から、構造物上の観察者に見える点まで伝達するような状況を想定している定義とも言える。

この定義であれば、引張強度と引張応力にばらつきを考えれば、ひび割れの発生は確率として捉えることができる。最も簡略化すれば、すなわち、いわゆる S-R モデルとして引張応力が引張強度を超える確率としてひび割れを評価できることになる。

ただし、この場合のひび割れ指数の定義には留意が必要である。上記のとおり、引張強度と引張応力にばらつきを認めるということは、この母集団に含まれる一つ一つを見ていくと、無数のひび割れ指数を持つ事になる。つまり、このように考えてしまうと、ひび割れ指数の意味は失われてしまうのである。確率論的にひび割れ指数を考慮するには、ある期待値 μ_R を持つ引張強度の母集団とある期待値 μ_S を持つ引張応力の母集団とを考えることになるため、ひび割れ指数とは、引張強度の期待値 μ_R を引張応力の期待値 μ_S で除したものと、代表值的、統計的、観念的な値として定義する必要があるである。

また、この強度と応力のばらつきには色々な要素が含まれる。実構造物と供試体との差、温度の差、施工欠陥の差、製造品質の差、構造物内での連続性や時間的前後関係等が考えられる。現状の限界状態設計法における体系では、これらは、平均値、特性値、安全係数等により整理して扱われているが、確率論的には、ばらつきとして包含して扱うことも可能である。これらのばらつきをどのように扱うかは、確率論と限界状態設計法との切り分けにもつながる。

4.1.3 期待値と標準偏差、変動係数、特性値、安全係数、修正係数

2012 年制定版コンクリート標準示方書設計編⁴⁾³⁾では、線形解析を用いる場合の安全係数を断面破壊の限界状態の照査を例に図 4.1-2⁴⁾³⁾のとおり示している。

同設計編では、安全係数について、次のとおり説明している。

安全係数は、材料係数 γ_m 、作用係数 γ_F 、構造解析係数 γ_a 、部材係数 γ_b および構造物係数 γ_i とする。

材料係数 γ_m は、材料強度の特性値からの望ましくない方向への変動、供試体と構造物中との材料特性の差異、材料特性が限界状態に及ぼす影響、材料特性の経時変化等を考慮して定めるものとする

作用係数 γ_F は、作用の特性値からの望ましくない方向への変動、作用の算定方法の不確実性、設計耐用期間中の作用の変化、作用の特性が限界状態に及ぼす影響等を考慮して定めるものとする。

構造解析係数 γ_a は、応答値算定時の構造解析の不確実性等を考慮して定めるものとする。構造解析係数 γ_a は、一般に 1.0 としてよい。

部材係数 γ_b は、部材耐力の計算上の不確実性、部材寸法のばらつきの影響、部材の重要度、すなわち対象とする部材がある限界状態に達したときに、構造物全体に与える影響等を考慮して定めるものとする。部材係数 γ_b は、限界値算定式に対応して、それぞれ定めるものとする。

構造物係数 γ_i は、構造物の重要度、限界状態に達したときの社会的影響等を考慮して定めるものとする。構造物係数 γ_i は、一般に 1.0～1.2 としてよい。

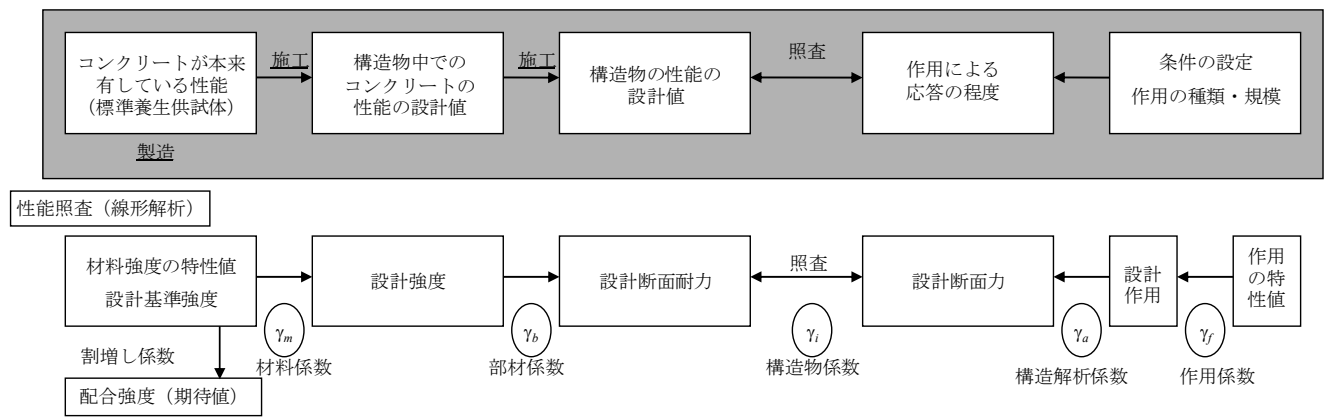


図 4.1-2 線形解析の性能照査における安全係数⁴⁻³⁾

また、同様に材料強度の特性値 f_k は、一般に(4.1-1)式により求められるとしている。

$$f_k = f_m - k\sigma = f_m(1 - k\delta) \tag{4.1-1}$$

ここに、
 f_m : 試験値の平均値
 σ : 試験値の標準偏差
 δ : 試験値の変動係数
 k : 係数

係数 k は、特性値より小さい試験値が得られる確率と試験値の分布形より定まるものである。特性値を下回る確率を 5 % とし、分布形を正規分布とすると、係数 k は 1.645 となる (図 4.1-3⁴⁻³⁾ 参照)。

さらに、材料強度および作用に関して、特性値とは別の体系の規格値または公称値が定まっている場合は、これらの特性値は、規格値または公称値を修正係数によって変換することによって求められる。また、作用修正係数 ρ_f は、それぞれの限界状態に応じて求められる。修正係数は、規格値や公称値が特性値の定義に従って規定されるまでの経過措置として、この示方書で規定している。

修正係数は、材料修正係数 ρ_m および作用修正係数 ρ_f とする。

材料修正係数 ρ_m は、材料強度の特性値と規格値との相違を考慮して定めるものとする。

作用修正係数 ρ_f は、作用の特性値と規格値または公称値との相違を考慮して、それぞれの限界状態に応じて定めるものとする。

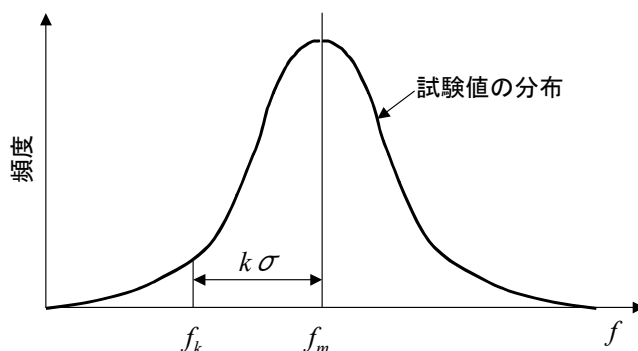


図 4.1-3 材料強度の特性値⁴⁻³⁾

断面破壊の限界状態に対して、安全性確保のために配慮されている内容とその取扱いをまとめると、表 4.1-1⁴⁻³⁾のようになることが示されている。

表 4.1-1 安全係数により配慮されている内容（線形解析を用いた断面破壊の照査の場合）⁴⁻³⁾

配慮されている内容		取り扱う項目
断面耐力	1. 材料強度のばらつき (1) 材料実験データから判断できる部分	特性値 f_k
	(2) 材料実験データから判断できない部分（材料実験データの不足・偏り、品質管理の程度、供試体と構造物中との材料強度の差異、経時変化等による）	材料係数 γ_m
	2. 限界状態に及ぼす影響の度合 3. 部材断面耐力の計算上の不確実性、部材寸法のばらつき、部材の重要度、破壊性状	部材係数 γ_b
断面力	1. 作用のばらつき (1) 作用の統計的データから判断できる部分	特性値 F_k
	(2) 作用の統計的データから判断できない部分（作用の統計的データの不足・偏り、設計耐用期間中の作用の変化、作用の算定方法の不確実性等による）	作用係数 γ_f
	2. 限界状態に及ぼす影響の度合 3. 断面力等の算定時の構造解析の不確実性	構造解析係数 γ_a
構造物の重要度、限界状態に達したときの社会的経済的影響等		構造物係数 γ_l

以上ここまでが、示方書における安全係数と特性値、修正係数などに関する説明の抜粋である。

このように、特性値と安全係数や修正係数の関係をしっかりと定義づけして説明している。

ところが、温度ひび割れ照査に用いられる引張強度は、割裂引張強度であり、これは供試体の試験値で、試験値の平均値 f_m 相当を示していると考えられる。この場合、試験のばらつきを考え、特性値を下回る確率を 5% とし、分布形を正規分布とすると、 1.645σ を差し引くことで特性値相当が得られると考えられるが、3.1.1 項において説明したとおり、ひび割れ照査においては期待値そのままを特性値としていと考えられる。この特性値をさらに、材料係数 γ_m で除すことで設計用の引張強度、部材係数 γ_b で除すことで、すなわち構造物のひび割れが発生する時の引張強度を表すことができる考えられる。

実際には、温度ひび割れ照査を考えた場合、微少要素における引張強度と引張応力の照査になり、部材単位での照査ではないことから、部材係数 γ_b は省略できると考えられる。また、作用係数 γ_f は、温度ひび割れ解析のパラメータを保守側に設定することで表現するものとし、構造解析係数は温度応力解析に 3 次元有限要素法を用いた場合には、使用性の照査の標準値相当の 1 としてよいと考える。

なお、本書では、平成11年版の改訂資料の説明^{4.4)}に従って、便宜上、材料係数 γ_m で除す代わりに、この逆数を修正係数 ρ_m と定義し、修正係数を乗することで、これらを表現している場合がある。前述の設計編の材料修正係数および作用修正係数の定義とは異なることに留意頂きたい。

このように、見てくると、限界状態設計法における部分安全係数法において、確率を扱っているのは、特性値においてのみである。特性値の設定には、ばらつきを考慮した確率が考慮されている。安全係数で扱っているのは、特性値をさらに安全側にどれだけシフトするかという、スカラー的な値を扱っていると見ることができる。安全係数に確率的意味合いを持たせて、詳細に検討しているのは、温度ひび割れ照査における体系だけと考えられる。

4.2 ひび割れ発生確率の算定方法

4.2.1 引張強度が引張応力を超える確率

ひび割れ発生確率は、構造物にひび割れが発生する時の引張強度（以降、引張強度と呼ぶ）をひび割れが発生した位置、時刻における引張応力（以降、引張応力と呼ぶ）を超える確率であると定義する。この引張強度と引張応力のばらつきをモデル化する事でひび割れ発生確率を直接的に算定することが可能となる。

ここでは、引張強度は正規分布 $N_R(\mu_R, \sigma_R)$ 、引張応力は正規分布 $N_S(\mu_S, \sigma_S)$ に従うとして、引張強度と引張応力のばらつきをモデル化する。ここで、 μ_R : 引張強度の平均値、 σ_R : 引張強度の標準偏差、 μ_S : 引張応力の平均値、 σ_S : 引張応力の標準偏差である。さらに、 μ_R は割裂引張強度 f_{tk} に修正係数 ρ_R を乗じたもの ($\mu_R = \rho_R \cdot f_{tk}$)、 μ_S は応力の推定値 σ_t に修正係数 ρ_S を乗じたもの ($\mu_S = \rho_S \cdot \sigma_t$) とする。 f_{tk} と σ_t を式(1)における定義から変えているのは、構造物のひび割れに直接関わる強度や応力なのか、あるいは供試体強度や解析値（推定値）なのかをより明確に切り分けるためである。

ひび割れ発生確率を直接的に算定するために、正規分布している変数と変数の差もまた正規分布するという性質を利用する。ここでの引張強度と引張応力の差の分布は、正規分布 $N_{R-S}(\rho_R \cdot f_{tk} - \rho_S \cdot \sigma_t, \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2})$ に従うこととなる。この正規分布 N_{R-S} において0以下になる確率が、引張強度を引張応力を超える確率であり、ひび割れ発生確率となる。至って簡単にひび割れ発生確率が求められることが分かる。なお、ひび割れ指数の分布は、正規分布している変数と変数の除の分布であるが、この分布は汎用的な既存の関数形でモデル化することはできず、数値計算的にしか求めることができない。このことが、これまでひび割れ指数からひび割れ発生確率を直接的に算定しなかった理由であろう。

さらに、ひび割れ発生確率の算定を一般化して汎用的にするために、正規分布 N_{R-S} に従う変数 X （引張強度と引張応力との差）を Z に正規化し、標準正規分布 SN_{R-S} を求める。変数 Z は(4.1-2)式で表す事ができる。

$$Z = \frac{X - (\rho_R \cdot f_{tk} - \rho_S \cdot \sigma_t)}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} \quad (4.1-2)$$

ひび割れ発生確率は、 X が0以下となる確率であるから、標準正規分布 SN_{R-S} において、(4.1-3)式で表す Z_0 以下となる確率となる。

$$Z_0 = \frac{-\rho_R \cdot f_{tk} + \rho_S \cdot \sigma_t}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} \quad (4.1-3)$$

ここにおいて、ひび割れ発生確率は標準正規分布表から Z_0 以下となる確率として汎用的に算定可能と

なり、また、ひび割れ発生確率 $P(Z_0)$ は誤差関数 erf を用いて(4.1-4)式のとおり定式化して表す事ができる。

$$P(Z_0) = \frac{1}{2} \left(1 + \text{erf} \left(\frac{Z_0}{\sqrt{2}} \right) \right) \quad (4.1-4)$$

このように、ひび割れ発生確率は割裂引張強度、応力の推定値、引張強度と引張応力の修正係数と標準偏差の6変数から、直接算定する事が可能である。

4.2.2 ひび割れ発生確率とひび割れ指数

ひび割れ指数がひび割れ発生確率に与える影響を把握するために、(4.1-3)式をひび割れ指数 I_{cr} ($=f_{tk}/\sigma_t$) を用いた(4.1-5)式に展開する事を試みる。ここで、ひび割れ指数は、引張強度の平均値を引張応力の平均値で除した比として表現することに留意する必要がある。

$$\begin{aligned} Z_0 &= \frac{-\rho_R \cdot f_{tk} + \rho_S \cdot \sigma_t}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} = \frac{(-\rho_R \cdot I_{cr} + \rho_S) \cdot \sigma_t \cdot \left(\frac{1}{\sigma_t}\right)}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2} \cdot \left(\frac{1}{\sigma_t}\right)} = \frac{(-\rho_R \cdot I_{cr} + \rho_S)}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2} \cdot \left(\frac{\rho_S}{\mu_S}\right)} \\ &= \frac{(-\rho_R \cdot I_{cr} + \rho_S)}{\sqrt{\rho_S^2 \frac{\sigma_R^2}{\mu_S^2} + \rho_S^2 \frac{\sigma_S^2}{\mu_S^2}}} = \frac{(-\rho_R \cdot I_{cr} + \rho_S)}{\sqrt{\rho_S^2 \frac{\sigma_R^2}{\rho_S^2 \mu_R^2} \rho_R^2 I_{cr}^2 + \rho_S^2 V_S^2}} = \frac{(-\rho_R \cdot I_{cr} + \rho_S)}{\sqrt{V_R^2 \rho_R^2 I_{cr}^2 + \rho_S^2 V_S^2}} \end{aligned} \quad (4.1-5)$$

ここに、 V_R : 引張強度の変動係数 σ_R/μ_R 、 V_S : 引張応力の変動係数 σ_S/μ_S である。ひび割れ発生確率の算定には、ひび割れ指数の他に、変動係数と修正係数が必要であり、ひび割れ発生確率図のようにひび割れ指数だけで、ひび割れ発生確率を算定できない事が明らかである。

なお、修正係数の代りに一般的な安全係数を用いた表記は以下のとおりとなる。

構造物中の引張強度（ひび割れ照査用） μ_R

μ_R = 割裂引張強度平均値 f_{tk} / 材料係数 γ_m

構造物中の引張応力（ひび割れ照査用） μ_S

μ_S = 引張応力解析値 σ_t × 構造解析係数 γ_a

解析から求まるひび割れ指数 I_{crk}

I_{crk} = 割裂引張強度平均値 f_{tk} / 引張応力解析値 σ_t

構造物中のひび割れ指数 I_{cr}

$$I_{cr} = \frac{f_{tk}}{\sigma_t \gamma_a \gamma_m} = I_{crk} \frac{1}{\gamma_a \gamma_m}$$

ひび割れ発生確率算定値 Z_0

$$Z_0 = \frac{-f_{tk}/\gamma_m + \sigma_t \gamma_a}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} = \frac{\gamma_a \gamma_m - I_{crk}}{\sqrt{V_R^2 I_{crk}^2 + V_S^2 \gamma_a^2 \gamma_m^2}}$$

ひび割れ発生確率の算定方法を模式的に図 4.2-1 に示す。

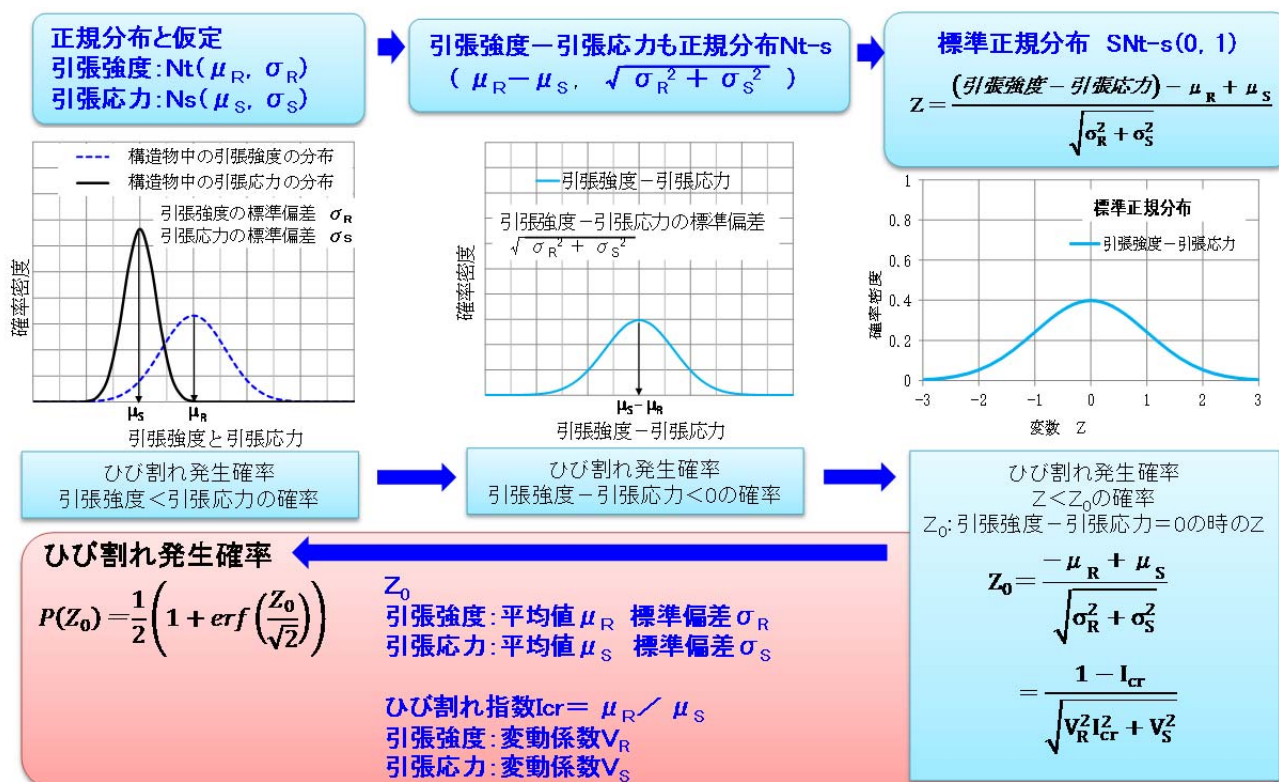


図 4.2-1 ひび割れ発生確率の算定方法

本論は、過去に、松井ら^{4.5)}や中村ら^{4.6)}が、ひび割れ発生確率に温度応力解析の入力パラメータが与える影響を感度解析するために採った方法とほぼ同様の方法である。しかし、松井らは、確率を算定する方法や式は示さず、中村らも、ひび割れ指数がひび割れ発生確率の算定にどのように影響するか、その意味や式展開を示さなかった。また、コンクリート標準示方書の改訂資料^{4.7)}でも、同様の論旨でひび割れ発生確率図の説明を行っているが、(4.1-5)式に至る前に $V_R = V_S$, $\rho_R / \rho_S \cdot I_{cr} = 1$ と仮定した式展開を行った。このようなことから、実務者には、ばらつきとひび割れ指数、ひび割れ発生確率の関係についての理解は、ほとんど進まなかったと考えられる。

今回、ひび割れ発生確率を汎用的に直接算定できる(4.1-3)式と(4.1-4)式、(4.1-5)式を示したことで、これらの関係性についても明らかにすることができたと考えている。

4.2.3 変動係数がひび割れ発生確率曲線に与える影響

引張強度の変動係数 V_R と引張応力の変動係数 V_S が同一の場合 ($V_R = V_S$)、これらを 10%, 20%, 30% とした時のひび割れ発生確率曲線を図 4.2-2 に示す。また、引張応力の変動係数 V_S は一定として、引張強度の変動係数 V_R が 10%, 20%, 30% に変化させた場合を図 4.2-3 に、引張強度の変動係数 V_R が同一で引張応力の変動係数 V_S が 10%, 20%, 30% に変化させた場合を図 4.2-4 に示す。図中の水色のハッチは、 $V_R = V_S$ の場合における図 4.2-2 に示されるひび割れ発生確率の範囲を、全ての図で示したものである。

全ての図のひび割れ発生確率曲線が、水色のハッチの範囲内にあることが分かる。すなわち、引張強度の変動係数 V_R と引張応力の変動係数 V_S が 10~30% の範囲であれば、ある指数に対するひび割れ発生

確率は図 4.2-2 に示されるひび割れ発生確率の範囲にあることが分かる。このことは、10～30%の範囲を例えば 5～40%に広げても同様であり、どのような範囲でも成立する。中村らの論文データ、松井らの論文データもこの範囲にある。

図 4.2-3(a)より、引張応力の変動係数 V_S が 10%と小さい場合、ひび割れ発生確率は、引張強度の変動係数 V_R で決定する。図 4.2-3(b)より、引張応力の変動係数 V_S が 30%と大きい場合、ひび割れ指数 1 以下のひび割れ発生確率は、引張強度の変動係数 V_R の影響をほとんど受けないが、ひび割れ指数 1 以上のひび割れ発生確率は、引張強度の変動係数 V_R の影響を受けるものの、 V_S が 10%の場合よりもその影響は小さい。

図 4.2-4(a)より、引張強度の変動係数 V_R が 10%と小さい場合、ひび割れ発生確率は、引張応力の変動係数 V_S で決定するが、ひび割れ指数 1.0 以下の場合における影響が大きい。図 4.2-4(b)より、引張強度の変動係数 V_R が 30%と大きい場合、ひび割れ発生確率は、引張応力の変動係数 V_S の影響をほとんど受けず、ひび割れ指数の値でひび割れ発生確率が一義的に決まるようになる。

図 4.2-3 と図 4.2-4 を比較すると、全般的に図 4.2-4 の方の変域が小さく、引張強度の変動係数 V_R の方が引張応力の変動係数 V_S よりもひび割れ発生確率に与える影響度が高い。これは、ひび割れ指数の分子と分母の影響度の差である。ひび割れ指数で整理している状況では引張強度の変動の影響を大きく受ける。

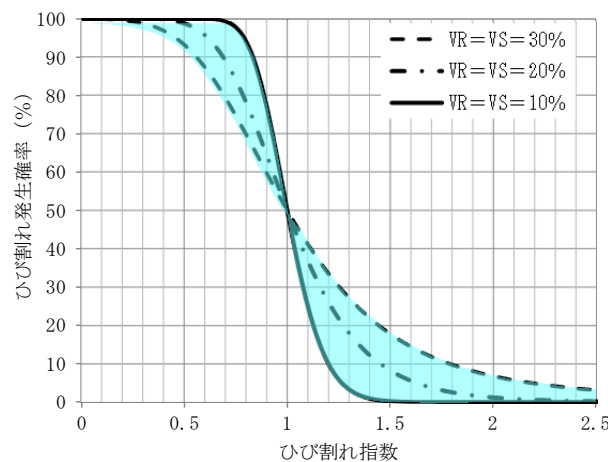


図 4.2-2 引張強度と引張応力の変動係数が同一の場合のひび割れ発生確率図

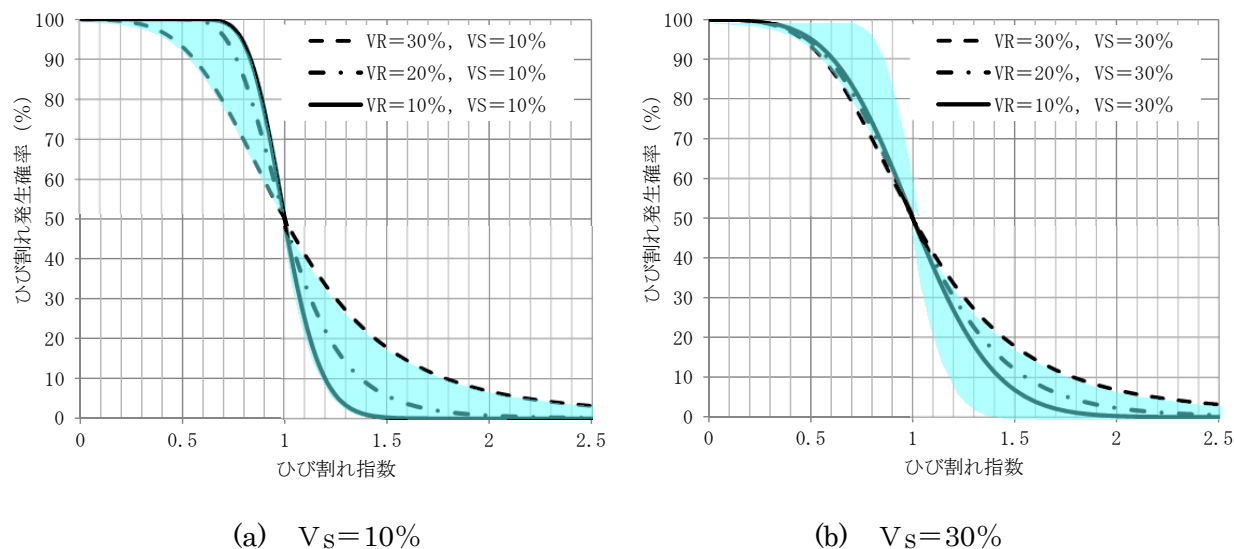


図 4.2-3 引張応力の変動係数が同一の場合のひび割れ発生確率図

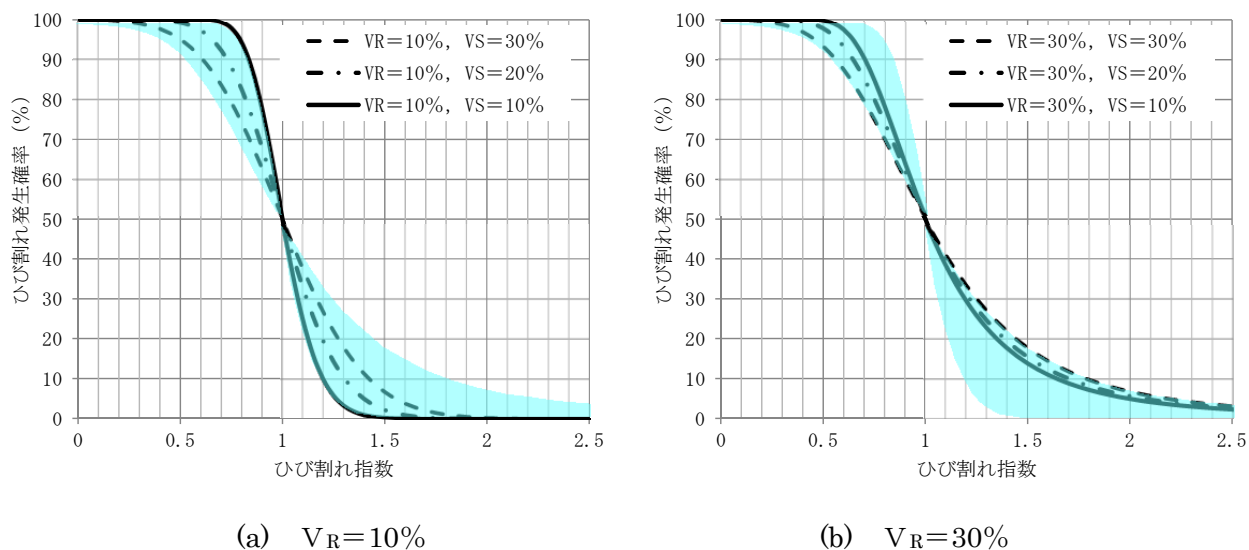


図 4.2-4 引張強度の変動係数が同一の場合のひび割れ発生確率図

以上の考察から、ひび割れ発生確率図でひび割れ指数に対して、ひび割れ発生確率が一義的に決定できる場合として、引張強度の変動係数 V_R が大きい場合であることが示された。すなわち、コンクリート標準示方書でひび割れ発生確率図が一つに設定できる論拠として、現在の施工状況では、引張強度の変動係数 V_R が高い場合がありえることも考えられる。

次項では、これらの考察も念頭にいれ、コンクリート標準示方書におけるひび割れ発生確率図を作成する元となったデータプロットの V_R と V_S の値の検討と共に、引張強度の変動係数の大きさとその影響度についても検討を加える。

4.2.4 安全係数がひび割れ発生確率曲線に与える影響

前述のとおり，平成8年制定版では構造物中の引張強度を使用してひび割れ指数を算定していたが，平成11年版では割裂引張強度を使用してひび割れ指数を算定することに改訂した．この場合，図4.2-5に示すとおりひび割れ発生確率曲線は右に1.25倍シフトしたことを説明した．

これは，構造物中の引張強度と割裂引張強度の特性値の差を示していることになり，安全係数，特に材料係数の影響をひび割れ発生確率曲線で表していることになる．すなわち，安全係数の値によって，ひび割れ発生確率曲線は左右に平行移動するように影響することが分かる．

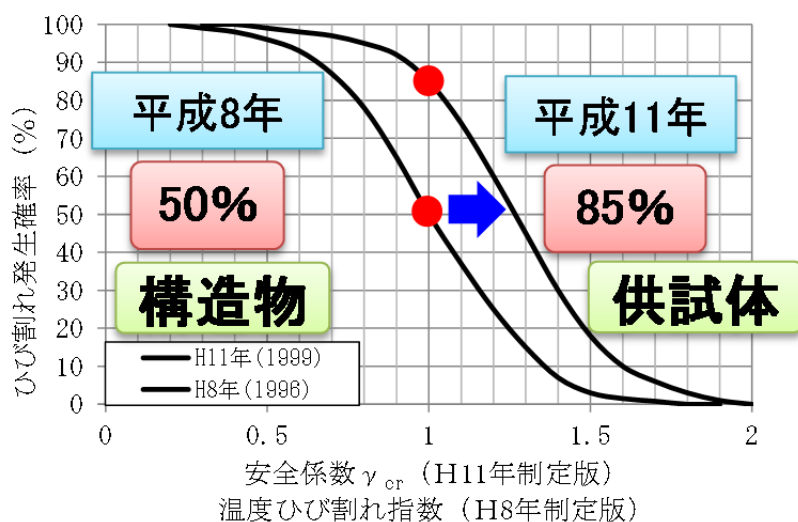


図 4.2-5 安全係数がひび割れ発生確率曲線に与える影響

4.3 ひび割れ照査方法改善の方向性

ここでは、ひび割れ発生確率を直接算定するには、引張強度と引張応力のばらつきを表す分布モデルを決めて、引張強度が引張応力を超える確率を算定すればよいことを示した。ばらつきを最も汎用的な正規分布とすれば、引張強度と引張応力の変動係数、割裂引張強度と引張強度の差を考慮する修正係数（材料係数の逆数）、応力の推定値と構造物にひび割れが発生する点の引張応力との差を考慮する修正係数（構造解析係数）を設定し、ひび割れ指数を解析的に求めれば、式(4.1-4)と式(4.1-5)からひび割れ発生確率が算定できる。引張強度と引張応力がどのようなばらつきであっても、変動係数と修正係数（安全係数）を適切に設定すれば、ひび割れ発生確率を正確に算定できることを示した。

一方、従来のひび割れ発生確率図では、標準的な管理状態におけるひび割れ発生確率を簡便に求めることが可能である。しかし、ひび割れ指数を大きくする以外の良質な施工を評価することはできなかった。将来的にはここで示したような、確率論の手順とおりに直接ひび割れ発生確率を算定し、ひび割れ制御方法を検討、評価できる照査方法にするのが良いと考えられる。この中で、標準的な管理状態にある構造物については、変動係数と修正係数（安全係数）の標準値、あるいはひび割れ発生確率図等を事前に示しておくのが良いと考える。これにより、ばらつきを低減する良質な施工（例えば、単位水量管理や締固め管理を標準以上に確実に実施し、密実均質で、ひび割れ発生の起点となる弱部を少なくできる施工等）も、ひび割れ発生確率として数値的に評価する事が可能となり、良質な施工のインセンティブになり、その差別化が図れる。

5章においては、このようなひび割れ照査方法について検討した結果を示す。

第5章 新たなひび割れ照査方法

5.1 ひび割れ発生確率の算定方法の一般化

前章で説明されたとおり，ここでは再度，ひび割れ発生確率の一般化した算定方法を整理して示す．

ひび割れ発生確率は，引張強度を引張応力が超える確率であると定義する．

構造物中の引張強度は正規分布 $N_R(\mu_R, \sigma_R)$ ，引張応力は正規分布 $N_S(\mu_S, \sigma_S)$ と設定する．

引張強度の平均値 μ_R は割裂引張強度 f_{tk} に修正係数 ρ_R を乗じて設定し，引張応力の平均値 μ_S は応力の推定値 σ_t に修正係数 ρ_S を乗じて設定する．

すなわち，引張強度は $N_R(\rho_R \cdot f_{tk}, \sigma_R)$ ，引張応力は $N_S(\rho_S \cdot \sigma_t, \sigma_S)$ の正規分布となる．

この時，引張強度と引張応力の差は，正規分布 $N_{R-S}(\rho_R \cdot f_{tk} - \rho_S \cdot \sigma_t, \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2})$ の正規分布となる．正規分布 N_{R-S} において 0 以下になる確率を求める．

この 0 以下になる確率が，引張強度が引張応力を超える確率，すなわちひび割れ発生確率である．

整理すると，ひび割れ発生確率を算出するための変数は以下の 6 変数である．

割裂引張強度 f_{tk}

引張応力の推定値 σ_t

割裂引張強度の修正係数 ρ_R

引張応力の推定値の修正係数 ρ_S

構造物中の引張強度の標準偏差 σ_R

構造物中の引張応力の標準偏差 σ_S

5.2 ひび割れ発生確率図の有用性

ひび割れ発生確率の算定は5.1節で論じた方法による事が確率論から考えれば最も適格な求め方である。一方でこの算定方法の場合、引張強度や引張応力に関する計6種類のパラメータが必要となることを示した。

ここでこれまでのひび割れ発生確率図を再度見直すと、コンクリート標準示方書に昭和61年に初めて掲載されてから現在まで30年の長きにわたり活用されてきた様々な理由が考えられる。その理由の大きな一つが、ひび割れという引張強度と引張応力という二つのパラメータのばらつきと平均値の大小関係で決まる事象をひび割れ指数という一つのパラメータで表現したことでありと考える。これにより、ひび割れ指数が小さければ、ほぼ直感的にひび割れ発生確率が想定されるという利便性が長きにわたり実用に供された理由となっている。このため、ここではなぜひび割れ指数という1つのパラメータでひび割れ発生確率を示すことが出来たのか分析を行った。

ひび割れ指数 I_{cr} が1.2と同一ではあるが、表5.2-1に示されるように引張強度と引張応力の組合せが相違する二組の正規分布（標準偏差はそれぞれ同一）について考えてみる。この場合の確率密度を図5.2-1に示す。

表 5.2-1 $I_{cr}=1.2$ となる引張強度と引張応力の組合せ分布2種類（標準偏差同一）

	$I_{cr}=1.2$ 組合せ1		$I_{cr}=1.2$ 組合せ2	
	引張強度1	引張応力1	引張強度2	引張応力2
平均値 m (N/mm^2)	2.400	2.00	7.200	6.00
標準偏差 σ (N/mm^2)	0.480	0.500	0.480	0.500
変動係数 (%)	20.00	25.00	6.67	8.33
ひび割れ発生確率	0.2819		0.0417	

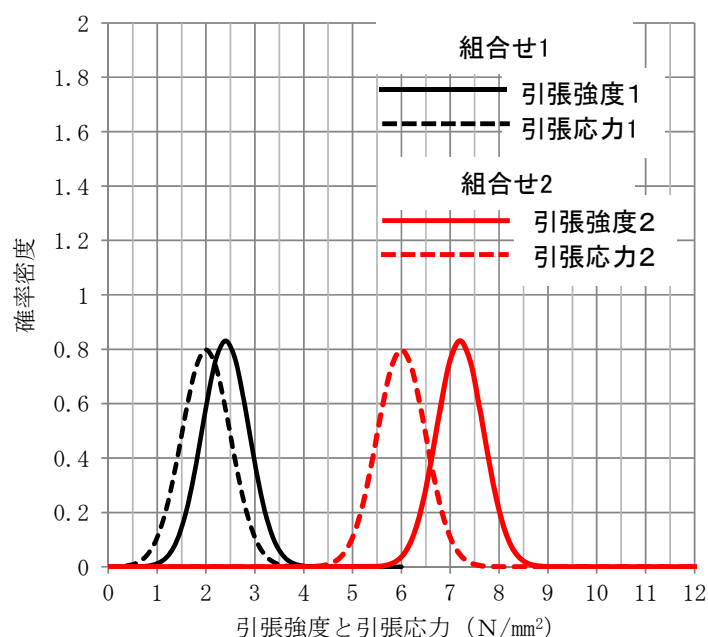
図 5.2-1 $I_{cr}=1.2$ の引張強度と引張応力の分布（標準偏差同一）

図 5.2-1 に示されるように、明らかに2つの組合せの間で重なり方が相違しており、ひび割れ発生確率が相違する事が分かる。この場合のひび割れ発生確率を算定すると表 5.2-1 に示すように 28.2%と 4.2%と大幅に違う。すなわち、このような場合、ひび割れ発生確率図のように、ひび割れ指数に対してひび割れ発生確率を一義的に決定することは、不合理で実務上支障をきたすレベルにあると考えられる。それでは、なぜこれまで長きにわたりひび割れ発生確率図は実用に耐えたのか、次の表 5.2-2 のひび割れ指数 I_{cr} が 1.2 と同一で、引張強度と引張応力の組合せが相違する二組の正規分布で変動係数がそれぞれ同一の場合について考えてみる。この場合の確率密度を図 5.2-2 に示す。図 5.2-2 に示されるように、こちらも見ると分布形状が全く相違するため、ひび割れ発生確率についてイメージすることができず、同一になるようには見えない。しかしこれについてひび割れ発生確率を前述のとおり算定すると、同一のひび割れ発生確率 28.19%となるのである。

これはどのような理由によるものか検討する。

表 5.2-2 $I_{cr}=1.2$ となる引張強度と引張応力の組合せ分布 2 種類（変動係数同一）

	$I_{cr}=1.2$ 組合せ1		$I_{cr}=1.2$ 組合せ2	
	引張強度 1	引張応力 1	引張強度 2	引張応力 2
平均値 m (N/mm ²)	2.400	2.00	7.200	6.00
標準偏差 σ (N/mm ²)	0.480	0.500	1.440	1.500
変動係数 (%)	20.00	25.00	20.00	25.00
ひび割れ発生確率	0.2819		0.2819	

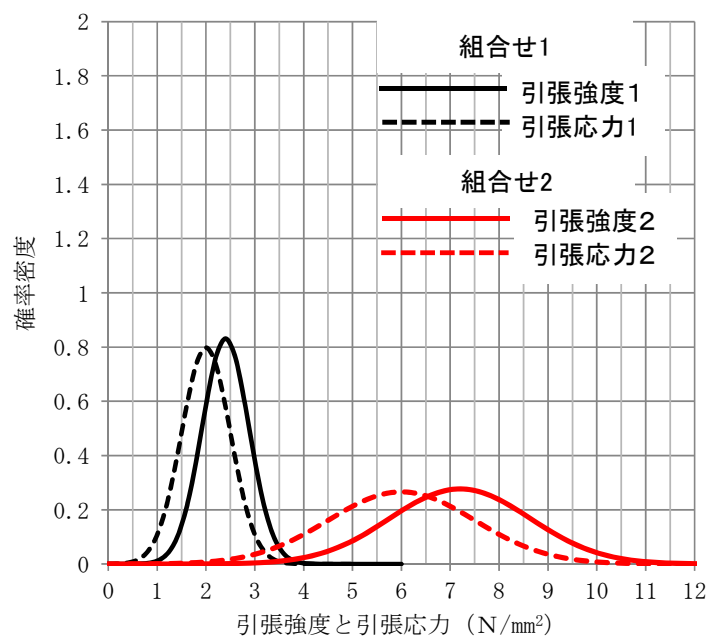


図 5.2-2 $I_{cr}=1.2$ の引張強度と引張応力の分布（変動係数同一）

図 5.2-1 の組合せ毎に引張強度と引張応力の差の分布は図 5.2-3 のとおり、正規分布同士の差の分布であるのでこれも正規分布となる。同様にして、図 5.2-2 における引張強度と引張応力の差の分布を図

5.2-4 に示す. 図 5.2-3 と図 5.2-4 を比較すると, 一見, 図 5.2-3 のひび割れ発生確率が同一になるように思える. しかし, ひび割れ発生確率は引張強度を引張応力が超える確率であり, 図 5.2-3 の朱色とグレーのハッチ部分の面積でそれぞれ表現できる. このことから, 図 5.2-3 から組合せ1と2のひび割れ発生確率が違うことは明らかである. 一方で, 図 5.2-4 で朱色とグレーのハッチ部分の面積を比較すると確かにほぼ同等であり, すなわち, ひび割れ発生確率が同等であることを意味している.

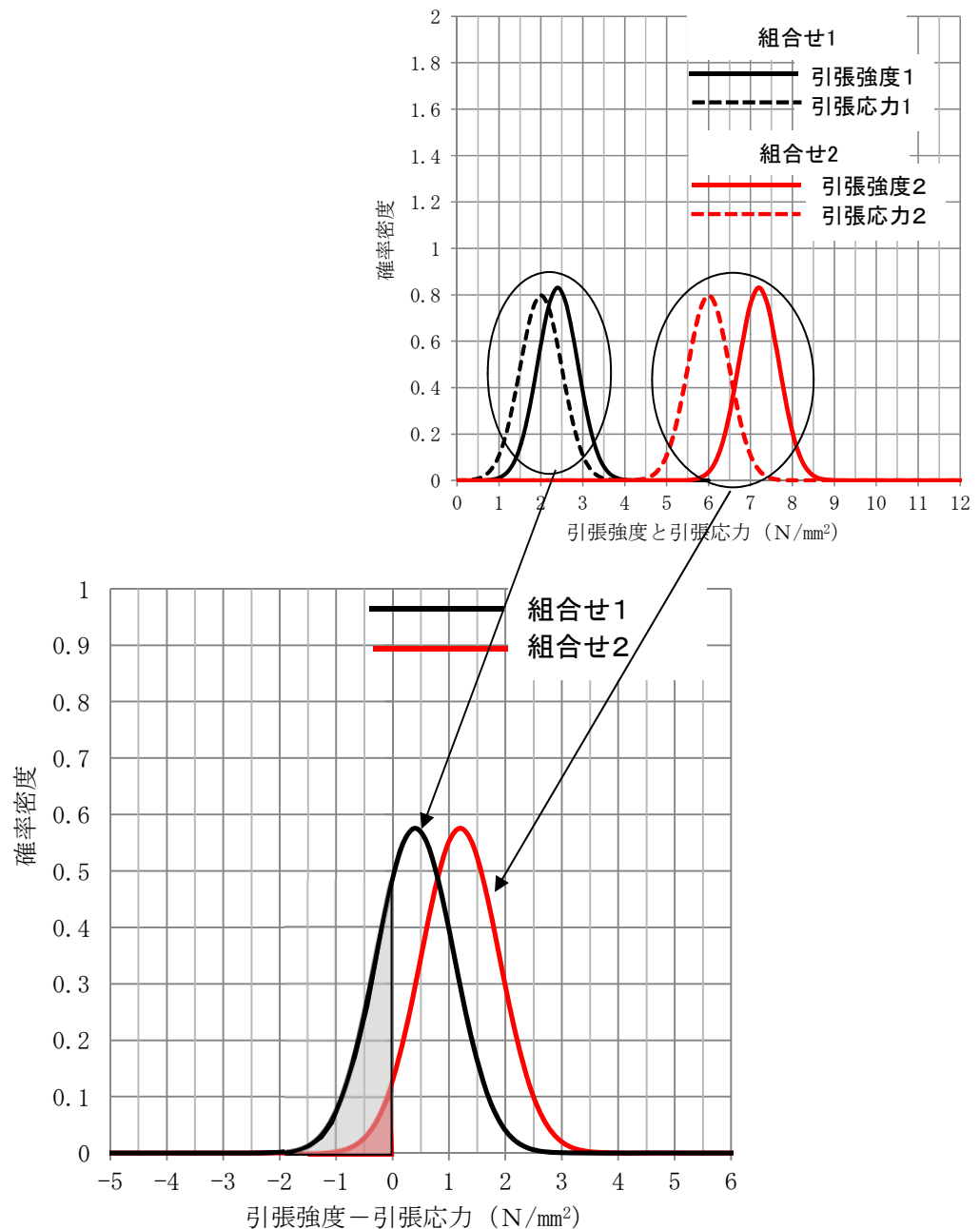


図 5.2-3 引張強度－引張応力の確率分布 (標準偏差同一)

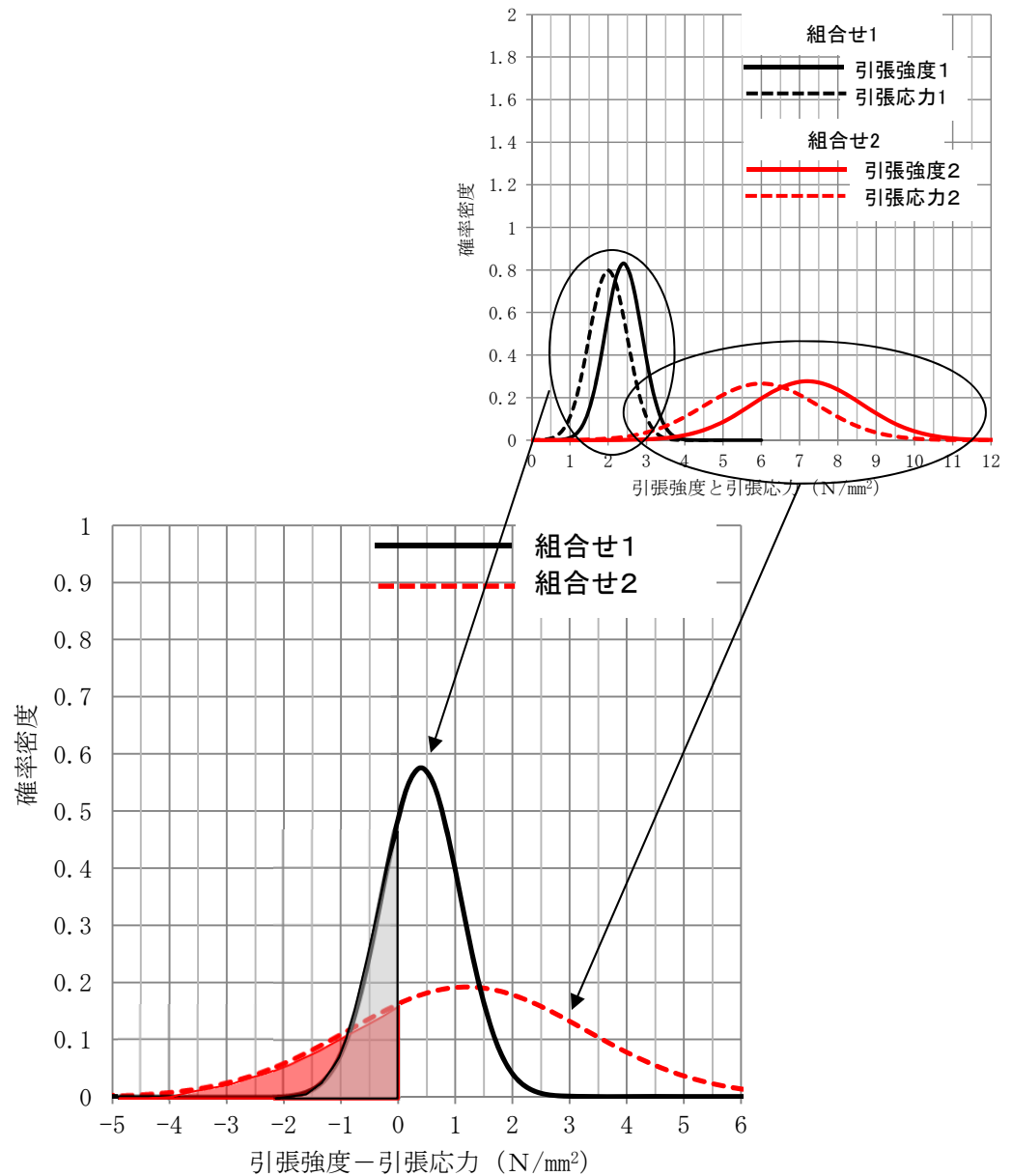


図 5.2-4 引張強度－引張応力の確率分布（変動係数同一）

ここで，図 5.2-4 の組合せ 1 の正規分布について正規化し，標準正規分布に修正してみる．組合せ 1 の変数 X は，引張強度の平均値 μ_R ，標準偏差 σ_R ，引張応力の平均値 μ_S ，標準偏差 σ_S ，とすると，平均値 $\mu_R - \mu_S$ ，標準偏差 $\sqrt{(\sigma_R^2 + \sigma_S^2)}$ の正規分布である．これを正規化した変数 Z は次式 (5.2-1) で表される．

$$\begin{aligned}
Z &= \frac{x - (\mu_R - \mu_S)}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} = \frac{x - (I_{cr} - 1) \cdot \mu_S \cdot (\frac{1}{\mu_S})}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2} \cdot (\frac{1}{\mu_S})} = \frac{x - (I_{cr} - 1)}{\sqrt{\frac{\sigma_R^2}{\mu_S^2} + \frac{\sigma_S^2}{\mu_S^2}}} \\
&= \frac{x - I_{cr} + 1}{\sqrt{\frac{\sigma_R^2}{\mu_S^2} + V_S^2}} = \frac{x - I_{cr} + 1}{\sqrt{\frac{\mu_R^2 \cdot \sigma_R^2}{\mu_R^2 \cdot \mu_S^2} + V_S^2}} = \frac{x - I_{cr} + 1}{\sqrt{V_R^2 \cdot I_{cr}^2 + V_S^2}} \quad \dots \dots (5.2-1)
\end{aligned}$$

ここで、 V_R ：引張強度の変動係数

V_S ：引張応力の変動係数

I_{cr} ：ひび割れ指数 (μ_R / μ_S)

式 (5.2-1) から、引張強度が引張応力を超える $X=0$ の点は、正規化した場合、式 (5.2-2) の変数 Z_0 に変換される。

$$Z_0 = \frac{-I_{cr} + 1}{\sqrt{V_R^2 \cdot I_{cr}^2 + V_S^2}} \quad \dots \dots (5.2-2)$$

式 (5.2-2) は、引張強度の変動係数 V_R と引張応力の変動係数 V_S 、ひび割れ指数 I_{cr} (μ_R / μ_S) が同一の正規分布であれば、どのような正規分布であっても、正規化した場合に、引張強度が引張応力を超える点 Z_0 が同一になることを示している。すなわち、 V_R と V_S 、 I_{cr} が同一の分布の場合、引張強度が引張応力を超える点 Z_0 は、標準正規分布上の同一点をとることとなる。標準正規分布上の同一点に引張強度が引張応力を超える点があるとすれば、ひび割れ発生確率が同一な事を意味しているのである。

まさにこれが、ひび割れ発生確率図の有用性であると言ってもよい。

V_R と V_S 、 I_{cr} さえ同一であれば、どのような引張強度、引張応力の分布であっても、ひび割れ発生確率は理論上同一なのである。つまり、 V_R と V_S さえ設定すれば、ひび割れ指数に対して一義的にひび割れ発生確率を決定してよいことになる。ひび割れ発生確率図は、前段でも議論したとおりであるが、この V_R と V_S に標準的な値を設定したものであることを再度、理論的に示した事にもなる。

また、式 (5.2-2) において、ひび割れ指数 $I_{cr}=1.0$ を代入すると $Z_0=0$ となる。標準正規分布では $Z_0=0$ 以下の累積確率は 50% となるから、ひび割れ指数 $I_{cr}=1.0$ の時、ひび割れ発生確率は変動係数に関係無く 50% となるのである。

それでは、具体的にコンクリート標準示方書のひび割れ発生確率図の V_R と V_S はどのような値であったのか、あるいはあるべきであるのか、これを検討する。

5.3 変動係数の標準値

5.3.1 平成8年制定版と2012年制定版の変動係数の推定

コンクリート標準示方書平成11年制定版改定資料⁵⁻¹⁾では、平成8年制定版のひび割れ発生確率曲線が、引張強度の変動係数 V_R と引張応力の変動係数 V_S を $V_R=V_S=0.28$ と設定したものに等しいと説明している。しかしながら、本来的に正規分布を仮定していること自体に疑義を示して、引張強度の変動係数 V_R と引張応力の変動係数 V_S を $V_R=V_S$ とすることに意味を与えていない。

また、正規化という概念の説明がないために、式(5.3-1)を変形し $V_R=V_S$ を利用して簡易化した式(5.3-2)を示している。これは、式(5.3-2)の $V_R=V_S=V$ 、分母の I_{cr} だけを $I_{cr}=1$ とした式である。この式(5.3-2)を利用して平成8年制定版の変動係数 V を検討した結果が、先に説明した $V=V_R=V_S=0.28$ であると説明されている。

$$Z_0 = \frac{-I_{cr} + 1}{\sqrt{V_R^2 \cdot I_{cr}^2 + V_S^2}} \quad \dots \dots (5.3-1) \text{ 再掲}$$

$$Z_0 = \frac{-I_{cr} + 1}{V\sqrt{2}} \quad \dots \dots (5.3-2)$$

ここでまず式(5.3-2)の意味を考えれば、正規化した変数の平均値が $I_{cr}-1$ 、標準偏差が $V\sqrt{2}$ になることを示している。この場合、式(5.3-3)となるが、式(5.3-4)に展開され、平均値 μ が $\sqrt{2}$ に等しくなければならないこととなり、一般式にはなりえない事を意味している。式(5.3-2)の分母の I_{cr} だけを $I_{cr}=1$ とする事でこのような大きな矛盾が生じていた事がわかる。

$$\sigma = V\sqrt{2} = \frac{\sigma}{\mu} \sqrt{2} \quad \dots \dots (5.3-3)$$

$$1 = \frac{1}{\mu} \sqrt{2} \quad \dots \dots (5.3-4)$$

コンクリート標準示方書平成11年制定版改定資料に示される式(5.3-3)のとおり計算したひび割れ発生確率曲線と、今回提案している新たなひび割れ発生確率の算定手法で $V_R=V_S=0.28$ と設定したひび割れ発生確率曲線、同新手法でも平成8年制定版のひび割れ発生確率曲線に近くなるように V_R と V_S とを回帰したひび割れ発生確率曲線を図5.3-1に示す。

平成11年制定版改定資料に示される方法では、平成8年制定版のひび割れ発生確率曲線と大きく相違している。改定資料では比較的適合性が高いとされているが、何かの算定が相違していたと考える。また新手法で $V_R=V_S=0.28$ と設定した場合でも、ひび割れ指数が1以上の場合に平成8年制定版のひび割れ発生確率曲線と大きくずれている。このことから、最も平成8年制定版のひび割れ発生確率曲線と適合性が高くなったのは、 $V_R=6\%$ 、 $V_S=27\%$ と設定した場合であった。同様に考えて2012年制定版のひび割れ発生確率曲線と適合性が高くなったのは、図5.3-2に示すとおり $V_R=15\%$ 、 $V_S=3\%$ と設定した場合であった。2012年制定版については、図5.3-3に示すとおりひび割れ発生確率が小さく、ひび割れ

指数が大きい場合の適合性が劣っている。

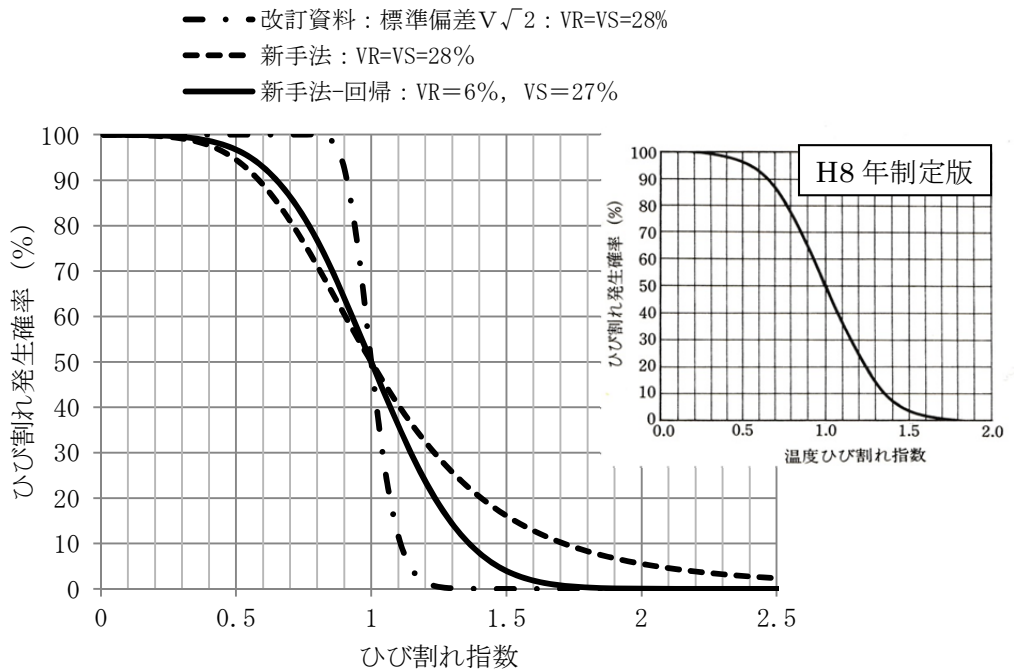


図 5.3-1 平成 8 年制定版のひび割れ発生確率図とその近似曲線

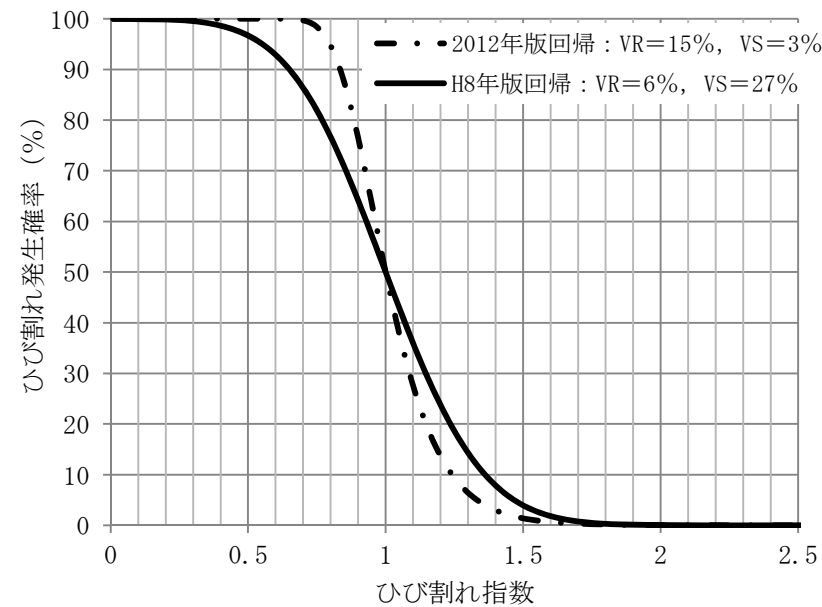


図 5.3-2 示方書のひび割れ発生確率図の変動係数の算定

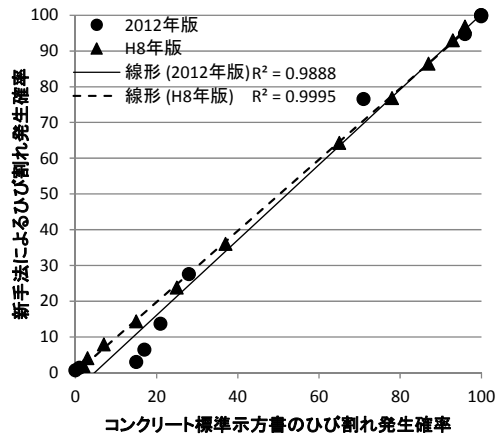


図 5.3-3 示方書と新手法のひび割れ発生確率の相違

一方で、以降で説明するように、基本的には引張強度と引張応力の変動係数が同等と説明することが可能である。この場合の引張強度と引張応力の変動係数を同様に検討すると、図 5.3-4 に示すとおり変動係数は 15～25%の間にあることが分かる。

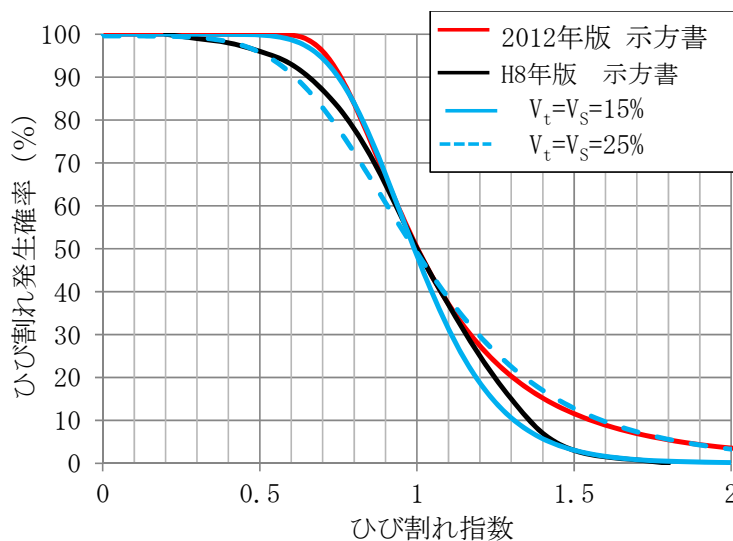


図 5.3-4 H8 年制定版と 2012 年制定版のひび割れ発生確率に適合する変動係数

さらに、2012 年制定版のプロットのうち、3.4 節で示された図 3.4-10 の標準的と言えそうもない変動係数が 25%以上と非常に大きいプロットを除外してこれを新手法により変動係数を逆算すると、図 5.3-5 に示すとおり変動係数は 15%となる。

以上の検討結果から、従来のひび割れ発生確率図で整理された実施工の結果からは、引張強度と引張応力の変動係数の標準的な値は 15%程度ではないかと推察された。

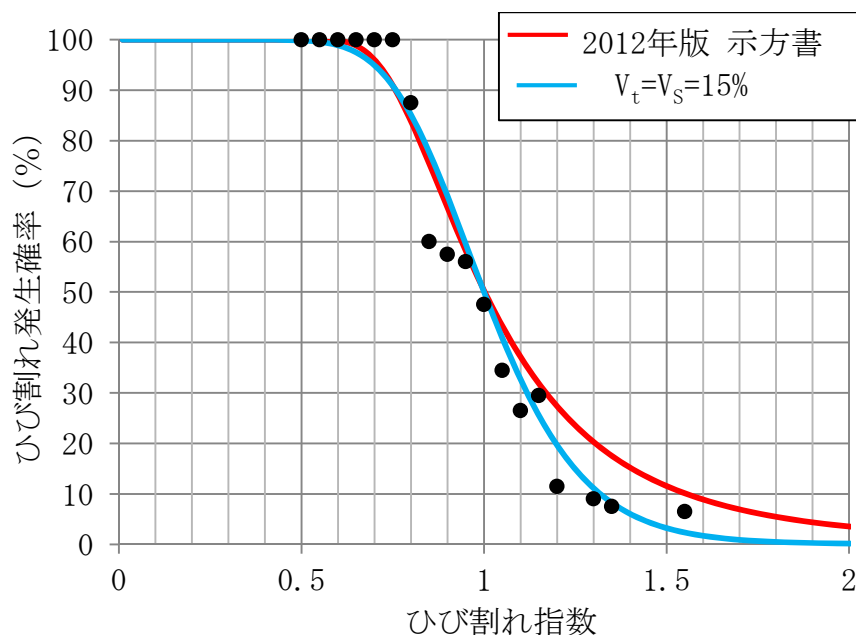


図 5.3-5 2012 年制定版の標準的プロットの変動係数

5.3.2 引張強度の変動係数の標準値の設定

従来のひび割れ発生確率図は、標準的な変動係数を一つ設定して指数でひび割れ発生確率を表したものと捉えることで、ひび割れ発生確率曲線が1本だけ示されていると言える。この標準的な変動係数は、実際の構造物におけるひび割れ発生有無のデータから求められたものである。ここでは、実際のひび割れ発生有無のデータから変動係数を設定するのではなく、異なるアプローチによって変動係数の標準値を設定することを試みる。

このアプローチは、レディーミクストコンクリート工場における標準的な供試体の変動係数を全国生コンクリート品質管理監査会議の約 3000 工場の調査データから設定し、これを元に構造物中の変動係数に換算していくアプローチである。

図 5.3-6^{5-2),5-3)}に、全国生コンクリート品質管理監査会議が平成 18 年と 28 年に実施した、約 3000 のレディーミクストコンクリート工場の呼び強度に対する試験値の割合の度数分布を示す。この強度比を工場の割り増し係数相当と考えて、変動係数に逆算した場合の度数分布を図 5.3-7 に示す。調査された全工場の変動係数の平均は、H18 年度は 11.7%，H28 年度は 11.3% となった。すなわち、供試体の圧縮強度の変動係数は 11% 程度が標準的であると考えられる。

では、これら供試体の変動係数が 11% のコンクリートが、構造物として打ち込まれた場合、どのようなになるか。構造物として打ち込まれたコンクリートは、供試体に比べて、①体積が増加、②締固めの程度、③養生、④温度、⑤打ち重ね、⑥打込み時間等が相違する。このため、欠陥部や強度発現の場所的な相違が必然的に多くなり、供試体強度のばらつきよりも、構造物中の方が強度平均は小さく、ばらつきも大きくなると考えるのが普通である。

ここで、確率論的には、同一材齢の同一部位（微少な部位、要素）における強度の発現頻度を考える必要がある。この場合、その場所で、供試体強度に対して一様な確率で欠陥があるとする、強度の平均

値が、一定の割合で小さくなるのは前述のとおりである．このことは、引張強度の修正係数（安全係数のうち材料係数）で従来から評価され、一般的に供試体強度の 8 割程度、2 割低減されると考えられている．この時、ばらつきについては、供試体強度が正規分布（ μ ， σ^2 ）に従っているとすると、一定の割合 c （ ≈ 0.8 ）で低減することから、構造物中の強度は、正規分布（ $c\mu$ ， $c^2\sigma^2$ ）に従う．この場合、変動係数（ σ/μ ）は、供試体と構造物中で不変であることになる．

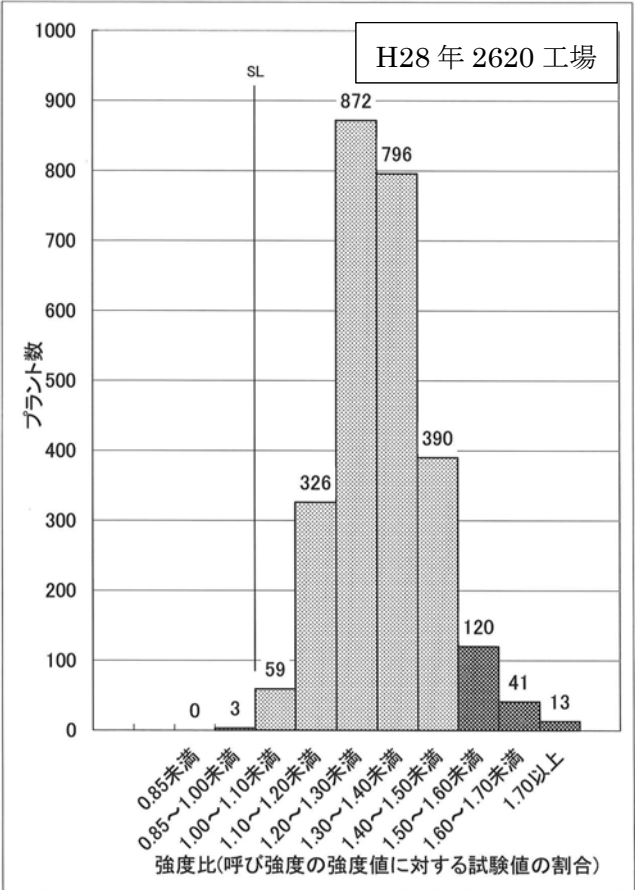
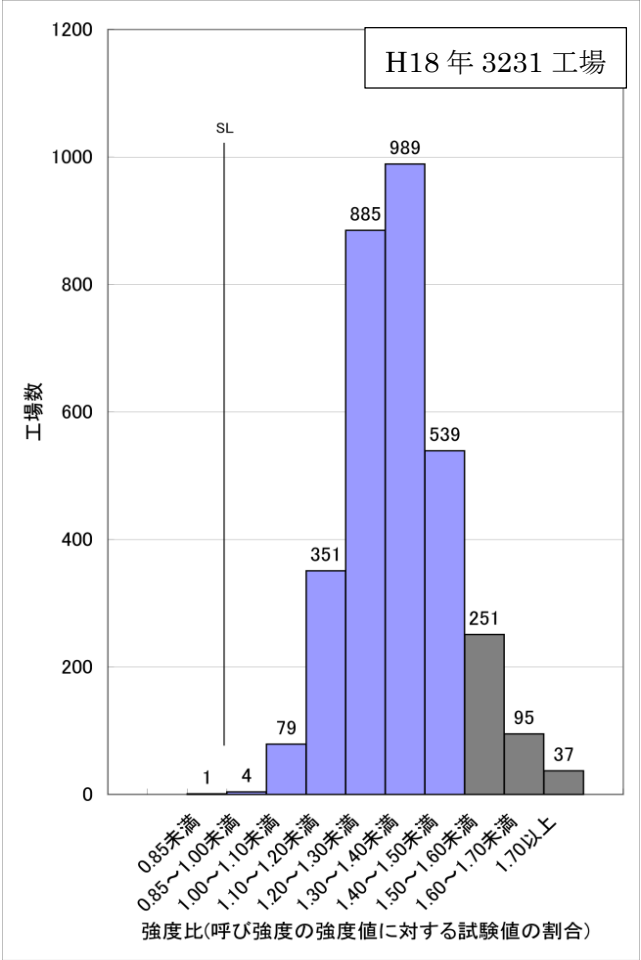


図 5.3-6 圧縮強度の割り増し係数（H18 年，H28 年）^{5-2), 5-3)}

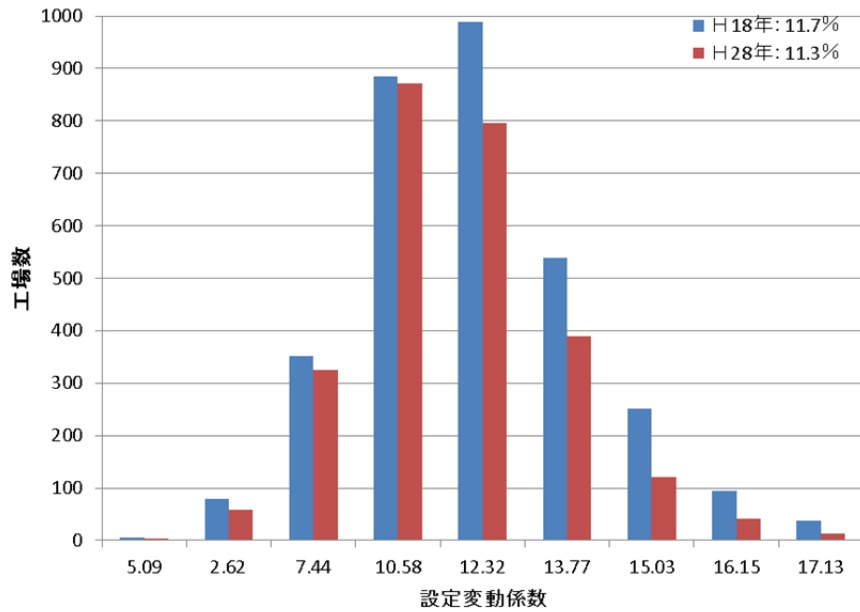


図 5.3-7 工場の変動係数 (H18 年, H28 年)

この場合の供試体と構造物の引張強度の分布イメージを図 5.3-8 に示す．正規分布していた供試体強度が一定の割合で低下することで，構造物中の強度の変動係数は同一となるが，標準偏差は強度の低下割合と同一の割合で小さく $c \sigma$ となる．平均値周辺に分布が狭まり，ばらつきが小さくなったように見える．

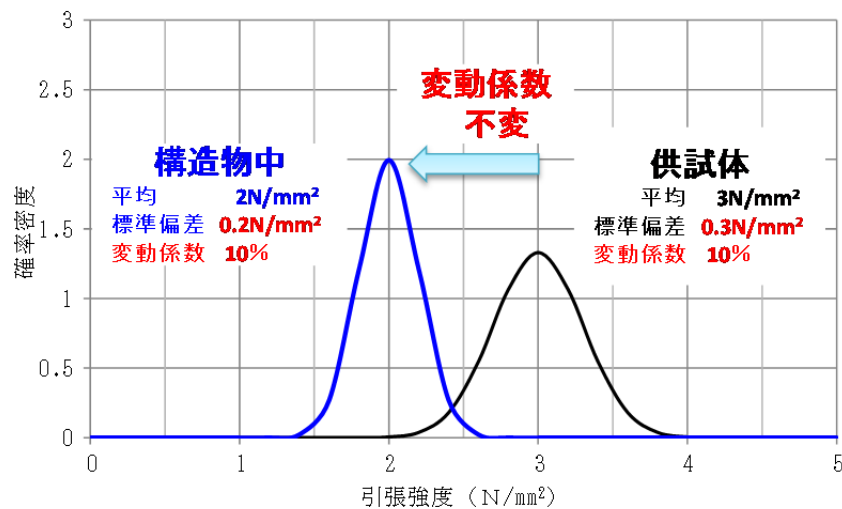


図 5.3-8 供試体と構造物中の強度 (変動係数が不変)

もう一つの別に，構造物中の欠陥は，供試体強度に関係無く一定数だけ増加し， $\mu \cdot (1 - c)$ だけ一律減少すると考えることも可能である．供試体強度が正規分布 (μ, σ^2) に従っているとすると，この時の構造物中の強度は ($c \mu, \sigma^2$) に従い，図 5.3-9 に例示するとおり，標準偏差は供試体強度と変わらないが，変動係数 ($\sigma / c \mu$) は ($1 / c$) だけ大きくなる．

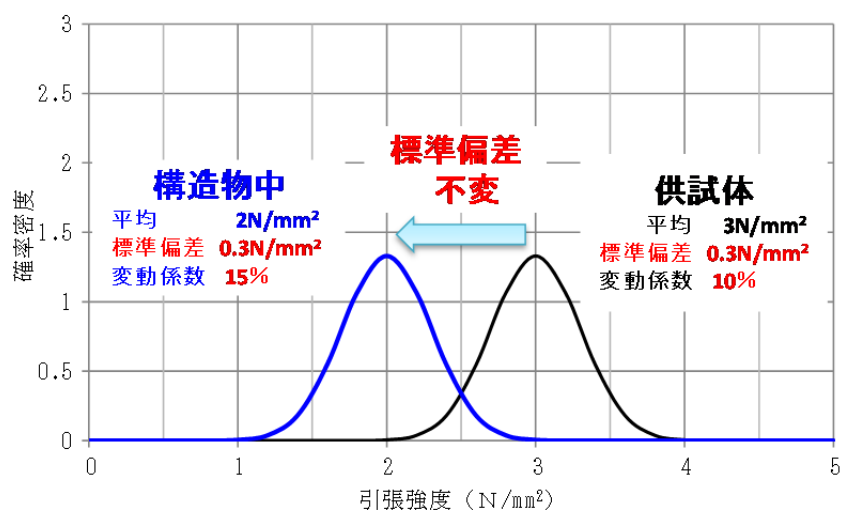


図 5.3-9 供試体と構造物中の強度（標準偏差が不変）

これらの場合の供試体と構造物中の引張強度の欠陥数との関係のイメージを図 5.3-10 に示す。

	変動係数が不変	標準偏差が不変
供試体 (平均) 3N/mm ²	<div>3 N/mm² 4 N/mm²</div> <div></div> <div>×: 欠陥</div>	<div>3 N/mm² 4 N/mm²</div> <div></div> <div>×: 欠陥</div>
	↓ ×は供試体数の倍 ↓	↓ ×は構造物3個増 ↓
構造物 (平均) 3×0.8=2.4N/mm ²	<div></div> <div>3×0.8=2.4N/mm² 4×0.8=3.2N/mm²</div>	<div></div> <div>3-0.6=2.4N/mm² 4-0.6=3.4N/mm²</div>

図 5.3-10 変動係数が不変の場合と標準偏差が不変の場合

例えば、供試体強度の平均値によって、配筋仕様が決まり、これがコンクリートの充填のし易さ等を支配して、施工による欠陥数が一律に決定する場合、すなわち、供試体強度の平均値が施工の欠陥数を決定する場合、図 5.3-10 の標準偏差が不変の場合のような、供試体強度からの構造物中の強度への変化が起これと想定される。他方、コンクリート材料として平均値よりも強度が高いものが来た場合には、粘性が高く、小さいものが来た場合にも材料分離しやすく、施工がし難くなることから、変動係数が不変という場合は、コンクリートの施工としては、現実的には考えにくい。

このような事からも、温度ひび割れ解析を対象とした変動係数の標準値を考えた場合、供試体の強度よりもばらつきが小さくなる「変動係数が不変な場合」ではなくて、「標準偏差が不変の場合」がより一般的であり適切であると考えた。

供試体の引張強度の平均値を μ_k 、標準偏差を σ_k 、変動係数を $\delta_k (= \sigma_k / \mu_k)$ とすると、構造物中の引張強度の平均値 μ_s は修正係数 ρ_c を使うと

$$\mu_s = \rho_c \mu_k \quad (5.3-1)$$

と表すことができる。

構造物中の引張強度の標準偏差 σ_s は、供試体の引張強度の標準偏差と同一であるから σ_k となる。この場合の、構造物中の引張強度の変動係数 δ_s は、

$$\delta_s = \sigma_s / \mu_s = \sigma_k / \rho_c \mu_k = \delta_k / \rho_c = \gamma_m \times \delta_k \quad (5.3-2)$$

と表すことができる。

構造物中の引張強度の変動係数 δ_s は、供試体の引張強度の変動係数に材料係数 γ_m を乗じたものであることが式 (5.3-2) から分かる。

以上の検討から、供試体の引張強度の変動係数 δ_k は 11% であり、材料係数 γ_m は従来データから 1.25、このことから、構造物中の引張強度の変動係数 δ_s は、

$$\delta_s = \gamma_m \times \delta_k = 11\% \times 1.25 = 13.75\% \quad (5.3-2)$$

部材係数の影響、従来のひび割れ発生確率図から推定される変動係数等も考慮して、構造物中の引張強度の変動係数 δ_s の標準値 $S \delta_s$ は 15% に設定できると考える。

5.3.3 応力の変動係数の設定

構造物中の応力の変動係数そのものを測定することは困難である。同じ構造物を同様の方法と条件で作成し、この時の応力を構造物中の同一場所で計測する必要があるため、その労力やコストが膨大になるためである。

そこで、ここではまず、構造物中で応力が変動する要因を考えてみる。ひび割れ発生確率を考えるための、応力の変動要因であるので、構造物中のある 1 点の微小要素において、ある 1 時点の材齢における応力の変動を考える必要がある。なぜなら、ひび割れ発生確率を求める、すなわち、引張強度を引張応力が超える確率を求めるのであるから、これらと比較するのは、前述のある 1 点の微小要素のある 1 時点の材齢だからである。この構造物中の定点に繰返しコンクリートを打ち込んだ場合の定時における、応力の期待値に対して変動する要因は、①材料の変動、②環境の変動、③施工の変動が考えられる。材料の変動は、①セメントロット、②骨材粒度、③表面水率（単位水量）、④計量誤差等が考えられる。環境の変動は、①気温、②湿度、③日射等、施工の変動は、①振動締固め、②打ち重ね有無（時間間隔）、

③練混ぜ水の注水から打ち込まれるまでの経過時間等が考えられる。しかし、これらは応力の変動要因である一方、いずれもが強度の変動要因である。これらによって、基本的には、強度の変動と同様の方向（符号）と程度で応力も変動すると想定できる。このことから、本論では、構造物中の応力の変動係数は、構造物中の強度の変動係数と同等であると、工学的に判断する。従って、構造物中の応力の変動係数は、強度の変動係数の標準値、15%を標準に設定できる。

ところで、温度ひび割れの照査において、応力は基本的に解析的に求められており、これが割裂引張強度と比較されている。この応力の解析値の変動をどのように考え、構造物中の応力の変動とどのように結びつけて考えるのか次に整理しておく。構造物中の応力と応力の解析値との関係は、基本的に図

5.3-11 構造物中の応力と応力の解析値図 5.3-11 のようなものとする。応力の解析結果は基本的にその条件設定が同一である限り、一つの解析値しか無いはずである。この一つの解析値と実際の構造物中の応力の関係は、(a) 解析値の近辺に集まる、(b) 平均値は解析値に近いがばらつきが大きい、(c) 解析値と別の値に集まる、(d) 平均値は解析値と関係無くばらつきも大きい、の4パターンである。構造物中の応力のばらつきは、別に15%程度が標準と評価できている。すなわち、応力の解析値と構造物中の応力のばらつきとの関係は、近傍に集まるかどうかを評価すれば良いことになる。よって、これについては、安全係数のうち、構造解析係数 γ_a で評価できると考えられる。ここでは、限界状態設計法における使用性能の照査で構造解析係数 γ_a の標準値とされる1を標準とする。

構造物中ある1点の応力のばらつき 応力解析結果は下記センターの1点

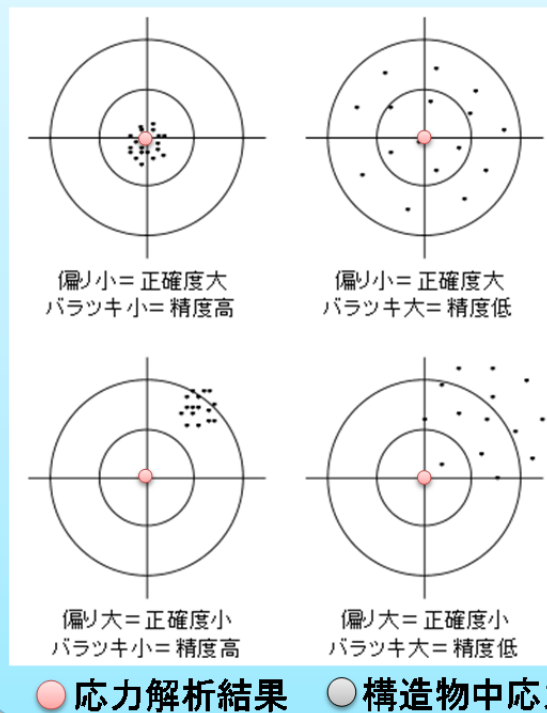


図 5.3-11 構造物中の応力と応力の解析値

5.3.4 コンクリート材齢と変動係数

変動係数が同一の場合，図 5.3-12 に示すとおり，強度が小さいほど標準偏差が小さくばらつきが小さくなる．これは，変動係数が同一の場合，コンクリートが若材齢時に長期材齢時よりも，ばらつきが小さくなる事を意味している．変動係数は標準偏差の平均値に対する比であるため，平均値が小さくなるほど標準偏差も小さくなるために，このような事になる．実際には，若材齢時の方がばらつきは大きく，長期材齢で強度が大きくなる方が，ばらつきは小さくなると考えられ，変動係数一定の場合と逆の傾向になると考えられる．

また，図 5.3-12 に示すとおり，ひび割れ指数が同一（強度の平均値と応力の平均値の比が同一）で，材齢によらず変動係数が同一であれば，ひび割れ発生確率は同一となるのは，前項の式 (5.2-2) から明らかなである．一方で，例えば，材齢によらず標準偏差を同一にすれば，図 5.3-13 に示すように，ひび割れ発生確率は相違する．逆に言えば，強度が小さい若材齢時のばらつきも長期材齢時も同一の標準偏差とした場合，ひび割れ指数が同一でも材齢によって，ひび割れ発生確率は変わる．

これは，ひび割れ発生確率図において，材齢毎にひび割れ発生確率曲線が変化することを意味している．変動係数と材齢の関係性を考慮する場合には，ひび割れ発生確率図による方法と別の方法を考える必要がある．

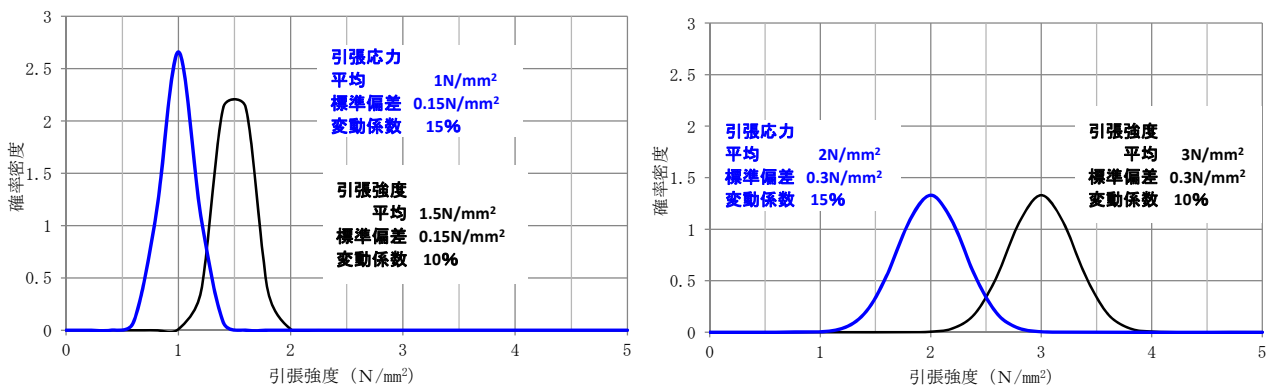


図 5.3-12 指数 1.5 の強度と応力の平均値とばらつき（変動係数一定）

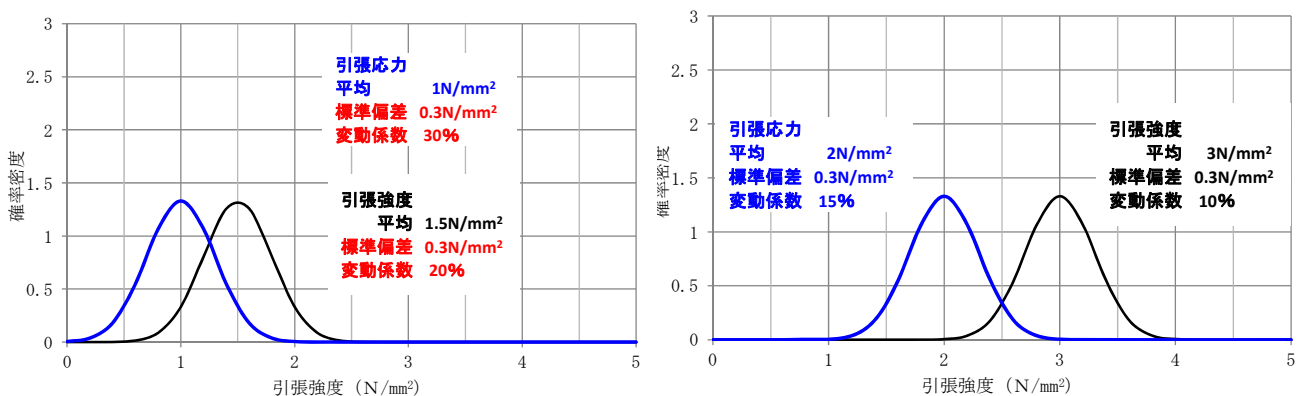


図 5.3-13 指数 1.5 の強度と応力の平均値とばらつき（標準偏差一定）

5.3.5 材齢による変化を考慮した変動係数の設定

ここで、変動係数を材齢との関係で表現する一つの方法を検討する。以下の議論は一つの方法論として示すもので、データの解釈も強引に行っていることを前置きする。

割裂引張強度の推定値に対する実測値の比と圧縮強度の関係を図 5.3-14⁵⁻⁴⁾に示す。図中には割裂引張強度の推定値に対する実測値の比が最低となっているプロットを結んだ朱線を筆者が追記している。

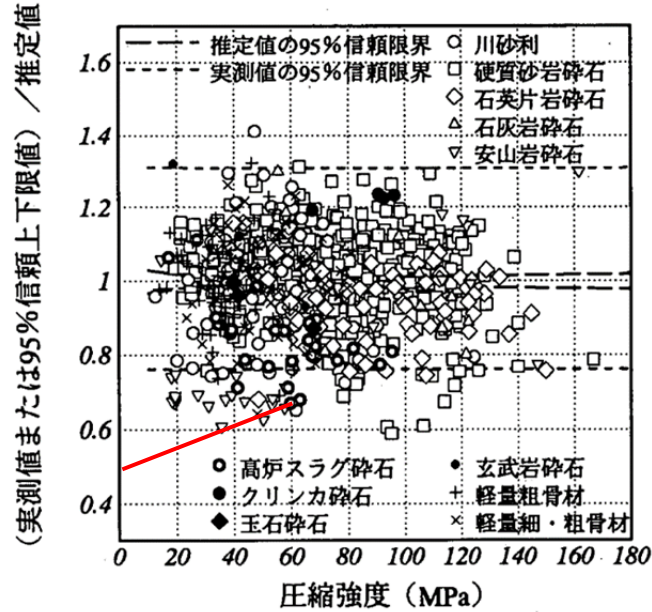


図 5.3-14 引張強度の推定値に対する実測値の比と圧縮強度の関係⁵⁻⁴⁾

この朱線の直線の方程式は (5.3-6) 式により表される。

$$(0.7-0.5) / 60 \times f'_c(t) + 0.5 = 0.003 \times f'_c + 0.5 \quad (5.3-6)$$

これは割裂引張強度の推定値に対する最低値の比であり、 3σ 相当と考えると、

$$3\sigma = f_m(t) - (0.003 \times f'_c + 0.5) \times f_m(t) \quad (5.3-7)$$

ここで、 $f_m(t)$: 割裂引張強度

$$\sigma = -0.001 \times f'_c \times f_m(t) - 1/6 f_m(t) + 1/3 f_m(t) \quad (5.3-8)$$

ここで、圧縮強度と割裂引張強度の関係は、

$$f_m(t) = C \times \sqrt{f'_c(t)} \quad (5.3-9)$$

$f_m(t)$: 材齢 t 日におけるコンクリートの割裂引張強度 (N/mm^2)

$f'_c(t)$: 材齢 t 日におけるコンクリートの圧縮強度 (N/mm^2)

c : コンクリートの乾燥の程度によって異なるが 0.44 を標準

$$f'_c(t) = f_m(t)^2 / C^2 = f_m(t)^2 / 0.19 \quad (5.3-10)$$

(5.3-8) 式に代入すると、

$$\begin{aligned} \sigma &= -0.001 \times f_m(t)^2 / 0.19 \times f_m(t) + 0.166 f_m(t) \\ &= -0.005 \times f_m(t)^3 + 0.166 f_m(t) \end{aligned} \quad (5.3-11)$$

さらに、この場合の変動係数は、

$$V_{S\text{-}crack}(t) = V_{t\text{-}crack}(t) = -0.005 \times f_m(t)^2 + 0.166 \quad (5.3-12)$$

となる.

このようにして、標準偏差と変動係数は、割裂引張強度の関数でかつ材齢の関数として表すことができる. この場合の割裂引張強度と標準偏差の関係を図 5.3-15 に割裂引張強度と変動係数の関係を図 5.3-16 に示す.

割裂引張強度が 3.2N/mm^2 程度で、標準偏差が極大値を取る一方で、変動係数は 5N/mm^2 程度の範囲まで、単調減少している. 図 5.3-14 におけるプロットも 60N/mm^2 程度までを扱う事とし、高強度領域の変動係数を扱えるものとは考えていない.

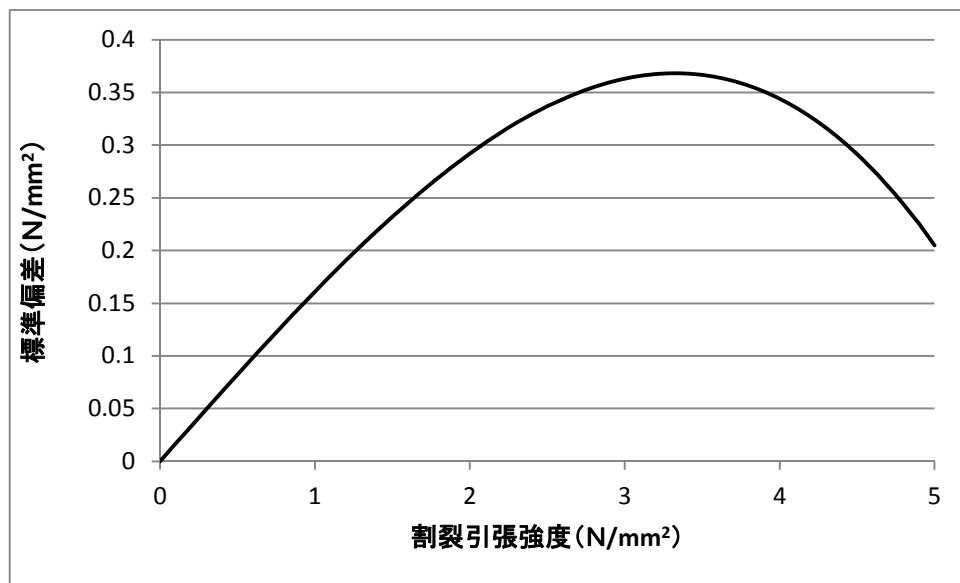


図 5.3-15 割裂引張強度に対する標準偏差

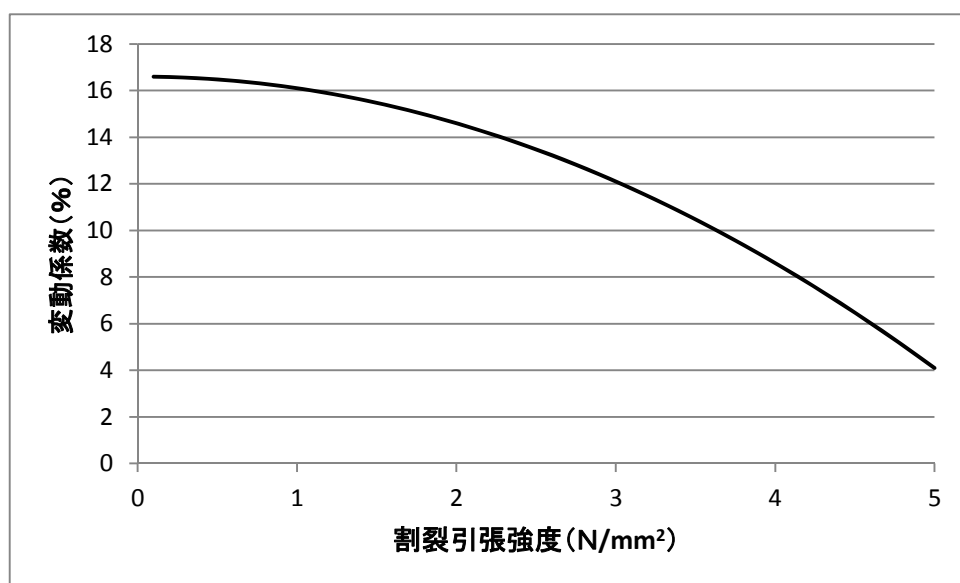


図 5.3-16 割裂引張強度に対する変動係数

このようにすれば，現実的な変動係数の設定が可能と考える．

さらに，製造施工品質管理の程度によって，変動係数を増減するのが良いと考える．

変動係数としては，割裂引張強度と材齢，品質管理の程度を評価できる（5.3-12）式を提案する．

$$V_{S-crack}(t) = V_{t-crack}(t) = -0.005 \times f_m(t)^2 + 0.166 + \alpha \quad (5.3-12)$$

$+ \alpha$: $-0.04 \sim +0.1$ の範囲で製造・施工管理の程度等により，

下記をそれぞれ加算して決定する．

標準の場合 $+0.03$

製造の管理を入念に実施した場合 -0.02

施工によるばらつきを抑える対策を実施した場合 -0.02

養生によるばらつきを抑える対策を実施した場合 -0.02

5.4 安全係数の標準値

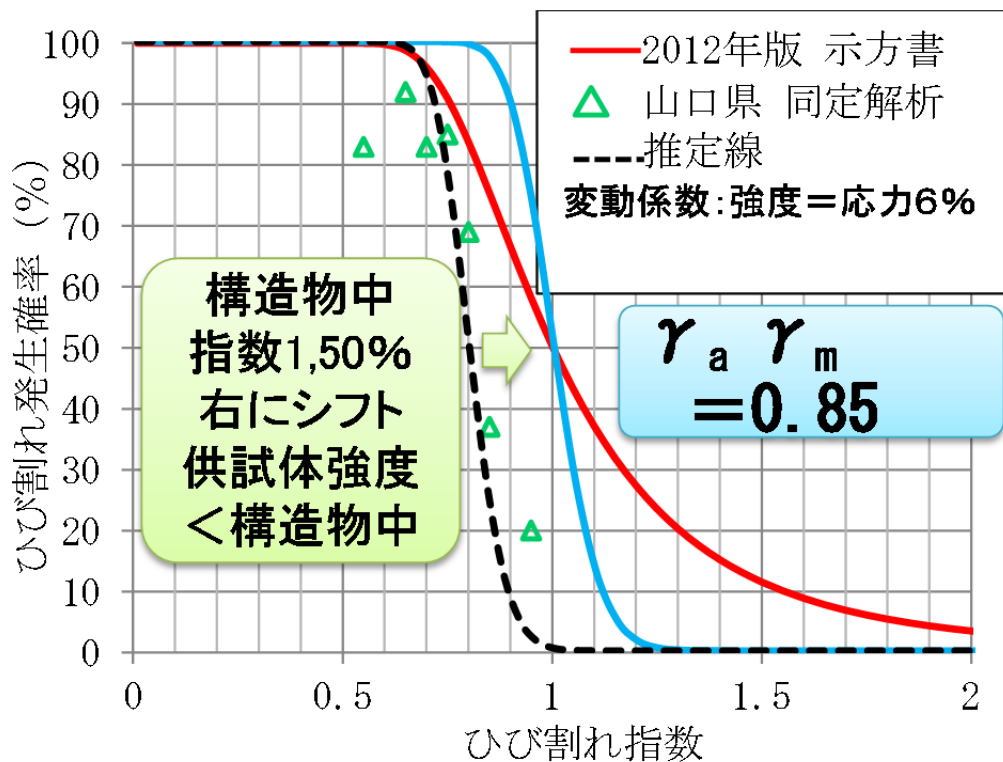
安全係数については、4章で整理してきた。実際の温度ひび割れ照査を考えた場合、微少要素における引張強度と引張応力の照査になり、部材単位での照査ではないことから、部材係数 γ_b は省略できると考えられる。また、作用係数 γ_f は、温度ひび割れ解析のパラメータを保守側に設定することで表現するものとし、構造解析係数は温度応力解析に3次元有限要素法を用いた場合には、使用性の照査の標準値相当の1としてよいと考える。安全係数の標準値を表5.4-1に示す。

表 5.4-1 安全係数の標準値の設定案

安全係数 要求性能 (限界状態)	材料係数 γ_m		部材 係数 γ_b	構造 解析 係数 γ_a	作用 係数 γ_f	構造物 係数 γ_i
	コンク リート γ_c	鋼材 γ_s				
安全性 (断面破壊)	1.3	1.0 または 1.05	1.1～ 1.3	1.0	1.0～ 1.2	1.0～ 1.2
使用性	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
ひび割れ照査	1.25	—	—	1.0	1.0	1.0

5.5 高品質な構造物のひび割れ発生確率

山口県の高品質な構造物群の同定解析のプロットについて今回提案している手法により回帰曲線を検討した。図 5.5-1 に示すように引張強度と引張応力の変動係数は 6% 程度がよく適合している。ただし、この時の安全係数は 0.85 と 1 より小さく、何らかの理由で応力を小さく推定しているか、引張強度を大きく推定していると考えられる。ここで示された同定解析のプロット⁵⁻⁵⁾は、マスコン指針 2008 に準じて温度応力解析を実施しており、前述のとおりひび割れ指数が小さく算定された可能性が高い。仮に割裂引張強度推定値が前述のとおり $1/1.25=0.8$ 倍程度であったと想定すれば、山口システムの場合、構造物中の引張強度は割裂引張強度と同等程度であったと考えられる。これらの同定解析は、忠実に山口システムを履行できた構造物のデータについて同定解析を実施したと説明されている。これらの事も考え合わせ、山口システムにより高品質な管理が実施された構造物群の変動係数は 10% 程度、材料係数は 1.1 程度であったと推察する。

図 5.5-1 山口県の同定解析結果⁵⁻⁵⁾の変動係数と安全係数

5.6 長スパン構造物のひび割れ発生確率

長スパン構造物のひび割れ発生確率の考え方を図 5.6-1 に示す。温度応力が不変となる最小のスパン L_0 (m) を考えた時に、これを 2 回作った場合、(目地を入れた場合と同等)、確率の加法定理から L_0 (m) スパンのひび割れ発生確率 P_0 の 2 倍のひび割れ発生確率 $2P_0$ となる。

一方で長スパン構造物の応力状態として、例えば $2L_0$ (m) の場合を考えると、図 5.6-1 に示す最下段のイメージとなり、スパン L_0 (m) の応力に対して、全延長を考慮すると 3 倍の応力が作用している。これを確率の加法定理で考えると、3 倍のひび割れ発生確率 $3P_0$ になると推定できる。

これをスパン長 L について一般化すると、下式になる。温度応力が不変となる最小のスパン L_0 (m) は、構造物事に解析的に検討するのが良いが、標準的には、3.4 節で示された図 3.4-15 における 15m と設定することを提案する。

$$P_L = (2L/L_0 - 1) \times P_0$$

ここで、

P_0 : スパン L_0 の場合のひび割れ発生確率

L_0 : 標準的には 15m

P_L : 計算上 100% を超える場合は 100% とする

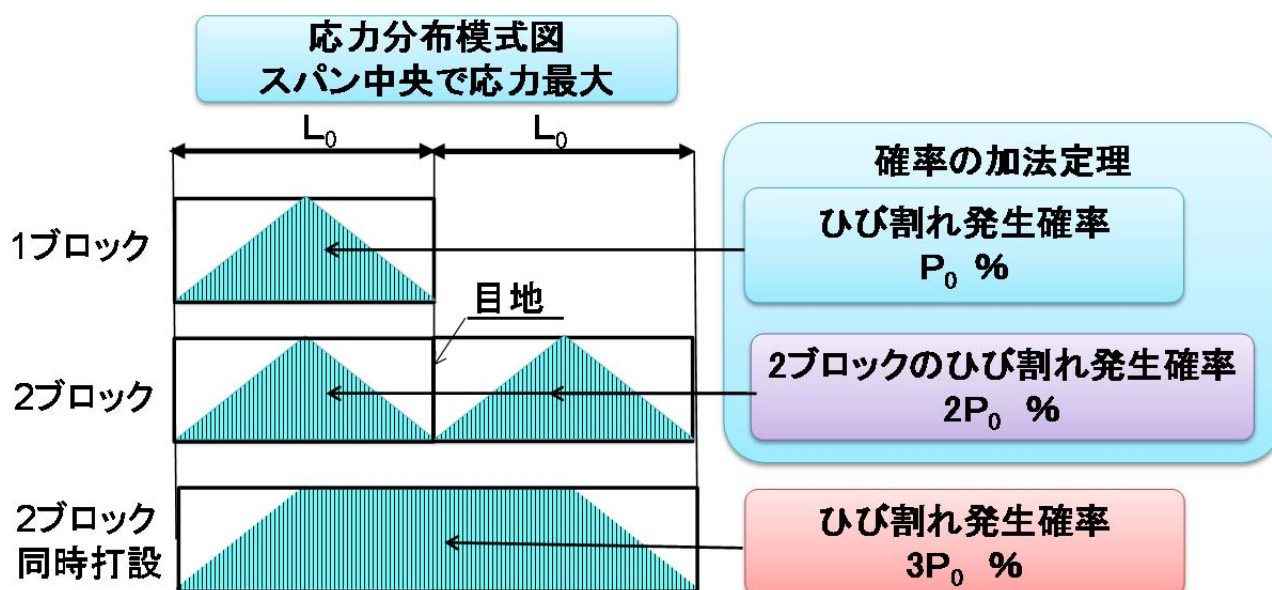


図 5.6-1 長スパンの構造物のひび割れ発生確率の考え方

この考え方によってひび割れ発生確率を補正した場合の結果を図 5.6-2 に示す。ひび割れ発生確率はスパン長に伴って大きくなるように補正されている。補正前後のスパン長とひび割れ発生確率の直線性から、壁厚が 1m を超える場合等は、温度応力が不変となる最小のスパン L_0 (m) を 10m として、それ以上のスパン長で補正した方が良いかもしれない。本補正を実際に行う場合には、温度応力が不変となる最小のスパン L_0 (m) をパラメータスタディーにより算出した後に、それ以上のスパン長の

場合に補正を行うと良いと考えられる。

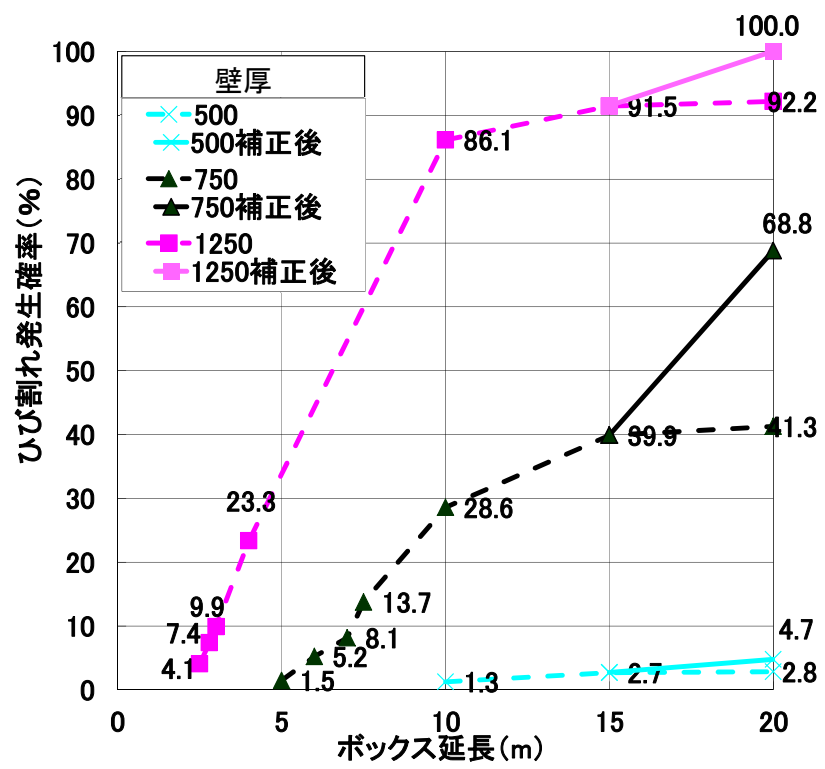


図 5.6-2 長スパンの構造物のひび割れ発生確率の補正

5.7 新たなひび割れ照査方法

新たなひび割れ照査方法としては、標準的な照査方法とより汎用的な照査方法の2パターンを提案する。標準的な照査方法は、従来とおりコンクリート標準示方書に示されるような標準的な製造施工品質管理方法でコンクリート構造物を構築する場合に、比較的従来のやり方に近いひび割れ発生確率図を用いて照査する方法である。現在のひび割れ発生確率図による照査方法の課題を解決した、ひび割れ照査方法である。他方より汎用的なひび割れ照査方法は、どのように高度化された製造施工品質管理方法においても、適切にひび割れ発生確率を評価できる方法である。より汎用的なひび割れ照査方法を用いれば、従来できなかったひび割れ発生確率の相違を評価できるようになることで、高度化された製造施工品質管理方法の適用にインセンティブを付与することが可能となり、ひび割れ制御、品質向上に貢献可能な方法である。

5.7.1 標準的なひび割れ照査方法

従来とおり、ひび割れ発生確率図から目標とするひび割れ発生確率となる安全係数を設定し、ひび割れ指数がこの安全係数以下となることを照査する方法である。ここでは限界状態設計法を意識して、実質的に取扱いのない安全係数についても記載して、説明を明確にしておく。

ひび割れ照査は下式を満足することにより行う。

$$I_{cr}(t) \geq \gamma_{cr} \times \gamma_b \times \gamma_a \times \gamma_i$$

ここに、 γ_{cr} ：セメントの水和に起因するひび割れに関する安全係数

ひび割れ発生確率図から制御目標に準じて設定する。

γ_b ：部材係数，微小要素での検討となるので，適用しない。

γ_a ：構造解析係数 1.0 を標準とする。

γ_i ：構造物係数， γ_{cr} に包含されるため，適用しない。

$I_{cr}(t)$ ：ひび割れ指数

$$I_{cr}(t) = f_{t-crack}(t) / f_{s-crack}(t)$$

$f_{t-crack}(t)$ ：材齢 t 日におけるコンクリート構造物中の引張強度

$$f_{t-crack}(t) = f_m(t) / \gamma_c$$

$f_m(t)$ ：割裂引張強度試験値（平均値），圧縮強度の関数の下式を用いてよい

$$f_m(t) = c \times \sqrt{f'_c(t)}$$

$f'_c(t)$ ：材齢 t 日におけるコンクリートの圧縮強度

c ：コンクリートの乾燥の程度によって異なるが 0.44

γ_c ：コンクリートの材料係数，1.25 を標準とする。山口システム，

長期の保水給水養生，寸法効果影響低減等の品質管理を実施した場合，

1.25～1.0 の間で適切に定める

$f_{s-crack}(t)$ ：材齢 t 日におけるコンクリート構造物中の最大主引張応力度

$$f_{s-crack}(t) = f_s(t) / \gamma_f$$

$f_s(t)$ ：2012 年制定版示方書に準じて 3D-FEM で求めた主引張応力度

γ_f ：作用係数，1.0 を標準とする

スパン長 15m 以下の構造物におけるひび割れ発生確率図を図 5.7-1 に示す。

コンクリート標準示方書に準じて施工した場合、 $V_t = V_s = 15\%$ を標準とする。単位水量測定や全数検査等のばらつきを低減する品質管理を実施した場合、 $V_t = V_s = 5 \sim 15\%$ の範囲で適切にこれを定める。変動係数は、 $5 \sim 25\%$ の範囲を標準とする。

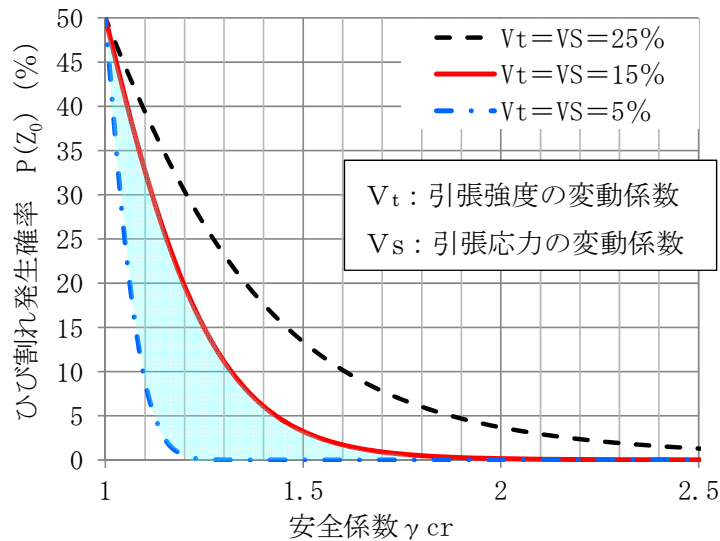


図 5.7-1 ひび割れ発生確率図（スパン長 15 m 以下の場合）

変動係数が 15% の場合のスパン長が 15m 以上の構造物におけるひび割れ発生確率図を図 5.7-2 に示す。スパン長が 20m を超える場合、引張強度が引張応力と等しい場合に、必ずひび割れは発生する。スパン長が 40m の場合には、ひび割れ指数が 1.3 でひび割れ発生確率が 50% 程度であることに留意する必要がある。

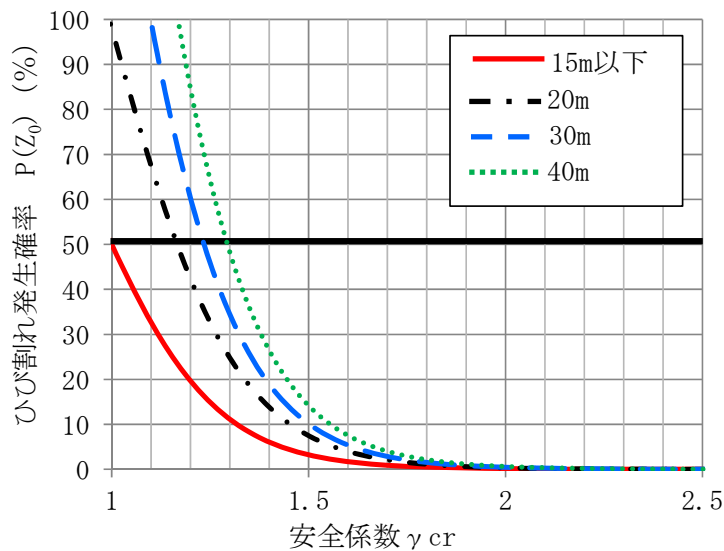


図 5.7-2 ひび割れ発生確率図（変動係数 15% 以上）

ひび割れ発生確率図は、セメントの水和に起因するひび割れに関する安全係数 γ_{cr} を設定するための図である。安全係数 γ_{cr} は構造物中の引張強度と引張応力のばらつき V_t , V_s 、構造物のスパン長を考慮し、制御目標とするひび割れ発生確率を達成するための安全係数である。この図は単純に確率論的に算出したひび割れ発生確率図である。安全係数の設定のための図であり、1 以下に意味を持たないことから、従来は表示していたが、ここでは表示しないこととした。

このようにすることで、標準的な品質管理に対して、従来ひび割れ制御効果を評価できなかった、高度化した良い製造管理、良い施工管理の評価が可能となる。すなわち、図 5.7-3 に示すとおり、例えばコンクリートの製造時に表面水率の管理頻度を増加する等して、ばらつきを低減できれば変動係数に反映することが可能となり、あるいは良い施工管理を行うことで、局所的な欠陥を少なくするよう締固め等を行えば、これは材料係数に反映することができる。このように、高度化した製造施工品質管理を評価することが、インセンティブの付与となり、コンクリート構造物のひび割れ制御、品質の向上に貢献できると考えられる。

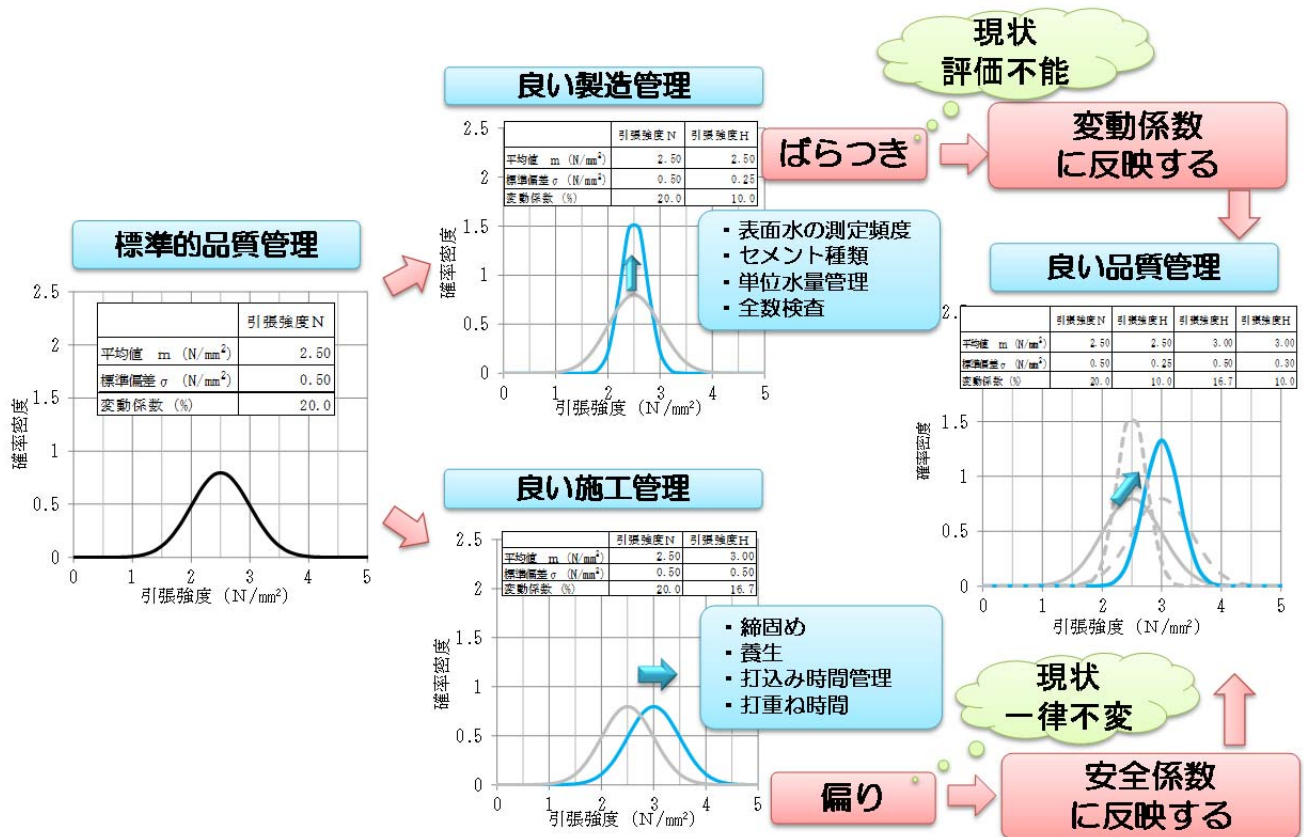


図 5.7-3 製造施工品質管理の高度化の評価方法

5.7.2 汎用的なひび割れ照査方法

3次元有限要素法により、コンクリート標準示方書に示されるパラメータを用いて、温度応力解析を実施して最小ひび割れ指数 I_{crMin} (t_1) を算出する。この際、引張強度は実構造物における値をパラメータとして設定する。すなわち割裂引張強度を修正係数 ρ_c (基本的に従来とおり 0.8 でよい) により低減し

た値をパラメータとすることに留意する。

最小ひび割れ指数 I_{crMin} (t_1) の材齢 t_1 (日) における引張強度の変動係数 V_R と引張応力の変動係数 V_S を設定する。引張強度の変動係数 V_R は施工管理の程度によって 5～15% に設定する。引張応力の変動係数 V_S は 3 次元有限要素法を用いて、コンクリート標準示方書に準じて推定する場合は 3% と設定することができる。

式 (5.2-2) により Z_0 を算出する。誤差関数によりひび割れ発生確率を算定する。あるいは、表 5.7-1 に示す標準正規分布確率表よりひび割れ発生確率を求める。算定されたひび割れ発生確率が目標とするひび割れ発生確率となるか、ひび割れ発生確率を照査する。

$$Z_0 = \frac{-I_{cr} + 1}{\sqrt{V_R^2 \cdot I_{cr}^2 + V_S^2}} \quad \dots (5.2-2) \text{ 再掲}$$

$$P(Z_0) = 1/2 (1 + \text{erf}(Z_0/\sqrt{2}))$$

目標とするひび割れは以下を参考とする。

ひび割れの発生を防止したい場合：5%以下

ひび割れの発生をできる限り制限したい場合：15%以下

表 5.7-1 標準正規分布表

$Z \sim N(0, 1), P(Z < z)$										
z	.00	.01	.02	.03	.04	.05	.06	.07	.08	.09
0.0	0.5000	0.5040	0.5080	0.5120	0.5160	0.5199	0.5239	0.5279	0.5319	0.5359
0.1	0.5398	0.5438	0.5478	0.5517	0.5557	0.5596	0.5636	0.5675	0.5714	0.5753
0.2	0.5793	0.5832	0.5871	0.5910	0.5948	0.5987	0.6026	0.6064	0.6103	0.6141
0.3	0.6179	0.6217	0.6255	0.6293	0.6331	0.6368	0.6406	0.6443	0.6480	0.6517
0.4	0.6554	0.6591	0.6628	0.6664	0.6700	0.6736	0.6772	0.6808	0.6844	0.6879
0.5	0.6915	0.6950	0.6985	0.7019	0.7054	0.7088	0.7123	0.7157	0.7190	0.7224
0.6	0.7257	0.7291	0.7324	0.7357	0.7389	0.7422	0.7454	0.7486	0.7517	0.7549
0.7	0.7580	0.7611	0.7642	0.7673	0.7704	0.7734	0.7764	0.7794	0.7823	0.7852
0.8	0.7881	0.7910	0.7939	0.7967	0.7995	0.8023	0.8051	0.8078	0.8106	0.8133

このように、考えると簡易的には、図 5.7-4 に示されるように、目標とするひび割れ発生確率から、ひび割れ指数に加えて、変動係数を管理する体系に移行することを提案する。例えば、ひび割れの発生を防止するために、ひび割れ発生確率を 5% 以下に制御したい場合、変動係数を 10% 以下に管理できれば、ひび割れ指数は逆に 1.25 で良いというような考え方である。これにより、ひび割れ制御方法の対策の幅も増加する。コンクリートの材齢によって本来、変動係数が変化している事にもこの図であれば対応可能である。すなわち、最小となるひび割れ指数の材齢を確認した上で、材齢を考慮した変動係数が、

図 5.7-4 に示される変動係数以下となるように管理すればよいのである。

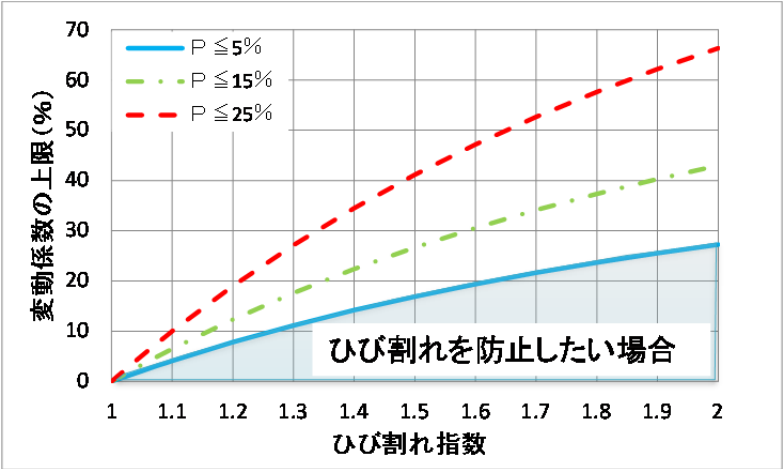


図 5.7-4 ひび割れ発生確率の目標値とひび割れ指数，変動係数の上限

さらに，製造施工品質管理の程度によって，変動係数を前述の (5.3-12) 式により設定すれば，図 5.7-4 と合わせて活用すれば，引張応力だけの目標値を設定することも可能となる。

$$V_R(t) = V_S(t) = -0.005 \times f_m(t)^2 + 0.166 + \alpha \quad (5.3-12)$$

+ α : -0.04 ~ +0.1 の範囲で製造・施工管理の程度等により，

下記をそれぞれ加算して決定する。

標準の場合 +0.03

製造の管理を入念に実施した場合 -0.02

施工によるばらつきを抑える対策を実施した場合 -0.02

養生によるばらつきを抑える対策を実施した場合 -0.02

すなわち，この方法を利用すれば，目標とするひび割れ発生確率を設定すれば，温度応力の制御目標値を設定することができる。

第6章 結論

本研究では，土木構造物のマスコンクリートにおけるひび割れ照査方法として，確率論に照らして説明性が高く，品質管理の方法等によらず一貫してより広範で汎用的な，新たなひび割れ照査法を提案することを目的とした．ここでは，各章毎の内容と本研究で得られた成果及び今後の課題をまとめ，本論文の結論とする．

第 1 章では，本研究の背景と目的を述べた．昭和 61 年から現在まで利用されているひび割れ発生確率図の変遷を調査し，その課題を明らかにすることで，確率論に照らして説明性が高く，品質管理の方法等によらず一貫してより広範で汎用的な，新たなひび割れ照査法を提案することを目的とすることを説明した．

第 2 章では，土木構造物のマスコンクリートにおける，これまでのひび割れ照査方法の変遷を整理した．土木構造物のマスコンクリートにおけるひび割れ照査が始まった経緯を，1936 年（昭和 11 年）に鉄筋コンクリート標準示方書が初めて表された時点から，時代背景と合わせて整理した．次に，2017 年現在に至るまで，ひび割れ照査方法の核となっているひび割れ発生確率図がどのように改訂されてきたか，その要因と対応を明らかにした．また，ひび割れ発生確率図の改訂に合わせて，①制御目標値，②引張強度，③有効ヤング係数，④断熱温度上昇特性がどのように改訂されてきたかを明らかにした．

第 3 章では，ひび割れ発生確率図を分析して現状の課題を検討整理した．

現状のひび割れ発生確率図では，割裂引張強度を用いて算出したひび割れ指数が 1 の時に，ひび割れ発生確率が 50% となるのが危険側であることを，課題として示した．確率が 50% となるのは，構造物中の引張強度と引張応力が等しい時であることが，第 2 章において明らかにされ，構造物中よりも大き

な割裂引張強度を用いて算出したひび割れ指数が1の時には、確率は50%よりも大きくなるためである。

また、現状のひび割れ発生確率図の曲線は指数が2以上と大きくても確率が数%ある裾野の広い曲線となっているが、これは標準的なひび割れ発生確率曲線と言えないことを課題として示した。例えば、実構造物のデータのうち指数1.85で確率18%程度のプロットは、応力の変動係数を一般的な15%程度と仮定すると、強度の変動係数が45%程度と算定でき、標準的な管理状態にあるとは言えない。このようなデータプロットへの適合性も考慮して曲線を作成しているため、標準的な施工結果のひび割れ発生確率と言えないためである。

さらに、ひび割れ発生確率曲線として、ワイブル分布関数式を適用したと説明されているが、数学モデルとしてはワイブル分布関数形とは呼ばず、曲線関数の説明性を失っていることを、課題として示した。適用されているワイブル分布関数は累積分布関数で、ある変数に対する確率は、その変数以下の時の確率を示す関数である。ひび割れ発生確率曲線は、ある安全係数に対する確率を示す曲線であり、累積分布関数としての数学モデル上の意味を表現していない。また、ワイブル分布関数の形状係数は正である場合に数学モデルとしての意味があるが、これを負の値にしているためである。

第4章では、引張強度を引張応力が超える確率をひび割れ発生確率と定義し、それぞれ正規分布すると仮定し、強度と応力の平均値、標準偏差を入力パラメータとした誤差関数によって、ひび割れ発生確率を計算できる式を提案した。さらに、同式を展開し、ひび割れ指数と変動係数の関数形に変換して示した。ひび割れ発生確率曲線は、変動係数を変えることで無数に描出できることを明らかにした。

この方法を利用して、平成8年制定版と2012年制定版のひび割れ発生確率図の変動係数を逆算して示した。この結果、変動係数は5～25%程度の範囲にあることを明らかにした。これらの逆算された変動係数は、コンクリート標準示方書に準じて製造施工管理を実施した、標準的管理状態にある構造物群のひび割れ発生確率データの回帰曲線から算定されたものであり、標準的なばらつきと考えられることを示した。ひび割れ発生確率曲線を一本だけ示すということは、強度と応力の標準的な変動係数を一組設定していると考えられることを明らかにした。

この方法を利用して、現状のひび割れ発生確率図に適合していない、山口県の高品質なコンクリート構造物群のデータプロット群をどのようにしたら扱えるか検討した。山口県の高品質なコンクリート構造物群のデータプロット群は、強度と応力の変動係数が共に6%程度と非常にばらつきが小さいと算定することができた。

また、現状のひび割れ照査方法では、あるスパン長以上の構造物になると、ひび割れ発生確率が変わらなくなる課題を示した。あるスパン長以上の構造物では、スパン長方向に断熱になり、温度分布が不変となることから、温度応力はスパンが長くなってもあるスパン長から不変となる。このため、ひび割れ指数も不変となり、現状のひび割れ発生確率図では、この場合のひび割れ発生確率も不変となる。すなわち、ひび割れ発生確率はあるスパン長以上では不変となる。しかしながら、実際には温度応力が高い区間がスパン長の増加と共に、長くなるため、ひび割れ発生確率もこれに伴い大きくなる。現状では、これを評価できていないことが課題であることを示した。

第5章では、第4章で示されたひび割れ発生確率の算定方法を利用し、確率論に照らして説明性が高く、品質管理の方法等によらず一貫してより広範で汎用的な、新たなひび割れ照査法を提案した。提案は、標準的なひび割れ照査方法と汎用的なひび割れ照査方法の二つの方法である。

標準的な照査方法は、確率論から算定するひび割れ発生確率図を利用する方法を提案した。ひび割れ

発生確率曲線は、実構造物におけるひび割れ発生有無とひび割れ指数との関係から設定した曲線ではない。変動係数を5～25%の範囲にした場合の曲線を示し、この範囲内で製造管理の程度によって適切に変動係数を設定することを提案した。標準的な変動係数としては、強度も応力も15%に設定することを提案した。ひび割れ指数の算定に用いる引張強度は割裂引張強度を材料係数で除したものとし、材料係数は標準的には1.25で施工管理の程度によって1.0まで低減することを提案した。割裂引張強度の圧縮強度からの推定式として、ACI算定式を元とした2007年版まで利用されていた平方根式に戻すことを提案した。これにより、製造施工管理の程度は、材料係数、変動係数を適切に設定することで評価することが可能となり、品質管理の高度化にインセンティブを付与することが可能となった。

また、長スパン構造物のひび割れ発生確率の補正方法を提案した。確率の加法定理に準じて、応力が不変となる最小のスパン長における応力の積分量に対して、長スパン構造物の応力の積分量の比率分、確率を増加補正する方法を提案した。

さらに、汎用的な照査方法として、第4章で示した引張強度と引張応力の変動係数、ひび割れ指数から誤差関数を利用してひび割れ発生確率を求めて、これを照査する方法を提案した。ひび割れ発生を防止したい場合（確率5%以下とした場合）のひび割れ指数と変動係数の上限の関係を図示し、ひび割れ指数だけでなく、変動係数についても管理指標とすることを提案した。

また、変動係数を強度や材齢に関係無く一定値として扱う事は、長期材齢時よりも若材齢時にばらつきが小さくなる設定で、現実的なモデル化ではないことを示した。これを解決できる、変動係数を割裂引張強度と材齢の関数として定式化して示し、標準的なコンクリートにおける変動係数の設定を可能とした。これにより、ひび割れ指数が同一でも若材齢時にばらつきが大きくなるような現象も反映したひび割れ照査が可能とできるようになる。長スパン構造物のひび割れ発生確率も適切に推定が可能となる。

第6章では、各章で得られた主要な結論をまとめることにより、本論文の結論とした。

本論は基本的にひび割れ照査方法の改善方法を示すことを目的とした方法論について述べている。このため、今後の課題として、ここで設定した変動係数や安全係数の標準値等の検証を進める必要性をあげる。これらの値は、方法論を示すことを主眼としているために、批判を恐れずに、ある意味大胆に割り切り、筆者の主観的な工学的判断も含んだ設定となっている部分もある。今後多くのデータを蓄積して検証を行い、より実態に即した変動係数や安全係数の標準値あるいは高度な品質管理を行った場合のそれらの値等を設定することが重要となる。

謝 辞

本論文を審査して頂きました、主査 岸利治博士（東京大学生産技術研究所 副所長、教授）、副査 前川宏一博士（東京大学工学系研究科 教授）、副査 野口貴文博士（東京大学工学系研究科 教授）、副査 石田哲也博士（東京大学工学系研究科 教授）、副査 長井宏平博士（東京大学生産技術研究所 准教授）、副査 佐藤良一博士（広島大学 名誉教授）、副査 中村秀明博士（山口大学大学院 教授）に、深く感謝いたします。

岸利治博士には、研究テーマの選定から本論文を纏めるまで、5 年以上に亘り、どのような事に対しても一つ一つ丁寧に議論とご指導を重ねて頂きました。これらの議論とご指導を頂いた中で、圧倒的に卓越した先見の明を持って、課題を導出あるいは解をイメージ、これらをストーリー付ける力には、ただただ感嘆、ご教示頂くばかりで申し訳なく思いましたが、感銘いたしました。これらの議論とご指導から筆者が勉強した力、物事の本質の捉え方、技術に対する真摯さや情熱等は、本研究の範囲を超えて、筆者が今後エンジニアとしてさらなる研鑽を積む上での矜持となりました。厚く御礼申し上げます。

前川宏一博士には、特に長スパン構造物における現状の温度ひび割れ照査方法の課題解決に関する熱い思いを、貴重な実績やご経験談を含めてご教示ご指導頂き、筆者の代えがたい財産になりました。野口貴文博士には、建築的視点や解析的な誤差とその補正方法について、石田哲也博士には、安全係数とその標準値、特に使用性の照査における材料係数について、長井宏平博士には、確率論を前面に出した照査方法を今後どのように展開していくかについて、全般ご指導頂いた中でも、特にご助言、ご教示、ご指導を頂きました。研究内容をより重厚にすることが可能になりました。厚く御礼申し上げます。

佐藤良一博士には本研究全般に亘り詳細なご指導を頂き、特に、限界状態設計法に温度ひび割れ照査体系を包含すべきものなのかどうか、標準的方法論を示すことが工学の進歩を止めないようにするべきである等、高所から本研究についての方向性を示して下さいました。中村秀明博士には、ひび割れ問題に関する確率論からのアプローチについて、先生が研究されていた当時の考え方等も含めて、様々なご教示ご指導を頂きました。お二人の先生には遠方から本研究のご指導のため、わざわざご足労頂く事も多くなってしまいました。含めて、厚く御礼申し上げます。

早稲田大学名誉教授の関博 博士には、現在まで 30 数年に亘り、常に筆者の事を気遣って頂き、筆者のどのような相談にも温かく適切にご指導ご支援頂き、また本研究の前段となる温度ひび割れ解析の研究でもご指導を頂きました。筆者がここまで大きく道を違わず技術畑を歩いて来られた基礎を創って下さいました。記して深く感謝いたします。

現在もベトナムでエンジニアとして現役の渡辺泰充氏（元清水建設株式会社）には、技術者としての生き方を、筆者が清水建設に入社した時から背中と文章とたまに言葉でご教示頂きました。また、西川洋二氏（元清水建設株式会社）には、筆者の身近に居て、どのような時でも暖かく応援して頂き、技術者としての真摯なあるべき姿をご教示頂きました。グローバルワークス株式会社の野口恒久氏（元清水

建設株式会社)には、技術的課題解決についての楽しさ、資格取得の楽しさをご教示頂きました。筆者が、技術者としての在り方を考え、自らの実力を試し、これを証明する武器の一つとして、学位を取得するという一つのインセンティブを頂き、本研究をまとめる原動力とできました。記して深く感謝いたします。

清水建設株式会社の名倉健二上席エンジニア、樋口義弘副本部長には、本研究の意義、筆者の思いや考えをご理解頂き、会社としての応援を取り付けて頂きました。大矢隆二副本部長からは、研究の進捗について、親身になってのご心配を、叱咤につぐ叱咤という形で頂き、本研究の進捗に学術以外の側面からインセンティブを与えて頂きました。江渡正満博士には、筆者が清水建設に入社した時から現在まで25年以上に亘り、温度ひび割れ問題に関して、いついかなる時、いかなる問題についても丁寧に楽しくご教示ご指導を頂きました。江渡正満博士のご指導が無ければ、筆者は温度ひび割れ問題に何ら深い知見を持てず現在に至り、本研究をテーマとすることはできませんでした。黒田泰弘博士には構造物中の強度の変動係数について貴重なご助言を頂き、田中博一博士、高橋圭一氏には筆者の本研究以外の業務を特にサポート頂きました。矢ノ倉ひろみ氏には本研究の基礎的知見となる温度応力解析、図表の検討作成等、論文作成全般において多大なご協力頂きました。辻正邦氏には、英文要旨の検討、10数年前一緒に実施した解析データの提供等ご協力頂きました。また、筆者の所属する土木技術本部の皆さん、特にバックエンド技術部の皆さんからは有形、無形のサポートを頂きました。さらに、筆者が清水建設に入社してから25年以上の間、藤井禎主査、小池洋副支店長、田中栄治副支店長、中満光広部長、倉内政弘工事長、定木紳主査、守屋紀和部長、戸栗智仁部長、野村朋宏主査、松本和真主査、全ての方のお名前を挙げればつきることがないほどですが、本当に多くの方々に、温度ひび割れの制御、例えば鉄筋増量や低熱系セメントの使用、プレクリーリング等を、一緒に実践あるいはご教示、ご指導頂いたことで、筆者は温度ひび割れ問題について多くの経験と知見を得ることができました。関係頂いた全ての方に深く感謝の意を表します。

最後に、筆者の研究への情熱を理解し、仕事と研究以外の事柄への関与の低下について、それを黙して埋めてくれた家内、その状態を良しとしてくれた娘達、さらに、父母と一緒に温かく応援までしてくれて、ありがとう。感謝します。

付 録-1 引張強度と有効ヤング係数の改訂の影響

1. 引張強度と有効ヤング係数の検討

引張強度と有効ヤング係数のパラメータを 2007 年制定版に変更した場合の検討を行った。

2. 解析モデル

解析モデルを図-1 に示す。解析対象は壁と底版とした。

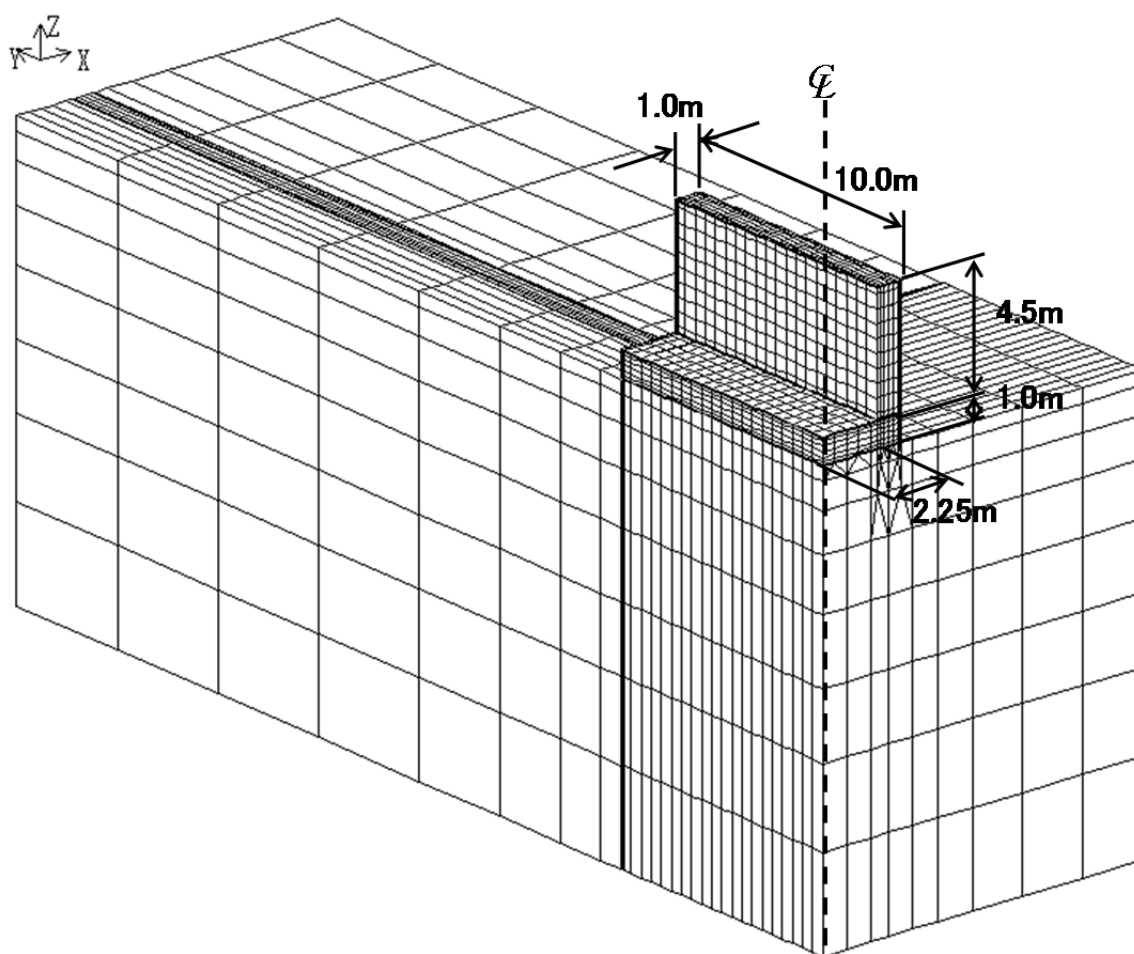


図-1 解析モデル

3. 解析条件

3.1 温度解析条件

温度解析条件を表-2 に、外気温入力データを図-3 に示す。解析期間は1年間とした。

表-2 温度解析条件

	底版	側壁	地盤	備考
W/C (%)	55.0		—	宇部三菱セメント技術資料 (2006) より
セメント種類	N		—	
セメント量 (kg/m ³)	296		—	
打設日	4/1	4/29	—	
外気温 (°C)	11.9	16.4	—	理科年表 東京
初期温度 (°C)	16.9	21.4	15.9	外気温+5°C
熱伝導率 (W/m°C)	2.7		3.45	2012 年コ示より
比熱 (J/g°C)	1.15		0.79	
密度 (kg/m ³)	2400		2650	2012 年コ示より
断熱温度上昇特性	$Q(t) = Q_{\infty} [1 - \exp\{-r(t - t_{0,Q})\}]$		—	2012 年コ示より
	Q _∞	50.0	49.8	
	γ	1.077	1.314	
	t ₀	0.213	0.156	

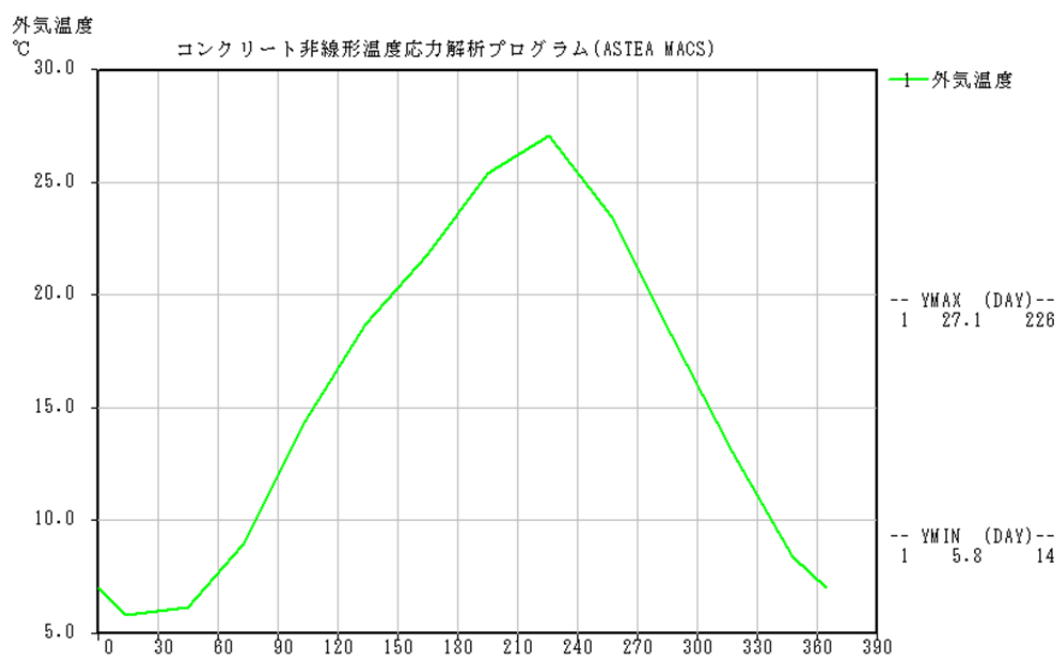


図-3 外気温入力データ

熱伝達境界の設定値を表-3 に示す。熱伝達係数の設定は、解析期間中一定とした。

表-3 熱伝達境界の設定値

部位		熱伝達係数 (W/m ² ・℃)
地盤		14.0 (外気)
底版	養生 (上面)	14.0 (散水)
	型枠	14.0 (鋼製型枠)
側壁	養生 (上面)	14.0 (外気)
	型枠	14.0 (鋼製型枠)

3.2 応力解析条件

応力解析条件を表-4 に示す。

表-4 応力解析条件

項目	底版・側壁	地盤	備考
圧縮強度 (N/mm ²)	$\sigma_3 : 16.6$ $\sigma_7 : 26.5$ $\sigma_{28} : 35.7$ $\sigma_{56} : 37.7$ $\sigma_{91} : 39.5$	—	材齢直線補間 宇部三菱セメント技術資料 (2006) より
引張強度 (N/mm ²)	$f_t(t_e) = C_1 \times f'_c(t_e)^{C_2}$ $C_1:0.13, C_2:0.85$	—	2012 年コ示より
	$f_t(t_e) = C_1 \times f'_c(t_e)^{C_2} \cdot \gamma$ $C_1:0.44, C_2:0.5, \gamma:0$		2007 年コ示より
ヤング係数 (N/mm ²)	$E_c(t_e) = C_3 \times f'_c(t_e)^{C_4}$ $C_3:6300, C_4:0.45$	25	底版, 側壁: 2012 年コ示より
	$E_c(t_e) = C_3 \times f'_c(t_e)^{C_4}$ $C_3:4700, C_4:0.5$		2007 年コ示より
有効ヤング係数	$E_e(t_e) = \phi(t_e) \times E_c(t_e)$ $\phi(t_e)$: 最高温度に達するまでの有効材齢: 0.42 最高温度に達する有効材齢+1 有効材齢以降: 0.65	—	2012 年コ示より
	$E_e(t_e) = \phi(t_e) \times E_c(t_e)$ $\phi(t_e)$: 温度上昇時におけるクリープ影響が大きいこ とによるヤング係数の補正係数 材齢 3 日まで $\phi(t) = 0.73$ 材齢 5 日以降 $\phi(t) = 1.0$ 材齢 3 日から 5 日までは直線補間してよい		2007 年コ示より
ポアソン比	0.2	0.3	2012 年コ示, マスコン指針より
線膨張係数 ($\mu / ^\circ\text{C}$)	10		2012 年コ示, マスコン指針より

4. 解析結果

解析結果の温度，応力，指数について，経験値の分布図と経時変化図を図-5～図-10 に示す．経時変化図を出力した着目点は，図-4 に示すとおりとした．

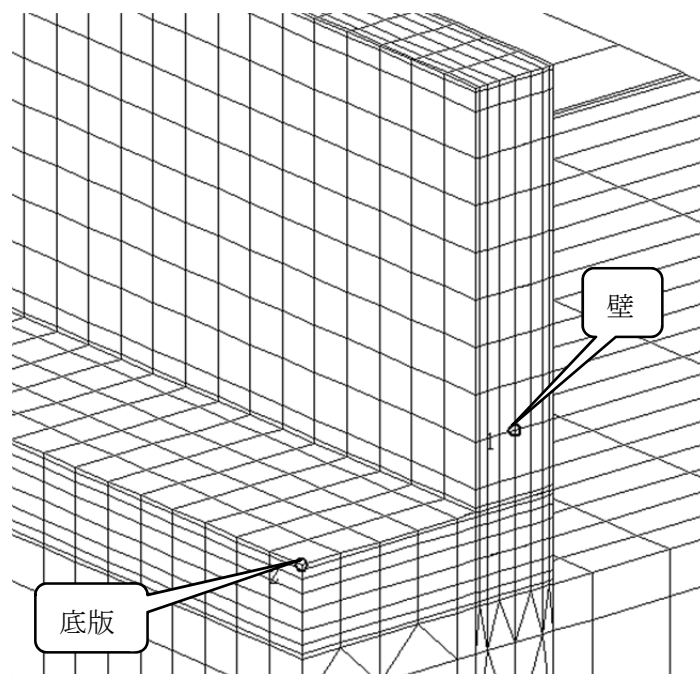


図-4 経時変化図の出力点

【底版の解析結果】

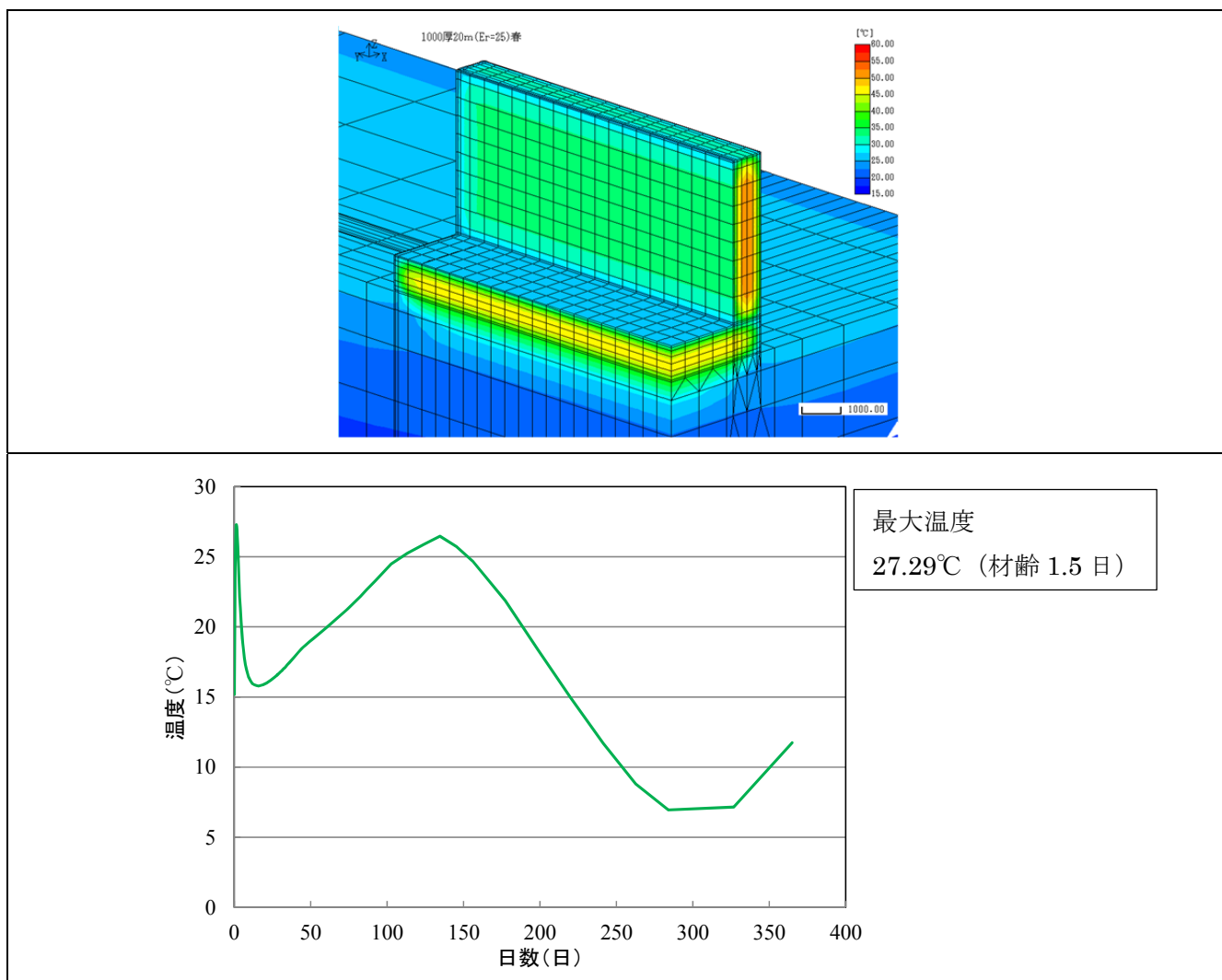


図-5 底版の温度解析結果

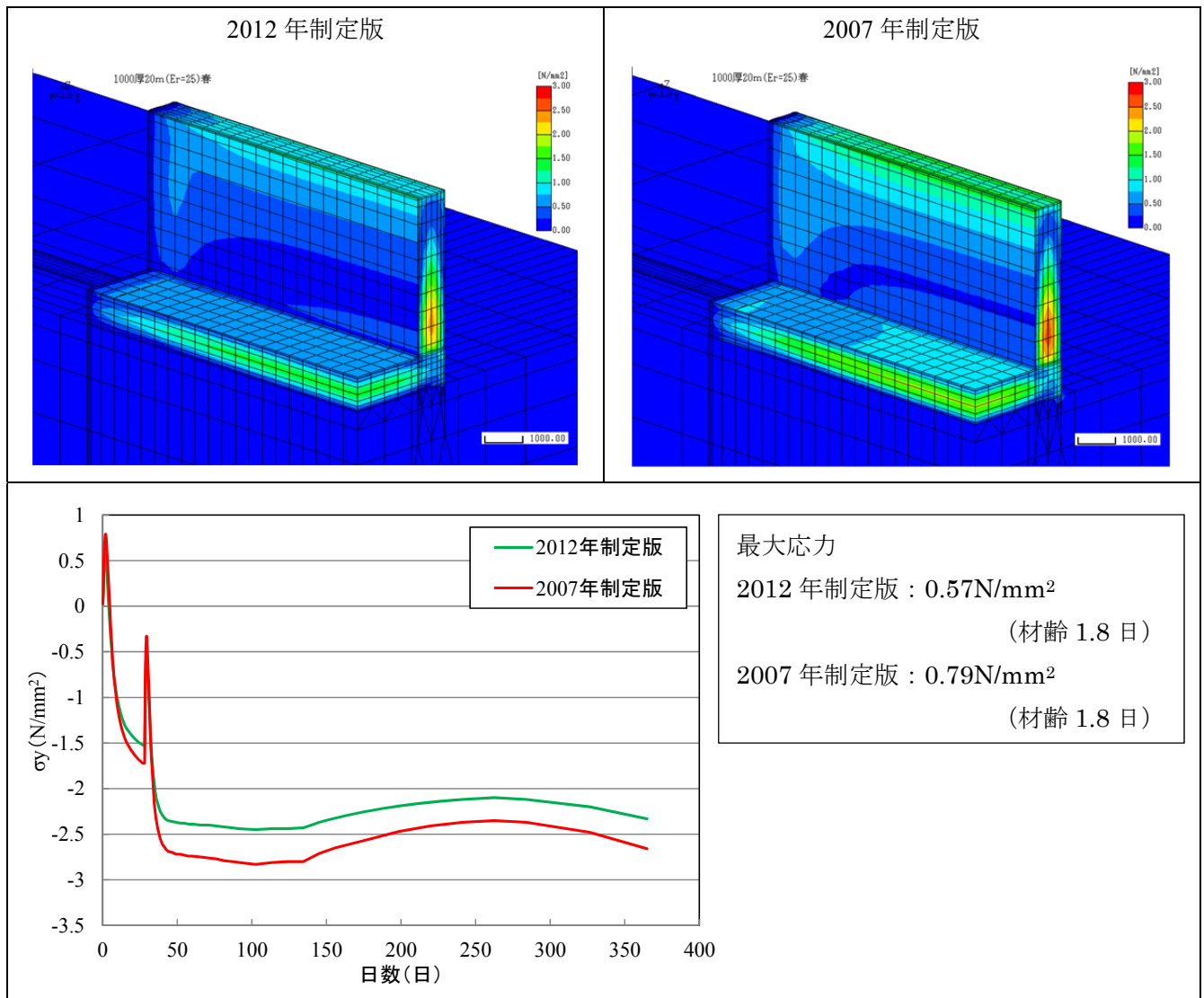


図-6 底版の応力解析結果

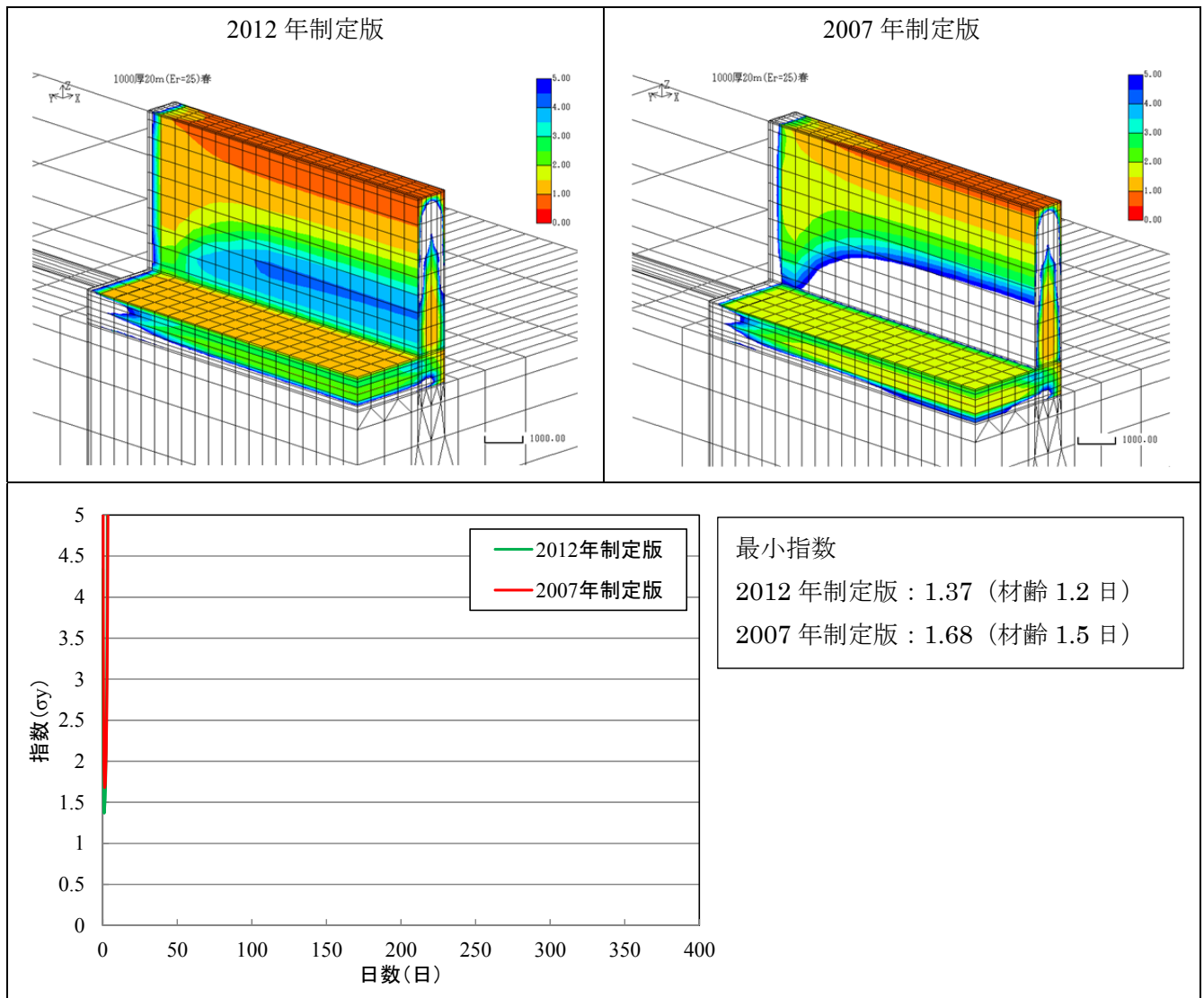


図-7 底版のひび割れ指数解析結果

【壁の解析結果】

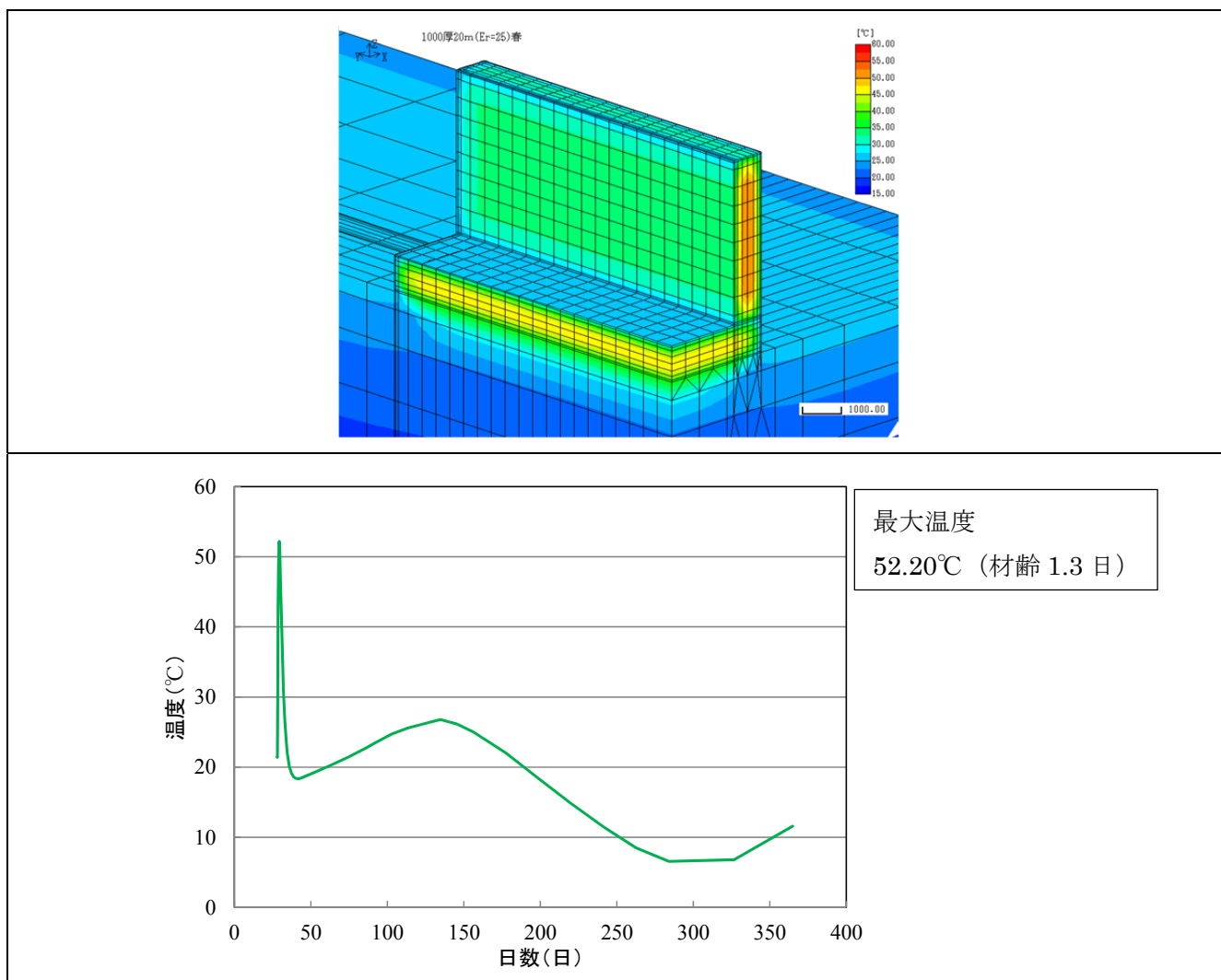


図-8 壁の温度解析結果

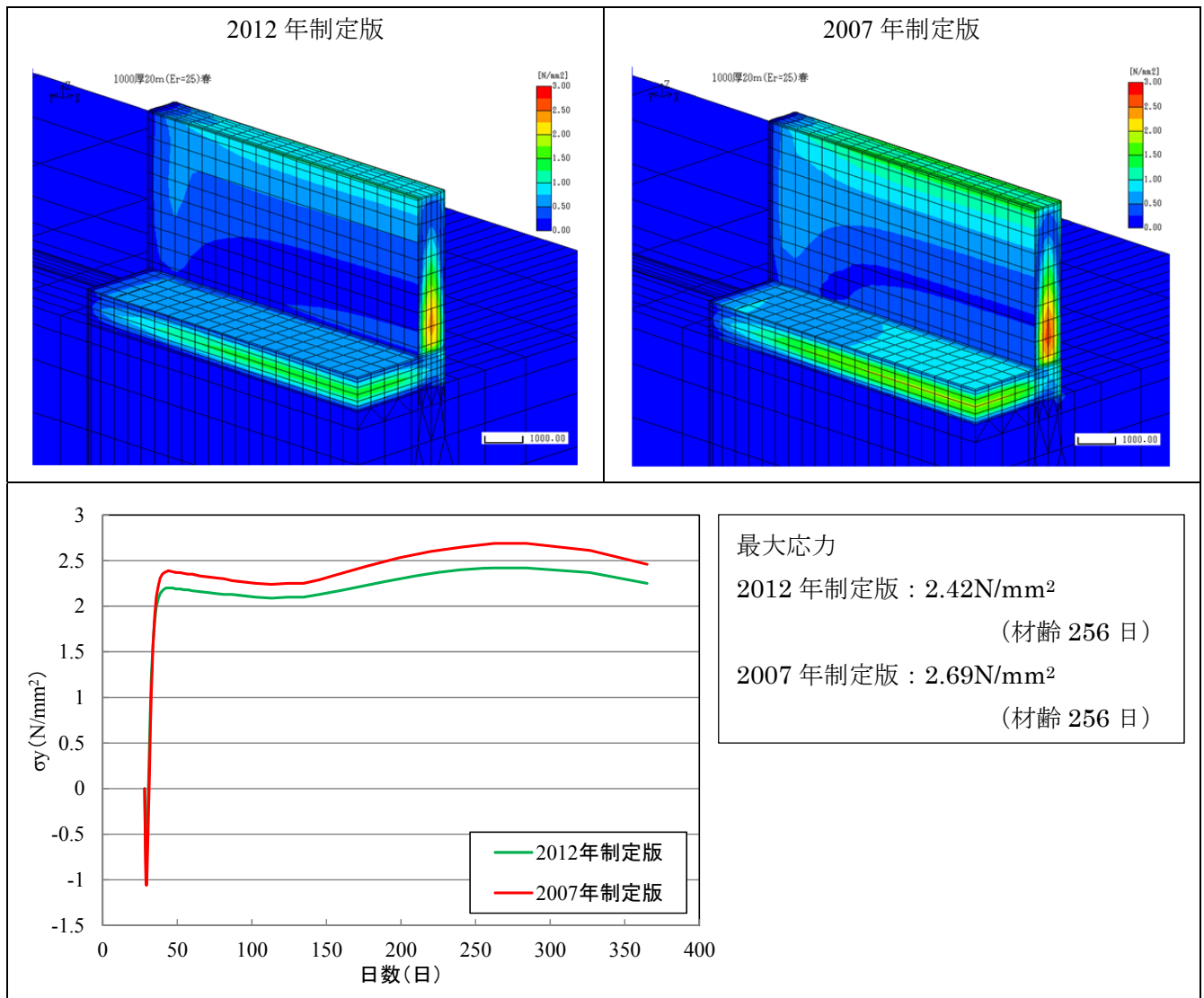


図-9 壁の応力解析結果

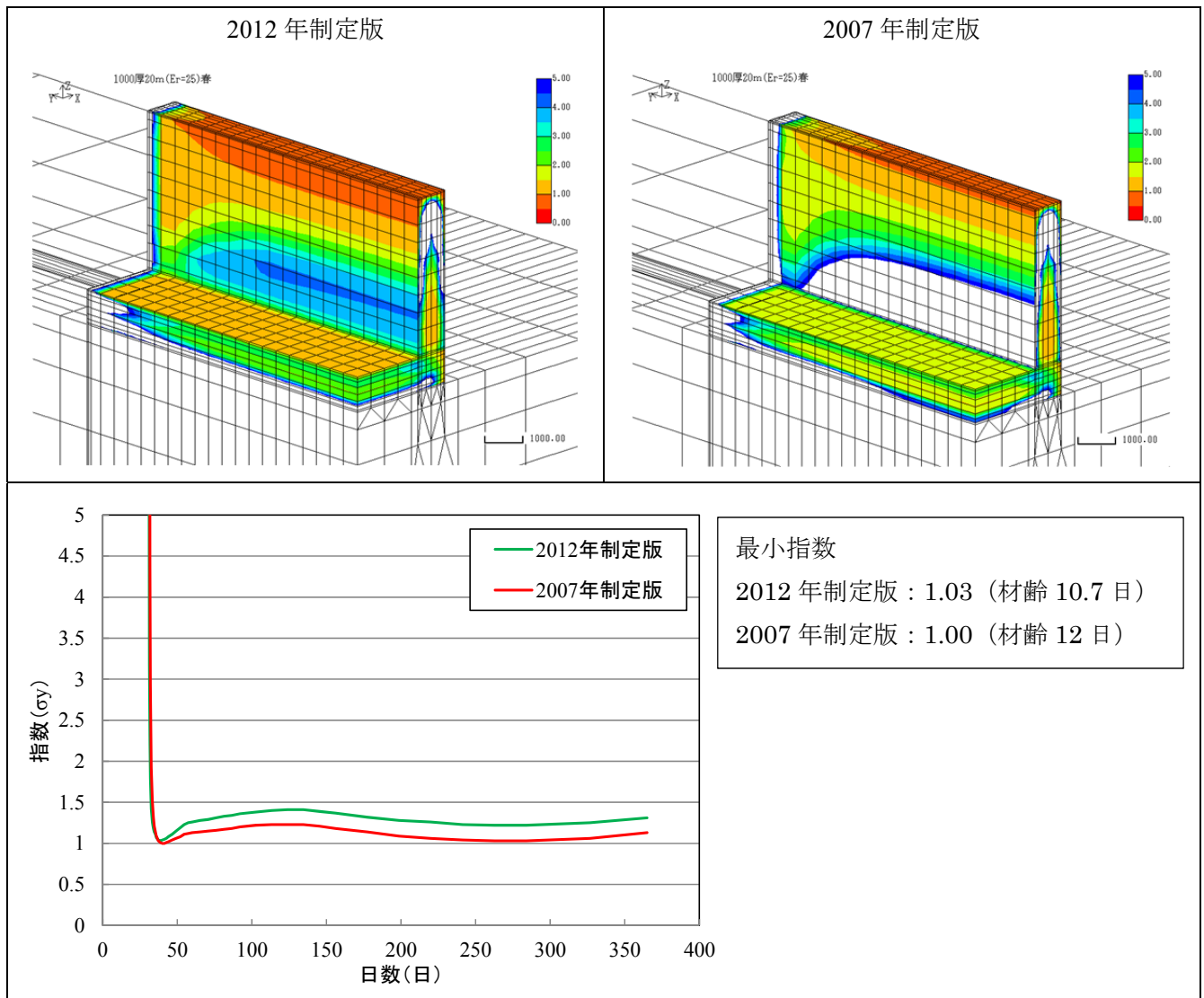


図-10 壁のひび割れ指数解析結果

付 録-2 断熱温度上昇特性の改訂の影響

1. 断熱温度上昇特性値の検討

断熱温度上昇特性値のパラメータを 2007 年制定版に変更した場合の検討を行った。

2. 解析モデル

解析モデルを図-1 に示す。解析対象は壁と底版とした。

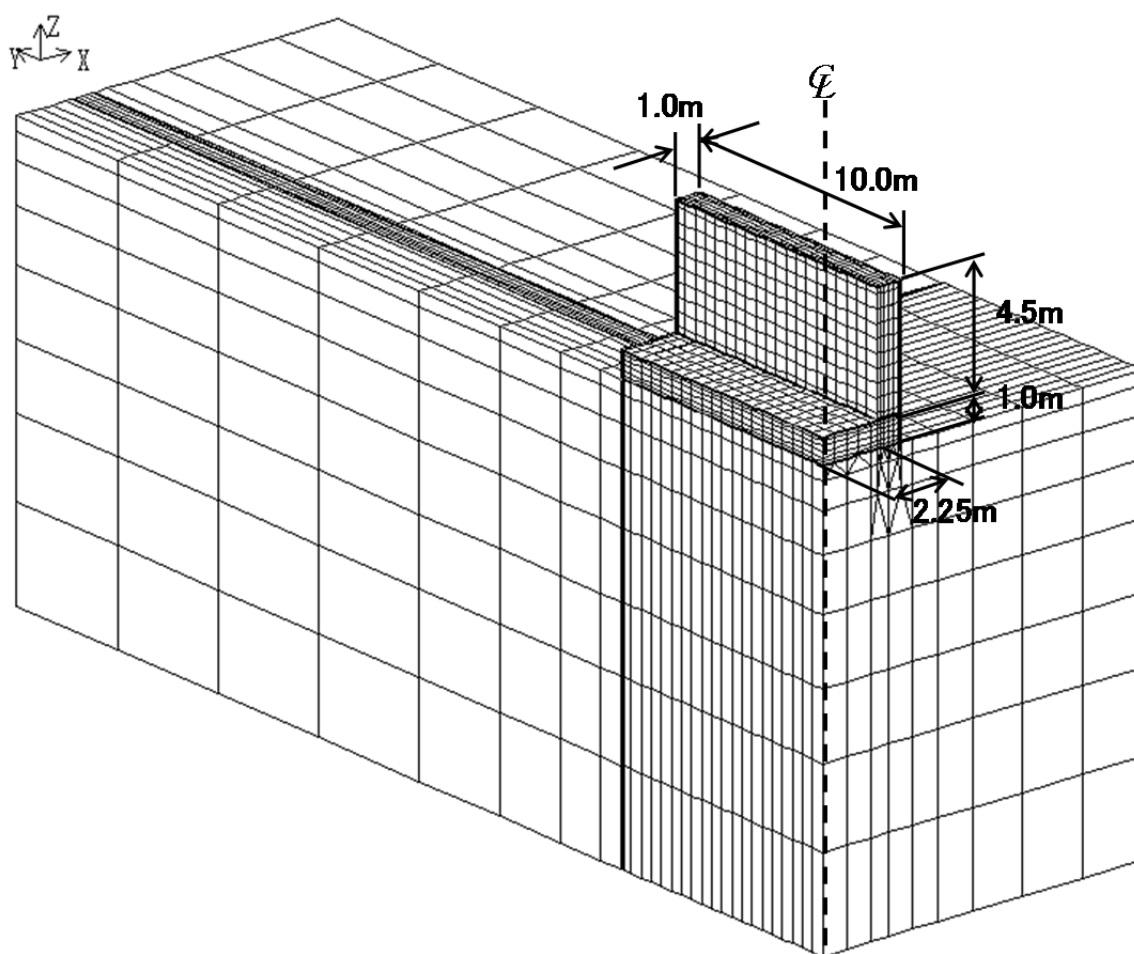


図-1 解析モデル

3. 解析条件

3.1 温度解析条件

温度解析条件を表-2 に、外気温入力データを図-3 に示す。解析期間は1年間とした。

表-2 温度解析条件

	底版	側壁	地盤	備考
W/C (%)	55.0		—	宇部三菱セメント技術資料 (2006) より
セメント種類	N		—	
セメント量 (kg/m ³)	296		—	
打設日	4/1	4/29	—	
外気温 (°C)	11.9	16.4	—	理科年表 東京
初期温度 (°C)	16.9	21.4	15.9	外気温+5°C
熱伝導率 (W/m°C)	2.7		3.45	2012 年コ示より
比熱 (J/g°C)	1.15		0.79	
密度 (kg/m ³)	2400		2650	2012 年コ示より
断熱温度上昇特性	$Q(t) = Q_{\infty} [1 - \exp\{-r(t - t_{0,Q})\}]$		—	2012 年コ示より
	Q _∞	50.0	49.8	
	γ	1.077	1.314	
	t ₀	0.213	0.156	
断熱温度上昇特性	$Q(t) = Q_{\infty} [1 - \exp\{-rt\}]$		—	2007 年コ示より
	Q _∞	45.9	45.4	
	γ	0.931	1.149	

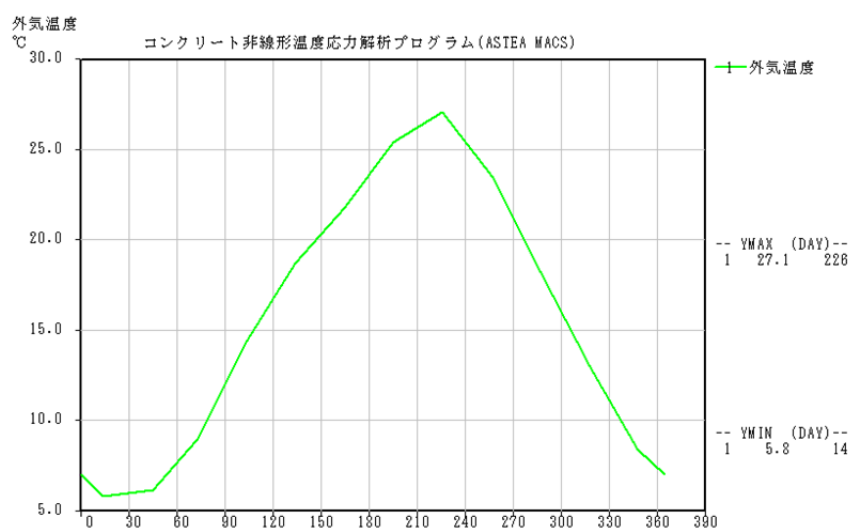


図-3 外気温入力データ

熱伝達境界の設定値を表-3 に示す。熱伝達係数の設定は、解析期間中一定とした。

表-3 熱伝達境界の設定値

部位		熱伝達係数 (W/m ² ・℃)
地盤		14.0 (外気)
底版	養生 (上面)	14.0 (散水)
	型枠	14.0 (鋼製型枠)
側壁	養生 (上面)	14.0 (外気)
	型枠	14.0 (鋼製型枠)

3.2 応力解析条件

応力解析条件を表-4 に示す。

表-4 応力解析条件

項目	底版・側壁	地盤	備考
圧縮強度 (N/mm ²)	$\sigma_3 : 16.6$ $\sigma_7 : 26.5$ $\sigma_{28} : 35.7$ $\sigma_{56} : 37.7$ $\sigma_{91} : 39.5$	—	材齢直線補間 宇部三菱セメント技術資料 (2006) より
引張強度 (N/mm ²)	$f_t(t_e) = C_1 \times f'_c(t_e)^{C_2}$ $C_1:0.13, C_2:0.85$	—	2012 年コ示より
ヤング係数 (N/mm ²)	$E_c(t_e) = C_3 \times f'_c(t_e)^{C_4}$ $C_3:6300, C_4:0.45$	25	底版, 側壁: 2012 年コ示より
有効ヤング係数	$E_e(t_e) = \phi(t_e) \times E_c(t_e)$ $\phi(t_e)$: 最高温度に達するまでの有効材齢: 0.42 最高温度に達する有効材齢+1 有効材齢以降: 0.65	—	2012 年コ示より
ポアソン比	0.2	0.3	2012 年コ示, マスコン指針より
線膨張係数 ($\mu / ^\circ\text{C}$)	10		2012 年コ示, マスコン指針より

4. 解析結果

解析結果の温度，応力，指数について，経験値の分布図と経時変化図を図-5～図-10 に示す．経時変化図を出力した着目点は，図-4 に示すとおりとした．

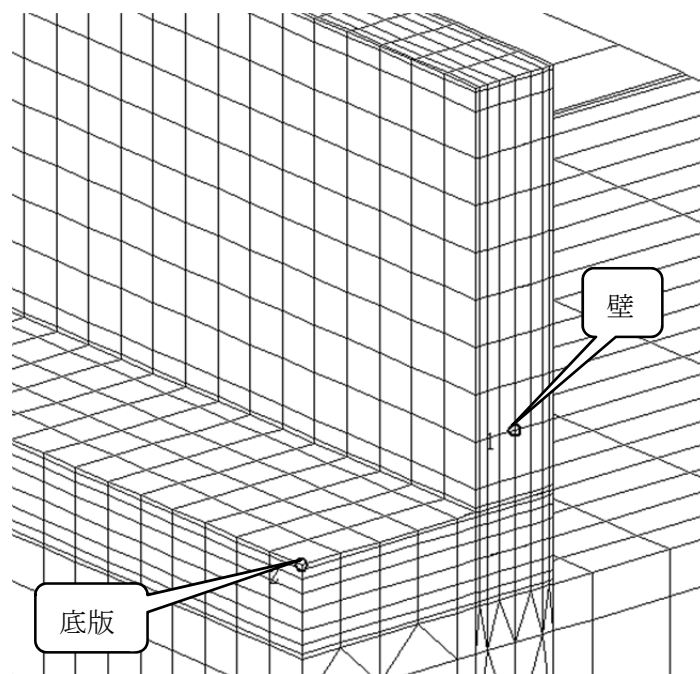


図-4 経時変化図の出力点

【底版の解析結果】

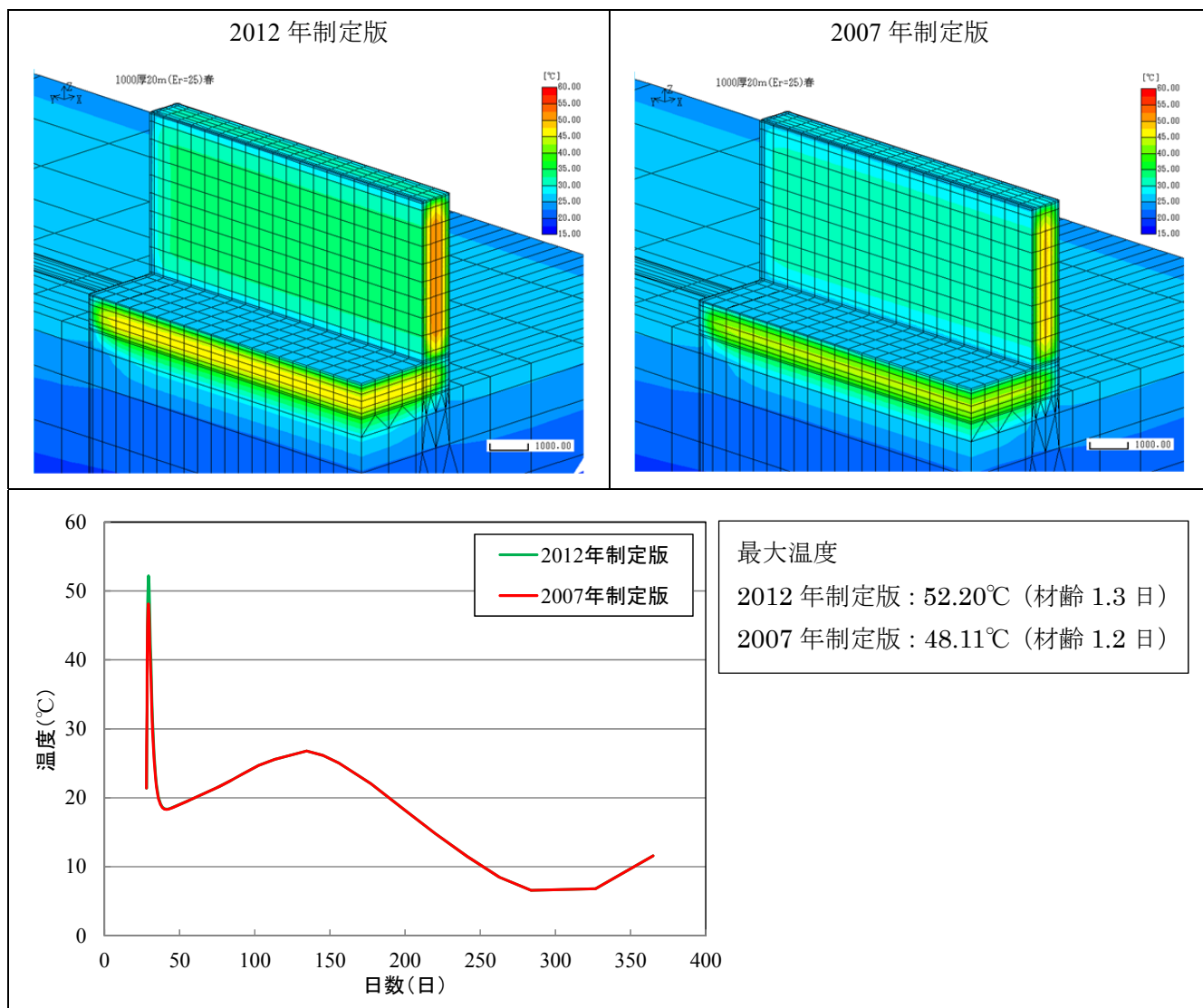


図-5 温度解析結果

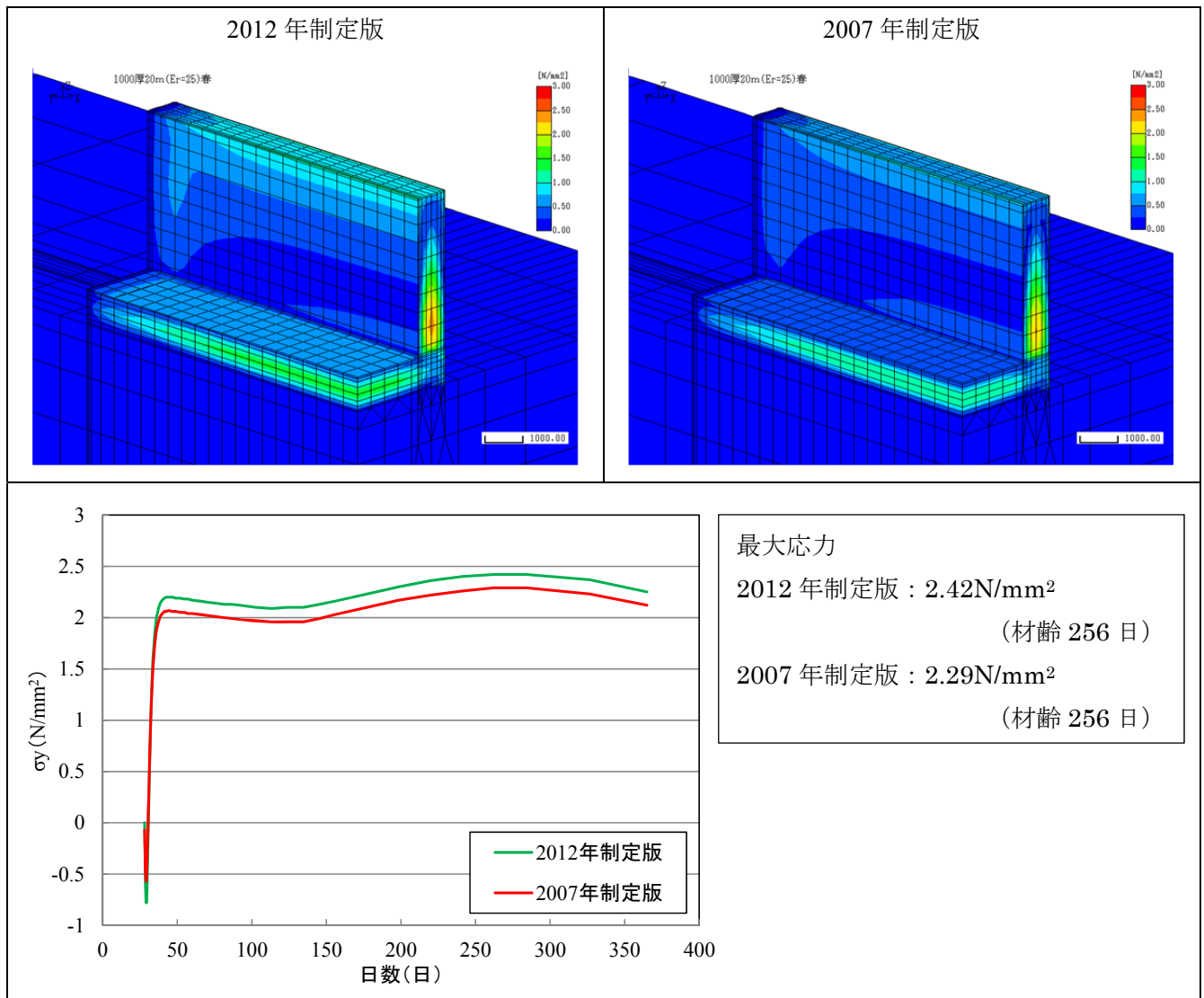


図-6 応力解析結果

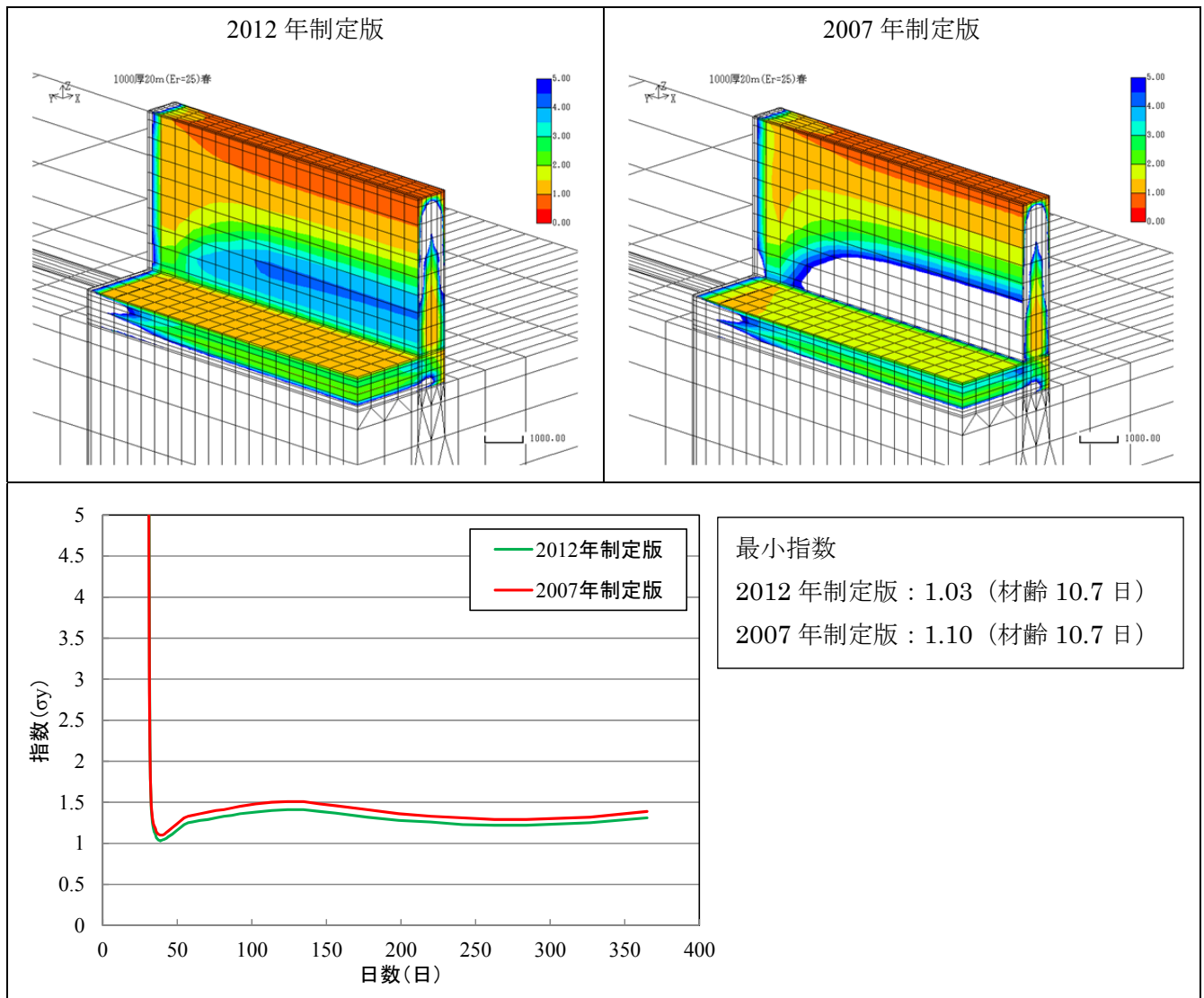


図-7 ひび割れ指数解析結果

【壁の解析結果】

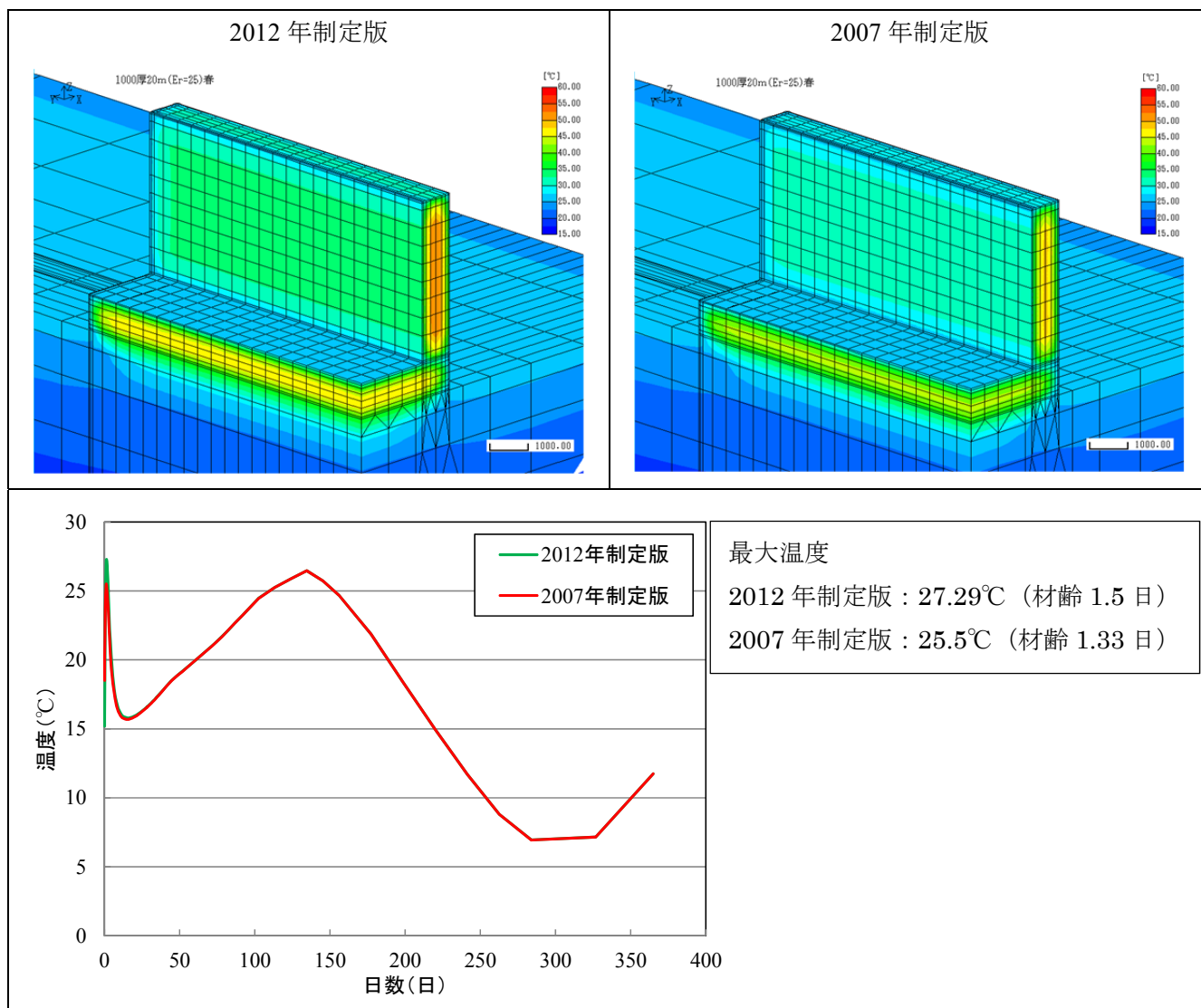


図-8 温度解析結果

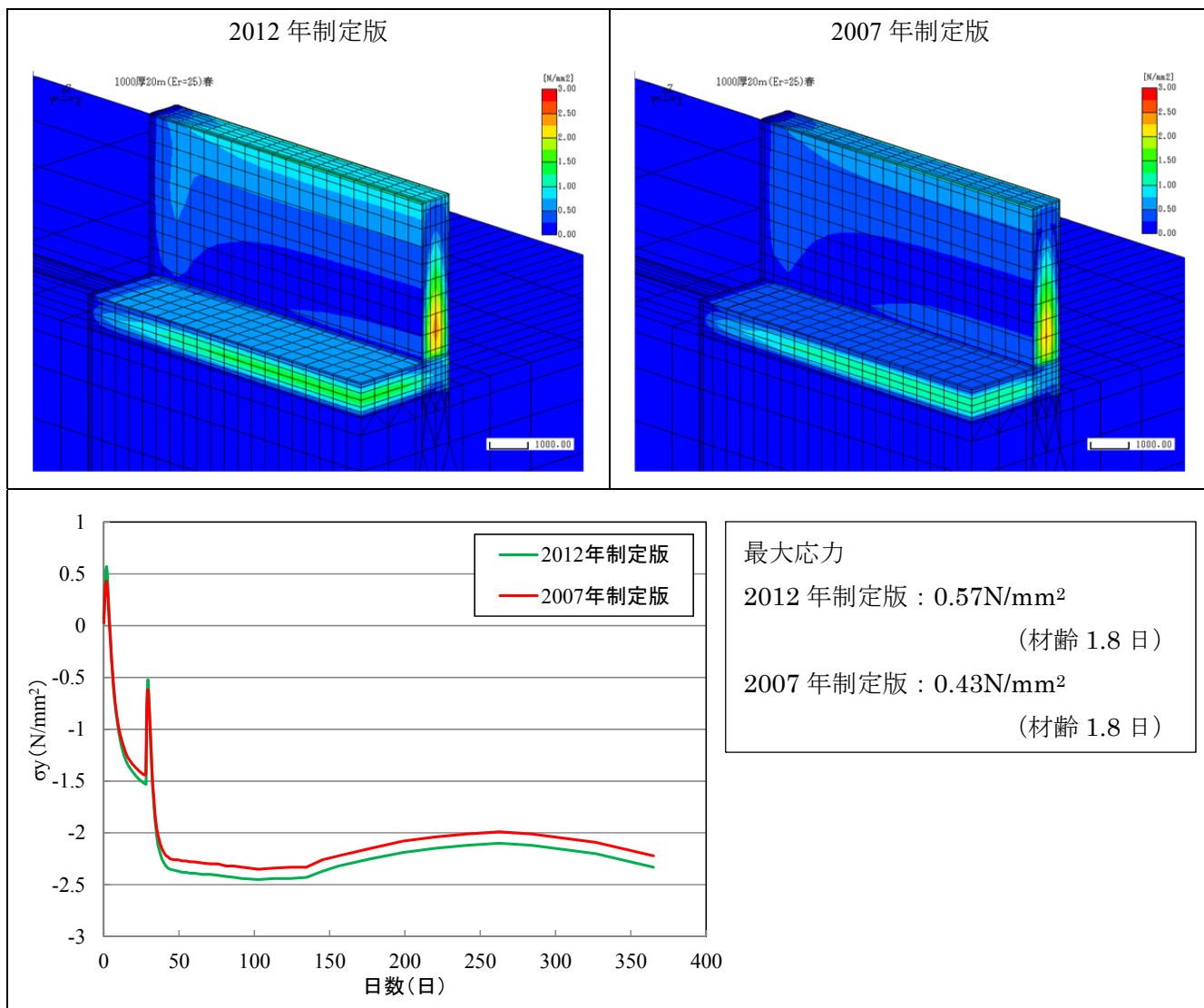


図-9 応力解析結果

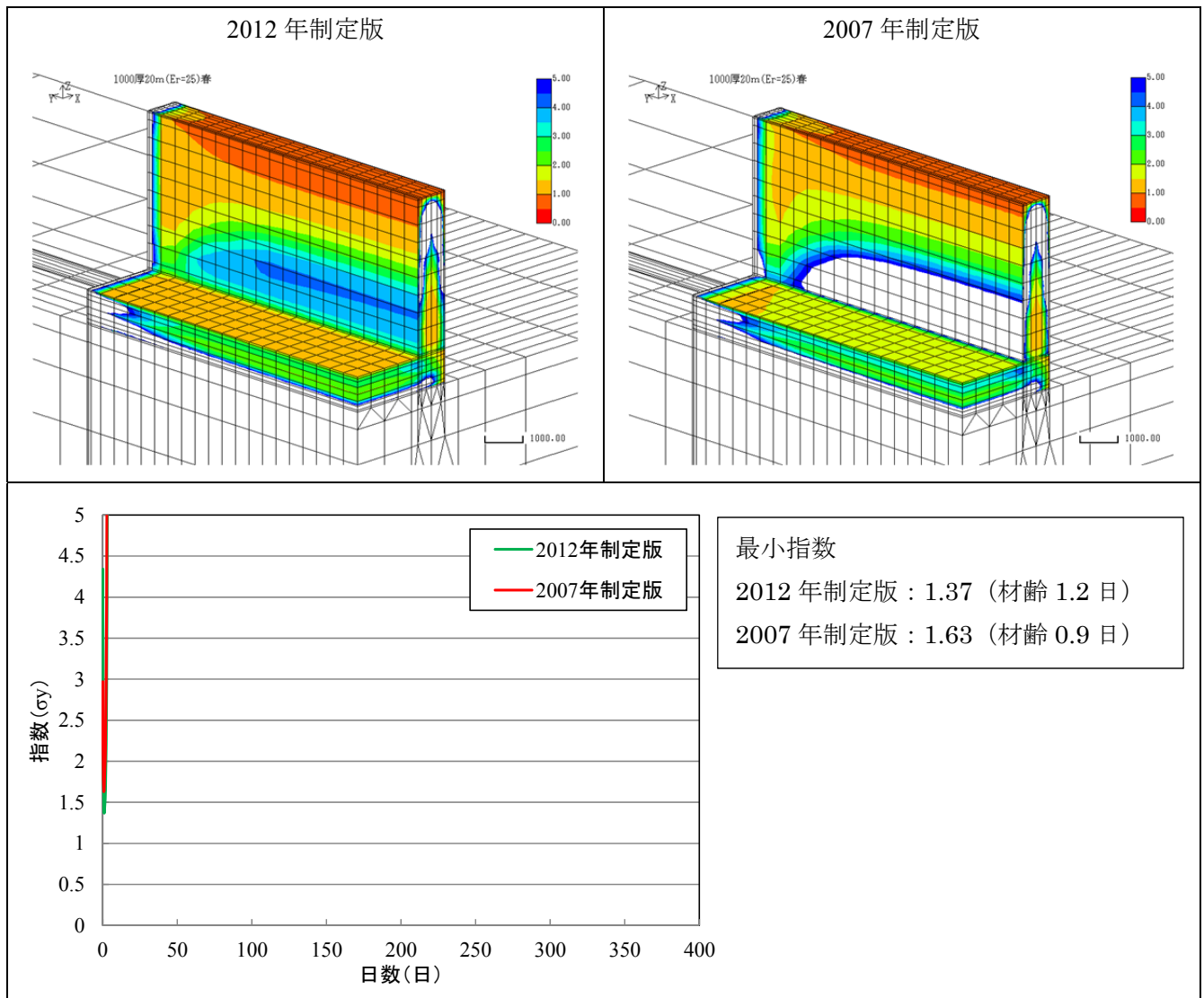


図-10 ひび割れ指数解析結果

付 録-3 長スパン構造物のひび割れ発生確率

1. スパン長の影響検討

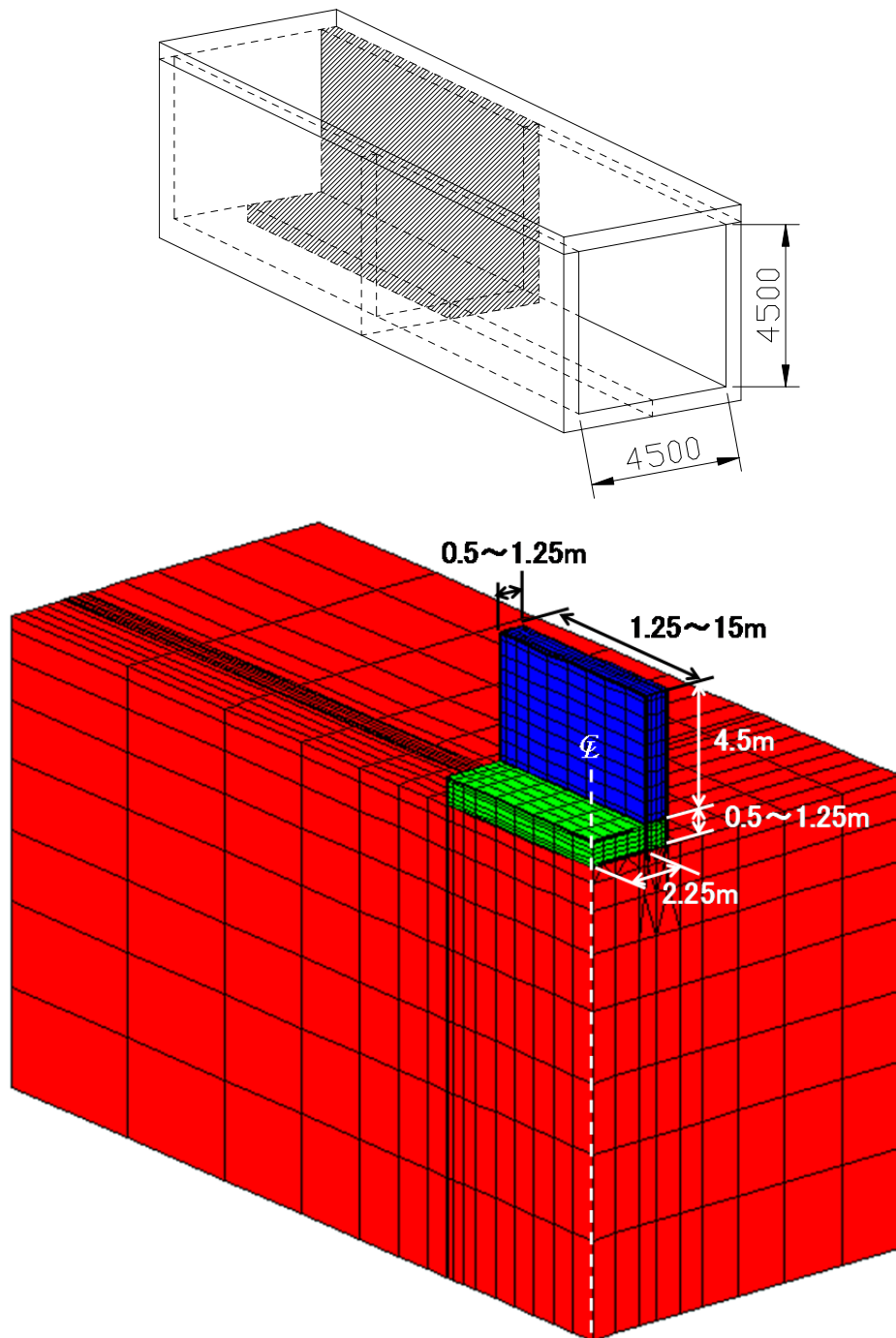
スパン長の影響を解析的に検討するために、一般的なボックスカルバートを考え、スパンを変えた解析を実施した。一般的なボックスカルバートは、「建設省制定 土木構造物標準設計管理カード（平成 12 年 9 月発刊）土木構造物標準設計第 1 巻 側こう類・暗きょ類」の内空幅と高さが 4.5m のケースを参考とし、壁厚、スパン長の組合せを表-1 のとおりとして解析ケースを設定した。ただし、底版厚さは、基本的に壁厚と同一であるが、標準設計に準じて壁厚 0.75m の場合のみ底版厚さは 1.0m で相違している。

表-1 解析ケース

壁厚 (m)	スパン長 (m)
0.5	10
	15
	20
0.56	10
	15
	20
	30
0.6	10
	15
	20
	30
0.75	5
	6
	7
	7.5
	10
	15
	20
1	3
	4
	5
	10
	12.5
	15
	20
1.25	2.5
	2.8
	3
	4
	10
	15
	20

2. 解析モデル

解析モデルは、ボックスカルバートの 1/4 部分を対象としてモデル化した。解析モデルを図-1 に、リフト割を図-2 に示す。



部 位		モデル色	打設高さ	幅	スパン長
1 リフト	底版コンクリート		0.5～1.25m	3.25m	1.25～15m
2 リフト	側壁コンクリート		4.5m	0.5～1.25m	
地盤			—		

図-1 解析モデル

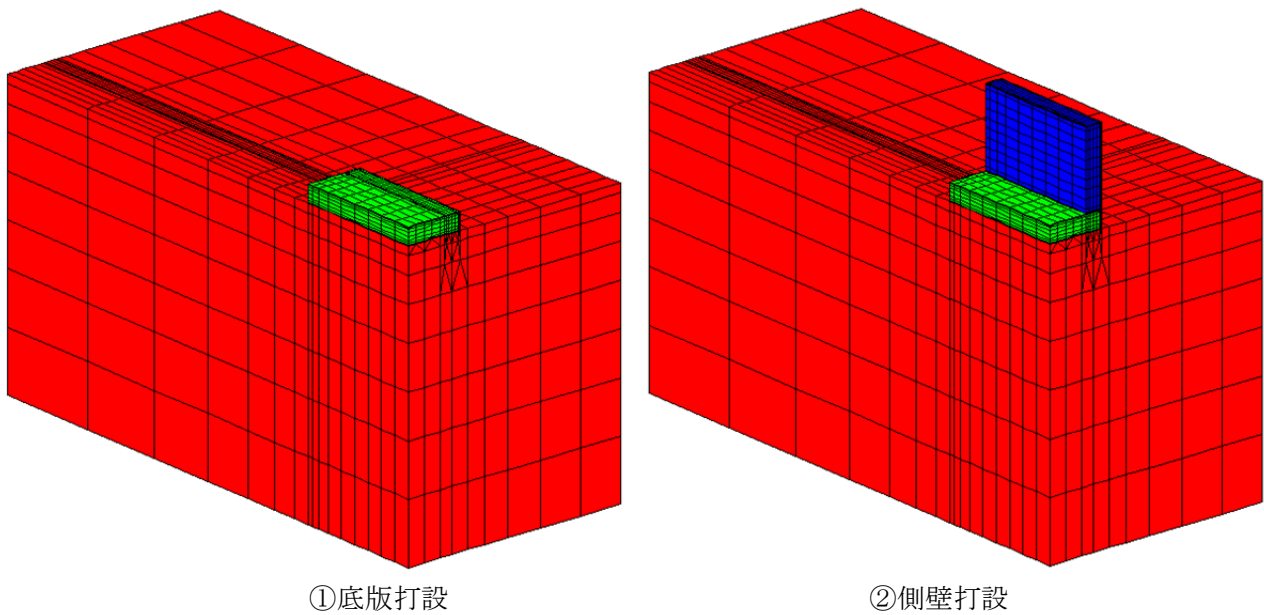


図-2 リフト割り

3. 解析条件

3.1 温度解析条件

温度解析条件を表-2 に、外気温入力データを図-3 に示す。解析期間は1年間とした。

表-2 温度解析条件

	底版	側壁	地盤	備考
W/C (%)	55.0		—	宇部三菱セメント技術資料 (2006) より
セメント種類	N		—	
セメント量 (kg/m ³)	296		—	
打設日	4/1	4/29	—	
外気温 (°C)	11.9	16.4	—	理科年表 東京
初期温度 (°C)	16.9	21.4	15.9	外気温+5°C
熱伝導率 (W/m°C)	2.7		3.45	2012 年コ示より
比熱 (J/g°C)	1.15		0.79	
密度 (kg/m ³)	2400		2650	2012 年コ示より
断熱温度上昇特性	$Q(t) = Q_{\infty} [1 - \exp\{-r(t - t_{0,Q})\}]$		—	2012 年コ示より
	Q_{∞}	50.0 49.8	—	
	γ	1.077 1.314	—	
	t_0	0.213 0.156	—	

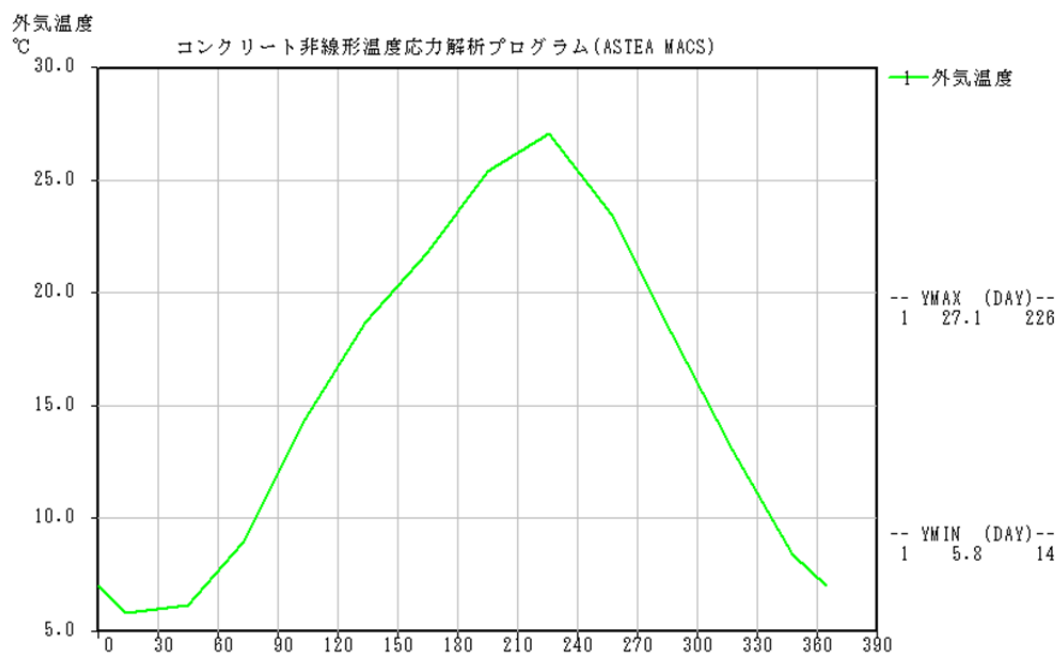


図-3 外気温入力データ

熱伝達境界の設定値を表-3 に示す。熱伝達係数の設定は、解析期間中一定とした。

表-3 熱伝達境界の設定値

部位		熱伝達係数 ($\text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$)
地盤		14.0 (外気)
底版	養生 (上面)	14.0 (散水)
	型枠	14.0 (鋼製型枠)
側壁	養生 (上面)	14.0 (外気)
	型枠	14.0 (鋼製型枠)

3.2 応力解析条件

応力解析条件を表-4 に示す.

表-4 応力解析条件

項目	底版・側壁	地盤	備考
圧縮強度 (N/mm ²)	$\sigma_3 : 16.6$ $\sigma_7 : 26.5$ $\sigma_{28} : 35.7$ $\sigma_{56} : 37.7$ $\sigma_{91} : 39.5$	—	材齢直線補間 宇部三菱セメント技術資料 (2006) より
引張強度 (N/mm ²)	$f_t(t_e) = C_1 \times f'_c(t_e)^{C_2}$ $C_1:0.13, C_2:0.85$	—	2012 年コ示より
ヤング係数 (N/mm ²)	$E_c(t_e) = C_3 \times f'_c(t_e)^{C_4}$ $C_3:6300, C_4:0.45$	25	底版, 側壁 : 2012 年コ示より
有効ヤング係数	$E_e(t_e) = \phi(t_e) \times E_c(t_e)$ $\phi(t_e)$: 最高温度に達するまでの有効材齢 : 0.42 最高温度に達する有効材齢+1 有効材齢以降:0.65	—	2012 年コ示より
ポアソン比	0.2	0.3	2012 年コ示, マスコン指針より
線膨張係数 ($\mu / ^\circ\text{C}$)	10		2012 年コ示, マスコン指針より

4. 解析結果

解析結果の温度, 応力, 指数について, 経験値の分布図と経時変化図を以降に示す. 経時変化図を出力した着目点は, 図-4 に示すとおり, 主応力方向で一番厳しい点 (ひび割れ指数が最小となる箇所) とした.

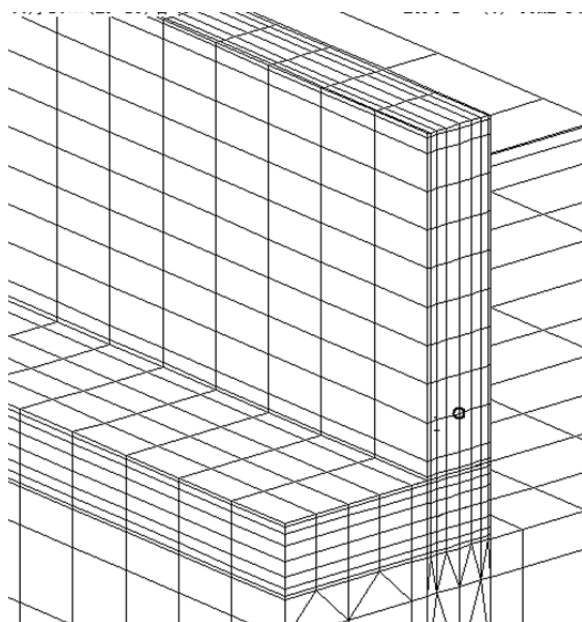
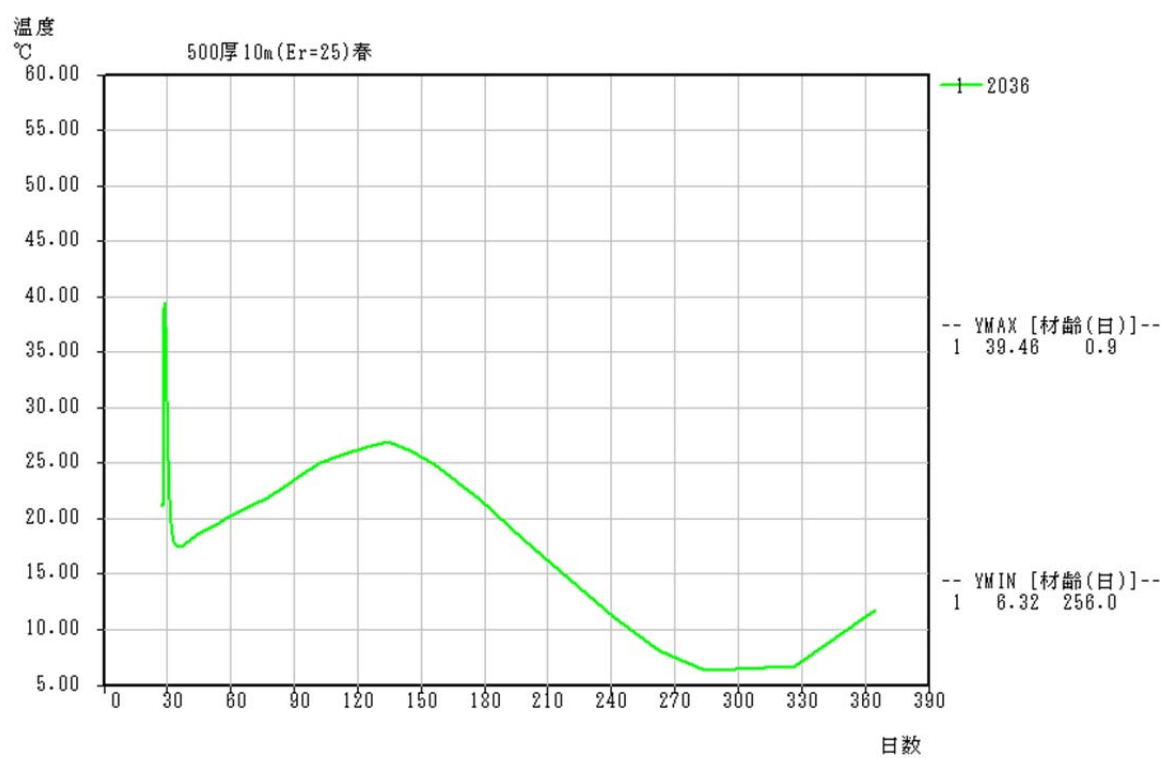
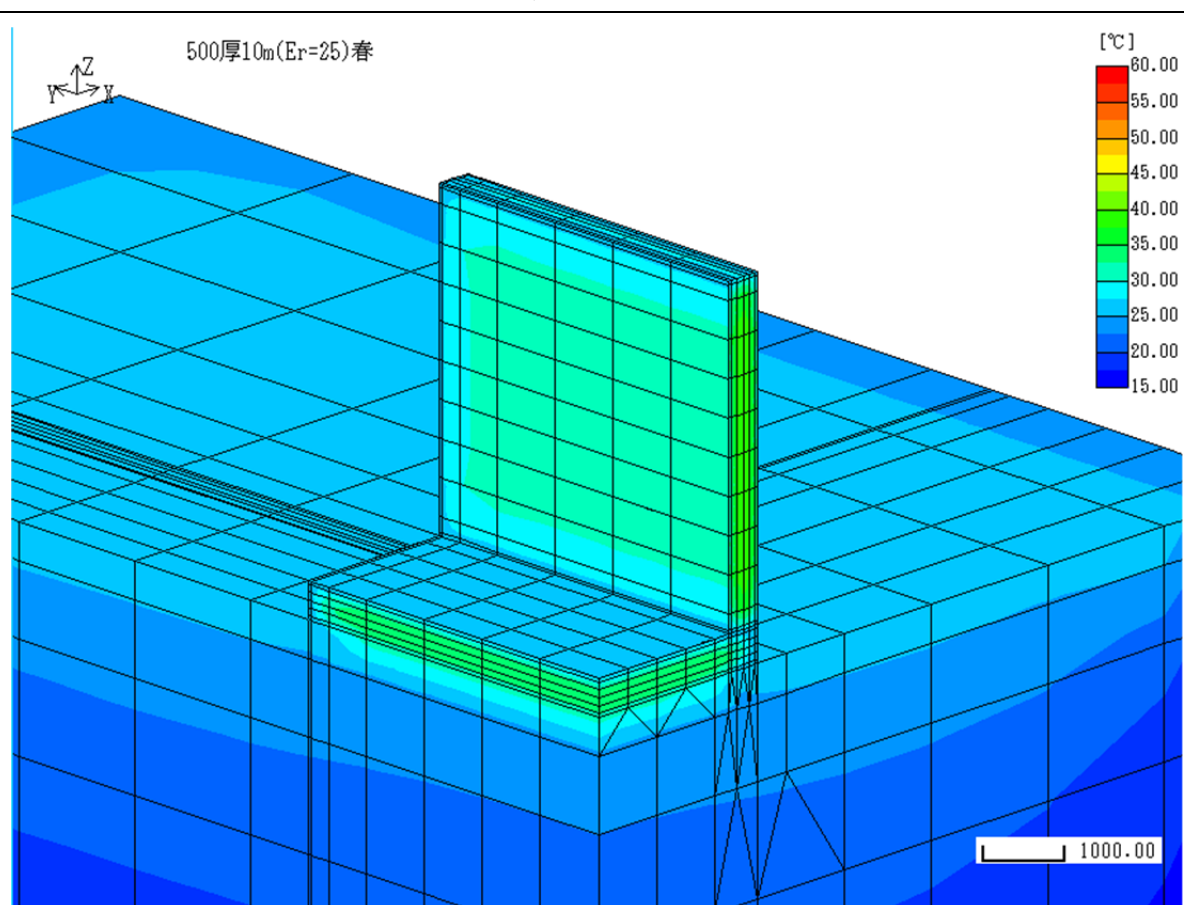
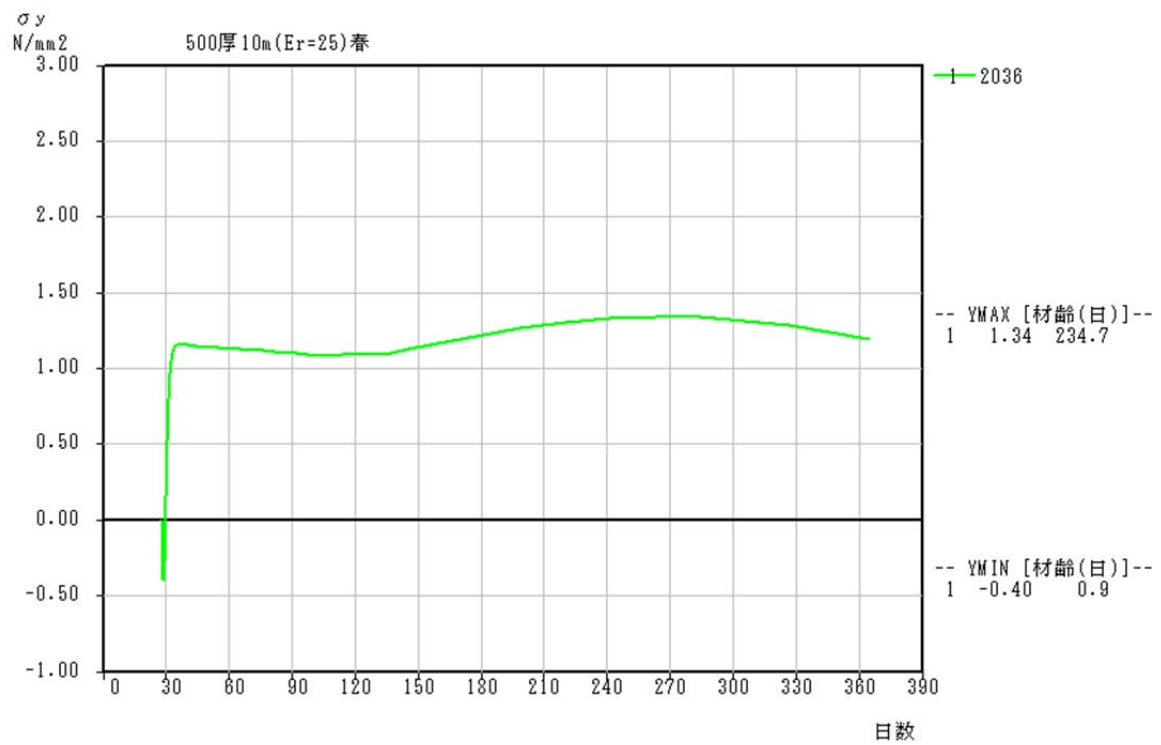
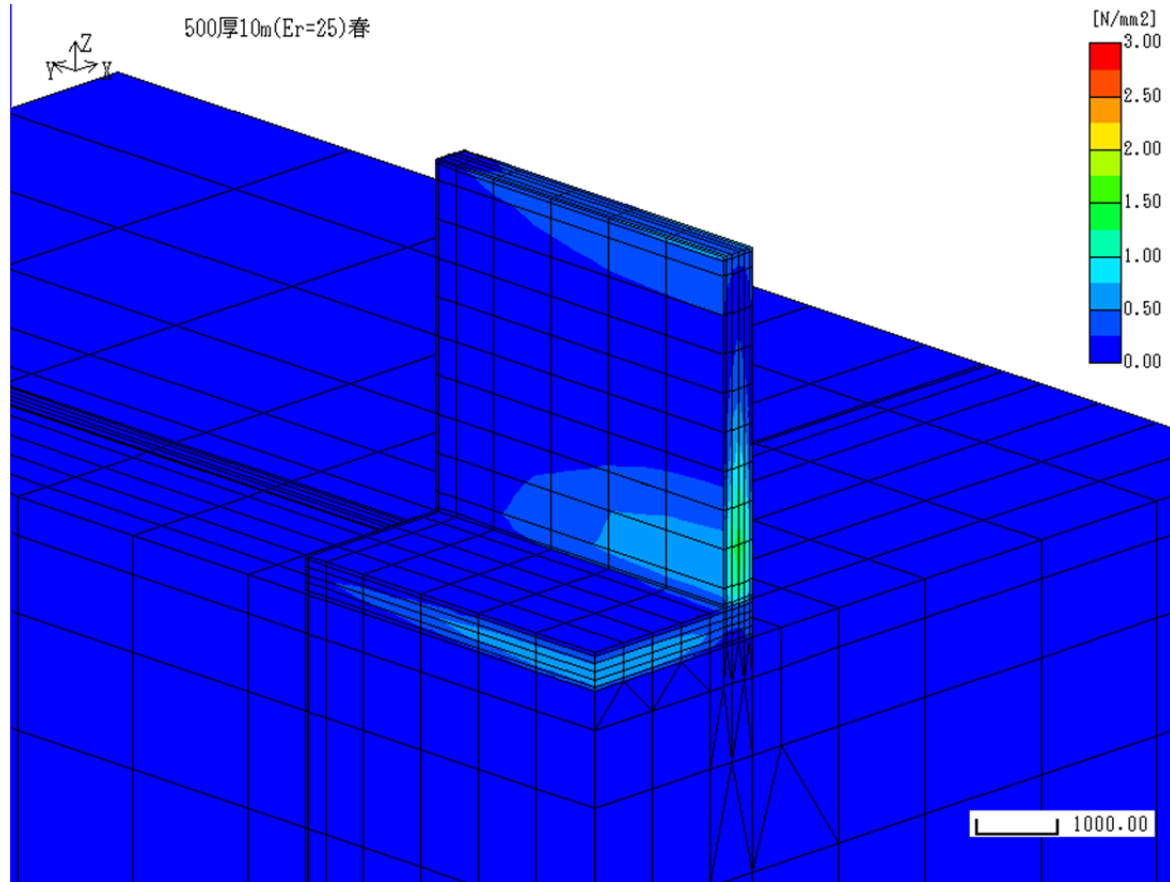


図-4 経時変化図の出力点

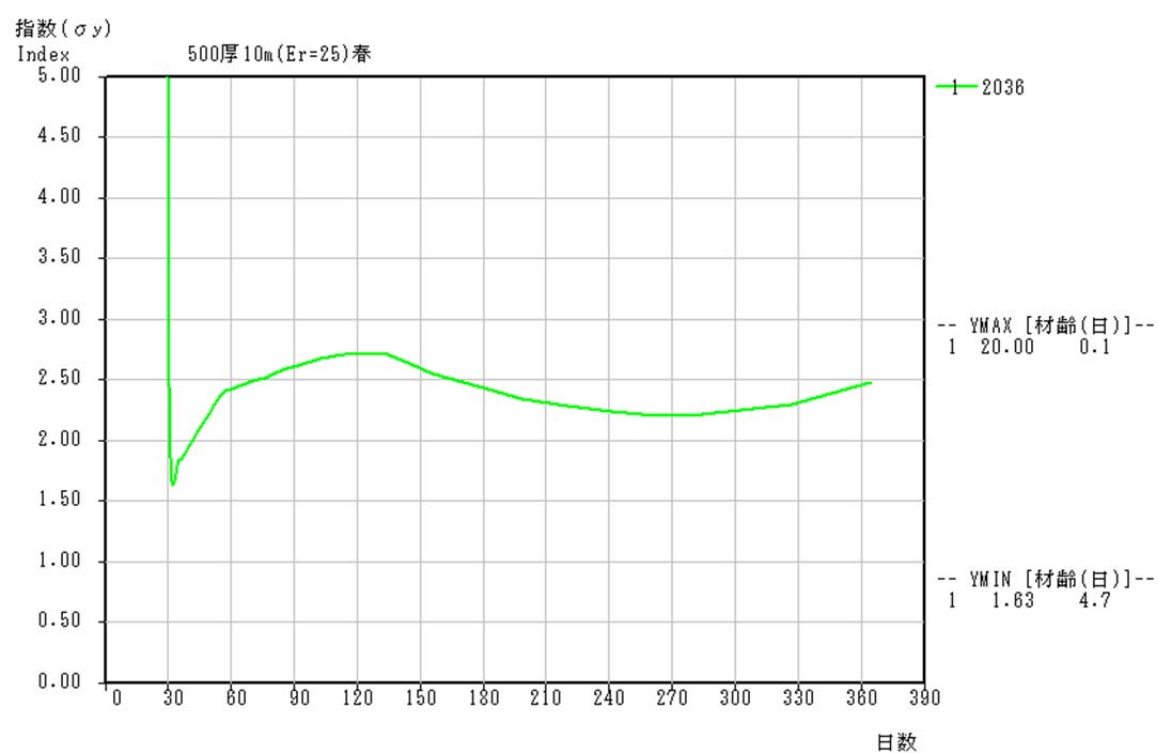
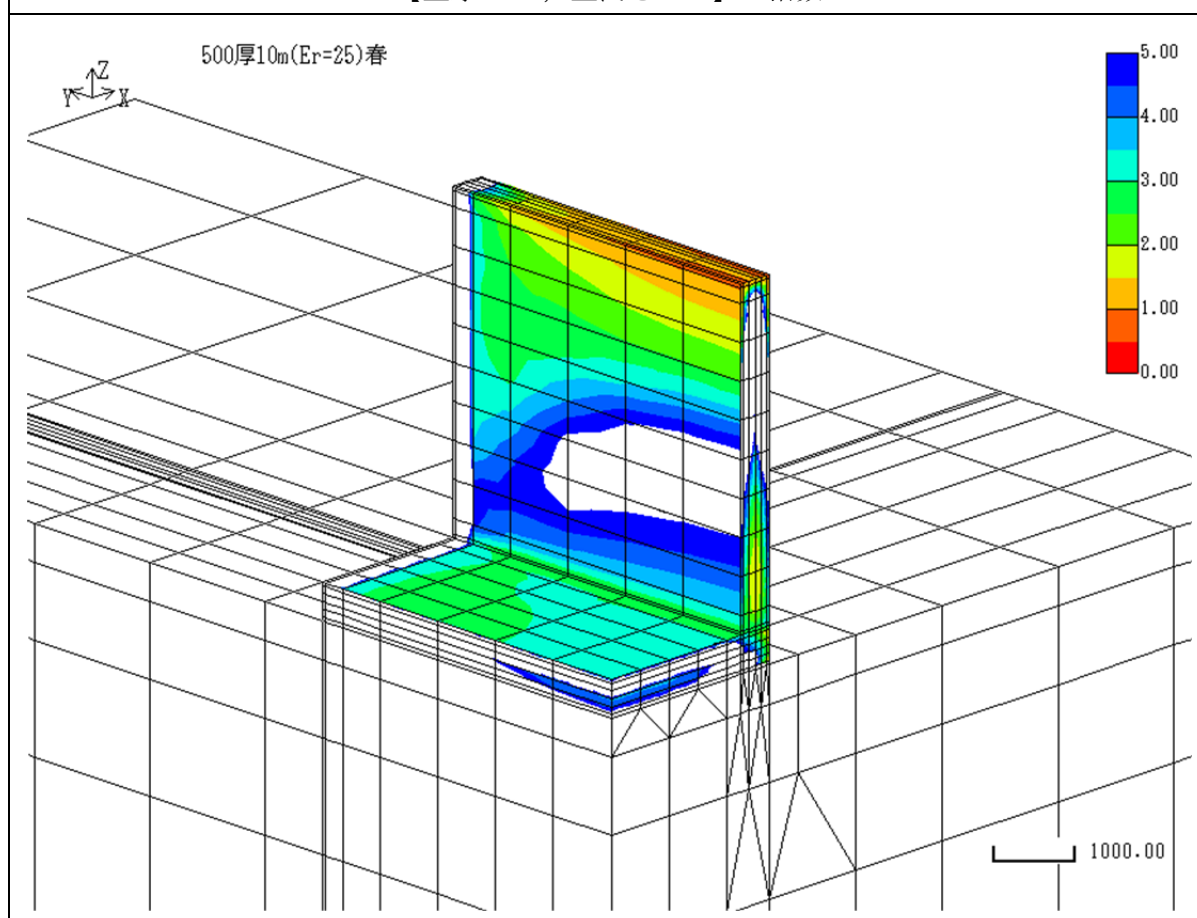
【壁厚 0.5m, 壁長さ 10m】 温度



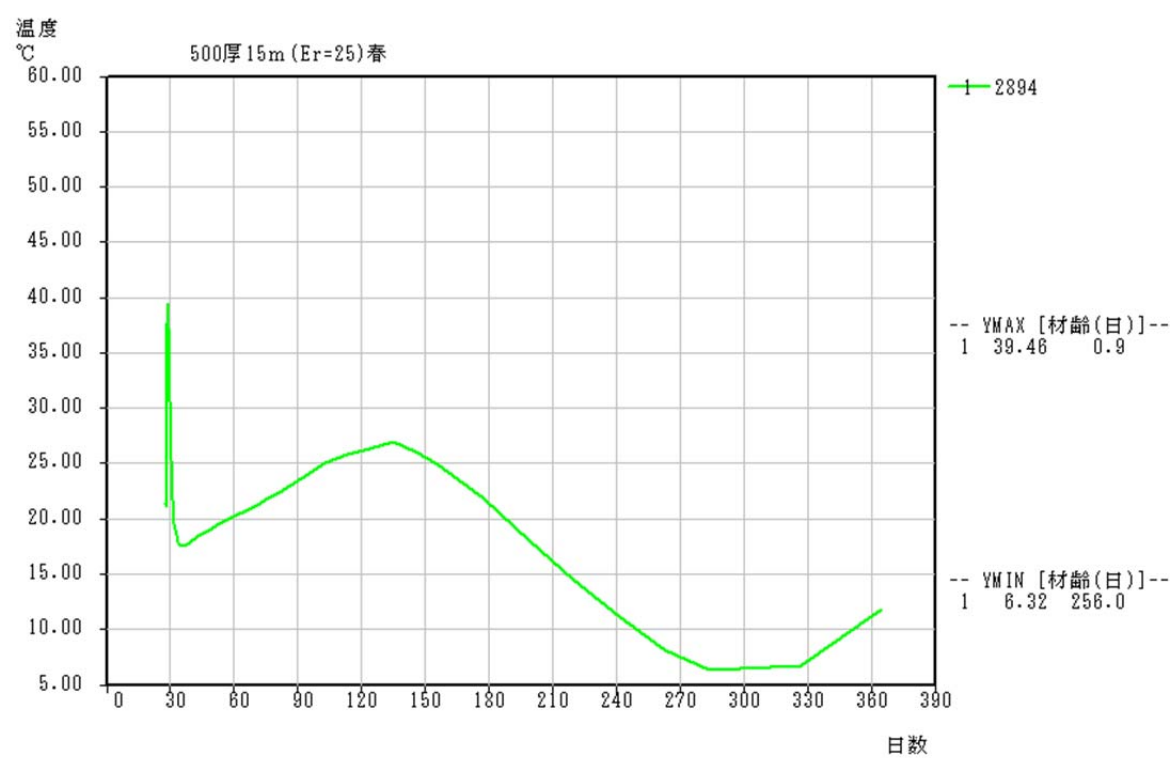
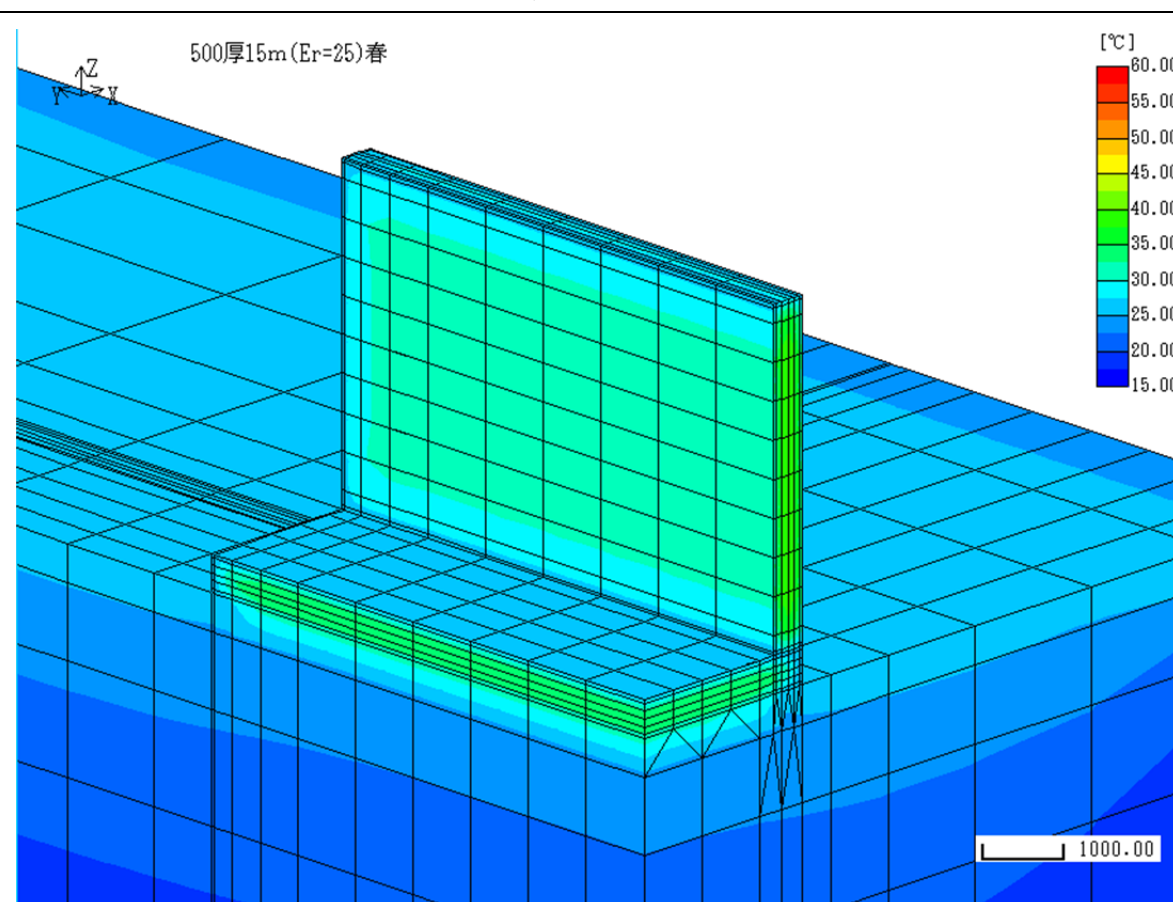
【壁厚 0.5m, 壁長さ 10m】 応力



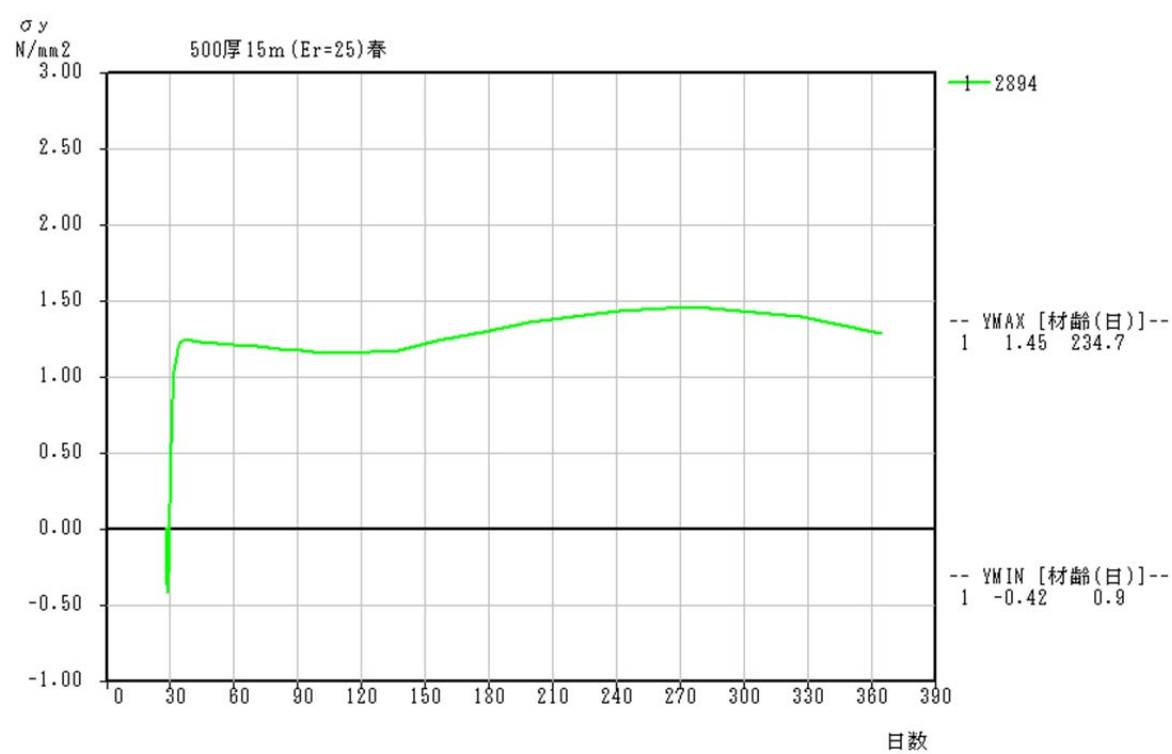
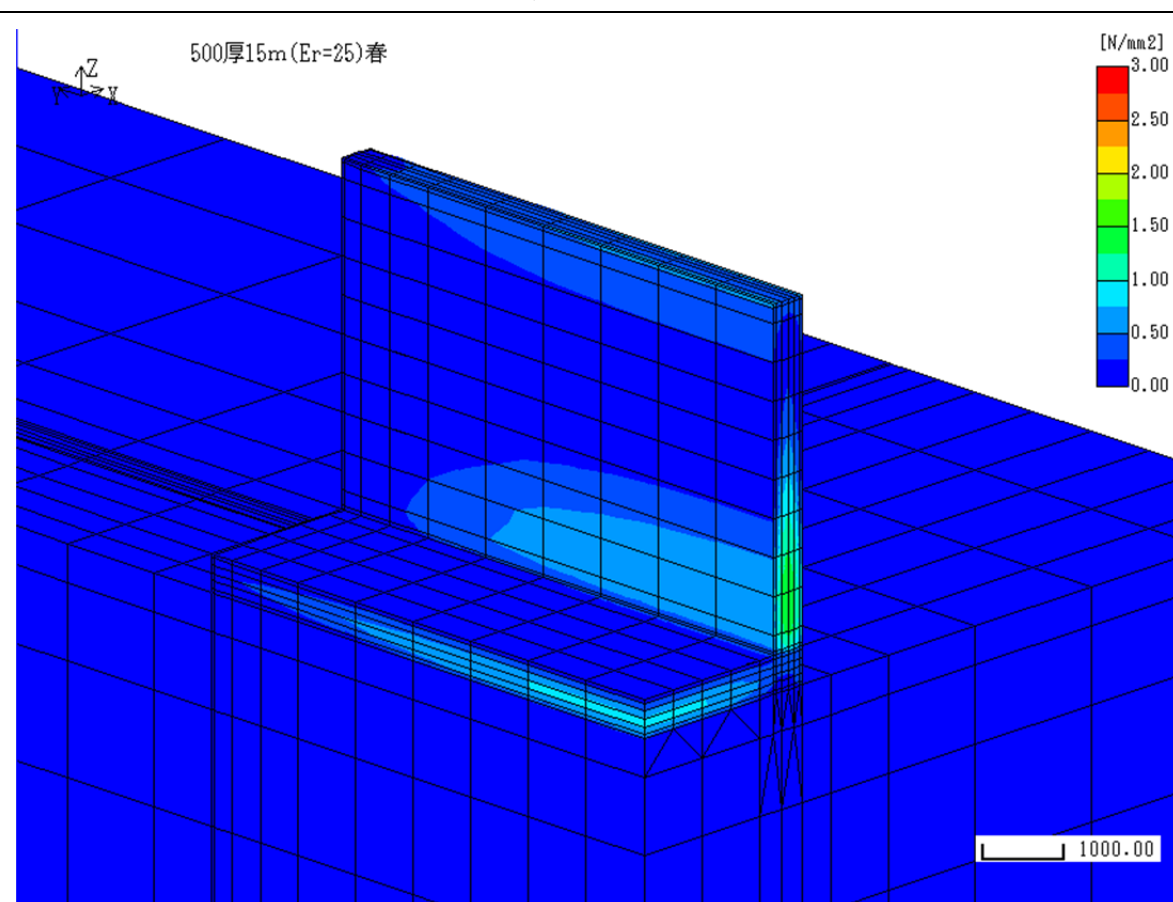
【壁厚 0.5m, 壁長さ 10m】 指数



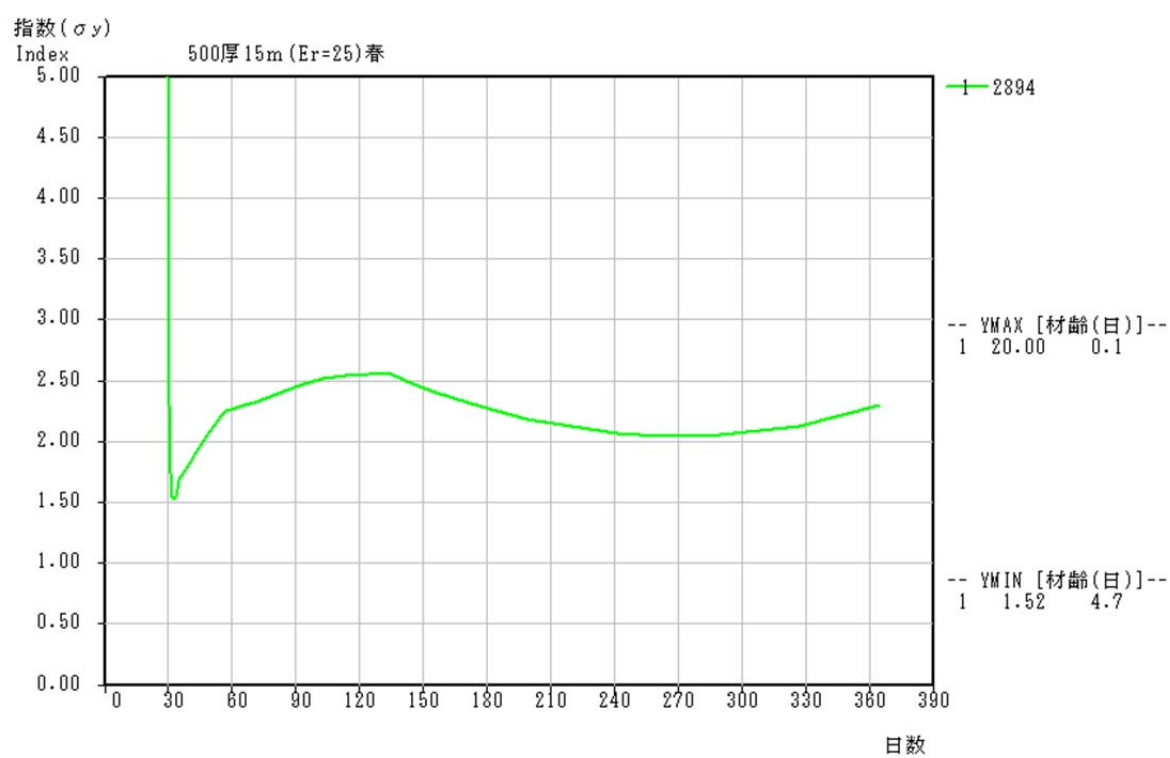
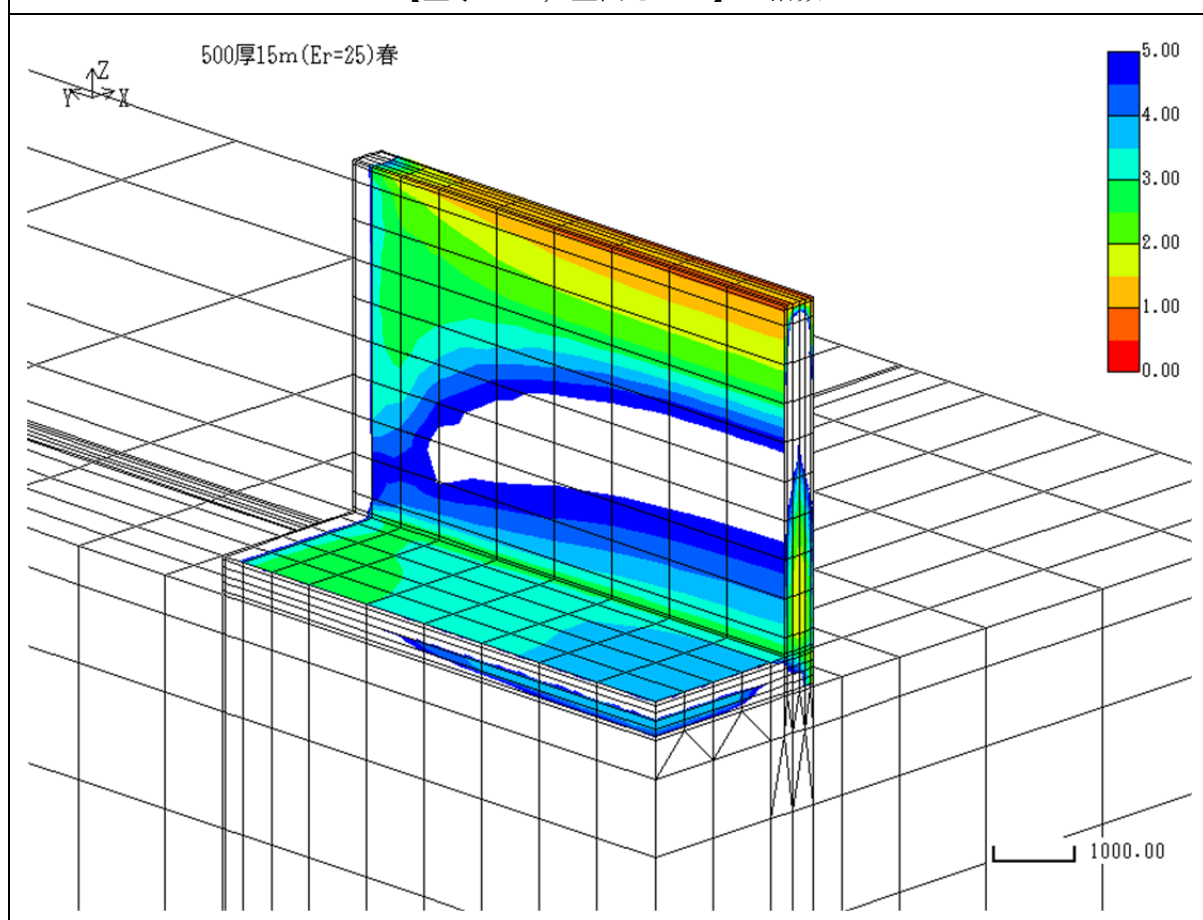
【壁厚 0.5m, 壁長さ 15m】 温度



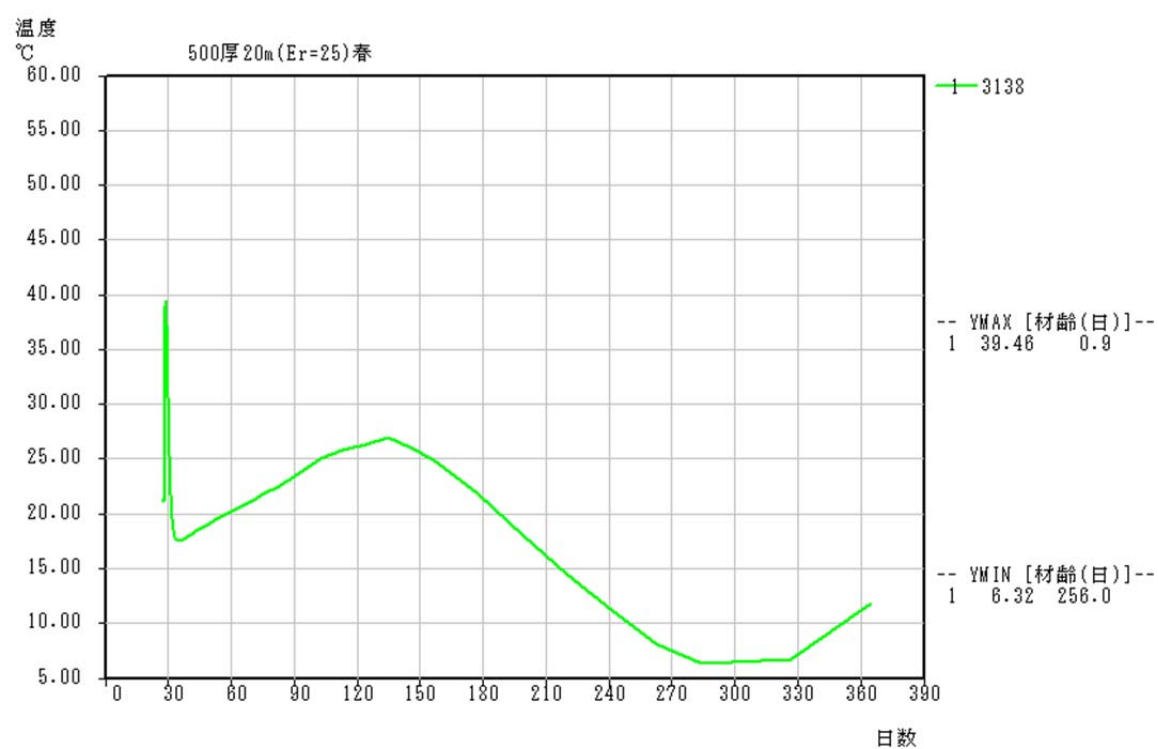
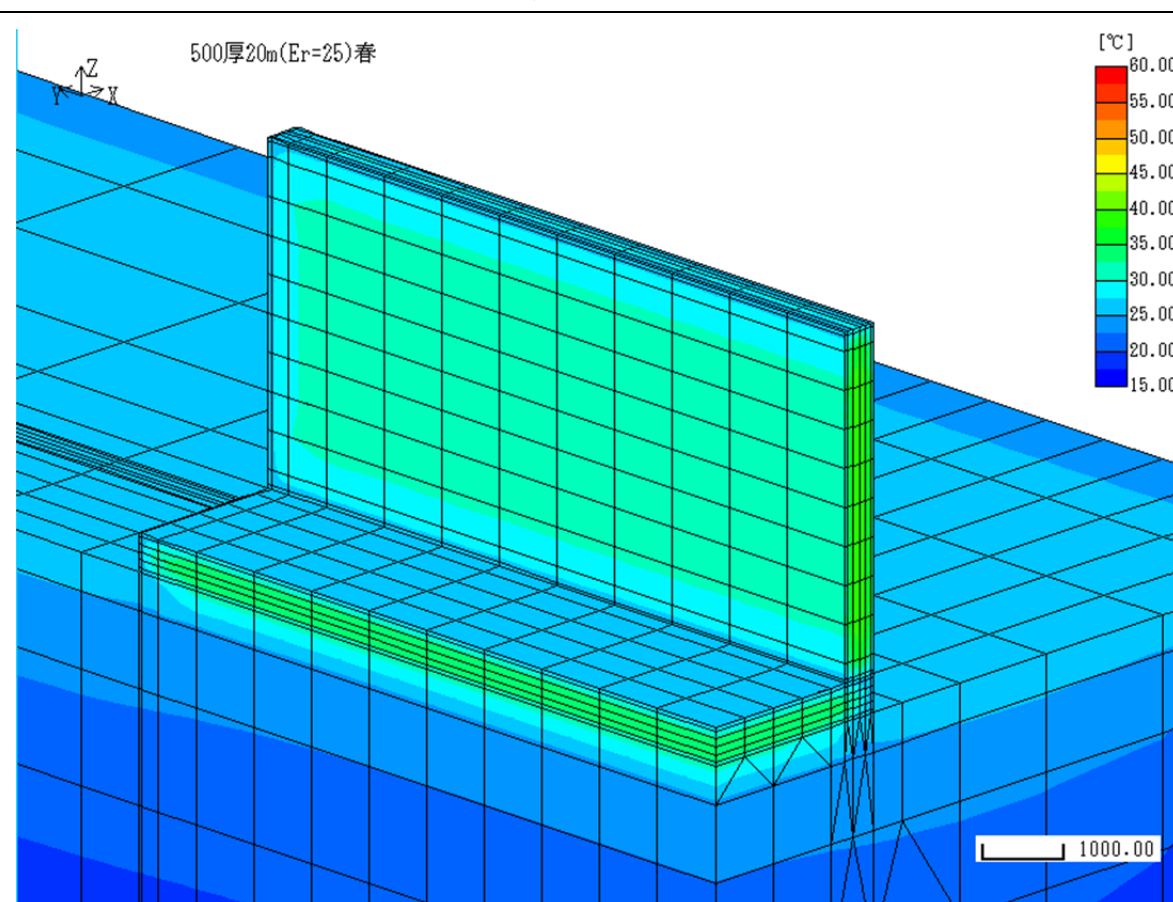
【壁厚 0.5m, 壁長さ 15m】 応力



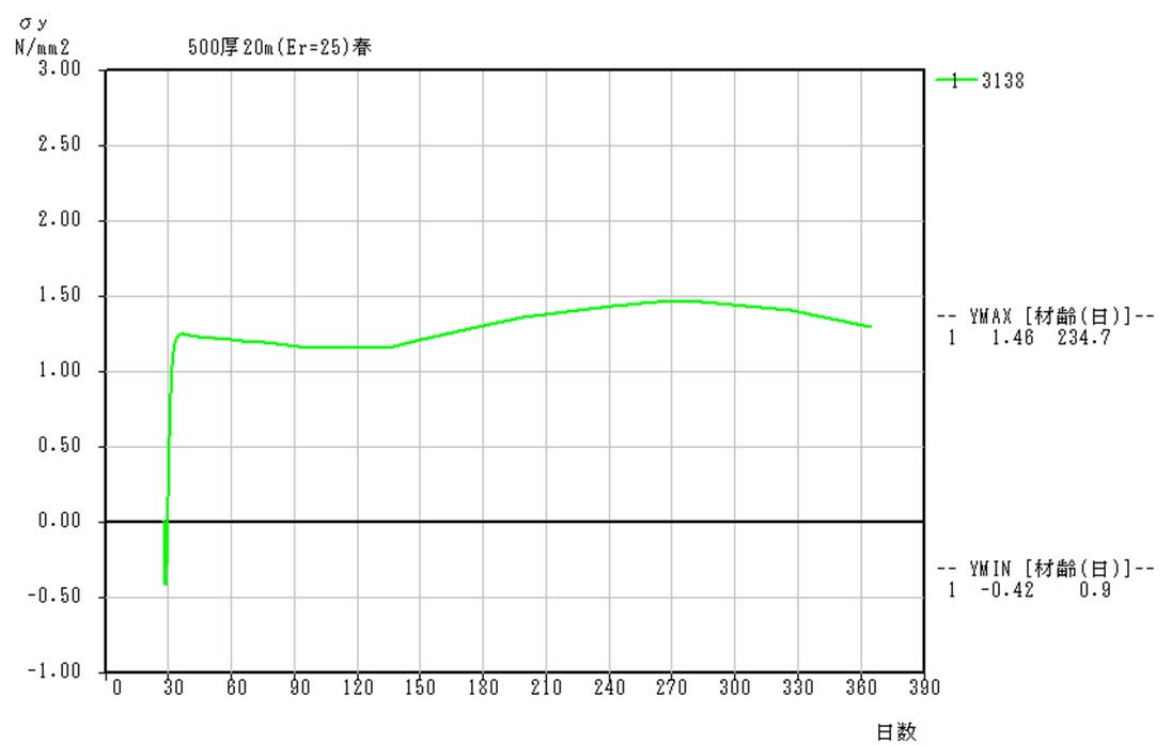
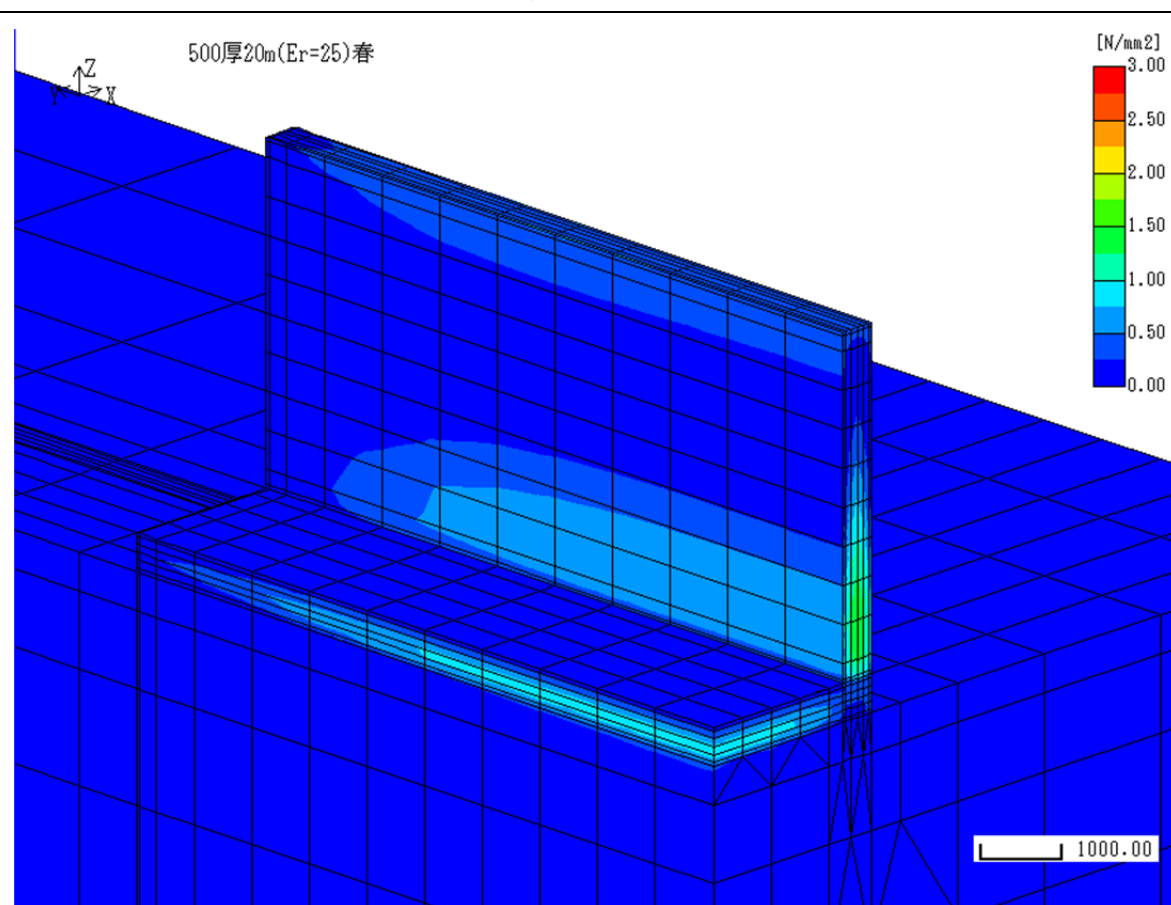
【壁厚 0.5m, 壁長さ 15m】 指数



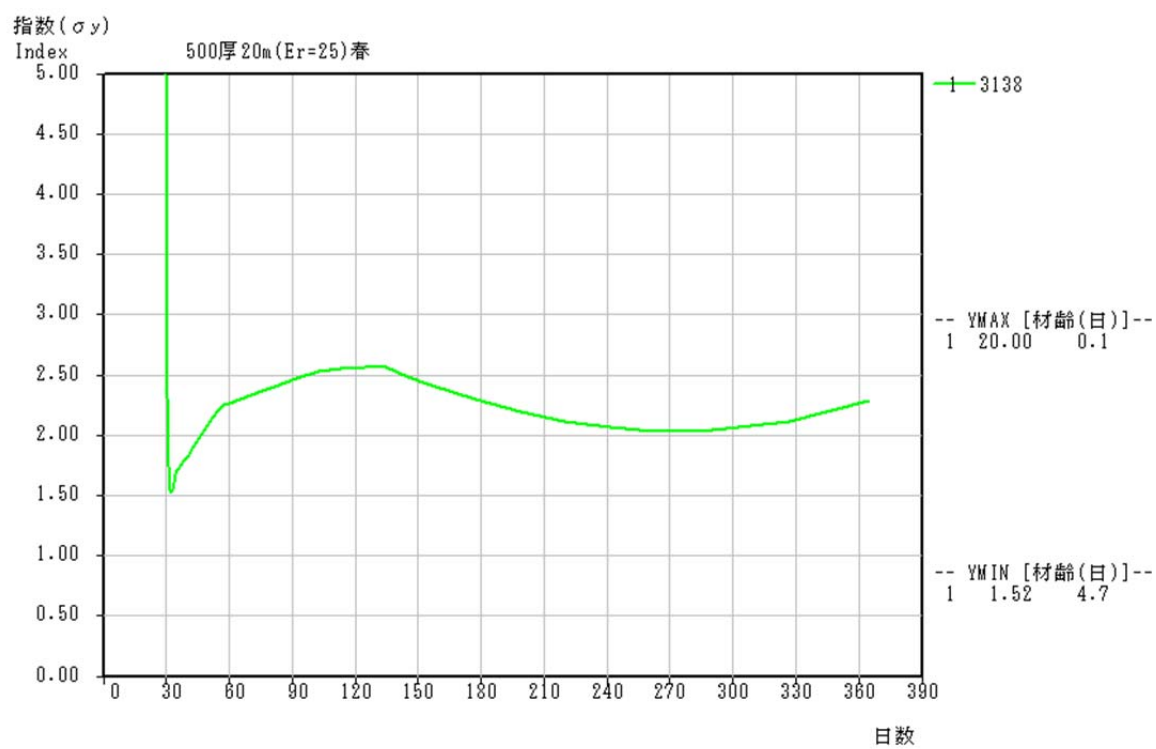
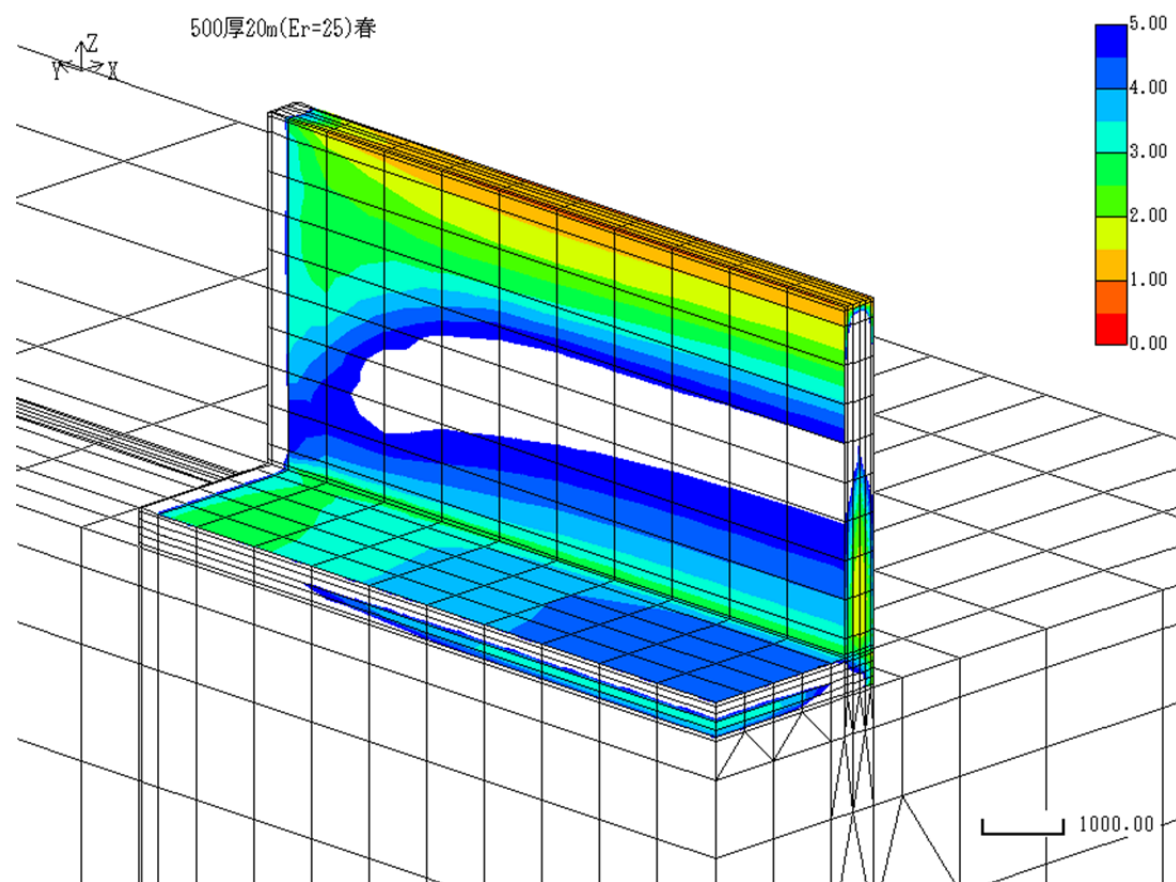
【壁厚 0.5m, 壁長さ 20m】 温度



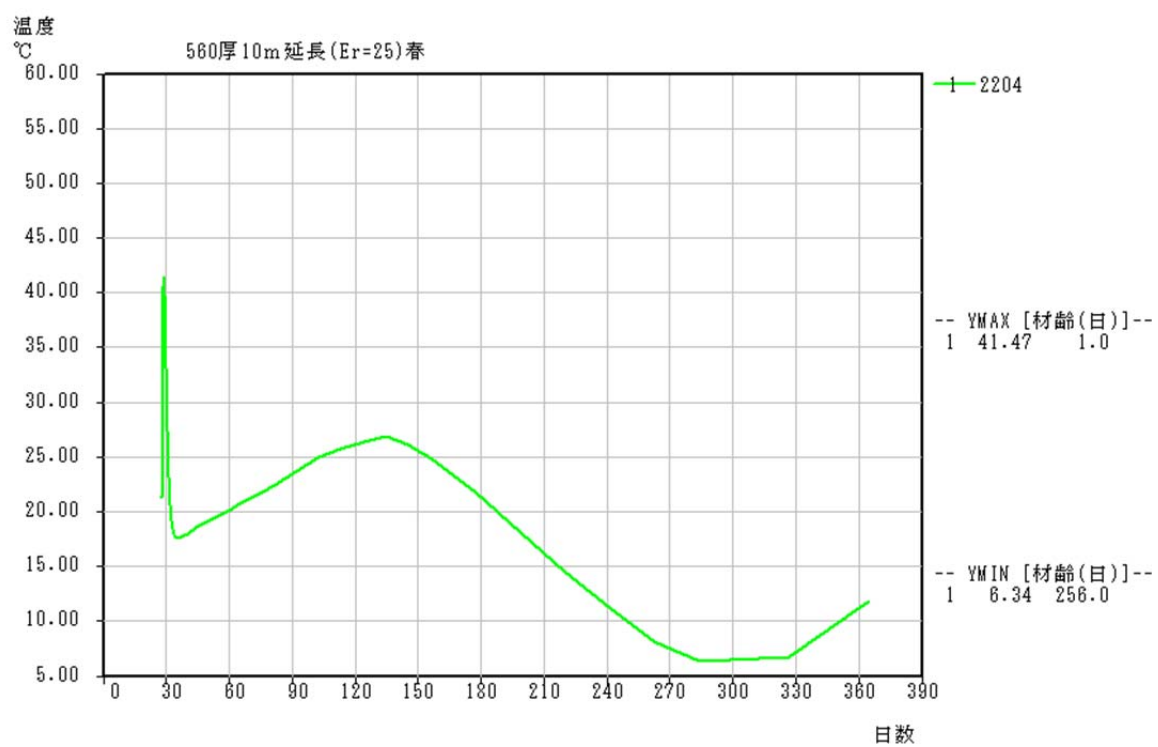
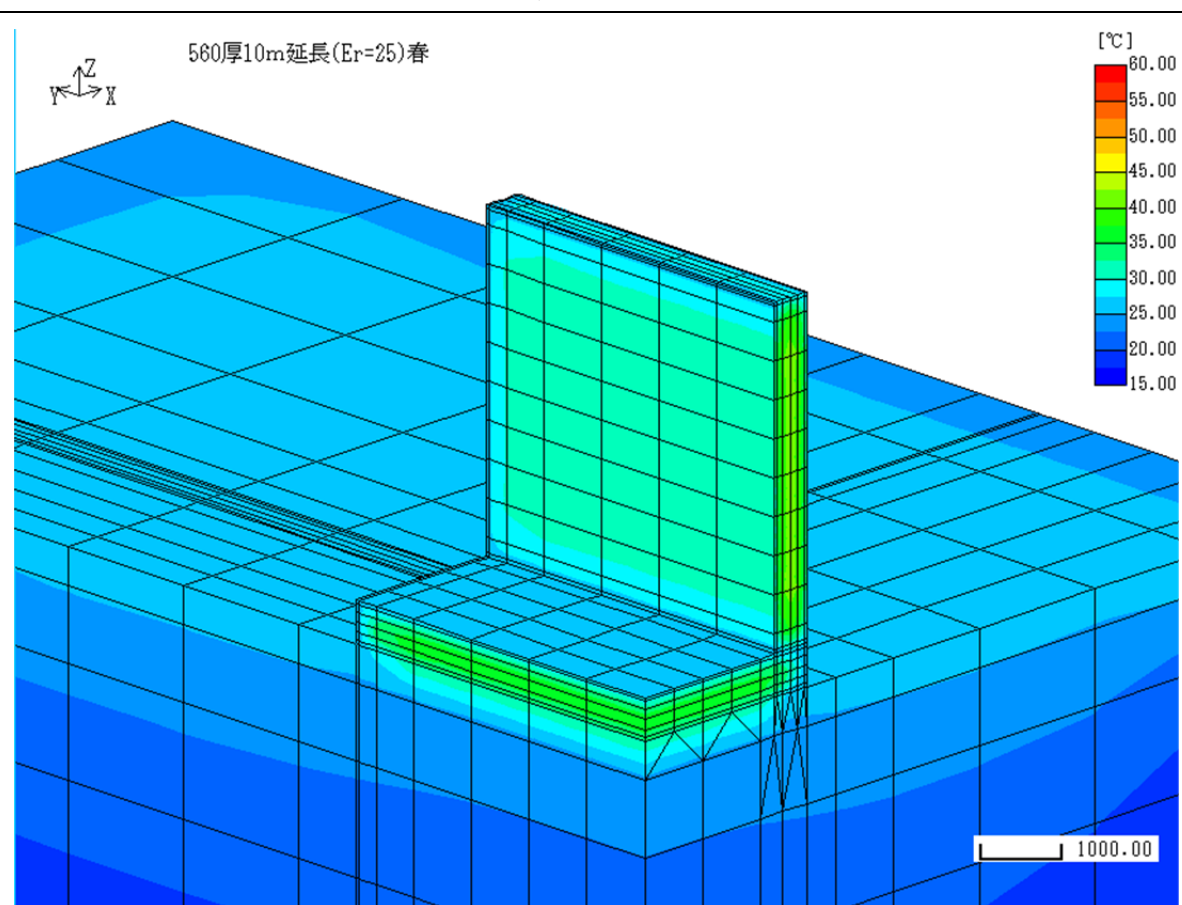
【壁厚 0.5m, 壁長さ 20m】 応力



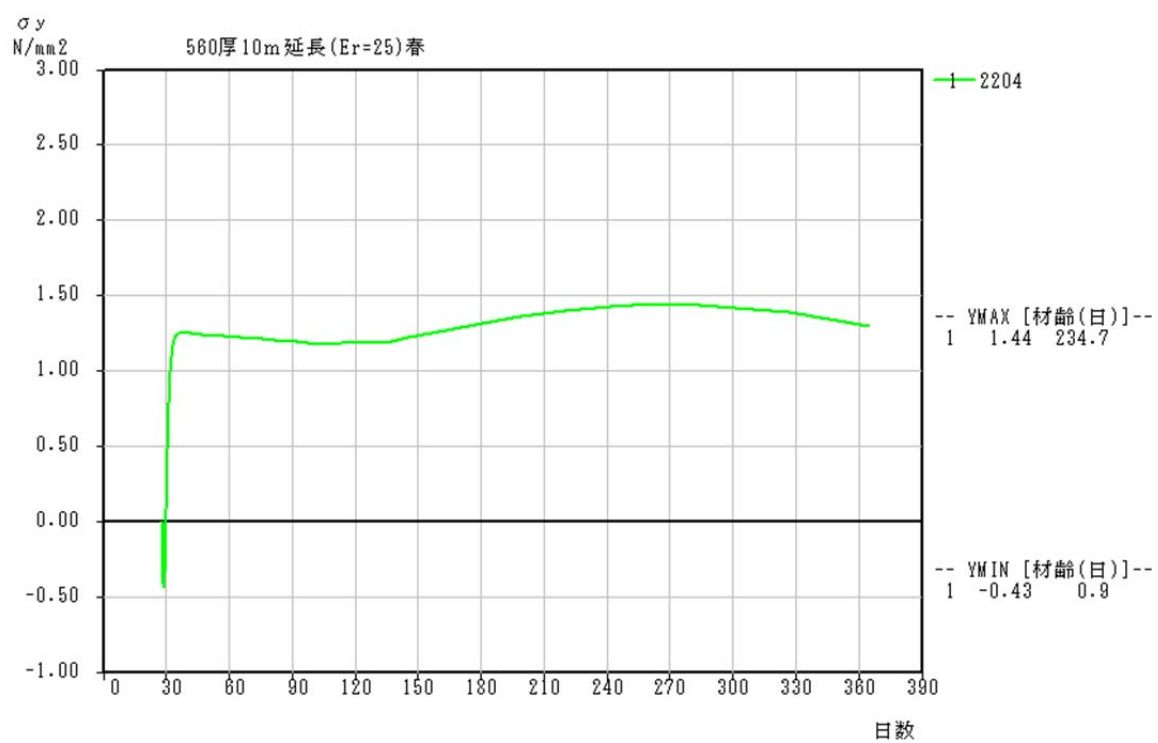
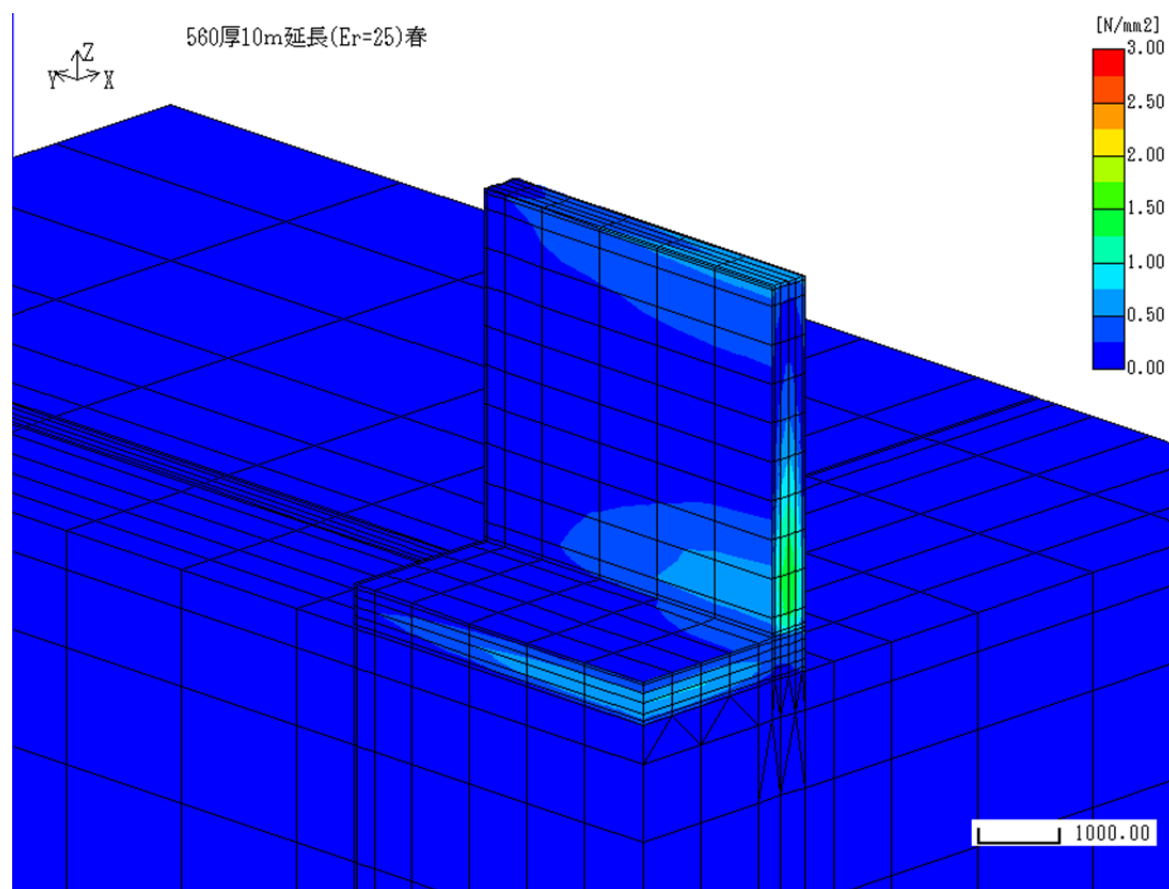
【壁厚 0.5m, 壁長さ 20m】 指数



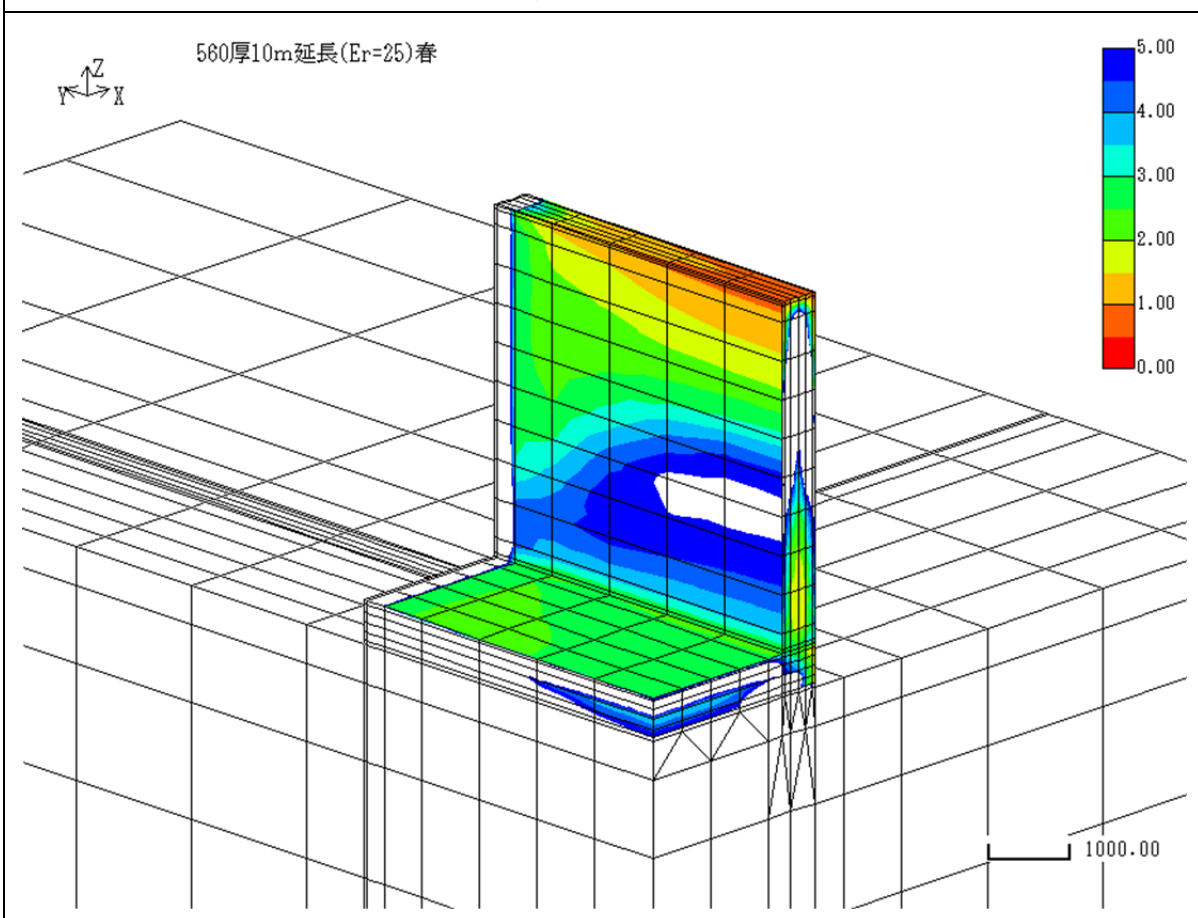
【壁厚 0.56m, 壁長さ 10m】 温度



【壁厚 0.56m, 壁長さ 10m】 応力



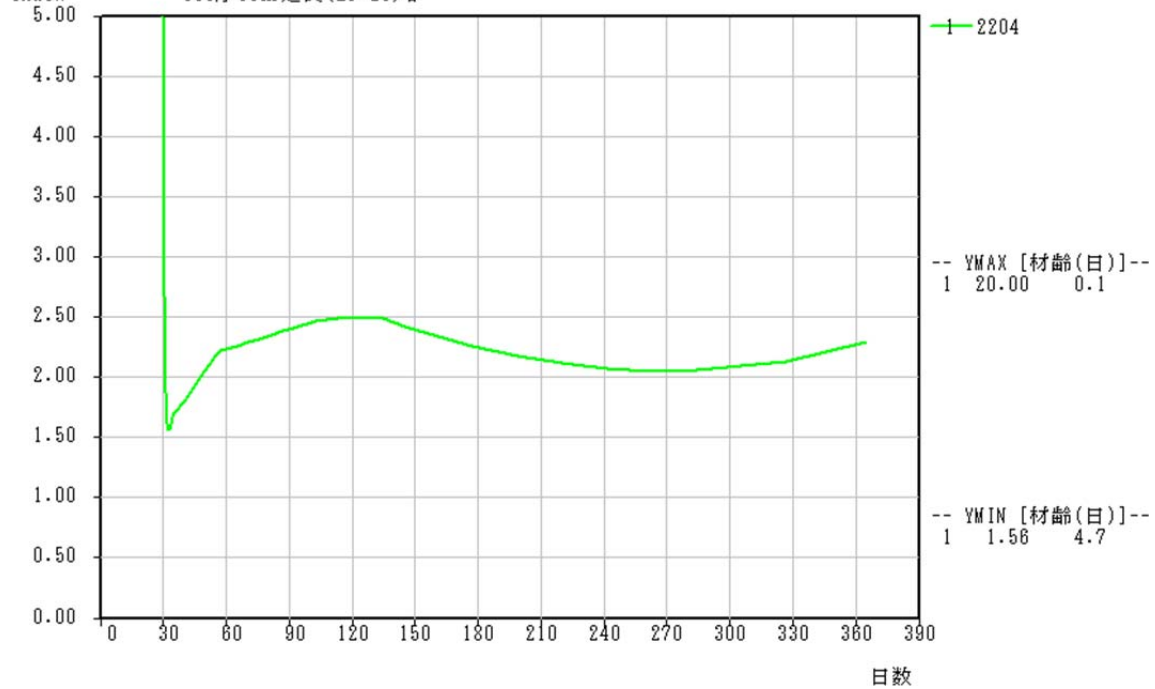
【壁厚 0.56, 壁長さ 10m】 指数



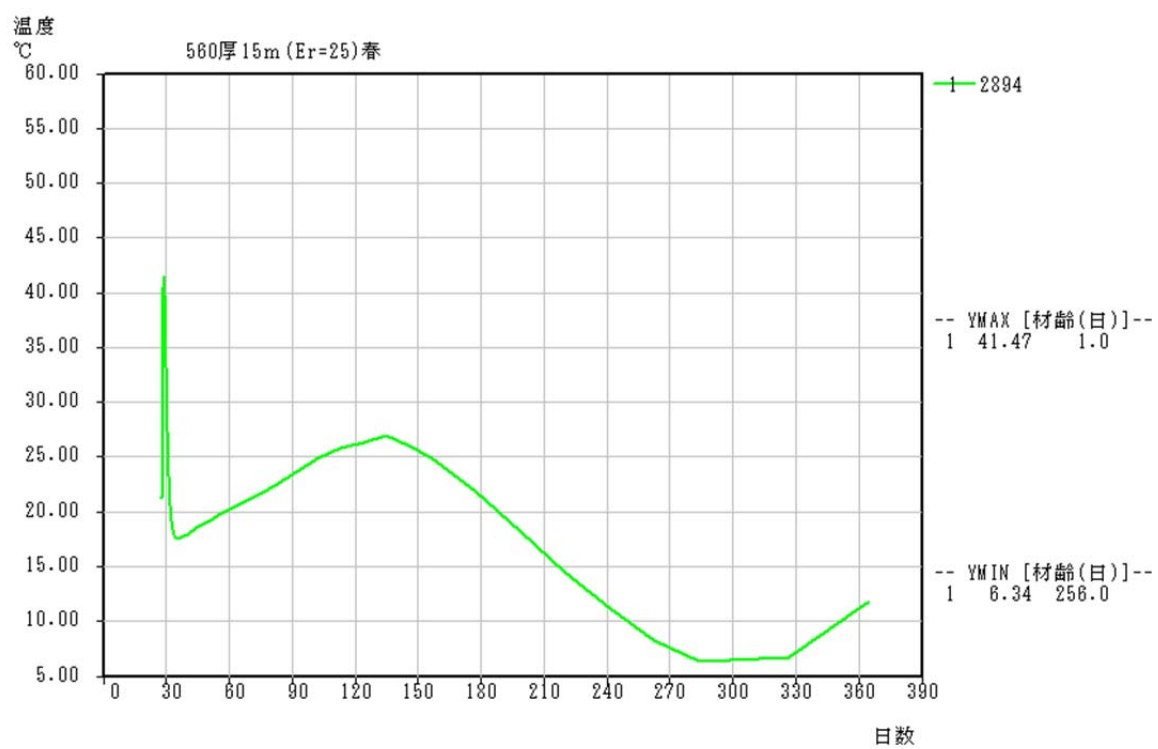
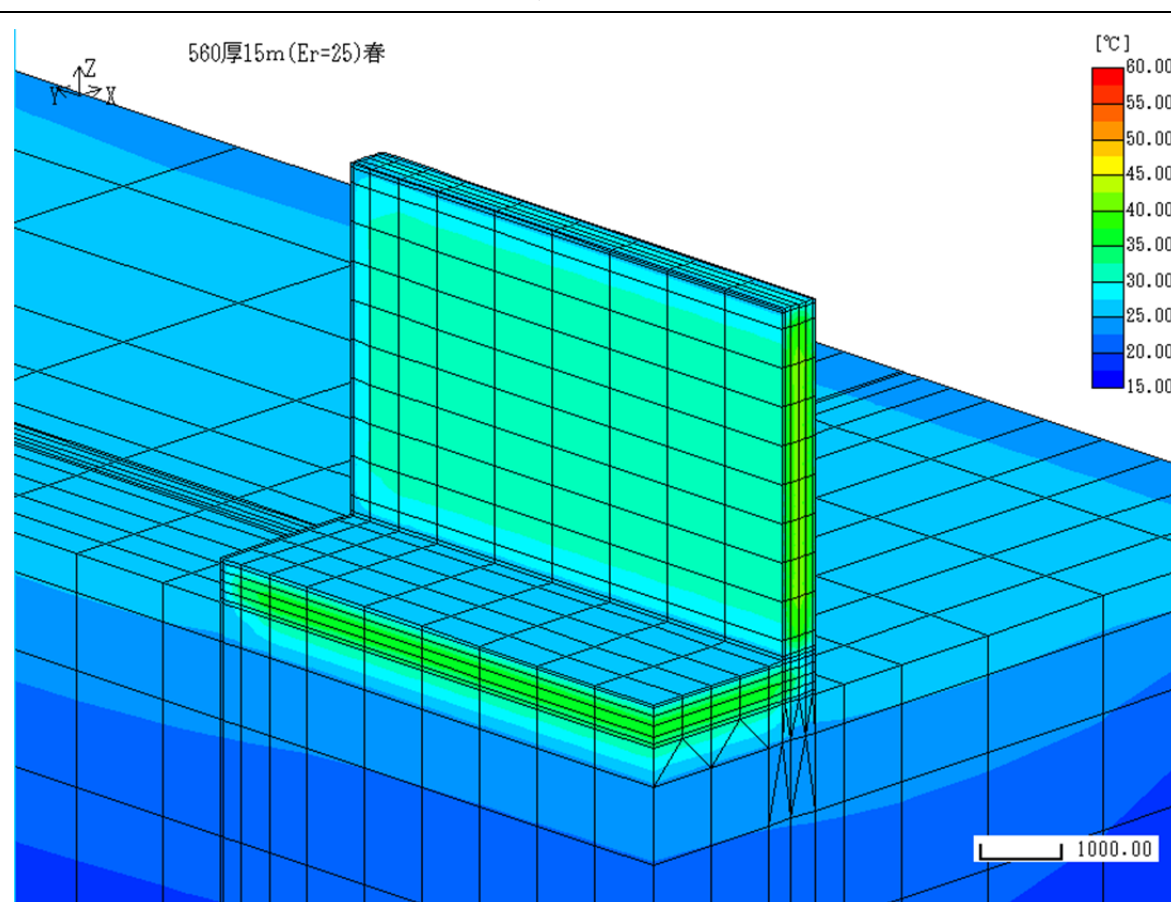
指数 (σ_y)

Index

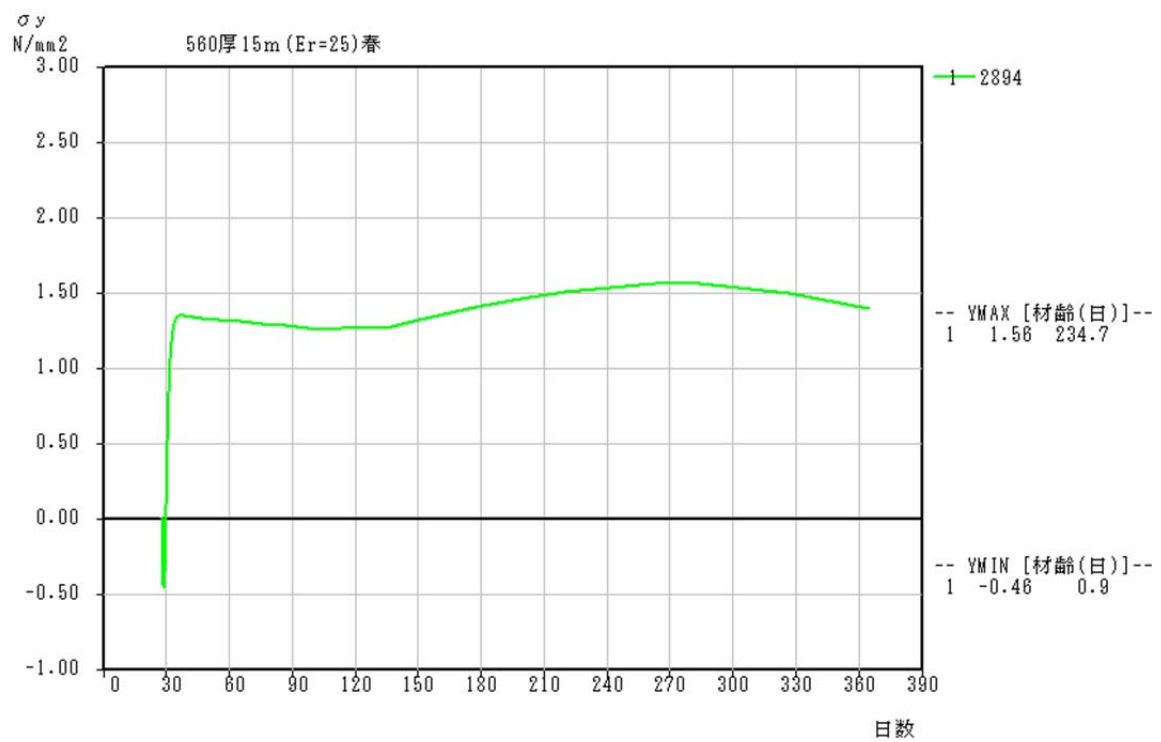
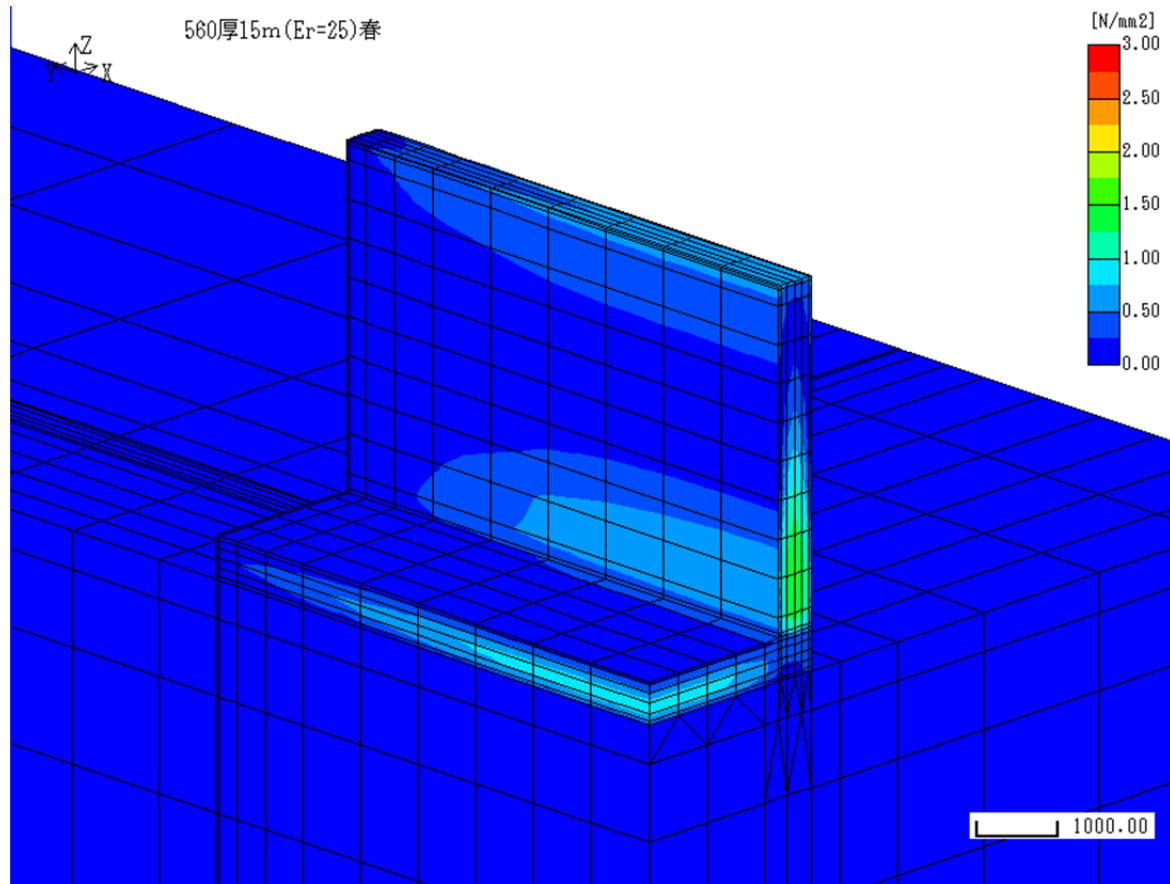
560厚10m延長(Er=25)春



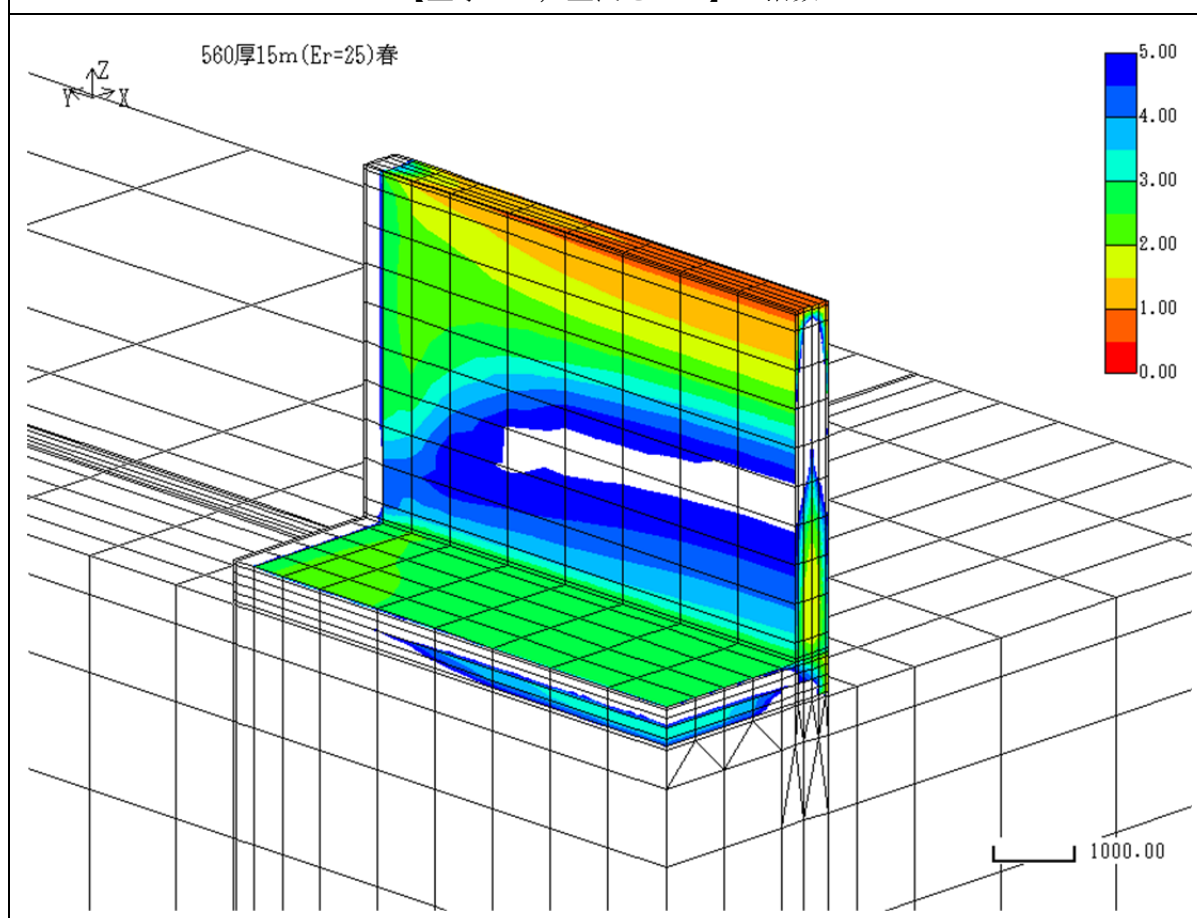
【壁厚 0.56m, 壁長さ 15m】 温度



【壁厚 0.56m, 壁長さ 15m】 応力



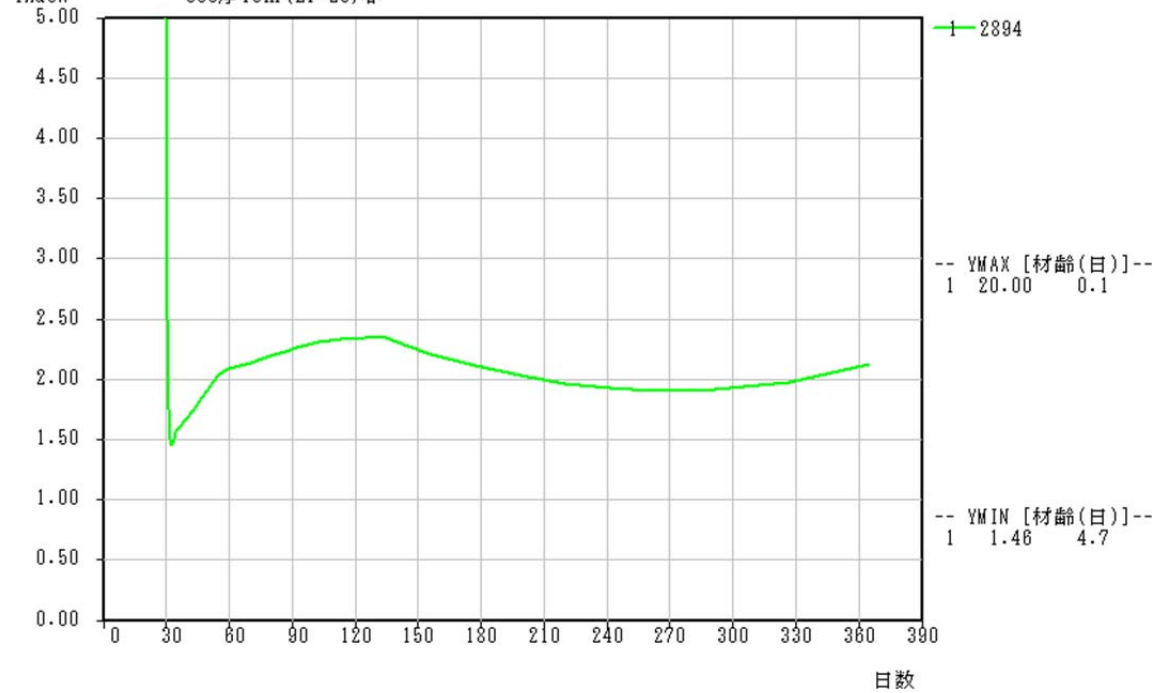
【壁厚 0.56, 壁長さ 15m】 指数



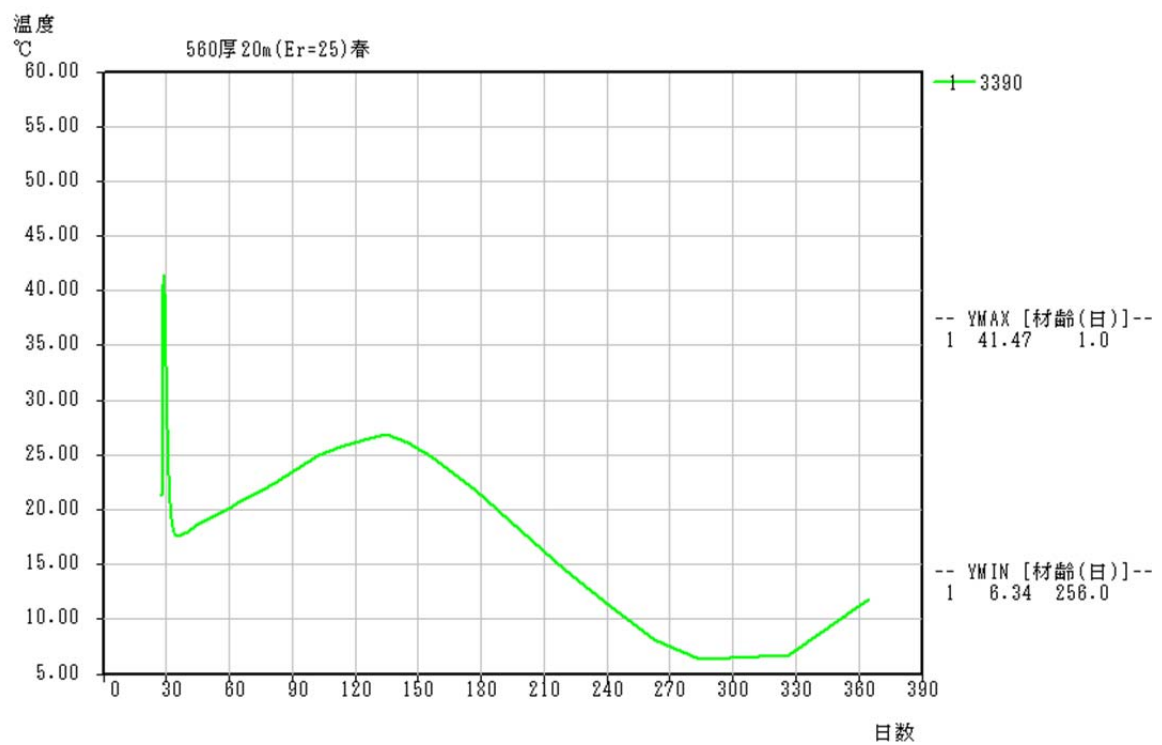
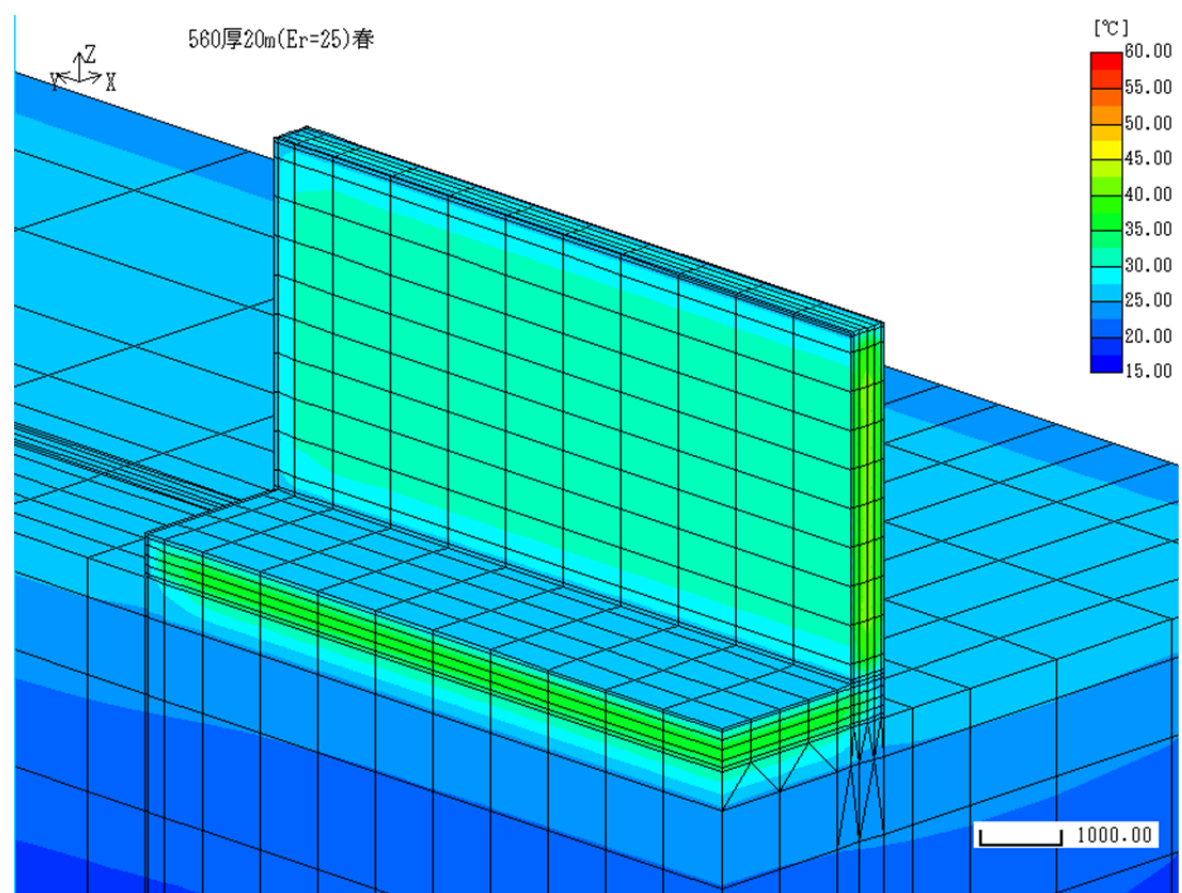
指数 (σ_y)

Index

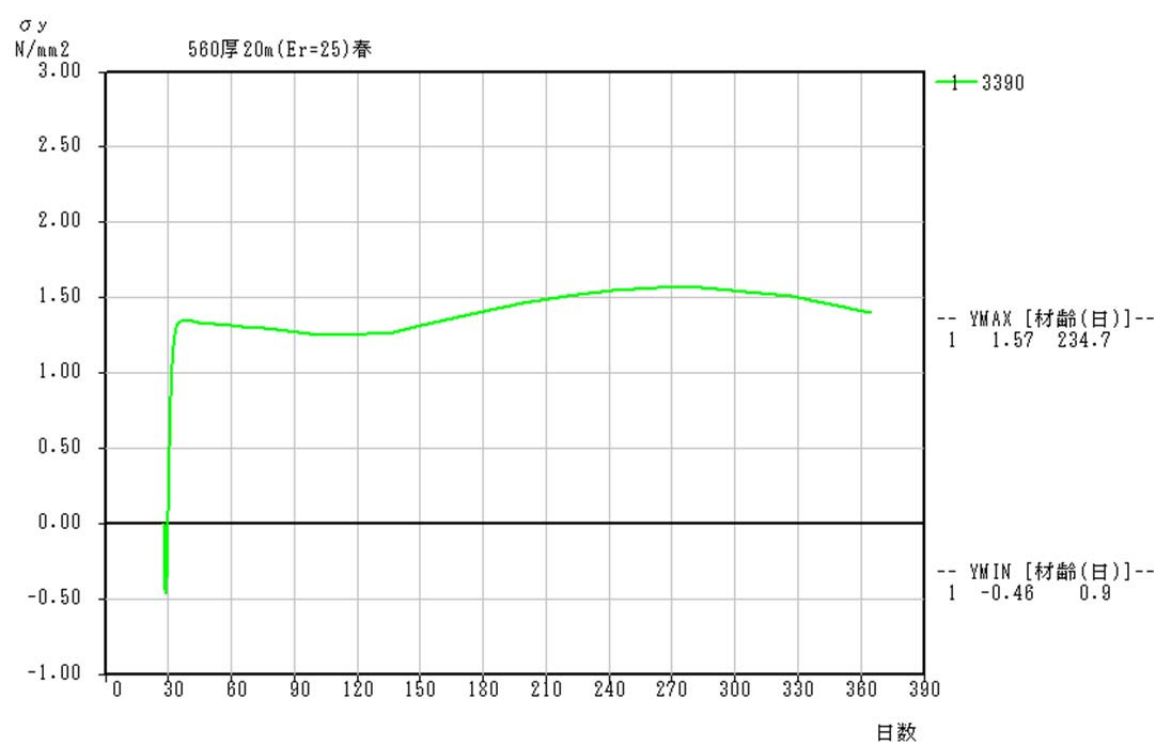
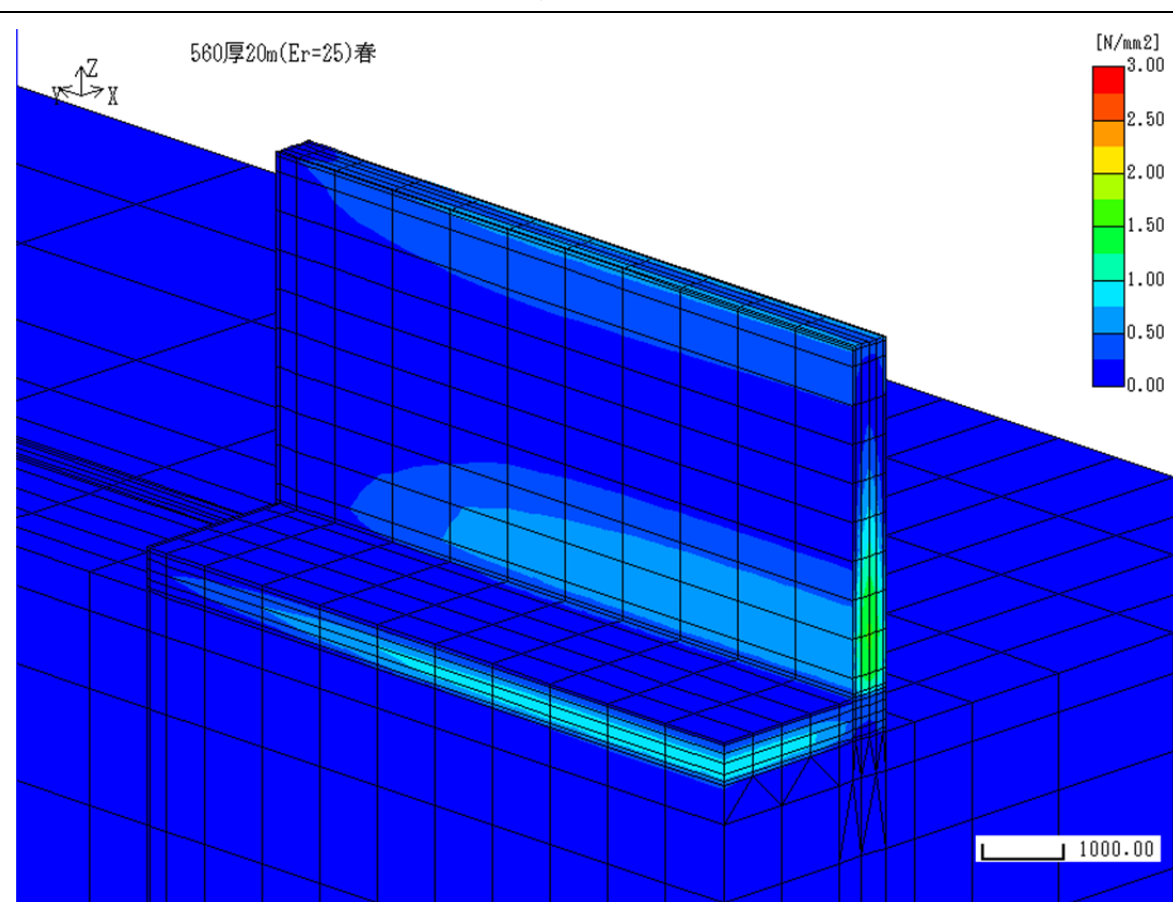
560厚15m (Er=25) 春



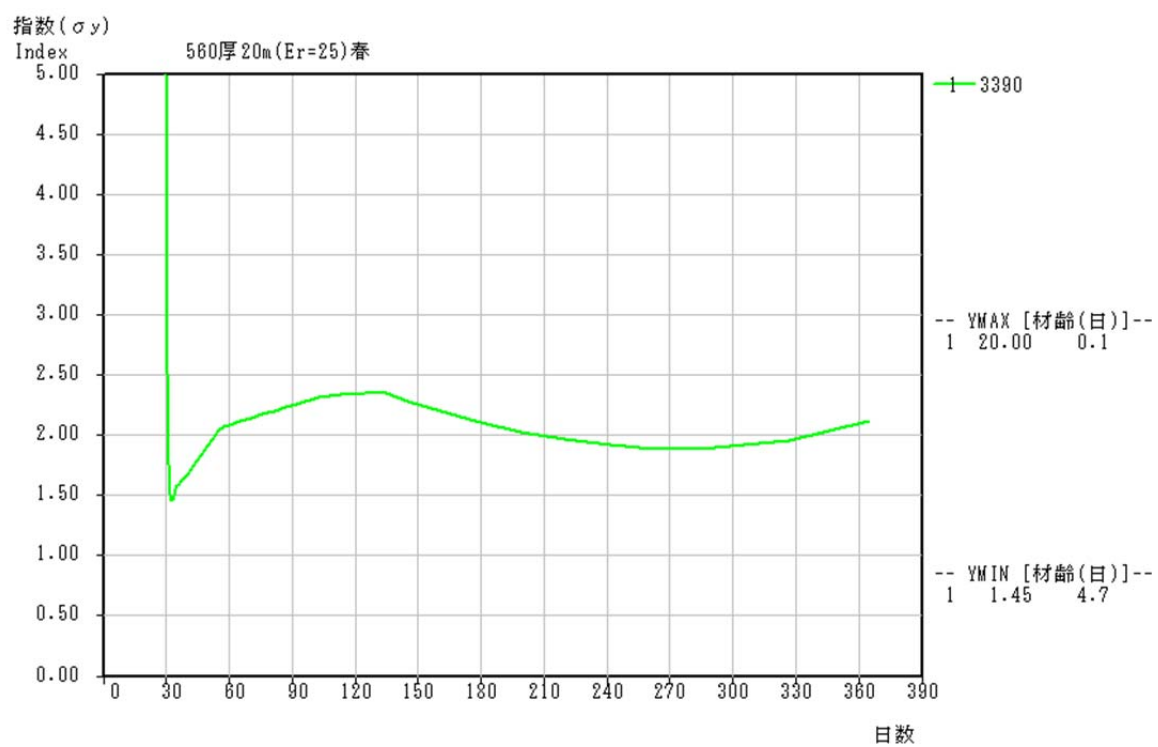
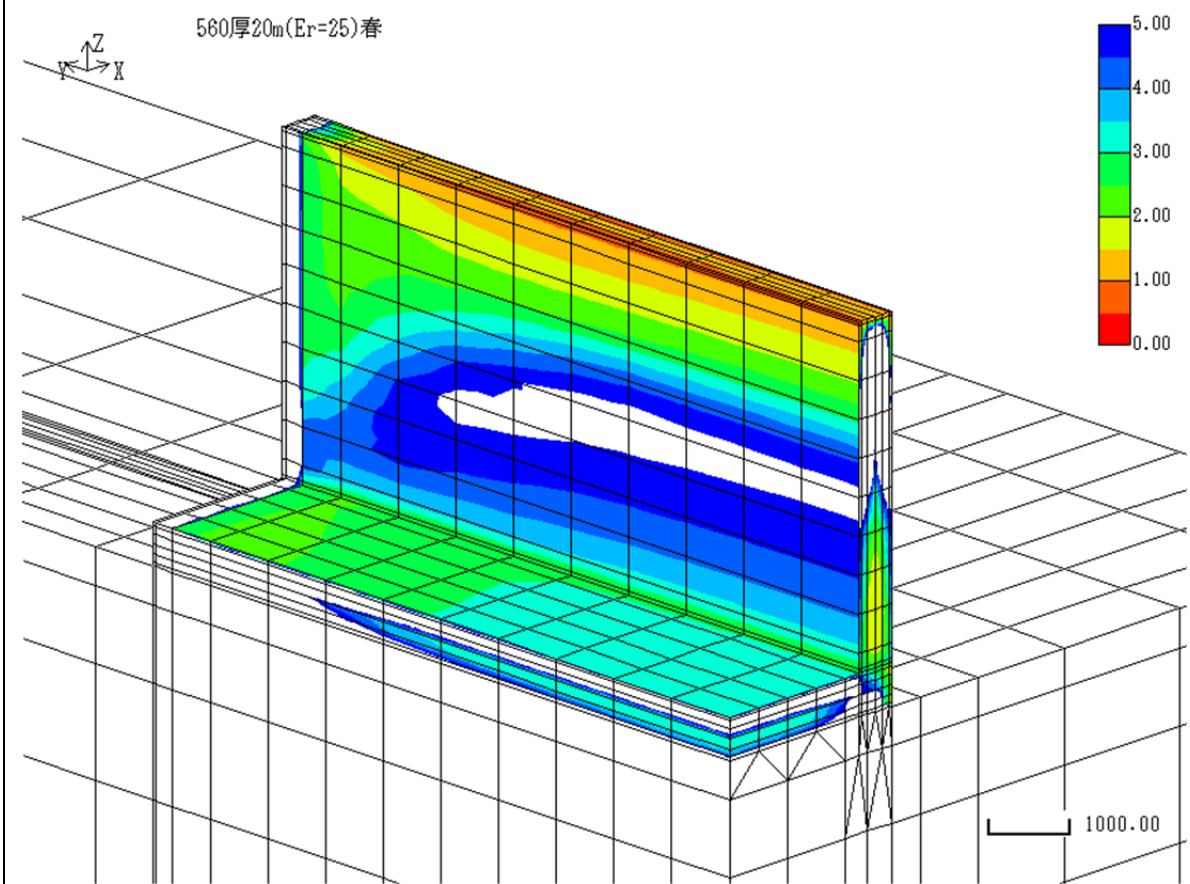
【壁厚 0.56m, 壁長さ 20m】 温度



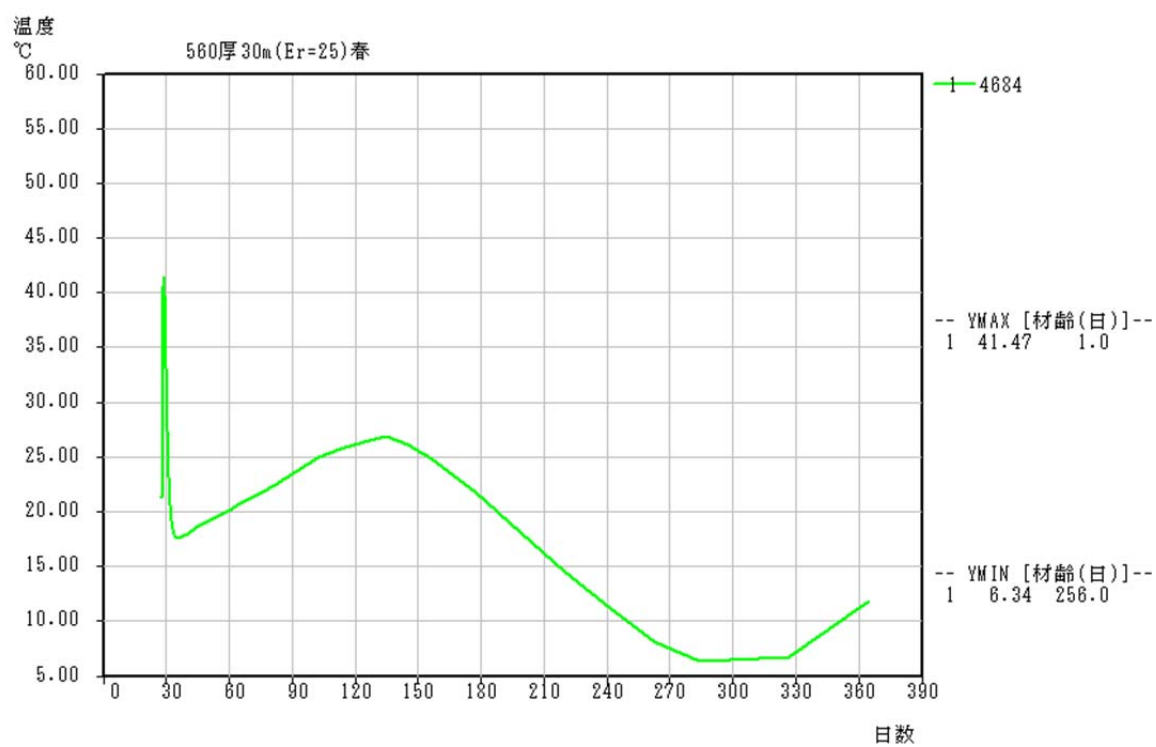
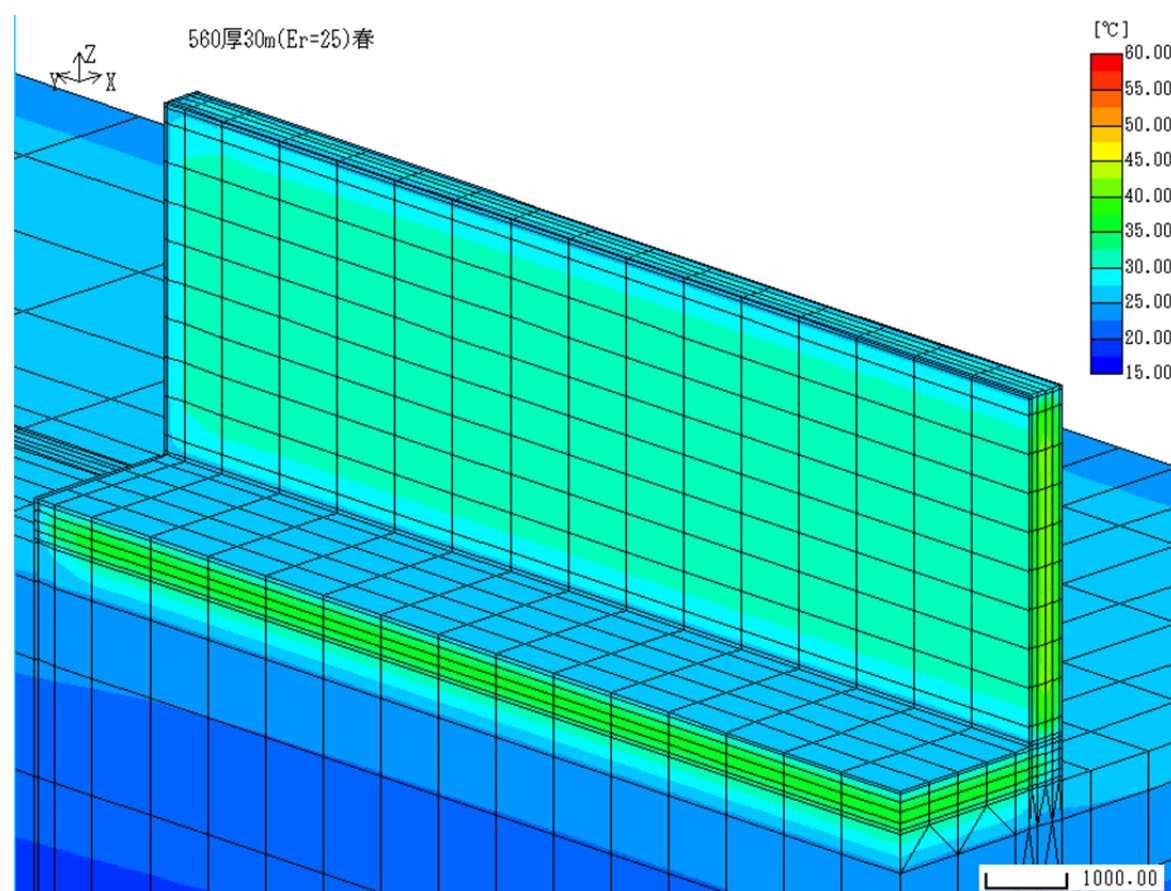
【壁厚 0.56m, 壁長さ 20m】 応力



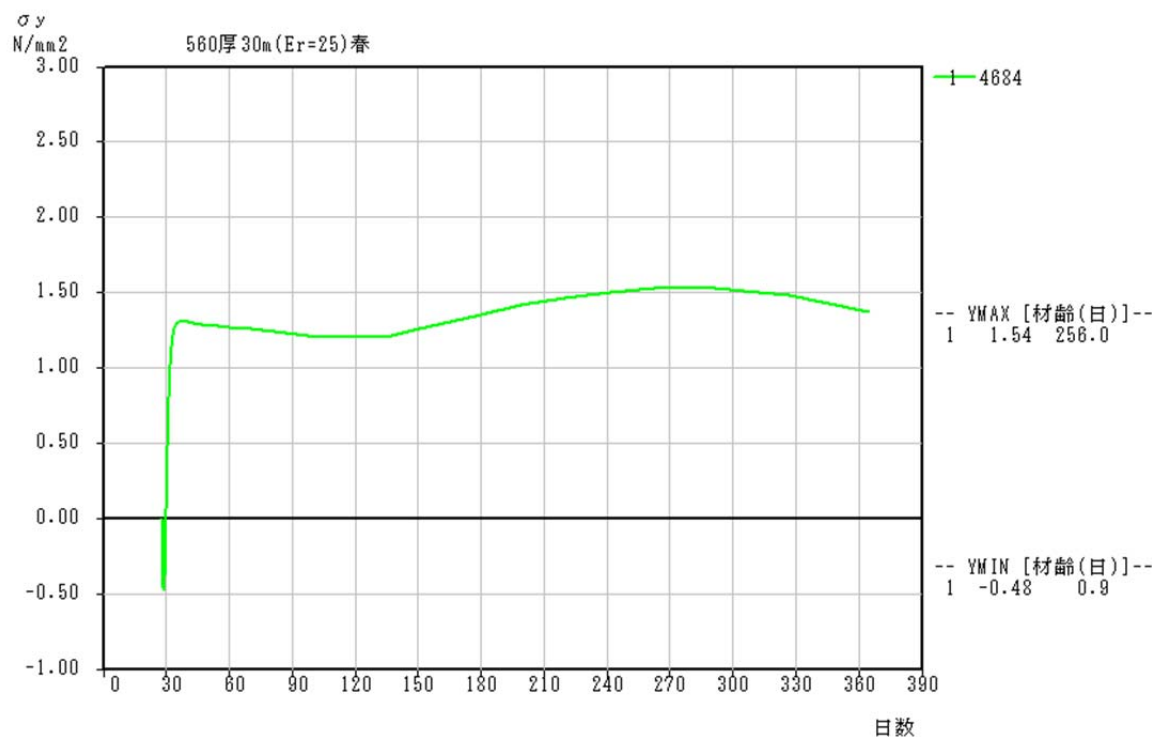
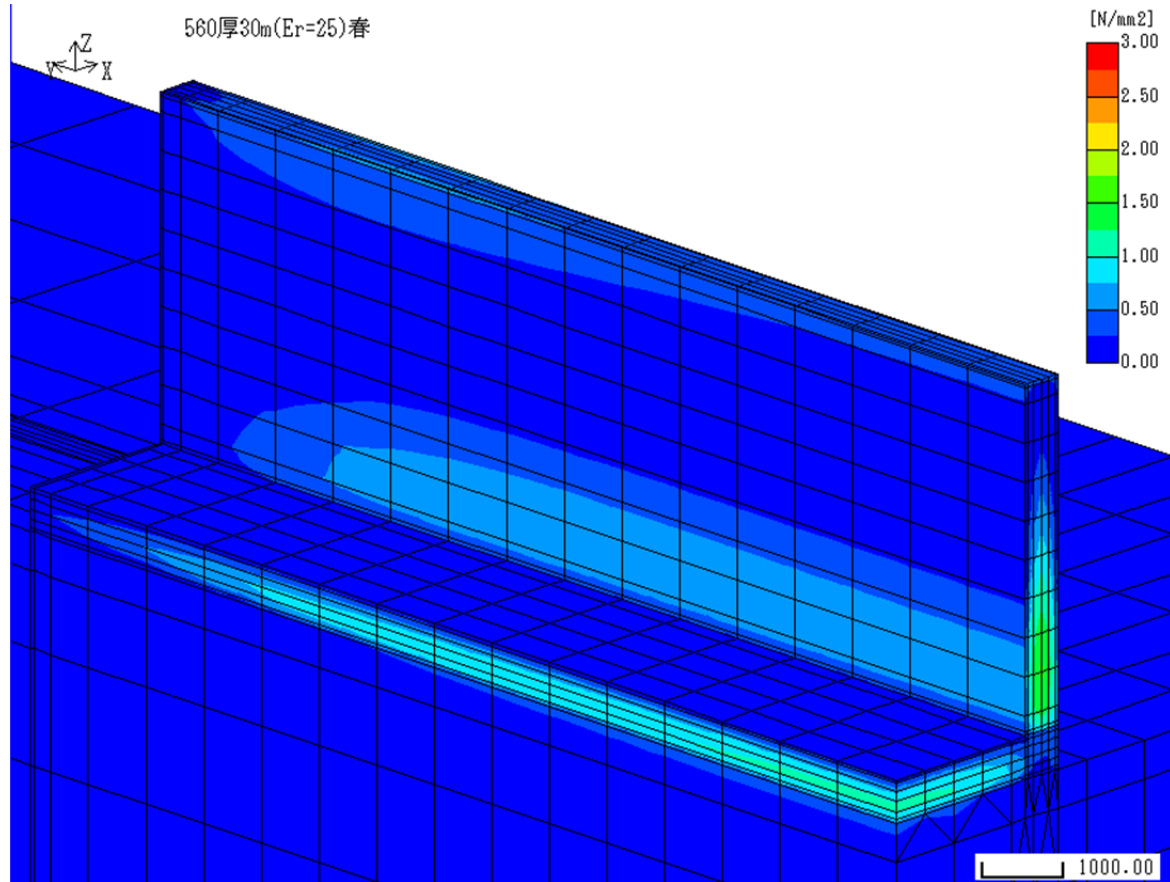
【壁厚 0.56, 壁長さ 20m】 指数



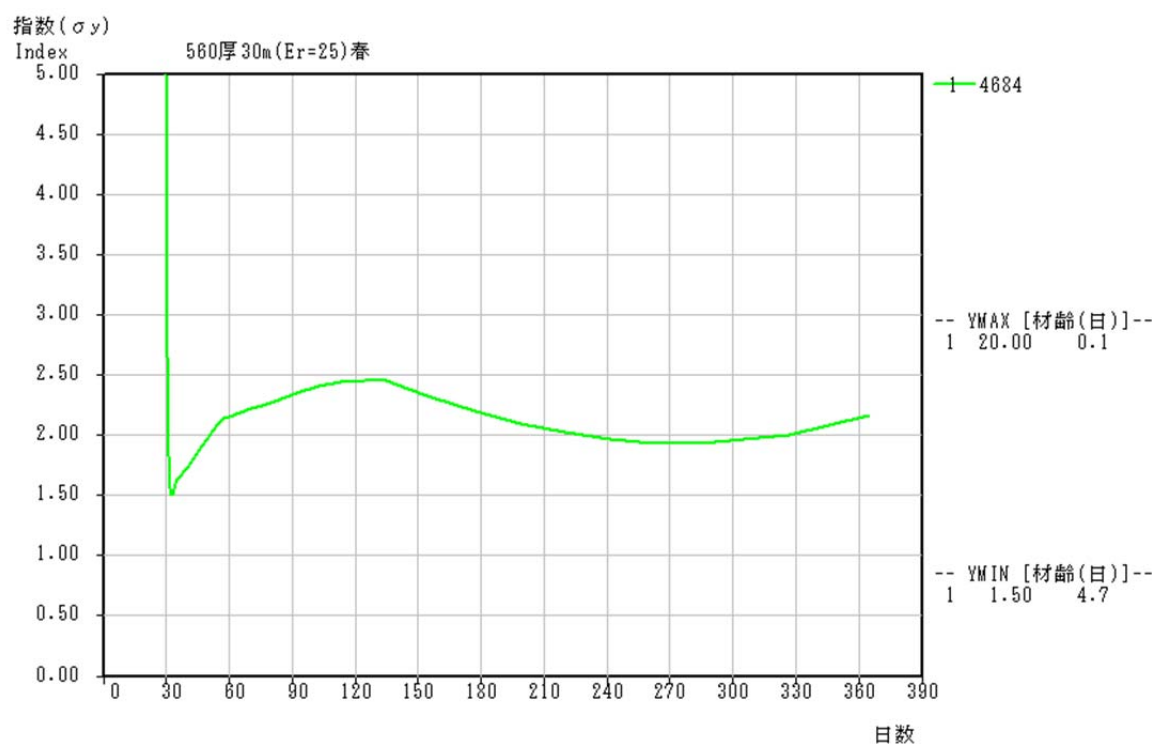
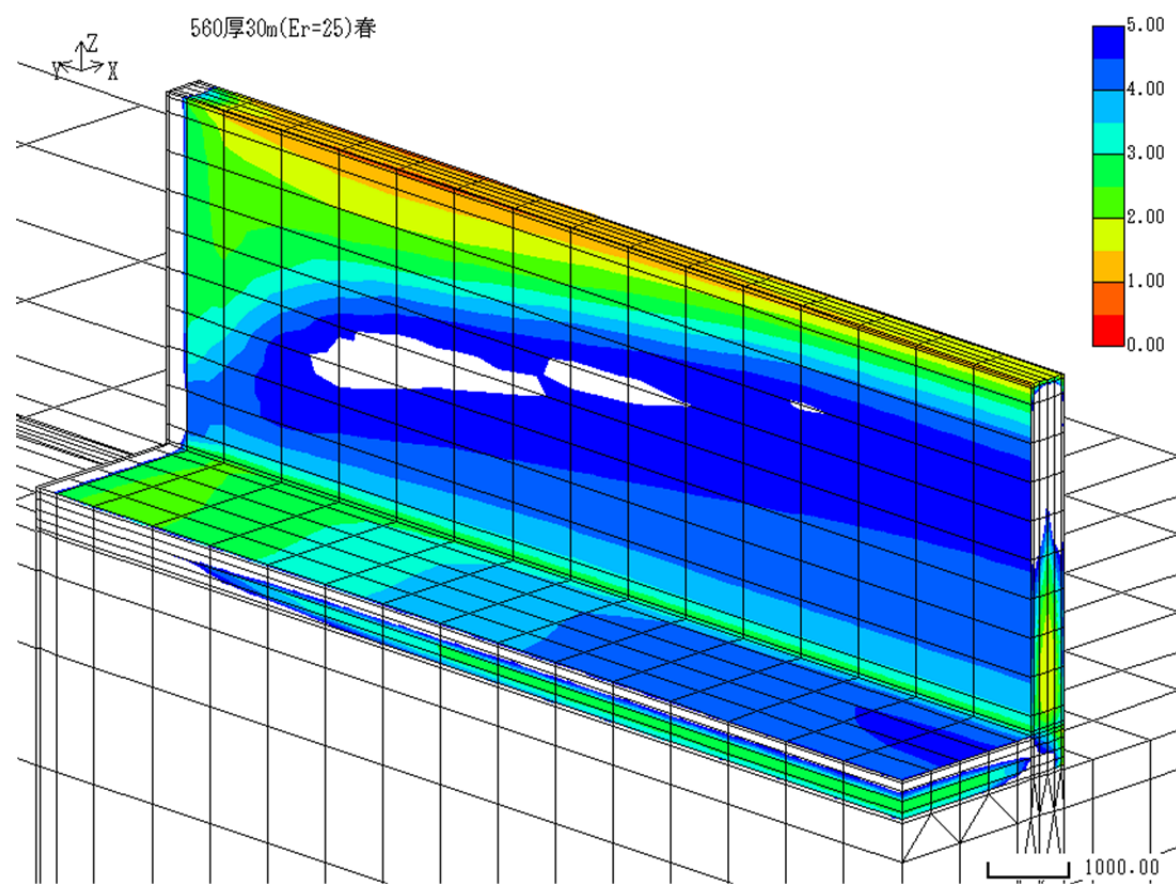
【壁厚 0.56m, 壁長さ 30m】 温度



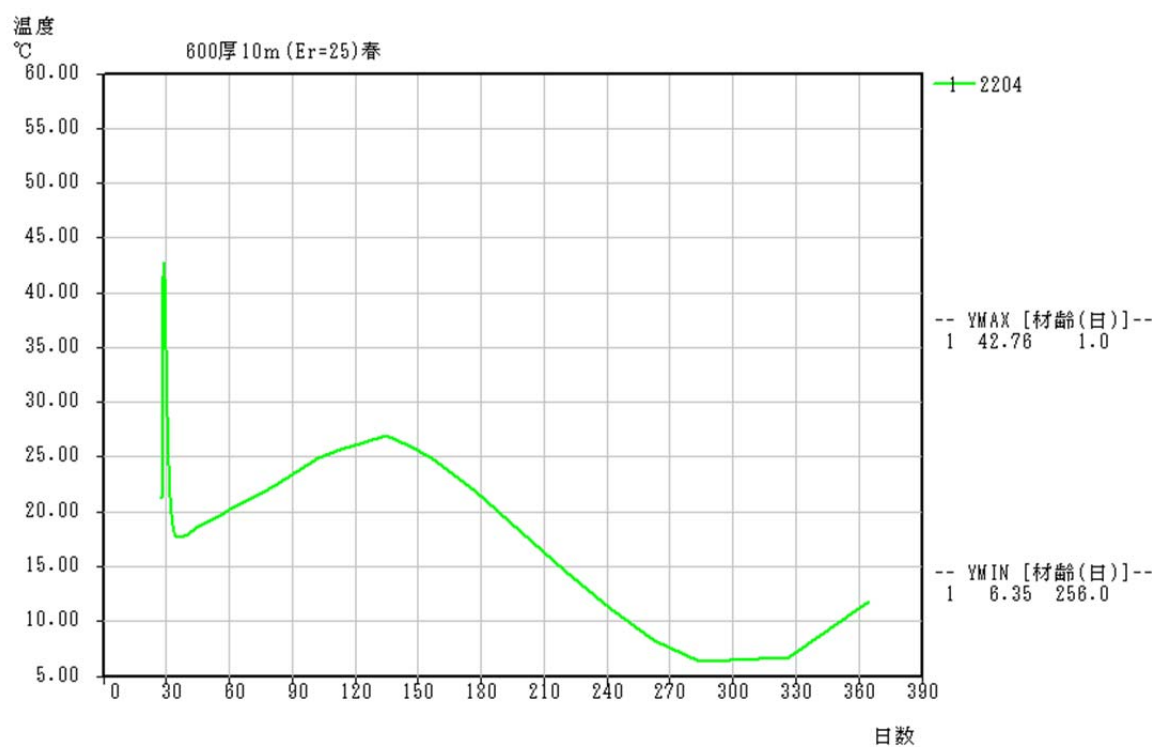
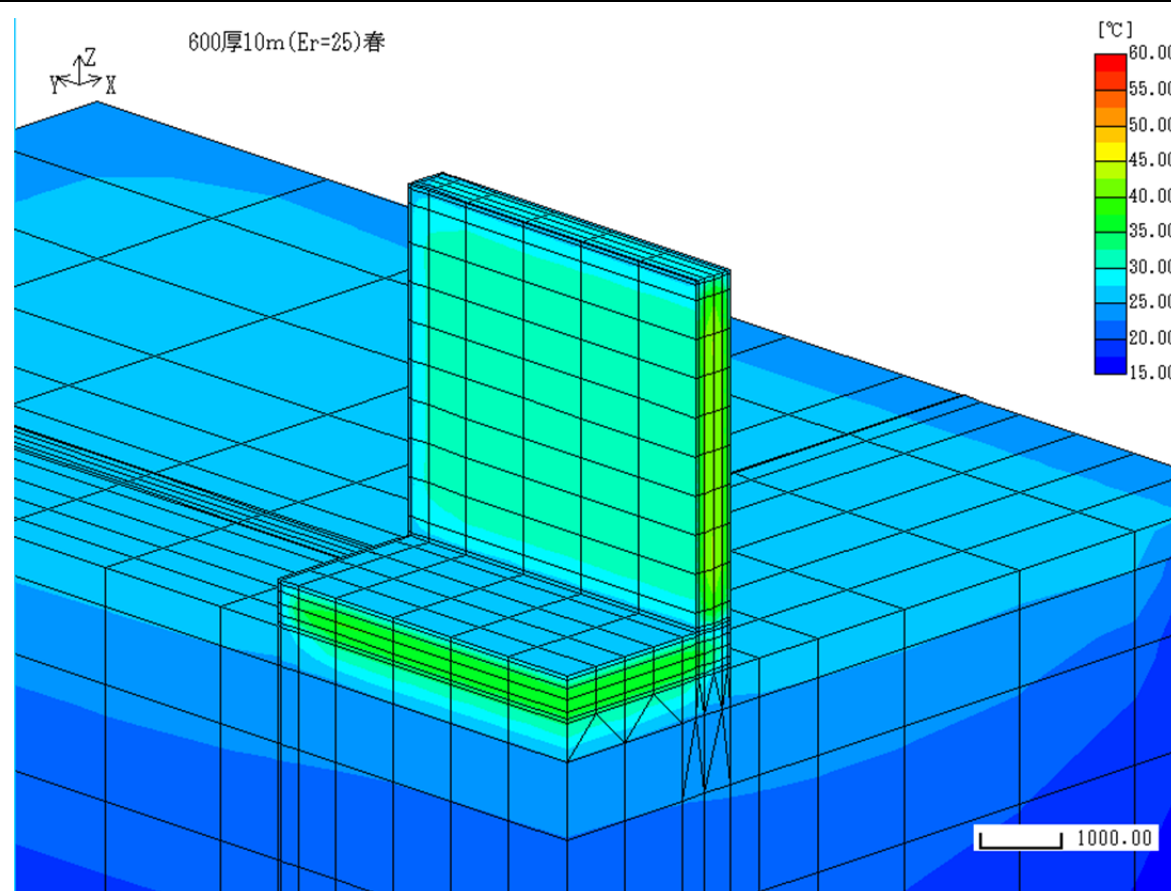
【壁厚 0.56m, 壁長さ 30m】 応力



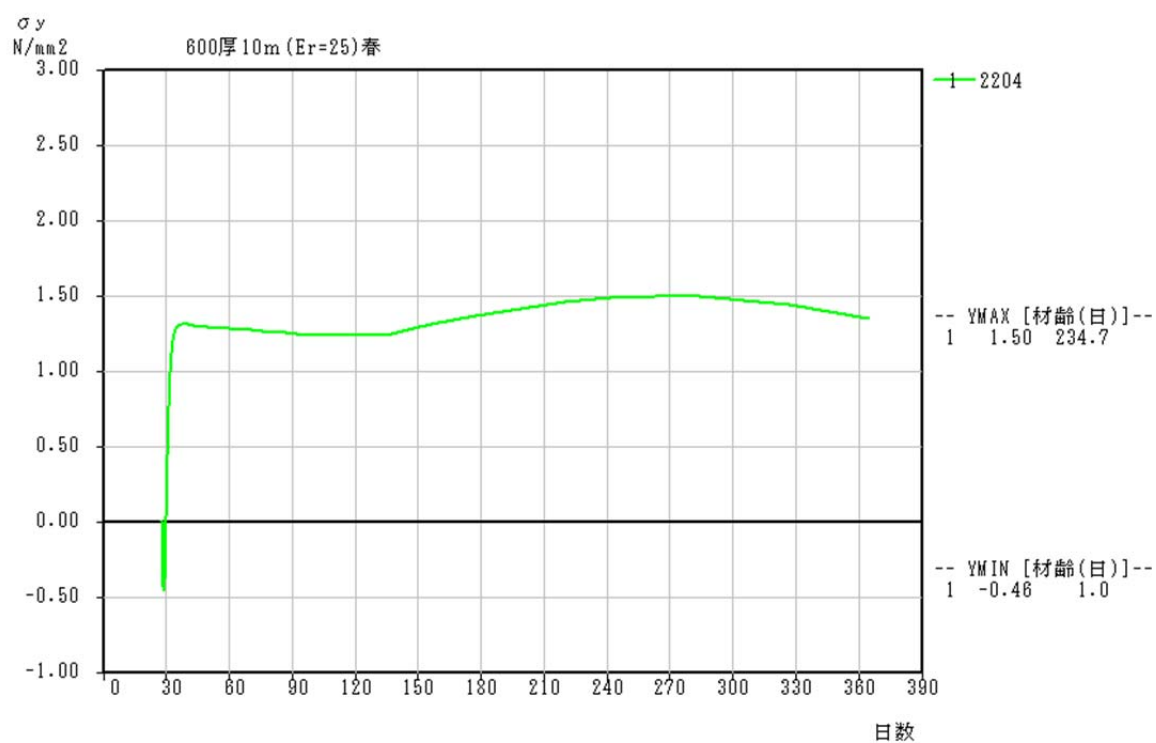
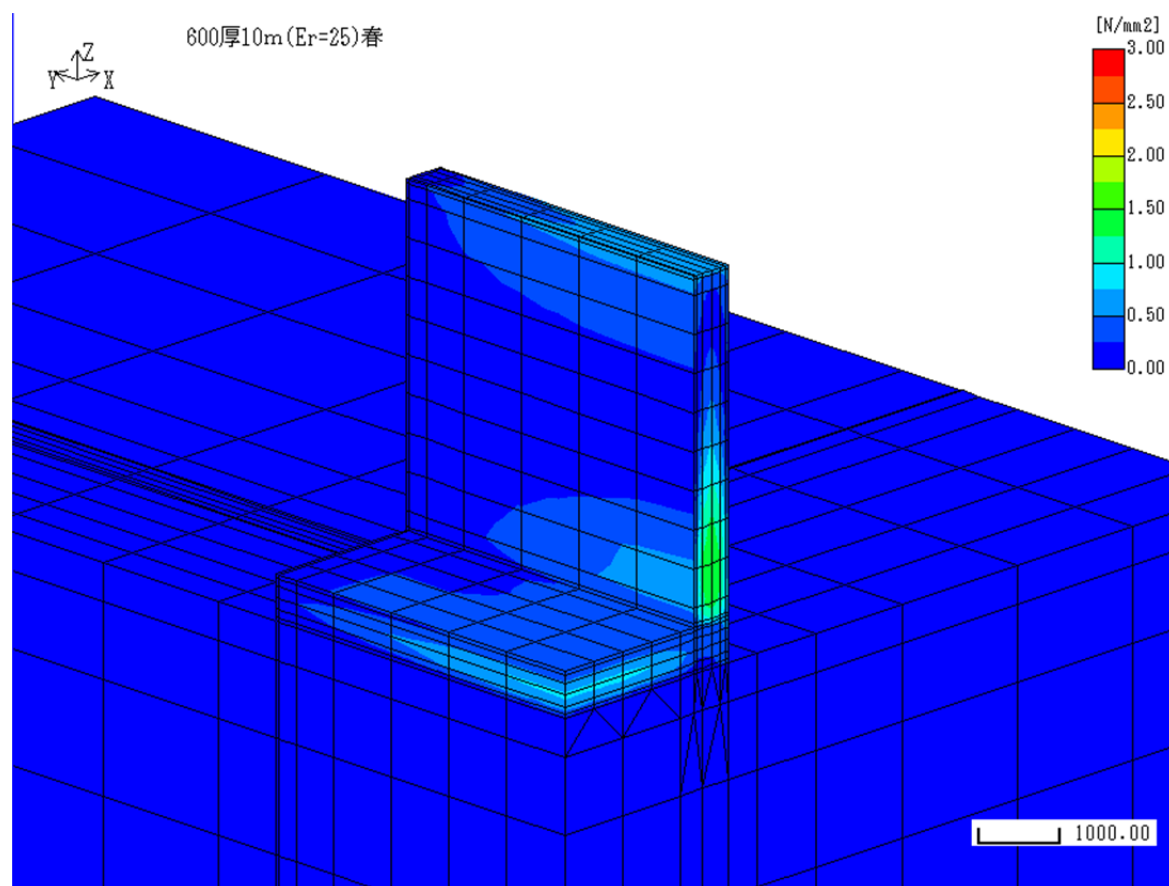
【壁厚 0.56, 壁長さ 30m】 指数



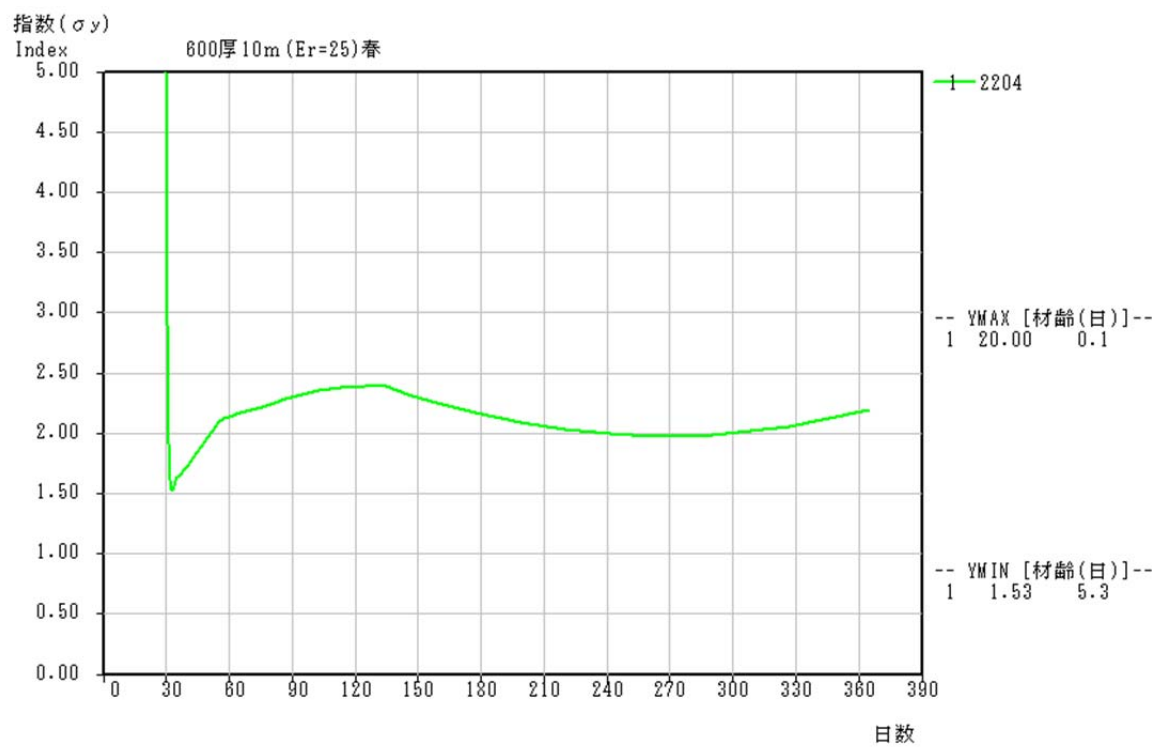
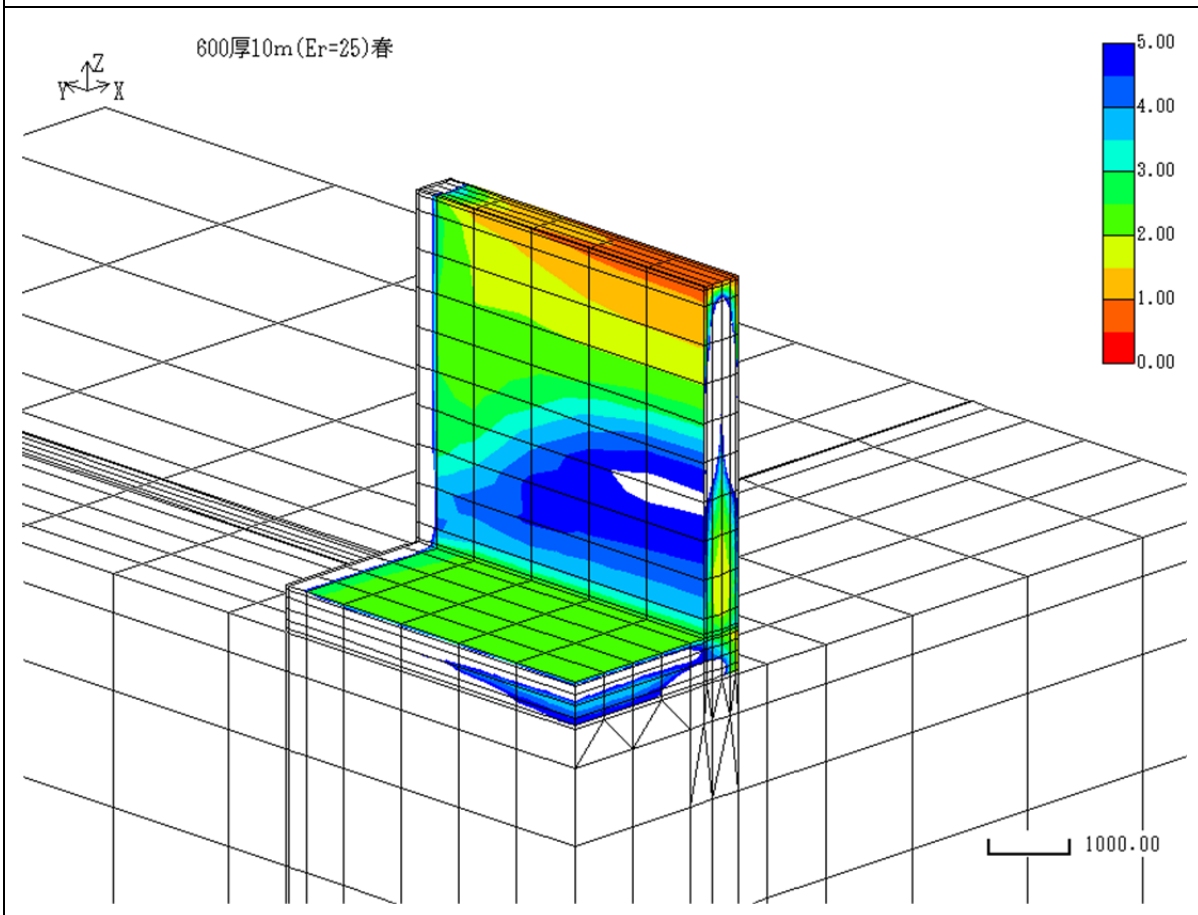
【壁厚 0.6m, 壁長さ 10m】 温度



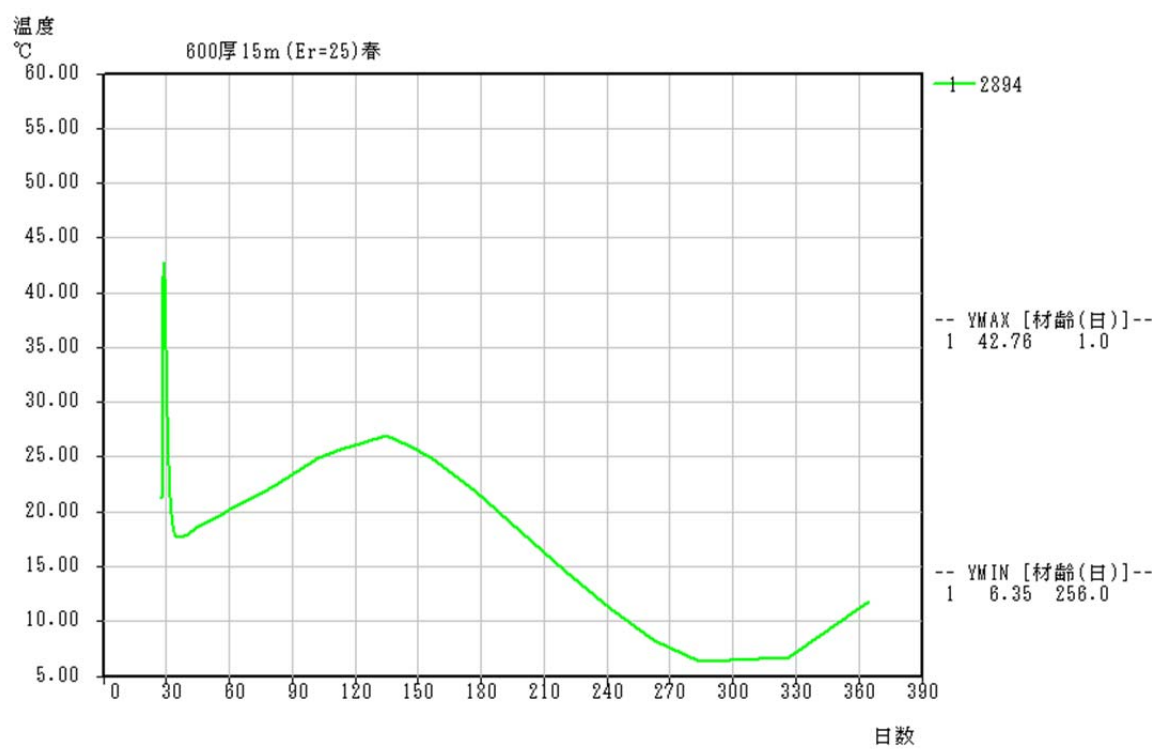
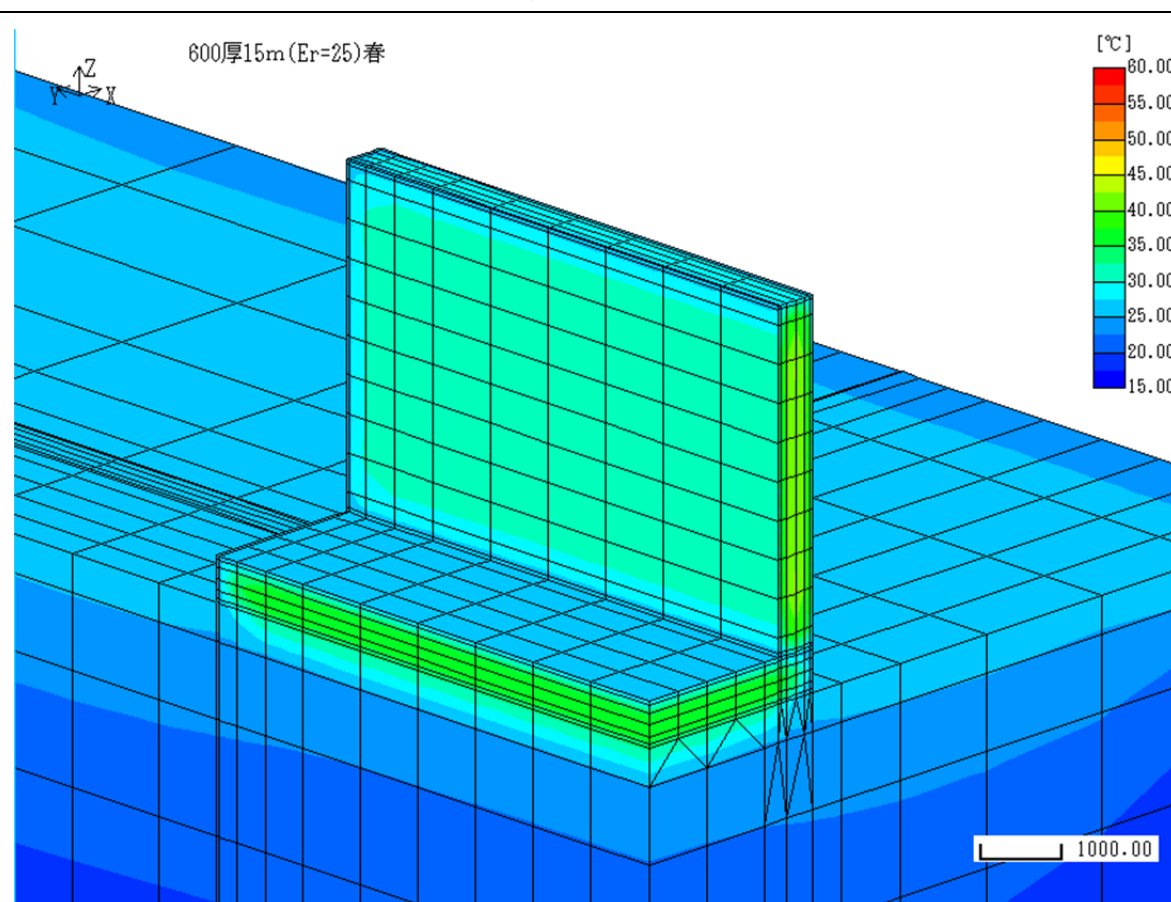
【壁厚 0.6m, 壁長さ 10m】 応力



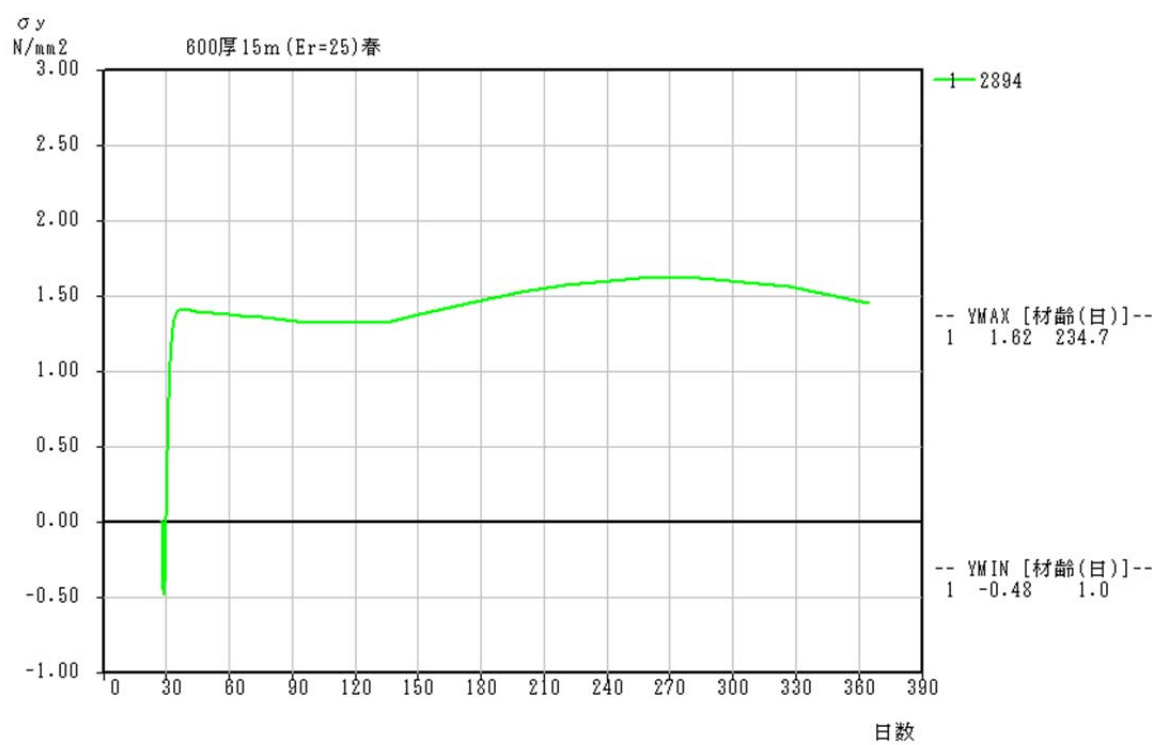
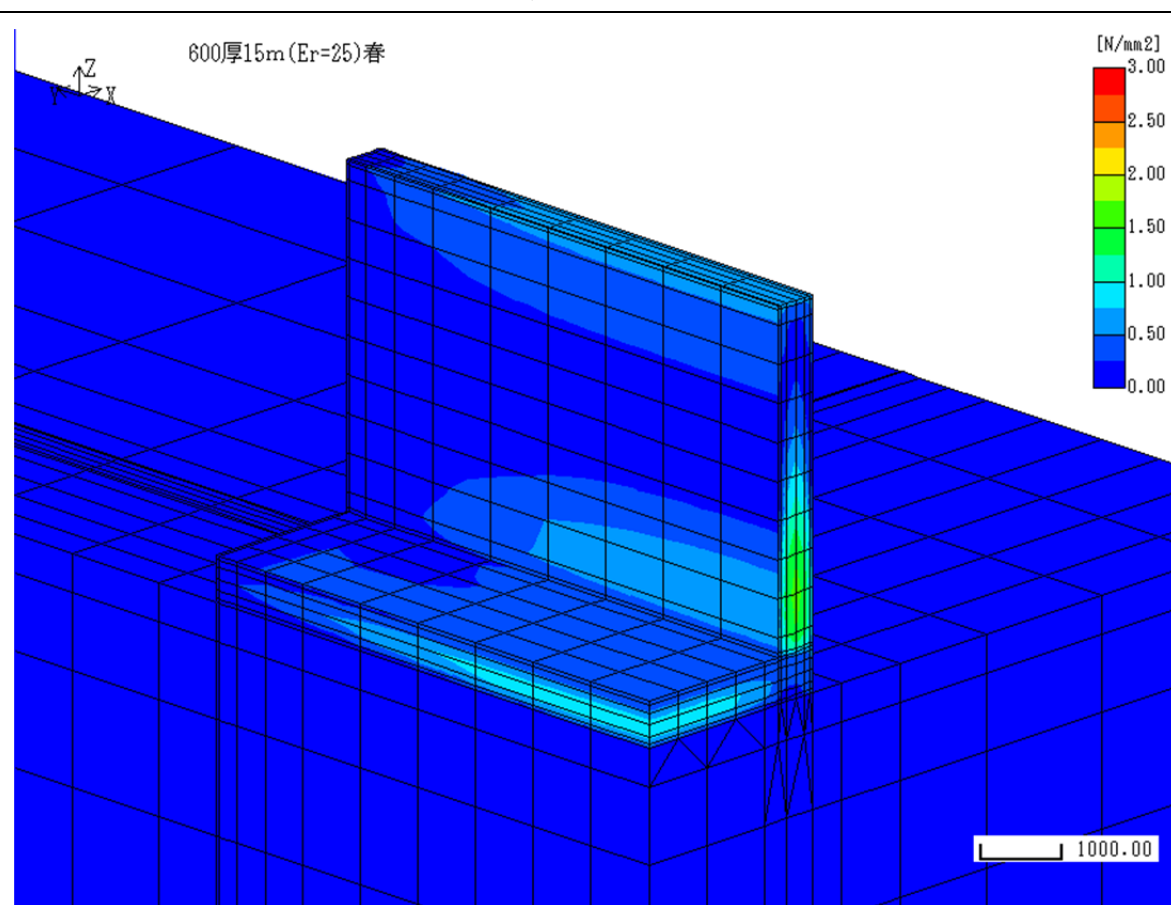
【壁厚 0.6，壁長さ 10m】 指数



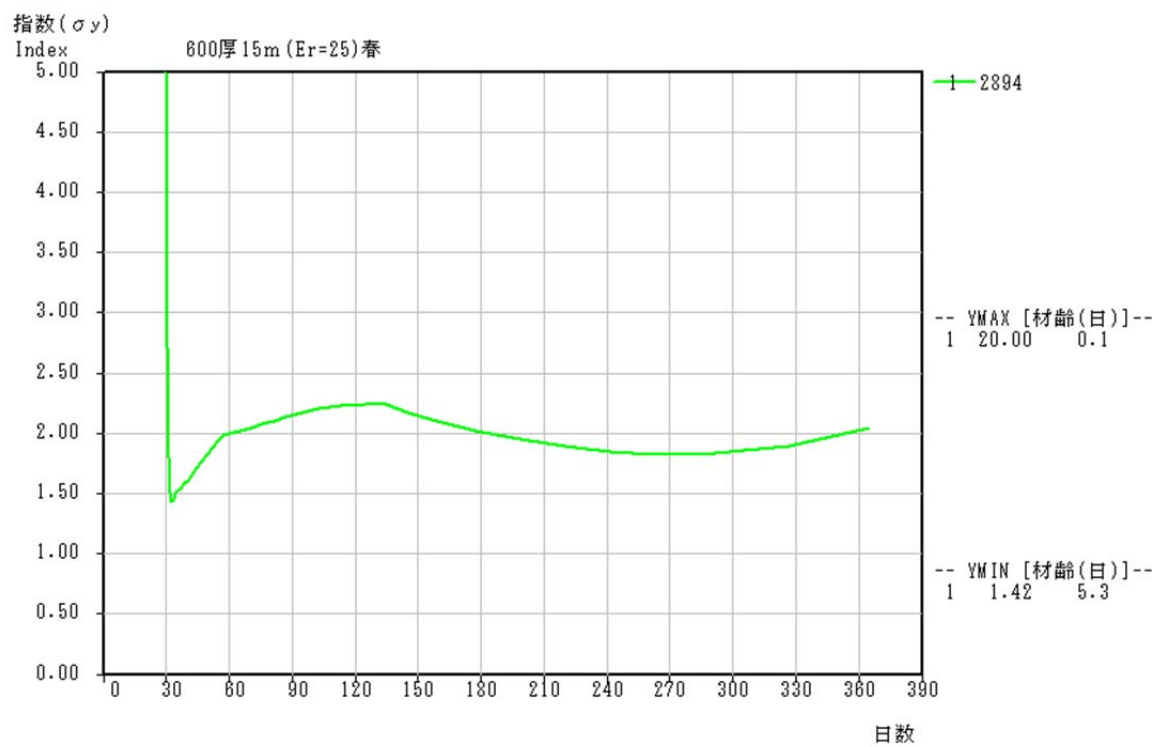
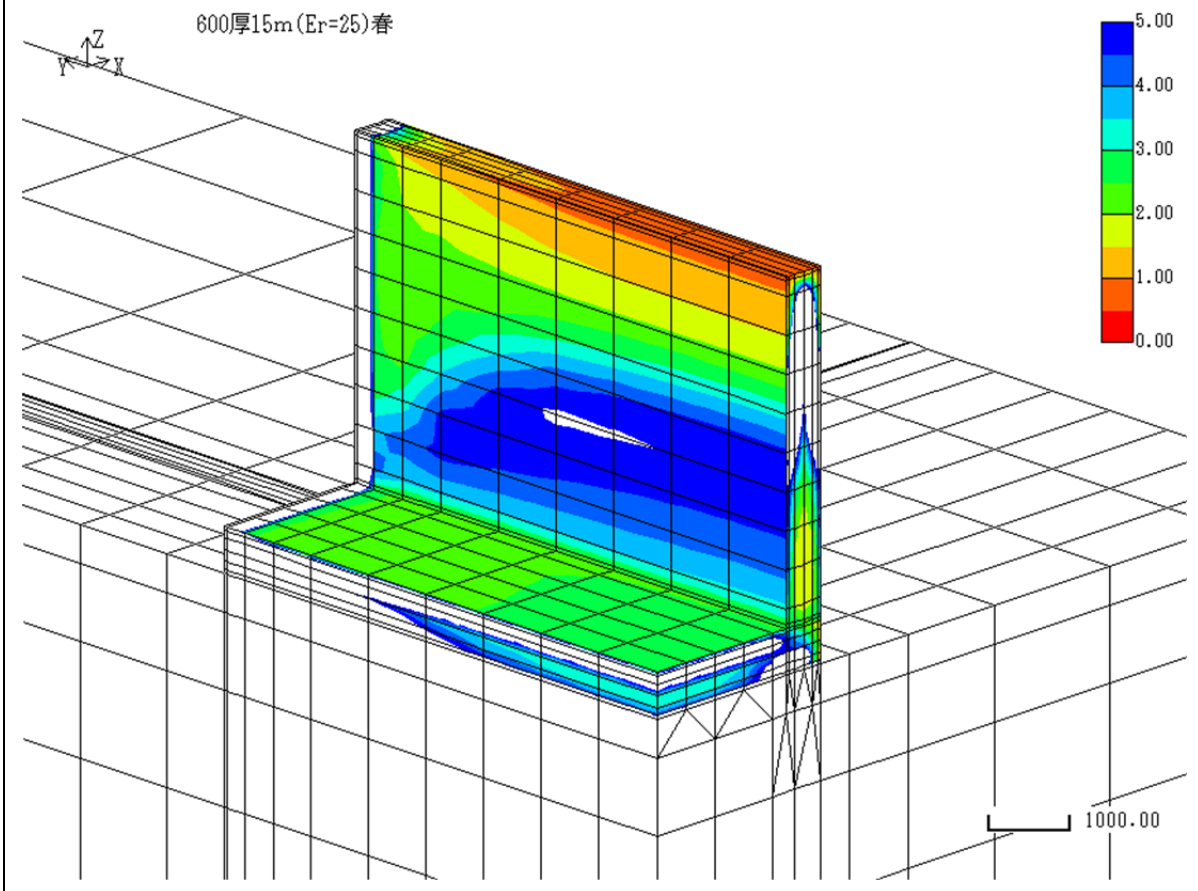
【壁厚 0.6m, 壁長さ 15m】 温度



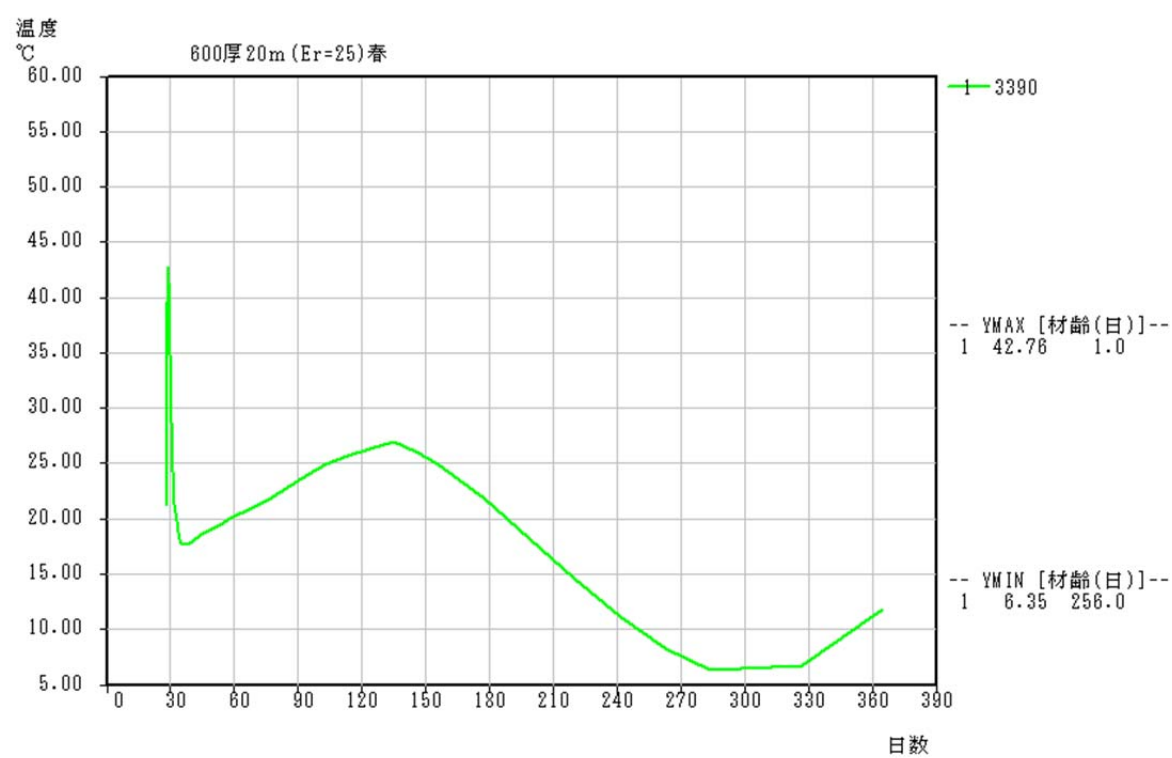
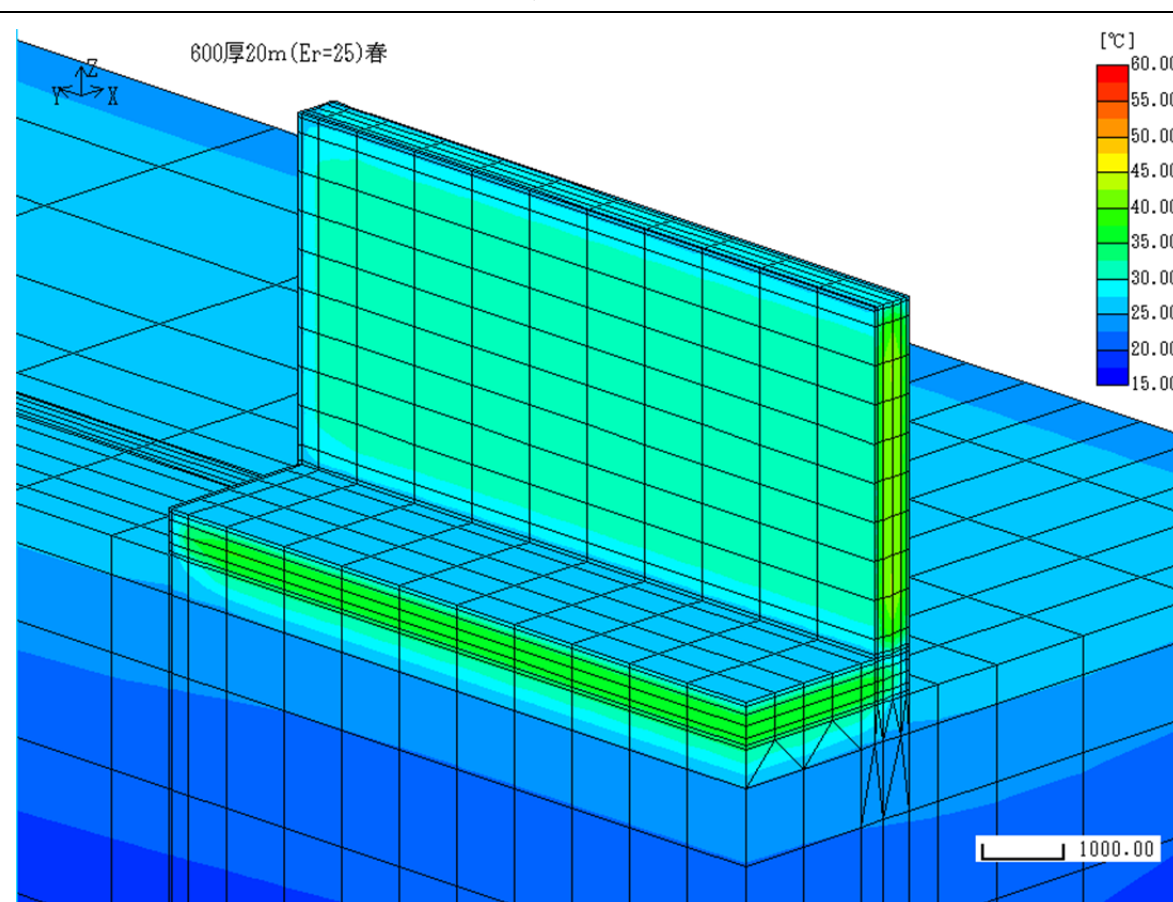
【壁厚 0.6m, 壁長さ 15m】 応力



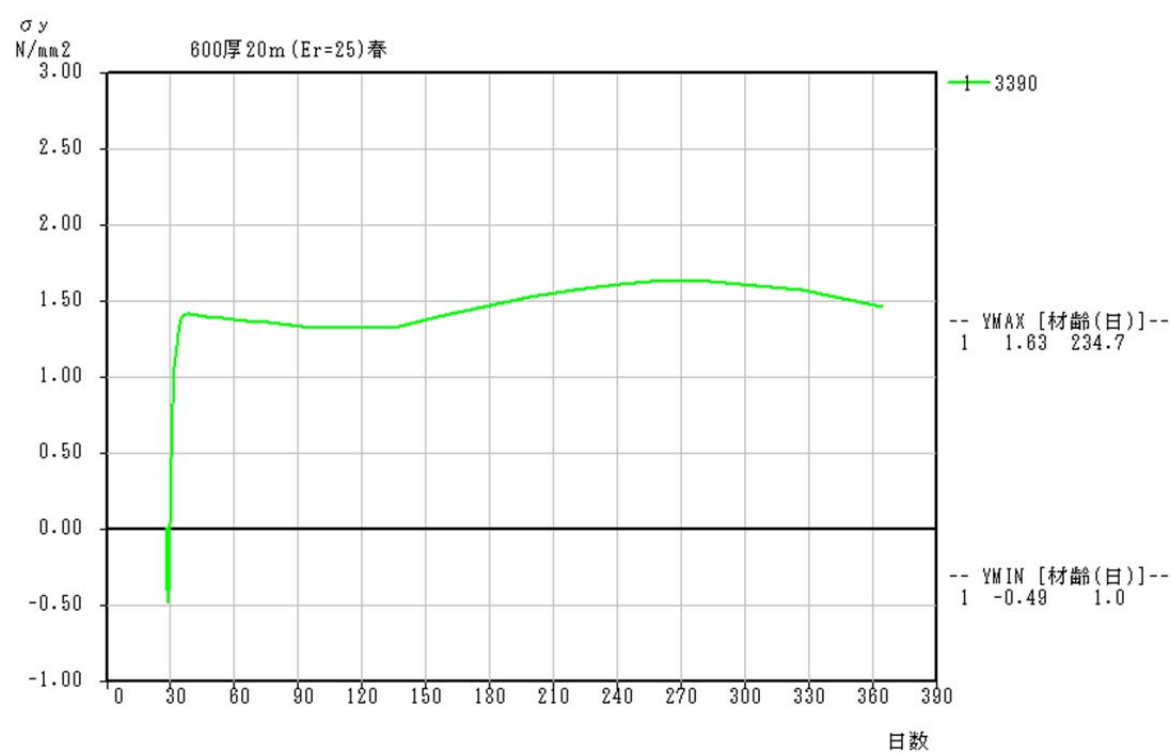
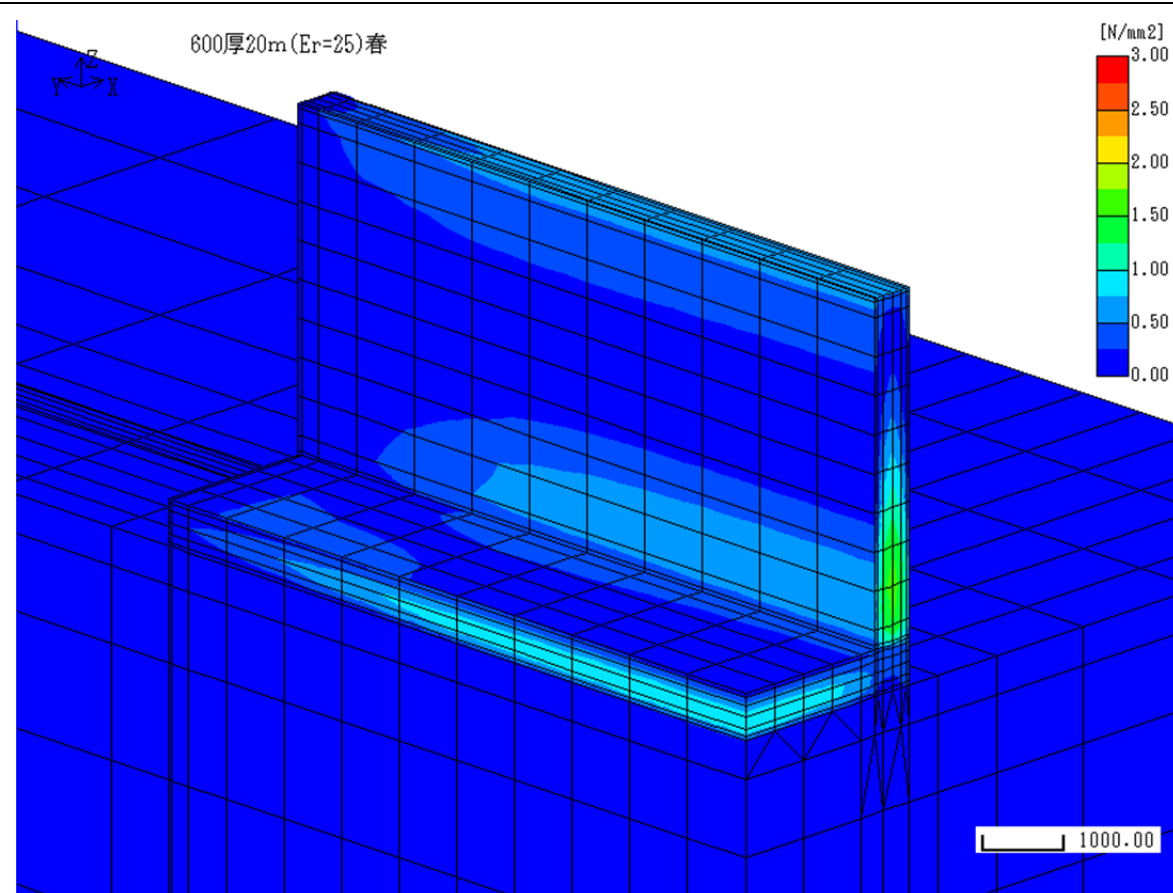
【壁厚 0.6, 壁長さ 15m】 指数



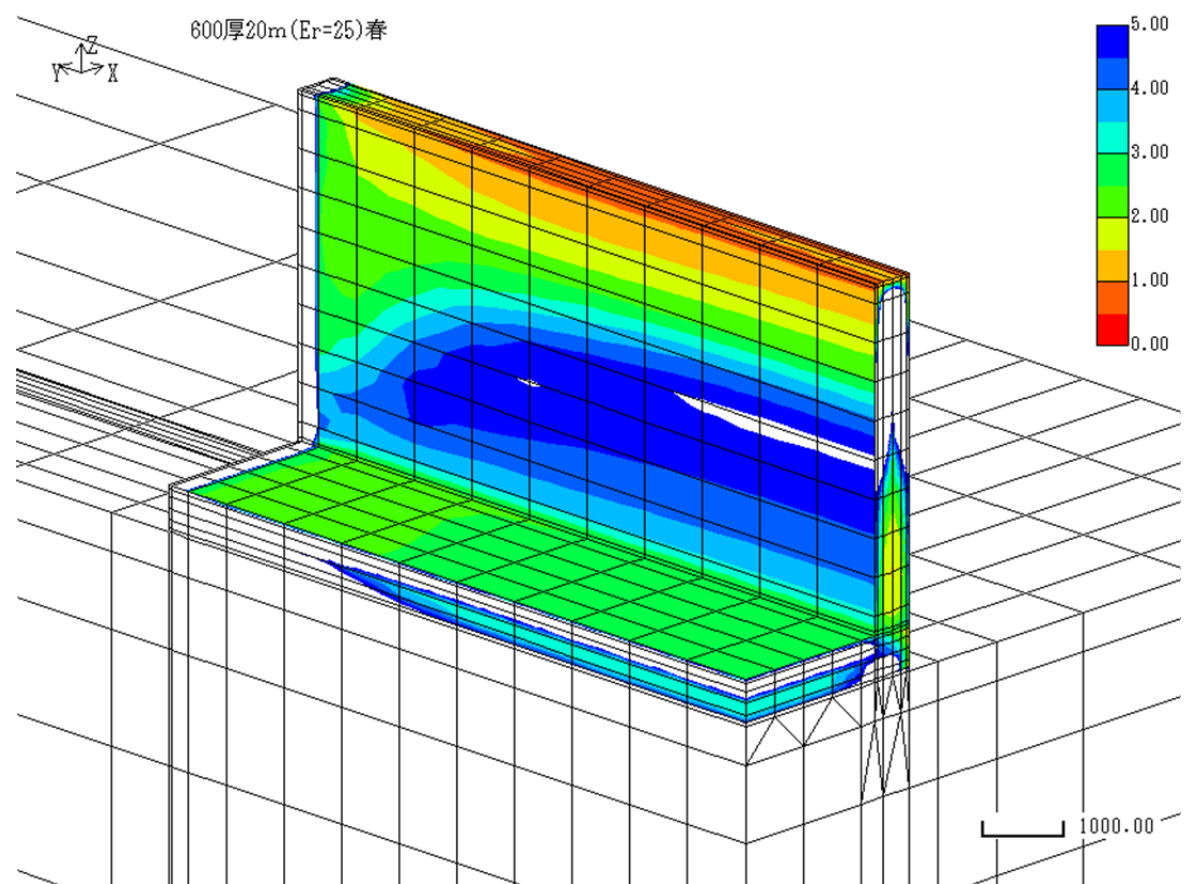
【壁厚 0.6m, 壁長さ 20m】 温度



【壁厚 0.6m, 壁長さ 20m】 応力



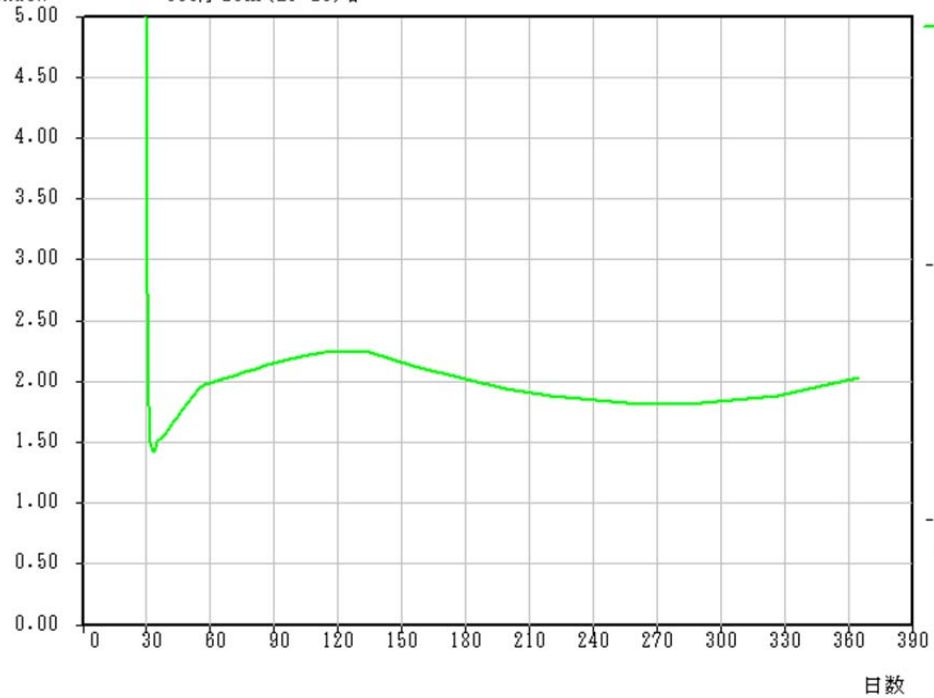
【壁厚 0.6，壁長さ 20m】 指数



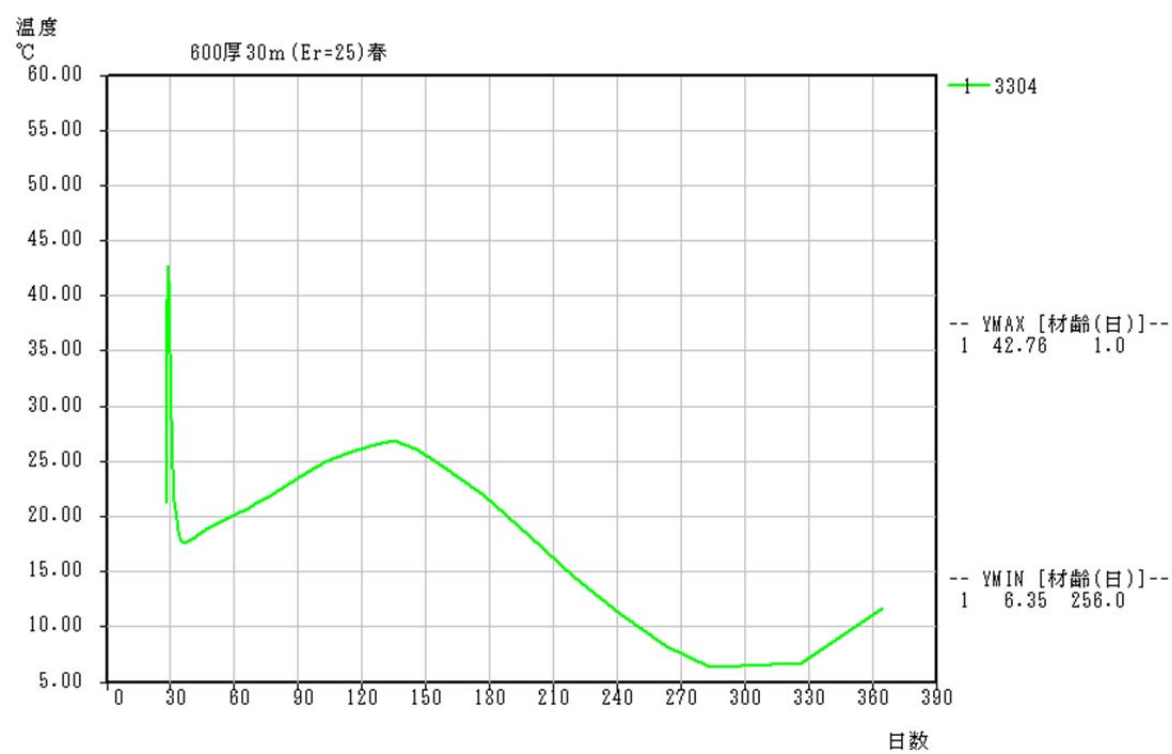
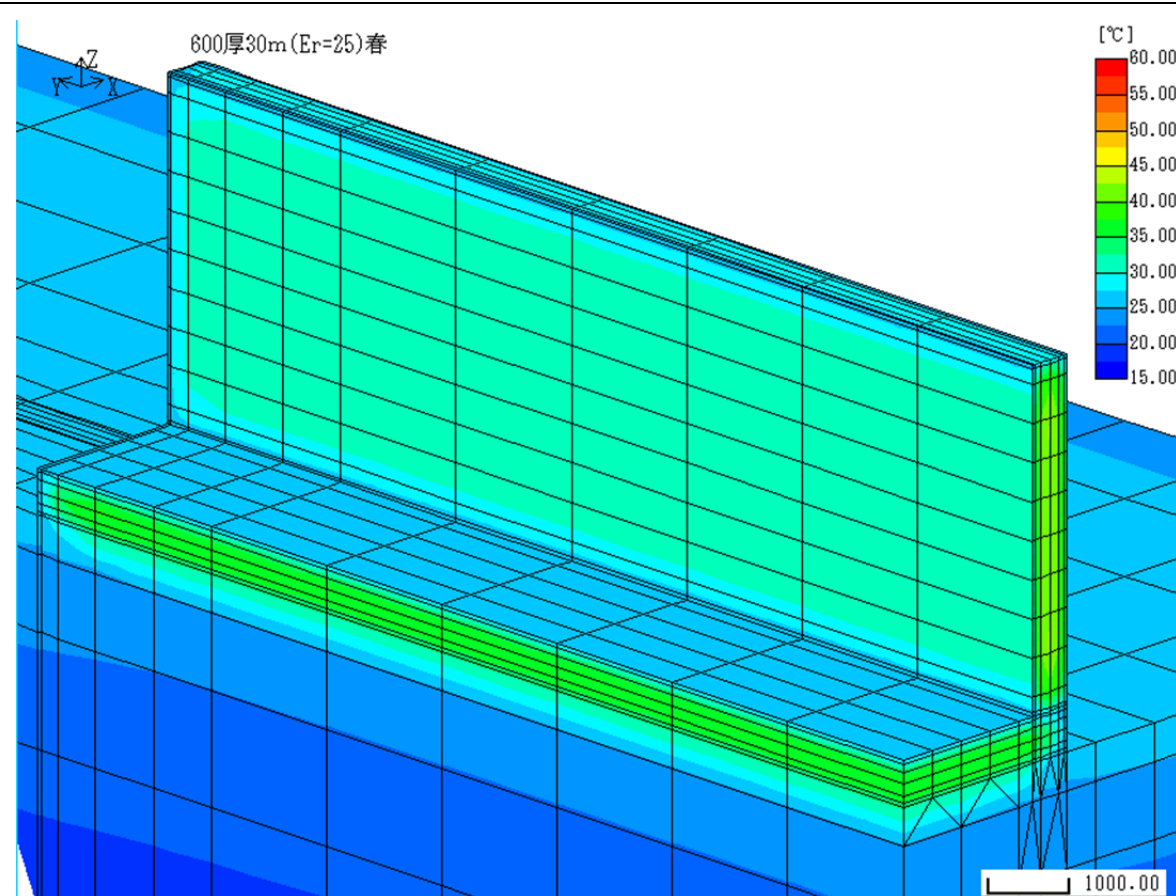
指数 (σ_y)

Index

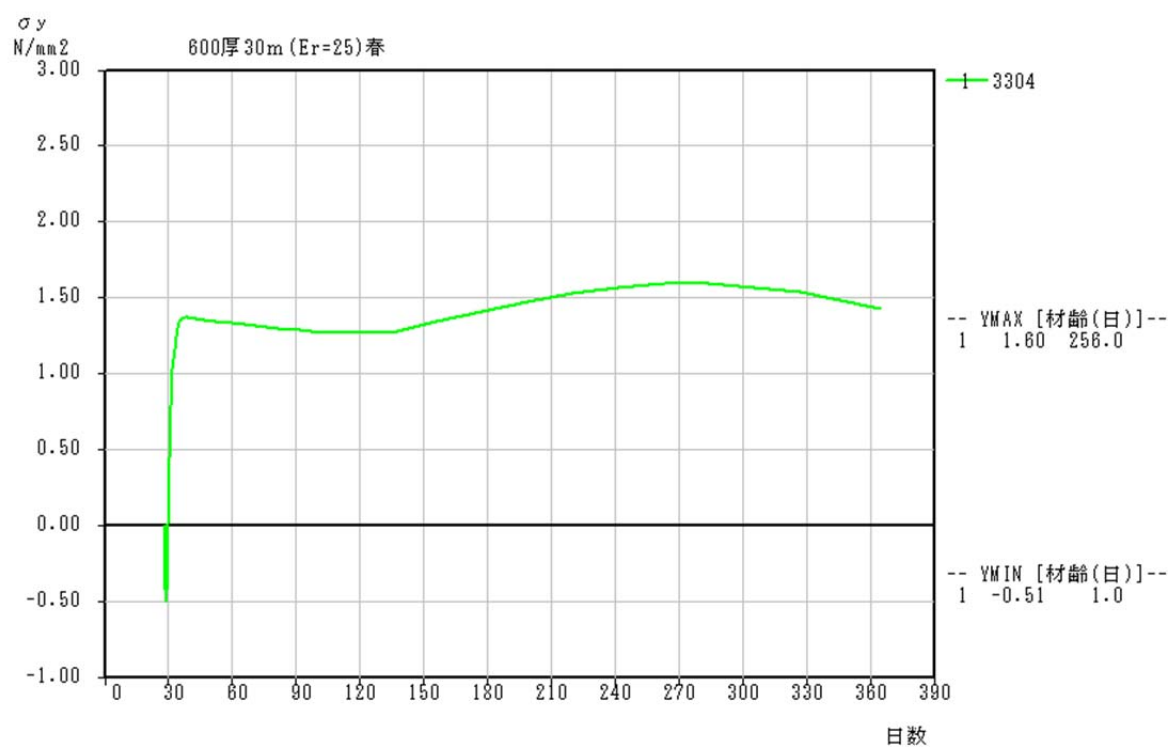
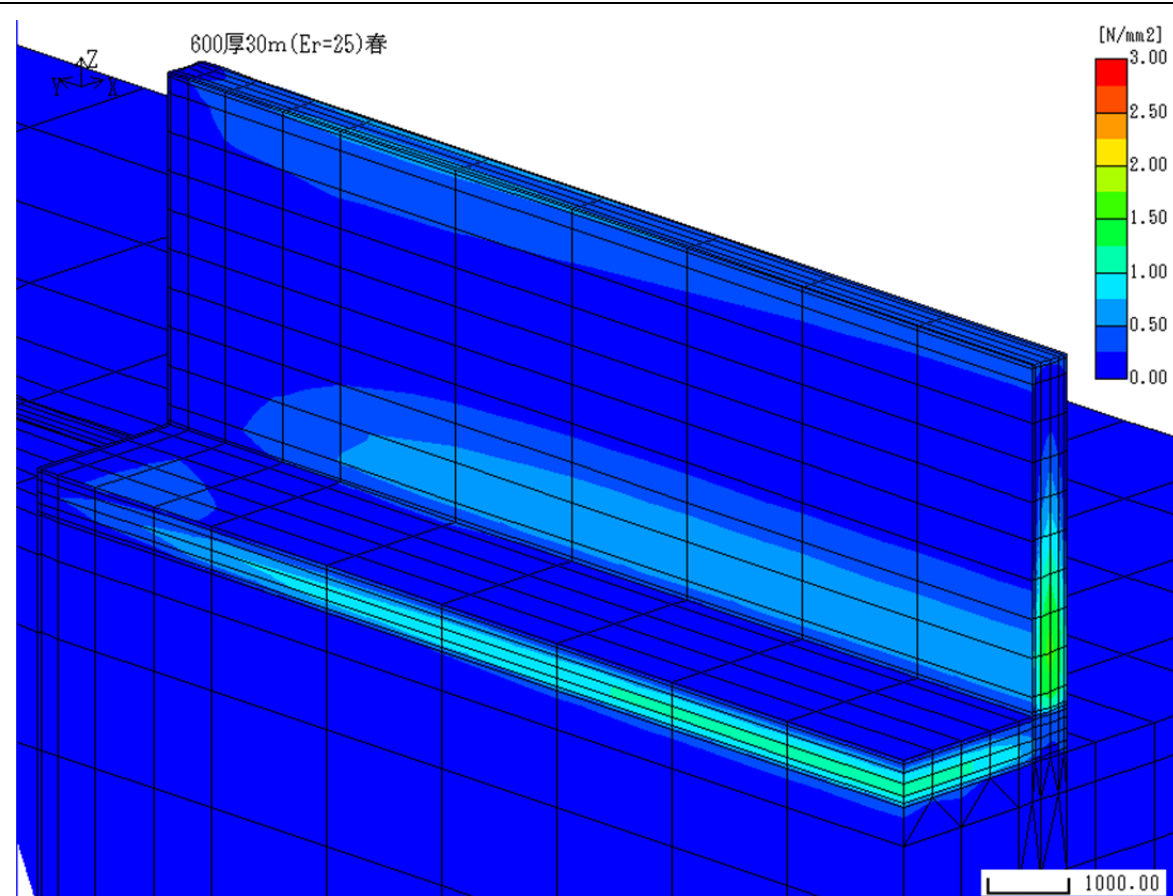
600厚 20m (Er=25) 春



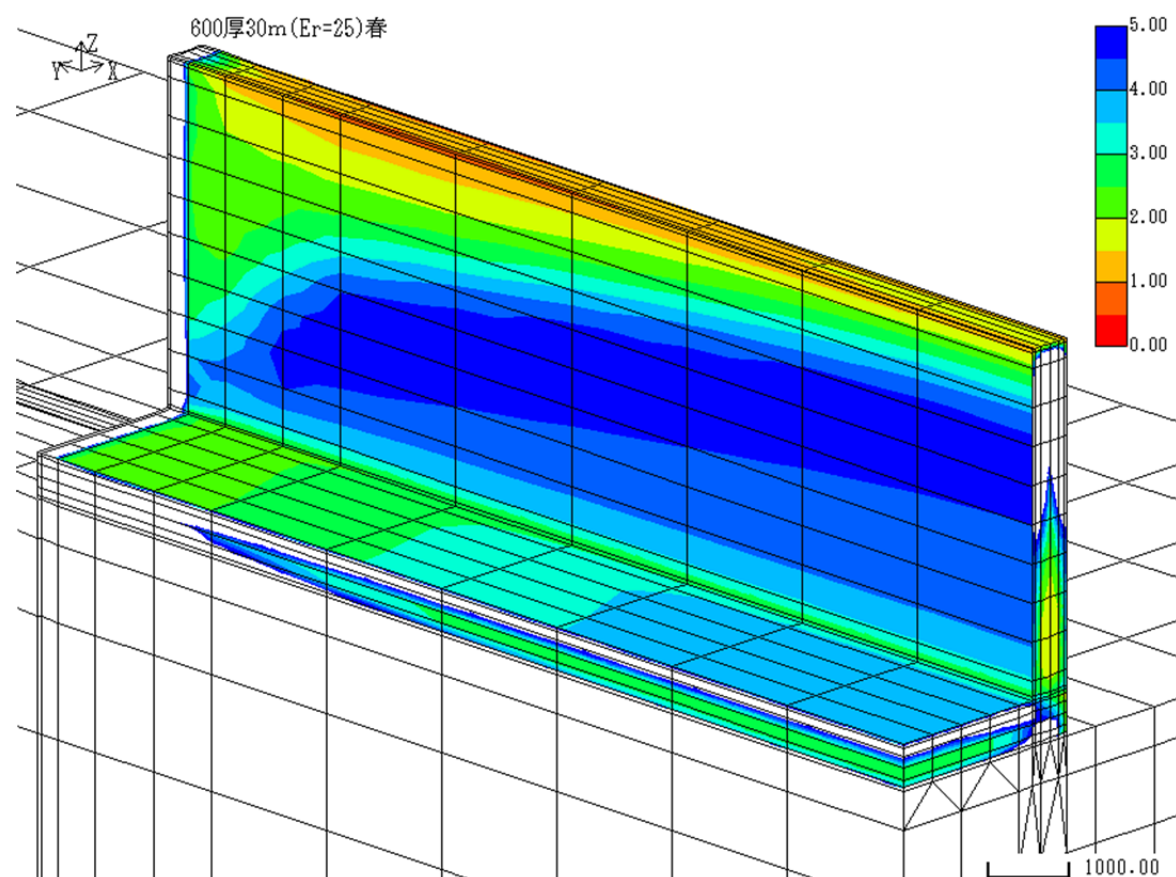
【壁厚 0.6m, 壁長さ 30m】 温度



【壁厚 0.6m, 壁長さ 30m】 応力



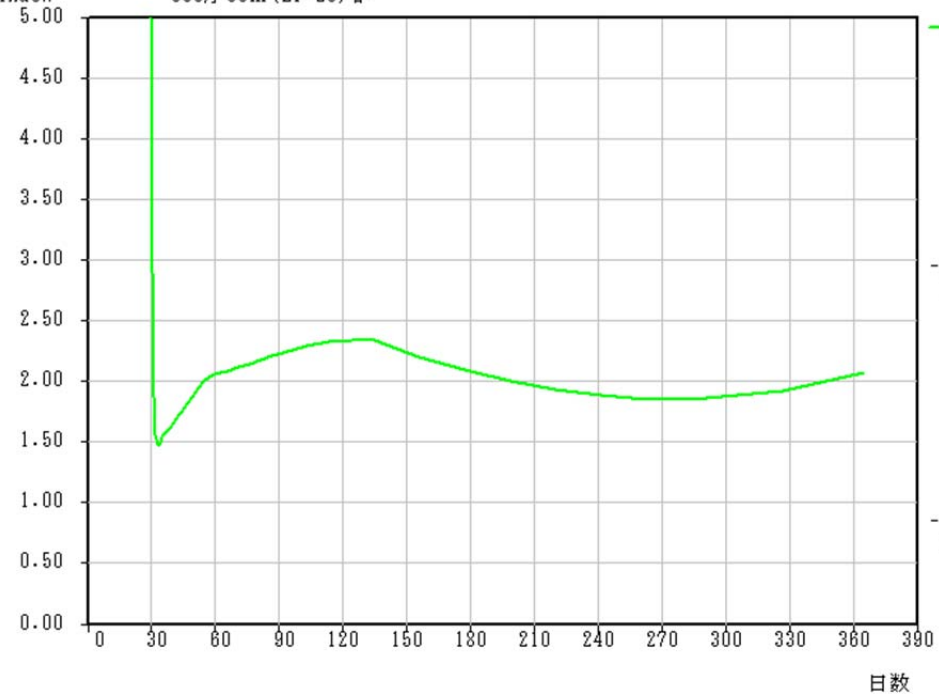
【壁厚 0.6，壁長さ 30m】 指数



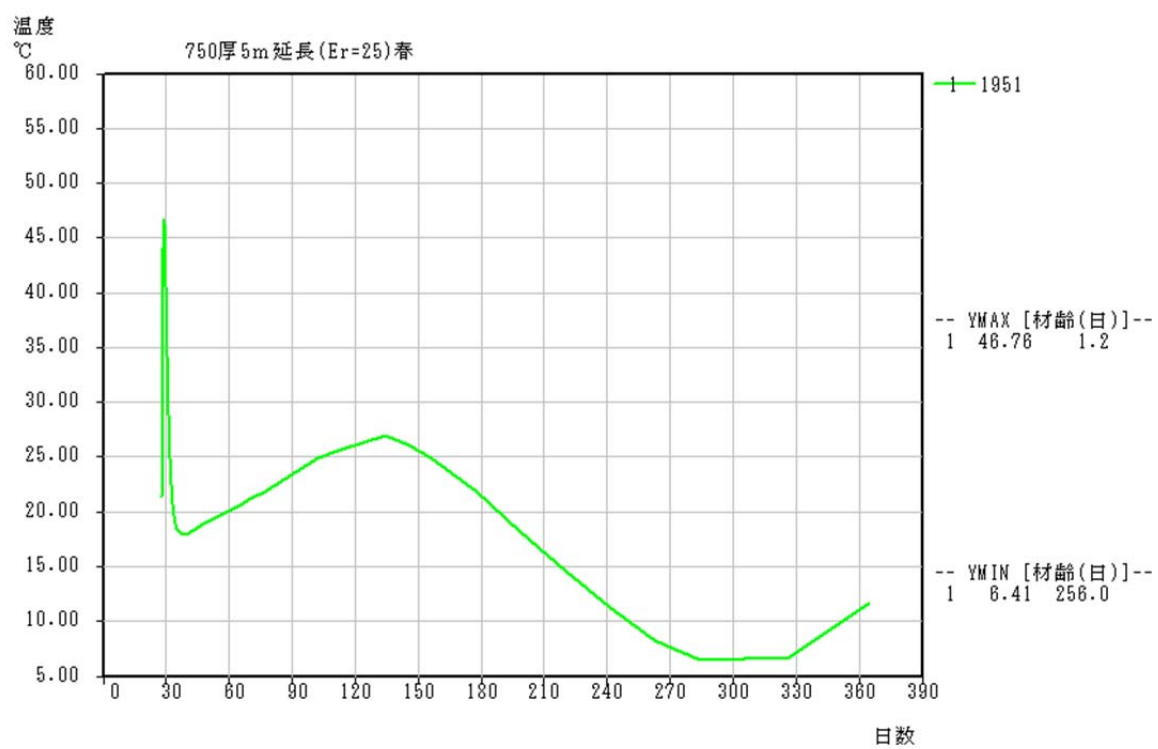
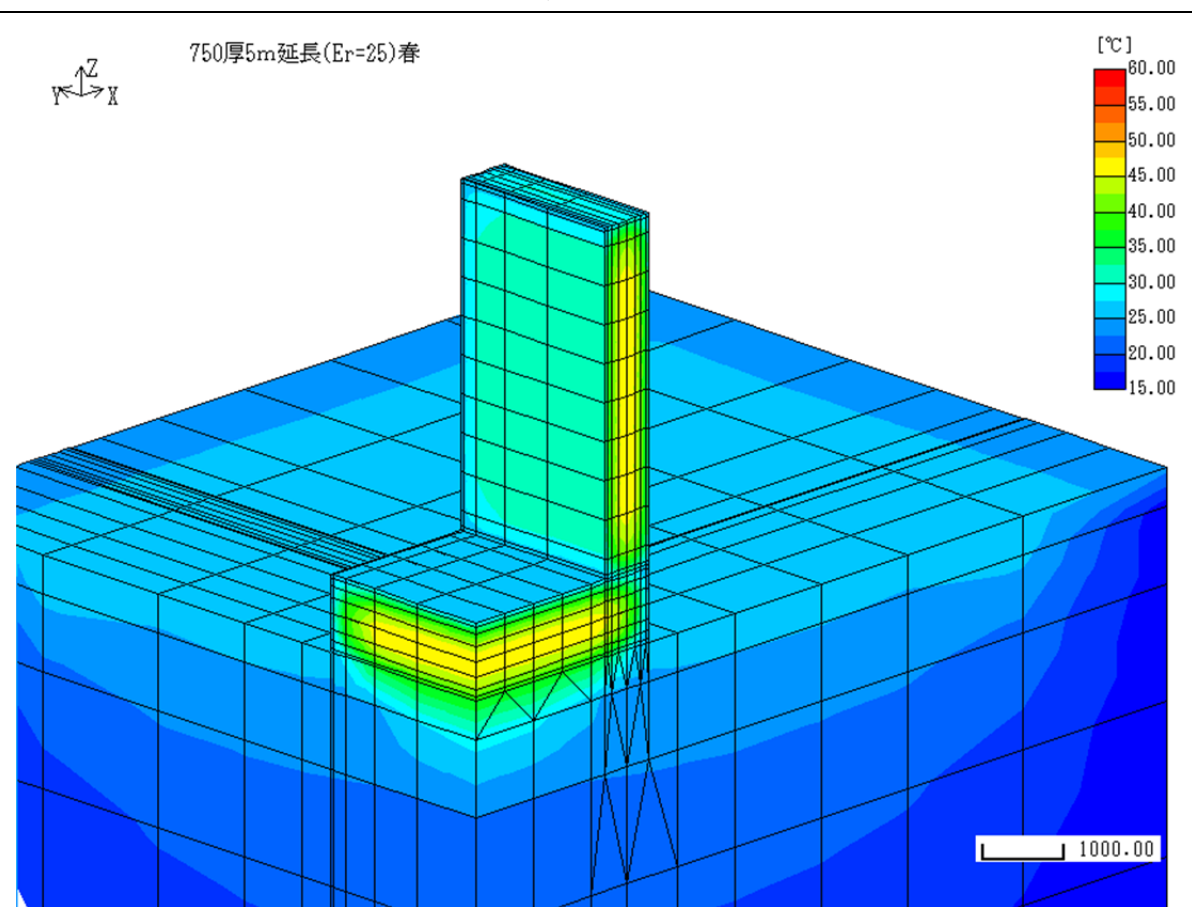
指数 (σ_y)

Index

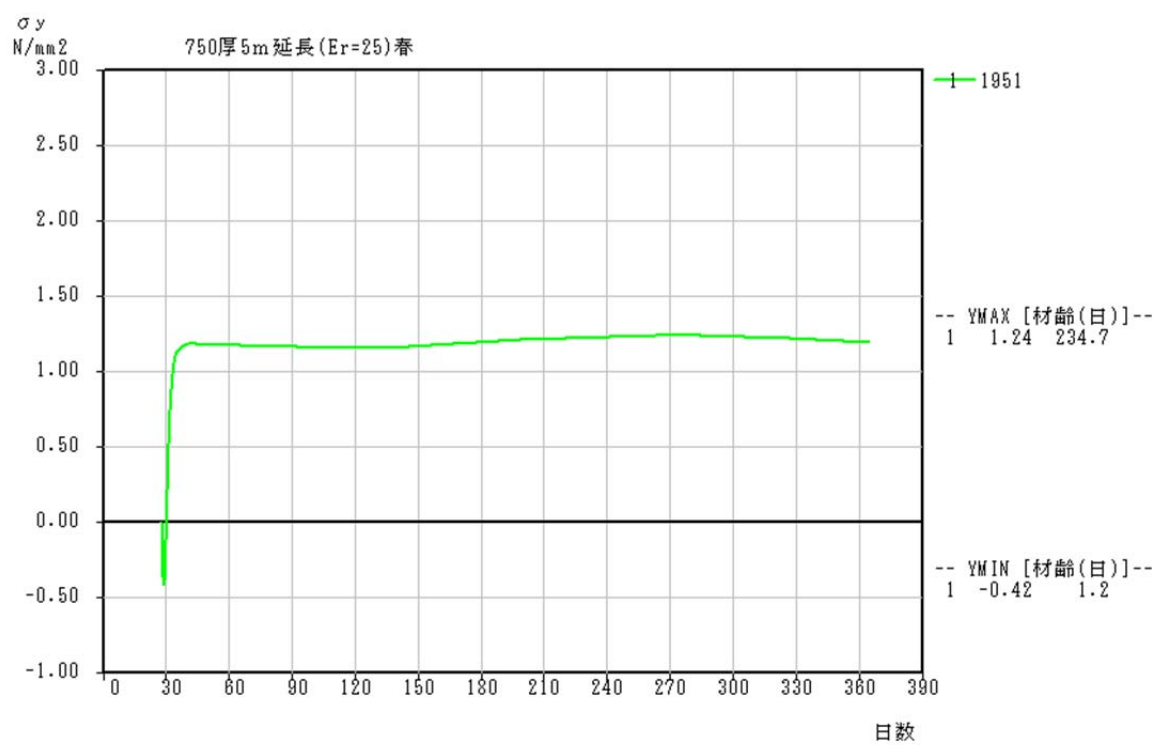
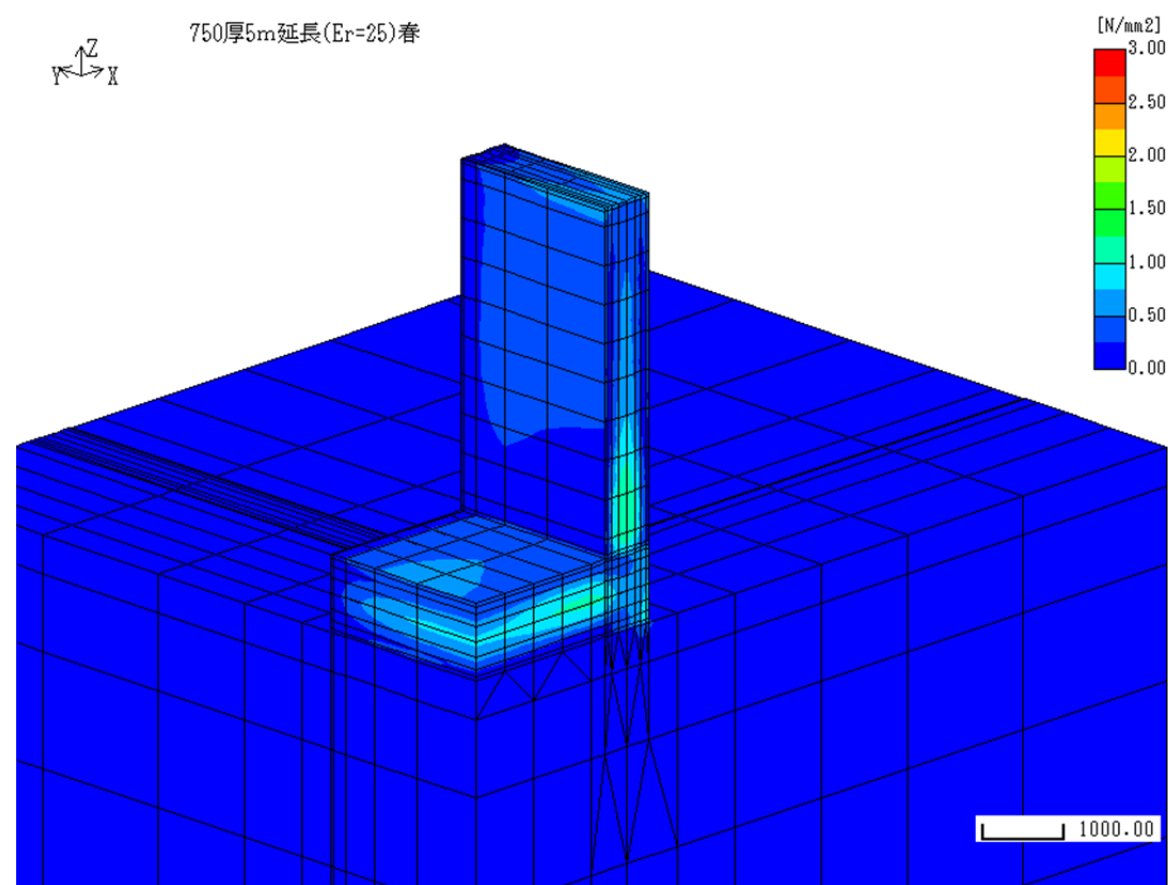
600厚 30m (Er=25) 春



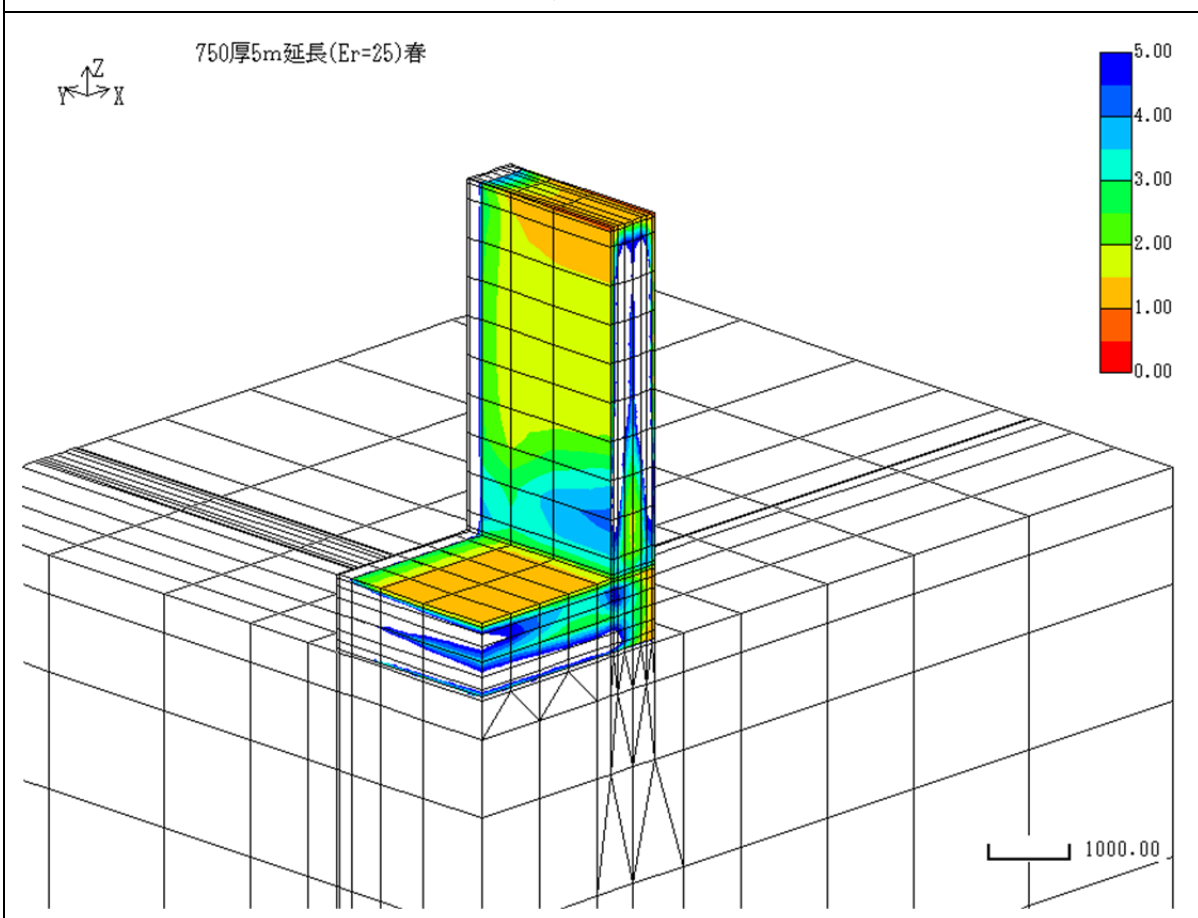
【壁厚 0.75m, 壁長さ 5m】 温度



【壁厚 0.75m，壁長さ 5m】 応力



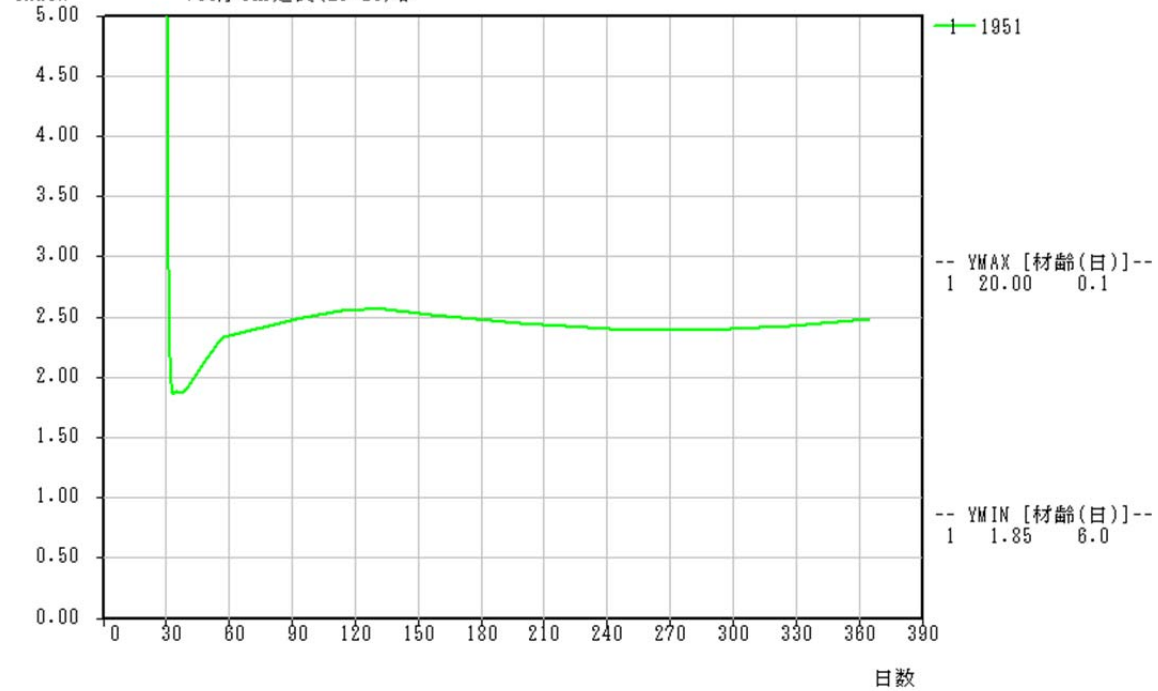
【壁厚 0.75m, 壁長さ 5m】 指数



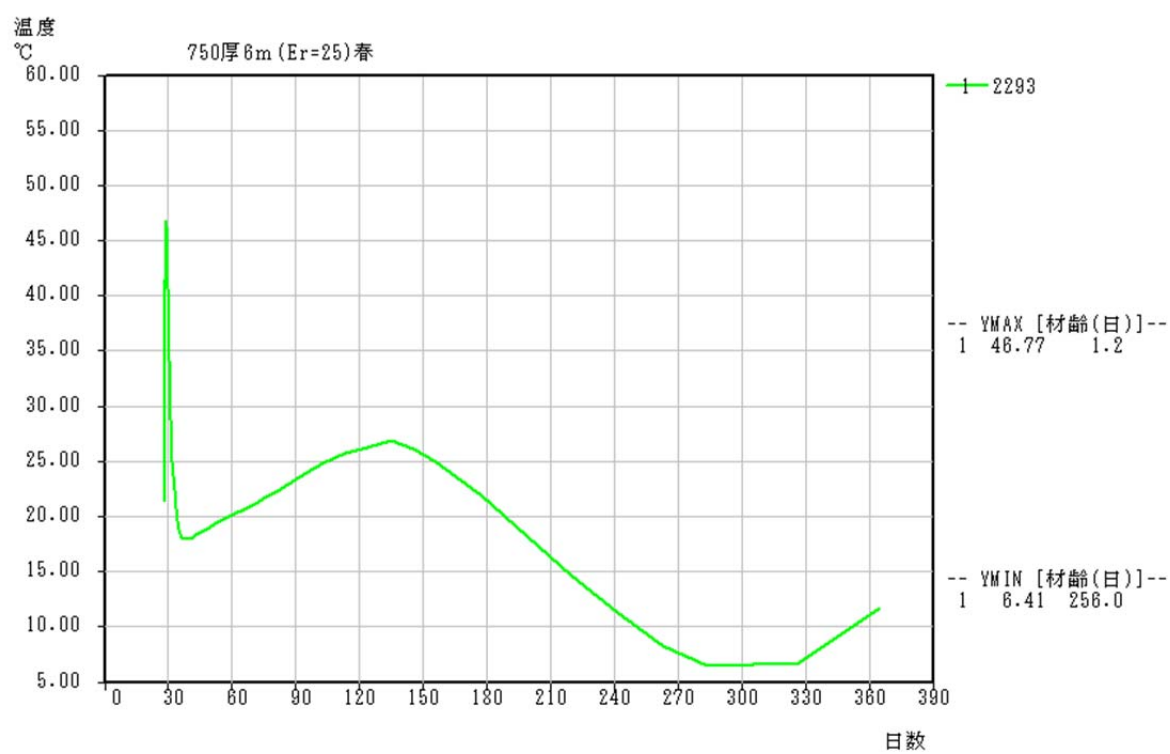
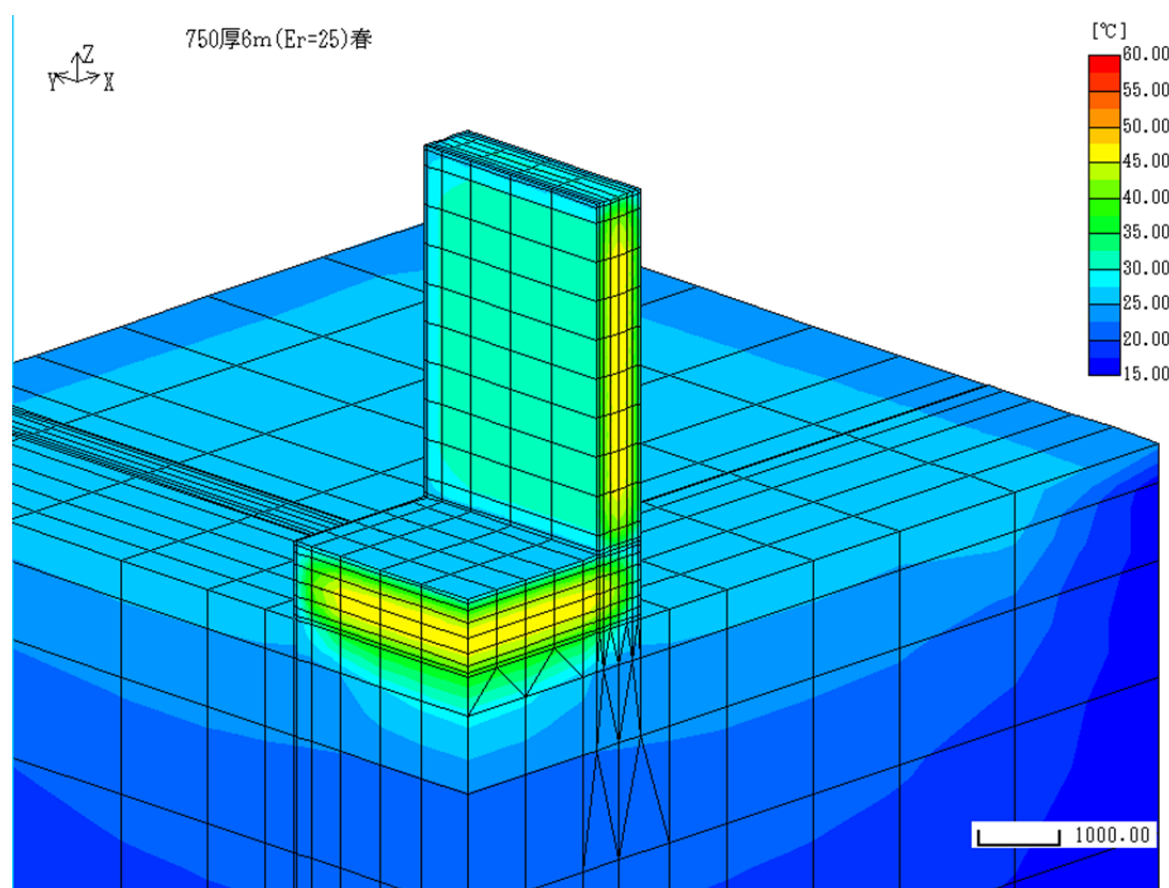
指数 (σ_y)

Index

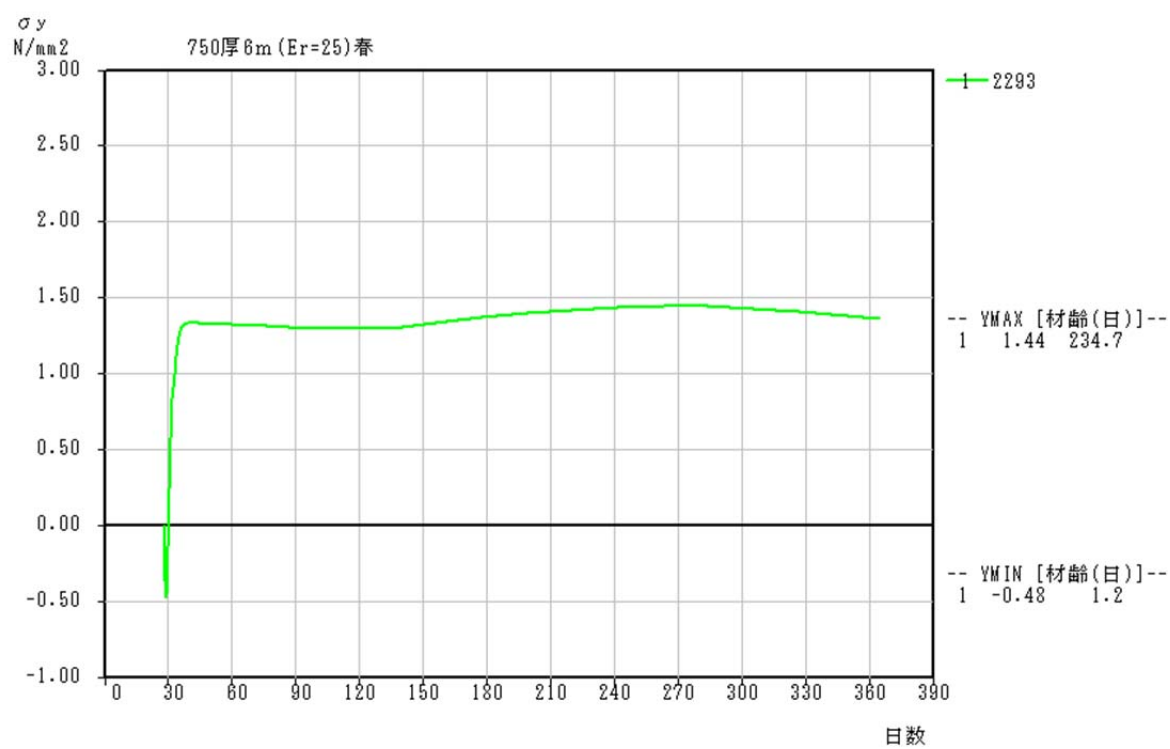
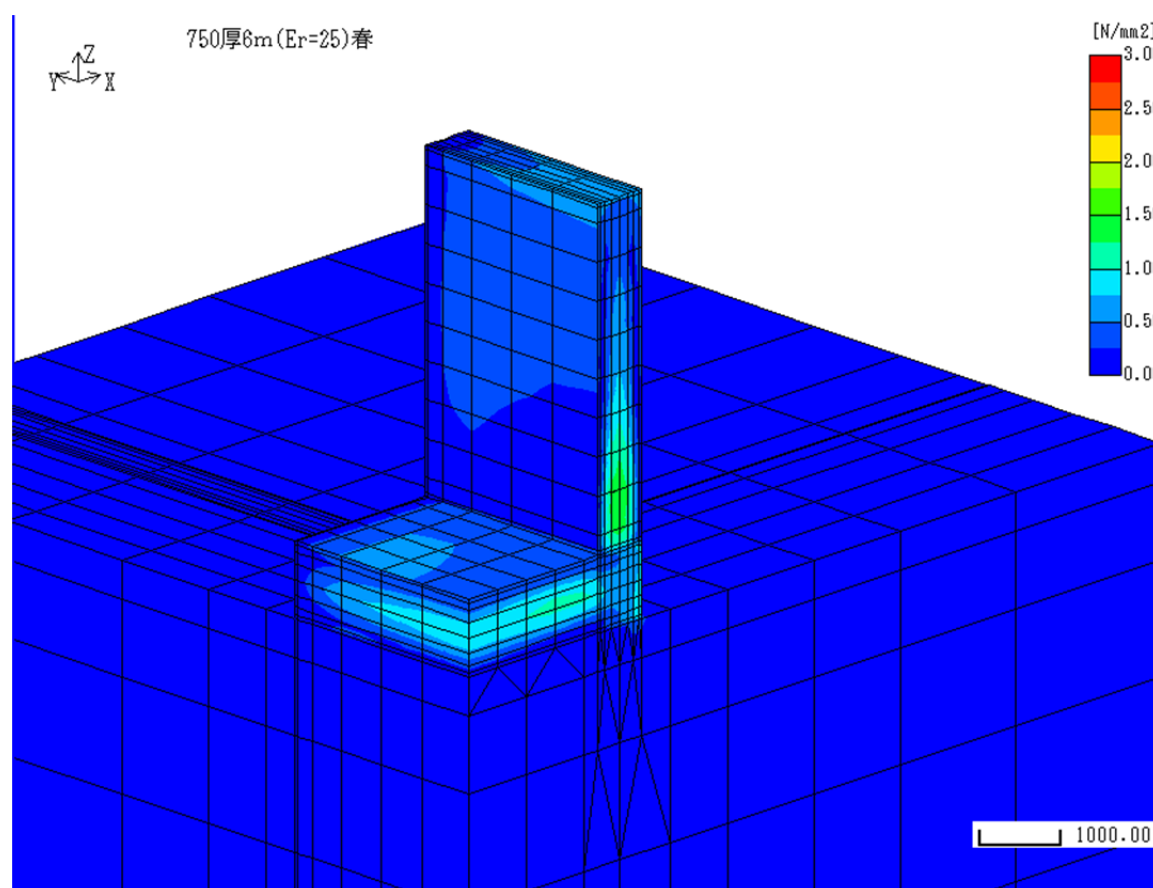
750厚5m延長(Er=25)春



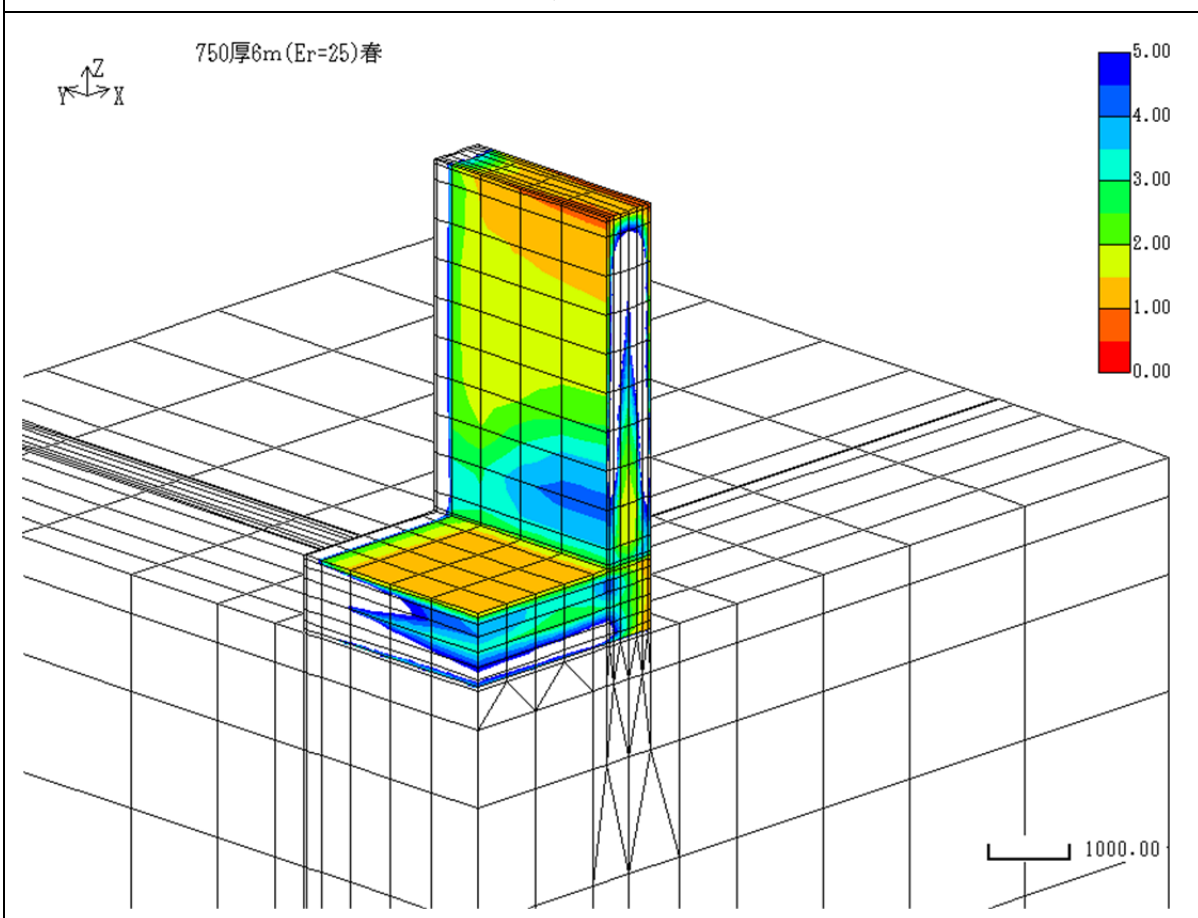
【壁厚 0.75m, 壁長さ 6m】 温度



【壁厚 0.75m, 壁長さ 6m】 応力

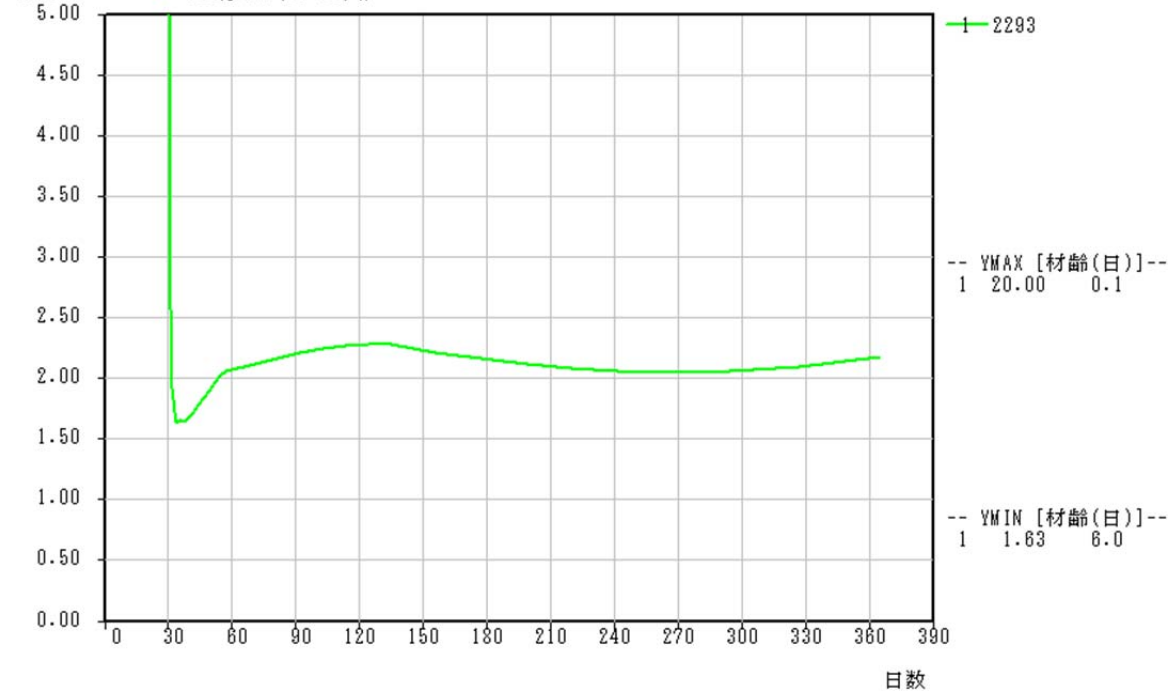


【壁厚 0.75m, 壁長さ 6m】 指数

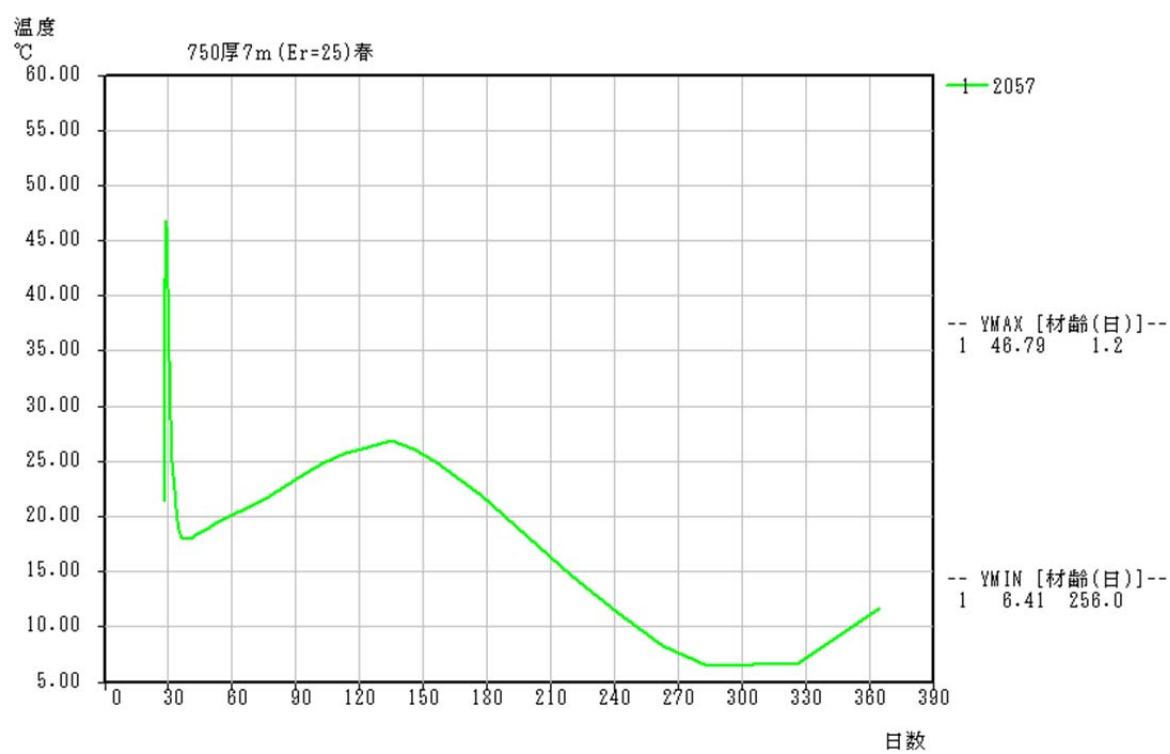
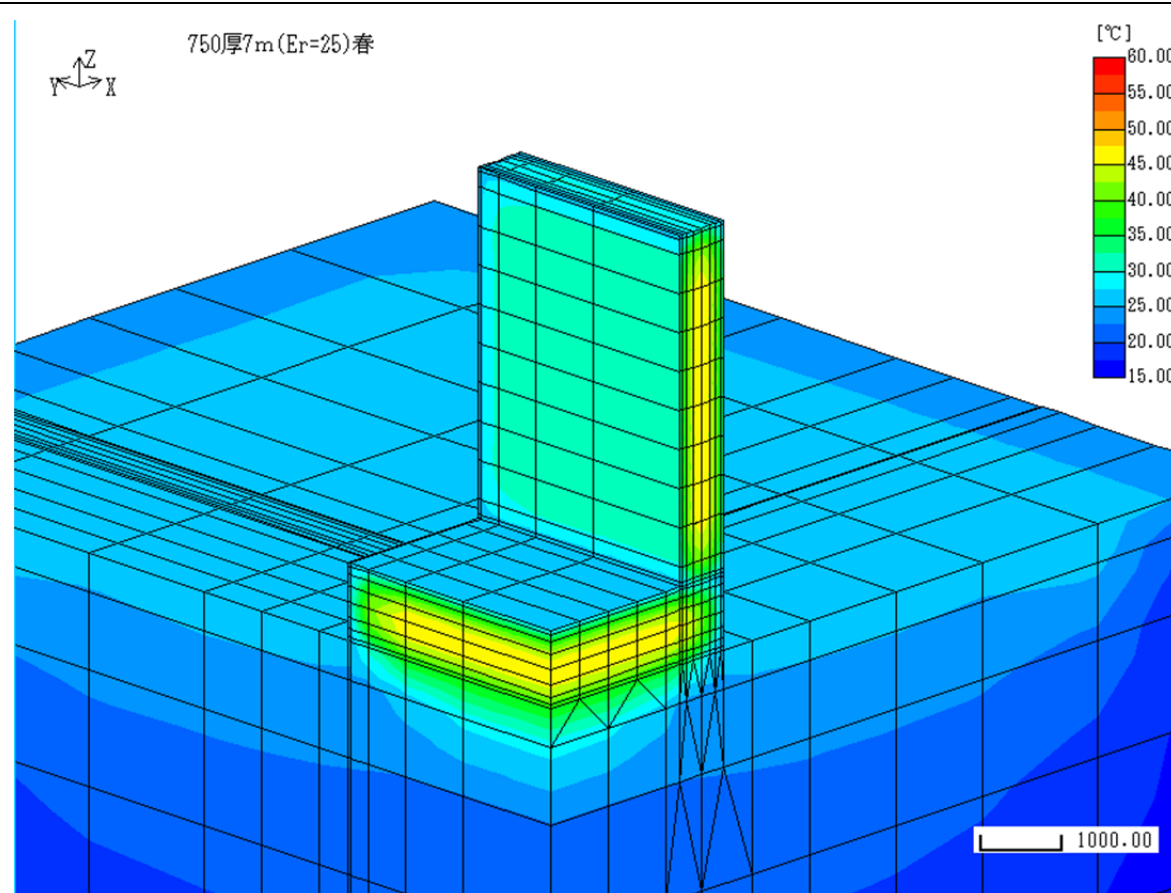


指数 (σ_y)

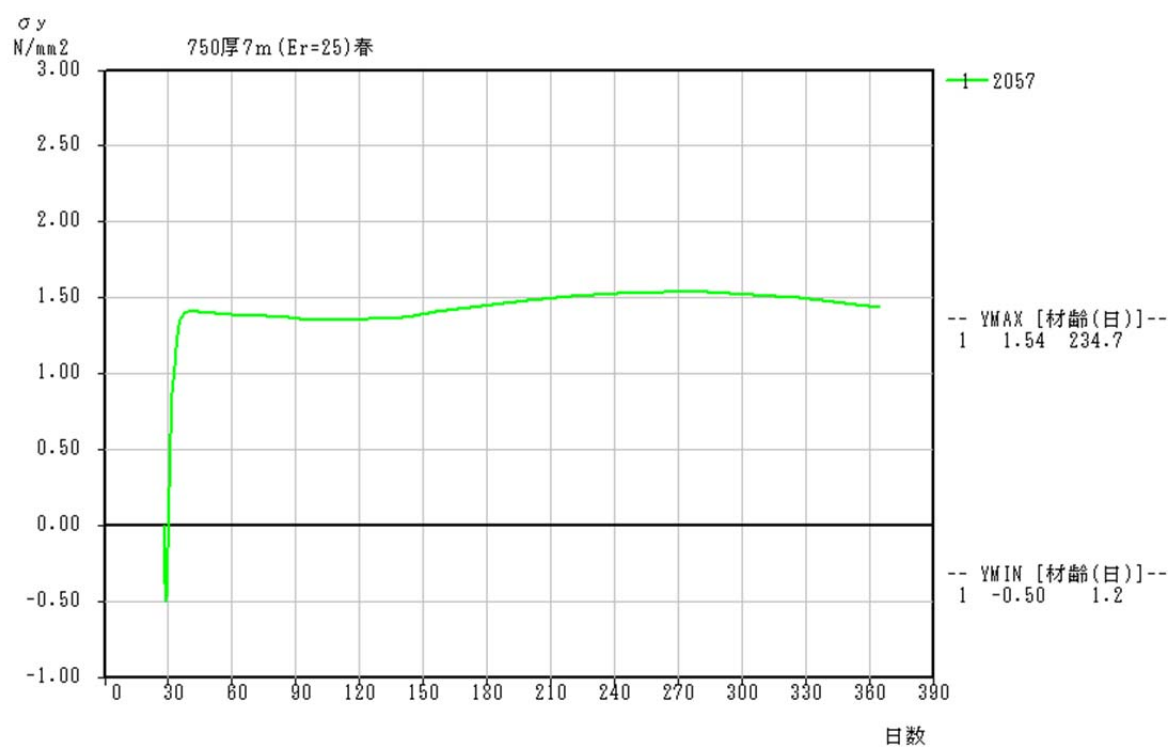
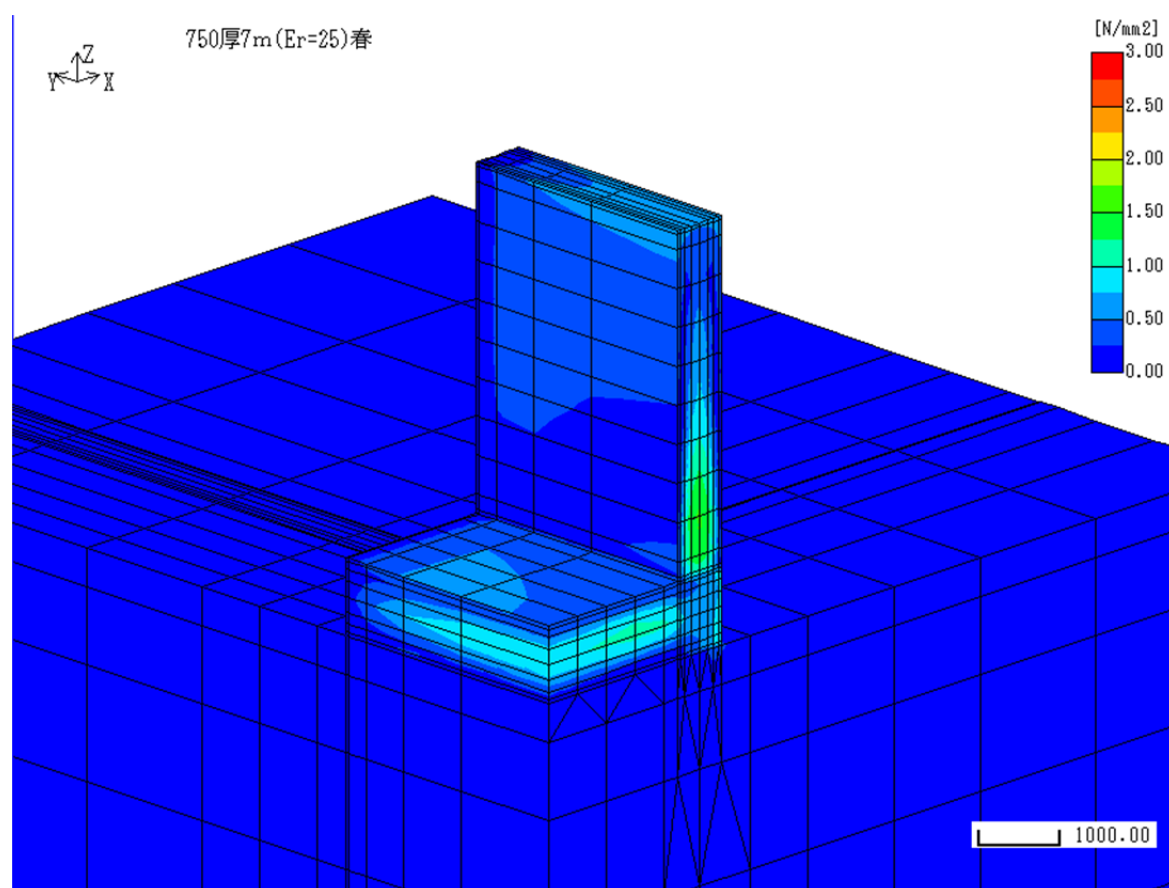
Index 750厚6m (Er=25) 春



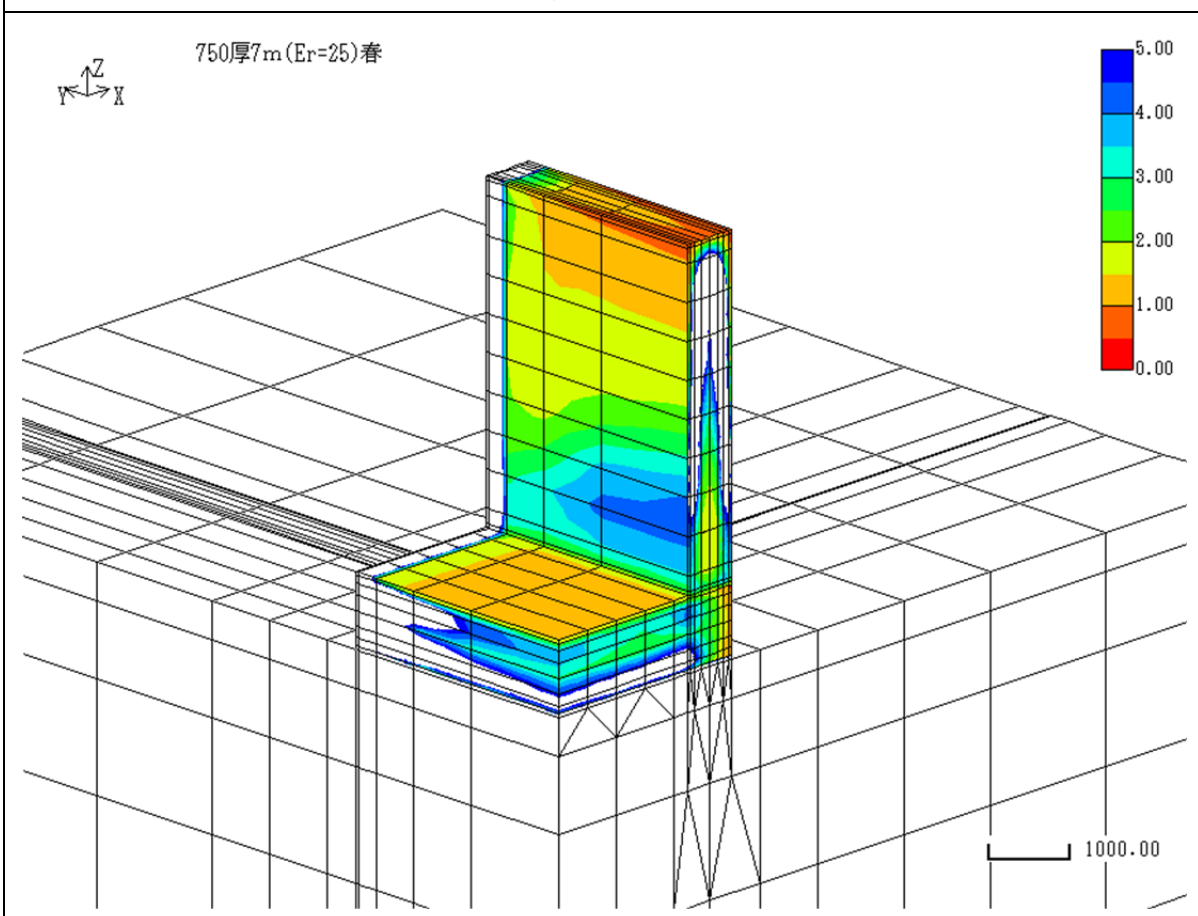
【壁厚 0.75m, 壁長さ 7m】 温度



【壁厚 0.75m, 壁長さ 7m】 応力

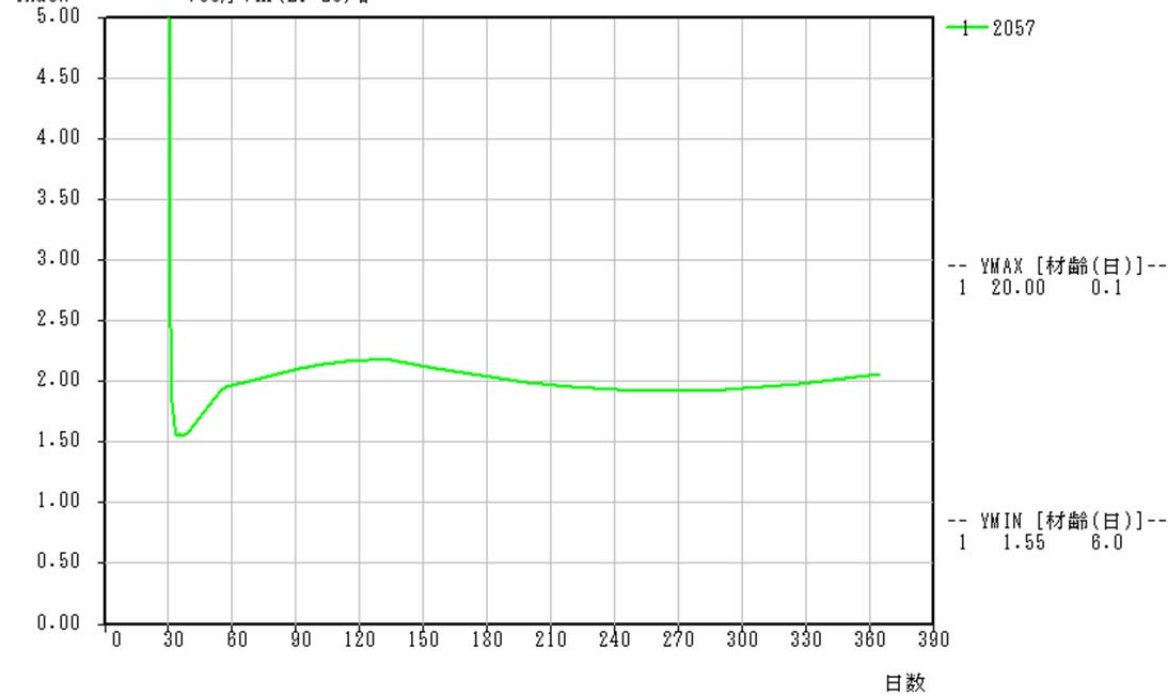


【壁厚 0.75m, 壁長さ 7m】 指数

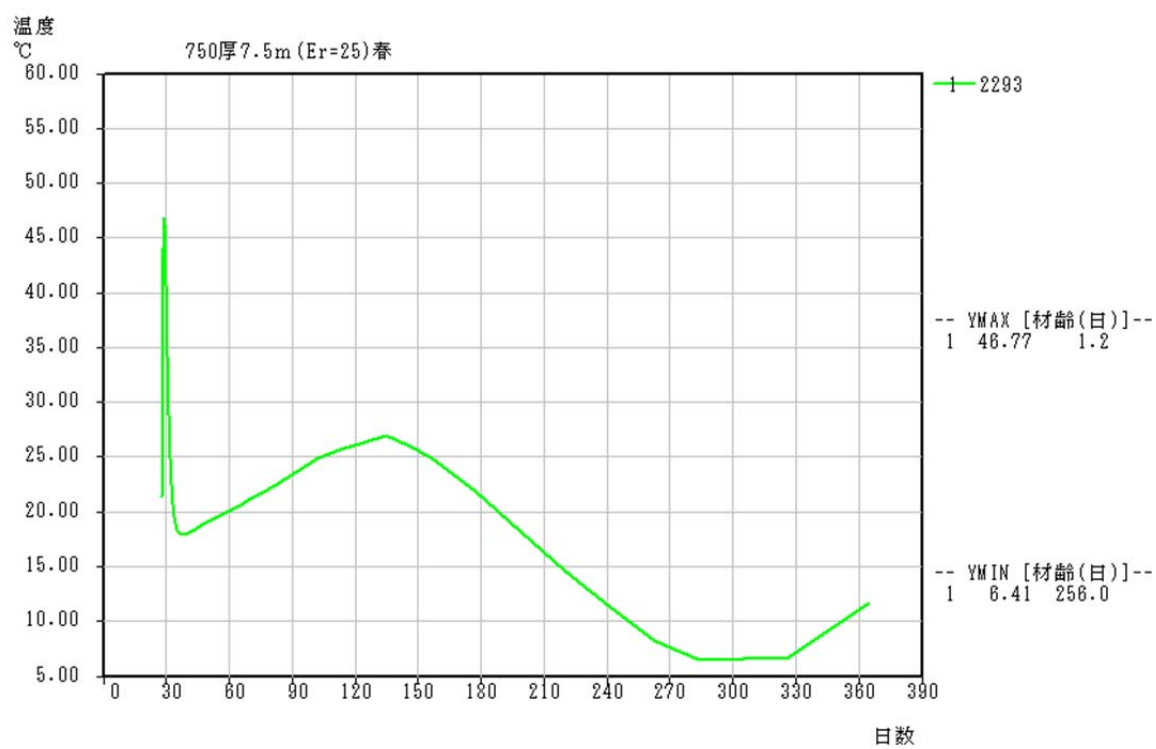
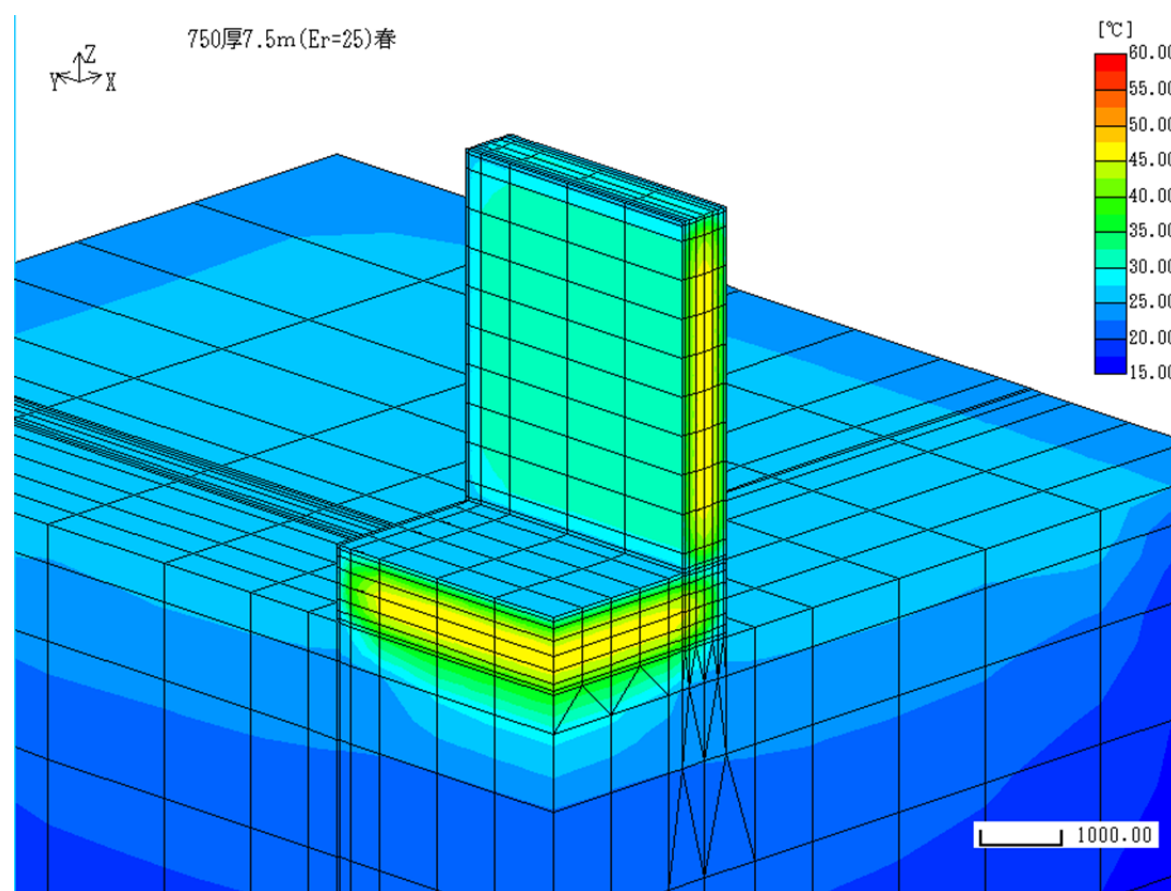


指数 (σ_y)

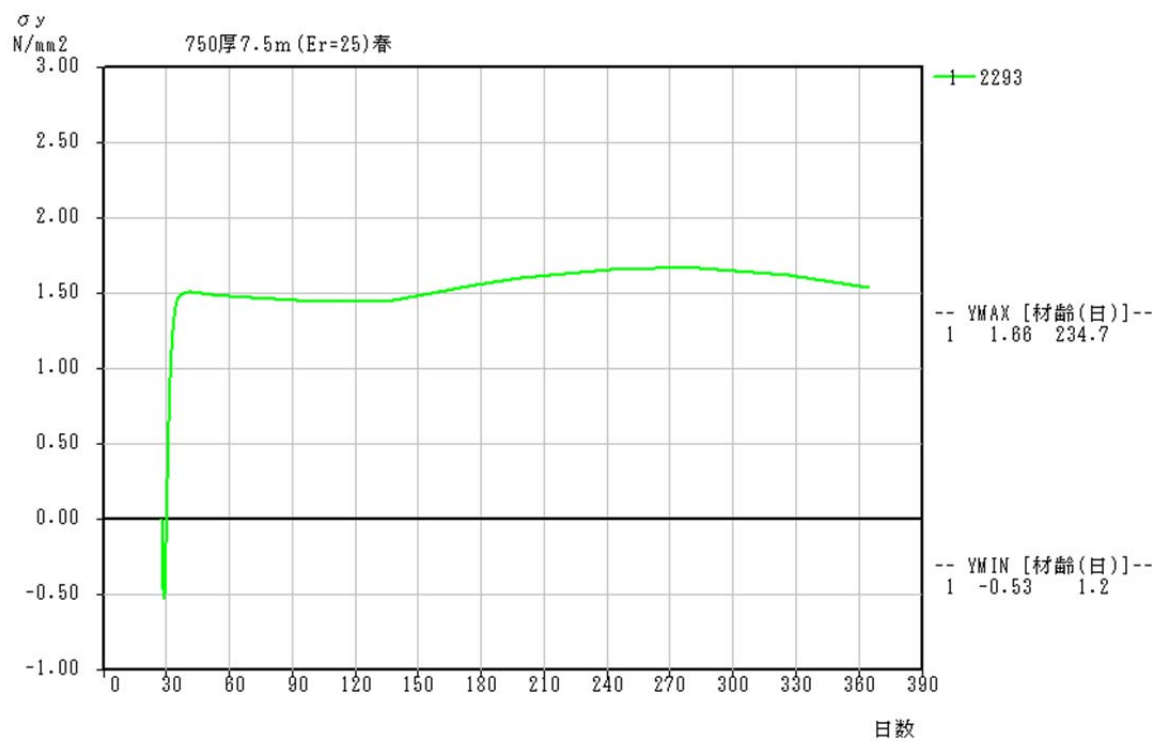
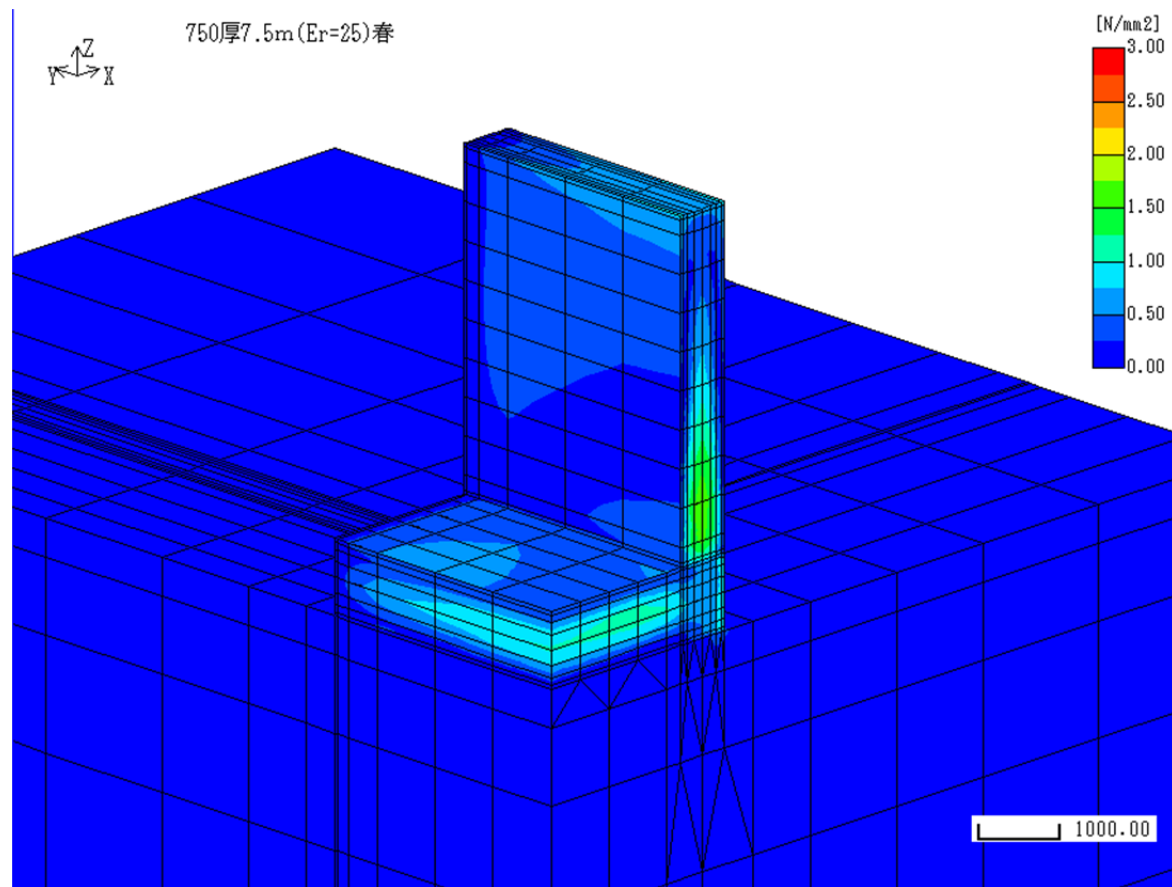
Index 750厚7m (Er=25) 春



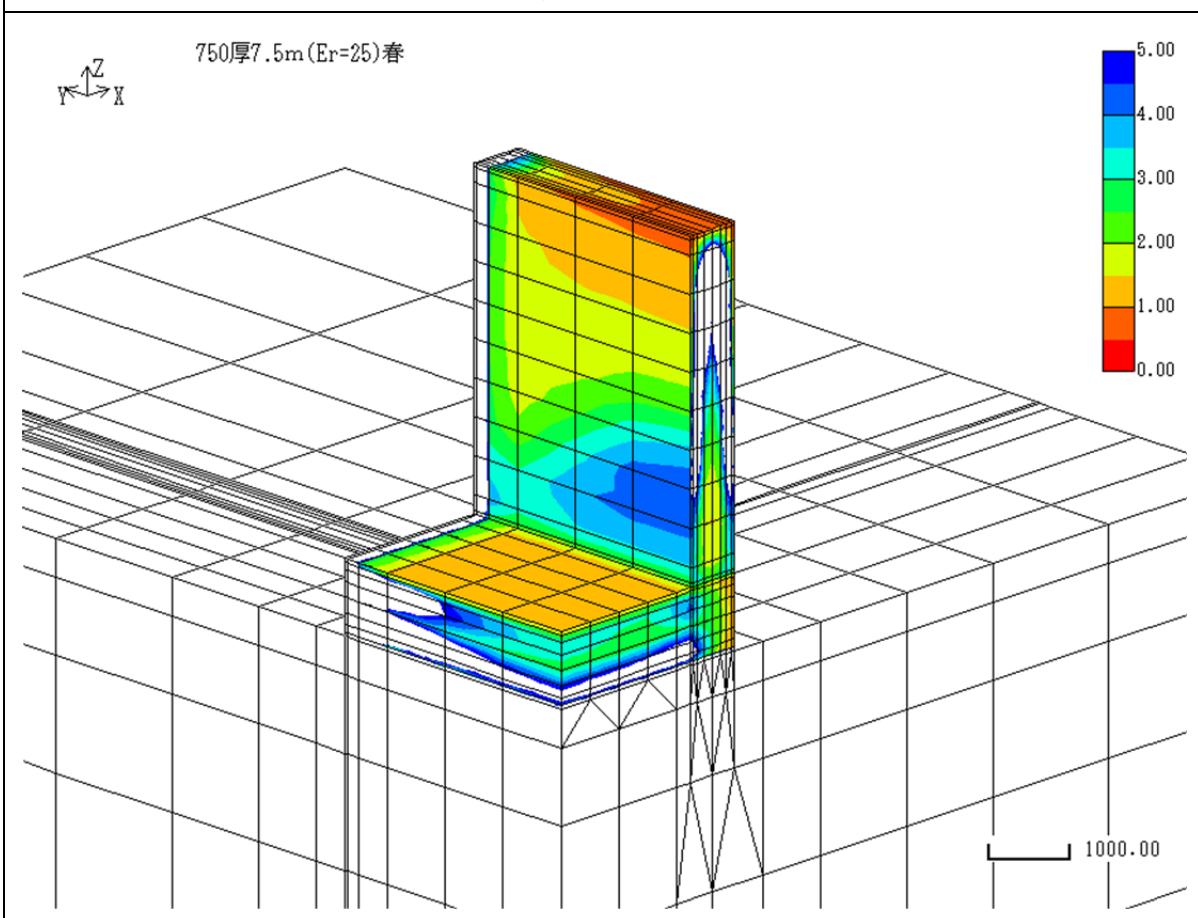
【壁厚 0.75m, 壁長さ 7.5m】 温度



【壁厚 0.75m, 壁長さ 7.5m】 応力



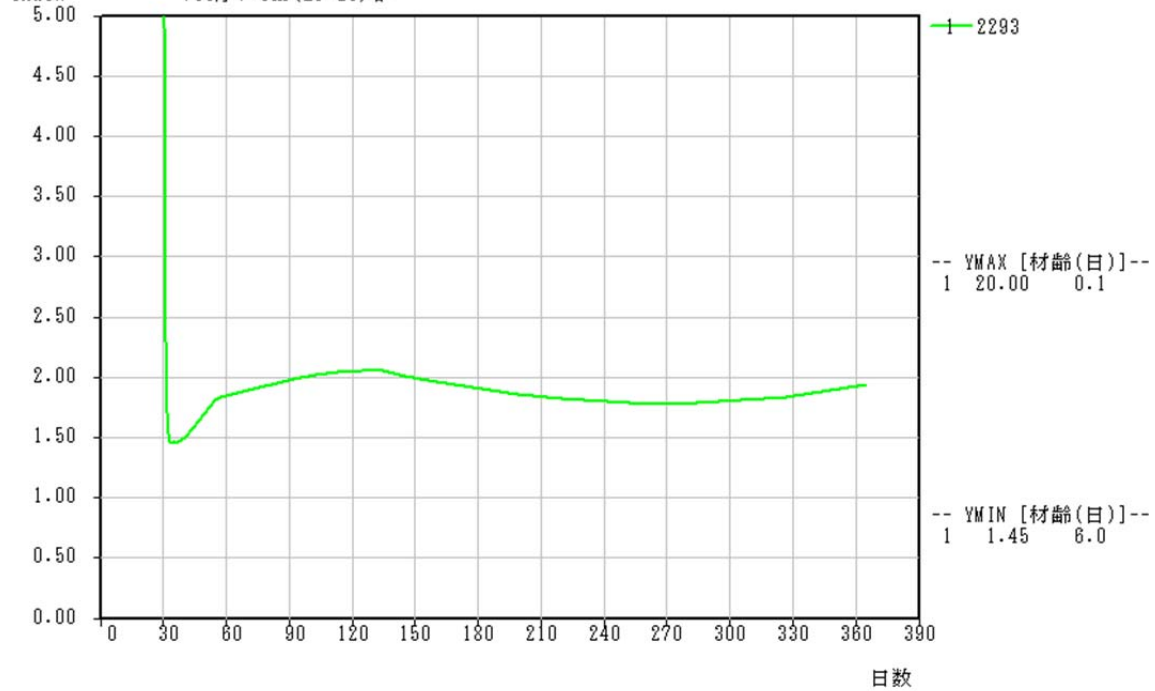
【壁厚 0.75m, 壁長さ 7.5m】 指数



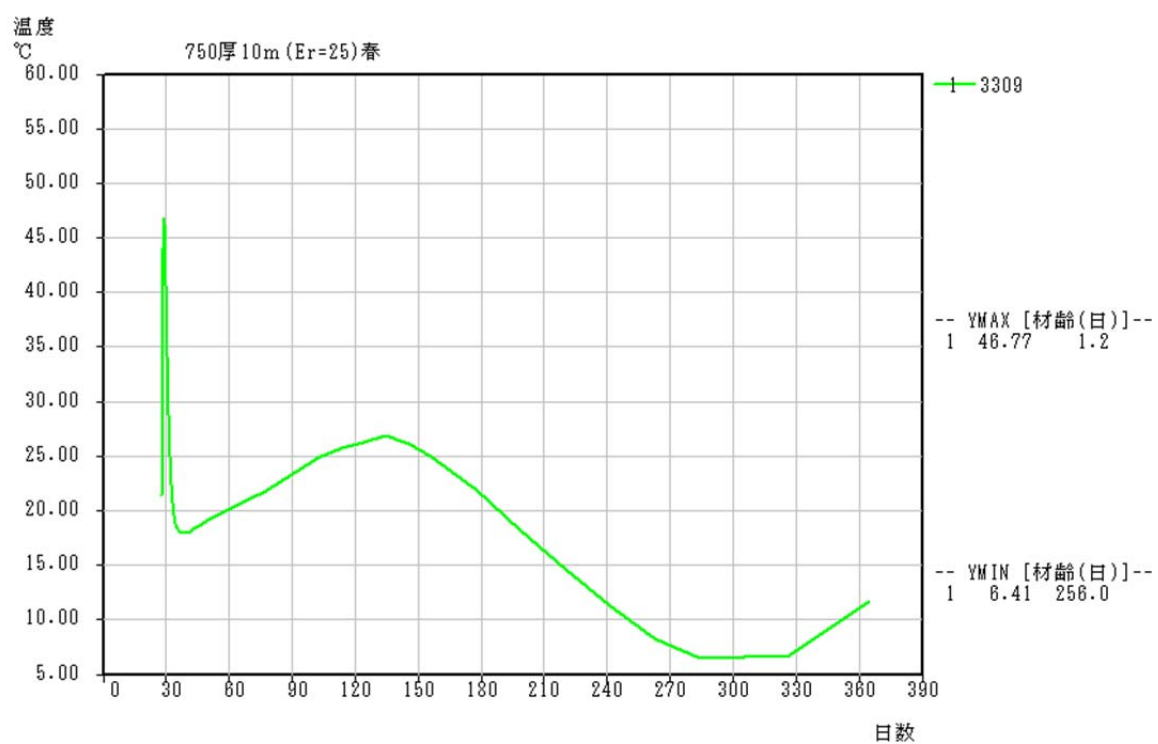
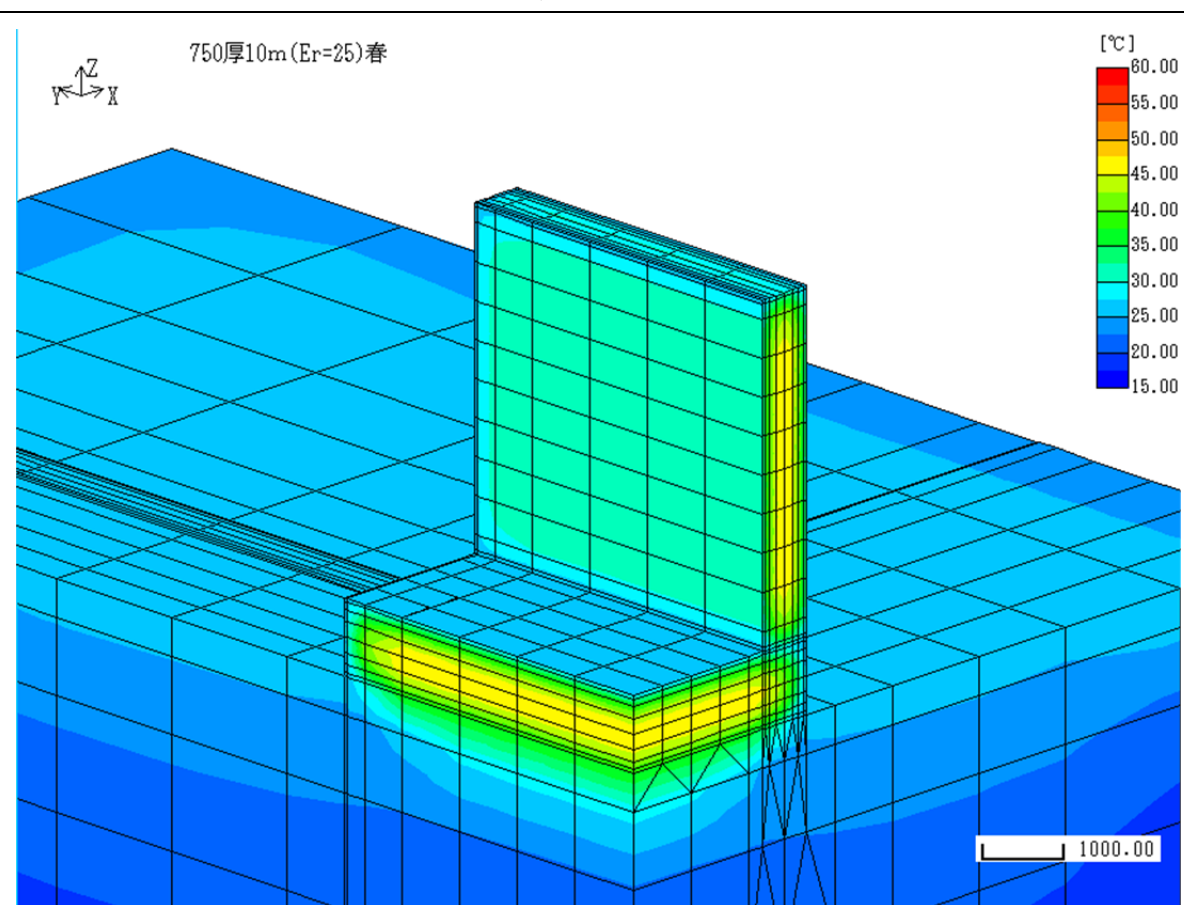
指数 (σ_y)

Index

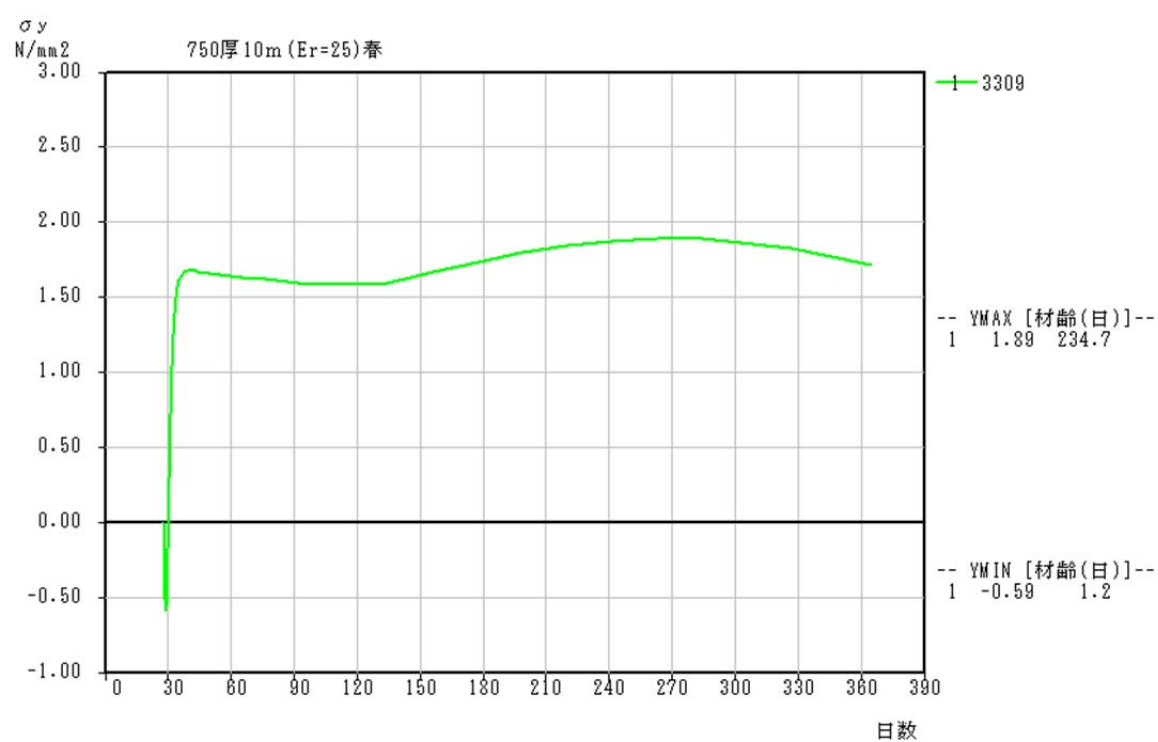
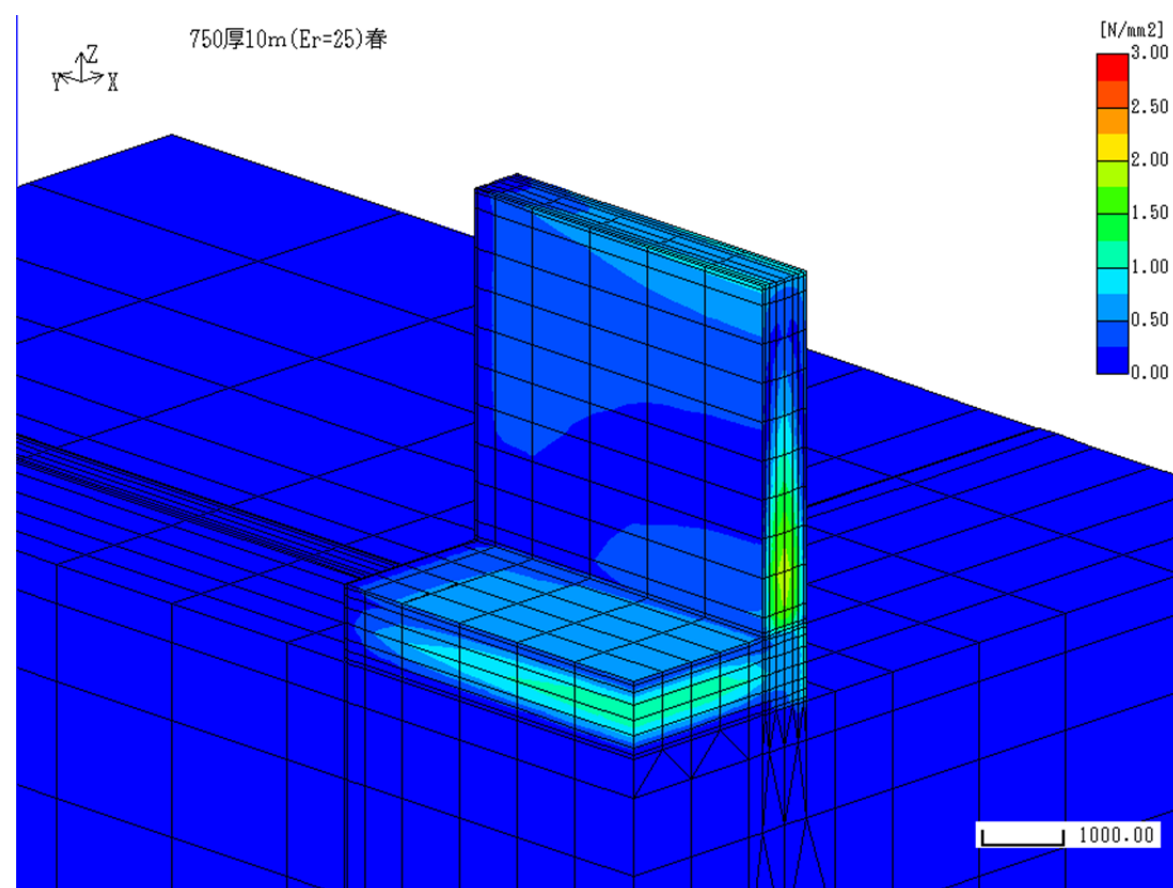
750厚7.5m (Er=25) 春



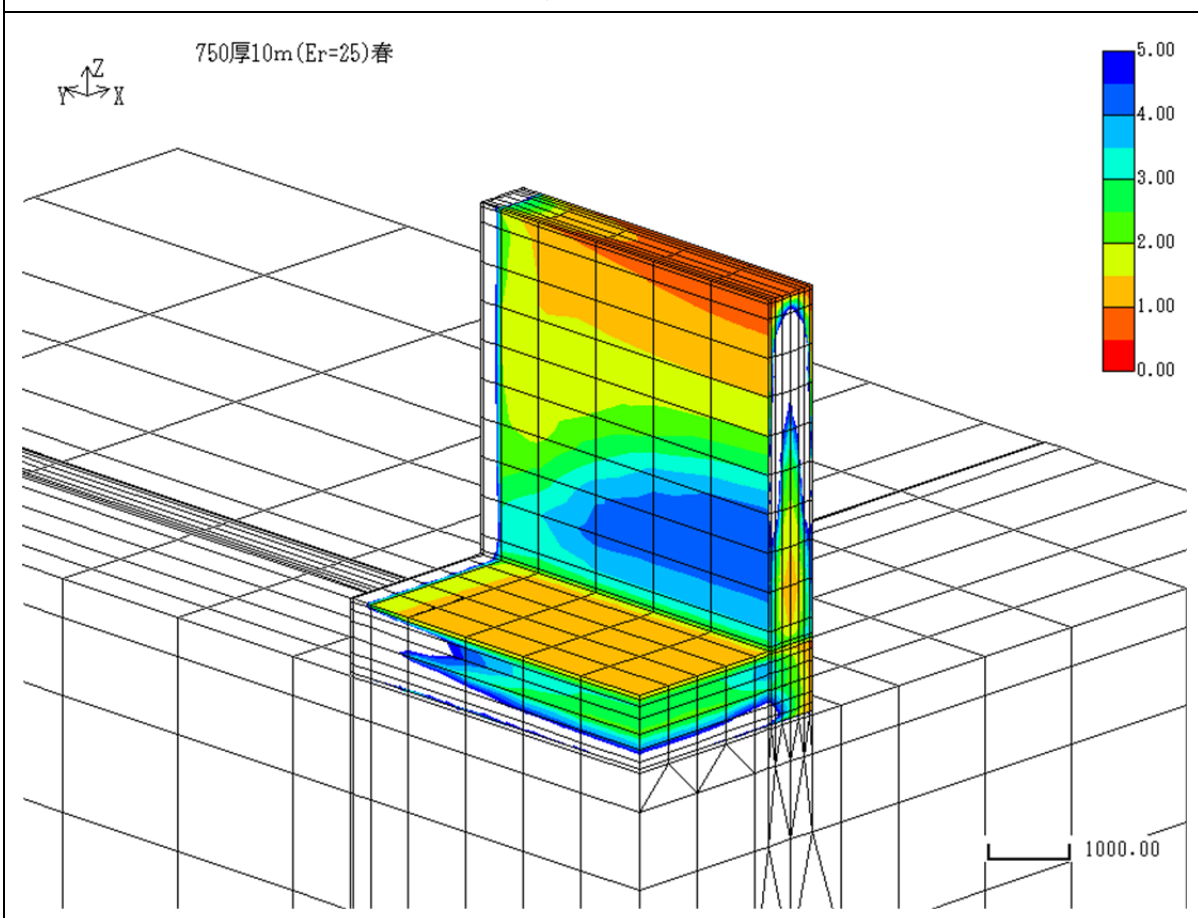
【壁厚 0.75m, 壁長さ 10m】 温度



【壁厚 0.75m, 壁長さ 10m】 応力



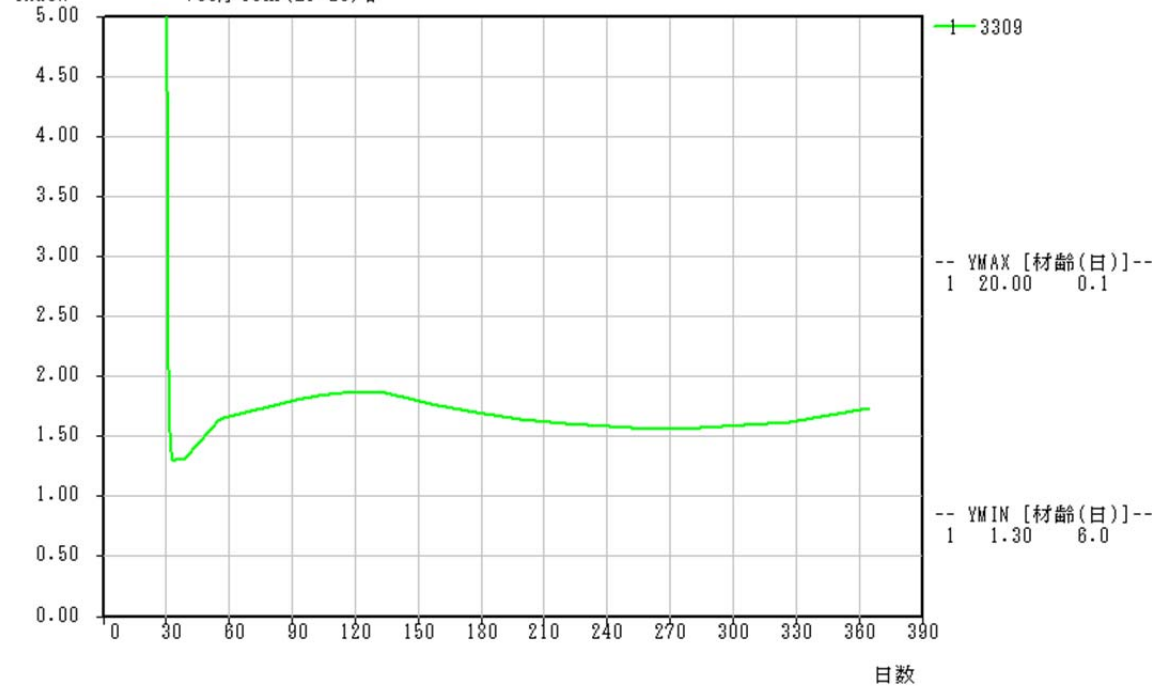
【壁厚 0.75m, 壁長さ 10m】 指数



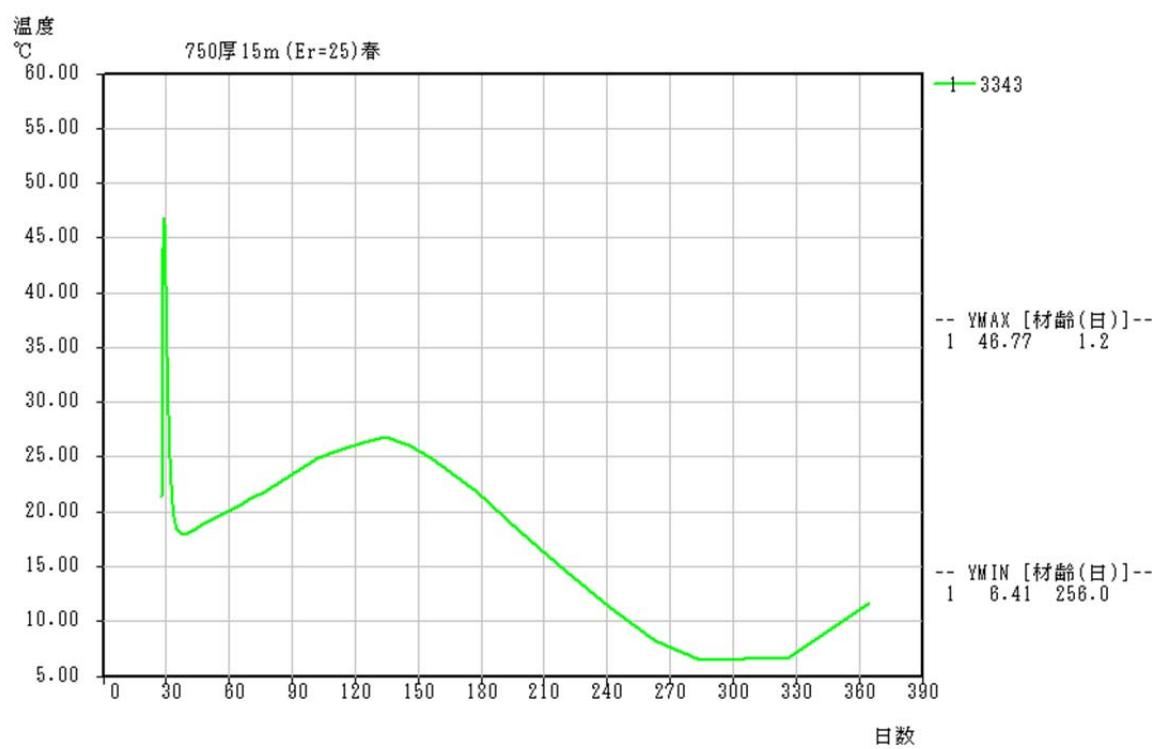
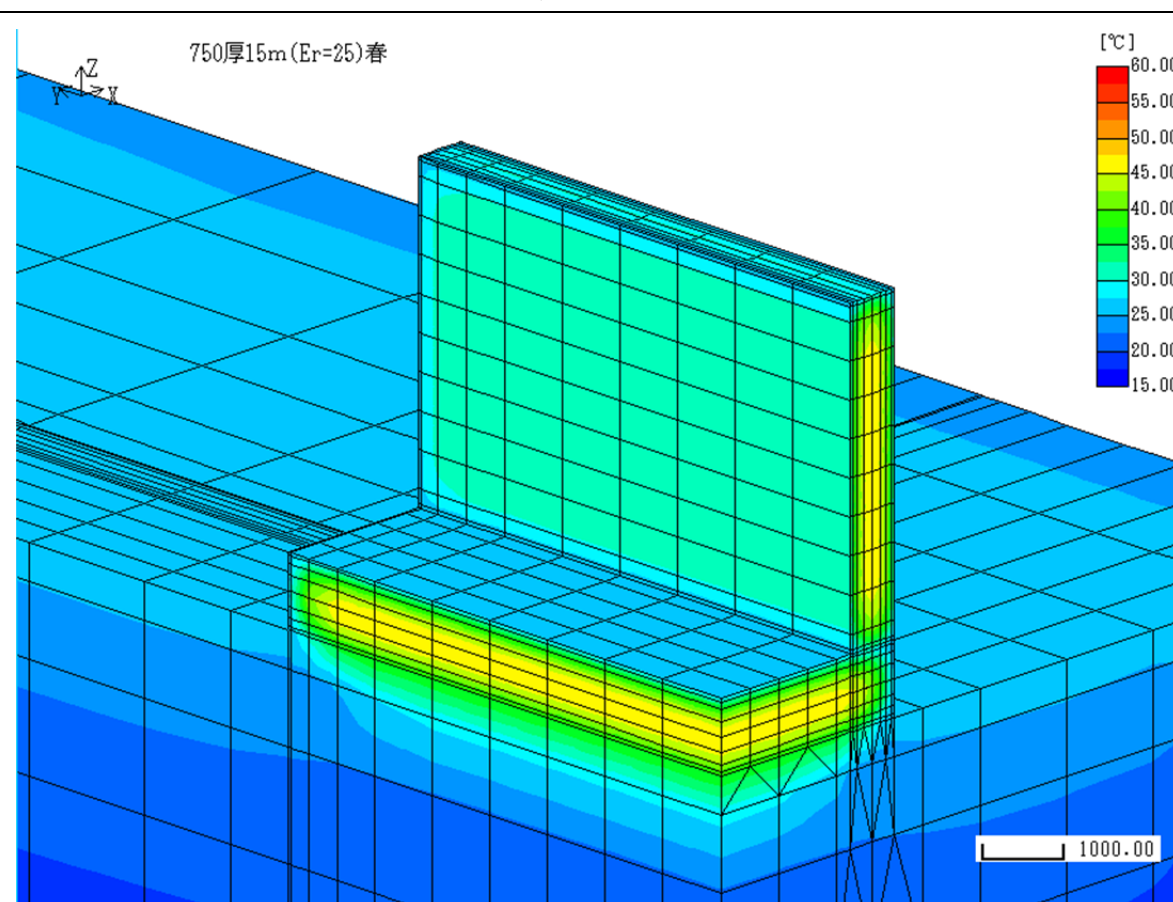
指数 (σ_y)

Index

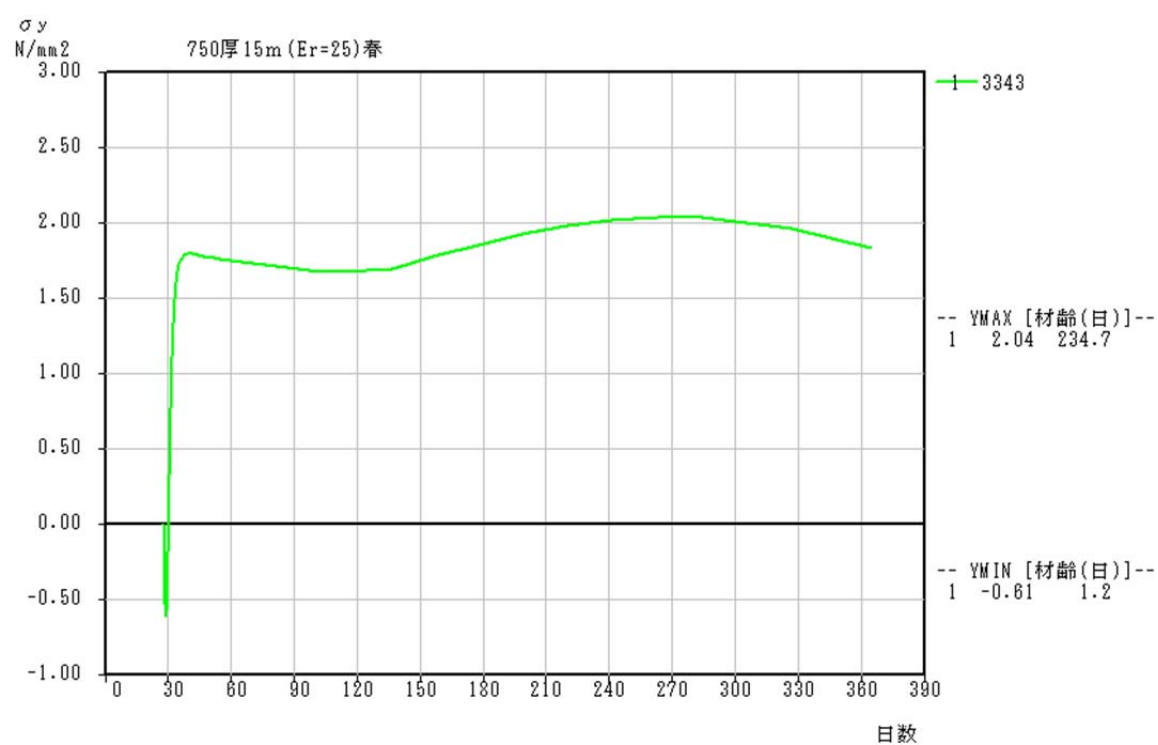
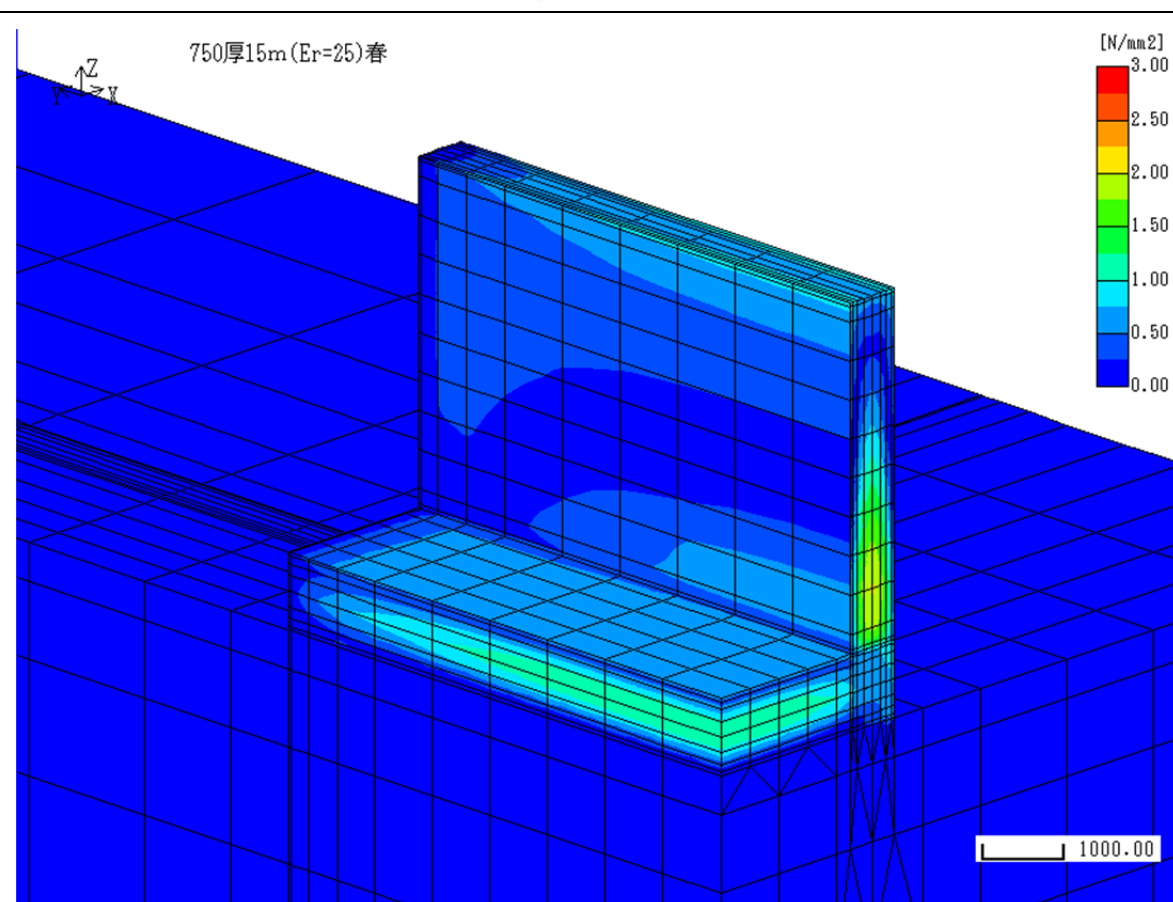
750厚10m(Er=25)春



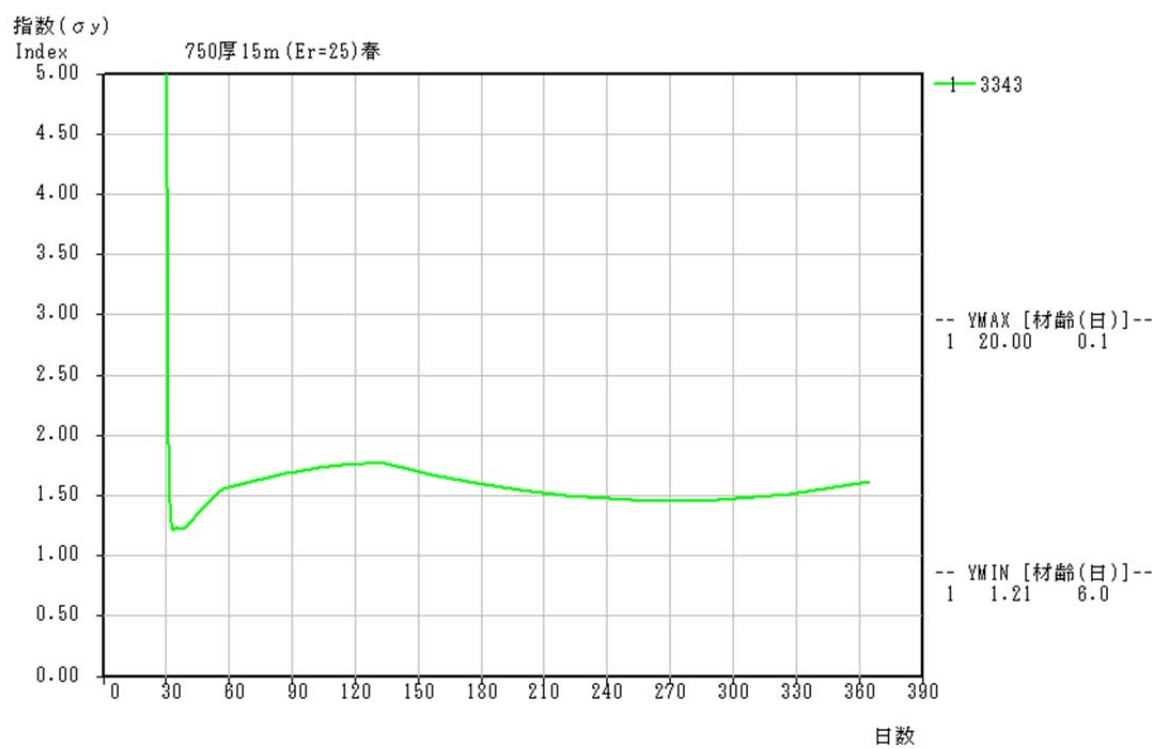
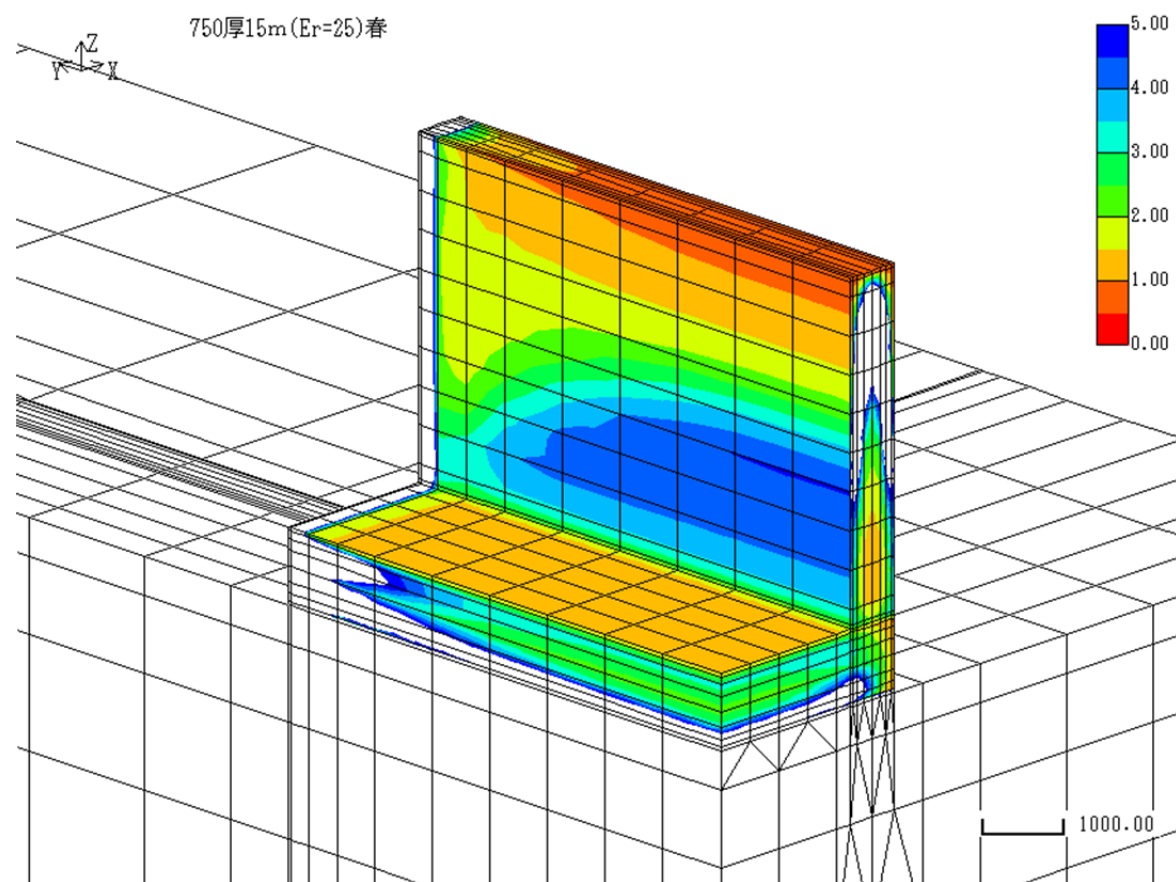
【壁厚 0.75m, 壁長さ 15m】 温度



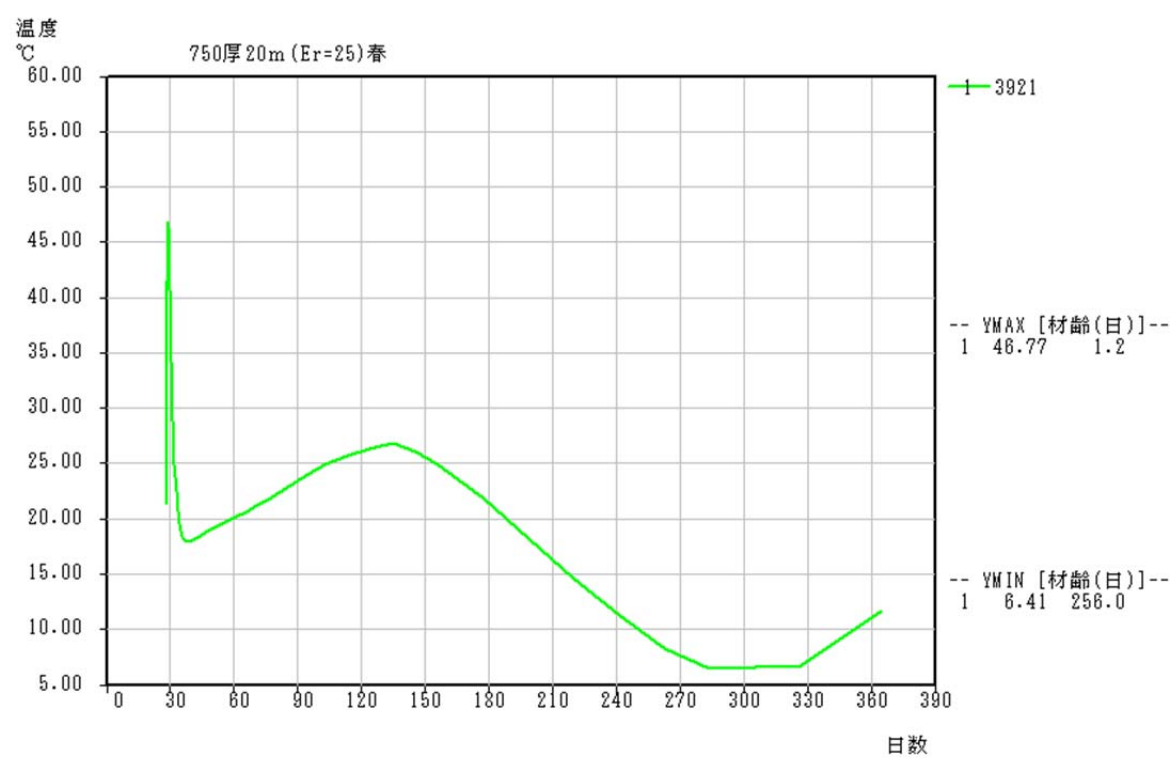
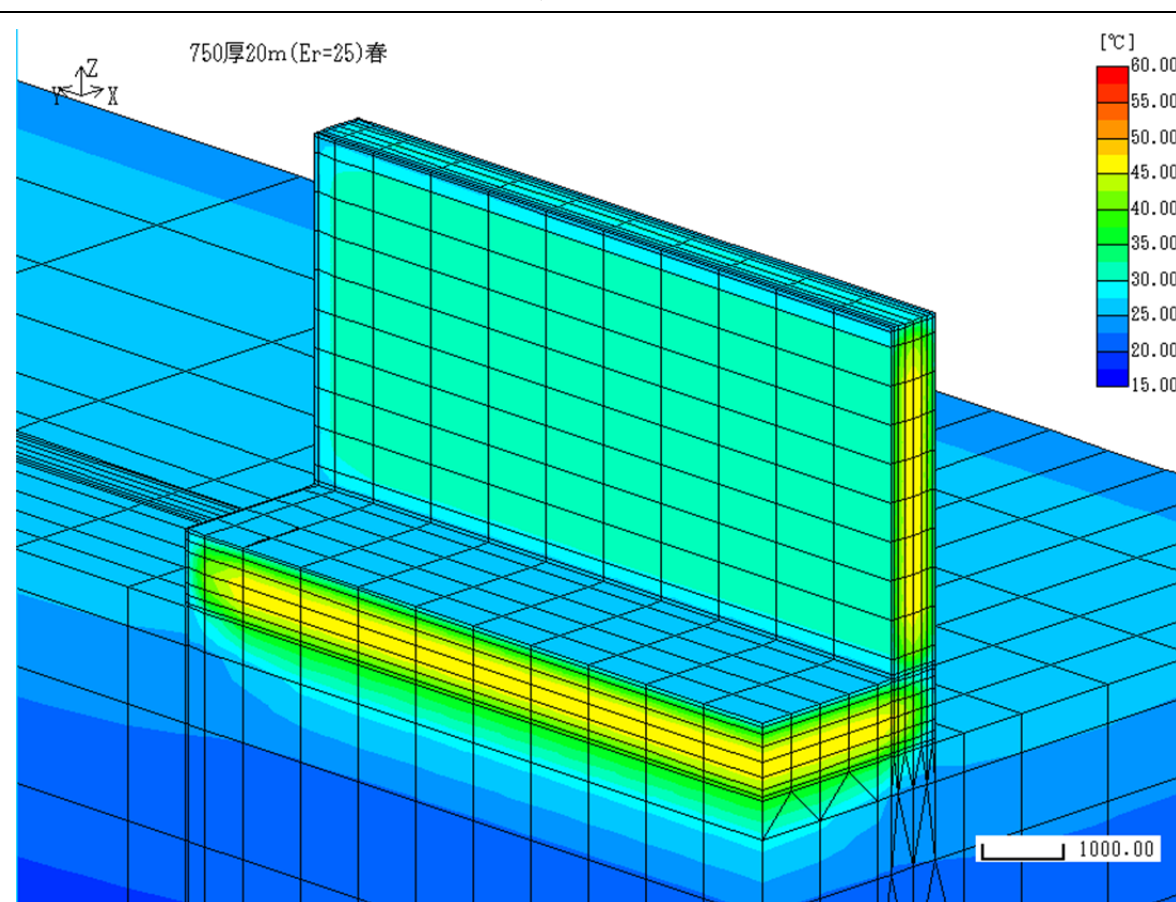
【壁厚 0.75m, 壁長さ 15m】 応力



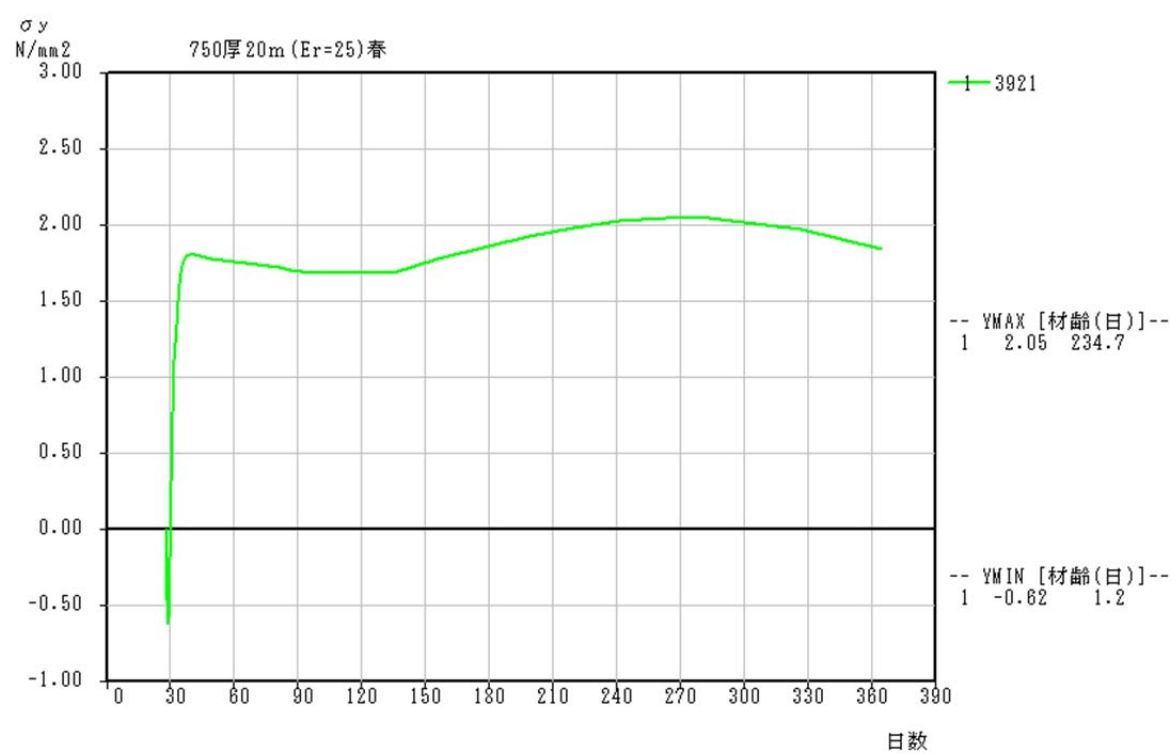
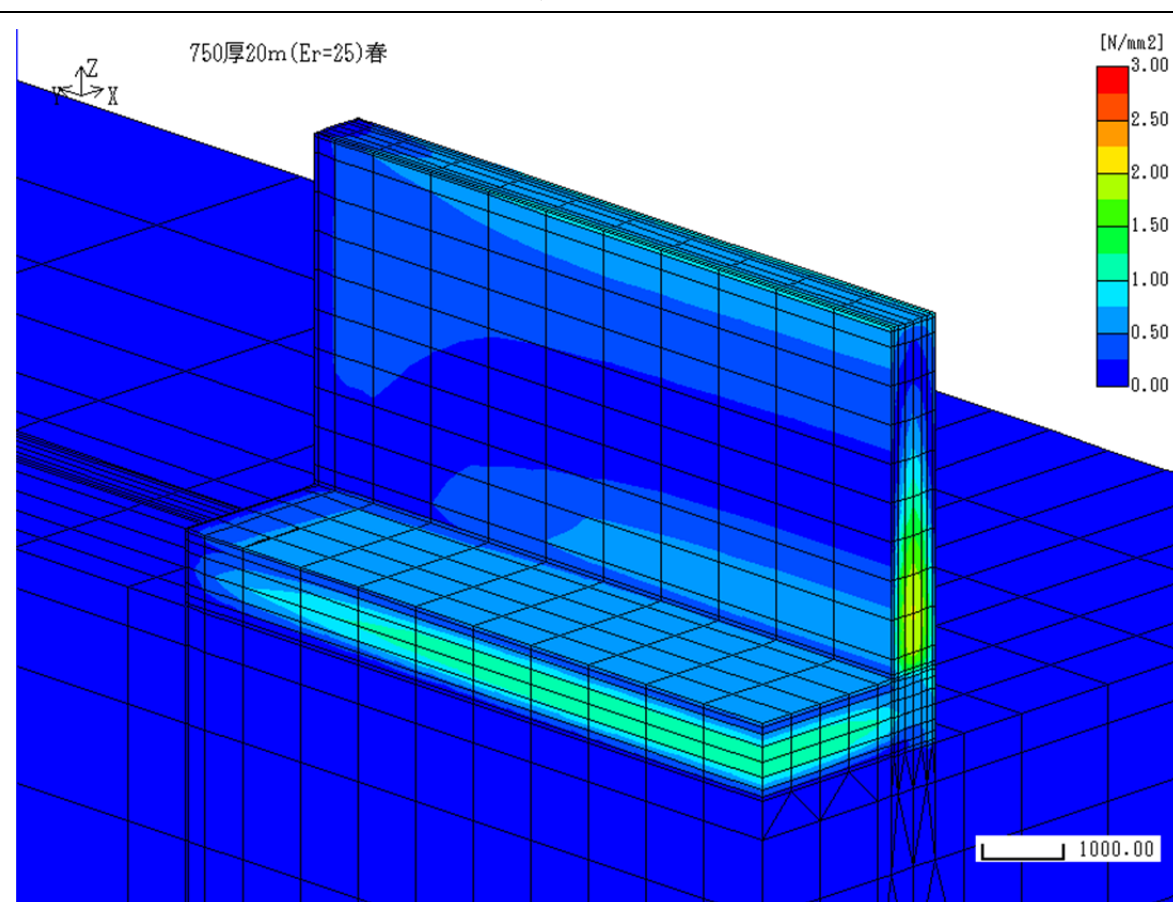
【壁厚 0.75m, 壁長さ 15m】 指数



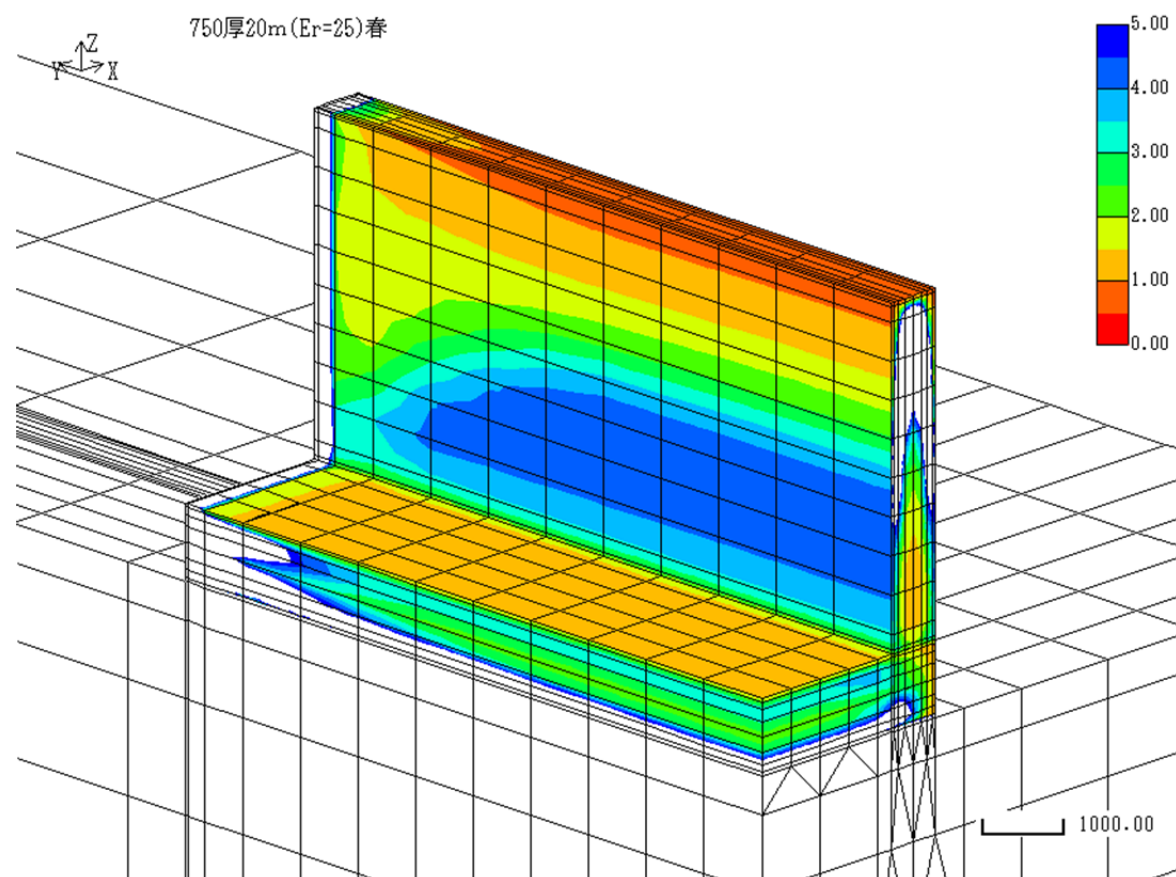
【壁厚 0.75m, 壁長さ 20m】 温度



【壁厚 0.75m, 壁長さ 20m】 応力



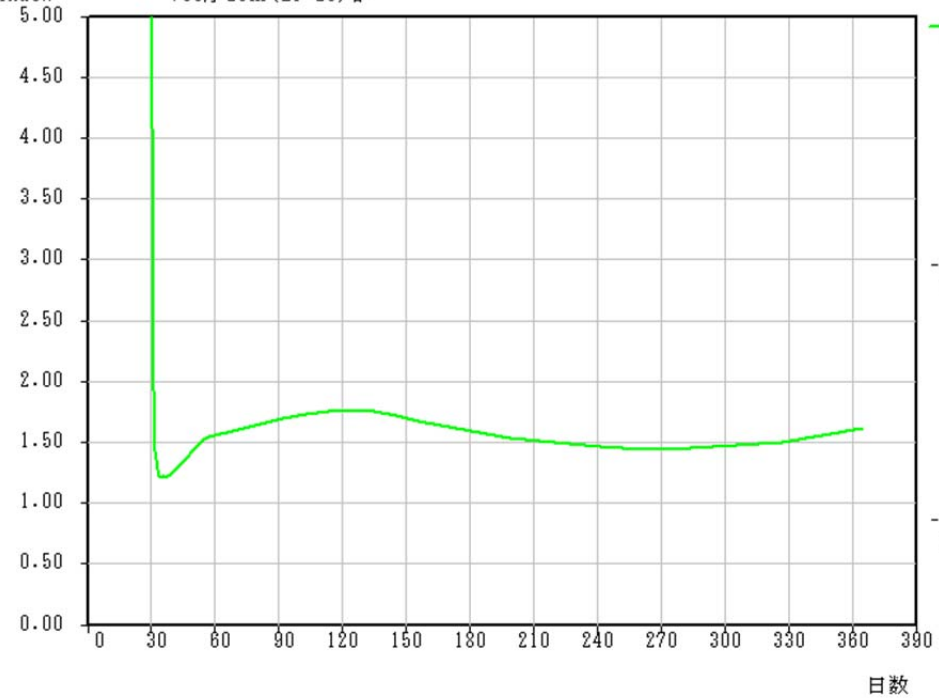
【壁厚 0.75m, 壁長さ 20m】 指数



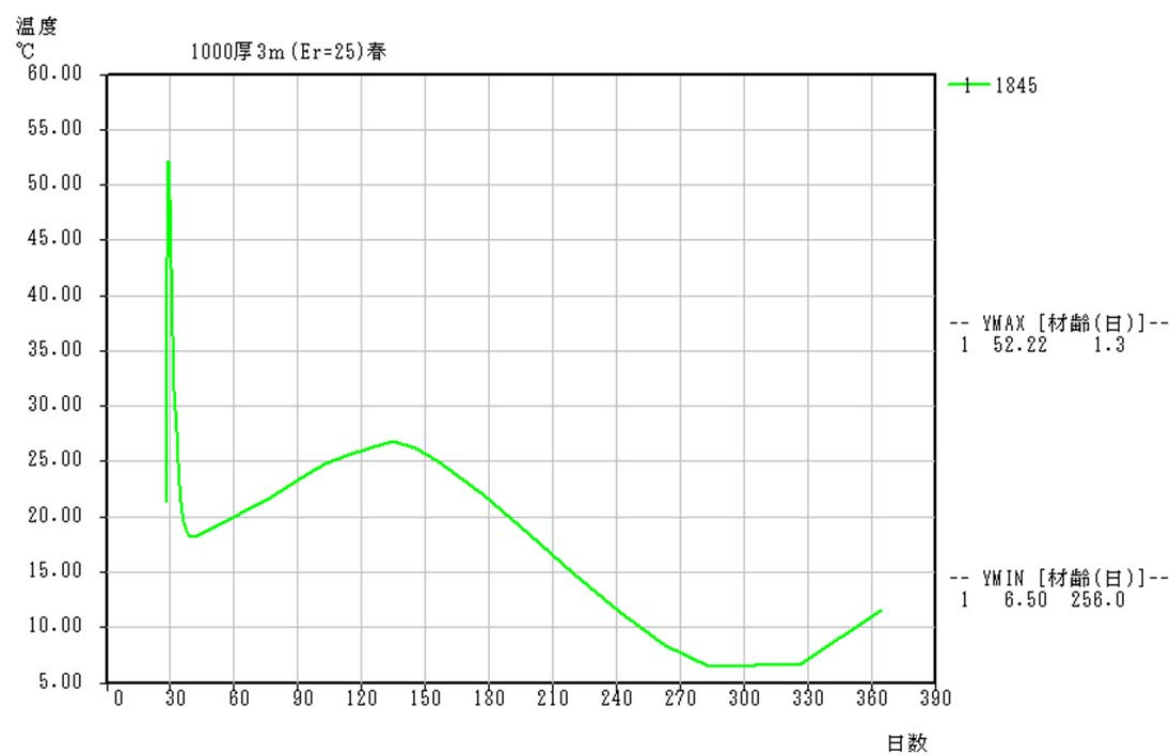
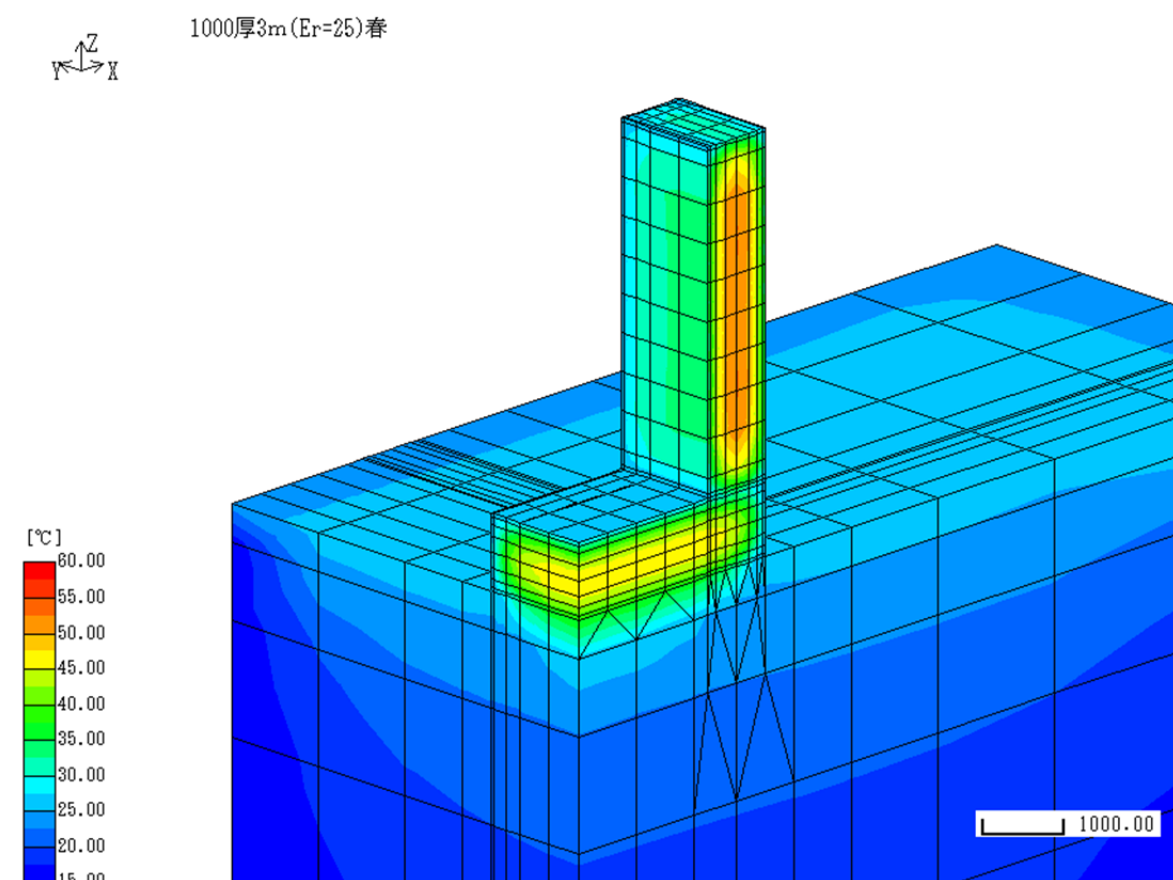
指数 (σ_y)

Index

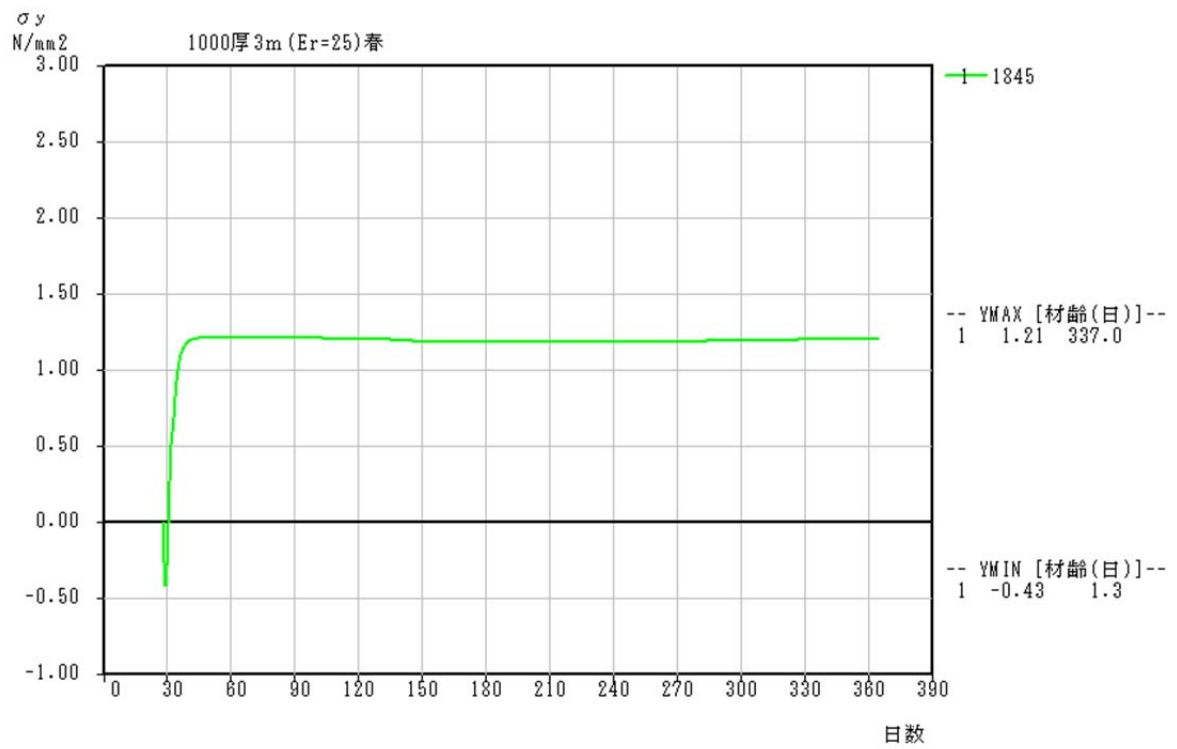
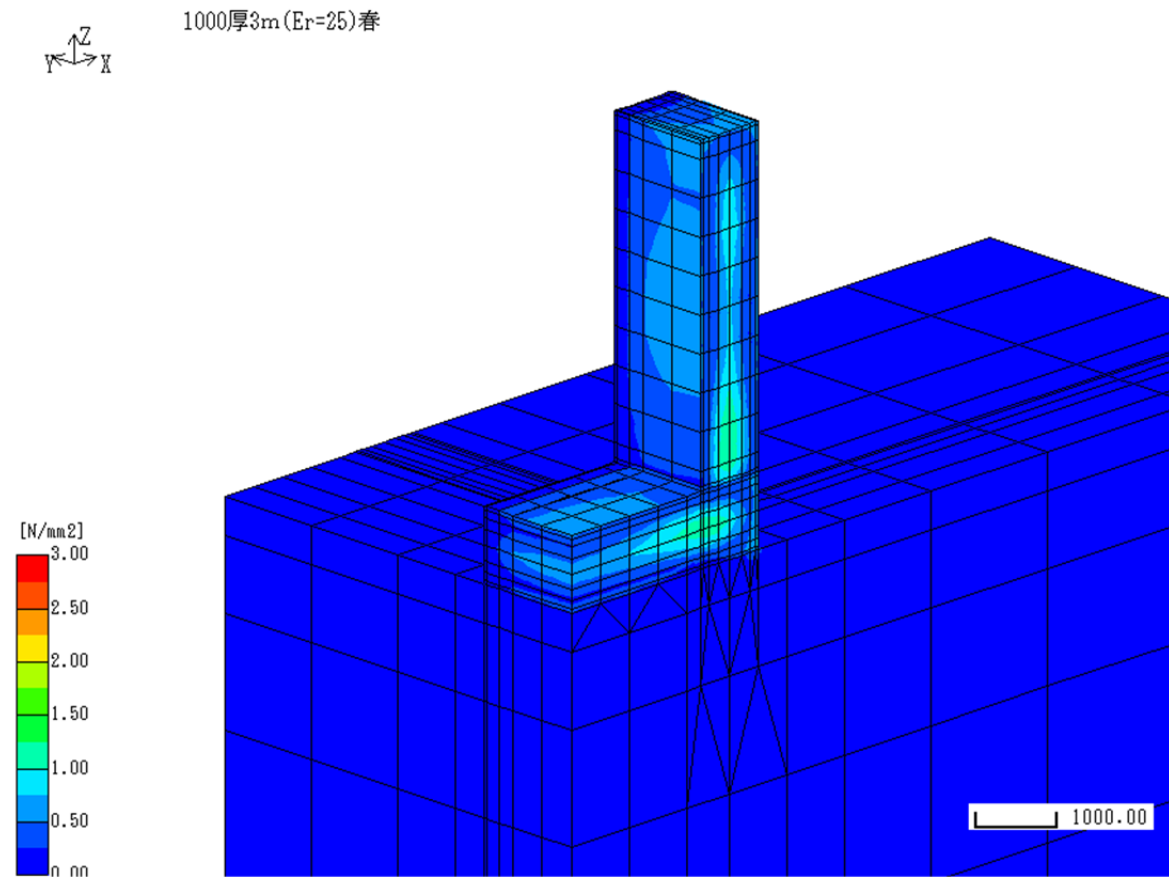
750厚 20m (Er=25) 春



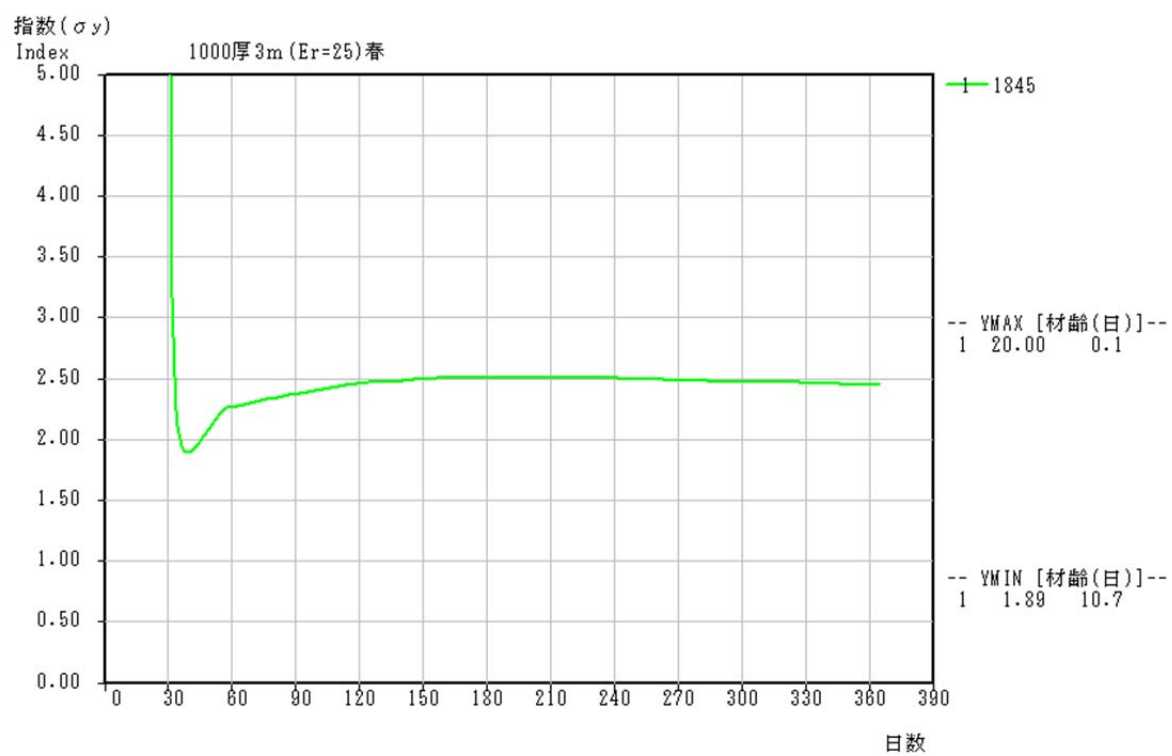
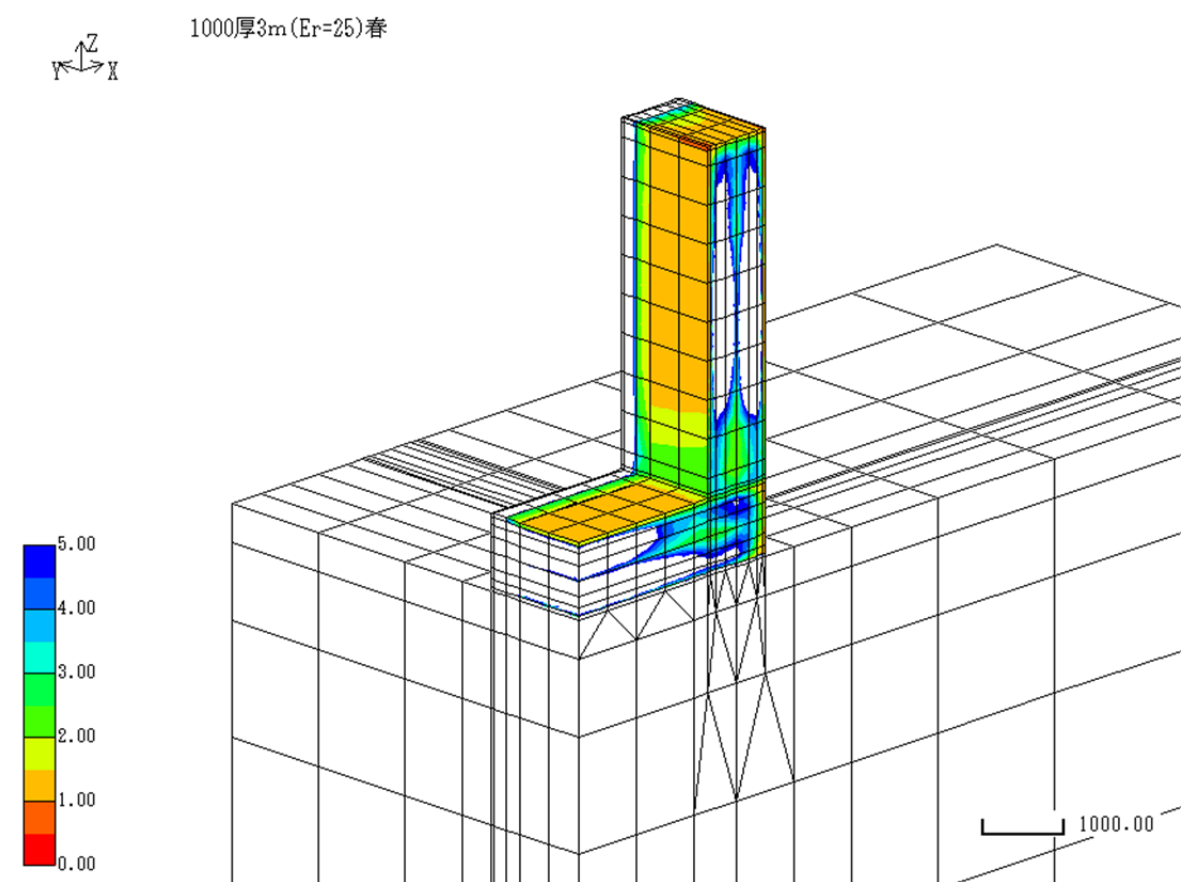
【壁厚 1.0m, 壁長さ 3m】 温度



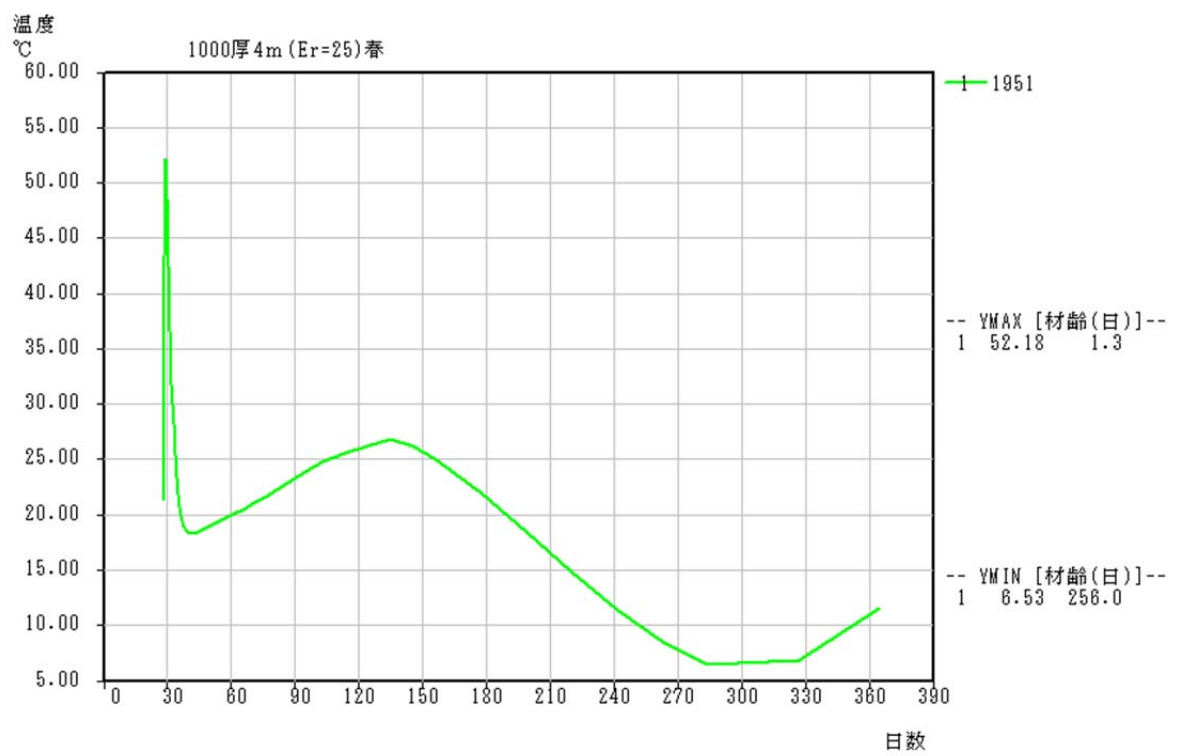
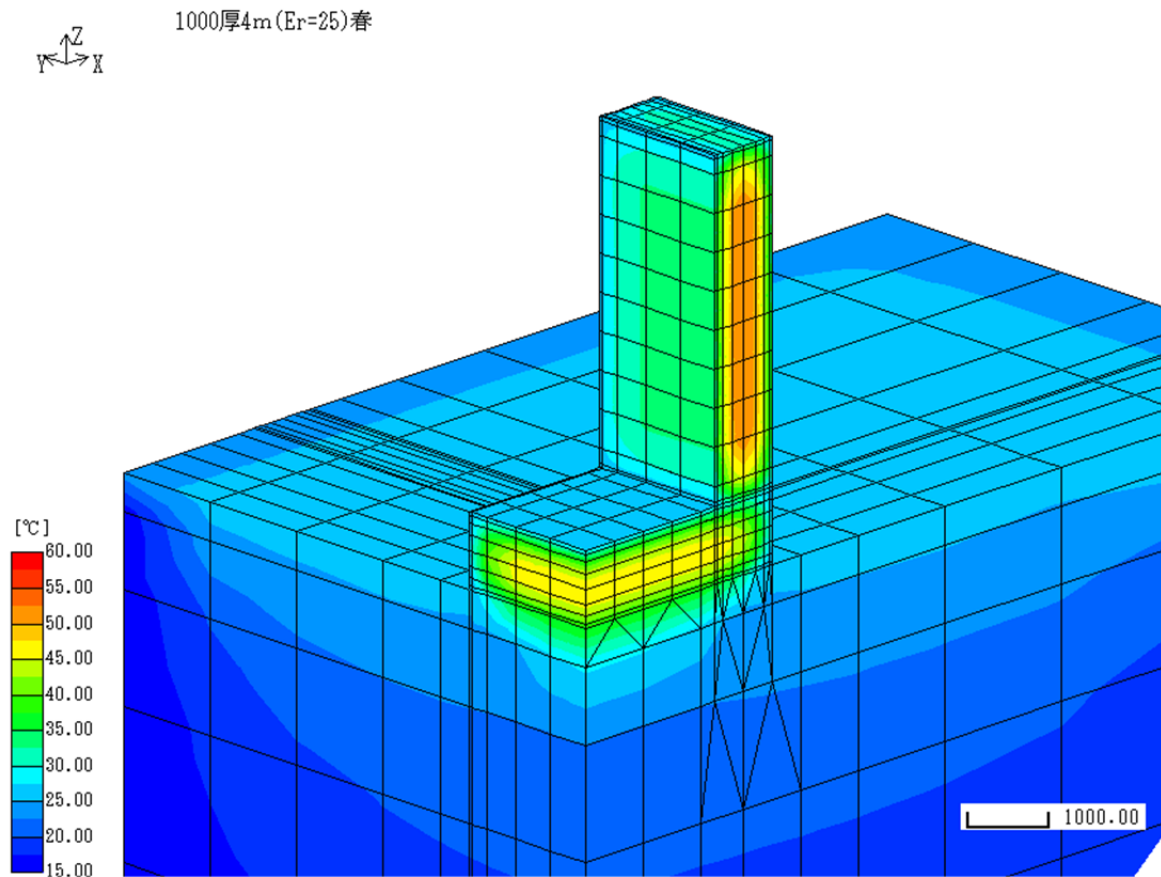
【壁厚 1.0m, 壁長さ 3m】 応力



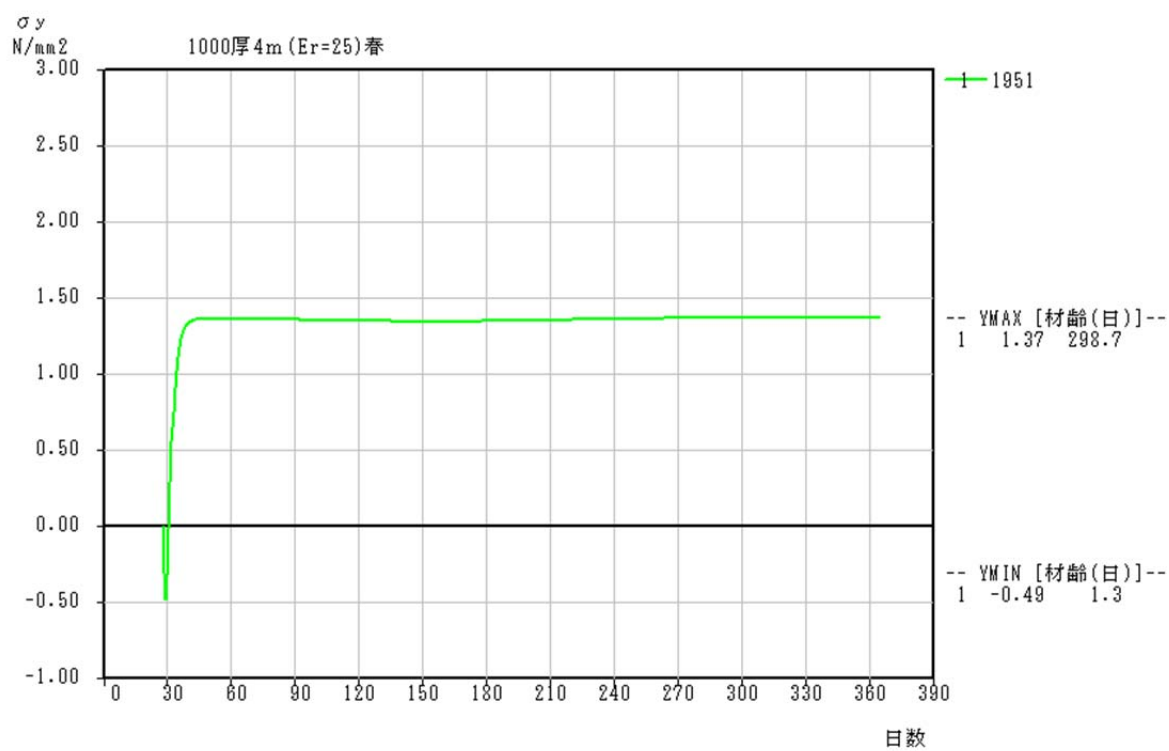
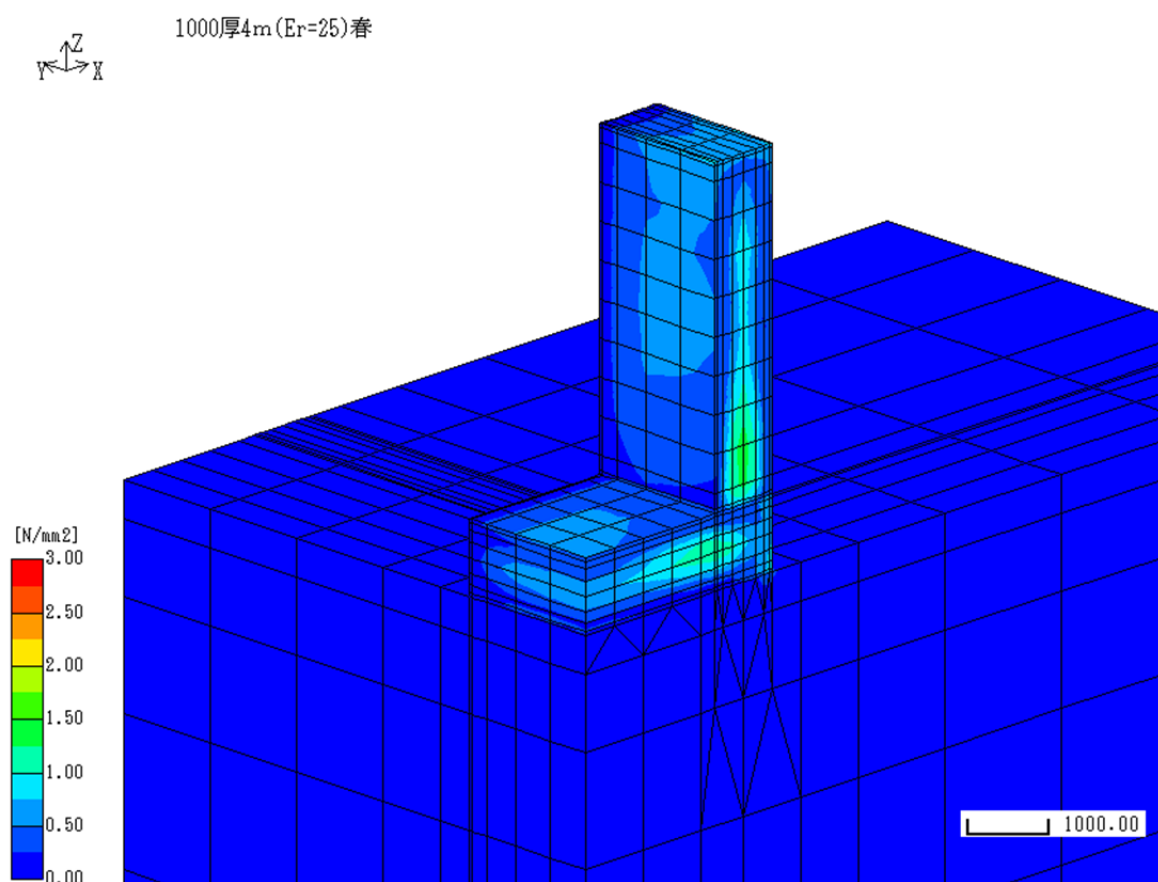
【壁厚 1.0m, 壁長さ 3m】 指数



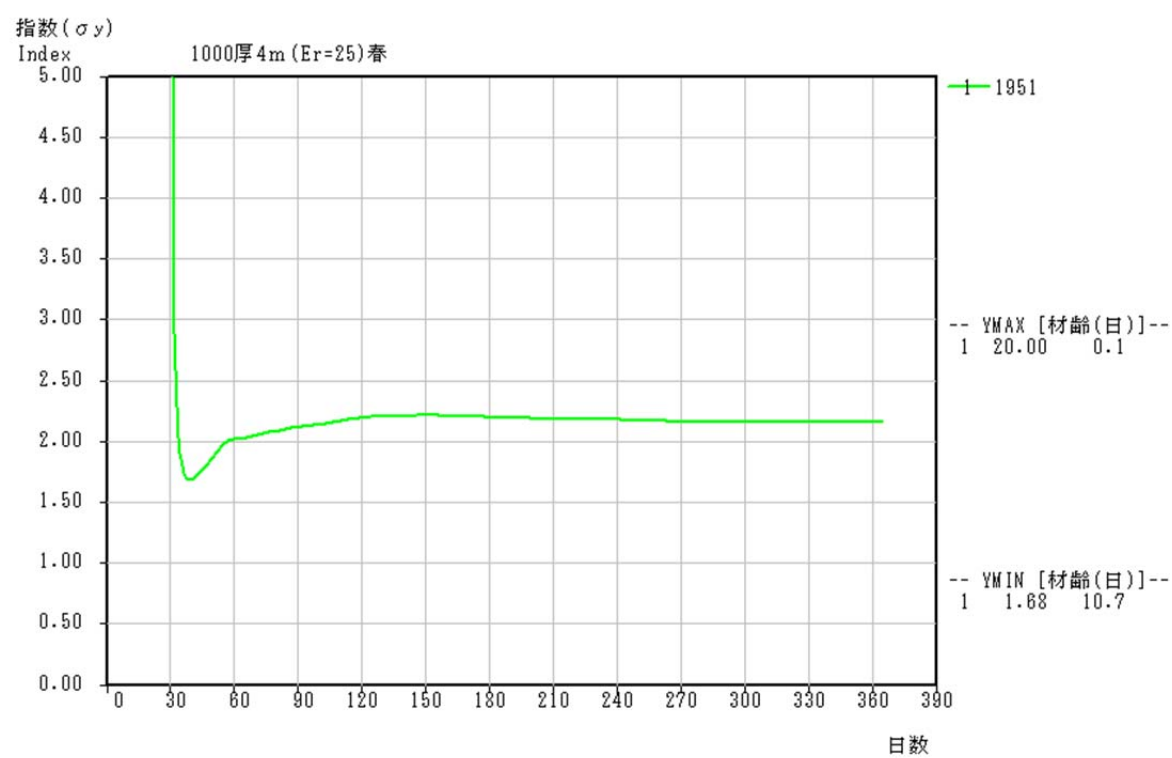
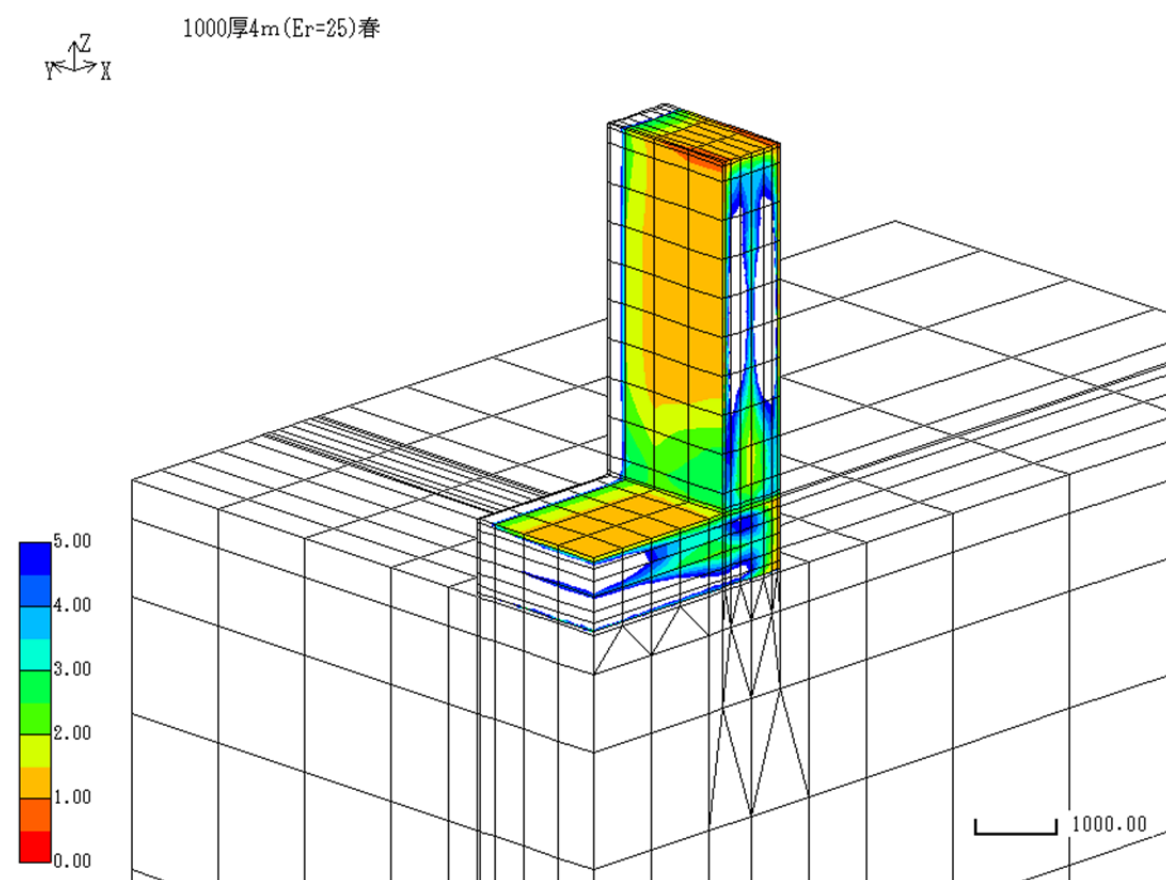
【壁厚 1.0m, 壁長さ 4m】 温度



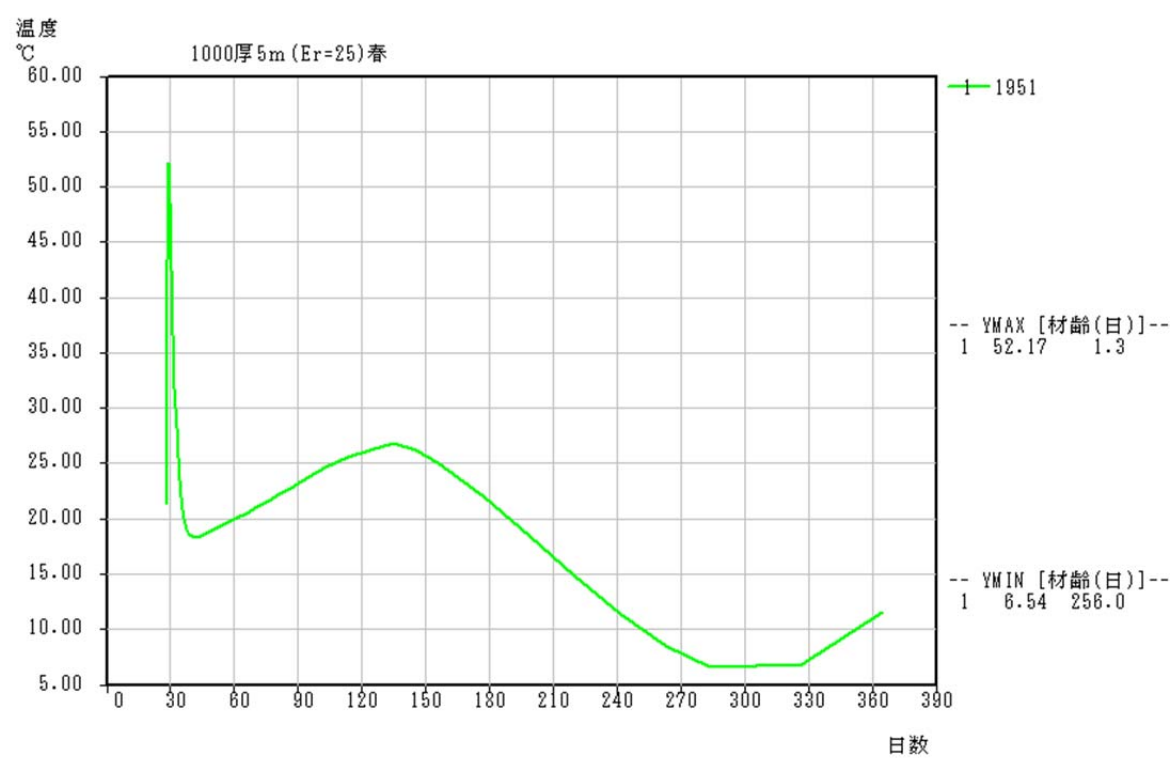
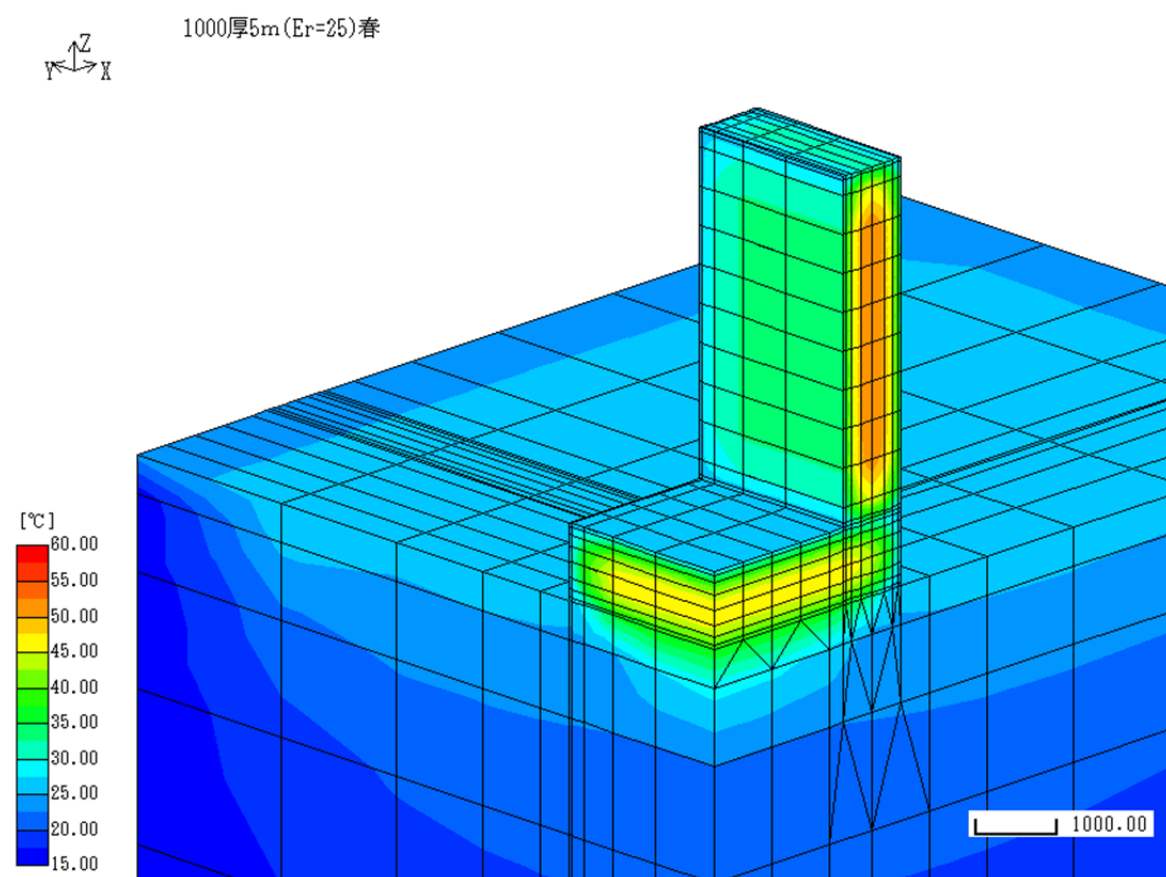
【壁厚 1.0m, 壁長さ 4m】 応力



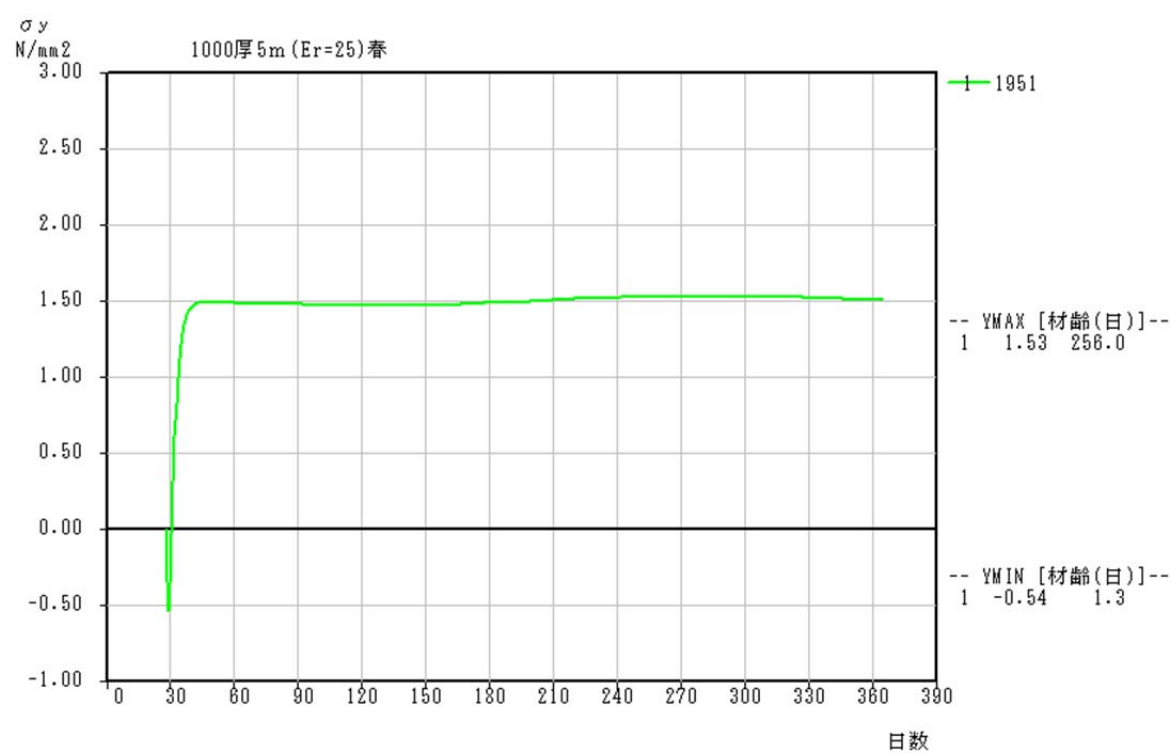
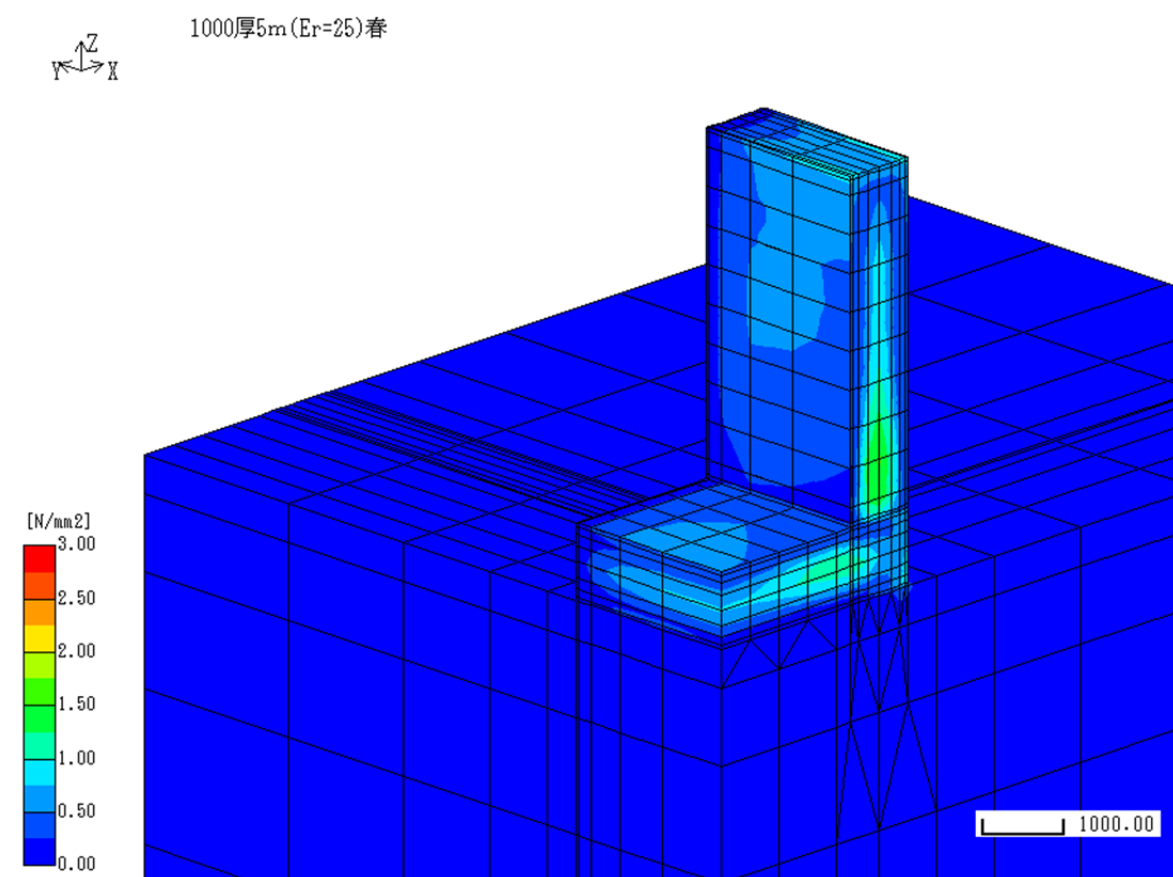
【壁厚 1.0m, 壁長さ 4m】 指数



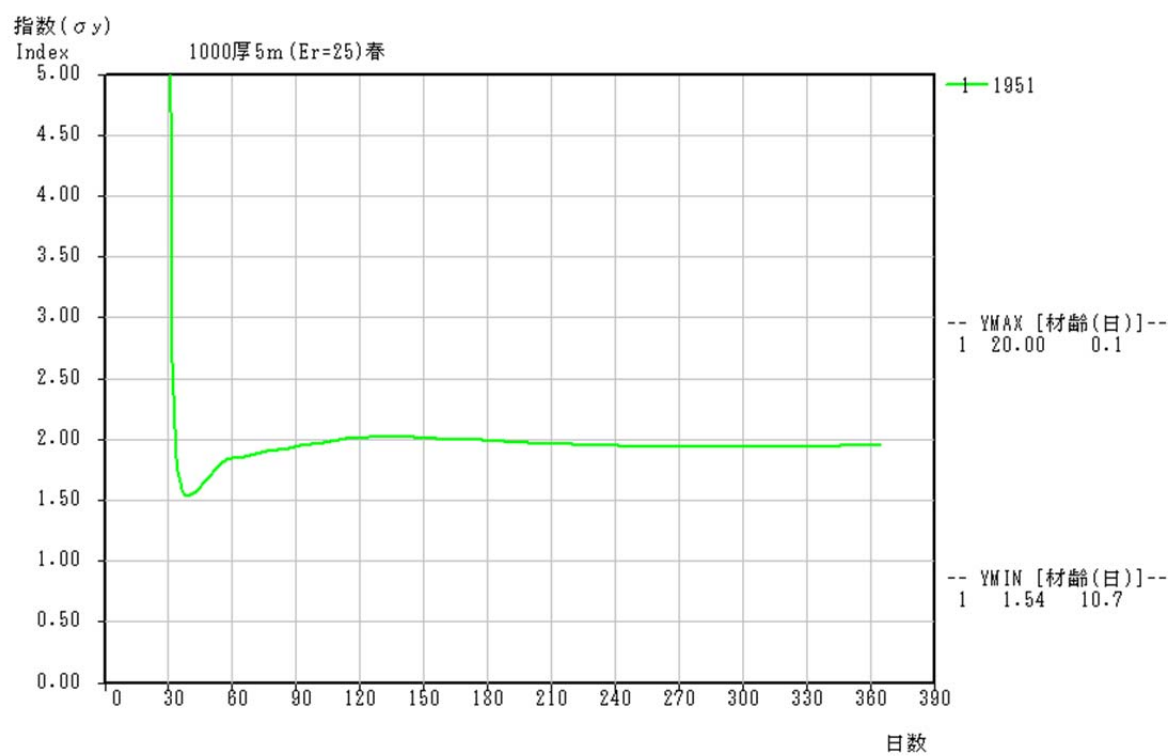
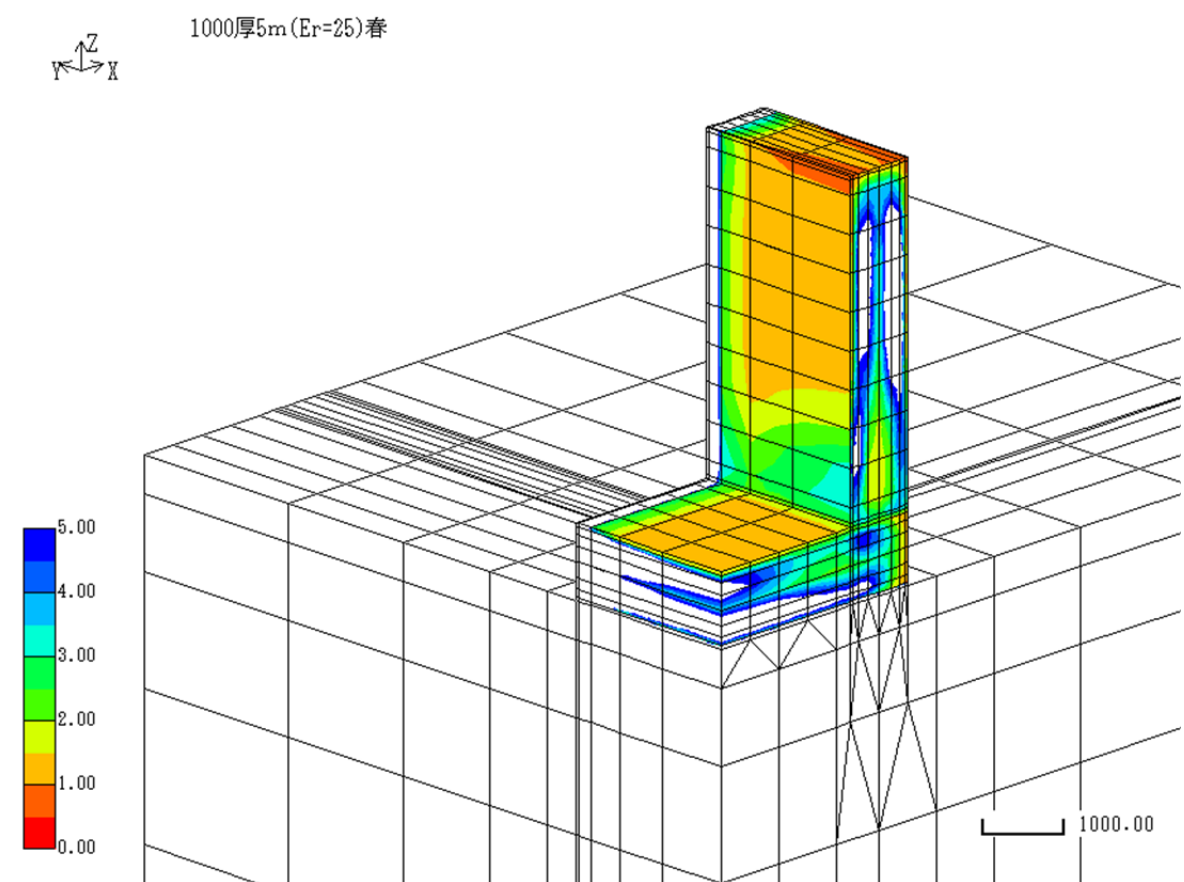
【壁厚 1.0m, 壁長さ 5m】 温度



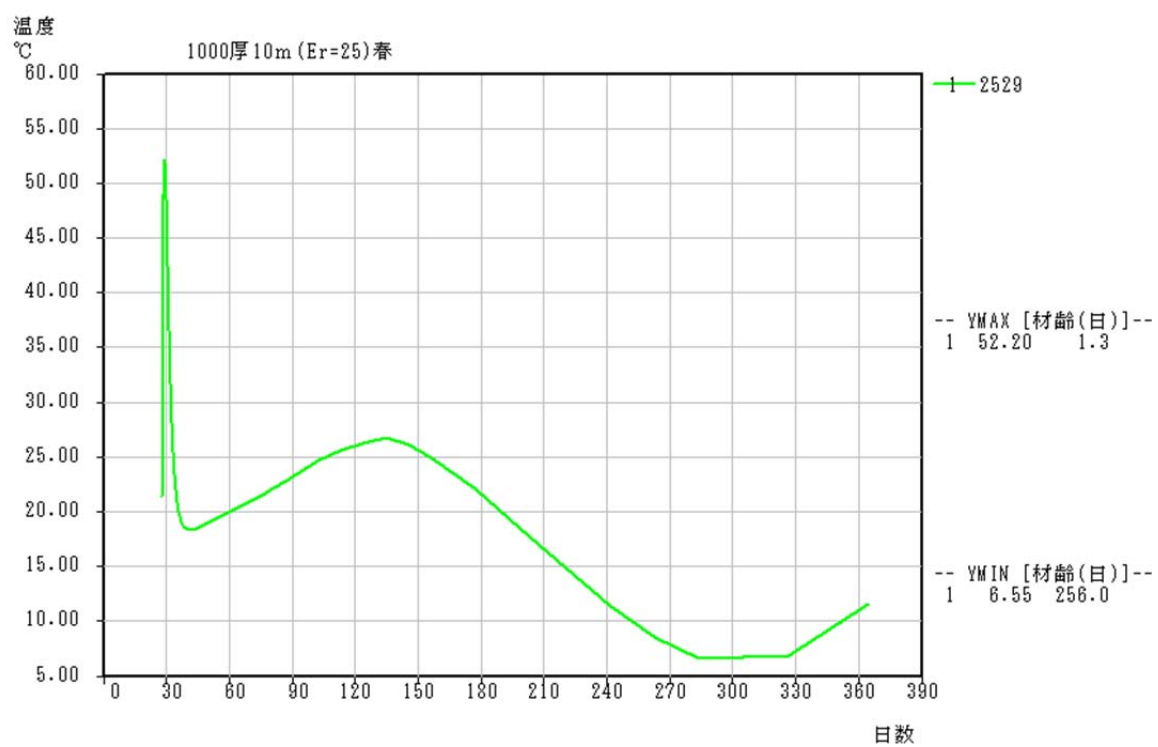
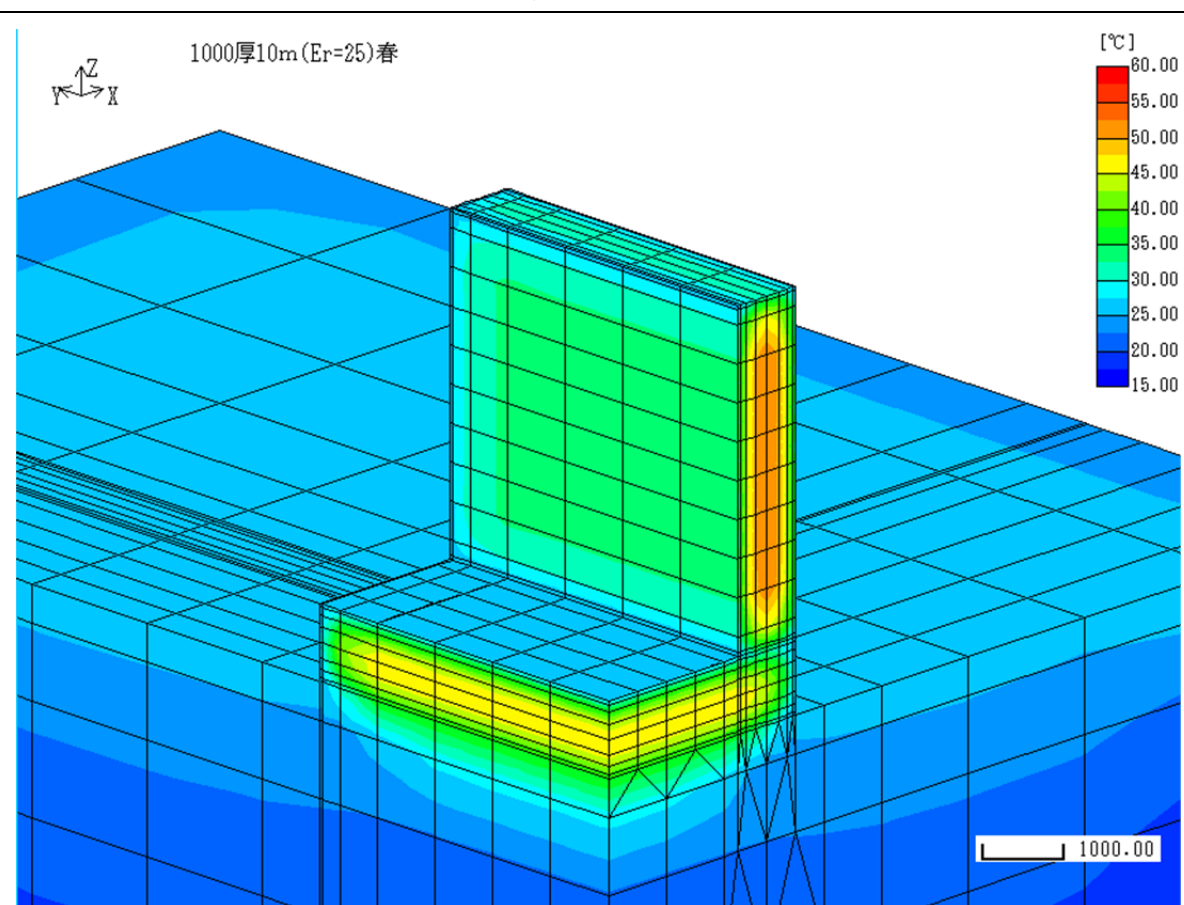
【壁厚 1.0m, 壁長さ 5m】 応力



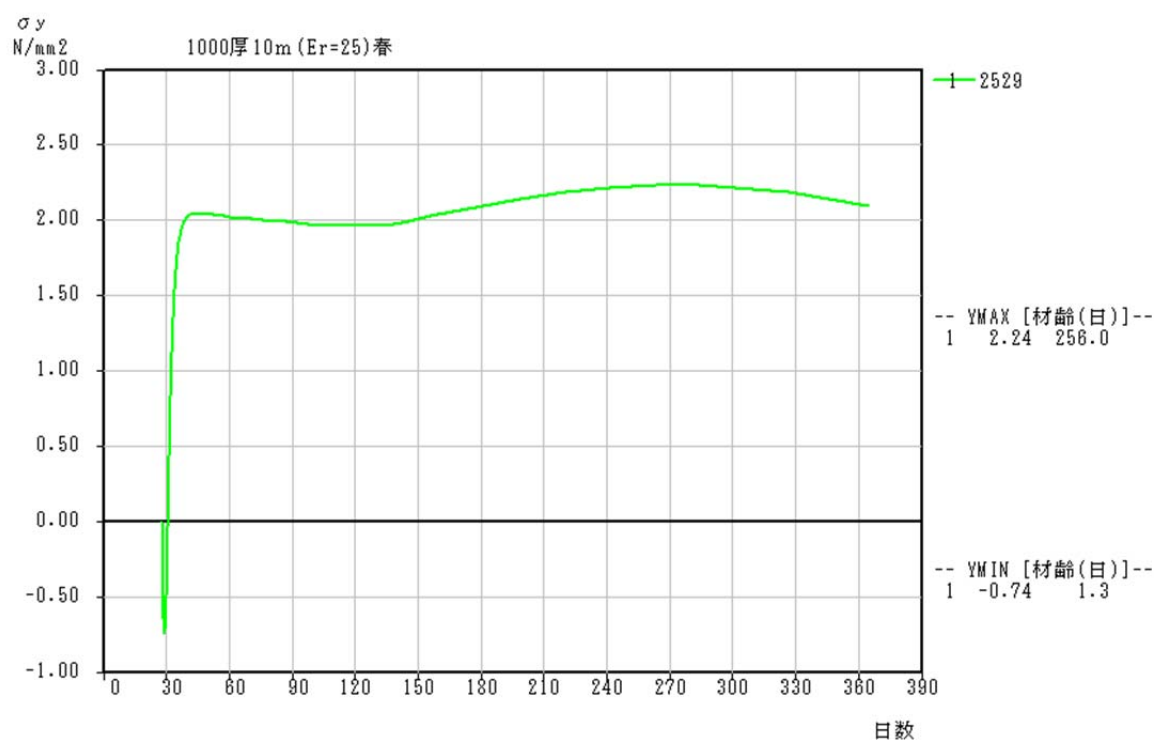
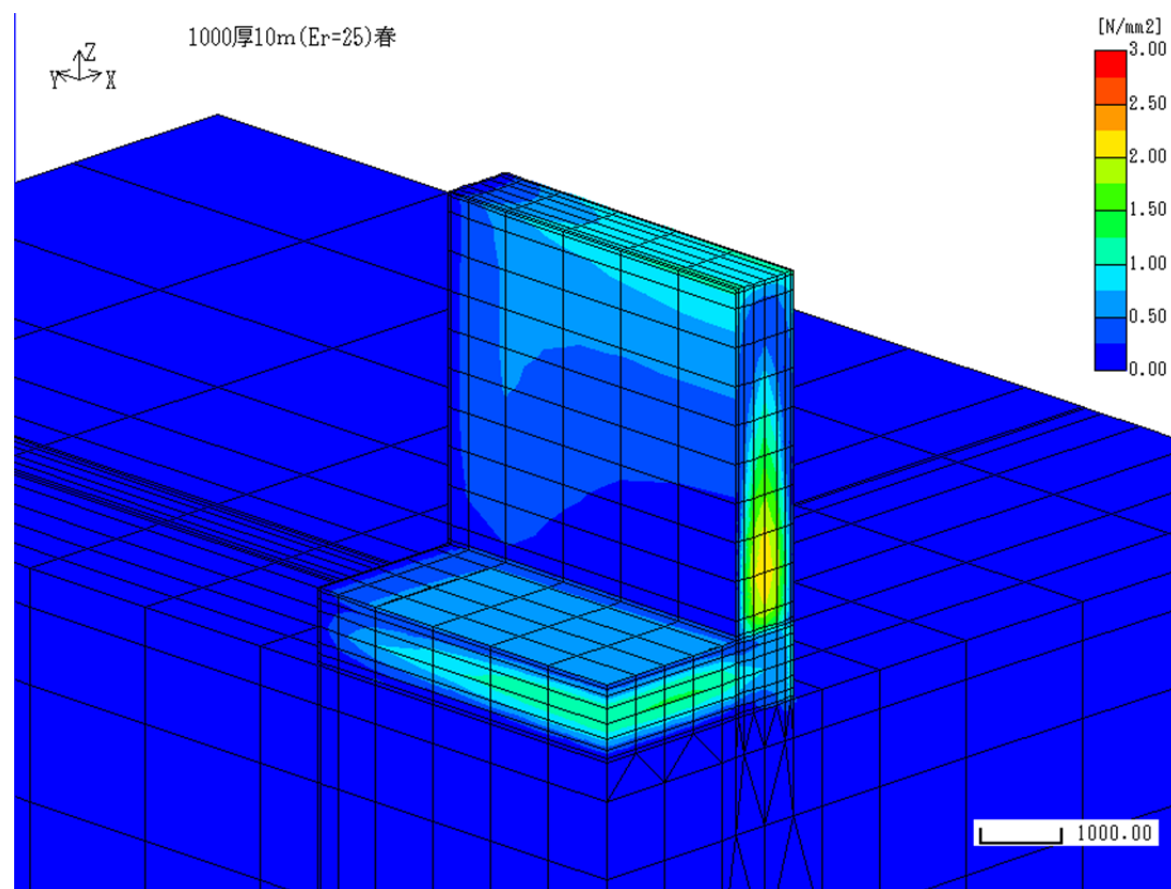
【壁厚 1.0m, 壁長さ 5m】 指数



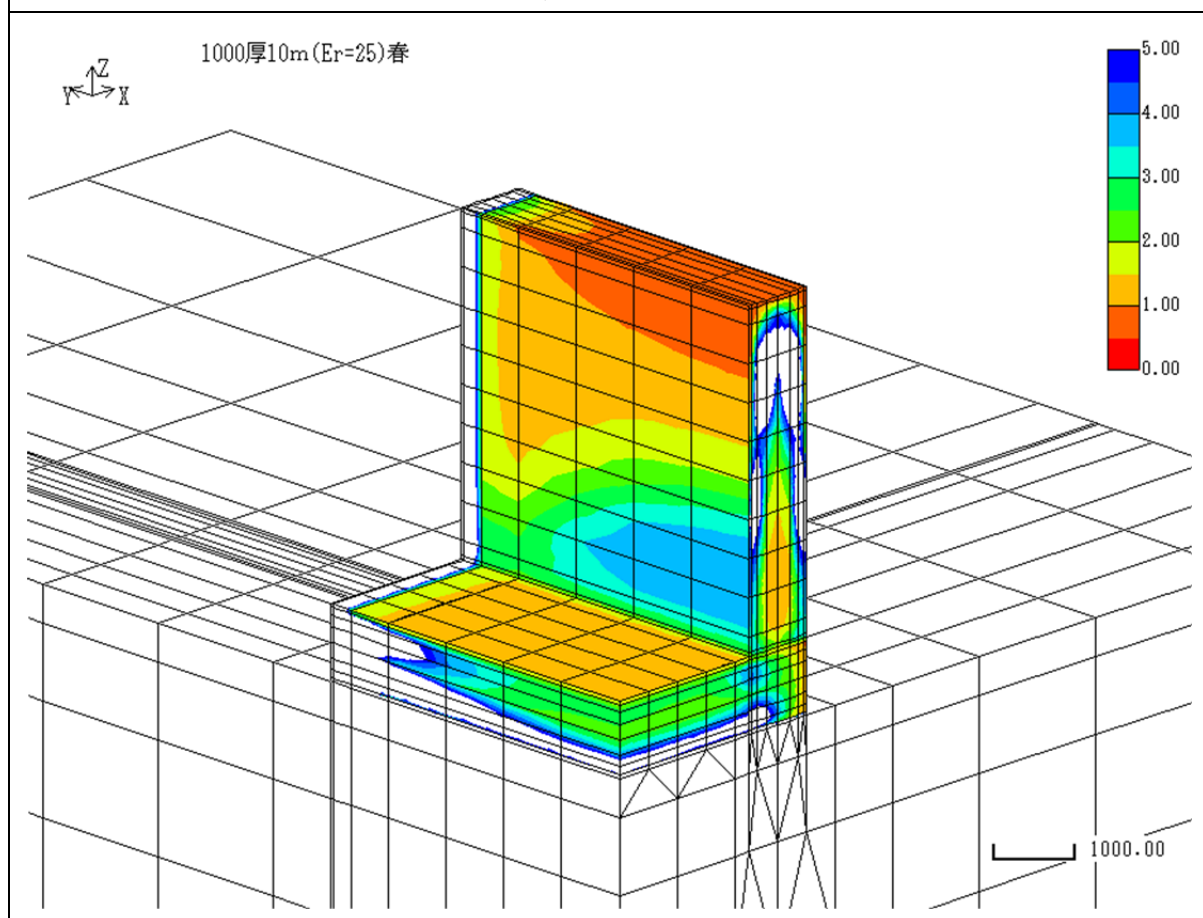
【壁厚 1.0m, 壁長さ 10m】 温度



【壁厚 1.0m, 壁長さ 10m】 応力



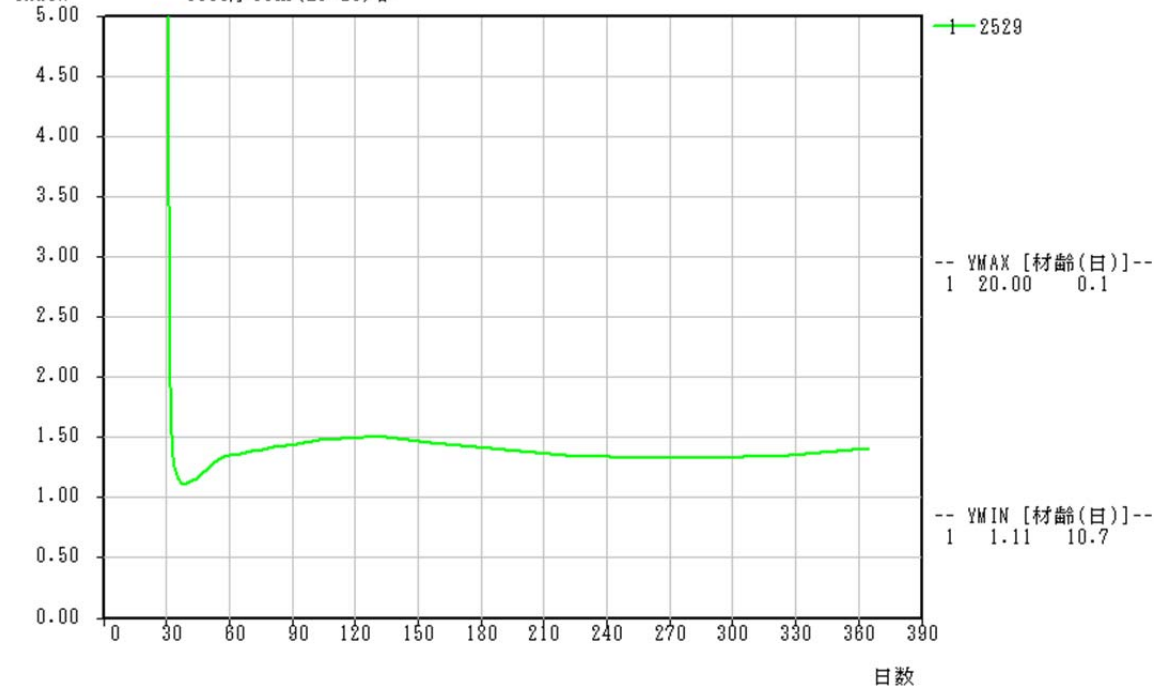
【壁厚 1.0m, 壁長さ 10m】 指数



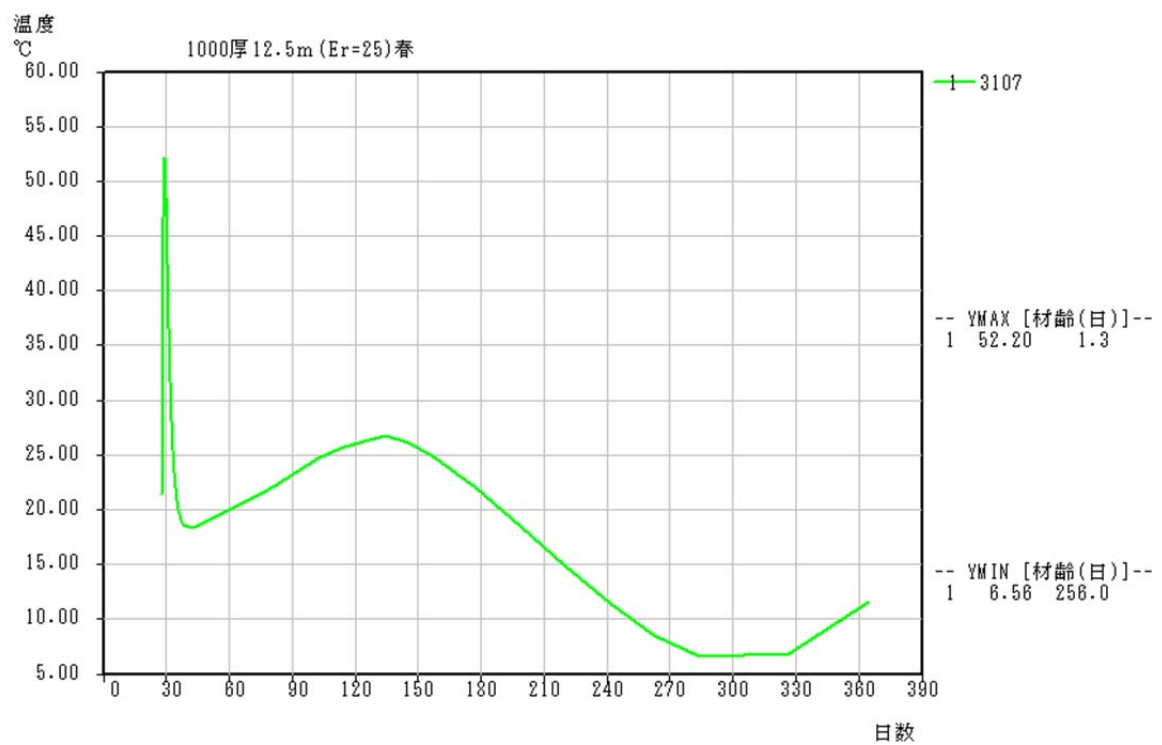
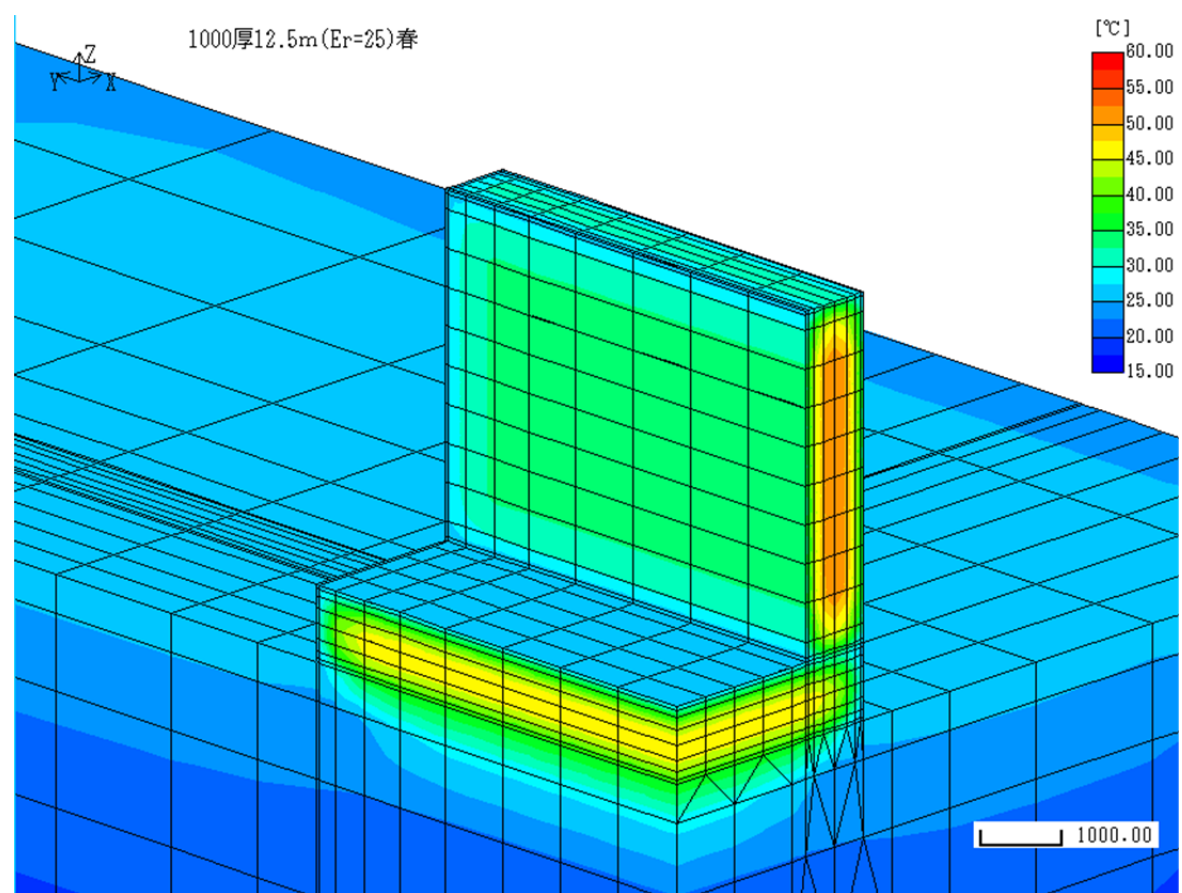
指数 (σ_y)

Index

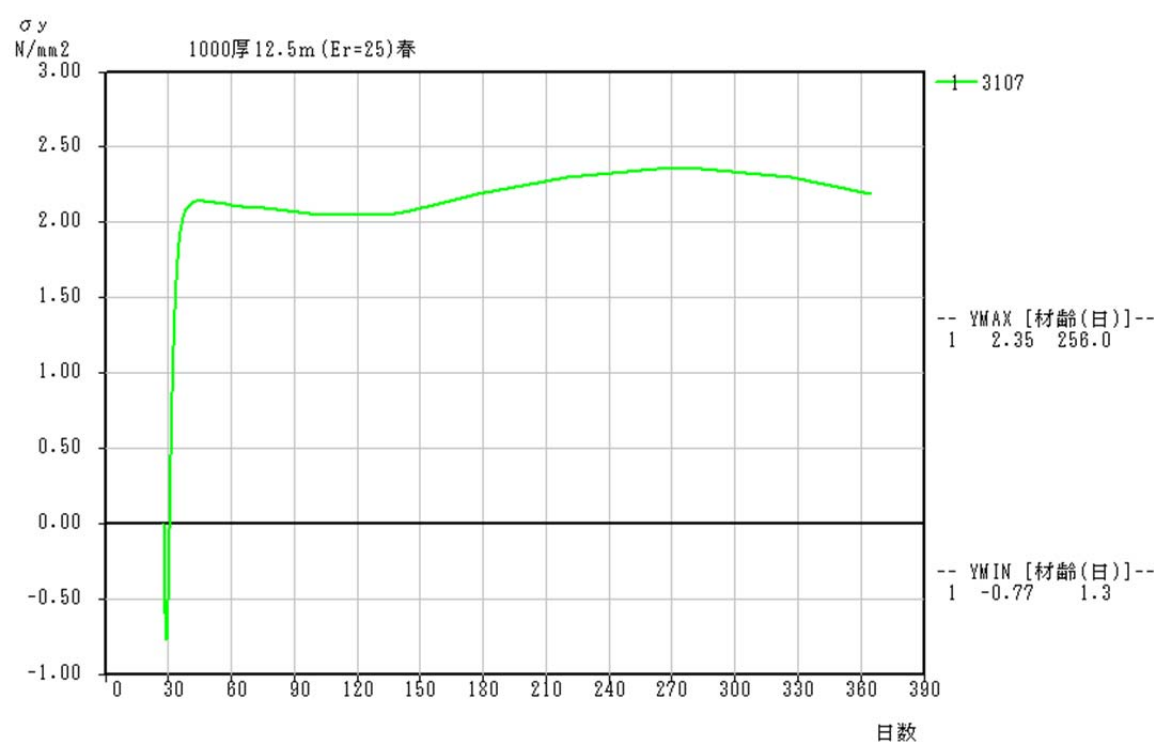
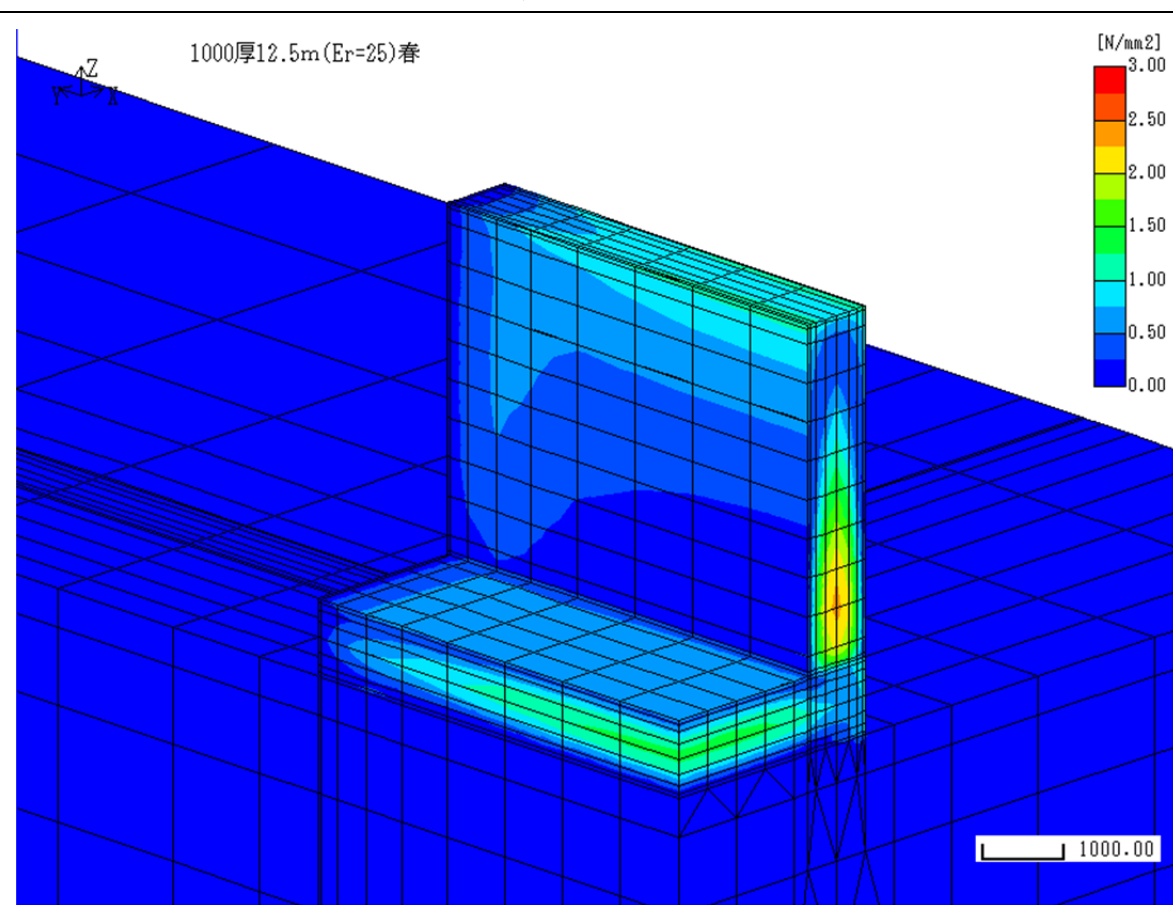
1000厚10m (Er=25) 春



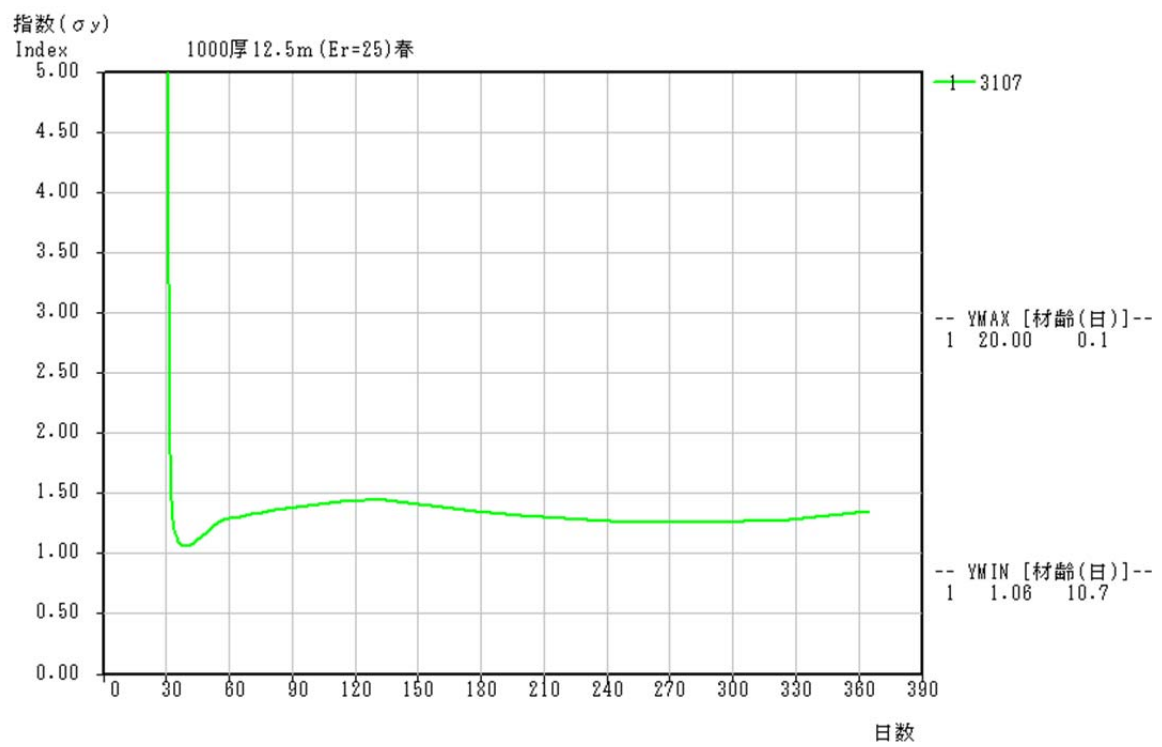
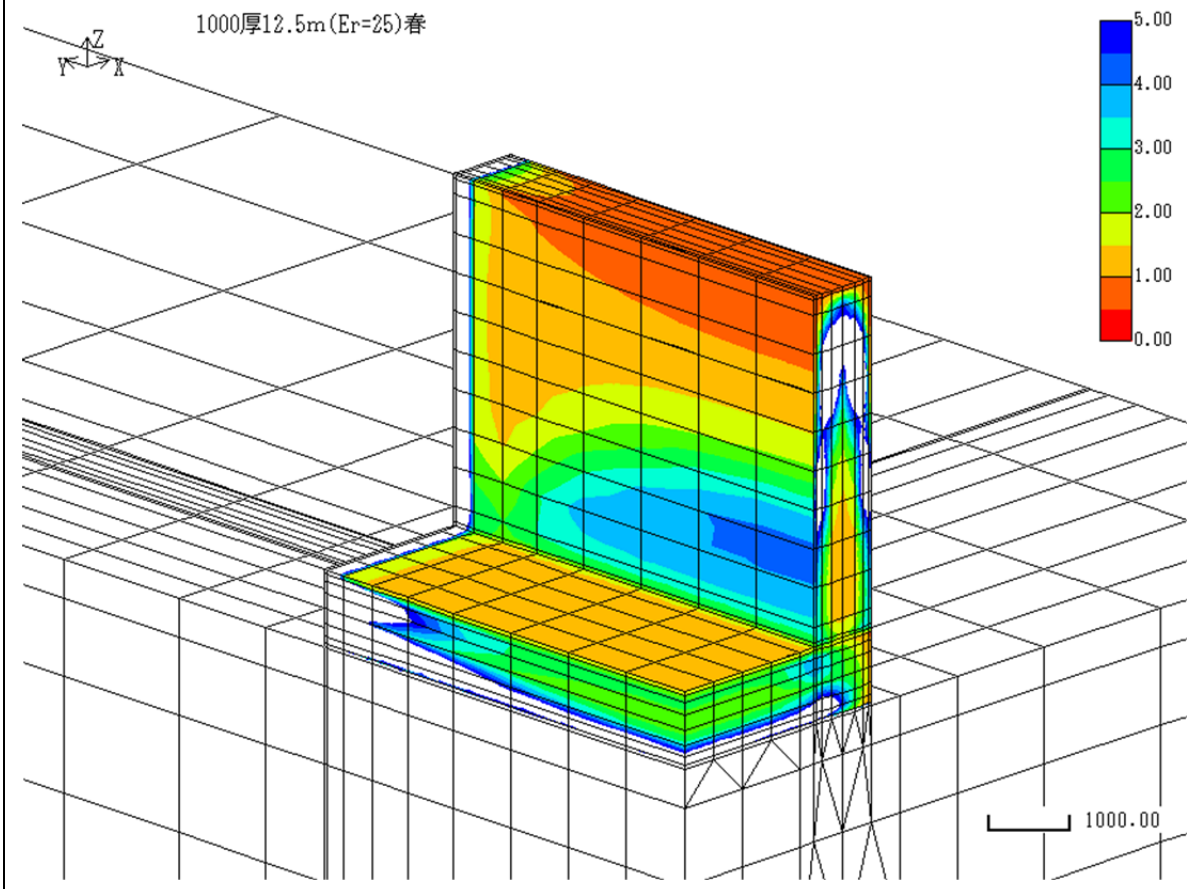
【壁厚 1.0m, 壁長さ 12.5m】 温度



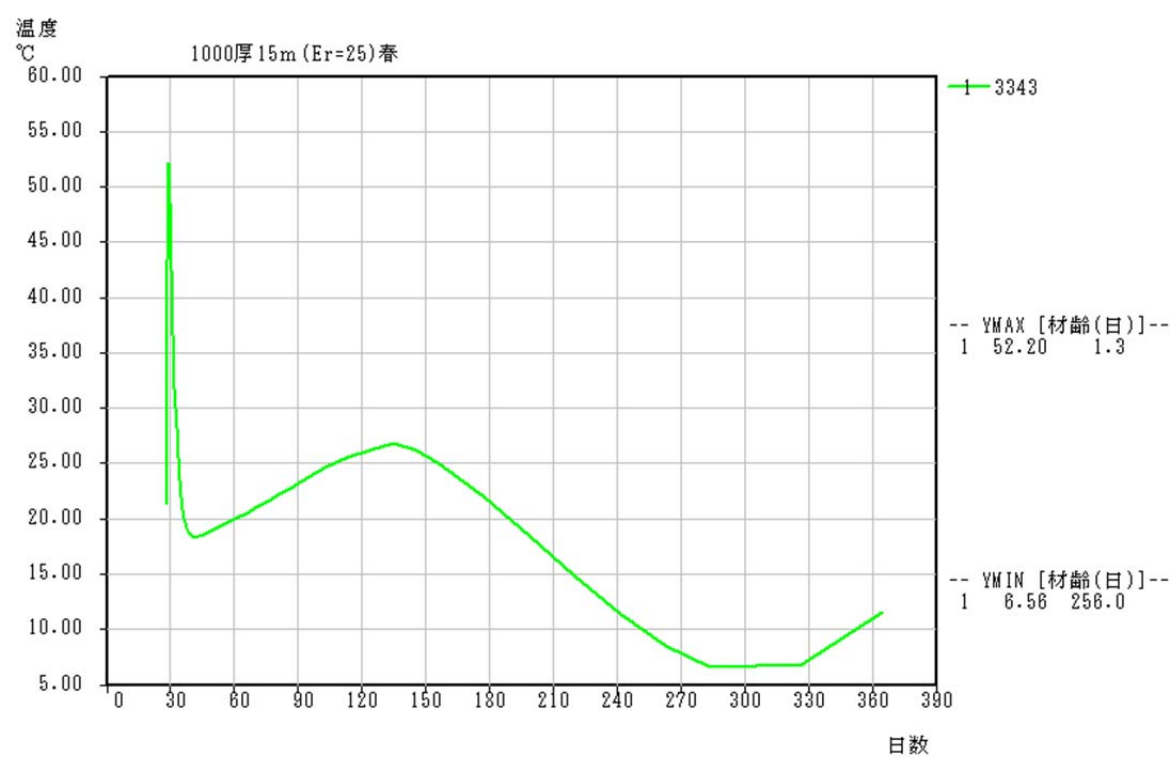
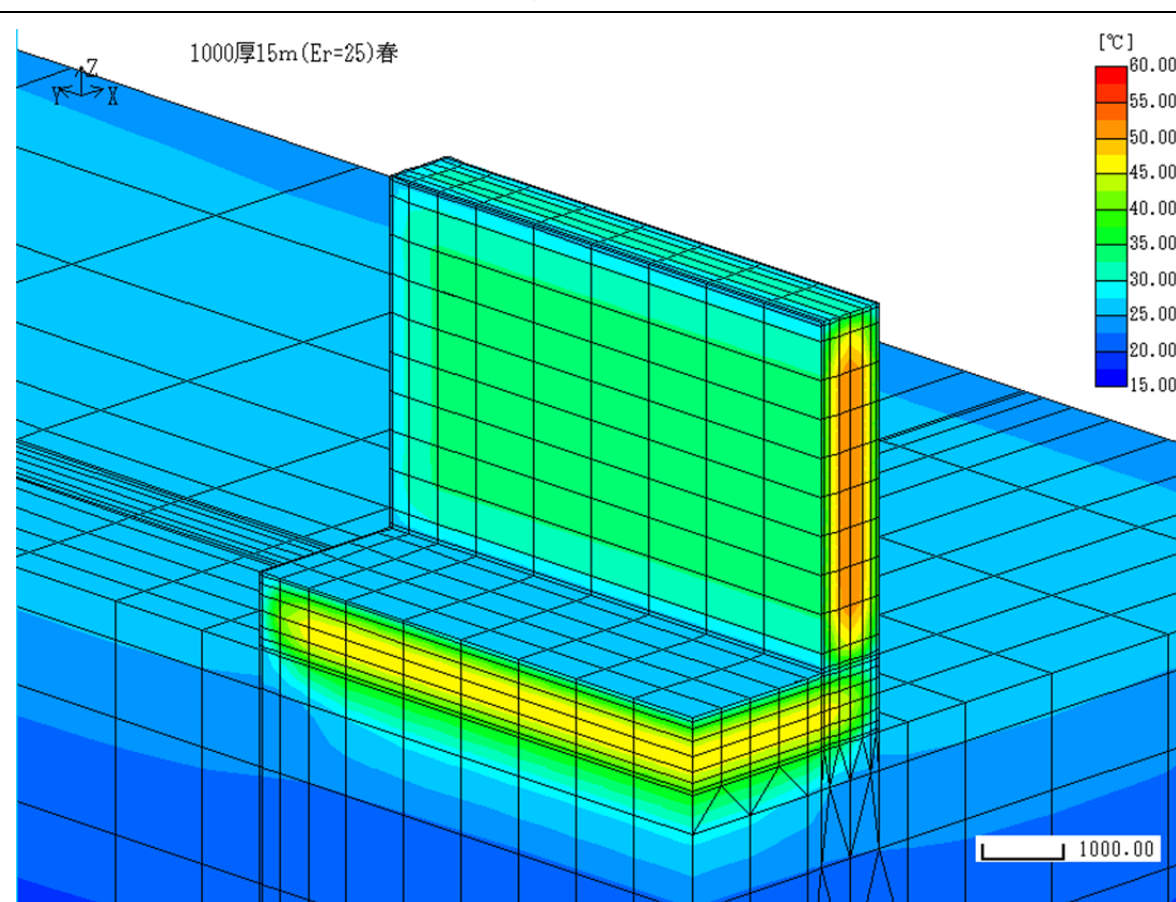
【壁厚 1.0m, 壁長さ 12.5m】 応力



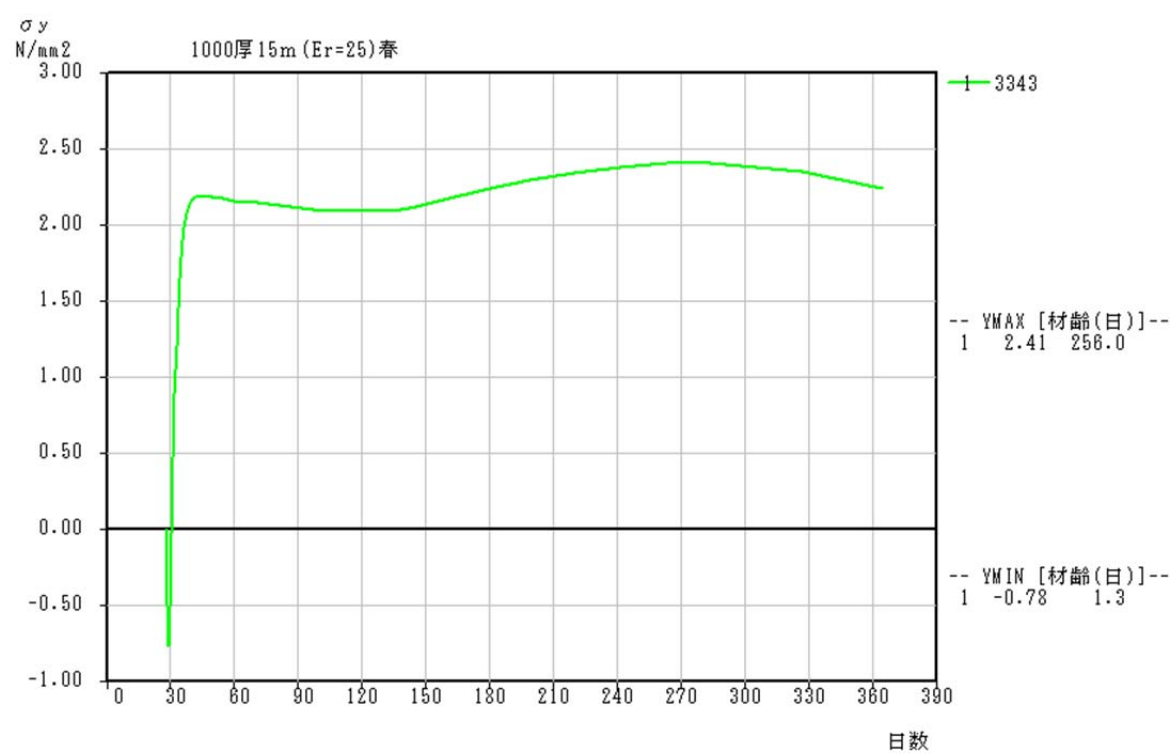
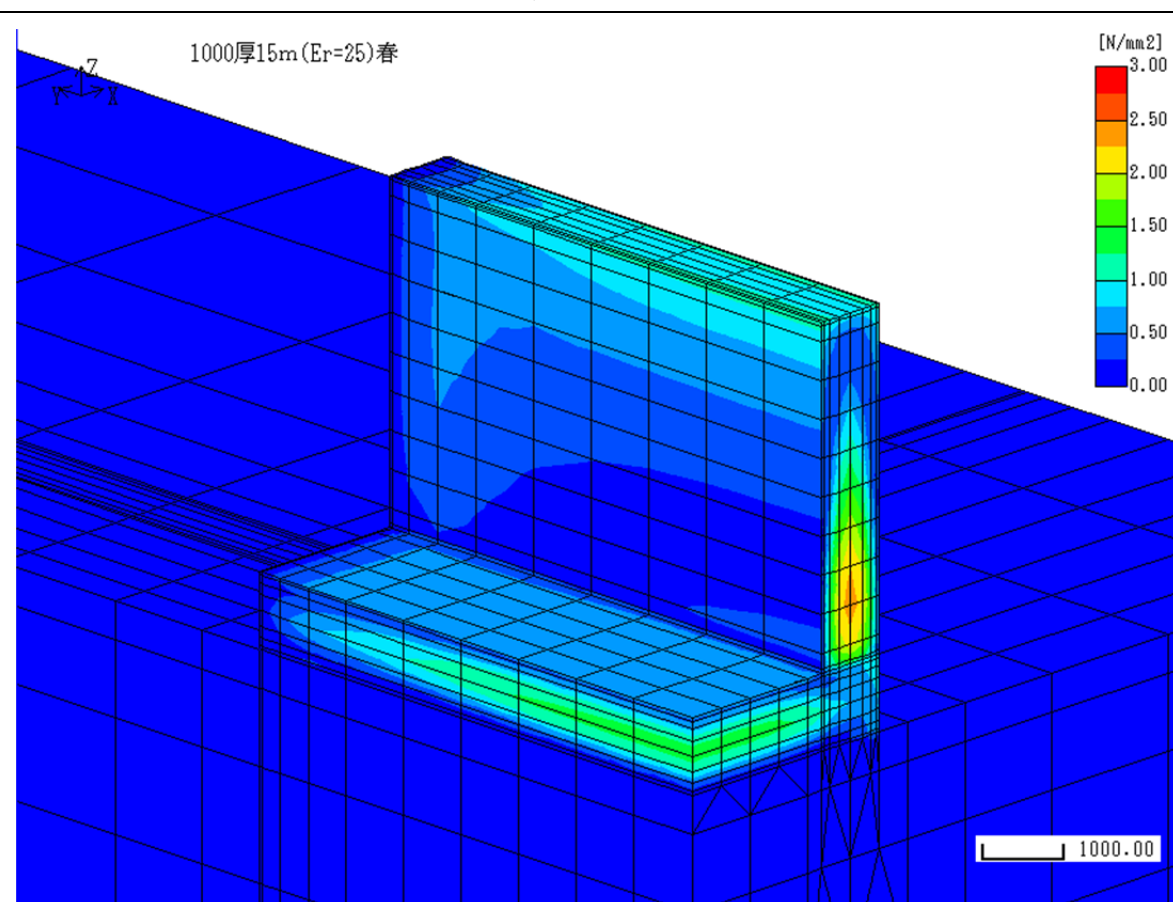
【壁厚 1.0m, 壁長さ 12.5m】 指数



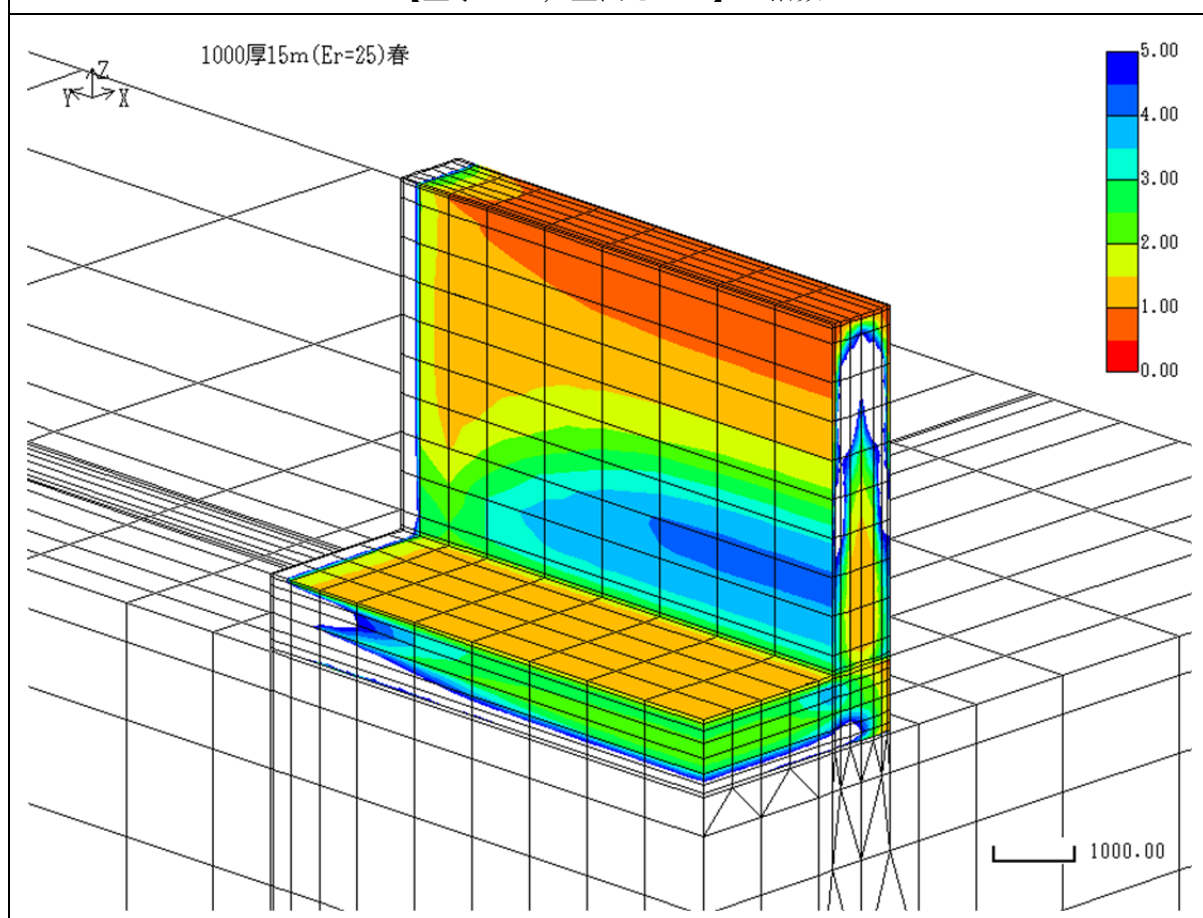
【壁厚 1.0m, 壁長さ 15m】 温度



【壁厚 1.0m, 壁長さ 15m】 応力



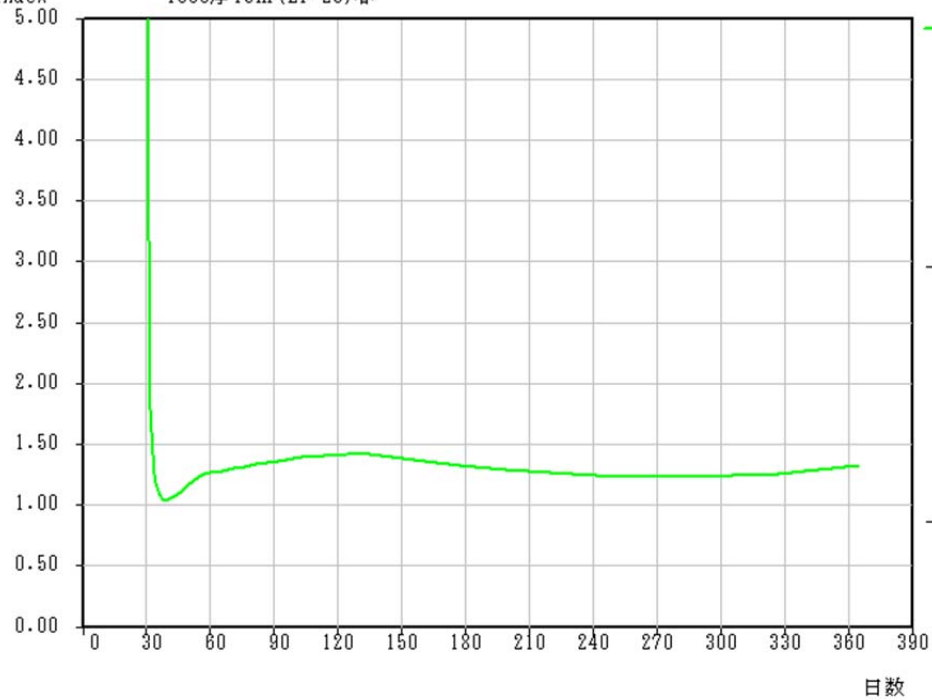
【壁厚 1.0m, 壁長さ 15m】 指数



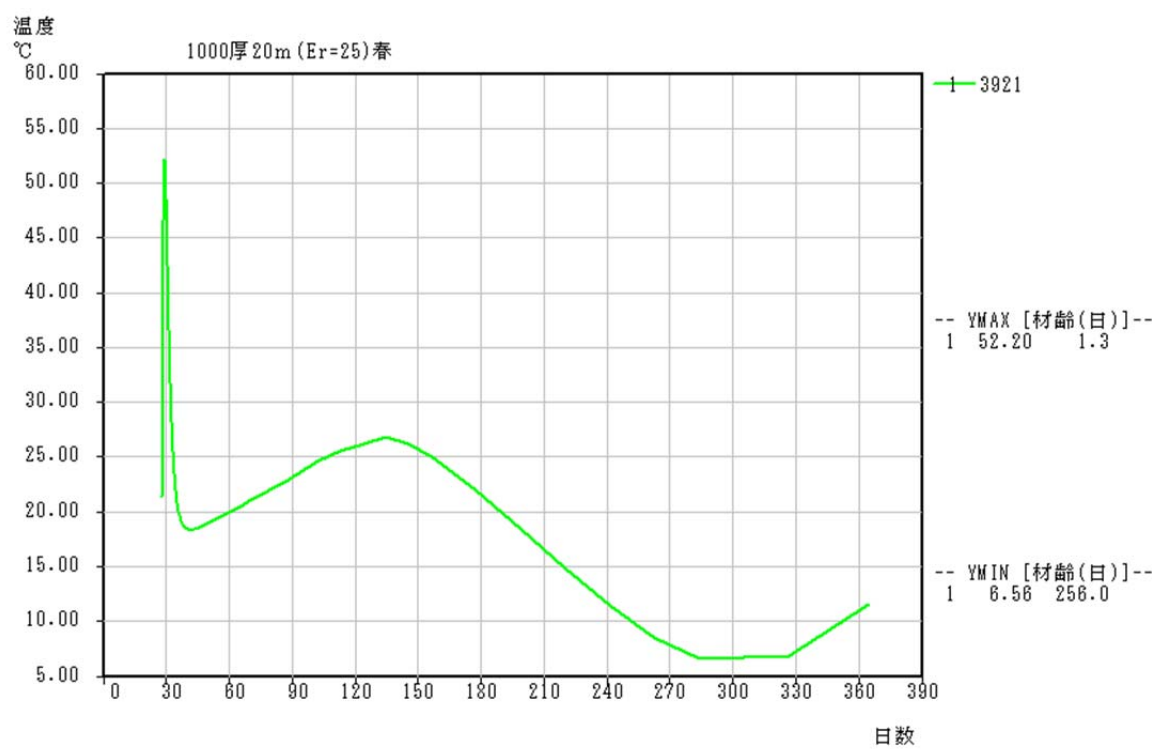
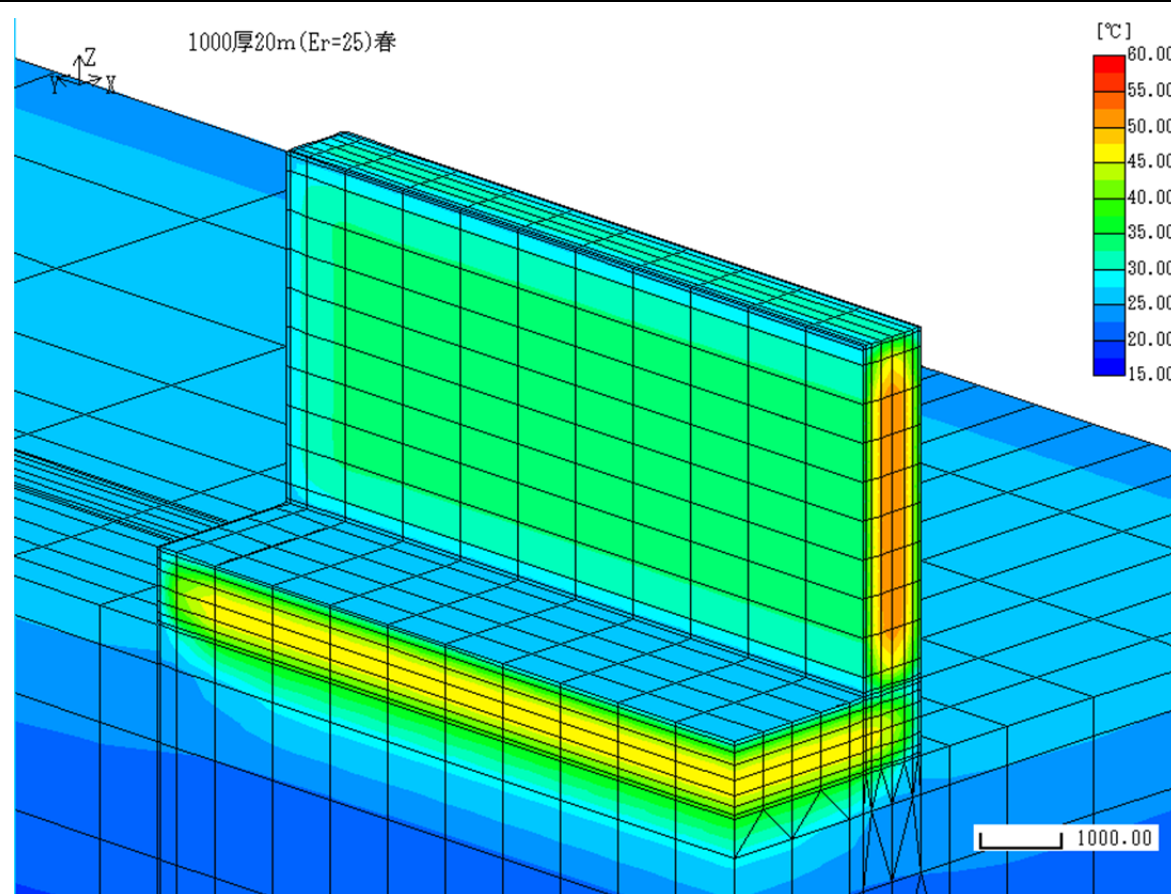
指数 (σ_y)

Index

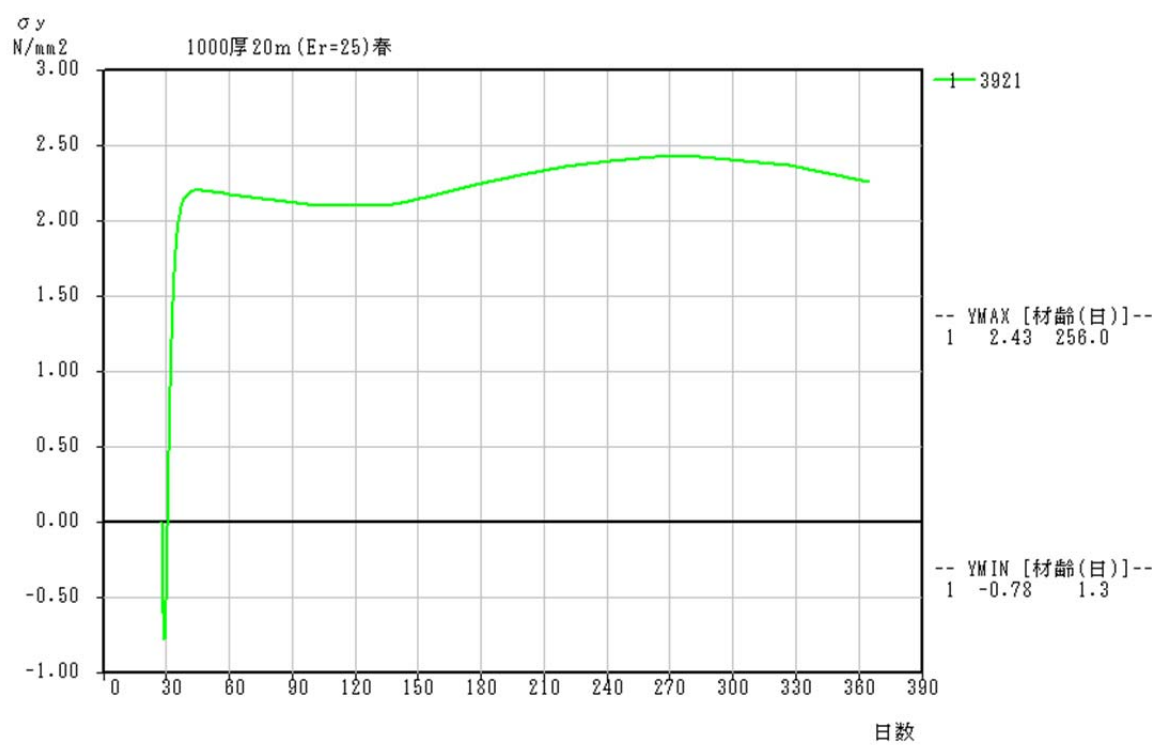
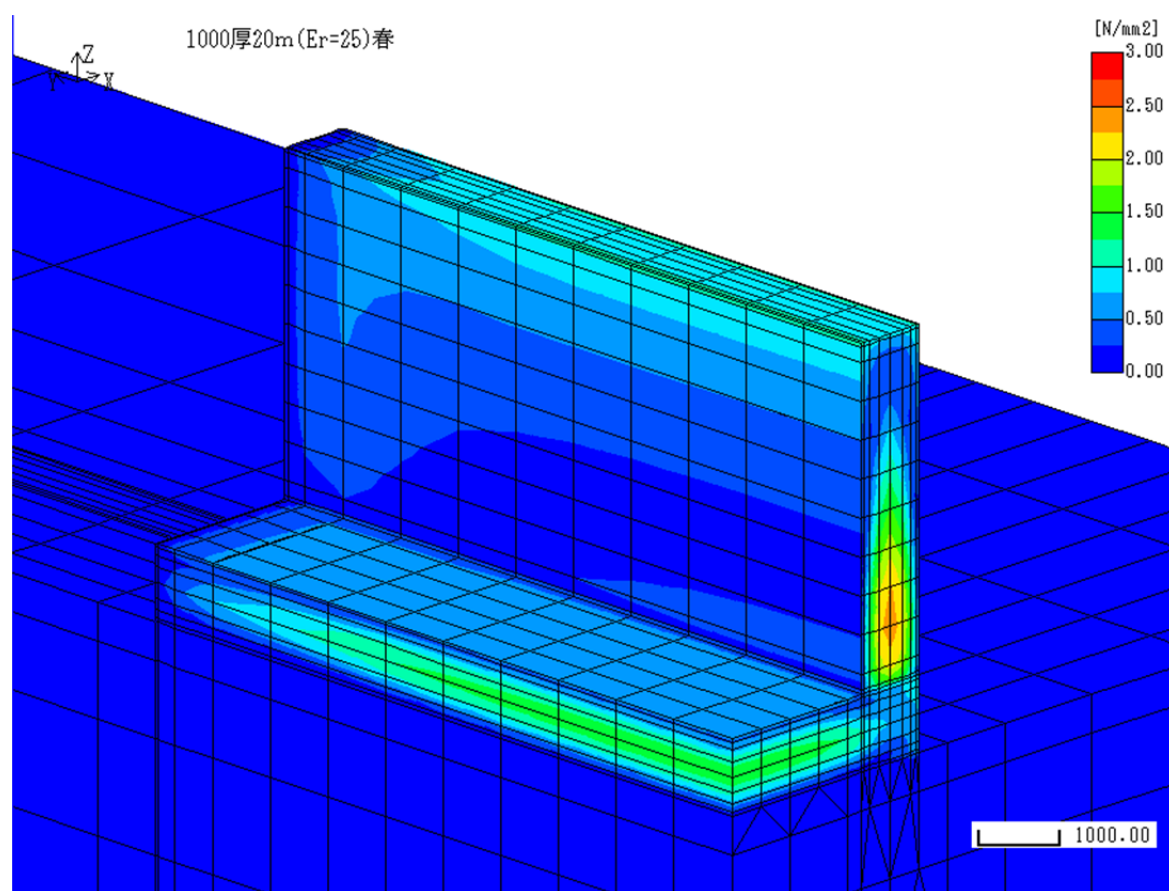
1000厚15m(Er=25)春



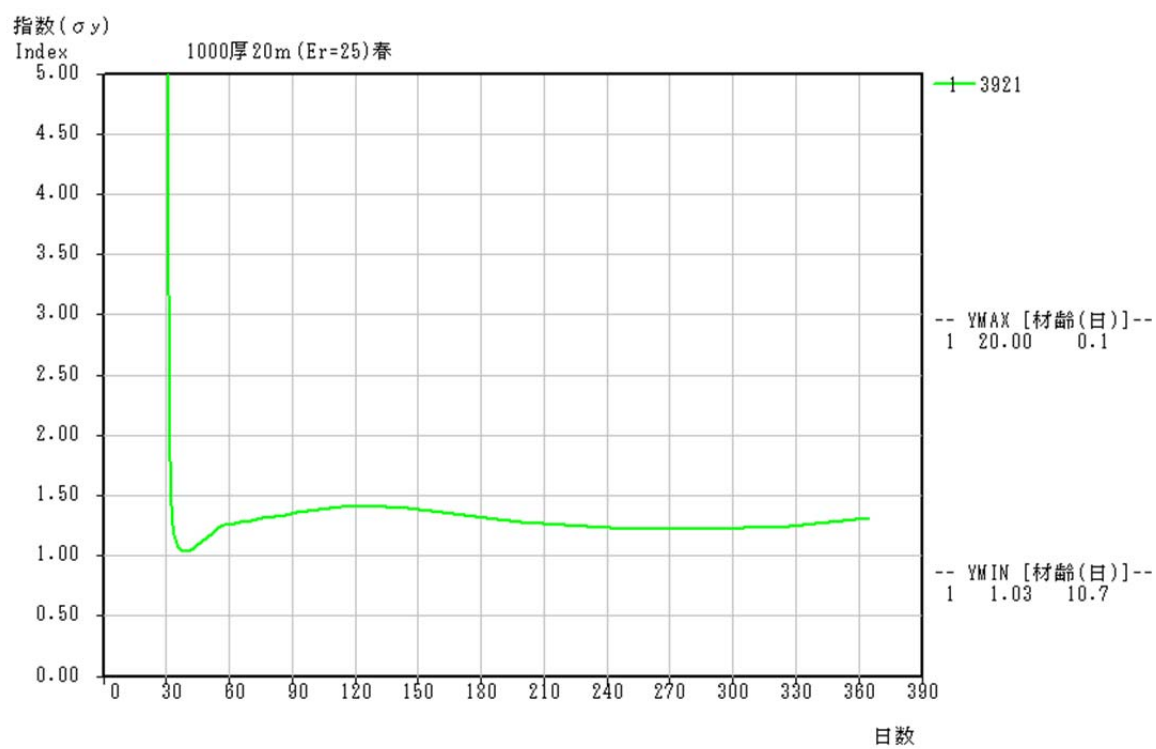
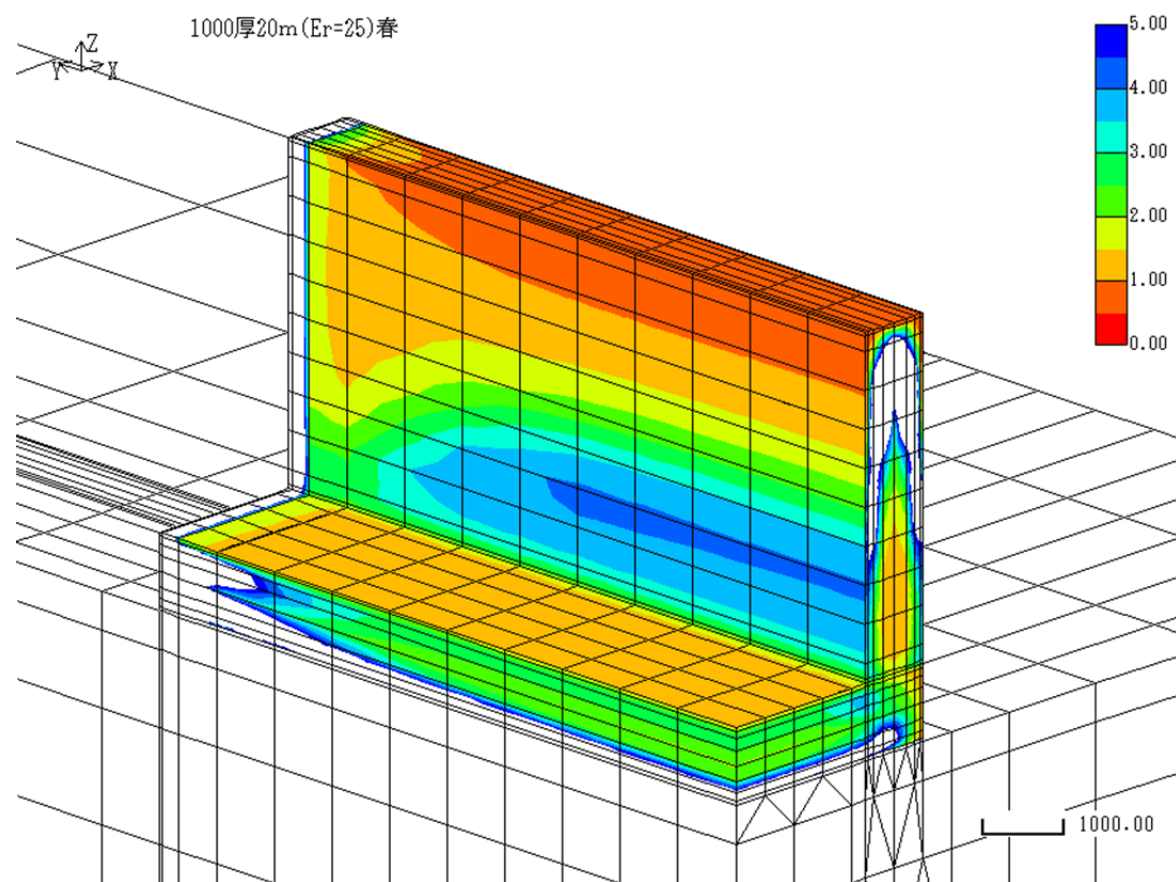
【壁厚 1.0m, 壁長さ 20m】 温度



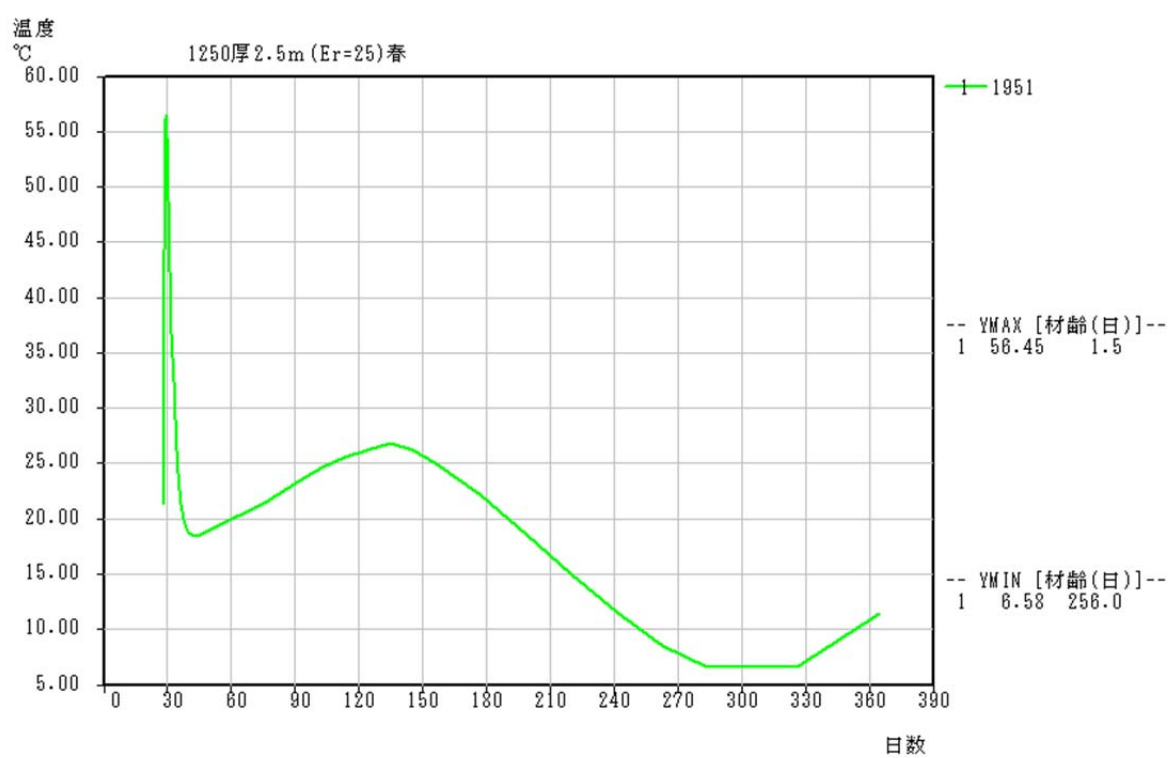
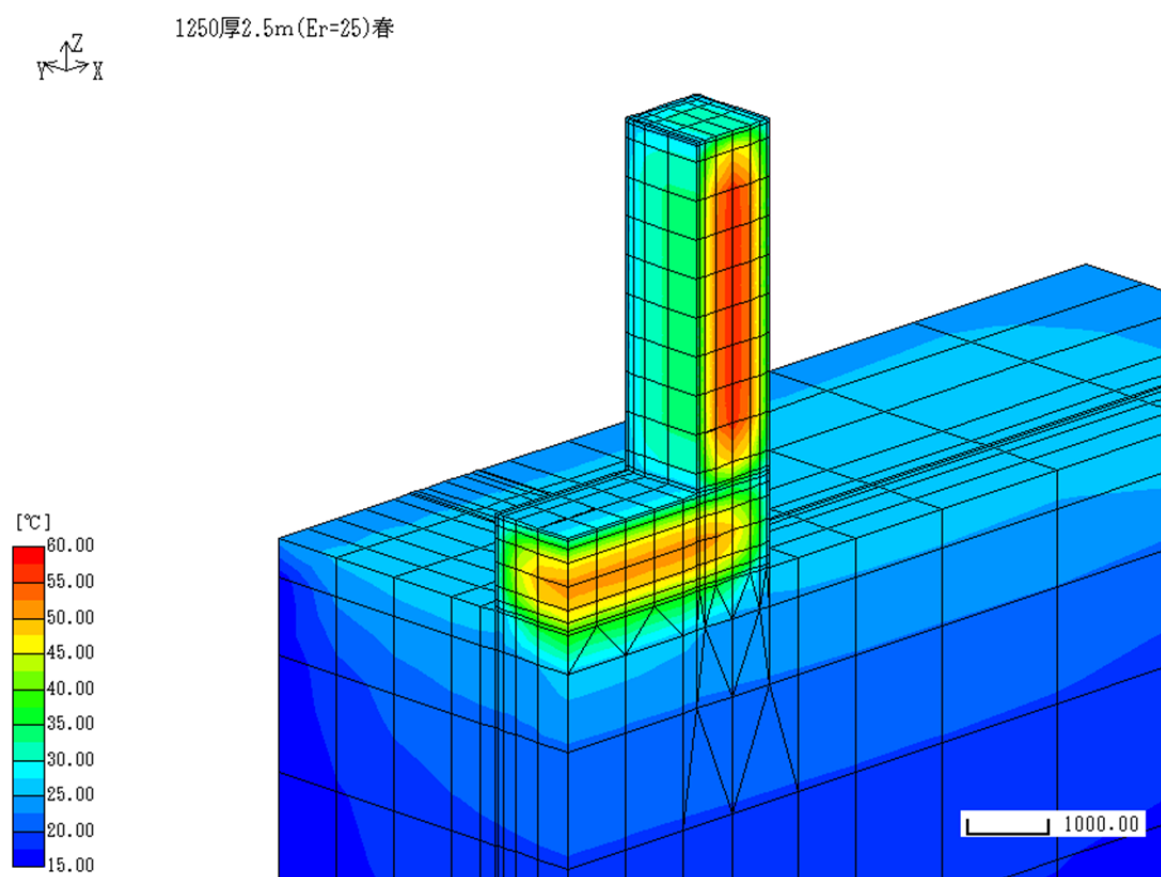
【壁厚 1.0m, 壁長さ 20m】 応力



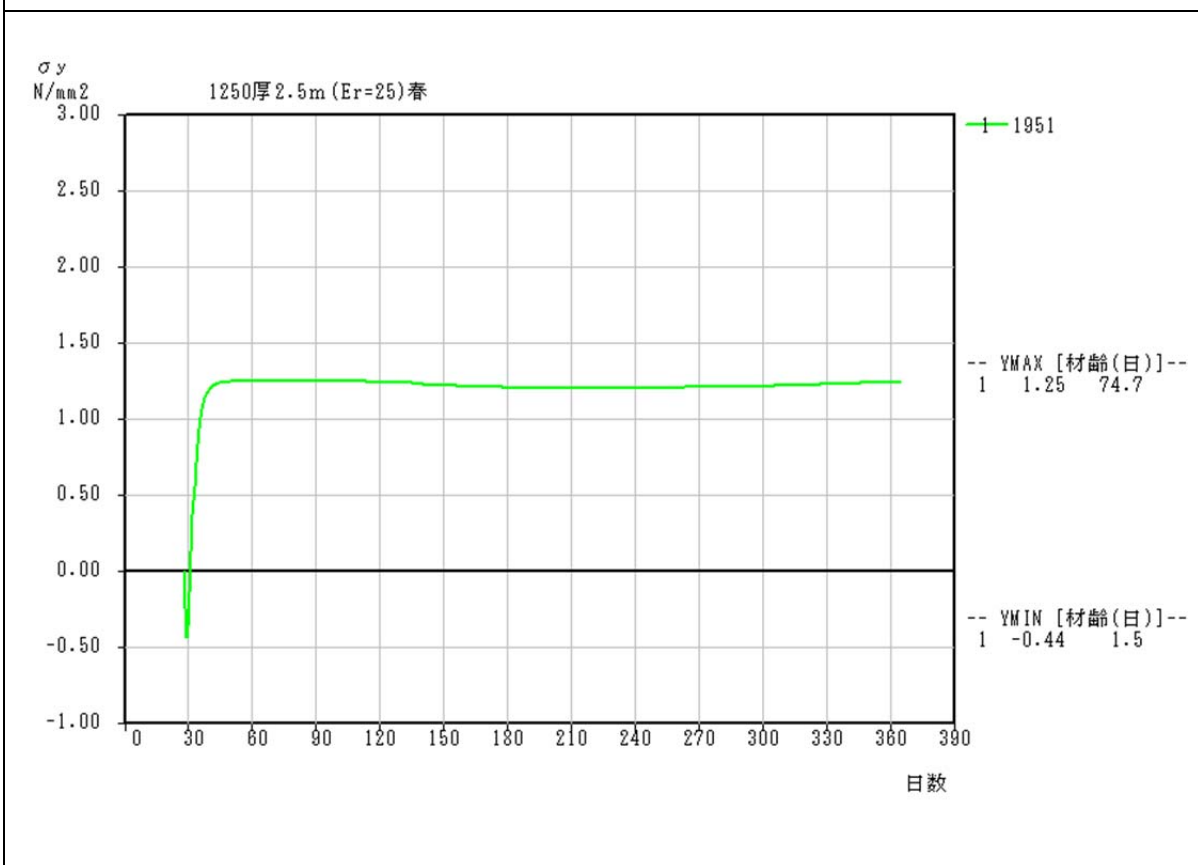
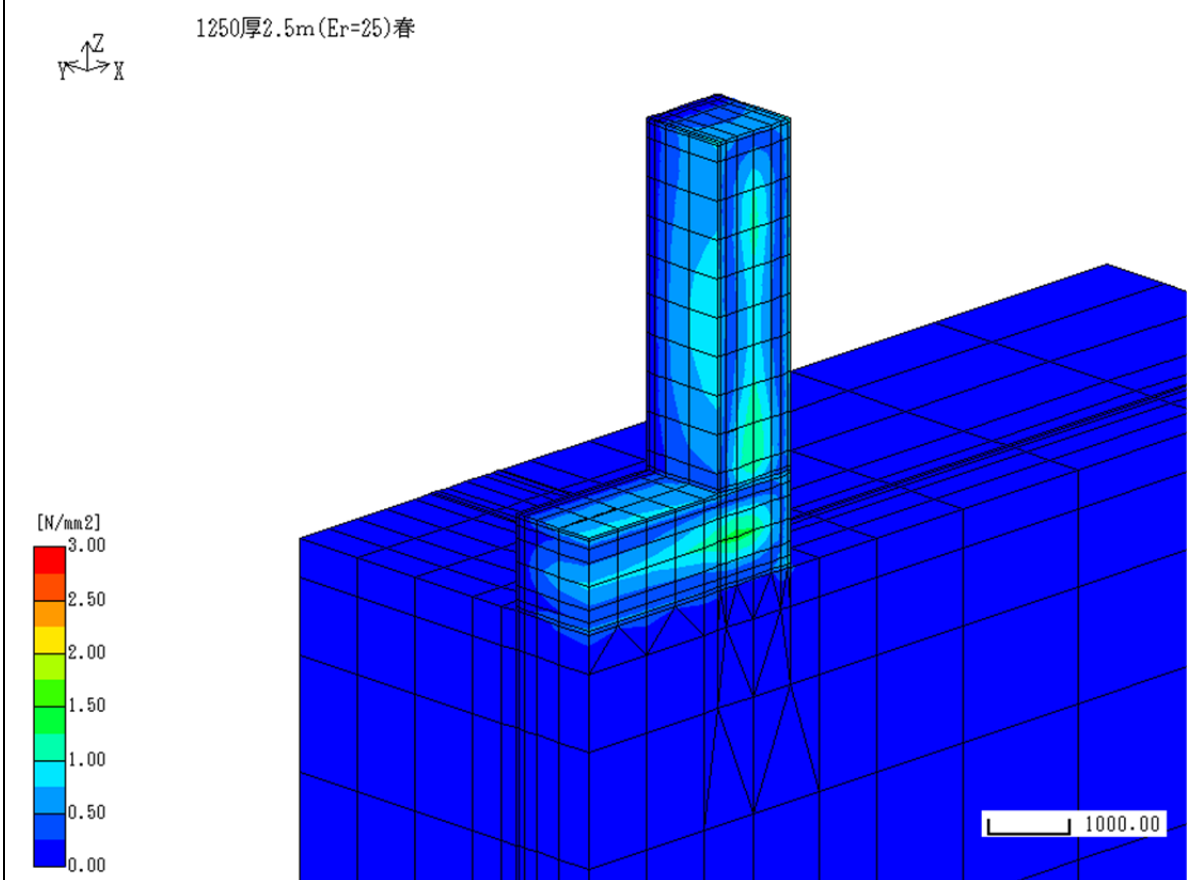
【壁厚 1.0m, 壁長さ 20m】 指数



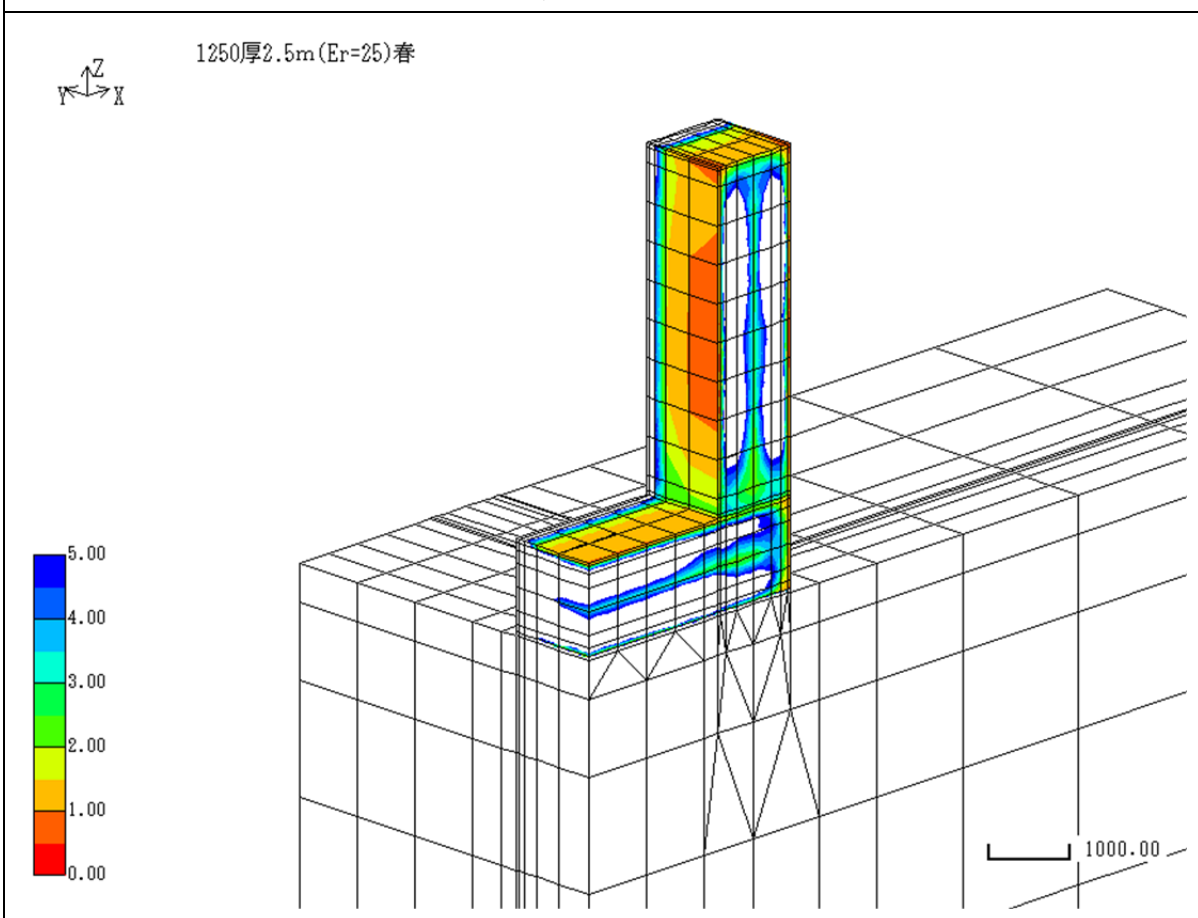
【壁厚 1.25m, 壁長さ 2.5m】 温度



【壁厚 1.25m, 壁長さ 2.5m】 応力



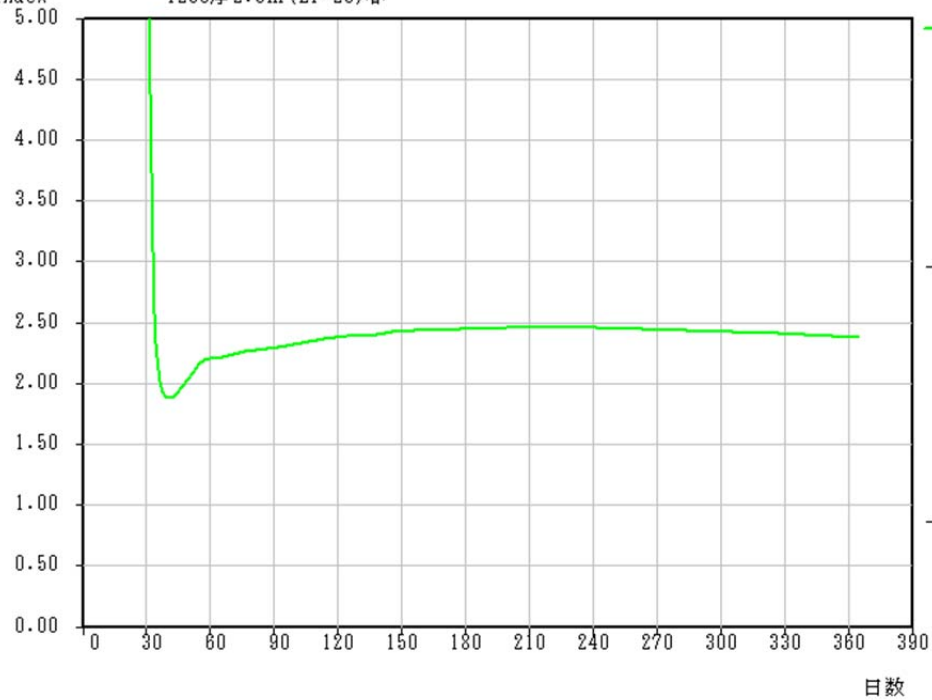
【壁厚 1.25m, 壁長さ 2.5m】 指数



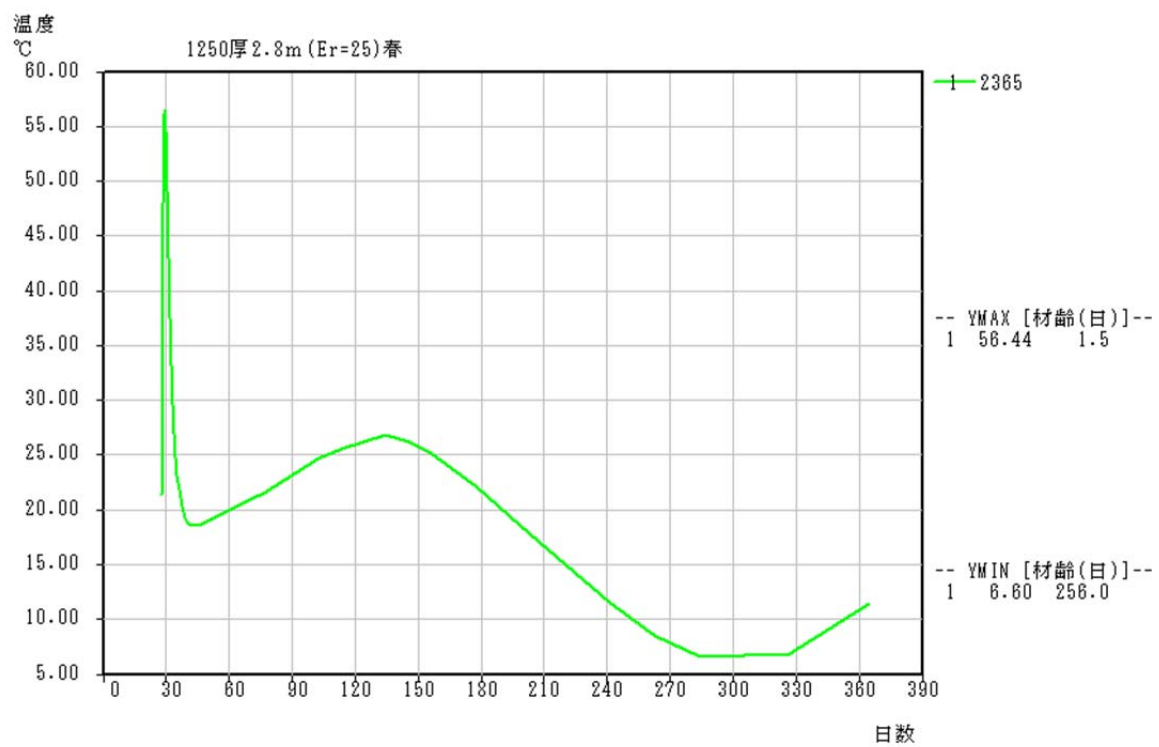
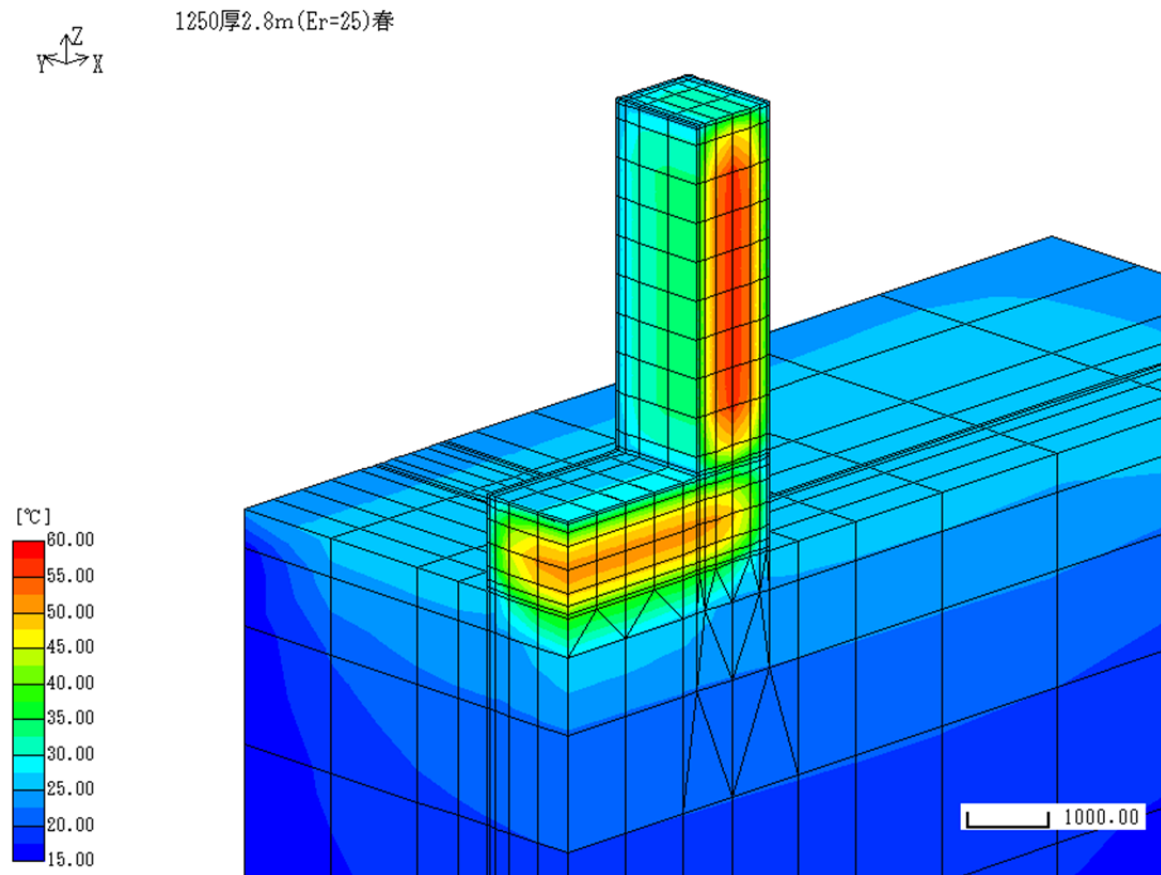
指数 (σ_y)

Index

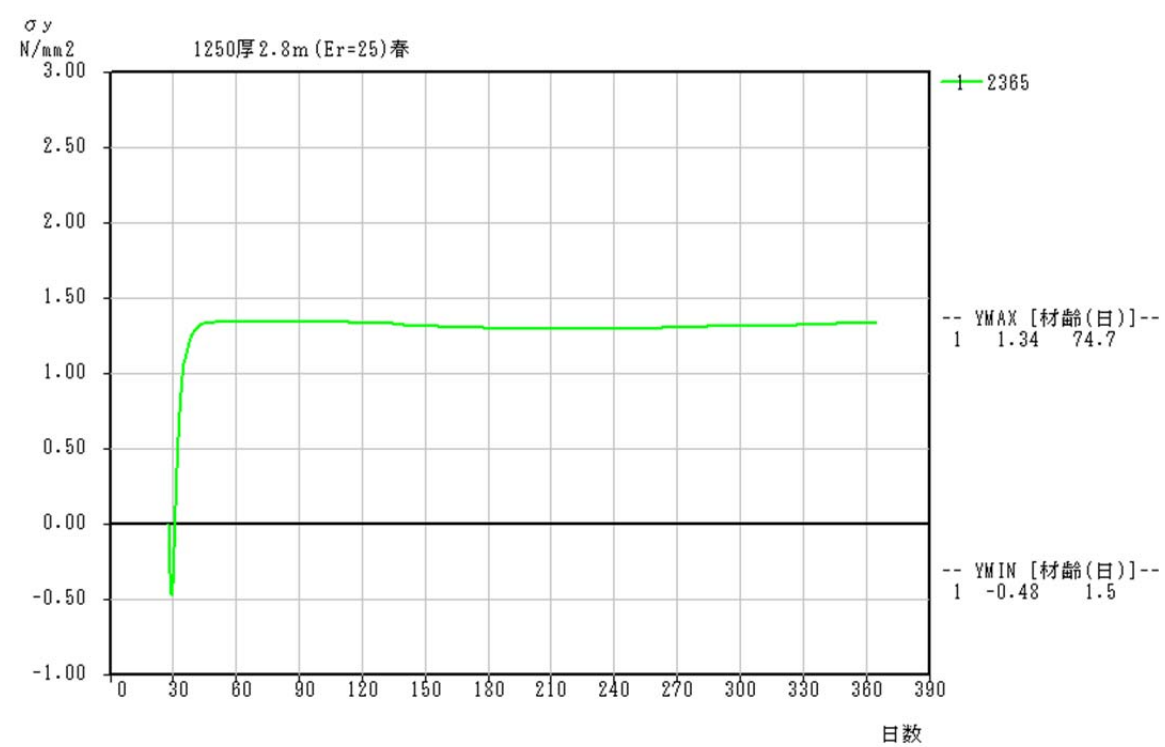
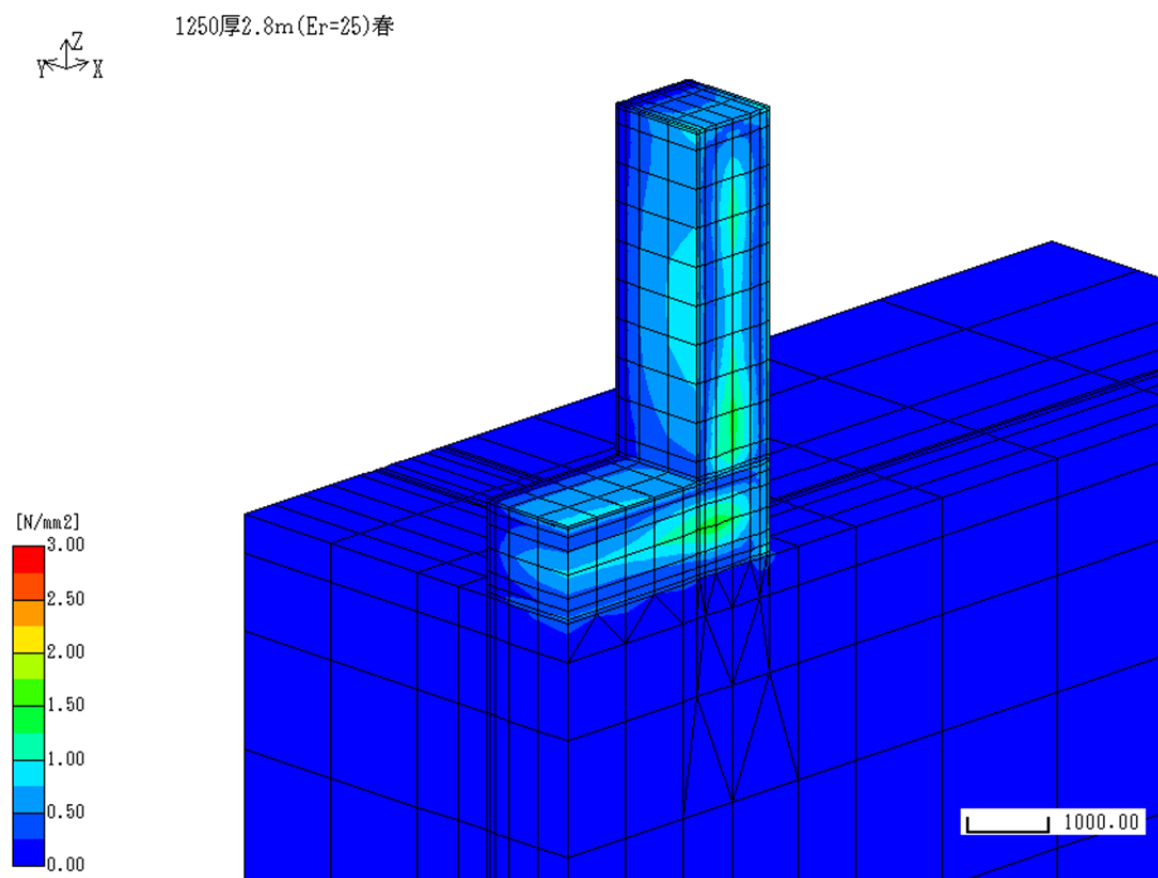
1250厚2.5m (Er=25) 春



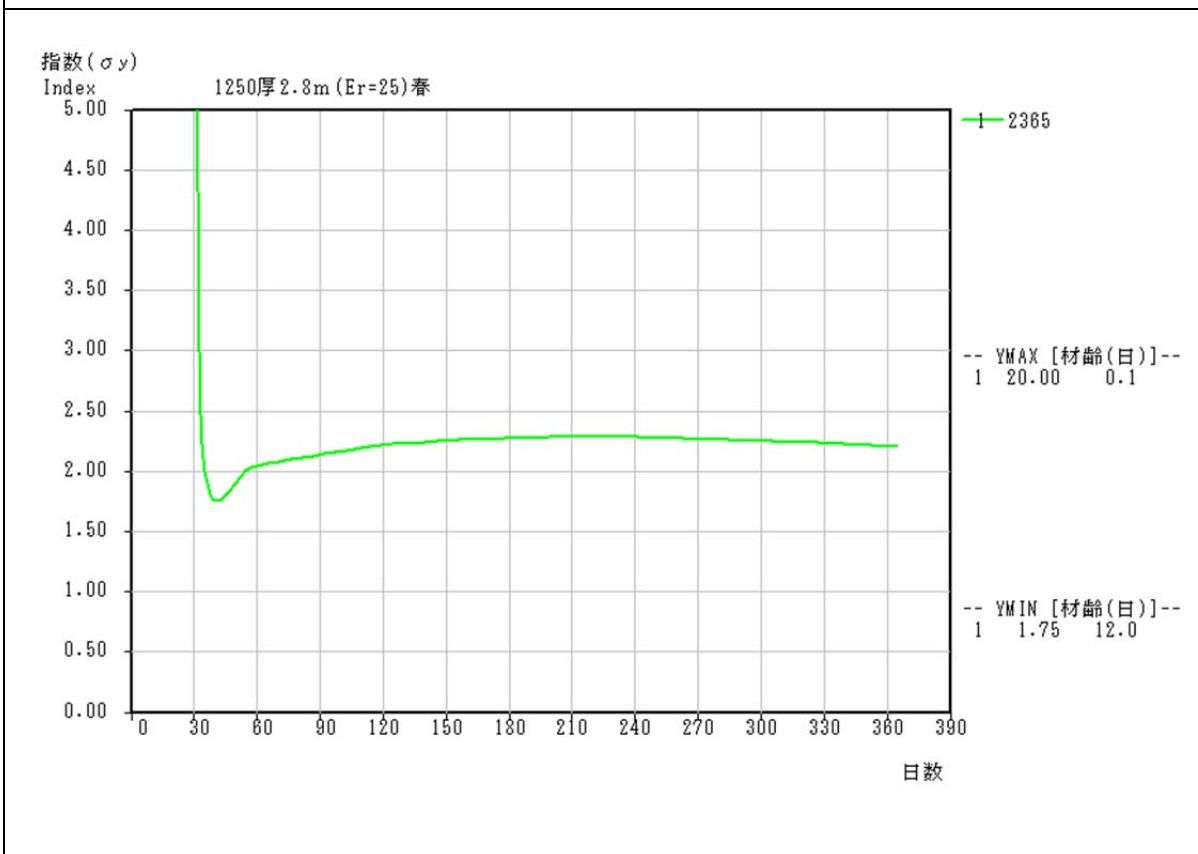
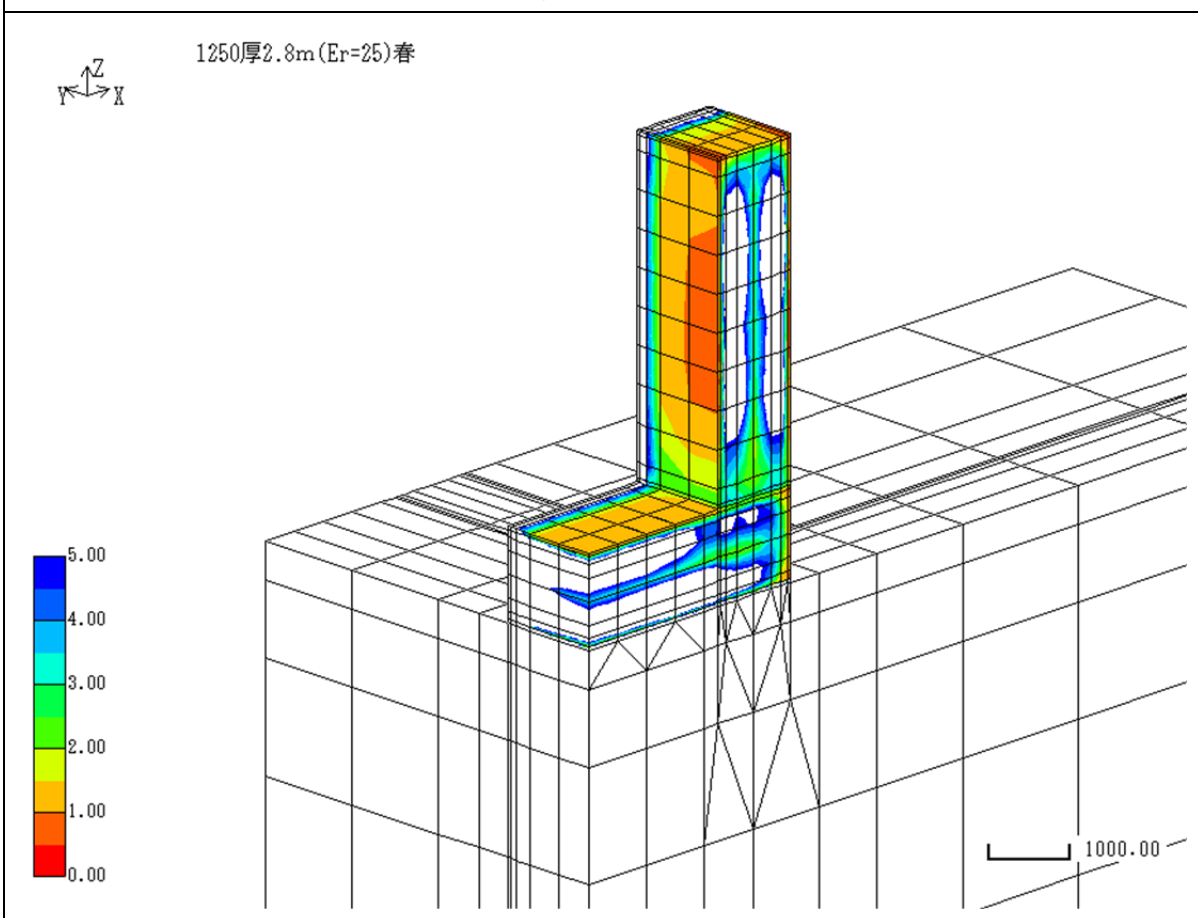
【壁厚 1.25m, 壁長さ 2.8m】 温度



【壁厚 1.25m, 壁長さ 2.8m】 応力

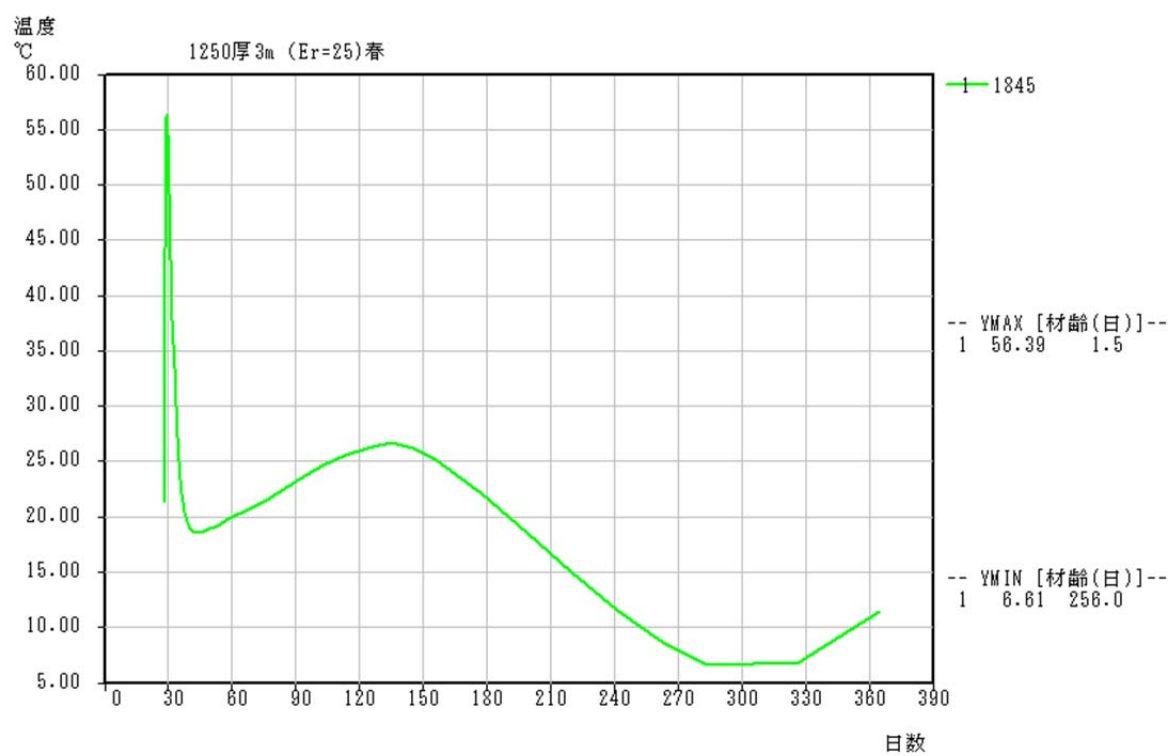
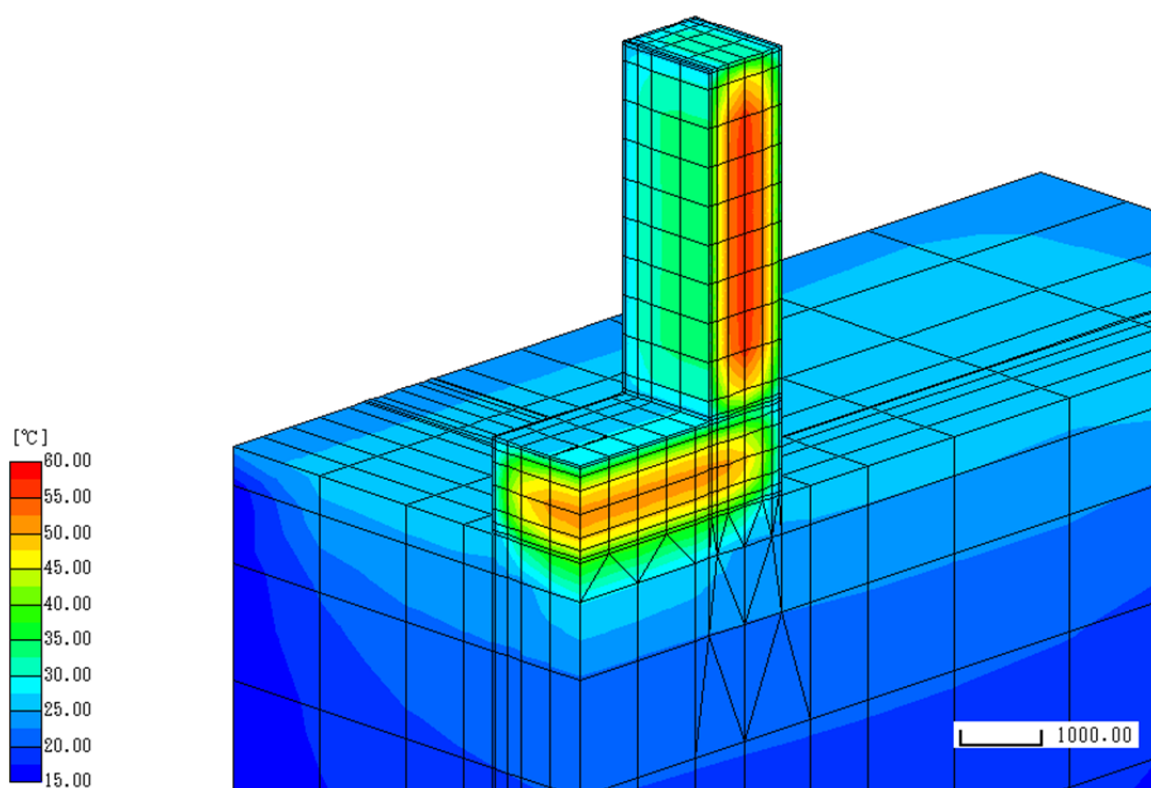


【壁厚 1.25m, 壁長さ 2.8m】 指数



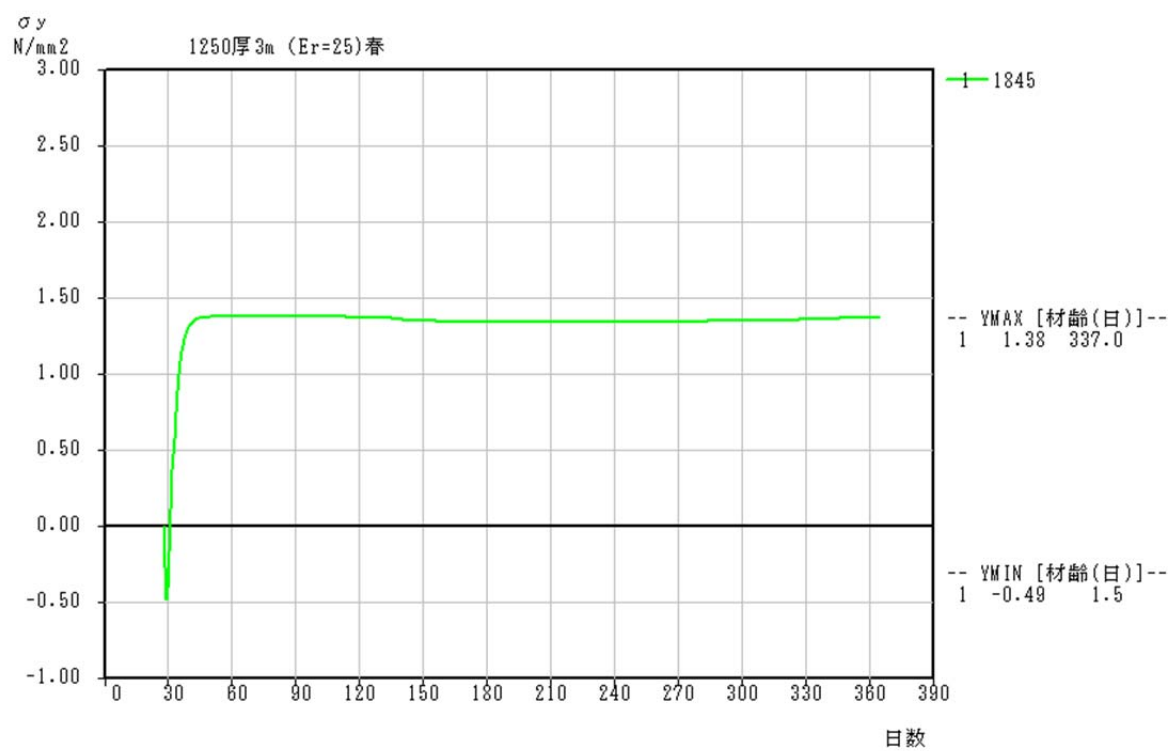
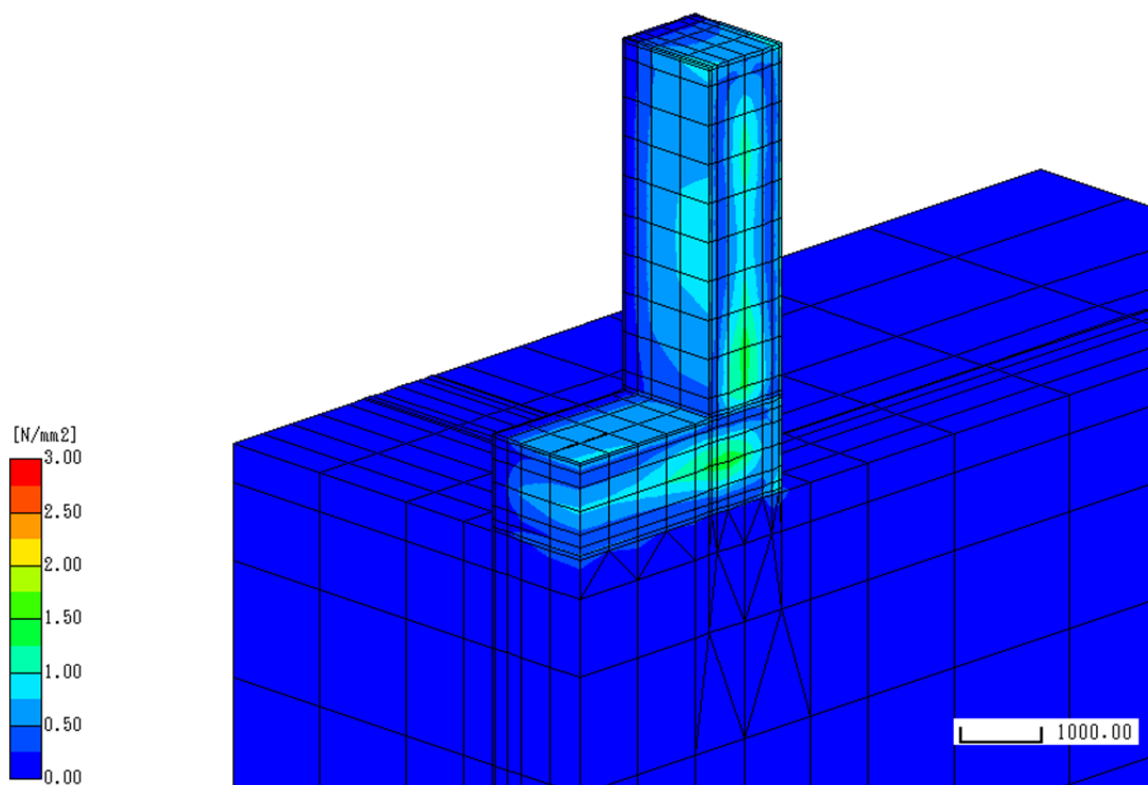
【壁厚 1.25m, 壁長さ 3m】 温度

1250厚3m (Er=25)春

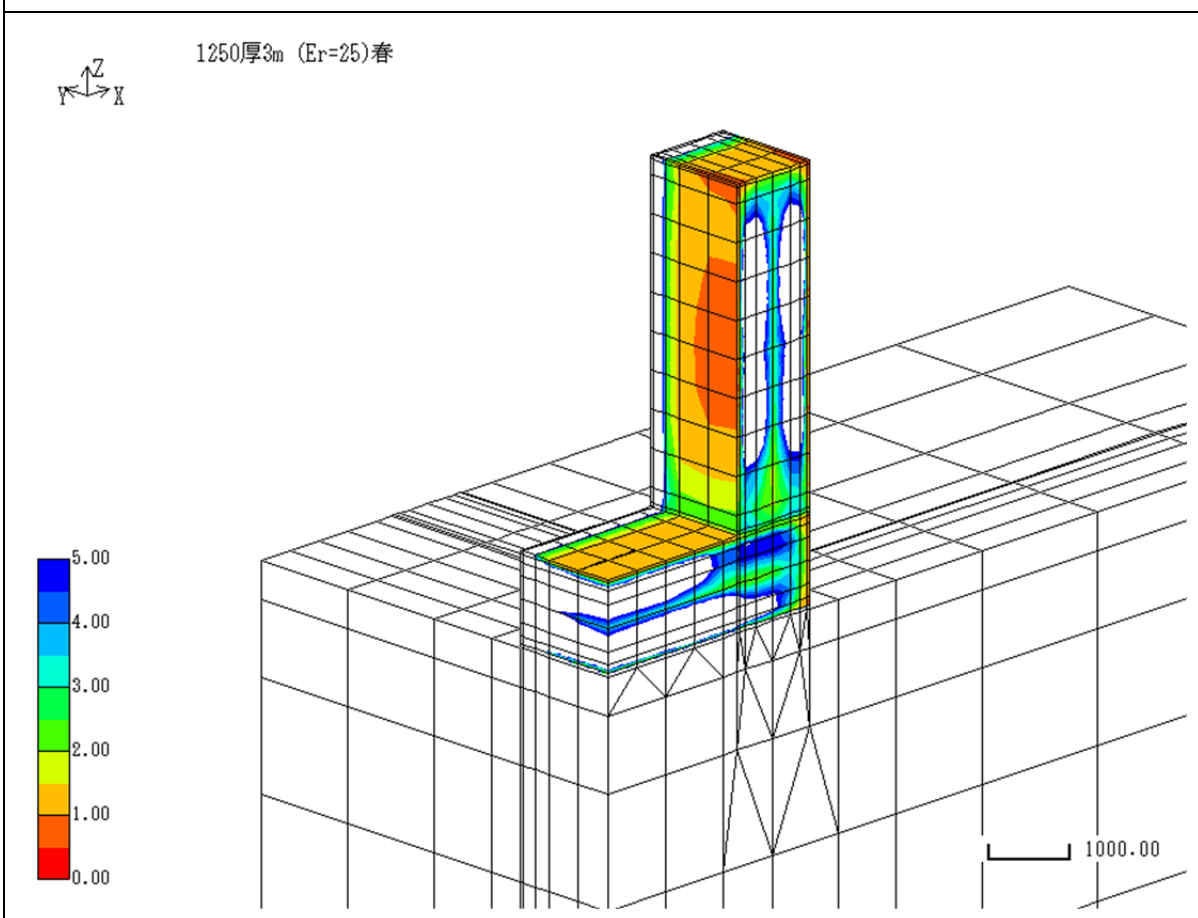



【壁厚 1.25m, 壁長さ 3m】 応力

1250厚3m (Er=25)春

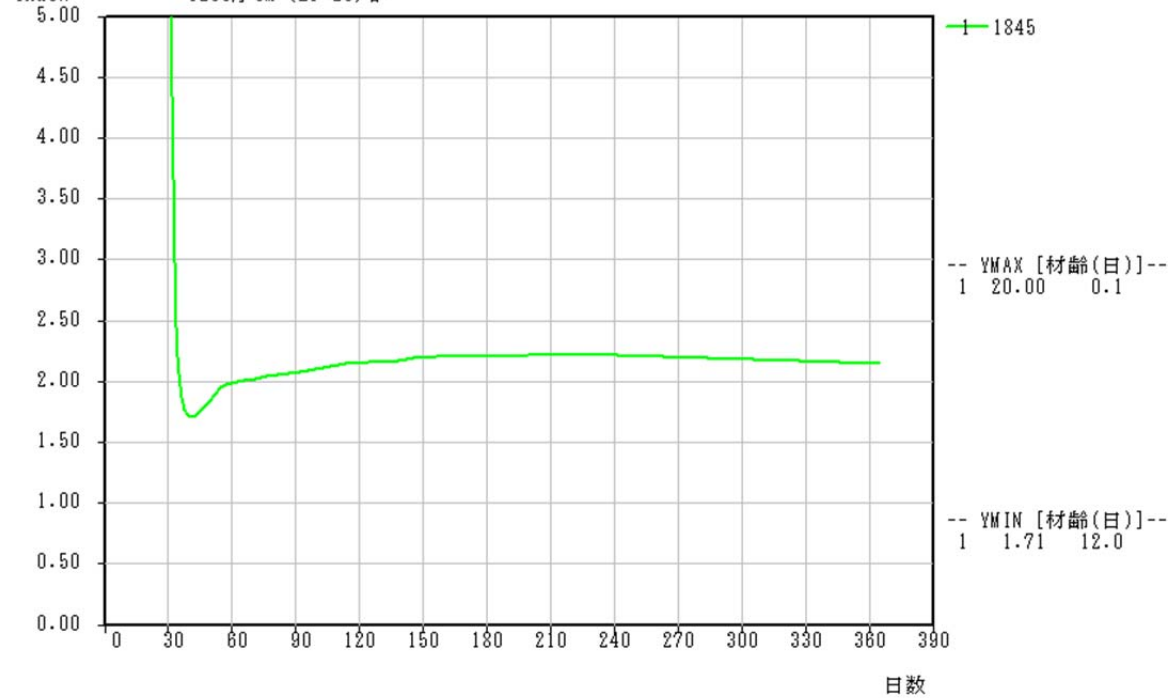



【壁厚 1.25m, 壁長さ 3m】 指数

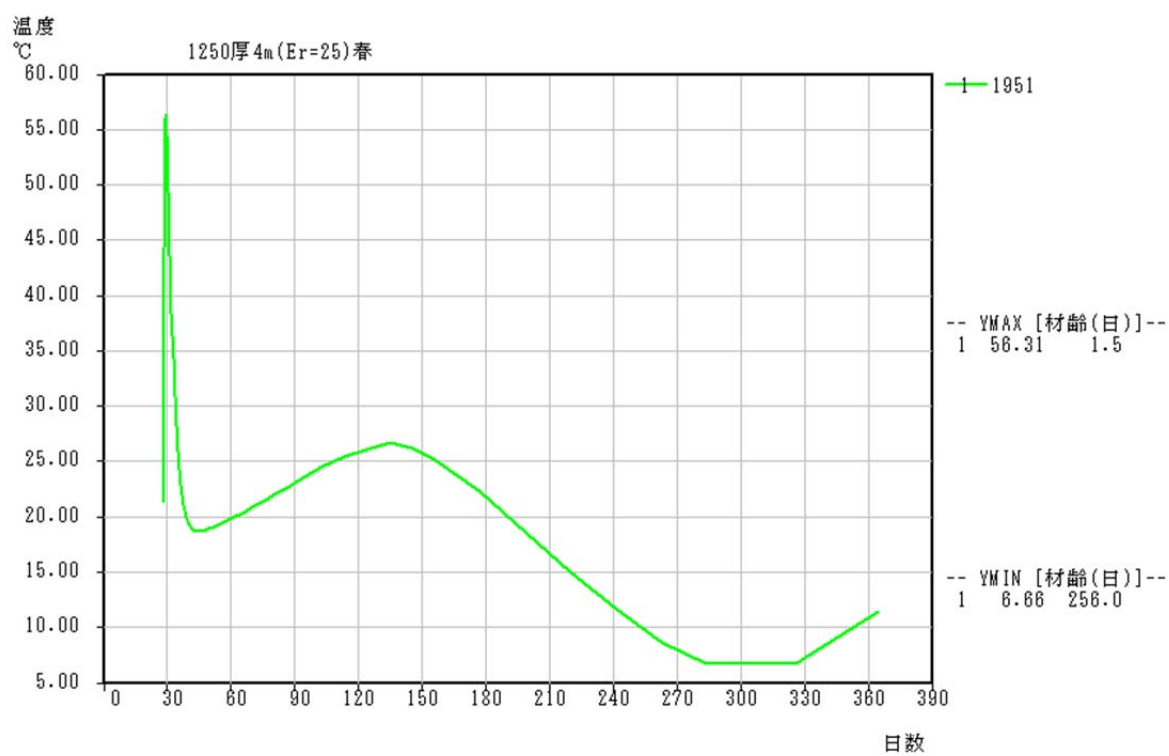
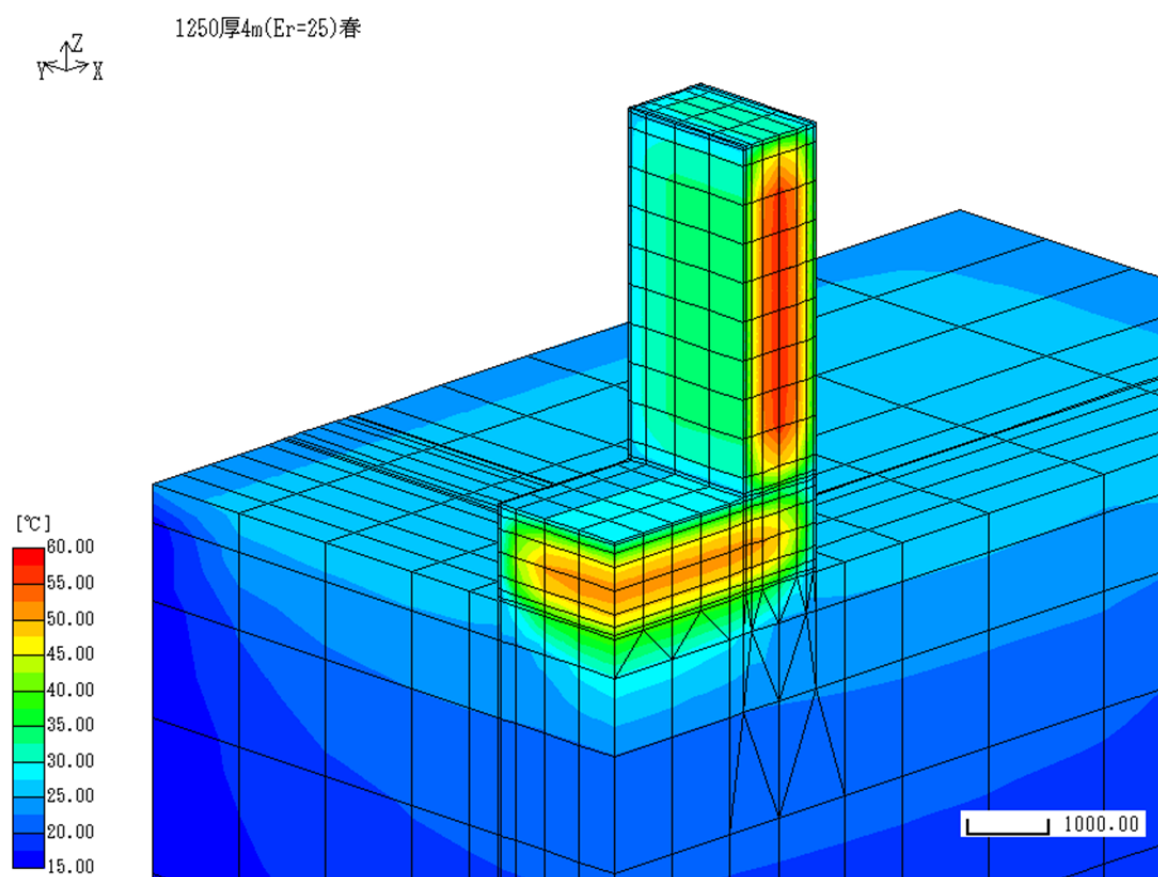


指数 (σ_y)

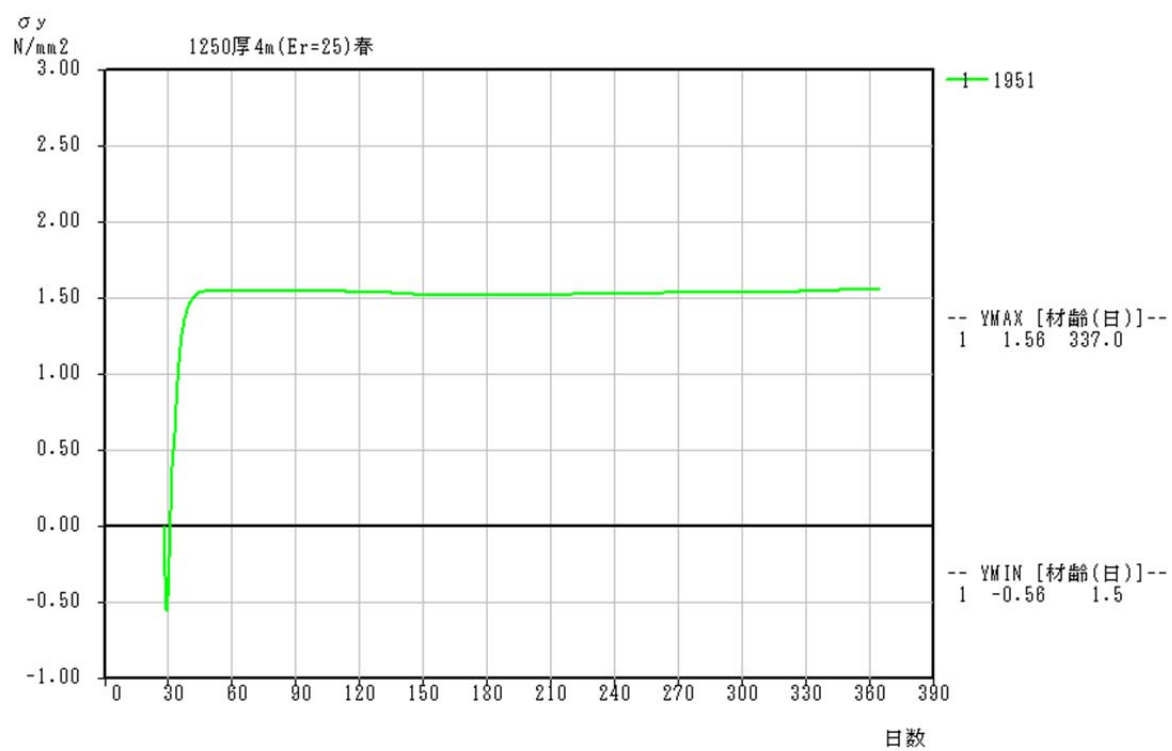
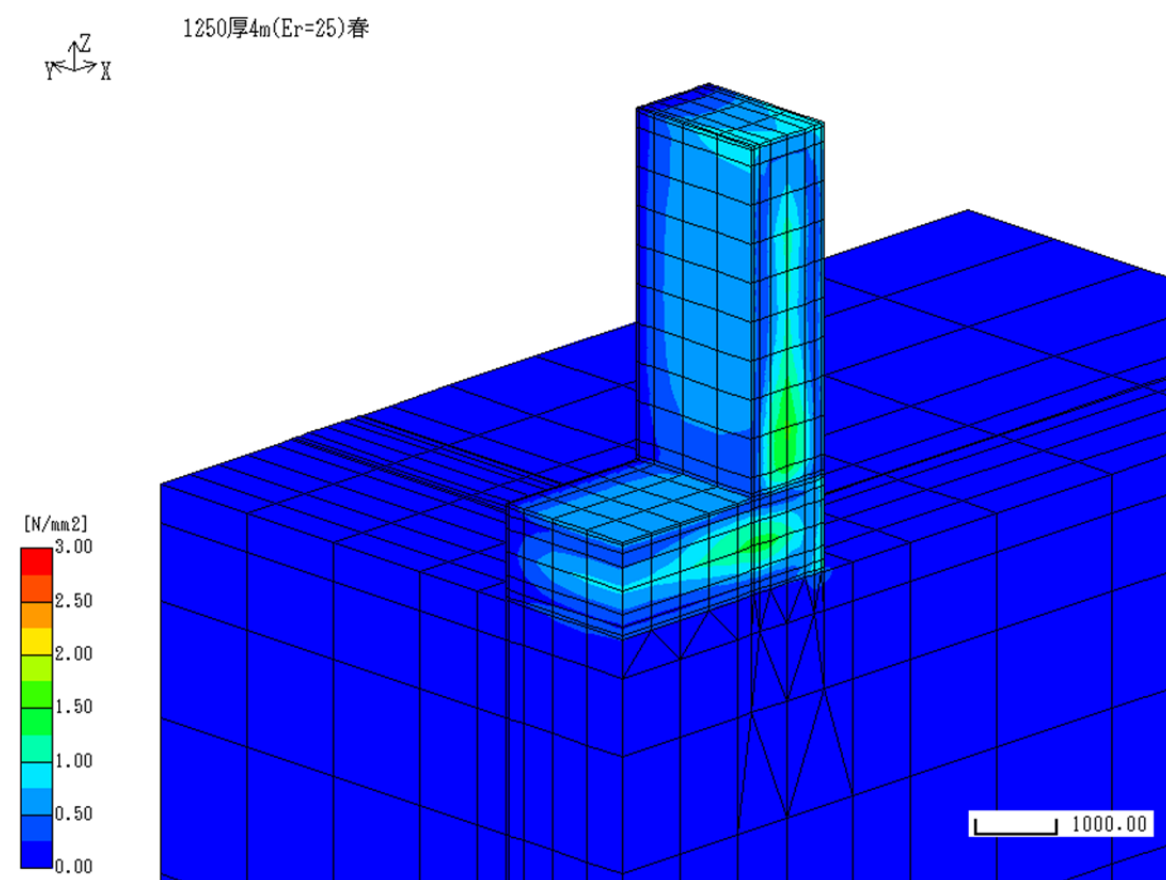
Index 1250厚3m (Er=25)春



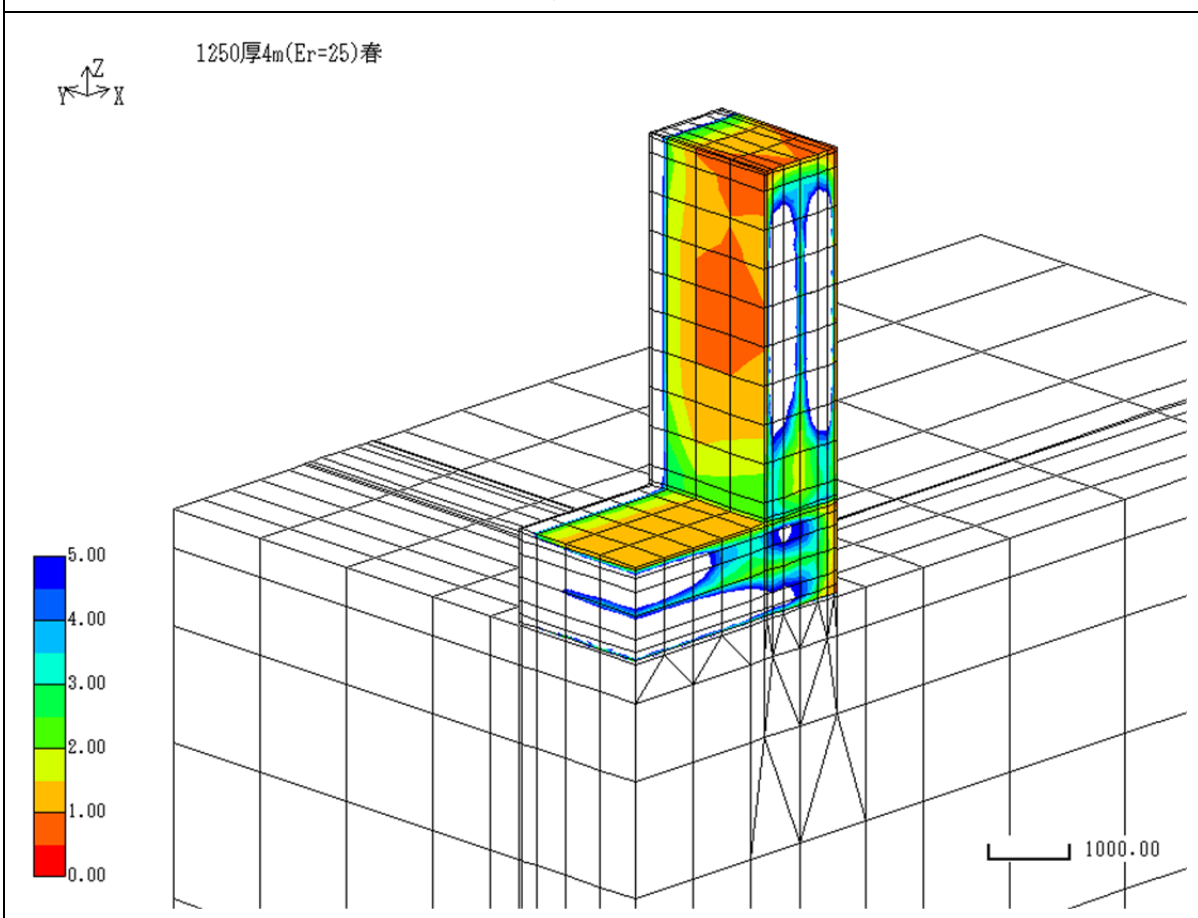
【壁厚 1.25m, 壁長さ 4m】 温度



【壁厚 1.25m, 壁長さ 4m】 応力

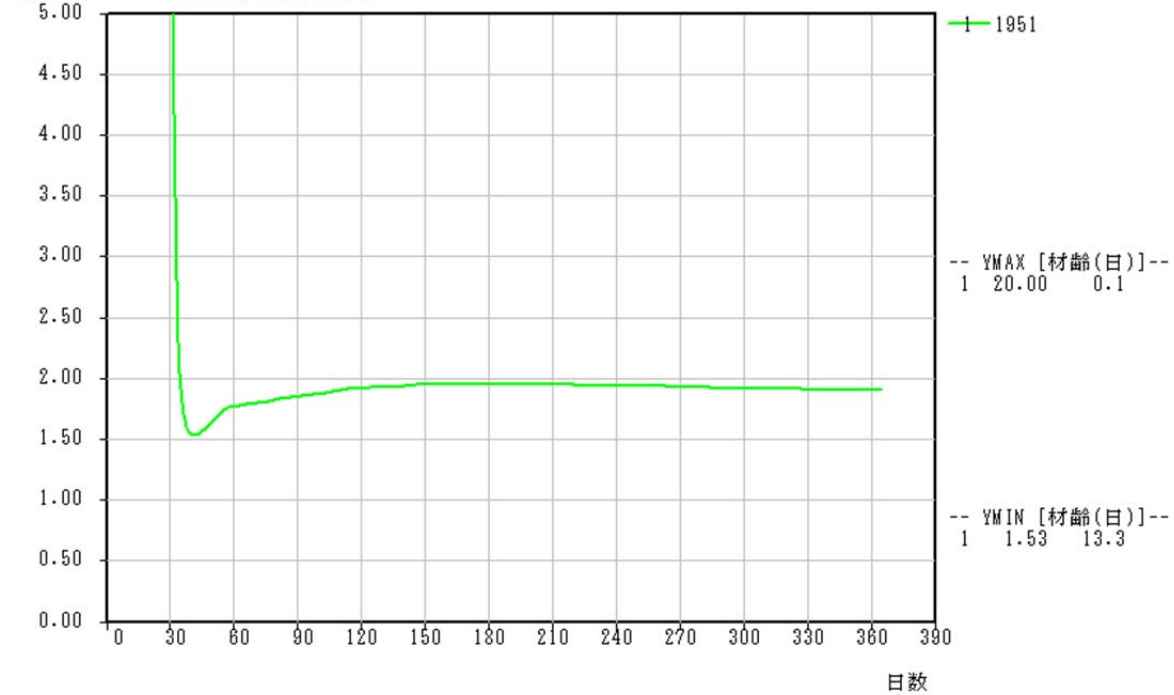


【壁厚 1.25m, 壁長さ 4m】 指数

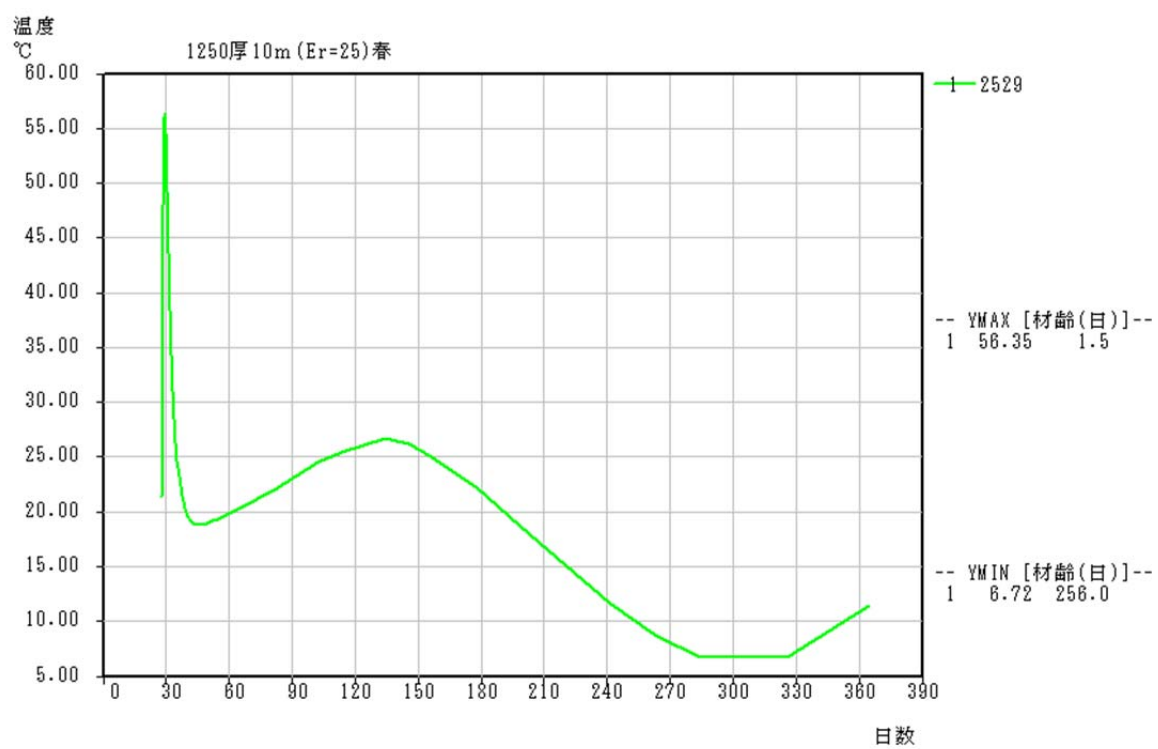
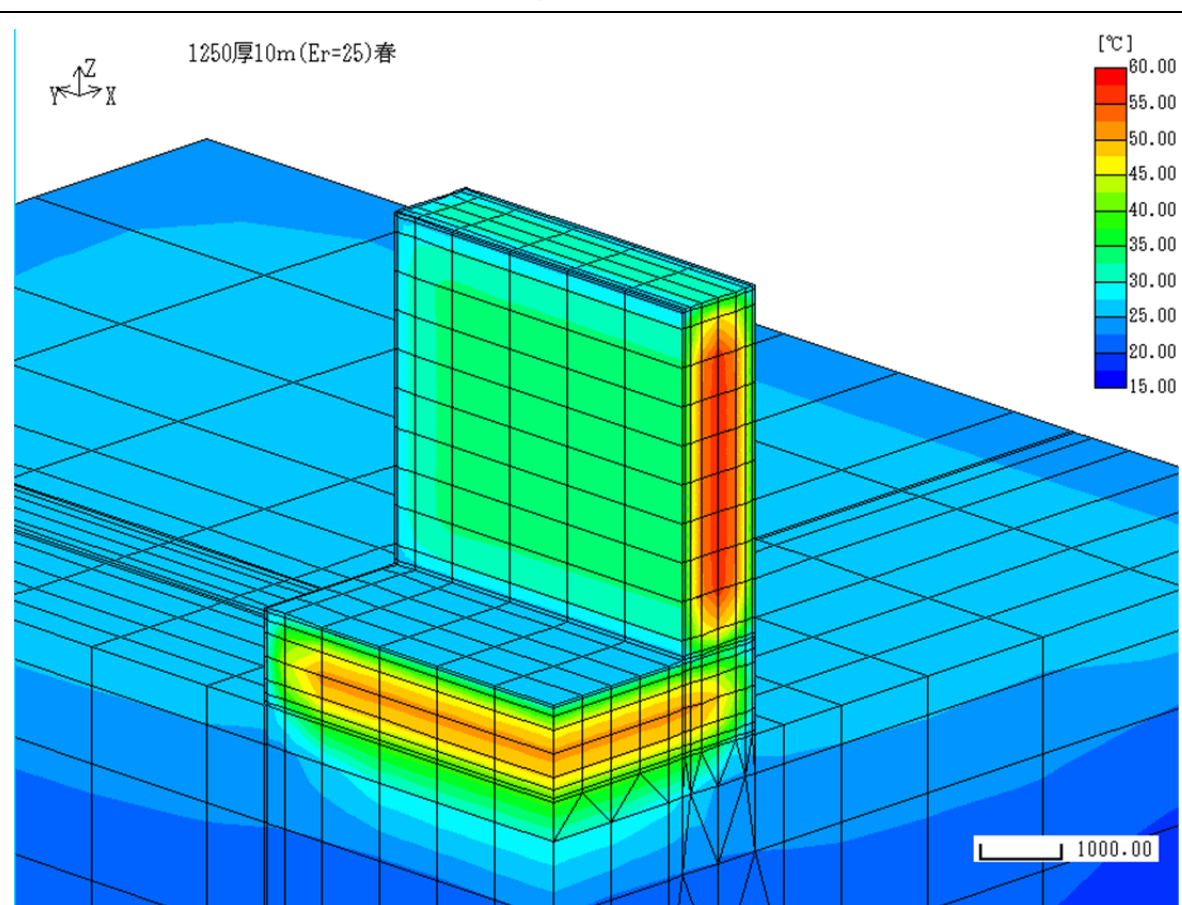


指数 (σ_y)

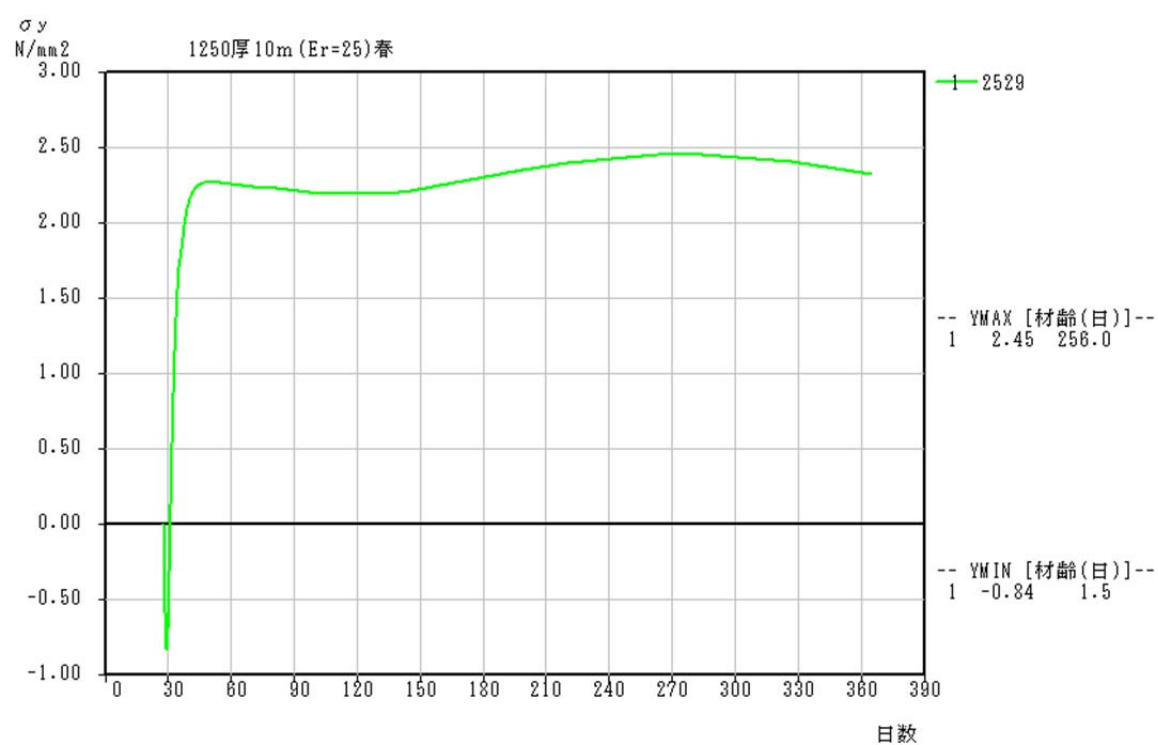
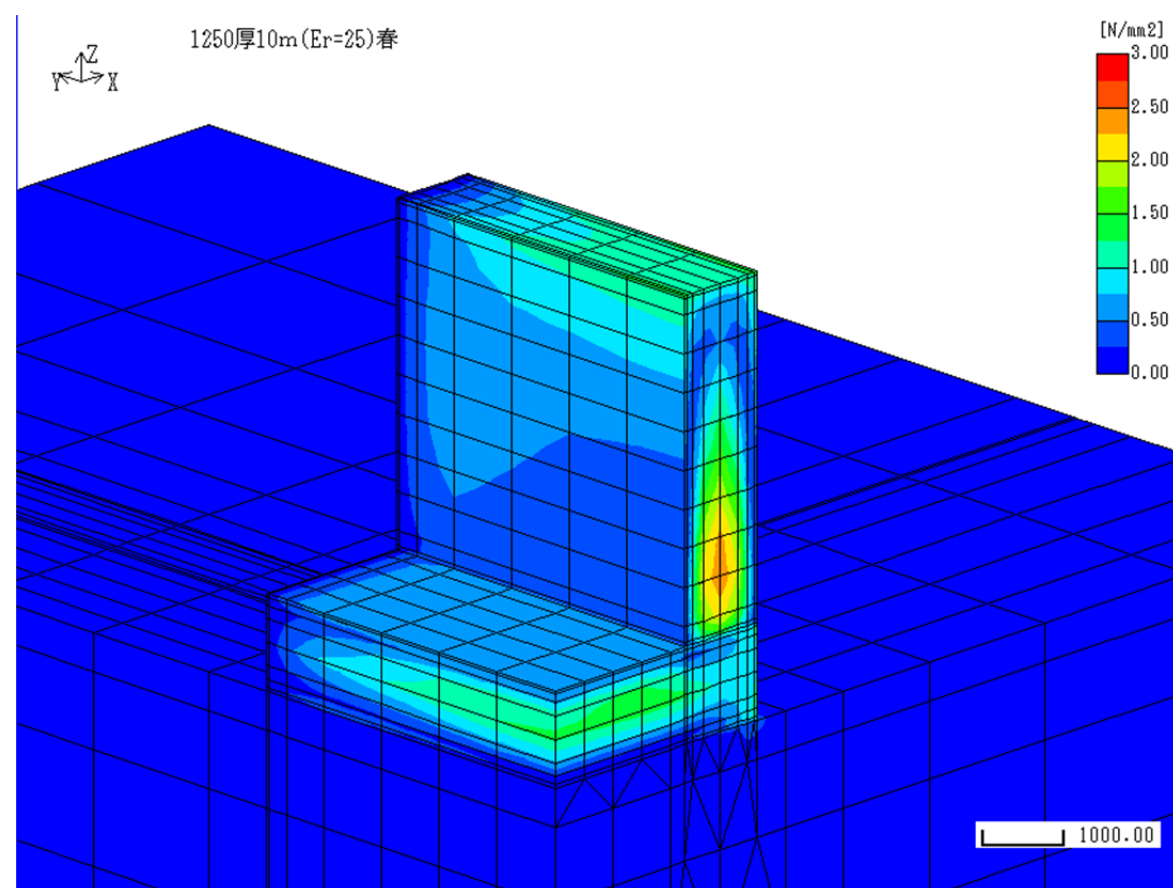
Index 1250厚4m(Er=25)春



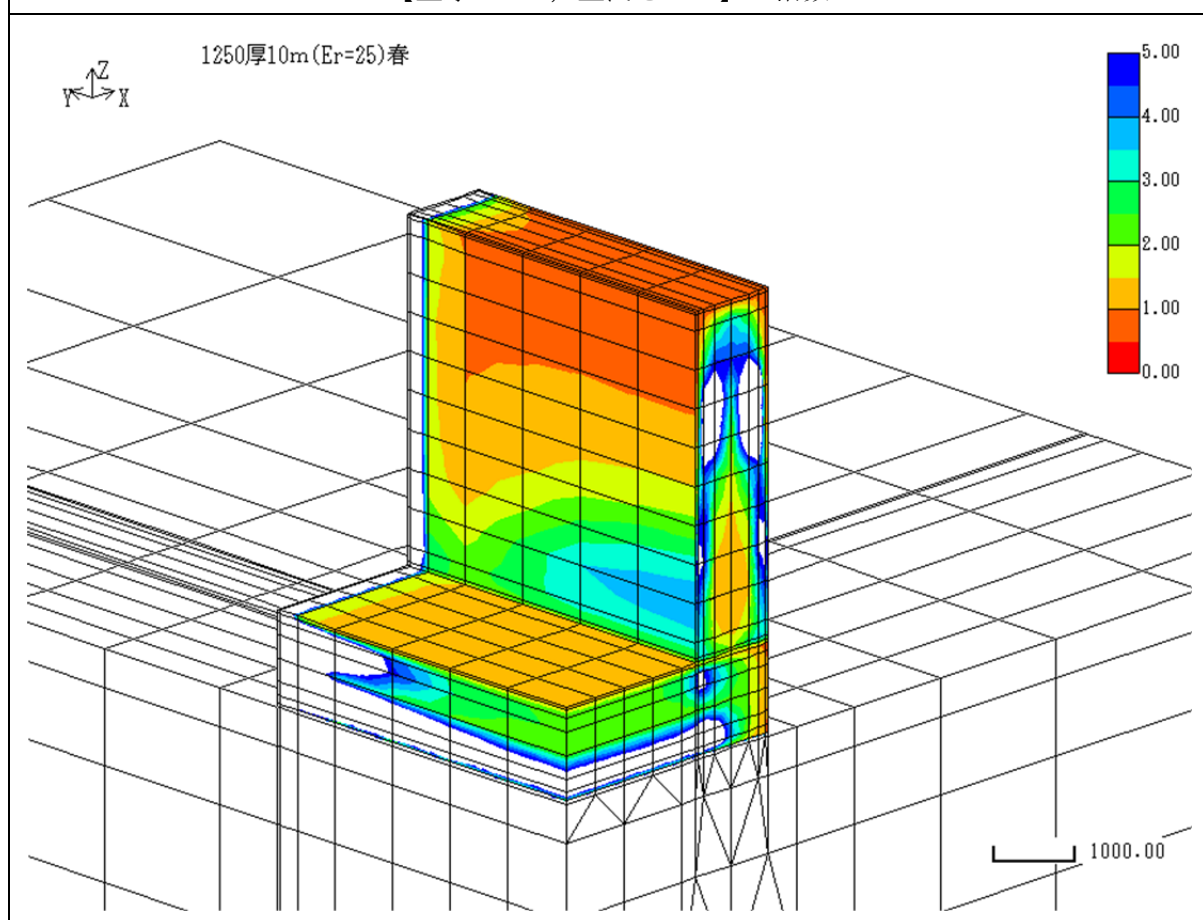
【壁厚 1.25m, 壁長さ 10m】 温度



【壁厚 1.25m, 壁長さ 10m】 応力



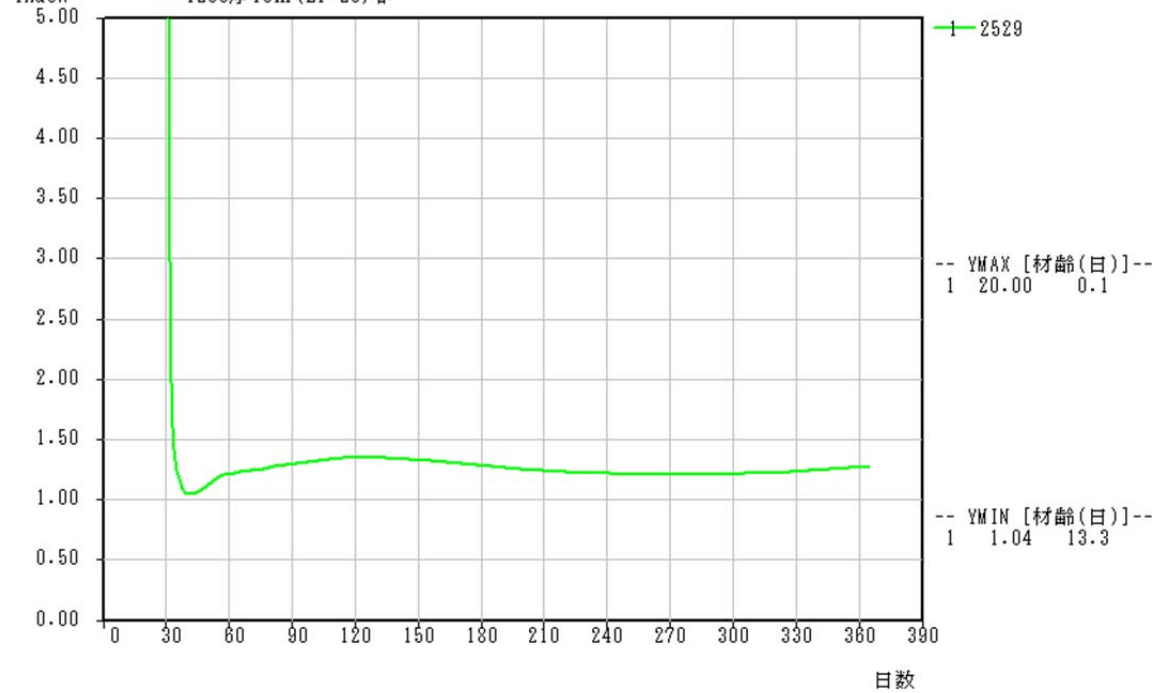
【壁厚 1.25m, 壁長さ 10m】 指数



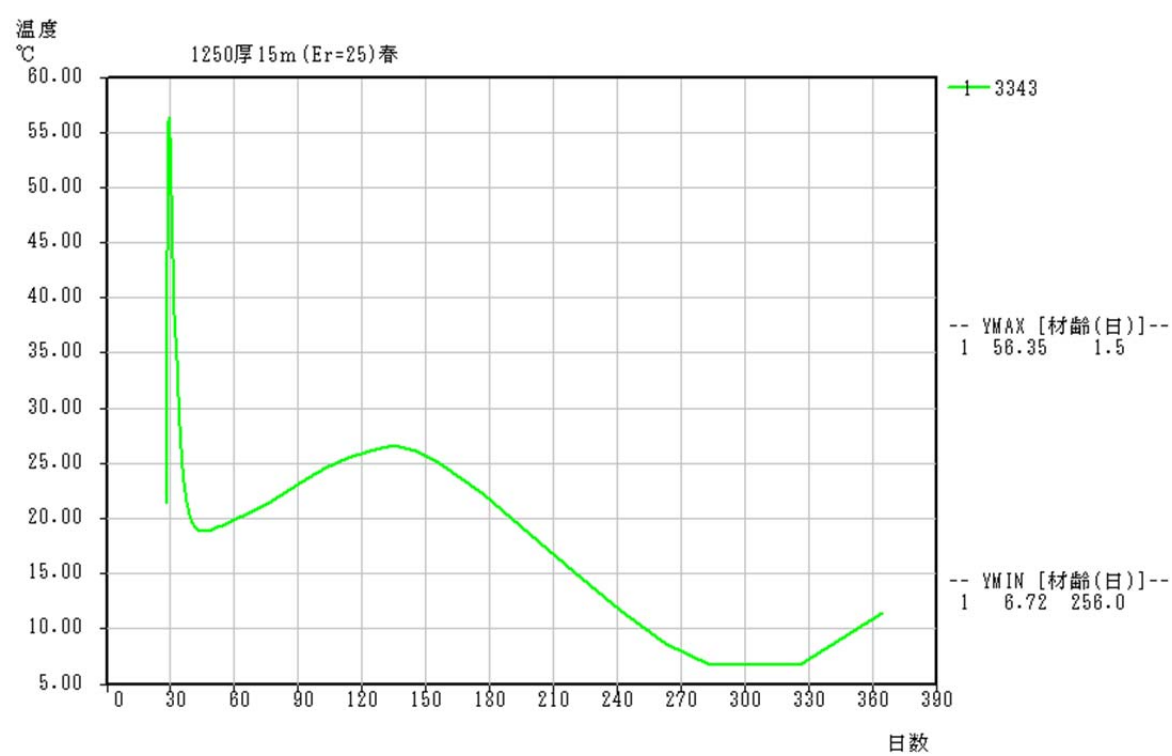
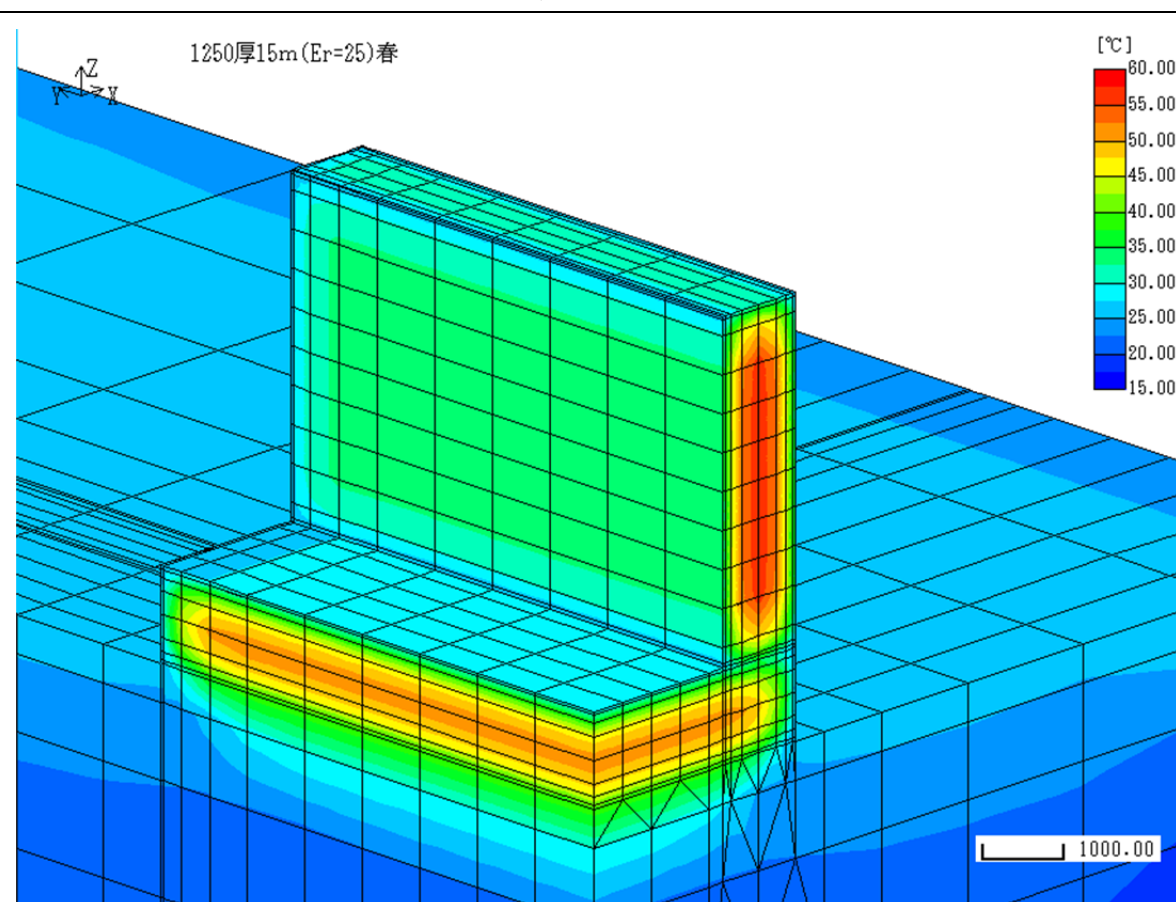
指数 (σ_y)

Index

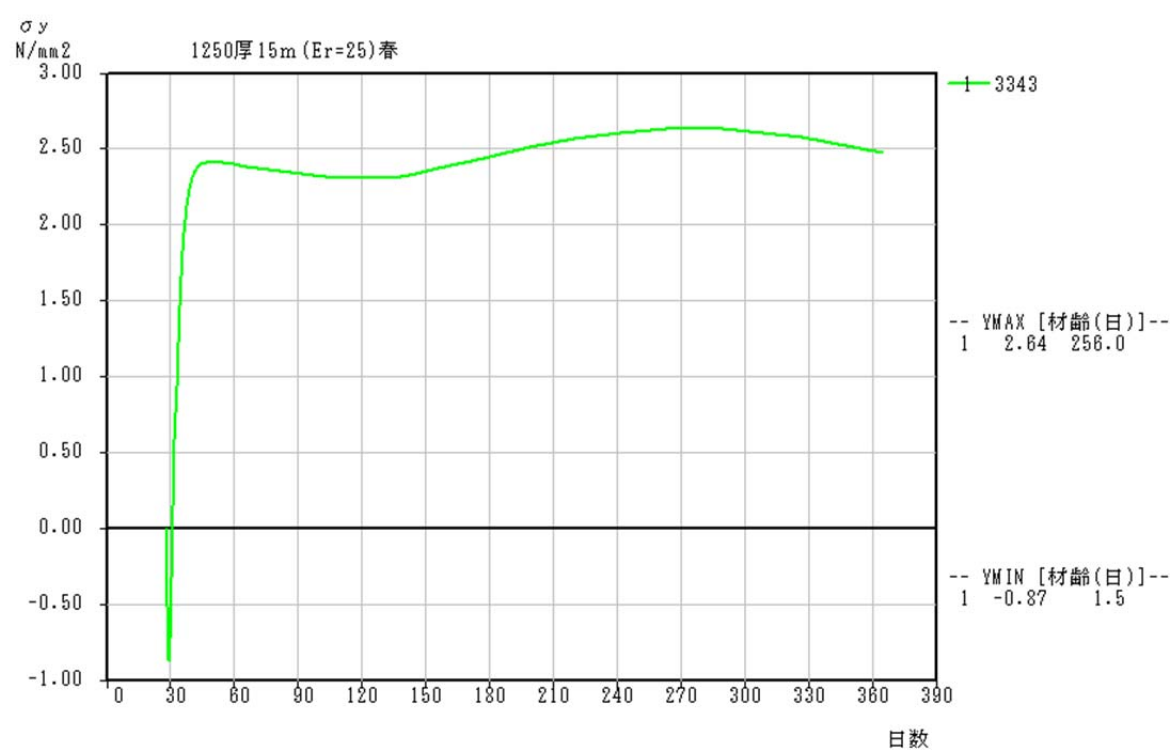
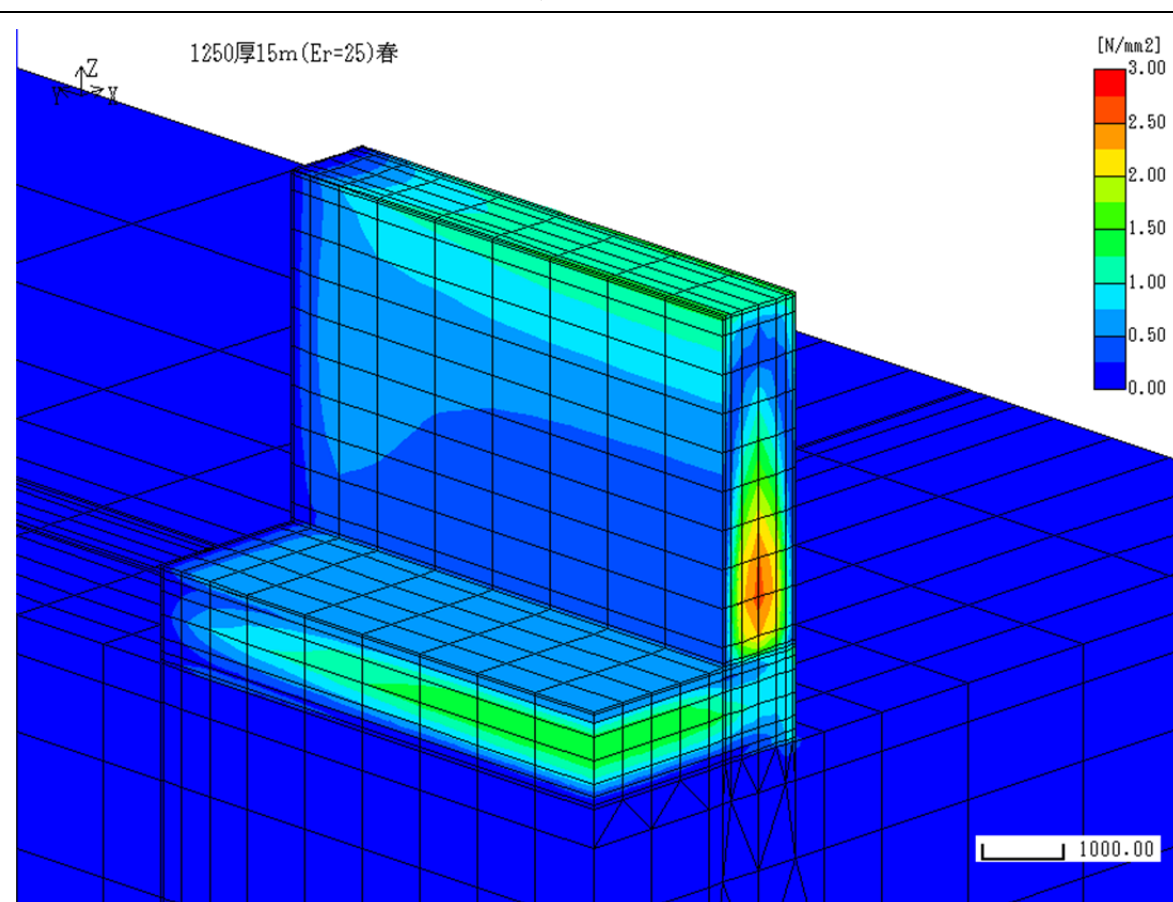
1250厚 10m (Er=25) 春



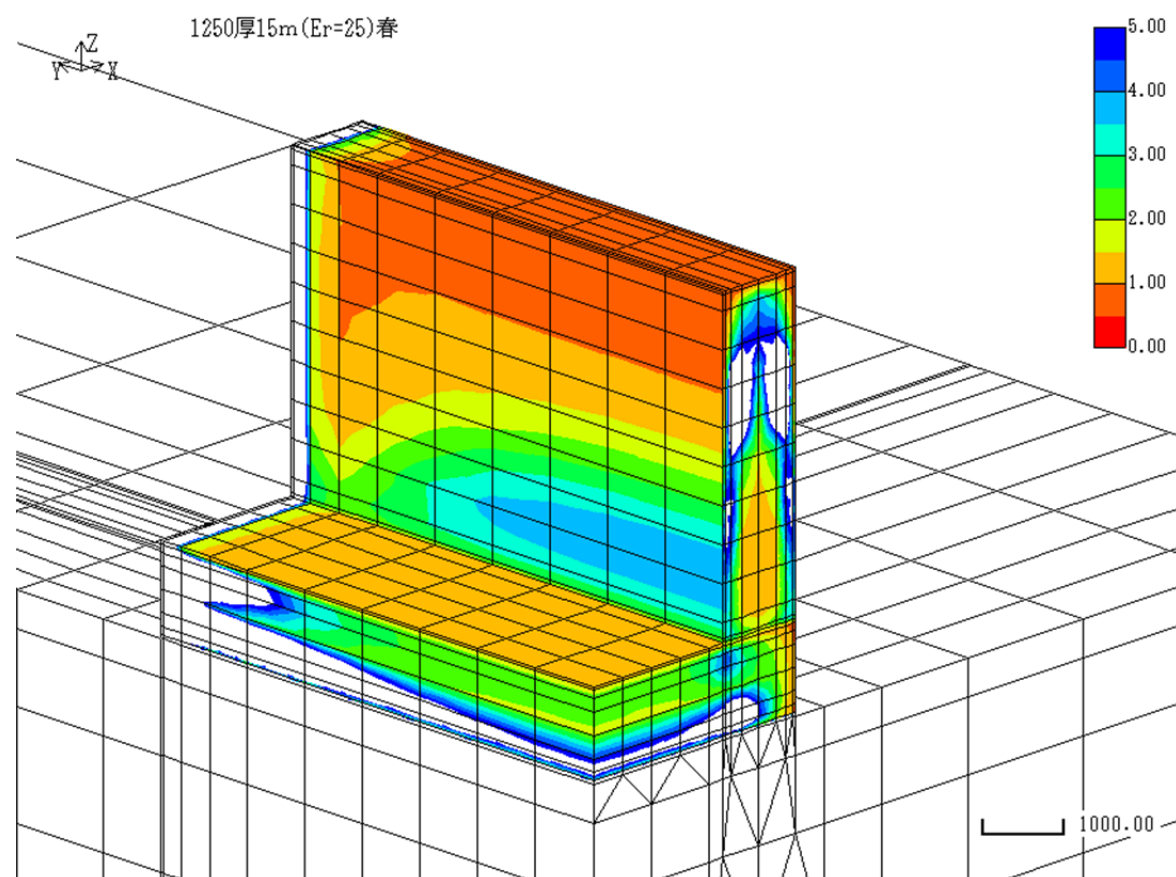
【壁厚 1.25m, 壁長さ 15m】 温度



【壁厚 1.25m, 壁長さ 15m】 応力



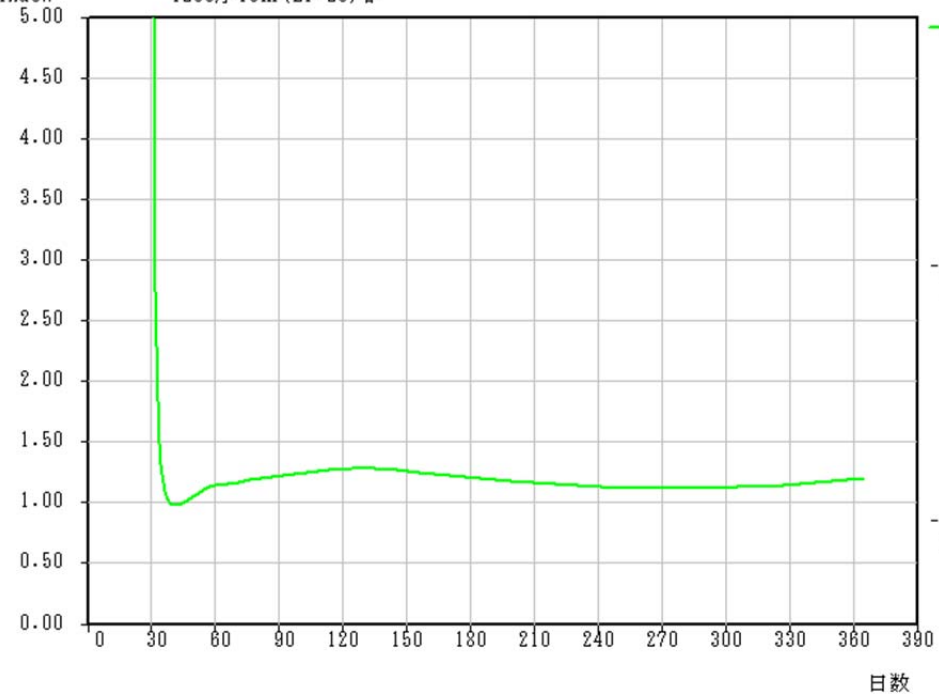
【壁厚 1.25m, 壁長さ 15m】 指数



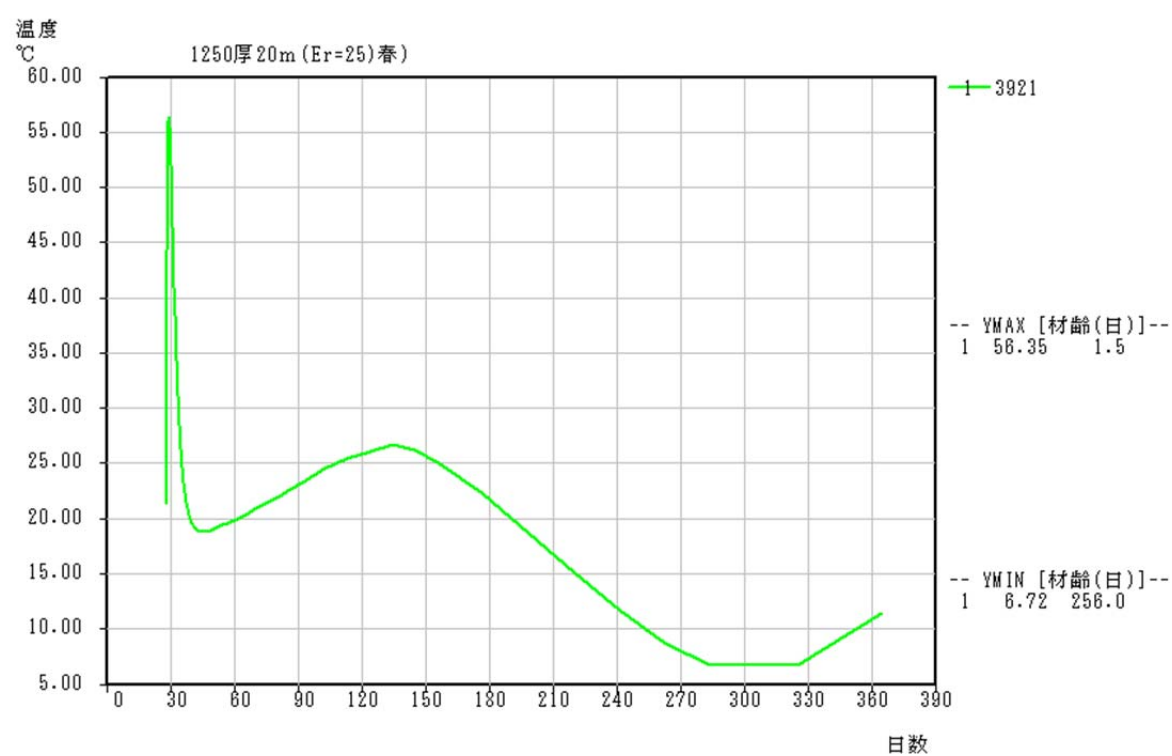
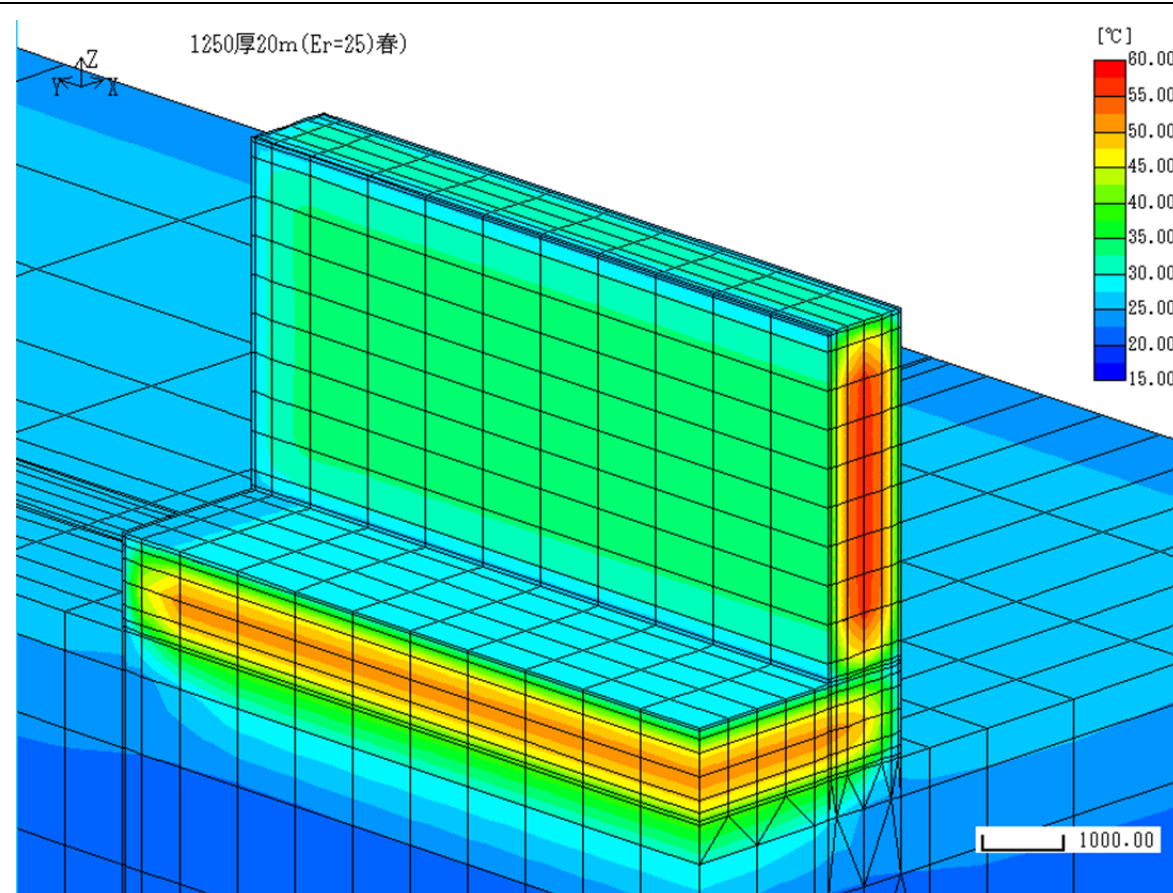
指数 (σ_y)

Index

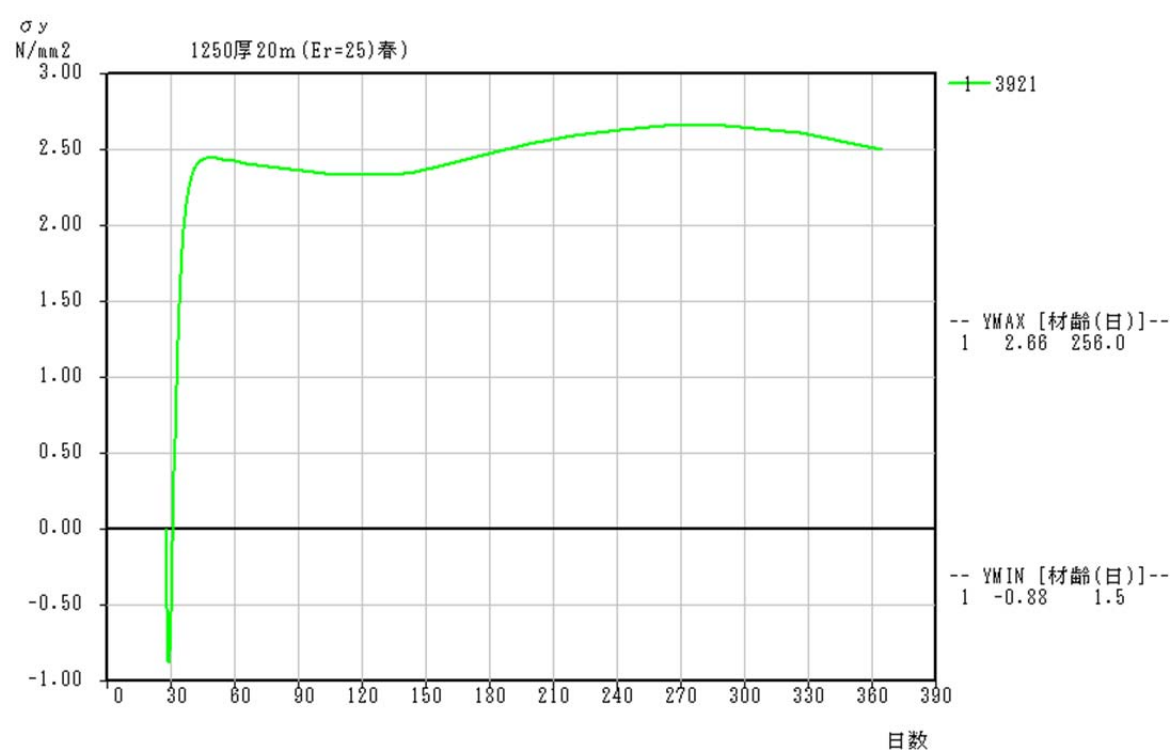
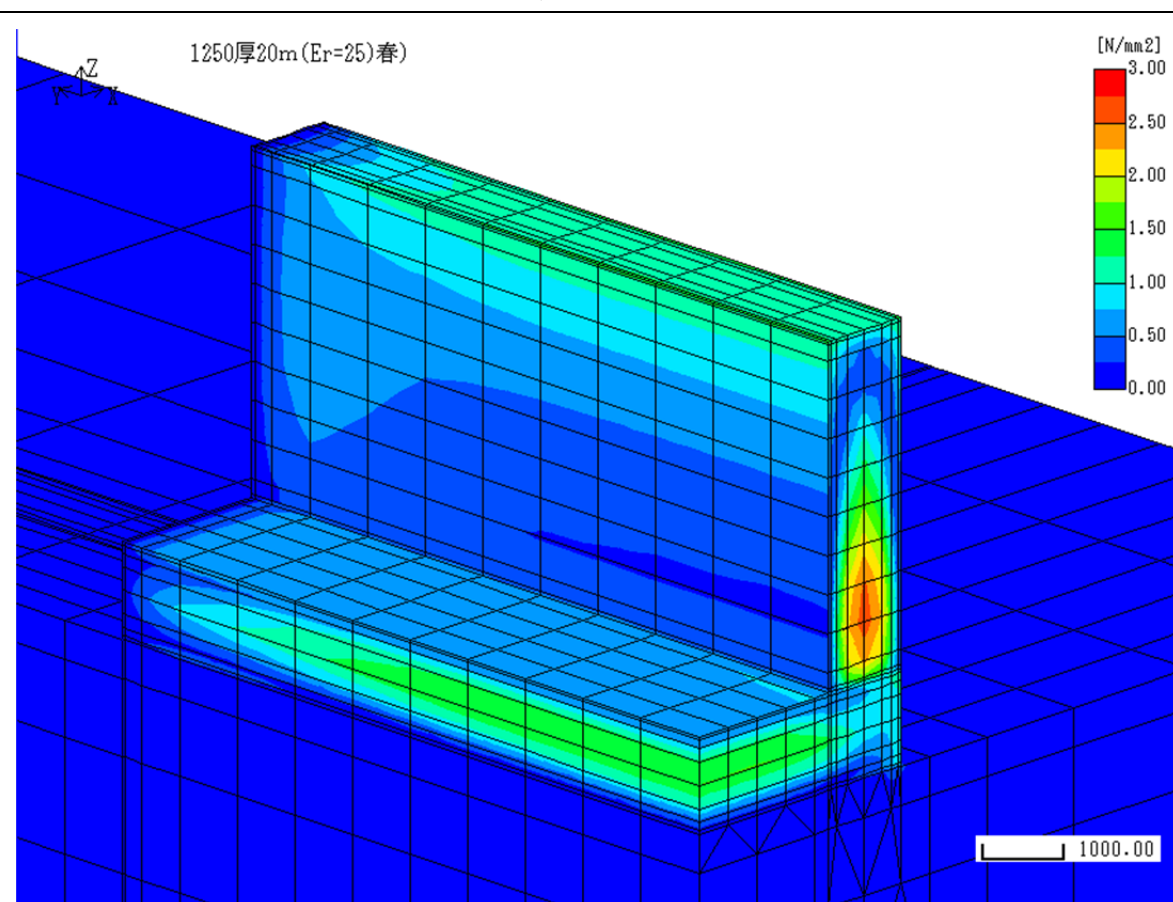
1250厚15m(Er=25)春



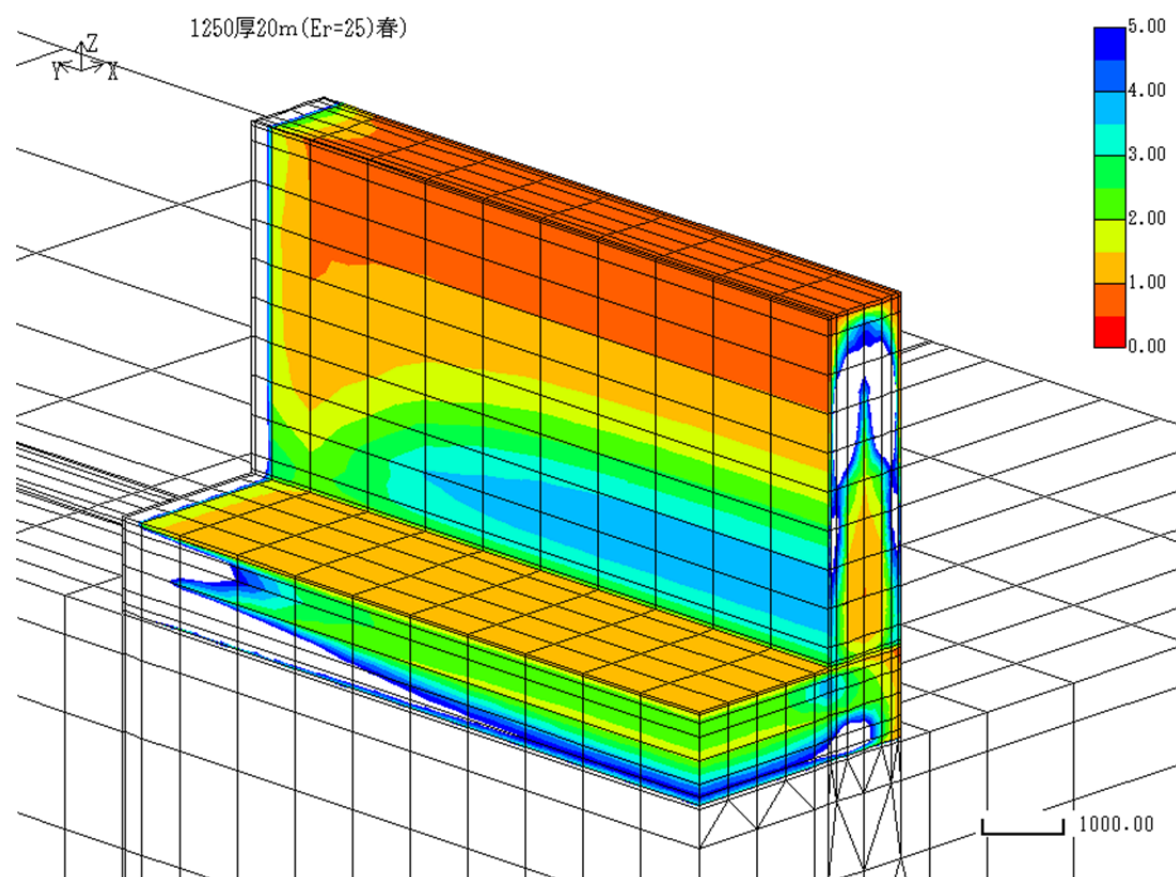
【壁厚 1.25m, 壁長さ 20m】 温度



【壁厚 1.25m, 壁長さ 20m】 応力



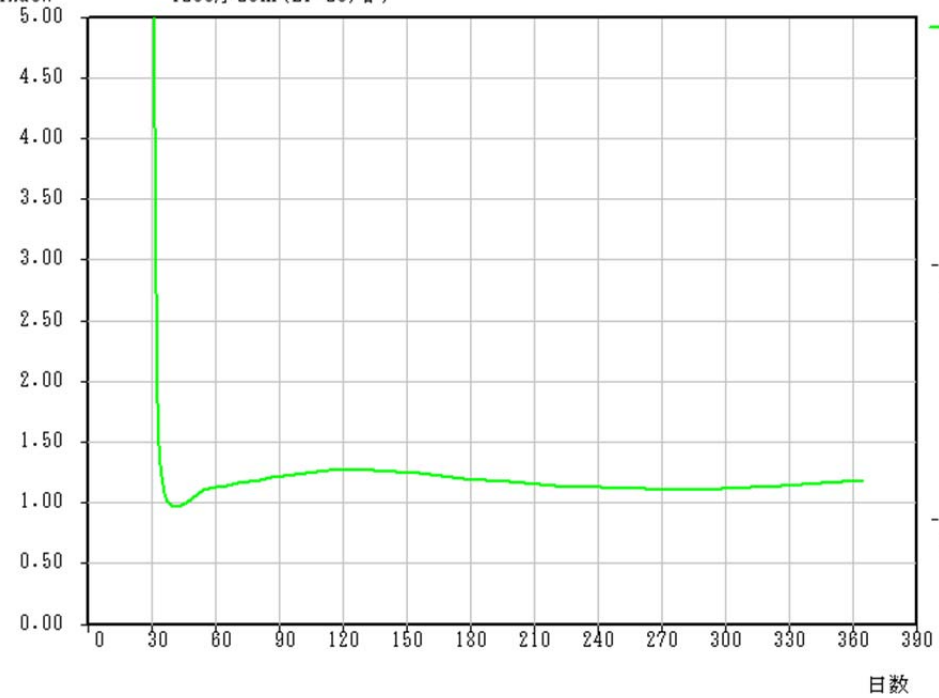
【壁厚 1.25m, 壁長さ 20m】 指数



指数 (σ_y)

Index

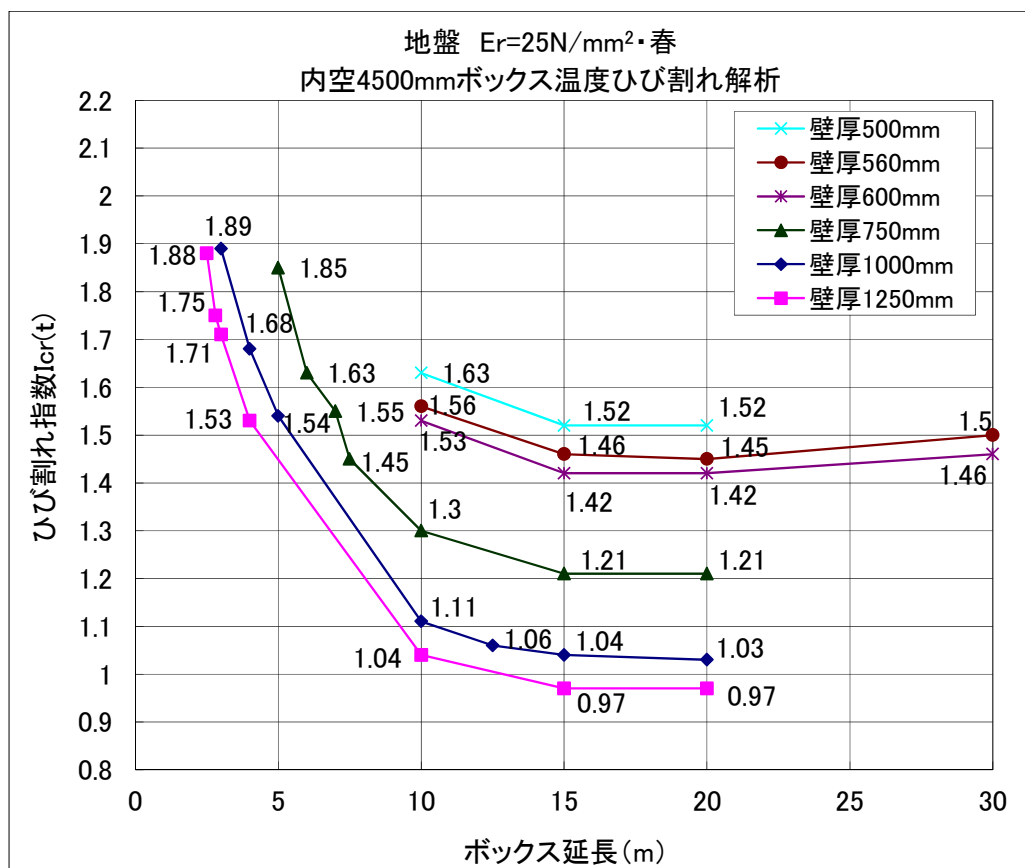
1250厚 20m (Er=25) 春



-- YMAX [材齢(日)]--
1 20.00 0.1

-- YMIN [材齢(日)]--
1 0.97 13.3

日数



参考文献

第1章 序論

- 1-1) 細田暁, 二宮純, 田村隆弘, 林和彦: ひび割れ抑制システムによるコンクリート構造物のひび割れ低減と表層品質の向上, 土木学会論文集 E2(材料・コンクリート構造), Vol.70, No.4, pp.336-355, 2014

第2章 既往の研究

- 2-1) 小野定, 田辺忠顕, 梅原秀哲: マスコンクリートの温度ひび割れ制御技術の現状, コンクリート工学, Vol. 36, No.8, pp.10-18, 1998.8
- 2-2) ACI 207 Committee: Effect of Restraint, Volume Change, and Reinforcement on Cracking of Massive Concrete, ACI Journal, Vol.70, No.7, pp.445-470, 1973.7
- 2-3) 社団法人土木学会: 昭和6年土木学会鉄筋コンクリート標準示方書解説, pp.55-57, 1931.10
- 2-4) 社団法人土木学会: 昭和24年土木学会制定コンクリート標準示方書解説, pp.84, pp.158-159, 1950.11
- 2-5) 社団法人土木学会: 昭和49年度版 コンクリート標準示方書解説, pp.67-68, 1974
- 2-6) 社団法人土木学会: 昭和49年制定 土木学会コンクリート標準示方書解説(昭和52年版), pp.181, 1977
- 2-7) 社団法人土木学会: コンクリート標準示方書(昭和61年制定)改訂資料, pp.49-88, 1986.10
- 2-8) 社団法人土木学会: 昭和61年制定 コンクリート標準示方書(施工編), pp.119-136, 1986
- 2-9) 森本博昭, 小柳洽: コンクリート構造物の温度ひびわれ危険度評価に関する研究, 土木学会年次学術講演会概要集, Vol. 39, No.5, p.291-292, 1984
- 2-10) 大崎幸雄, 庄野昭, 杉山律, 河田秋澄: 温度ひび割れ発生危険度の簡易評価システムについて, 第7回コンクリート工学年次講演会論文集, pp.657-660, 1985
- 2-11) 吉岡保彦: マスコンクリートのひび割れ予測システムの開発とその適用例, 第2回マスコンクリートの温度応力発生メカニズムに関するコロキウム論文集, pp.29-34, 1984.3
- 2-12) 社団法人土木学会: コンクリート標準示方書(平成3年版), pp.128-146, 1991
- 2-13) 社団法人土木学会: コンクリート標準示方書(平成8年制定), pp.173-193, 1996
- 2-14) 社団法人土木学会: マスコンクリート技術の現状と動向, コンクリート技術シリーズ8, pp.46, 1994
- 2-15) 社団法人土木学会: 平成8年制定 コンクリート標準示方書改訂資料, コンクリートライブラリー85, pp.106-110, 1996.2
- 2-16) 社団法人土木学会: コンクリート標準示方書(平成11年制定), pp.24-36, 1999
- 2-17) 社団法人土木学会: 平成11年版 コンクリート標準示方書(施工編)ー耐久性照査型ー改訂資料, コンクリートライブラリー99, pp.43-48, 1999
- 2-18) 社団法人日本コンクリート工学協会: マスコンクリートのひび割れ制御指針2008, pp.16-18, pp.1193-125, 2008
- 2-19) 社団法人土木学会: 2012年制定 コンクリート標準示方書 設計編, pp.303-318, 2012
- 2-20) 社団法人土木学会: 2012年制定 コンクリート標準示方書 改訂資料(基本原則編・設計編・施工編), コンクリートライブラリー138, pp.140, 2012
- 2-21) 社団法人土木学会: コンクリート標準示方書(平成3年版)改訂資料およびコンクリート技術の今後の動向, コンクリートライブラリー70, pp.232, 1991
- 2-22) 一般社団法人日本建築学会: マスコンクリートの温度ひび割れ制御設計・施工指針(案)・同解説, pp.36-37, 2008
- 2-23) 社団法人土木学会: 昭和61年制定 コンクリート標準示方書(設計編), pp.17-19, 1986

- 2-24) セメント協会：最近のポルトランドセメントを用いたコンクリートのセメント水重量比と圧縮強度と引張強さ係数との関係に関する報告，F-5，1957.5
- 2-25) 岡村甫：コンクリート構造の限界状態設計法[第2版]，コンクリートセミナー④，共立出版(株)，pp.15-19，1988.2
- 2-26) 社団法人日本コンクリート工学協会：マスコンクリートのひび割れ制御指針，pp.67-70，1986
- 2-27) 社団法人土木学会：2002年制定 コンクリート標準示方書 施工編，pp.41-54，2002
- 2-28) 一般社団法人日本建築学会：マスコンクリートの温度ひび割れ制御設計・施工指針（案）・同解説，pp.68-69，2008
- 2-29) 丸山一平，佐藤良一：スラブ状マスコンクリート構造物を対象とした簡易応力強度予測式の提案，日本建築学会大会学術講演梗概集（関東）材料施工，Vol.A-1，pp.117-118，2006.9
- 2-30) 一般社団法人日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ制御 設計施工指針（案）同解説，pp.72-78，2006
- 2-31) 野口貴文，友澤史紀：高強度コンクリートの圧縮強度と各種力学特性との関係，日本建築学会構造系論文集，第472号，11-16，1995.6
- 2-32) 社団法人日本コンクリート工学協会：マスコンクリートのひび割れ制御指針，pp.67-70，1986
- 2-33) ACI 318-83：Building Code Requirements for Reinforced Concrete
- 2-34) 社団法人土木学会：コンクリート標準示方書（平成3年版）改訂資料およびコンクリート技術の今後の動向，コンクリートライブラリー70，pp.227-241，平成3年9月，1991
- 2-35) 社団法人土木学会：2007年制定 コンクリート標準示方書 施工編，pp.331-343，2007
- 2-36) 社団法人土木学会：2007年版 コンクリート標準示方書改訂資料，コンクリートライブラリー129，pp.37-40，2007
- 2-37) 嶋 毅，鈴木康範，小田部裕一，岸利治：コンクリートの断熱温度上昇および強度発現の標準値の提案，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.2，pp.181-186，2007
- 2-38) CEB：CEB-FIP Model Code1990，Final Draft，1991
- 2-39) 松井邦人，西田徳行，土橋吉輝，潮田和司：不確定因子の影響を考慮したマスコンクリートの温度応力解析，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.15，No.1，pp.1143-1148，1993
- 2-40) 中村秀明，浜田純夫：材料の不確定性を考慮したマスコンクリートのひび割れ発生確率，土木学会論文集，NO.514/V-27，pp.29-40，1995.5

第3章 ひび割れ発生確率図の分析と評価，課題

- 3-1) 社団法人土木学会：マスコンクリート技術の現状と動向，コンクリート技術シリーズ8，pp.46，1994
- 3-2) 社団法人土木学会：平成11年版 コンクリート標準示方書（施工編）—耐久性照査型—改訂資料，pp.43-48，1999
- 3-3) 社団法人日本コンクリート工学協会：マスコンクリートのひび割れ制御指針2008，pp.113，2008
- 3-4) 杉橋直行，岸利治：マスコンクリートの温度ひび割れ照査法の改訂による本質的な改善についての一提案，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.38，No.1，pp.1485-1490，2016
- 3-5) 社団法人土木学会：最新のマスコンクリート技術，コンクリート技術シリーズ14，pp.8～15，1996
- 3-6) セメント協会：石灰石骨材コンクリートに関する研究コンクリート専門委員会報告F-46，pp.13，1992
- 3-7) 清水昭之，本間敏明：コンクリートの高応力状態における引張クリープに関する実験的研究（その2），日本建築学会学術講演概要集（九州），pp.73-74，1981
- 3-8) 西林新蔵，木村英郎，坂田憲次，井上正一：引張応力下におけるコンクリートの時間依存的挙動に関する研究，材料第26巻290号，pp.61-66，1977
- 3-9) 長谷川俊昭，塩屋俊幸，岡田武二：コンクリートの割裂引張強度に関する寸法効果，第7回コンクリート工学年次講演会論文集，日本コンクリート工学協会，Vol.7，pp.309-312，1985
- 3-10) 上田稔，佐藤正俊，長谷部宣男，奥田宏明：コンクリートの直接引張強度に関する寸法効果の破壊力学的研究，第16回コンクリート工学年次講演会論文集，日本コンクリート工学協会，Vol.16，No.2，pp.69-74，1994

- 3-11) Nguyen Van Loi, 澤信繁, 内田祐市, 小柳洽: コンクリートの引張強度の寸法効果とひび割れ性状, 第 18 回コンクリート工学年次講演会論文集, 日本コンクリート工学協会, Vol.18, No.1, pp.537-542, 1996
- 3-12) 秋田宏, 小出英夫, 三橋博三: コンクリートの直接引張試験における 4 つの誤解, コンクリート工学論文集, 日本コンクリート工学協会, Vol.16, No.1, pp.77-86, 2005.1
- 3-13) 吉川弘道, 西藤厚, 金刀督純: 引張強度の空間的変動を考慮したコンクリートの FEM 破壊シミュレーション, コンクリート工学論文集, 日本コンクリート工学協会, Vol.7, No.2, pp.103-117, 1996.7
- 3-14) 田中泰司, Joop.A.den Uijl: 確率論的解析手法による割裂引張強度の寸法効果に関する検討, コンクリート工学年次論文集, 日本コンクリート工学協会, Vol.30, No.3, pp.49-54, 2008
- 3-15) 谷川恭雄, 太田福男, 尾形素臣, 小野博宣, 金子林爾, 小池狹千朗, 山田和夫: 構造材料実験法, 第 2 版, 森北出版 (株), 1992
- 3-16) Kupfer, H. et al.: Behavior of concrete under biaxial stresses, ACI journal, Vol.66, No.8, pp.656-666, 1969.8
- 3-17) 永山功, 渡辺和夫, 尾畑伸之: ダム用コンクリートの直接引張強度試験とその試験結果についての考察, ダム技術, No.54, pp. 38-46, 1991
- 3-18) 狩野敏也, 渡辺博志, 河野広隆: 温度ひび割れ評価のためのコンクリート引張強度特性に関する研究, 土木学会第 50 回年次学術講演会, V-366, pp.732-733
- 3-19) 社団法人日本コンクリート工学協会: マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008, pp.16-18, pp.119-125, 2008
- 3-20) 社団法人土木学会: 平成 11 年版 コンクリート標準示方書 (施工編) - 耐久性照査型 - 改訂資料, コンクリートライブラリー99, pp.43-48, 1999
- 3-21) 中村秀明, 浜田純夫: 材料の不確定性を考慮したマスコンクリートのひび割れ発生確率, 土木学会論文集, NO.514/V-27, pp.29-40, 1995.5
- 3-22) 社団法人日本コンクリート工学協会: マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008, pp.17, 2008
- 3-23) 細田暁, 二宮純, 田村隆弘, 林和彦: ひび割れ抑制システムによるコンクリート構造物のひび割れ低減と表層品質の向上, 土木学会論文集 E2(材料・コンクリート構造), Vol.70, No.4, pp.336-355, 2014

第 4 章 ひび割れ発生現象の確率論

- 4-1) 社団法人土木学会: 昭和 61 年制定 コンクリート標準示方書 (施工編), pp.119-136, 1986
- 4-2) 社団法人土木学会: コンクリート標準示方書 (昭和 61 年制定) 改訂資料, pp.49-88, 1986.10
- 4-3) 社団法人土木学会: 2012 年制定 コンクリート標準示方書 設計編, pp. 22-29, 2012
- 4-4) 社団法人土木学会: 平成 11 年版 コンクリート標準示方書 (施工編) - 耐久性照査型 - 改訂資料, コンクリートライブラリー99, pp.43-48, 1999
- 4-5) 松井邦人, 西田徳行, 土橋吉輝, 潮田和司: 不確定因子の影響を考慮したマスコンクリートの温度応力解析, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 5, No.1, pp.1143-1148, 1993
- 4-6) 中村秀明, 浜田純夫: 材料の不確定性を考慮したマスコンクリートのひび割れ発生確率, 土木学会論文集, NO.514/V-27, pp.29-40, 1995.5
- 4-7) 社団法人土木学会: 平成 11 年版 コンクリート標準示方書 (施工編) - 耐久性照査型 - 改訂資料, コンクリートライブラリー99, pp.43-48, 1999

第 5 章 あらたなひび割れ照査方法

- 5-1) 社団法人土木学会: 平成 11 年版 コンクリート標準示方書 (施工編) - 耐久性照査型 - 改訂資料, コンクリートライブラリー99, pp.43-48, 1999
- 5-2) 全国生コンクリート品質管理監査会議: 平成 18 年度 全国統一品質管理監査結果の概要, p.10, 2007.3
- 5-3) 全国生コンクリート品質管理監査会議: 平成 28 年度 全国統一品質管理監査結果の概要, p.9, 2017.4
- 5-4) 野口貴文, 友澤史紀: 高強度コンクリートの圧縮強度と各種力学特性との関係, 日本建築学会構造

系論文集, 第 472 号, 11-16, 1995.6

- 5-5) 細田暁, 二宮純, 田村隆弘, 林和彦: ひび割れ抑制システムによるコンクリート構造物のひび割れ低減と表層品質の向上, 土木学会論文集 E2(材料・コンクリート構造), Vol.70, No.4, pp.336-355, 2014