

学位論文

追掛継の回転剛性と曲げ耐力に関する研究

指導教員 准教授 稲山 正弘

平成24年3月

東京大学大学院 農学生命科学研究科

生物材料科学専攻 博士課程

小林 良洋

目次

第1章 序論

1.1 問題提起

1.1.1 我が国の軸組式伝統木造構法の特徴と問題点.....3

1.1.2 現在の設計法と問題点

1.1.2.1 壁量計算法.....3

1.1.2.2 許容応力度計算法.....4

1.1.2.3 許容応力度等計算法.....4

1.1.2.4 保有水平耐力計算法.....4

1.1.2.5 限界耐力計算法.....4

1.1.2.6 その他の方法.....5

1.1.2.7 現在の設計法上の問題点.....5

1.1.3 軸組式伝統木造構法の継手・仕口の種類

1.1.3.1 軸組式伝統木造構法の継手の種類.....7

1.1.3.2 軸組式伝統木造構法の仕口の種類.....11

1.2 本論文の目的と問題解決方法

1.2.1 研究の目的と本論文の範囲.....14

1.2.2 本論文の問題解決方法.....14

1.3 既往の研究.....15

1.4 本論文の構成と概要.....17

第2章 追掛継の弾性域の回転剛性理論式

2.1 4点曲げ試験による変形と破壊の経過.....21

2.2 弾性域の回転剛性評価式の提案

2.2.1 弾性域の力学モデル.....23

2.2.2 弾性域の接合部の回転剛性評価式の誘導.....24

2.3 まとめ.....27

第3章 木口面同士の摩擦応力による割裂耐力の推定

3.1 木材の割裂に関する既往の研究.....31

3.2 木口面同士の摩擦応力を考慮した割裂試験

3.2.1 追掛継の胴付に生じる割裂のメカニズム.....32

3.2.2 割裂試験の方法.....33

3.2.3 試験体.....35

3.3 結果と考察

3.3.1 試験結果.....36

3.3.2 割裂耐力推定式と各パラメータとの相関について.....42

3.3.3 割裂破壊係数と比重・年輪傾角の相関について.....43

3.3.3.1 割裂破壊係数と比重の相関について.....44

3.3.3.2 割裂破壊係数と年輪傾角の相関について.....45

3.4 まとめ.....46

第4章 追掛継の塑性域の回転剛性理論式	
4.1 胴付の割裂位置の推定	49
4.2 塑性域の回転剛性評価式の提案	
4.2.1 塑性域の力学モデル	52
4.2.2 塑性域の接合部の回転剛性評価式の誘導	53
4.2.3 割裂発生時の接合部の抵抗モーメント M_T の推定式の誘導	54
4.2.4 顎の下端が支圧強度に達した時の接合部の抵抗モーメント M_y の推定式の誘導	55
4.2.5 顎の下端が支圧強度に達した後の回転剛性評価式の誘導	56
4.3 まとめ	59
第5章 追掛継の4点曲げ試験	
5.1 試験体と試験方法	
5.1.1 試験体の種類と試験方法	63
5.1.2 試験体の物性値	65
5.2 追掛継の曲げ性能の予測と試験結果の解析	
5.2.1 回転剛性及び曲げ耐力の予測	66
5.2.2 試験結果と解析	
5.2.2.1 破壊モード	68
5.2.2.2 割裂耐力	71
5.2.2.3 割裂高さ	81
5.2.2.4 回転剛性の理論値と実験値の比較と曲げ耐力推定値の提案	83
5.2.2.5 接合部の抵抗モーメントと接合効率	90
5.2.2.6 塑性率	93
5.2.2.7 継手のめり込みと曲げ変形角	95
5.2.2.8 胴付のせん断変形	106
5.3 まとめ	117
第6章 結論	
6.1 追掛継の曲げ性能理論式について	123
6.2 割裂後から顎が支圧強度に達する前のせん断耐力評価式の誘導	125
謝辞	129
参考・引用文献	133
資料編	
1 木口面同士の摩擦応力を考慮した割裂試験データ	139
2 追掛継の4点曲げ試験データ	171

論文中的変数の定義

基本的に文中でも記述しているが、主要な変数についての定義をまとめておく。以下の表記にさらに添字が追加されている場合、付加的な情報が加えられていることを示している。また参考文献で式としてまとめられている場合、基本的に文字定義をそのまま引用した。このため、本論文では同一の変数に複数の文字が定義されている場合がある。

凡例

W :材幅

H :材背

L :継手長さ

e :顎幅

g :目違幅

j :目違長さ

y_p :割裂前の継手の圧縮側縁から中立軸までの距離

$\Delta\sigma_p$:割裂前の中立軸から単位距離当たりの圧縮応力度

x :中立軸からの距離

θ_p :割裂前の接合部の変形角

V_f :継手片側部分の摩擦力、木口面同士の摩擦による割裂耐力、繊維直交方向の引張力(N)

N_U :中立軸より上側の合力

N_D :中立軸より下側の合力

μ :摩擦係数

M_p :割裂前の接合部の抵抗モーメント

K_E :木材の繊維方向の面圧剛性

σ_p :割裂前の中立軸より x のところの圧縮応力度

δ :接合部の両側の木口が圧壊した繊維方向の距離

E_0 :木材の繊維方向のヤング係数

d :平均面圧幅

K_{Rp} :割裂前の接合部の回転剛性

R :摩擦力

$N(x)$:繊維方向の圧縮力

H :材背(mm)

w :主材厚(mm)

h_e :材天端から割裂までの距離(mm)

X :中立軸から割裂までの距離(mm)

y_p :材下端から中立軸までの距離(mm)

P_{cr} :木材の諸材料物性値に加え、割裂位置における縁距離: h_e 、材背: H 、及び材幅: w の関数

C_f :摩擦による割裂破壊係数(N/mm^{1.5})

C_r :割裂破壊係数(N/mm^{1.5})

α, β :年輪傾角、寸法比

V, V_f :割裂破壊荷重(N)

G :せん断弾性係数(N/mm)

G_c :エネルギー解放率(J/mm²)

E , MOE: ヤング係数(N/mm)

b : 材幅(mm)

ℓ : 試験体の支点間距離(mm)

Ave.: 平均値

S.D.: 標準偏差

C.V.: 変動係数

y_f : 割裂後から顎の下端が支圧強度に達するまでの継手の圧縮側縁から中立軸までの距離

$\Delta\sigma_f$: 割裂後から顎の下端が支圧強度に達するまでの中立軸から単位距離当たりの圧縮応力度

θ_f : 割裂後から顎の下端が支圧強度に達するまでの接合部の変形角

M_f : 割裂後から顎の下端が支圧強度に達するまでの接合部の抵抗モーメント

σ_f : 割裂後から顎の下端が支圧強度に達するまでの中立軸より x のところの圧縮応力

K_{Rf} : 割裂後から顎の下端が支圧強度に達するまでの接合部の回転剛性

$F_{e\parallel}$: 木材の繊維方向の基準支圧強度

r_0 : 木材の基準比重

M_y : 顎の下端が支圧強度に達した時の接合部の抵抗モーメント

y_e : 顎の下端が支圧強度に達した後の中立軸から弾性範囲までの距離

y_q : 顎の下端が支圧強度に達した後の継手の圧縮側縁から中立軸までの距離

$\Delta\sigma_q$: 顎の下端が支圧強度に達した後の中立軸から単位距離当たりの圧縮応力度

θ_q : 顎の下端が支圧強度に達した後の接合部の変形角

M_q : 顎の下端が支圧強度に達した後の接合部の抵抗モーメント

K_{Rq} : 顎の下端が支圧強度に達してからの接合部の回転剛性

P : 4点曲げ試験の荷重

a : 4点曲げ試験の支点～加力点間距離

b : 4点曲げ試験の加力点間距離

I : 4点曲げ試験の材の断面二次モーメント

I' : 4点曲げ試験の顎の影響を考慮した材の断面二次モーメント

S_c : 顎のせん断面積

$S_{c\perp}$: 顎の垂直せん断面積

$S_{c\parallel}$: 顎の水平せん断面積

k : 滑り勾配の繊維方向の長さ

α : 継手中央から垂直せん断面上底までの最短距離

$\Delta\sigma_s$: 顎のせん断応力度

V_{cs} : 顎のせん断応力

$\Delta\sigma_{cf}$: 顎をせん断破壊させた時の圧縮応力度

V_{cf} : 顎がせん断破壊した時の圧縮応力

論文中の各用語の定義

基本的に、論文中では以下のように用語の定義をしている。

「胴付」: 継手端部における目違幅を除く部分が接する箇所。

第1章 序論

1.1 問題提起

1.1.1 我が国の軸組式伝統木造構法の特徴と問題点

1.1.2 現在の設計法と問題点

1.1.2.1 壁量計算法

1.1.2.2 許容応力度計算法

1.1.2.3 許容応力度等計算法

1.1.2.4 保有水平耐力計算法

1.1.2.5 限界耐力計算法

1.1.2.6 その他の方法

1.1.2.7 現在の設計法上の問題点

1.1.3 軸組式伝統木造構法の継手・仕口の種類

1.1.3.1 軸組式伝統木造構法の継手の種類

1.1.3.2 軸組式伝統木造構法の仕口の種類

1.2 本論文の目的と問題解決方法

1.2.1 研究の目的と本論文の範囲

1.2.2 本論文の問題解決方法

1.3 既往の研究

1.4 本論文の構成と概要

1.1 問題提起

1.1.1 我が国の軸組式伝統木造構法の特徴と問題点

我が国の軸組式伝統木造構法は大きく二つのタイプに分けることができる。一つは宮居などに見られる茅葺や檜皮葺などの屋根に掘立柱、落とし込み板壁と高床により空間構成をする古代から存在する板壁構法ともう一つは仏教伝来以降、寺院建築で普及してきた瓦屋根に土壁と土間で空間構成する土壁構法である。後者は、鎌倉時代以降、礎石建ちの柱に古代より我が国で使われてきた貫を通すという通貫構法が加わる。

前者の特徴は、剛性や耐力に頼らず、大変形しながらも外力に対して柔軟に追従し、構造体を崩壊させないで安全を担保するものである。

後者の特徴は、柱と貫および楔との接触部分のめり込み抵抗によって耐力を発揮する接合部で、大変形時の耐力低下が少ない¹⁾。一方、土壁は材料が手に入り易く、施工も簡便であるが強度のばらつきが大きく、変形による剥落で降伏時までしかその性能を担保することができない。

これらの軸組式伝統木造構法の接合部は嵌合による継手・仕口で構成されており、柱同士や横架材同士の接合部は継手、柱と横架材の接合部は仕口と呼ばれている。我が国には主な継手が 44 種類あり、また仕口は 68 種類存在する²⁾。この嵌合による継手・仕口の特徴は、審美性と同時に力学的性能を高めようとする観点で作られている。力学的性能は、剛性を木材の面圧性能に、最大耐力を木材の割裂やせん断、曲げ、めり込みの強度によっている。

現在の我が国における軸組式伝統木造構法の問題点は、国土交通省が構造計算書偽造問題の公表(平成 17 年 11 月 17 日)を行ったことにより浮上してきた。この構造計算書偽造問題の公表の結果、改正建築基準法が施行(平成 19 年 6 月 20 日)され、同法に基づき法適合の厳格化が進んだ。さらに専門知識を持った構造計算適合性判定員による点検制度(ピアチェック)の導入がなされ、従来では構造計算で安全性が証明できれば建築できた伝統構法もピアチェックが必要になった。日本の全国各地で独自の発達を遂げてきた伝統木造構法は、木材の種類や木組の方法が千差万別で構造解析が難しいことから、それまで建築確認に要する日数が 21 日程度であったものが 35~70 日を要するようになった。また伝統木造構法の構造解析を行う機関が少なく、審査費用も 15~20 万円余計に必要となることから、伝統木造構法は経済的、時間的負担が施主にかかるようになったと言われている。しかし、本当の理由はこれまで伝統木造構法の大半を占めてきた 4 号建物の伝統木造構法が、検査を受けないことにより法適合の目を潜り抜けることができてきたことである。そのため伝統木造構法の設計法に関するニーズが表面化することがなく、稲山が学位論文³⁾の中でその必要性について言及してきたにも拘らず伝統木造構法の設計法の確立が等閑にされてきたという問題点がある。

1.1.2 現在の設計法と問題点

木造建築物の設計法としては壁量計算法、許容応力度計算法、許容応力度等計算法、保有水平耐力計算法、限界耐力計算法などがある。

1.1.2.1 壁量計算法

基準法施行令第 46 条の規定である。昭和 23 年の福井地震に際して、久田らにより被害程度と壁量に基づく耐震性能評価との間に相関が確認され、これが基準法の壁量規定に繋がったとされている。壁量計算法そのものは耐震耐風設計の一手段であるが、施行令第三章第三節の在来木造の規定全体を、壁量計算

法を中心とした木造建築物の仕様書規定、すなわち木造建築物全体の構造設計法であるとも言える。ただし、鉛直荷重に対する横架材の断面寸法の規定などがない部分もあって、完全な設計法の体はなしていない⁴⁾。

1.1.2.2 許容応力度計算法

許容応力度計算法は、基準法施行令第 82 条に規定されており、法令上は「令第 82 条各号及び令第 82 条の 4 に定めるところによる構造計算」と称されるが、木造建築物でも地上の階数が 3 以上の場合や延べ床面積が 500 m²を超えた場合など、あるいは仕様規定の一部を適用除外とするためにはこの許容応力度計算法が要求される。

本来は各部の応力度を算出して許容応力度以下に収まっていることを確認するという検証法であるので、特別な方法はないはずであるが、在来軸組構法に特有の方法として、構造全体のモデル化や応力算出の方法、許容応力度の考え方、また耐力壁や水平構面の許容せん断耐力や接合部許容引張耐力の考え方などが必要となる。さらに許容応力度計算法が本来何を目的にすべきかについて、近年では許容応力度計算法といえども中地震動時の損傷防止だけではなく、大地震動時の倒壊に対する安全性確保を求めるべきだという考え方が取られている⁴⁾。

1.1.2.3 許容応力度等計算法

平成 18 年から 19 年にかけての法令改正で、いわゆるルート 2 の計算のみを許容応力度等計算法ということとなった。木造建築物の場合には、高さ 13m 又は軒高 9m を超える場合に構造計算適合性判定の対象となる建築物となり、許容応力度計算法に加えて保有水平耐力計算法(いわゆるルート 3)又は剛性率、偏心率及び靱性確保のための計算や確認等(いわゆるルート 2)が要求される。昭和 55 年建設省告示第 1791 号第 1 には、木造の建築物に関してルート 2 で要求される構造計算の基準が示されており、筋かいの水平力負担割合による応力割り増し、筋かいが割裂きやせん断破壊を生じないことの確認等が求められている⁴⁾。

1.1.2.4 保有水平耐力計算法

保有水平耐力計算法は、Newmark によって提案された地震応答予測法であるエネルギー一定則に基づく、大地震動に対する性能検証法である。昭和 56 年の新耐震基準の導入に際し、一定以上の規模の建築物に義務付けられる計算ルートの一つとして法令上に位置付けられた。木造建築物の場合には、前述のように、高さ 13m 又は軒高 9m を超える場合にルート 2 又はルート 3 の計算や確認が要求されるが、特に高さが 31m を超える場合に保有水平耐力計算法(ルート 3)が要求される。平成 18 年～19 年の法令改正で、保有水平耐力計算法に用いる構造特性係数 D_s の算出方法に関する告示(昭和 55 年建設省告示第 1792 号)が改正され、木造についても詳細に D_s の算出方法が定められた。

本来、許容応力度計算法と合わせて保有水平耐力計算法を別途行えば、大地震動時の安全性を無理に許容応力度計算法の中で担保する必要はなく、損傷防止と転倒防止のそれぞれ目標とした、より合理的な設計が可能となるはずである⁴⁾。

1.1.2.5 限界耐力計算法

平成 12 年の基準法改正に際して、構造関連規定における性能規定化の重要な柱として導入された。地

震については、大地震動と中地震動の双方に対して検証を行うこととされており、その検証方法は、柴田らが提案した地震応答予測法である等価線形化法に基づいている。

保有水平耐力計算法と比べた場合、ベースとなる応答予測法の違い以上に、規定上、仕様書の規定に依存する程度が極めて少ないことが特徴となっている。従って、各層の荷重変形関係及び等価粘性減衰が算出できて、損傷限界と安全限界が求められるような構造であれば、施行令の種々の構造規定を満たさない新しい構造方法にも適用が可能である。これは性能規定化の柱とされる所以であり、当然、木造建築物に対しても限界耐力計算法の適用は可能である⁴⁾。

1.1.2.6 その他の方法

その他の設計法としては、時刻歴応答解析法に基づく方法、応答予測法の一つであるエネルギー法に基づく方法、信頼性解析をベースにした限界状態設計法などがある。

時刻歴応答解析法は施行令第81条第1項に定められており、具体的な方法が平成12年建設省告示第1461号に述べられている。エネルギー一定則や等価線形化法が、非線形応答予測を単純化するために種々の仮定を置いているのに対して、直接的に地震応答を求めるものである。従って、適用範囲は広いはずであるが、荷重変形履歴性状の仮定の妥当性、入力地震動の特性の一般性など、評価には専門的判断を必要とするものである。そのため、基準法においては1棟ごとに大臣認定が要求されている。木造建築物についても研究レベルでの検討は進んでいるが、実用的な指針類はない。

エネルギー法は秋山が提案する、主として鋼構造の分野で研究が進められてきた設計法であるが、平成17年に限界耐力計算法と同等以上に建築物の安全性を確かめることができる構造計算として基準法に位置付けられた(平成17年国土交通省告示第631号)。木造建築物への適用可能性も検討され、マニュアルで適用方法が示されている。

限界状態設計法は、ISOにおいても取り入れられている国際的な潮流である。我が国では基準法には位置付けられておらず、実務にも殆ど使われていないが、耐震設計法も含めて検討は進められている⁴⁾。

1.1.2.7 現在の設計法上の問題点

現在の設計法上の問題点は、壁量計算法においては短期基準耐力が特定変形角時の耐力 P_R で決まることから、低剛性・低耐力の軸組式伝統木造構法は勢い低い壁倍率となり、軸組式伝統木造構法の特徴である開放性を活かすことができない。

一方、仕様書の規定に依存する程度が極めて少ないことが特徴である限界耐力計算法による場合、平成20年度より国土交通省の補助を受けた財団法人日本住宅・木材技術センター(以下、住・木センターと略す。)の「伝統的木造軸組構法住宅の設計法作成及び性能検証事業」実験検討委員会において限界耐力計算法による詳細設計法と簡易設計法が検討されてきた。その結果、運用上の課題が4点あることが明らかになった。

1つは、伝統木造構法は層間変形角 $1/30 \sim 1/10 \text{rad}$ 以上で耐力が上昇するが、安全限界変形角が $1/30$ となったことである。面格子や落とし込み板壁はめり込み抵抗に拠っているため、大変形時にこそ性能を発揮するが、評価法は性能を発揮するまでに打ち切られてしまった点である。2つ目は、地盤の振動応答値が木造に不利になりやすいことである。さらに詳細設計法では、標準貫入試験を3か所以上行う必要がありコストが掛かる上、工学的基盤の傾きが5度以下であることが求められている点である。3つ目は、簡易設計法であ

るが仕様規定となるため自由度は低く、安全側に設定されているため外力の設定が高くなり、2 階建てで壁量が必要量の 2 倍程度になると思われる点である。同委員会では安全限界変形角を 1/30 から 1/20 に緩和の方向で動いているが、どれだけ伝統構法を救えるか未知数である。4 点目は、高度な計算が必要であると共にその高度な計算を適合判定する人材も必要となる点である。

なお、国土交通省住宅局住宅生産課では、平成 22 年度「木のまち・木のいえ整備促進事業」のうち「木造住宅・建築物等の整備推進に関する技術基盤強化」として「伝統的構法の設計法作成及び性能検証実験」検討委員会を立ち上げ、石端建てによる伝統構法の設計法を検討することになったが、上述の 4 点の課題は変わらない。

一方、許容応力度設計法による場合、建築基準法施行令第三章第三節に則れば、軸組式在来木造構法と同じように設計することが可能である。またラーメンで建築するなら昭 62 建告 1898 号のルートをとり、昭 62 建告 1898 号に定める材料は、スギ、ヒノキ、マツであればFFTアナライザーのソフトをネットからダウンロードし、マイクで集音すれば簡単に測定できるようになっている。但し、広葉樹は日本農林規格が無いため許容応力度設計法で使用するできない問題点がある。同じく昭 62 建告 1898 号に定める柱脚の緊結については、柱脚のスライディングはその量を制御できないことから将来の課題となるが、柱脚のロックングについては解決が待たれる喫緊の課題である。さらに令 82 条第一号～第三号に定める許容応力度計算法では継手・仕口の評価が難しく、財団法人日本住宅・木材技術センターのホームページにデータが載っているものを活用するか、木造軸組構法住宅の許容応力度設計(2008 年度版)の第 6 章 試験方法と評価方法⁹⁾に拠って第三者機関で試験をする必要があるが、いずれにしても継手・仕口のパラメータが変わると使えなくなるといった問題がある。しかし、伝統木造構法の継手・仕口の性能評価式を順次作っていくことにより、今後、許容応力度設計法で伝統木造構法は無理なく建築できるようになっていくであろう。

1.1.3 軸組式伝統木造構法の継手・仕口の種類

本論に入る前に実際の軸組式伝統木造構法の継手・仕口にどのようなものがあるのか具体例を挙げて説明することにする。但し、ここで挙げているものが全てではない。継手・仕口は地域性や大工個々人の工夫によって考案されたものが多数あり、筆者が知る範囲だけでも継手で44種類、仕口は68種類存在する。それらの内、代表的なものとして、継手4種類、仕口4種類を取り上げて紹介する。

1.1.3.1 軸組式伝統木造構法の継手の種類

A. 腰掛蟻継

簡単な継手で、土台、大引、胴差、軒桁、母屋などの横架材の継手として、多く用いられている。背の半分を切り欠き腰掛とする。蟻とは男木の形状が、蟻の頭部に似ていることから名づけられている。蟻の形状は男木の先端に比べて付け根を幾分小さめにして、女木は男木の蟻に形状を合わせるがややきつく加工する。組み方は、男木を上から垂直に女木へ落とし込むだけである。引張破壊性状は、女木の割裂破壊によることが多い。構造的には引張力に対して抵抗するものであるが、耐力は小さい⁶⁾。

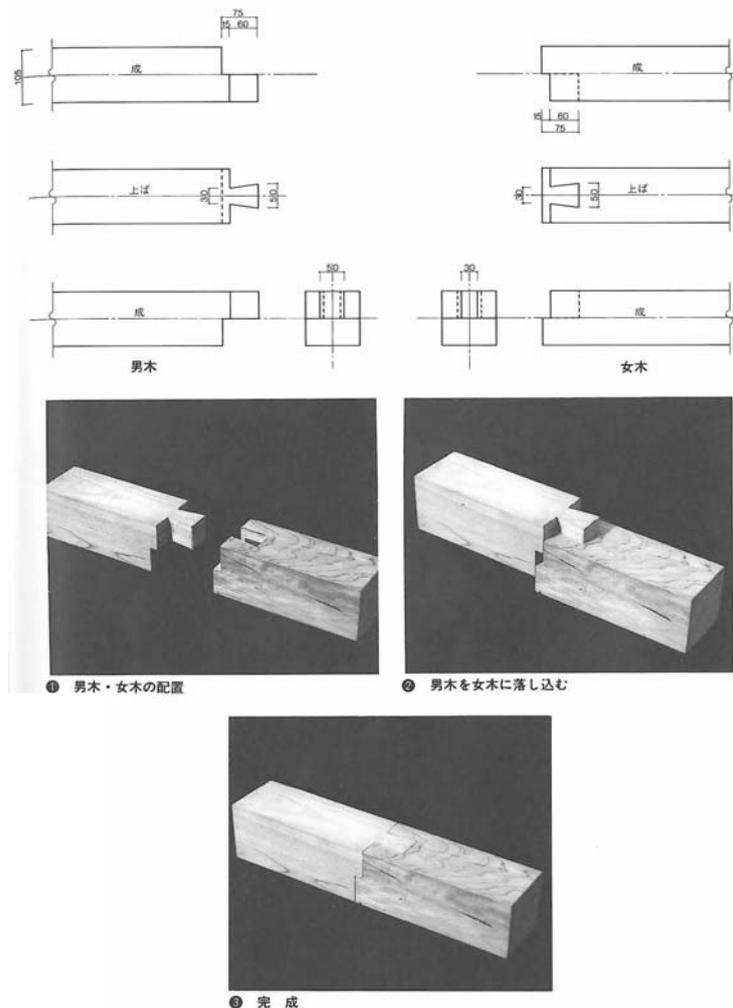
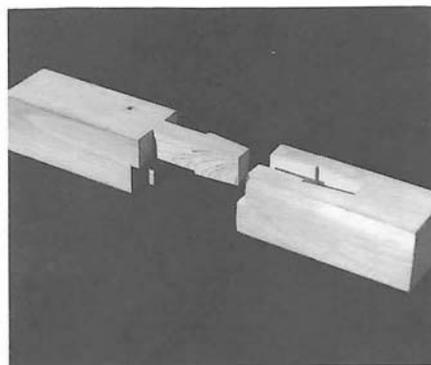
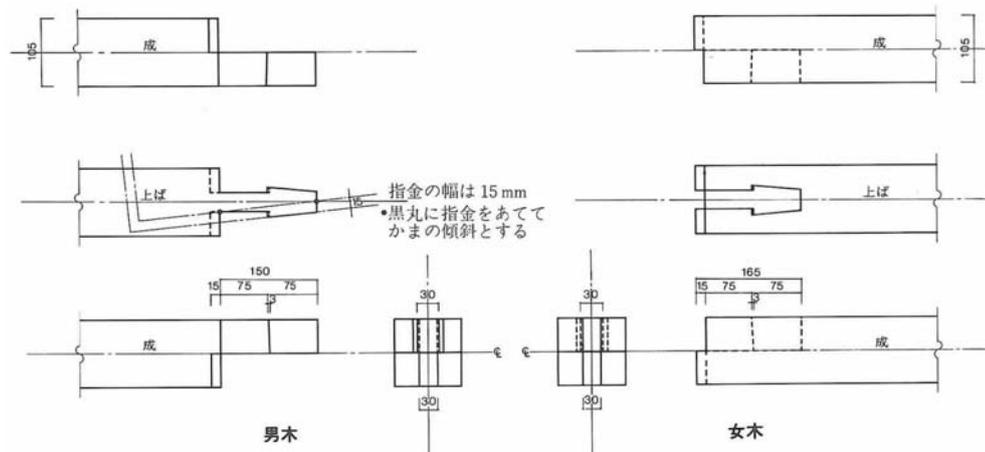


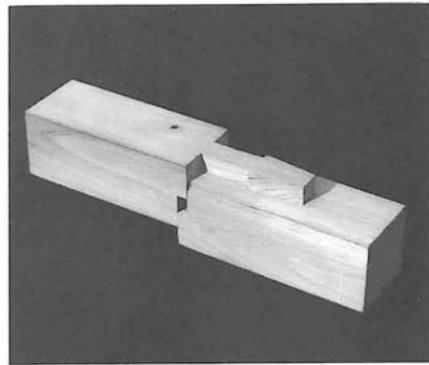
図1.1.1 腰掛蟻継⁶⁾

B. 腰掛鎌継

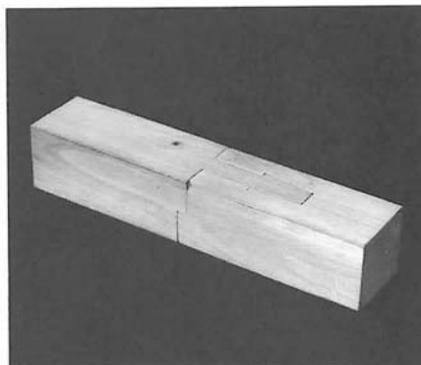
土台や桁などの継手に用いられる。腰掛蟻継と同様に背の半分を切り欠き腰掛とする。材の背が150mm 以上の場合、鎌の下部に目違ほぞを設けて材の変形によるねじれや継手直交方向の外力に対して抵抗する。組み方は腰掛蟻継と同様に男木を上から垂直に女木へ落とし込むだけである。引張破壊性状は女木の圧壊、若しくは男木の鎌部分のせん断破壊となる。構造的には腰掛蟻継よりも引張耐力が高い⁶⁾。



① 男木・女木の配置



② 男木を女木に落とし込む



③ 完成

図1.1.2 腰掛鎌継⁶⁾

C. 追掛大栓継

土台、桁、梁の他、柱の根継ぎにも用いられる。継手の中心にあるのが顎といわれる部分で、顎には滑り勾配と呼ばれるものがある。この滑り勾配によりお互いの木が繊維方向に押しつけられて接合している。継手両端の胴付の横の少し飛び出したほぞは、目違と呼ばれ、両材が面外に外れないようにする機能を持っている。ほぞ穴は目違より心持深く掘られ、目違の横の胴付が強く押し付け合うようになっている。また込栓は上下方向に継手が外れないようにする機能を担っている。組み方は、男木、女木が同形で上木を下木の滑り勾配に沿わせて落とし込む。そして継手の側面から込栓を二か所に打ち込む。引張破壊性状は顎からのせん断破壊によるものが多い。構造的には、前二者よりもさらに大きな引張耐力を発揮する⁶⁾。

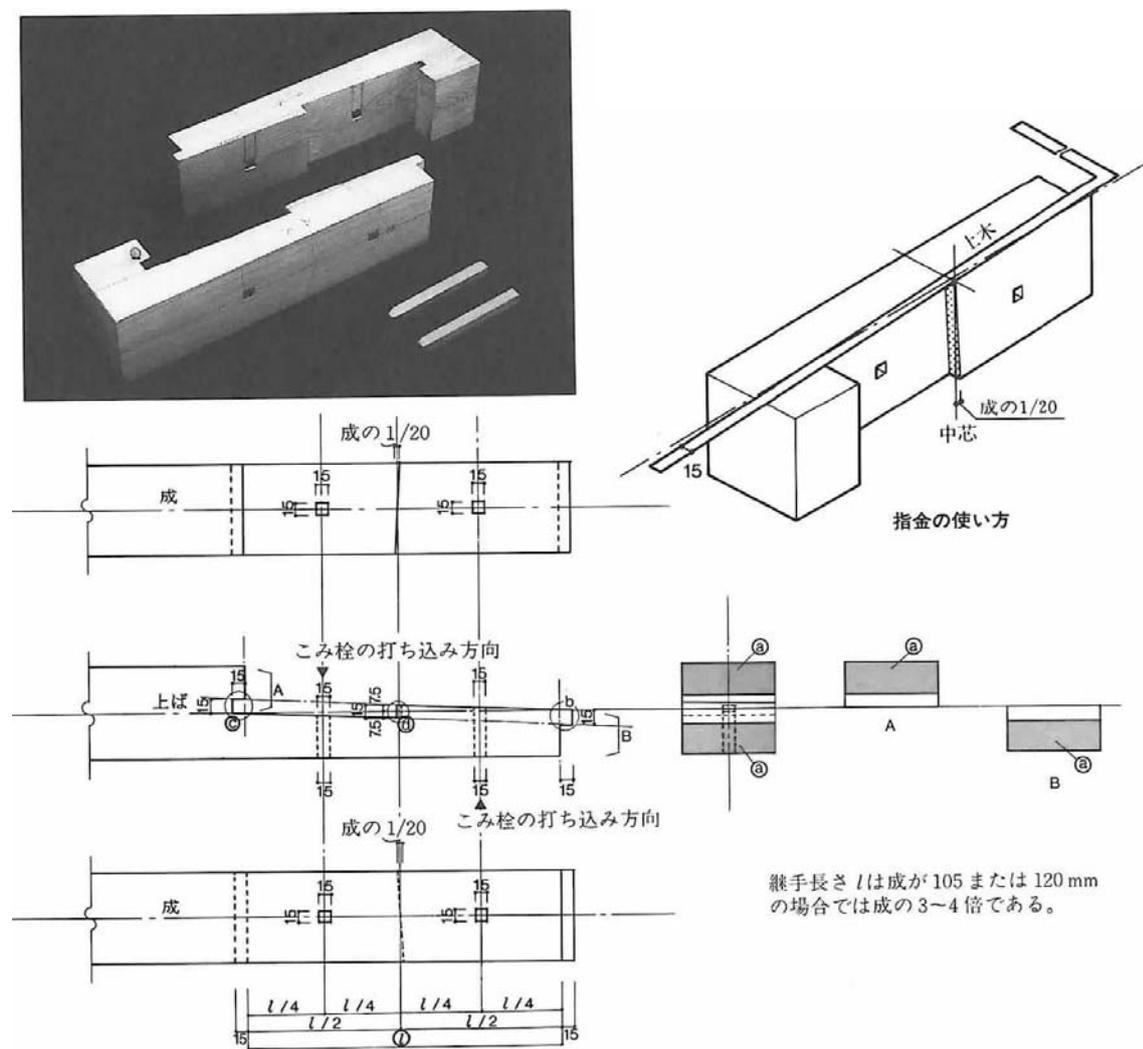


図1.1.3 追掛大栓継⁶⁾

D. 金輪継

追掛大栓継同様、土台、桁、梁の他、柱の根継ぎにも用いられる。構造は、継手の中心の顎の部分に栓を打ち込む溝を突く。嵌合させた後、この溝に栓を打ち込むことにより互いの木が繊維方向に押しつけられて接合する。継手両端の胴付に垂直方向と水平方向に少し飛び出したほぞが設けられる。これらは両材が上下・面外に外れないようにする機能を持っている。ほぞ穴は目違より心持深く掘られ、目違の横の胴付が強く押し付け合うようになっている。追掛大栓継と同様に男木、女木が同形で、組み方は顎面を接して組み入れた後、材軸方向に継手を移動し、胴付を密着させた上で顎の空隙部分に栓を打ち込む。引張破壊性状は顎からのせん断破壊によるものが多い。構造的には、追掛大栓継と同様の引張耐力を発揮する⁶⁾。

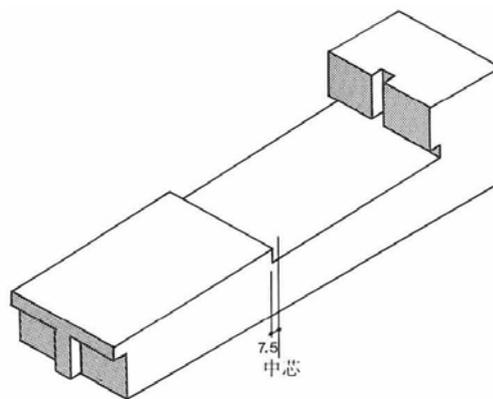


図1.1.4 金輪継⁶⁾

1.1.3.2 軸組式伝統木造構法の仕口の種類

A. 通し貫接合(隅柱;片下げ蟻貫、柱;渡り顎貫)

横架材である貫を柱に通し、楔で止めつけて壁体を構成する半剛節架構である。古代より利用されてきたが、鎌倉時代に広く用いられるようになり、近代に至るまで社寺をはじめ民家でも構造要素として使われている。壁の無い開放的な空間を持ちながら、地震、台風に耐えて今日まで残っている理由は、小壁の存在と通し貫接合の二つのラーメン効果によって説明できる³⁾。

貫構法は施工上の問題から貫背よりも大きな貫穴を柱に空け、柱と貫を堅固に固定し初期のガタつきをなくすために両側から楔が打ち込まれる。この楔を介して摩擦力が伝達され、抵抗要素の一つとなっている。

この接合部の特徴は、釘や金物類を一切使わず、貫または楔が貫穴にめり込み地震力、風圧力などの水平力に抵抗していることである。また抵抗要素である木材の横圧縮は極めて靱性が大きく、大変形に至っても容易に割裂やせん断で終局破壊することなく、曲げ破壊するまでにめり込みによって非常に粘り強い塑性変形性状を示す特徴がある。これを利用すれば大地震動時に大きな変形でエネルギーを吸収し、かつ倒壊させない可能性を有する構法である。一方、柱に貫穴を空けるため断面欠損が大きくなり、太い柱を使わないと有効でないことや施工精度や木痩せによる貫穴と貫との空隙が原因の初期スリップやめり込みによって初期剛性が上がらないことがある。

次に図示するものは、隅柱と貫の仕口(片下げ蟻貫)である。柱を建てるときに貫が入っていれば水平の揺れを防止でき、建方完了時に楔を打ち込み柱と貫の蟻を嵌合させる。楔は収まり寸法より大きくし、めり込む状態まで打ち込む。併せて通し貫(渡り顎貫)の場合も図に示す⁶⁾。

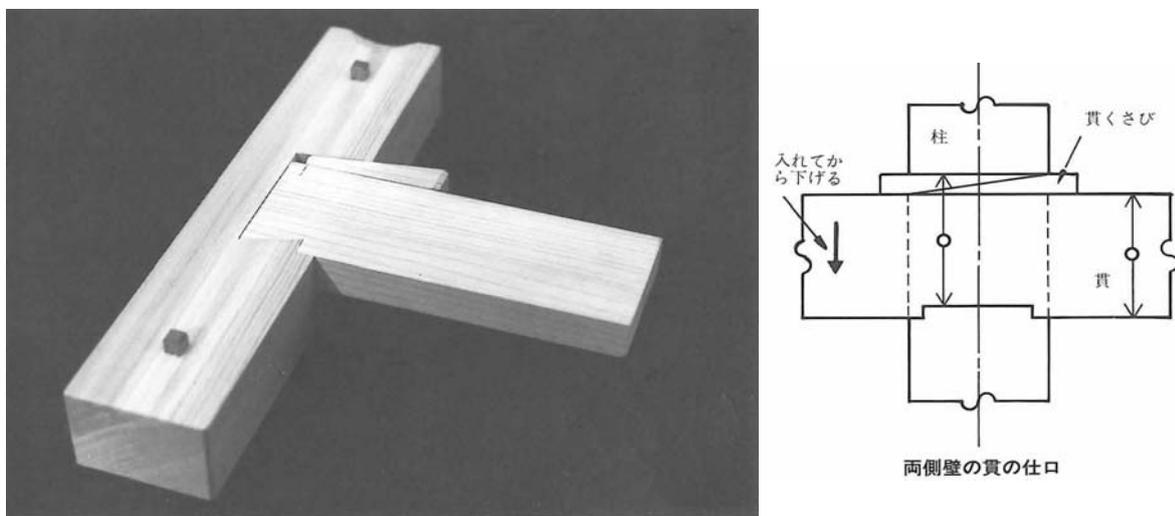


図1.1.5 通し貫接合(隅柱;片下げ蟻貫、柱;渡り顎貫)⁶⁾

B. 引独鈷車知栓締め+小根ほぞ差込栓打ち

柱の二方向から横架材が入る場合の仕口である。二つの横架材を女木として引独鈷を入れ、車知栓で締めて接合する。これにより横架材の材長を節約できるが、一方を男木とした場合の方が剛性、耐力ともに性能は上昇すると思われる。横架材の下端には小根ほぞを設け、柱の芯から込栓を打つ。

破壊は、車知栓が回転し、横架材や柱を割裂させる。さらに進行すると車知栓の割裂や引独鈷のせん断破壊、込栓の曲げ破壊が発生し、終局は小根ほぞのせん断破壊や車知栓の回転による横架材の割裂若しくは柱の割裂が見られる。横架材に引張力が発生すると車知栓が回転してエネルギーを吸収する機構である。モーメント抵抗性能は、 $1/20\text{rad}$ 付近まで耐力が上昇する。

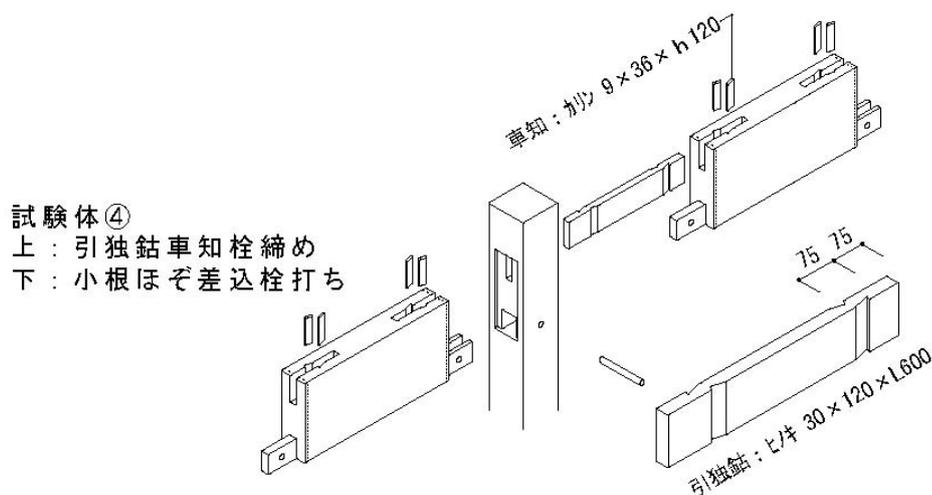


図1.1.6 引独鈷車知栓締め+小根ほぞ差込栓打ち

C. ほぞ差込栓打ち

柱の二方向から横架材が入る場合の仕口である。横架材と同じ背のほぞを設け、柱の芯から込栓を打ち込む。横架材の余長をあまり必要としない接合方法である。

破壊は込栓の曲げ破壊が起こり、終局はほぞのせん断破壊である。

柱-横架材十字型接合部の静加力試験では、最大耐力は低いだが、靱性が高く粘り強い仕口である。

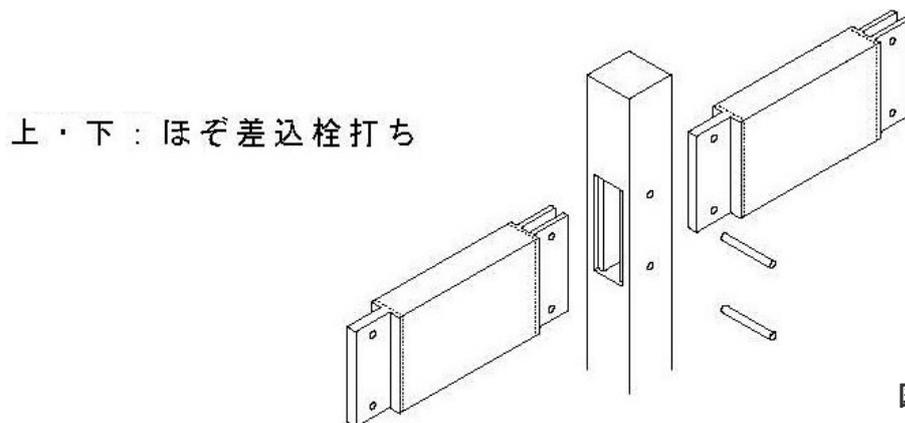


図1.1.7 ほぞ差込栓打ち

D. 京呂組

小屋梁を軒桁の上に載せる小屋組である。梁が曲がった材の場合には、設定された水墨をもとに任意の位置に上がり墨を打つ。

桁の垂直中心線と垂木の下端線との交点を峠と言ひ、全ての小屋組の基準とする。峠は一般に垂木欠きによる桁の断面欠損を少なくするため、桁断面内に収まらない場合が多いが、峠を基準とすると勾配の計算には便利である。小屋梁上端には、垂木の入り込む溝を設ける。また、その先端下端に蟻を設け、兜蟻とする。

この形状は、ひかり板というもので実測し、桁の切り込みの形状を決定する。小屋束は、施工時、鳶職が掴まることがあるため束の根ほぞをきつめにする。具体的にはほぞ穴の幅は、材の割れを避けるため束と同寸法とし、長手をきつくする⁶⁾。

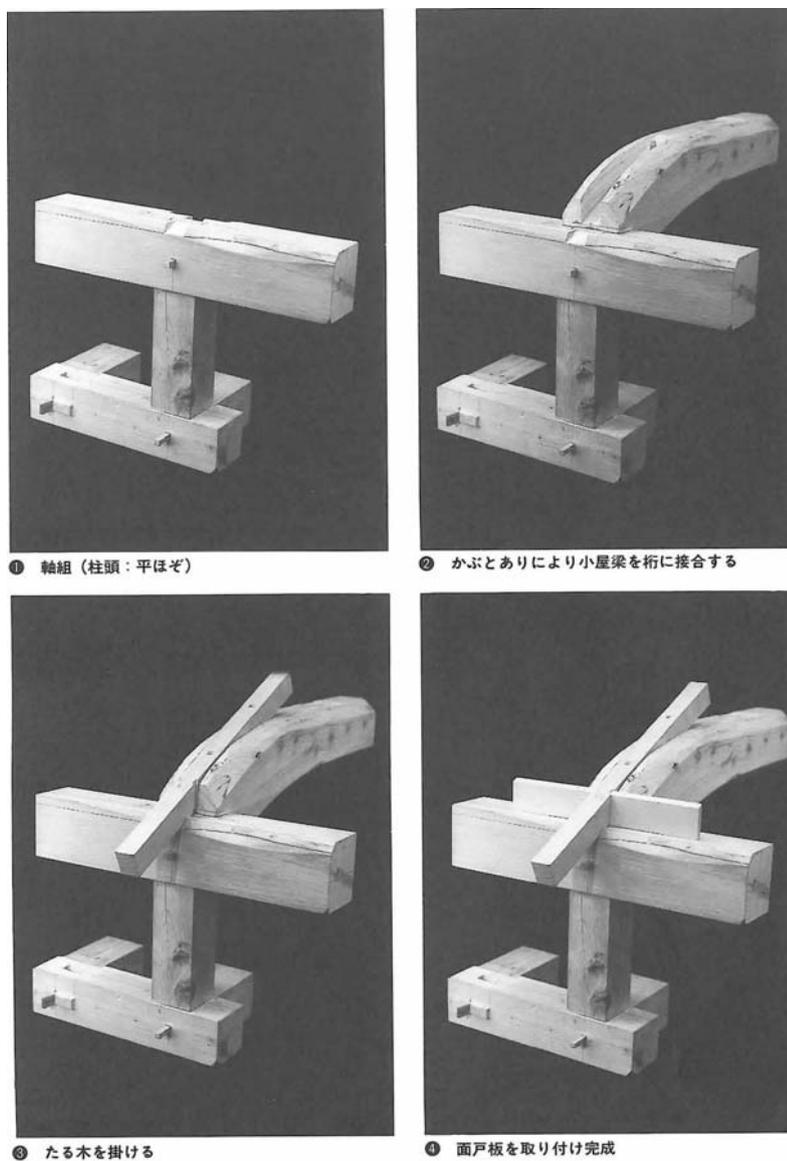


図1.1.8 京呂組⁶⁾

1.2 本論文の目的と問題解決方法

1.2.1 研究の目的と本論文の範囲

追掛継(写真 1.2.1)は、内田らの調査²⁾によると西暦 1,200 年前後から見られるようになった略鎌が発展したもので、現在の形状になったのは 1,400 年頃と思われる。この形状は、追掛大栓継をはじめとする、金輪継、尻挟継、台持継などに共通した接合形状であり、構造的特徴は、顎と接合部の繊維方向の面圧性能を利用して、我が国の伝統構法の継手・仕口の中で曲げモーメント、引張力に対して最も抵抗性能の高い継手として、横架材の接合部などに広く用いられてきた。

本論文では、胴付に割裂が発生する前の弾性域の回転剛性評価式⁷⁾と既往の研究から割裂発生後の力学モデルを作り、塑性域の回転剛性評価式を導き、継手各部の任意の寸法が曲げ剛性や耐力にどのような影響を及ぼすのかを検証し、一方向鉛直荷重下における追掛継の曲げ性能評価式と合理的な継手の各部の寸法を求めることを目標とした。尚、ここでは長期鉛直荷重に対する略鎌系継手の一般的な力学モデルから性能評価式を導き検証することを目的としているため、大栓は除いた追掛継そのものを対象としている。

1.2.2 本論文の問題解決方法

まず追掛継の一方向鉛直荷重による 4 点曲げ試験を実施し、変形と破壊の経過の観察から、胴付に割裂が発生する前の力学モデルを作った。そして中立軸周りの力のつり合い式より、引張側縁から中立軸までの距離： y_p を求め、抵抗モーメントの総和から弾性域の回転剛性評価式を導き出した。

ここで胴付に割裂が入った後の塑性域の性能を検証するに当たり、木口面同士の摩擦応力による割裂耐力評価式を実験的に求めた。

そして摩擦力による割裂耐力と胴付の割裂位置から上に発生する摩擦力のつり合いから、中立軸から割裂までの距離： X を求めた。そして追掛継の実験結果と摩擦による割裂耐力の理論値との整合性を検証した。

次に X より y_p を新たな中立軸とした抵抗モーメントの総和を求め、塑性域の回転剛性評価式を導いた。

さらに顎の下端が支圧強度に達した後の抵抗モーメントの総和を求め、回転剛性評価式を導き、追掛継の曲げ耐力評価式の提案を行った。

そして評価式を検証するため、4 つのパラメータ(樹種、材背、顎幅、継手長さ)を変化させた一方向鉛直荷重による 4 点曲げ試験の結果と理論値から評価式の妥当性について検証した。



写真 1.2.1 追掛継の構造

1.3 既往の研究

従来、伝統木造の継手・仕口に関する力学的研究は、特定の樹種および断面や各部寸法についての実験データが存在するのみで、その多くは引張試験に関するものである。そのため接合部の各部寸法が変化した場合の曲げモーメントに対する剛性や耐力を推定できるような設計式を導くという研究はほとんど行われてこなかった。追掛継も同様にその特徴である曲げ性能に関する研究は少ない、もしくは追掛継に大栓が入った研究がなされており、追掛継そのものの性能を示すものは見られない。

そこで追掛大栓継に関する既往の重要な文献^{8~16)}をここで概観してみる。

まず、本多祥二ら⁸⁾は、スギ材を用いて追掛大栓継の機械加工と手加工による引張力の強度・剛性の差異、および栓に木製の込栓を用いた場合とボルトを用いた場合の差異を実験的に検証している。その結果、機械加工の方が手加工よりも強度が高いとしている。また込栓とボルトの強度の差異はないが、剛性はボルトの方が高く、その原因を井上らはボルトの締め付け力によるものとしている。しかし、込栓は繊維直交方向にせん断力を受けることから、ボルトの圧縮力よりもむしろ鋼製のボルトによる面圧剛性の影響が大きく出たものと考えられる。

次に井上正文ら⁹⁾は、スギ材を用いて、追掛大栓継の機械加工と手加工による曲げに対する強度・剛性の差異、および栓に木製の込栓を用いた場合とボルトを用いた場合の差異を実験的に検証している。その結果、込栓またはボルトを使った場合、剛性、耐力の差はなかった。但し、ボルトを締め付けた場合、僅かに剛性が上昇するが、耐力は変わらない。また手加工と機械加工の差は、機械加工の方が手加工よりも剛性、耐力とも若干高いとしている。

藤野栄一ら¹⁰⁾は、ベイマツとスギを用いて、引張耐力に関する研究を行っている。ベイマツはスギに対して、最大耐力で1.3~1.5倍程度、降伏耐力で1.2~1.7倍程度、大きな値を示したとしている。最大荷重とせん断面積が比例関係にあるとしているが、材幅120mm、継手長さ360mmの時、材背120mmと240mmを比較すると、せん断面積が2倍になっても最大荷重は約1.8倍となり、せん断面積の増加につれて最大荷重の増加率が低減するとしている。

松窪直人ら^{11) 12)}は、ベイマツを用いて、強軸方向载荷及び弱軸方向载荷に対して、単調载荷時及び繰り返し载荷時の試験体全体の変位や継手の歪の分布から破壊性状を分析している。その結果、割裂するまでは、継手内部において圧縮力及び引張力が平面保持をしているが、割裂後は、平面保持が崩れ、継手上部に圧縮力の大きな負担が見られると共に込栓の部分での圧縮力が顕著になるとしている。これより発生している胴付上部と顎下部の歪の差は、込栓が負担しているものと考えられる。

戸田正彦ら¹³⁾は、スギ材を用いて、引張強度の推定をしているが、推定値が、実験値よりも高く、うまく推定できていない。

宇京斉一郎ら¹⁴⁾は、120mmの正角スギの集成材を用いて、継手長さや顎幅を変化させた追掛大栓継と込栓の無い追掛継の引張時のひずみ分布解析を行っている。継手長さが増加するにつれて最大荷重が増加しているが、せん断面積の増加率と最大荷重の増加率を比較すると、面積の増加よりも荷重の増加が少ない。しかし、せん断面積の増加率をせん断面上における応力集中係数(最大せん断応力/平均せん断応力)で除してやると最大耐力の増加率とほぼ一致し、初期破壊が生じる荷重の予測ができることを示唆している。

瀧野敦夫ら¹⁵⁾は、ヒノキの接着重ね梁を用いて、追掛大栓継の最大曲げ耐力の評価式を提案している。荷重上昇時に発生する胴付の割裂よりも上部の木材はせん断耐力に起因しないものとして、顎

に生じる圧縮力 T とそれに釣り合う断面に発生する力 T' によって継手内部にせん断力応力度の最大値が材料強度に達した際に継手が破壊すると仮定して最大耐力を推定している。しかし継手の破壊過程から見て、割裂するや否やせん断破壊するものも多く、割裂が先行して破壊したのか、せん断が先行して破壊したのか不明であることからせん断耐力のみで追掛継大栓継の最大曲げ耐力を評価することに疑問がある。

北田祐一ら¹⁶⁾は、追掛大栓継と追掛継の曲げ剛性と最大耐力を提案している。曲げ剛性は、込栓の三角形変位めり込みを仮定し、稲山によるめり込み基準式¹⁷⁾によって算定している。また最大耐力は、接合部の割裂高さを測定し、接合部の圧縮応力を三角形分布、最大耐力時の顎の圧縮応力を四角形分布と仮定している。しかし、接合部の割裂高さを実測しており純粋な理論式とは言い難い。また抵抗するせん断面を顎の垂直面のみ仮定しており、顎の水平面を考慮していないことから、提案されている最大耐力の推定式が実際に発生する力を推定しているとは言い難い。

伝統構法の継手・仕口に関する既往の研究報告は近年増加しており、追掛大栓継以外の継手・仕口で重要なものに北守顕久ら¹⁸⁾によって行われた伝統構法の継手の一つである金輪継を対象に引張力と曲げが同時に作用する複合応力状態において、曲げ特性に与える影響を評価したものがあつた。その結果、金輪継の耐力計算に際しては、軸力、モーメントを独立して算定するのみならず、両者の複合状態を想定した許容値を与える必要があることを示唆している。

1.4 本論文の構成と概要

本論文は6章より構成されている。第1章では、我が国の軸組式伝統木造構法の特徴として、接合部が嵌合による継手・仕口で構成されており、力学的性能は剛性を木材の面圧性能に、最大耐力を木材の割裂やせん断、曲げ、めり込みの強度によっていることを述べた。しかし、この軸組式伝統木造構法の設計法の確立がこれまで等閑にされてきたことを問題点として挙げた。

これに対して本論文では、我が国の伝統構法の継手・仕口の中で曲げモーメント、引張力に対して最も抵抗性能の高い継手として追掛継を取り上げて、継手各部の任意の寸法が曲げ剛性や耐力にどのような影響を及ぼすのかを検証することを目標に掲げた。これにより、その他の伝統構法の継手・仕口の力学性能評価式を構築する手法の導きとなる立場を明らかにしている。

第2章では、追掛継の弾性域の回転剛性評価式の提案をしている。

2.1では、4点曲げ試験による変形と破壊の経過と弾性域の範囲について述べている。

2.2では、2.1から接合部の胴付に割裂が発生する前までの接合部の回転剛性評価式を誘導するに当たり、力学モデルを提案している。そして力学モデルより、中立軸の位置と接合部の抵抗モーメントを求め、弾性域における回転剛性評価式を提案した。

第3章では、追掛継の胴付に発生する割裂耐力の推定に関して論じている。

3.1では、木材の割裂に関する既往の研究について述べている。

3.2では、木口面同士の摩擦応力を考慮した割裂試験について述べている。

3.3では、試験の結果と考察において、割裂耐力と各寸法パラメータの相関関係、割裂破壊係数と比重、年輪傾角の相関関係について検討している。

第4章では、追掛継の胴付に発生する割裂位置の推定から塑性域の回転剛性評価式を提案している。

4.1では、胴付に割裂が生じる時の割裂位置を算定するにあたり、力学モデルを作成し、木口面同士が摩擦応力により、割裂が片側のみに生じる場合の割裂耐力と追掛継の中立軸から X の位置に割裂が生じる時の力が等しいことから、最小仕事の原理より、追掛継に割裂が発生する位置を推定している。

4.2では、胴付が割裂した後から顎の下端が支圧強度に達するまでの接合部の回転剛性評価式の誘導にあたり、力学モデルを作成し、以下、第2章と同様の手順で割裂後の継手の引張側縁から中立軸までの距離と接合部の抵抗モーメントを求め、塑性域における接合部の回転剛性評価式を提案した。また割裂発生時の面圧応力度を用いて、割裂発生時の抵抗モーメントの理論値を求めた。続いて、顎の下端が支圧強度に達した後の回転剛性評価式について提案している。まず木質構造設計規準・同解説(602.1.1)式¹⁹⁾より顎の引張側縁に圧壊が生じるときの支圧強度を求め、顎の下端が支圧強度に達した時の降伏モーメントを求めた。次に顎の下端が支圧強度に達した後は、その圧縮応力のまま一定で変位のみ進む塑性状態になるものとして、顎の引張側縁から中立軸までの距離と接合部の抵抗モーメントを求め θ_q と y_q 、 θ_q と M_q の関係式を導いている。

第5章では、追掛継の4点曲げ試験の予測と結果の解析を行っている。

5.1では、追掛継の4点曲げ試験の試験体の種類と試験方法、試験体の物性値について述べている。

5.2 では、追掛継の曲げ性能の予測と試験結果の解析を行っている。

第 6 章では、本論文の結論について述べている。

6.1 では、本論文で得た追掛継の曲げ性能理論式について、その成果と残された課題について述べている。

6.2 では、今後の課題として、顎が支圧強度に達する前のせん断耐力評価式の誘導について述べている。これに当たり、力学モデルの提案と顎の終局せん断応力と顎の圧縮応力が等しいことから、最小仕事の原理より、中立軸から顎のせん断位置を求め、顎の終局せん断応力を推定する式を誘導している。

第2章 追掛継の弾性域の回転剛性理論式

2.1 4点曲げ試験による変形と破壊の経過

2.2 弾性域の回転剛性評価式の提案

2.2.1 弾性域の力学モデル

2.2.2 弾性域の接合部の回転剛性評価式の誘導

2.3 まとめ

2.1 4点曲げ試験による変形と破壊の経過

図 2.1.1 より、全体的な変形と破壊の経過は直線的に荷重上昇している途中で、写真 2.1.1 のように胴付の中立軸より上部で、摩擦により上下方向のせん断抵抗をしている部分の中立軸より少し上あたりに割裂が生じた。そこで荷重上昇が一旦停止し、その後、写真 2.1.2 のように顎から先が脆性的にせん断破壊するか、あるいは写真 2.1.3 のように顎の繊維方向のめり込みによる圧壊で緩やかな勾配に移り、そのまま荷重上昇または荷重が一旦低下するものの再度上昇する。最大耐力は写真 2.1.4 のように顎のせん断破壊、あるいは写真 2.1.5 のように継手の曲げ破壊、あるいは顎の繊維方向のめり込みによる圧壊で決まることが観察された。尚、本章で目的とする弾性剛性は、上記の胴付に割裂が生じる前の直線的に荷重が上昇する範囲と定義する。

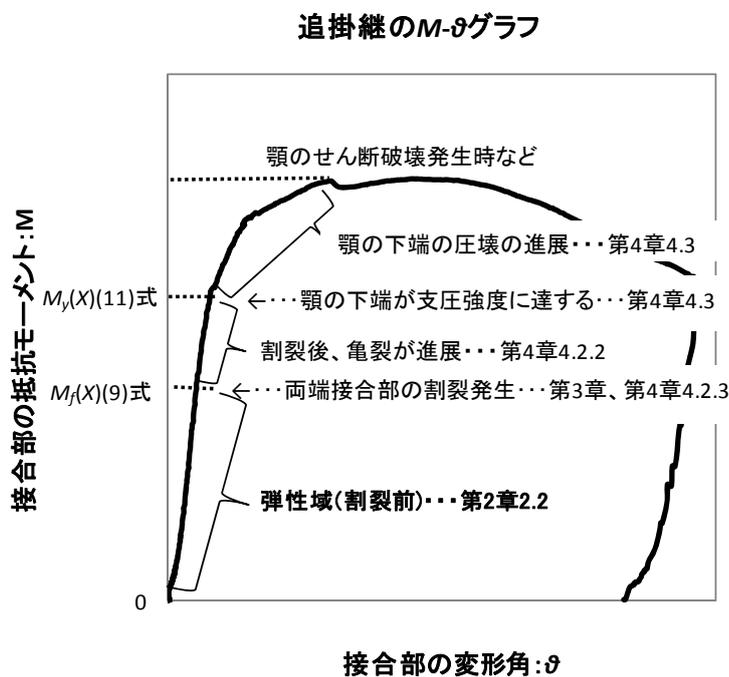


図 2.2.1 追掛継のM-θ グラフ



写真 2.1.1 胴付の摩擦による割裂
(DH180-e15-L300-1)



写真 2.1.2 顎のせん断破壊
(DH120-e15-L300-1)



写真 2.1.3 顎の圧壊
(DH180-e15-L300-2)



写真 2.1.4 顎のせん断破壊
(DH180-e60-L300-1)



写真 2.1.5 継手の曲げ破壊
(DH180-e60-L300-1)

2.2 弾性域の回転剛性評価式の提案

2.2.1 弾性域の力学モデル

2.1 の 4 点曲げ試験による変形と破壊の経過より、胴付に割裂が発生する前の接合部の回転剛性評価式を誘導するにあたり、次の仮定をした。

- 継手ゾーン内での曲げ変形は無視する。
- 胴付の反力は繊維方向の圧縮力と木口面の摩擦力のみと考えた。
- 木口面以外の摩擦力は、上木と下木の側面に生じるものが考えられるが無視をする。
- 胴付と顎の圧縮力の材背方向の分布は、中立軸からの距離に比例するものとする(平面保持仮定)。

以上より、図 2.2.2、2.2.3、2.2.4 の力学モデルを作成した。

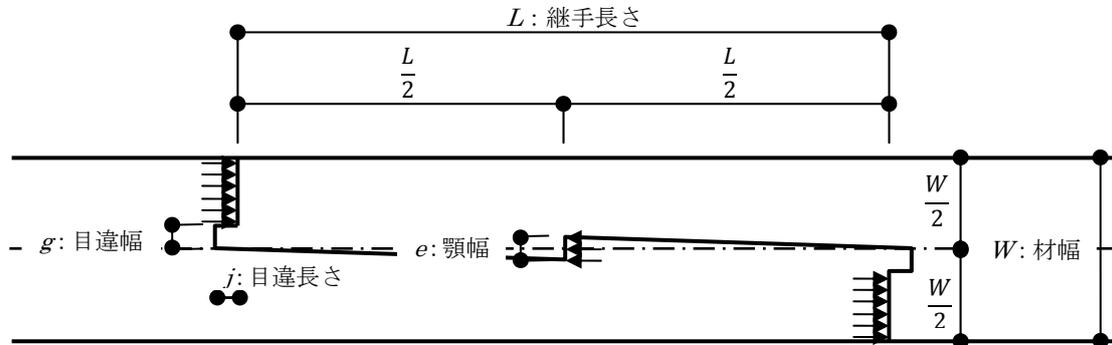


図 2.2.2 上面から見た接合部の各部寸法と力学モデル

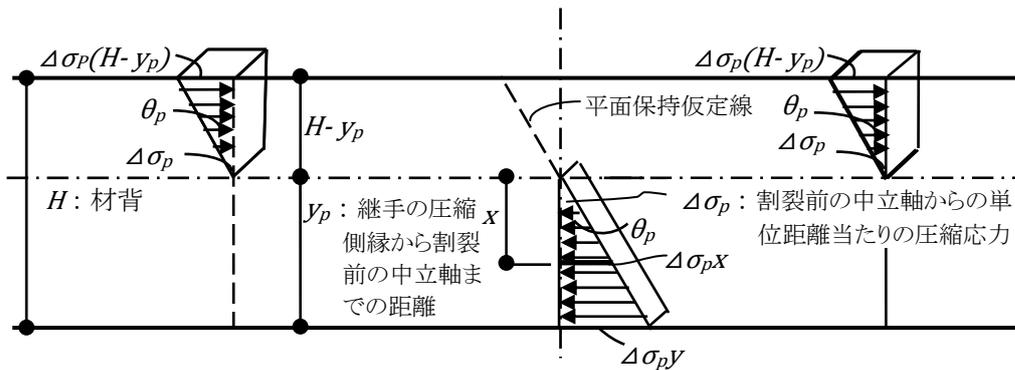


図 2.2.3 側面から見た接合部の各部寸法と力学モデル(割裂前)

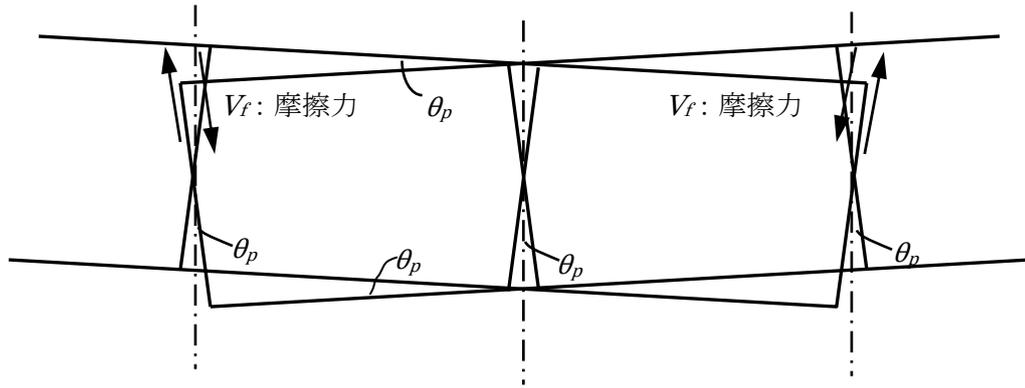


図 2.2.4 胴付に働く摩擦力

2.2.2 弾性域の接合部の回転剛性評価式の誘導

図 2.2.2、2.2.3 より中立軸の上側の合力 N_U と下側の合力 N_D が等しいことから、引張側縁から中立軸までの距離を y_p とした時、

$$\begin{aligned} \text{中立軸より上側の合力: } N_U &= \Delta\sigma_p \times (H - y_p) \times (H - y_p) \times \frac{1}{2} \times \left(\frac{W}{2} - g\right) \times 2 \\ &= \frac{1}{2} \Delta\sigma_p (W - 2g) (H - y_p)^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{中立軸より下側の合力: } N_D &= \Delta\sigma_p \times y_p \times y_p \times \frac{1}{2} \times e \\ &= \frac{1}{2} \Delta\sigma_p e y_p^2 \end{aligned}$$

x 方向の力のつり合いより、次式となる。

$$N_U = N_D \cdots (2.2.1)$$

(2.2.1) 式を y_p について解くと、継手の引張側縁から中立軸までの距離: y_p が得られる。

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \Delta\sigma_p (W - 2g) (H - y_p)^2 &= \frac{1}{2} \Delta\sigma_p e y_p^2 \\ (W - 2g) (H - y_p)^2 &= e y_p^2 \\ (W - 2g) (y_p^2 - 2H y_p + H^2) - e y_p^2 &= 0 \\ (W - 2g - e) y_p^2 - 2(W - 2g) H y_p + (W - 2g) H^2 &= 0 \end{aligned}$$

両辺を $W - 2g$ で除すると

$$\left(1 - \frac{e}{W - 2g}\right) y_p^2 - 2H y_p + H^2 = 0$$

$0 < y_p < H$ より、継手の引張側縁から中立軸までの距離: y_p を(2.2.2)式のように求めた。

$$y_p = \frac{H - \sqrt{H^2 - H^2 \left(1 - \frac{e}{W - 2g}\right)}}{1 - \frac{e}{W - 2g}} = \frac{H - H \sqrt{\frac{e}{W - 2g}}}{1 - \frac{e}{W - 2g}}$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{H \left(1 - \sqrt{\frac{e}{W-2g}}\right)}{1 - \frac{e}{W-2g}} \\
&= \frac{H(W-2g) \left(1 - \sqrt{\frac{e}{W-2g}}\right)}{W-2g-e} \\
y_p &= \frac{H\sqrt{W-2g}(\sqrt{W-2g}-\sqrt{e})}{W-2g-e} \dots(2.2.2)
\end{aligned}$$

次に接合部の抵抗モーメントを求める。

摩擦力は中立軸より上の合力に摩擦係数: μ を乗じる。

$$\text{継手片側部分の摩擦力: } V_f = \frac{1}{2} \mu N_U \quad \mu: \text{摩擦係数}$$

よって、弾性域の接合部の「抵抗モーメント」: M_p

=「中立軸より下側の顎部分の三角形分布圧縮力によるモーメント」
+「中立軸より上側の胴付部分の三角形分布圧縮力によるモーメント」
+「継手片側部分の摩擦力と継手長さの積」より、

$$\begin{aligned}
M_p &= \int_0^{y_p} e \Delta \sigma_p x^2 dx + \int_0^{H-y_p} (W-2g) \Delta \sigma_p x^2 dx + \frac{\mu N_U L}{2} \\
&= \frac{\Delta \sigma_p e y_p^3}{3} + \frac{\Delta \sigma_p (W-2g) (H-y_p)^3}{3} + \frac{\Delta \sigma_p \mu L (W-2g) (H-y_p)^2}{4} \dots(2.2.3)
\end{aligned}$$

ここで図 2.2.5 より、中立軸から 1 のところの単位圧縮応力度を $\Delta \sigma_p$ とすると、 x のところの圧縮応力: $\sigma_p = \Delta \sigma_p x$ となり、 x のところの縮み量は、顎または胴付の両側の木材が等しく潰れるため面圧剛性が半分になることから: $\delta = \frac{2\sigma_p}{K_E}$ となる。

よって、変形角 θ_p は、 $\theta_p = \frac{\delta}{x} = \frac{2\sigma_p}{x K_E} = \frac{2\Delta \sigma_p x}{x K_E} = \frac{2\Delta \sigma_p}{K_E}$ より、 $\Delta \sigma_p = \frac{K_E \theta_p}{2} \dots(2.2.4)$ となる。

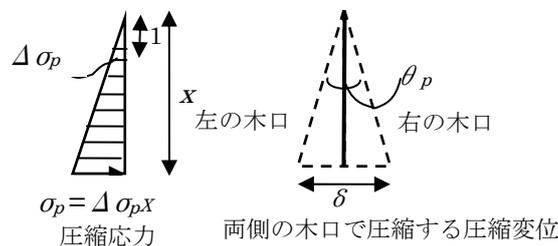


図 2.2.5 顎の圧縮応力と変形

この時、木材の繊維方向の面圧剛性: K_E は、木質構造設計規準・同解説 1) による平井・小松式より求めるものとする。

$$K_E = E_0 / (31.6 + 10.9d) \dots(2.2.5)$$

ここで

E_0 : 木材の繊維方向のヤング係数

$$\text{平均面圧幅: } d = \left\{ \left(\frac{W}{2} - g \right) (H - y_p) \times 2 + e \times y_p \right\} / \left\{ (H - y_p) \times 2 + y_p \right\} \dots (2.2.6)$$

とした。

(2.2.4)式を(2.2.3)式に代入すると、弾性域における接合部の抵抗モーメント: M_p と変形角: θ_p との関係式は、(2.2.7)式ようになる。

$$M_p = \frac{K_E \theta_p \{ 4e y_p^3 + 4(W-2g)(H-y_p)^3 + 3\mu L(W-2g)(H-y_p)^2 \}}{24} \dots (2.2.7)$$

弾性域における接合部の回転剛性: K_{Rp} は、下式となる。

$$K_{Rp} = \frac{M_p}{\theta_p} = \frac{K_E \{ 4e y_p^3 + 4(W-2g)(H-y_p)^3 + 3\mu L(W-2g)(H-y_p)^2 \}}{24} \dots (2.2.8)$$

2.3 まとめ

本章で推定・誘導した式を以下に示す。

弾性域における追掛継の継手の引張側縁から中立軸までの距離： y_p

$$y_p = \frac{H\sqrt{W-2g}(\sqrt{W-2g}-\sqrt{e})}{W-2g-e} \dots(2.2.2)$$

弾性域における追掛継の接合部の回転剛性： K_{Rp}

$$K_{Rp} = \frac{M_p}{\theta_p} = \frac{K_E\{4ey_p^3+4(W-2g)(H-y_p)^3+3\mu L(W-2g)(H-y_p)^2\}}{24} \dots(2.2.8)$$

第3章 木口面同士の摩擦応力による割裂耐力の推定

3.1 木材の割裂に関する既往の研究

3.2 木口面同士の摩擦応力を考慮した割裂試験

3.2.1 追掛継の胴付に生じる割裂のメカニズム

3.2.2 割裂試験の方法

3.2.3 試験体

3.3 結果と考察

3.3.1 試験結果

3.3.2 割裂耐力推定式と寸法パラメータとの相関について

3.3.3 割裂破壊係数と比重・年輪傾角の相関について

3.3.3.1 割裂破壊係数と比重の相関について

3.3.3.2 割裂破壊係数と年輪傾角の相関について

3.4 まとめ

3.1 木材の割裂に関する既往の研究

第2章では追掛継の曲げ性能について、耐力発現メカニズムを簡易な力学モデルによって表現することにより、接合部のモーメントと変形角関係の弾性範囲における回転剛性算定式を提案¹⁾した。

上述の実験において、松本²⁾や瀧野³⁾らの報告と同様に、ほぼ全ての試験体において、荷重の増加とともに、継手の胴付面から割裂破壊が観察された(写真 3.1.1)。従って、胴付からの割裂破壊は接合部の降伏を決定する要因の一つと考えられる。また、割裂破壊後は、割裂開口変位の増加に伴って、弾性剛性を推定する際に仮定した断面の平面保持が成立しないと考えられるため、割裂以降の荷重変形関係を追跡するためには、力学モデルを新たに構築しなければならない。このような理由から、割裂以降、降伏点及び終局に至るまでの接合部の荷重変形挙動を予測するためには、胴付面からの割裂破壊荷重を推定することが必要である(図 3.1.1)。



写真 3.1.1 追掛継の胴付の割裂

追掛継のM-θグラフ

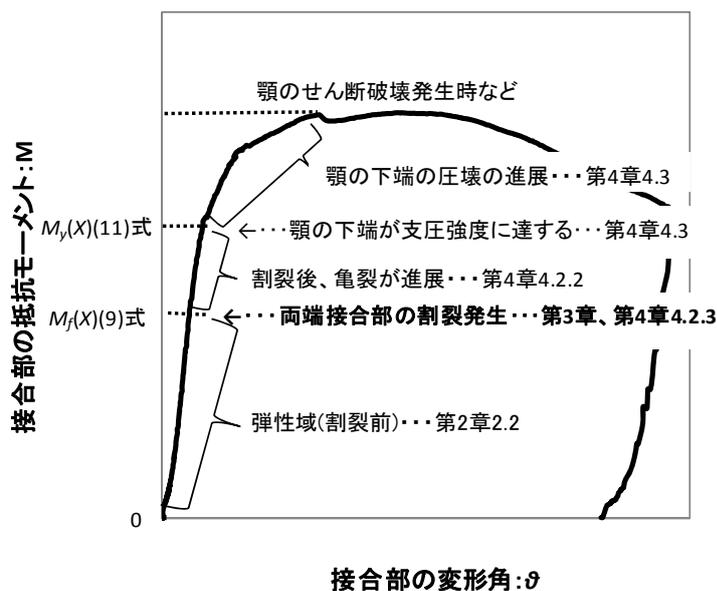


図3.1.1 追掛継のM-θグラフ

割裂破壊は、胴付面の圧縮応力と回転変形の結果発生する摩擦力による繊維直交方向の横引張応力が主要な要因となって引き起こされると考えられる。木材の割裂破壊については、平井・澤田の実験的研究⁴⁾や安村基の応力解析⁵⁾を始めとして多くの研究報告がある。これらの中で、割裂破壊荷重の簡便な計算法としてはP. J. Gustaffson⁶⁾とVan der Putら⁷⁾の算定手法が知られている。後者は岩崎ら⁸⁾によってボルトのせん断実験結果に基づき割裂破壊パラメータが誘導され、現行の木質構造設計規準・同解説⁹⁾の中でボルト接合部の割裂破壊荷重算定式として採用されている。両者は、ともに割裂の進展とそれに伴う系のポテンシャルエネルギーの関係を定式化したものであるが、これらが本研究で取り上げる荷重条件に対しても適用し得るものかどうかは確認が必要である。また、一定の傾向を表現することが確認されたとしても、破壊靱性値といった破壊力学における材料特性値についてデータの蓄積に乏しい今日においては、上述の割裂破壊パラメータのように、材料特性値を含んだ形でのパラメータ設定が、破壊荷重を推定するためには不可欠である。

以上から、本研究では木口面の摩擦によるせん断力が作用するような状態を疑似的に再現する実験を行い、割裂破壊荷重に影響を与えることが予想される因子を抽出して割裂破壊荷重との関係を明らかにするとともに、既往の算定式を始めとするいくつかの定式化を試み、それらの適用性について検討を行った。

3.2. 木口面同士の摩擦応力を考慮した割裂試験

3.2.1 追掛継の胴付に生じる割裂のメカニズム

追掛継の胴付における割裂が発生するときの接合部の応力状態は、追掛継の顎の滑り勾配により胴付が強く押し付けられることにより図3.2.1のように考えることができる。ものである。このとき、圧縮と回転変形によって生じる摩擦力がせん断応力として胴付の木口面に作用し、このせん断応力の集積の結果として木口面には繊維直交方向の引張力が発生する。

$$V_f = \int_x^{H-y_p} R dx \cdots (3.2.1)$$

$$R = \mu N(x) \cdots (3.2.2)$$

ここで、

V_f : 繊維直交方向の引張力(N)

x : 中立軸からの距離(mm)

H : 材背(mm)

y_p : 材下端から中立軸までの距離(mm)

X : 中立軸から割裂までの距離(mm)

R : 摩擦力(N)

μ : 摩擦係数

$N(x)$: 繊維方向の圧縮力(N)

とする。

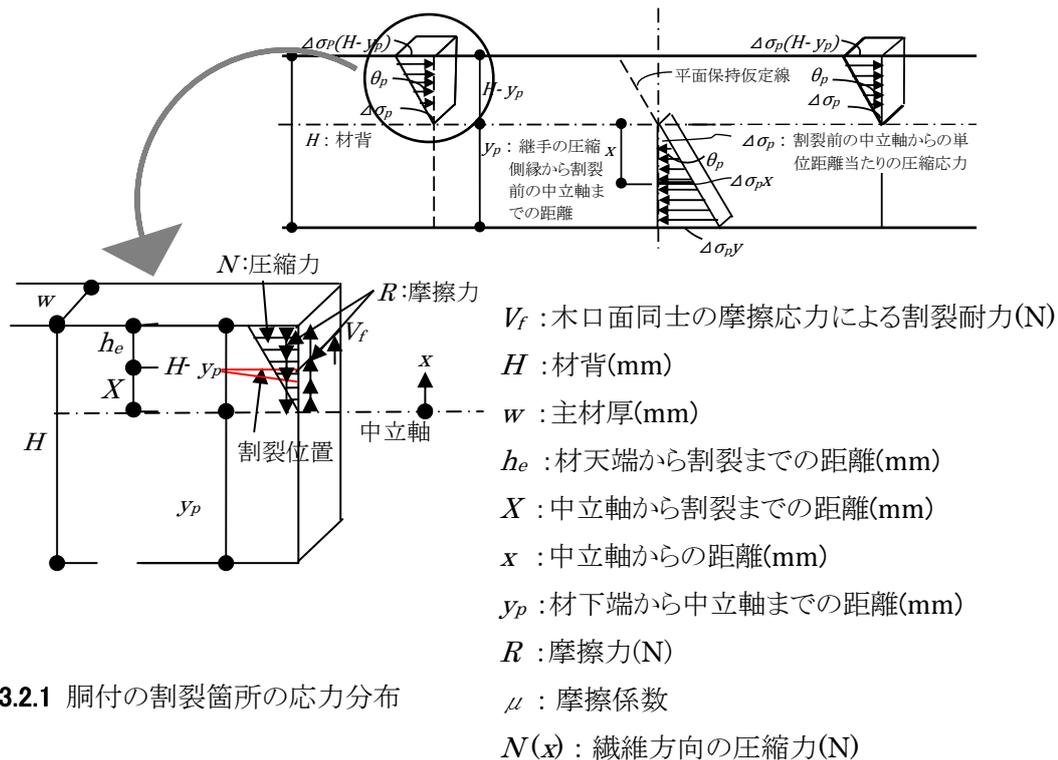


図 3.2.1 胴付の割裂箇所の応力分布

追掛継の割裂破壊では、目視による破壊直後のき裂の繊維方向のすべりは観察されなかったことから、繊維平行方向のせん断応力の影響は小さいものとして、破壊は繊維直交方向の応力のみによって引き起こされるものとする。

材天端からある距離を隔てた位置における木材の繊維直交方向の引張力が割裂破壊荷重に達した時に、その位置において割裂破壊が発生するものと考え、割裂破壊荷重を次式のように表わすことができる。

$$V_f = P_{cr} \cdots (3.2.3)$$

この時、 P_{cr} を木材の諸材料物性値に加え、割裂位置における縁距離： h_e 、材背： H 及び材幅： w の関数と考える。

3.2.2 割裂試験の方法

割裂試験は、縁距離： h_e の位置で割裂が生じるように30mm幅の顎を設けた上で、摩擦力によって一様なせん断応力が生じる状態を模して、試験体材料側面からオウシュウアカマツ (*Pinus sylvestris*)、18×30mmの製材に接着剤(コニシ製、酢酸ビニル樹脂エマルジョン木材接着剤、ボンド木工用即乾)を用いて接着する方法とした。実際の追掛継の場合はせん断力により中立軸より上側の胴付面に上向きの摩擦力が発生し割裂が生じるので、今回の試験体のように割裂位置に顎が有る場合の応力状態と実際には異なるが、割裂位置より上側の両側面に一様に上向きの応力を与えている点で、顎に上向きの集中荷重が加わる試験法に比べてより実際の上向きの摩擦力による割裂発生時の応力状態に近い試験方法となっているものと考えられる。

試験方法は、図 3.2.2 に示すように曲げ応力による影響を取り除くため、逆対称4点曲げ試験によ

る単調載荷試験とした。加力は島津製作所製万能試験機 Auto Graph AG-IS100kN を用い、割裂位置におけるせん断力を支点位置に設けたロードセルを用いて計測した。また、顎の付け根から 50mm のところの割裂位置におけるき裂の開口変位を東京測器製の高性能変位計 CDP25 を用いて測定し、割裂発生の有無を確認した。写真 3.2.1 は実験風景である。

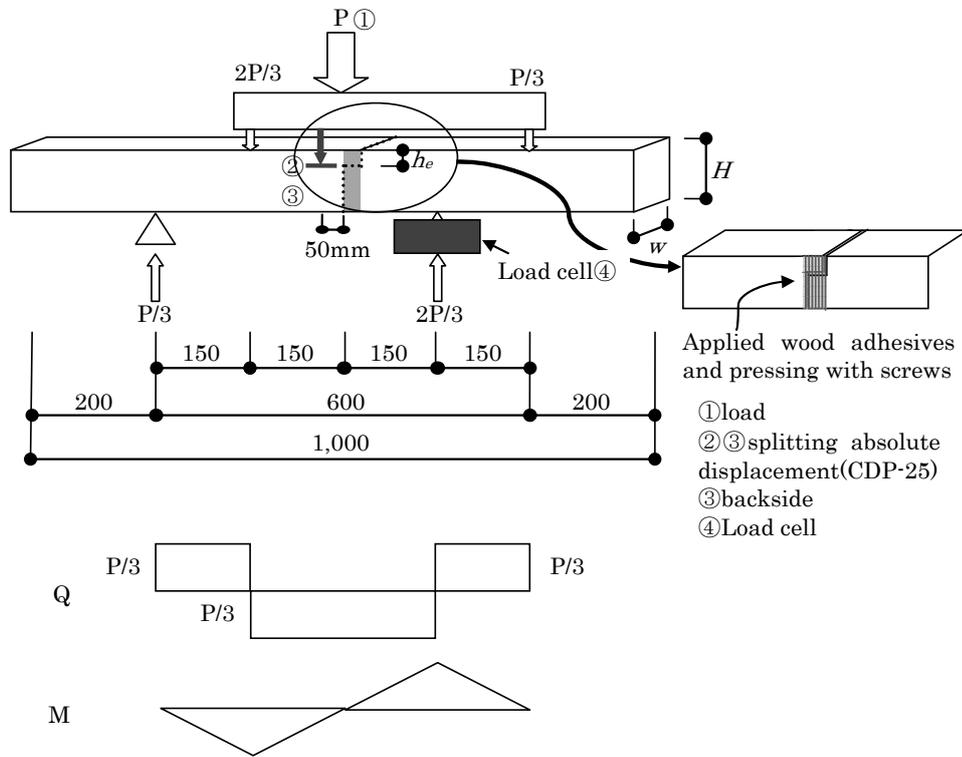


図 3.2.2 試験方法



写真 3.2.1 実験風景

3.2.3 試験体

表 3.2.1 に試験体の種類を示す。試験体に用いた樹種は、高比重の針葉樹として日本農林規格における機械等級区分製材 E110 のベイマツ (*Pseudotsuga menziesii*)、平均比重 0.47、平均含水率 9.6%、及び低比重の針葉樹材として機械等級区分製材 E70~E90 のスギ (*Cryptomeria Japonica*)、平均比重 0.32、平均含水率 7.8% の 2 種類とした。いずれも人工乾燥材の平角材から挽いた平板材とし、割裂位置周辺に乾燥割れが無いよう試験体の木取りを行った。試験体のパラメータは、材背： H を 120、180、240、300mm の 4 種類とし、割裂位置の縁距離： h_e と材背： H との比率： h_e/H を 1/8、1/6、1/4、1/3 の 4 種類とした計 16 種類に設定した。 h_e/H については、既報¹⁾で行った曲げ試験の結果から、ベイマツで $h_e/H=1/13\sim 1/3$ 程度、スギで $1/10\sim 1/2$ であったことに基づいて決定した。尚、材幅： w はベイマツ 57mm、スギ 60mm とした。

表 3.2.1 試験体情報

kiln-dried <i>Pseudotsuga menziesii</i> , E110-SD20									kiln-dried <i>Cryptomeria Japonica</i> , E70-E90 SD20									(mm)	
Types	mean moisture content (%)	w	H	cutting butt end length	h_e	h_e/H	$w \sqrt{\frac{h_e}{1-h_e/H}}$	number	Types	mean moisture content (%)	w	H	cutting butt end length	h_e	h_e/H	$w \sqrt{\frac{h_e}{1-h_e/H}}$	number		
kiln-dried <i>Pseudotsuga menziesii</i>	DH120- h_e 15	9.3	57	120	30	15	0.13	236.00	kiln-dried <i>Cryptomeria Japonica</i>	CH120- h_e 15	8.2	60	120	30	15	0.13	248.42	6	
	DH120- h_e 20	9.0				20	0.17	279.24		6	CH120- h_e 20				8.2	20	0.17	293.94	6
	DH120- h_e 30	9.4				30	0.25	360.50		6	CH120- h_e 30				7.9	30	0.25	379.47	6
	DH120- h_e 40	9.5				40	0.33	441.52		6	CH120- h_e 40				7.7	40	0.33	464.76	6
	DH180- h_e 22.5	9.3	57	180	30	22.5	0.13	289.04	6	CH180- h_e 22.5	7.3	60	180	30	22.5	0.13	304.26	6	
	DH180- h_e 30	10.0				30	0.17	342.00	6	CH180- h_e 30	7.4				30	0.17	360.00	6	
	DH180- h_e 45	9.7				45	0.25	441.52	6	CH180- h_e 45	7.4				45	0.25	464.76	6	
	DH180- h_e 60	9.7				60	0.33	540.75	6	CH180- h_e 60	7.1				60	0.33	569.21	6	
	DH240- h_e 30	9.7	57	240	30	30	0.13	333.76	6	CH240- h_e 30	7.8	60	240	30	30	0.13	351.32	6	
	DH240- h_e 40	10.3				40	0.17	394.91	6	CH240- h_e 40	7.7				40	0.17	415.69	6	
	DH240- h_e 60	10.2				60	0.25	509.82	6	CH240- h_e 60	8.0				60	0.25	536.66	6	
	DH240- h_e 80	10.0				80	0.33	624.40	6	CH240- h_e 80	8.2				80	0.33	657.27	6	
	DH300- h_e 37.5	8.4	57	300	30	37.5	0.13	373.15	6	CH300- h_e 37.5	7.7	60	300	30	37.5	0.13	392.79	6	
	DH300- h_e 50	9.6				50	0.17	441.52	6	CH300- h_e 50	7.9				50	0.17	464.76	6	
	DH300- h_e 75	12.0				75	0.25	570.00	6	CH300- h_e 75	8.1				75	0.25	600.00	6	
	DH300- h_e 100	10.5				100	0.33	698.10	6	CH300- h_e 100	8.0				100	0.33	734.85	6	
average	9.6						amount	96	average	7.8						amount	96		

Legend: w : Material width, H : Material height, h_e : Distance from top of species to splitting position

3.3 結果と考察

3.3.1 試験結果

各試験体の含水率、MOE、比重、年輪傾角の実測値、及び割裂試験より、割裂発生時の荷重： P 、割裂位置における割裂耐力： V_f 等の一覧を、ベイマツについては、表 3.3.1、スギについては表 3.3.2、それぞれの平均値や標準偏差等を表 3.3.3 と表 3.3.4 にまとめた。この時、割裂破壊係数： C_r は論文⁶⁾の切り欠きを有する梁の割裂算定式として紹介されている式(3.3.1)の $\beta=0$ の時の C_r とした(図 3.3.1)。尚、ベイマツの木取りは、長さ4m、幅120mmの平角材を2つ割りの平板材として、それを3分割して試験体を作成し、同一の平角材4mからとれる6体を h_e の異なる4種類に割りつけた。一方、スギの木取りは、長さ4m、幅60mmの平板材から4分割して試験体を作製し、同一の平板材から取れる4体は、 h_e の異なる4種類に割りつけた。

$$V = \frac{\sqrt{G_c d}}{\sqrt{0.6(\alpha - \alpha^2)/G + \beta \sqrt{6(1/\alpha - \alpha^2)/E}}} \cdots (3.3.1)$$

この時、

V ：割裂耐力(N)

G ：せん断弾性係数(N/mm)

G_c ：エネルギー解放率(J/mm²)

E ：ヤング係数(N/mm)

b ：材幅 (mm)

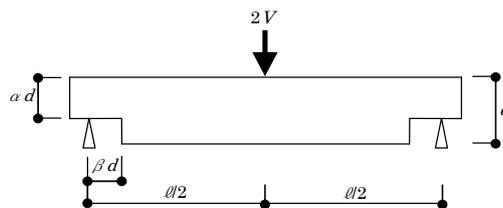
d ：材背 (mm)

ℓ ：材長 (mm)

α, β ：寸法比

C_r ：割裂破壊係数； $\sqrt{\frac{GG_c}{0.6}}$

とした。



V ：割裂耐力(N)

G ：せん断弾性係数(N/mm)

G_c ：エネルギー解放率(J/mm²)

E ：ヤング係数(N/mm)

b ：材幅(mm)

d ：材背(mm)

ℓ ：材長(mm)

α, β ：寸法比

図 3.3.1 切り欠き材モデルの寸法概要

表 3.3.1 ベイマツ試験結果情報

Kiln-dried <i>Pseudotsuga menziesii</i> , E110-SD20														
Types	No.	w (mm)	H (mm)	h _e (mm)	h _e /H	w $\sqrt{\frac{h_e}{1-h_e/H}}$	moisture content (%)	MOE (kN/mm ²)	specific gravity	ring angle (DEG)	P: load (kN)	splitting strength V _I =P/3 (kN)	C _I =V _I /w $\sqrt{h_e/(1-h_e/H)}$ (N/mm ^{1.5})	lumber No.
DH120-h _e 15	1	57	120	15	0.13	236.00	8.4	12.97	0.51	37.50	7.10	2.37	10.03	G
	2						8.4	15.61	0.46	50.19	6.43	1.86	7.86	H
	3						9.6	14.31	0.46	78.74	5.37	1.79	7.58	F
	4						9.5	12.38	0.41	28.47	6.47	2.16	9.14	E
	5						9.9	12.97	0.50	85.80	4.27	1.38	5.84	G
	6						9.7	15.61	0.50	74.95	3.53	1.18	4.99	H
DH120-h _e 20	1	57	120	20	0.17	279.24	9.0	12.97	0.50	67.67	8.30	2.77	9.91	G
	2						9.4	15.61	0.52	87.80	6.00	2.00	7.16	H
	3						9.1	14.31	0.45	86.68	5.27	1.76	6.29	F
	4						8.9	12.38	0.42	38.60	8.20	2.73	9.79	E
	5						9.2	12.97	0.51	75.59	7.60	2.53	9.07	G
	6						8.5	15.61	0.51	56.64	6.00	1.61	5.77	H
DH120-h _e 30	1	57	120	30	0.25	360.50	8.8	12.97	0.46	37.74	10.00	3.33	9.25	G
	2						9.9	15.61	0.50	87.09	10.43	3.34	9.28	H
	3						10.4	14.31	0.42	45.81	11.53	3.84	10.66	F
	4						8.5	12.38	0.47	38.18	11.43	3.81	10.57	E
	5						9.7	14.31	0.45	86.23	9.17	3.01	8.35	F
	6						9.0	12.38	0.46	60.87	11.03	3.68	10.20	F
DH120-h _e 40	1	57	120	40	0.33	441.52	9.2	14.31	0.48	79.62	12.00	3.58	8.10	F
	2						9.6	12.38	0.43	58.80	13.50	4.50	10.19	E
	3						10.1	12.97	0.53	64.25	16.67	4.83	10.95	G
	4						10.5	15.61	0.50	57.79	14.07	4.69	10.62	H
	5						9.4	14.31	0.41	51.57	15.93	5.31	12.03	F
	6						8.4	12.38	0.44	58.68	3.88	3.88	8.78	E
DH180-h _e 22.5	1	57	180	22.5	0.13	289.04	8.8	12.70	0.52	19.02	7.47	2.49	8.61	A
	2						9.0	12.07	0.42	39.02	7.00	2.26	7.80	B
	3						9.6	12.95	0.36	24.55	8.03	2.88	9.26	C
	4						9.8	18.54	0.57	77.97	7.73	2.58	8.92	D
	5						9.4	12.70	0.46	31.66	9.03	3.01	10.42	A
	6						9.0	12.07	0.46	45.00	8.43	2.81	9.73	B
DH180-h _e 30	1	57	180	30	0.17	342.00	9.6	12.70	0.45	15.46	9.77	3.23	9.45	A
	2						10.5	12.07	0.52	20.14	10.23	3.36	9.81	B
	3						10.2	12.95	0.35	30.74	12.23	4.08	11.92	C
	4						9.7	18.54	0.54	19.03	11.83	3.94	11.53	D
	5						10.5	12.70	0.69	29.87	10.40	2.97	8.68	A
	6						9.6	12.07	0.57	48.78	10.63	3.53	10.33	B
DH180-h _e 45	1	57	180	45	0.25	441.52	9.4	12.70	0.52	17.71	14.73	4.91	11.12	A
	2						9.6	12.70	0.50	20.00	16.67	4.06	9.19	A*
	3						10.0	12.95	0.34	30.54	14.27	4.76	10.77	C
	4						9.8	18.54	0.54	32.11	18.53	6.18	13.99	D
	5						10.4	12.70	0.52	53.07	15.00	4.47	10.12	A**
	6						9.1	12.07	0.48	65.48	15.00	4.82	10.92	B
DH180-h _e 60	1	57	180	60	0.33	540.75	8.7	12.95	0.40	44.27	24.93	6.46	11.94	C**
	2						10.0	18.54	0.51	19.81	16.50	4.27	7.89	D*
	3						10.1	12.95	0.42	50.97	20.93	4.48	8.28	C
	4						10.0	18.54	0.47	55.57	21.23	5.96	11.01	D
	5						10.1	12.95	0.47	40.52	15.53	5.18	9.58	C
	6						9.5	18.54	0.39	10.35	18.93	6.31	11.67	D
DH240-h _e 30	1	57	240	30	0.13	333.76	8.3	10.56	0.43	35.28	6.37	2.06	6.16	I
	2						9.5	15.66	0.51	16.80	8.87	2.07	6.19	J
	3						9.8	13.56	0.49	52.22	9.47	3.16	9.45	K
	4						9.8	10.90	0.43	31.07	8.77	2.92	8.75	M
	5						9.9	10.56	0.44	39.35	12.07	4.02	12.05	I
	6						10.6	15.66	0.67	43.49	13.77	4.59	13.75	J
DH240-h _e 40	1	57	240	40	0.17	394.91	8.5	10.56	0.40	22.31	9.73	3.16	7.99	I
	2						10.4	15.66	0.49	34.07	10.67	2.81	7.12	J
	3						10.8	13.56	0.48	51.29	10.67	3.40	8.61	K
	4						10.0	10.90	0.47	44.19	12.87	4.29	10.86	M
	5						10.6	10.56	0.42	46.57	12.77	4.26	10.78	I
	6						11.3	15.66	0.68	53.69	15.33	3.33	8.44	J
DH240-h _e 60	1	57	240	60	0.25	509.82	10.4	10.56	0.46	11.67	12.77	4.26	8.35	I
	2						10.1	10.56	0.50	49.19	10.73	2.84	5.78	I**
	3						9.0	13.56	0.42	47.75	15.03	4.94	9.70	K
	4						10.0	10.90	0.42	30.74	17.10	5.57	10.92	M
	5						10.8	10.56	0.42	45.91	15.37	5.12	10.05	I**
	6						11.1	15.66	0.56	60.70	16.57	5.52	10.83	J
DH240-h _e 80	1	57	240	80	0.33	624.40	8.6	13.56	0.41	32.76	21.73	7.24	11.60	K*
	2						10.0	10.90	0.48	78.72	19.43	5.57	8.92	M
	3						10.4	13.56	0.37	26.39	16.53	5.20	8.33	K
	4						9.2	13.56	0.47	62.45	22.40	7.47	11.96	K*
	5						10.8	13.56	0.43	32.94	22.43	7.48	11.98	K
	6						11.1	10.90	0.45	67.25	25.37	3.99	6.39	M
DH300-h _e 37.5	1	57	300	37.5	0.13	373.15	8.5	12.98	0.49	49.17	11.17	3.72	9.98	N
	2						8.9	12.66	0.47	16.17	7.43	2.48	6.64	O
	3						8.8	13.01	0.51	12.90	9.53	3.18	8.52	P
	4						9.2	14.49	0.45	32.61	9.83	3.21	8.61	Q
	5						7.9	12.98	0.42	11.60	10.80	3.60	9.65	N
	6						8.2	12.66	0.45	33.14	12.70	4.00	10.72	O
DH300-h _e 50	1	57	300	50	0.17	441.52	10.1	12.98	0.45	42.70	14.93	4.98	11.27	N
	2						9.0	12.66	0.39	18.25	14.07	4.69	10.62	O
	3						10.8	13.01	0.52	14.21	9.33	3.11	7.05	P
	4						9.9	14.49	0.45	43.58	15.00	5.00	11.32	Q
	5						9.7	12.98	0.43	28.58	17.07	4.32	9.79	N
	6						8.4	12.66	0.44	52.69	14.97	4.63	10.49	O
DH300-h _e 75	1	57	300	75	0.25	570.00	9.6	12.98	0.52	75.79	23.50	7.03	12.34	N
	2						10.3	12.66	0.41	24.60	11.40	3.69	6.47	O*
	3						10.9	13.01	0.49	19.87	30.13	10.04	17.62	P
	4						21.9	14.49	0.41	39.23	19.97	6.66	11.68	Q
	5						9.7	12.98	0.43	28.58	22.10	6.60	11.58	N*
	6						9.8	12.66	0.44	52.69	16.77	5.59	9.81	O
DH300-h _e 100	1	57	300	100	0.33	698.10	9.7	13.01	0.52	45.69	23.00	7.67	10.98	P*
	2						12.1	13.01	0.53	31.90	22.67	7.56	10.82	P
	3						9.2	13.01	0.53	28.13	26.73	8.91	12.76	P
	4						11.6	12.66	0.39	22.21	19.73	6.58	9.42	O*
	5						10.0	12.98	0.50	59.01	25.80	7.90	11.32	N
	6						10.6	12.66	0.47	54.63	30.00	10.00	14.32	O

凡例: MOE: ヤング係数、C_r: 割裂破壊係数

注: *: 加力失敗による代替試験体、**: 切り出しの失敗による代替試験体

表 3.3.2 スギ試験結果情報

Kiln-dried <i>Pseudotsuga menziesii</i> , E110-SD20														
Types	No.	w (mm)	H (mm)	h _e (mm)	h _e /H	w $\sqrt{\frac{h_e}{1-h_e/H}}$	moisture content (%)	MOE (kN/mm ²)	specific gravity	ring angle (DEG)	P: load (kN)	splitting strength V _f =P/3 (kN)	C _f =V _f /w $\sqrt{h_e/(1-h_e/H)}$ (N/mm ^{1.5})	lumber No.
DH120-h _e 15	1	57	120	15	0.13	236.00	8.4	12.97	0.51	37.50	7.10	2.37	10.03	G
	2						8.4	15.61	0.46	50.19	6.43	1.86	7.86	H
	3						9.6	14.31	0.46	78.74	5.37	1.79	7.58	F
	4						9.5	12.38	0.41	28.47	6.47	2.16	9.14	E
	5						9.9	12.97	0.50	85.80	4.27	1.38	5.84	G
	6						9.7	15.61	0.50	74.95	3.53	1.18	4.99	H
DH120-h _e 20	1	57	120	20	0.17	279.24	9.0	12.97	0.50	67.67	8.30	2.77	9.91	G
	2						9.4	15.61	0.52	87.80	6.00	2.00	7.16	H
	3						9.1	14.31	0.45	86.68	5.27	1.76	6.29	F
	4						8.9	12.38	0.42	38.60	8.20	2.73	9.79	E
	5						9.2	12.97	0.51	75.59	7.60	2.53	9.07	G
	6						8.5	15.61	0.51	56.64	6.00	1.61	5.77	H
DH120-h _e 30	1	57	120	30	0.25	360.50	8.8	12.97	0.46	37.74	10.00	3.33	9.25	G
	2						9.9	15.61	0.50	87.09	10.43	3.34	9.28	H
	3						10.4	14.31	0.42	45.81	11.53	3.84	10.66	F
	4						8.5	12.38	0.47	38.18	11.43	3.81	10.57	E
	5						9.7	14.31	0.45	86.23	9.17	3.01	8.35	F
	6						9.0	12.38	0.46	60.87	11.03	3.68	10.20	E
DH120-h _e 40	1	57	120	40	0.33	441.52	9.2	14.31	0.48	79.62	12.00	3.58	8.10	F
	2						9.6	12.38	0.43	58.80	13.50	4.50	10.19	E
	3						10.1	12.97	0.53	64.25	16.67	4.83	10.95	G
	4						10.5	15.61	0.50	57.79	14.07	4.69	10.62	H
	5						9.4	14.31	0.41	51.57	15.93	5.31	12.03	F
	6						8.4	12.38	0.44	58.68	3.88	3.88	8.78	F
DH180-h _e 22.5	1	57	180	22.5	0.13	289.04	8.8	12.70	0.52	19.02	7.47	2.49	8.61	A
	2						9.0	12.07	0.42	39.02	7.00	2.26	7.80	B
	3						9.6	12.95	0.36	24.55	8.03	2.68	9.26	C
	4						9.8	18.54	0.57	77.97	7.73	2.58	8.92	D
	5						9.4	12.70	0.46	31.66	9.03	3.01	10.42	A
	6						9.0	12.07	0.46	45.00	8.43	2.81	9.73	B
DH180-h _e 30	1	57	180	30	0.17	342.00	9.6	12.70	0.45	15.46	9.77	3.23	9.45	A
	2						10.5	12.07	0.52	20.14	10.23	3.36	9.81	B
	3						10.2	12.95	0.35	30.74	12.23	4.08	11.92	C
	4						9.7	18.54	0.54	19.03	11.83	3.94	11.53	D
	5						10.5	12.70	0.69	29.87	10.40	2.97	8.68	A
	6						9.6	12.07	0.57	48.78	10.63	3.53	10.33	B
DH180-h _e 45	1	57	180	45	0.25	441.52	9.4	12.70	0.52	17.71	14.73	4.91	11.12	A
	2						9.6	12.70	0.50	20.00	16.67	4.06	9.19	A*
	3						10.0	12.95	0.34	30.54	14.27	4.76	10.77	C
	4						9.8	18.54	0.54	32.11	18.53	6.18	13.99	D
	5						10.4	12.70	0.52	53.07	15.00	4.47	10.12	A**
	6						9.1	12.07	0.48	65.48	15.00	4.82	10.92	B
DH180-h _e 60	1	57	180	60	0.33	540.75	8.7	12.95	0.40	44.27	24.93	6.46	11.94	C**
	2						10.0	18.54	0.51	19.81	16.50	4.27	7.89	D*
	3						10.1	12.95	0.42	50.97	20.93	4.48	8.28	C
	4						10.0	18.54	0.47	55.57	21.23	5.96	11.01	D
	5						10.1	12.95	0.47	40.52	15.53	5.18	9.58	C
	6						9.5	18.54	0.39	10.35	18.93	6.31	11.67	D
DH240-h _e 30	1	57	240	30	0.13	333.76	8.3	10.56	0.43	35.28	6.37	2.06	6.16	I
	2						9.5	15.66	0.51	16.80	8.87	2.07	6.19	J
	3						9.8	13.56	0.49	52.22	9.47	3.16	9.45	K
	4						9.8	10.90	0.43	31.07	8.77	2.92	8.75	M
	5						9.9	10.56	0.44	39.35	12.07	4.02	12.05	I
	6						10.6	15.66	0.67	43.49	13.77	4.59	13.75	J
DH240-h _e 40	1	57	240	40	0.17	394.91	8.5	10.56	0.40	22.31	9.73	3.16	7.99	I
	2						10.4	15.66	0.49	34.07	10.67	2.81	7.12	J
	3						10.8	13.56	0.48	51.29	10.67	3.40	8.61	K
	4						10.0	10.90	0.47	44.19	12.87	4.29	10.86	M
	5						10.6	10.56	0.42	46.57	12.77	4.26	10.78	I
	6						11.3	15.66	0.68	53.69	15.33	3.33	8.44	J
DH240-h _e 60	1	57	240	60	0.25	509.82	10.4	10.56	0.46	11.67	12.77	4.26	8.35	I
	2						10.1	10.56	0.50	49.19	10.73	2.94	5.78	I**
	3						9.0	13.56	0.42	47.75	15.03	4.94	9.70	K
	4						10.0	10.90	0.42	30.74	17.10	5.57	10.92	M
	5						10.8	10.56	0.42	45.91	15.37	5.12	10.05	I**
	6						11.1	15.66	0.56	60.70	16.57	5.52	10.83	J
DH240-h _e 80	1	57	240	80	0.33	624.40	8.6	13.56	0.41	32.76	21.73	7.24	11.60	K*
	2						10.0	10.90	0.48	78.72	19.43	5.57	8.92	M
	3						10.4	13.56	0.37	26.39	16.53	5.20	8.33	K
	4						9.2	13.56	0.47	62.45	22.40	7.47	11.96	K*
	5						10.8	13.56	0.43	32.94	22.43	7.48	11.98	K
	6						11.1	10.90	0.45	67.25	25.37	3.99	6.39	M
DH300-h _e 37.5	1	57	300	37.5	0.13	373.15	8.5	12.98	0.49	49.17	11.17	3.72	9.98	N
	2						8.9	12.66	0.47	16.17	7.43	2.48	6.64	O
	3						8.8	13.01	0.51	12.90	9.53	3.18	8.52	P
	4						8.2	14.49	0.45	32.61	9.83	3.21	8.61	Q
	5						7.9	12.98	0.42	11.60	10.80	3.60	9.65	N
	6						8.2	12.66	0.45	33.14	12.70	4.00	10.72	O
DH300-h _e 50	1	57	300	50	0.17	441.52	10.1	12.98	0.45	42.70	14.93	4.98	11.27	N
	2						9.0	12.66	0.39	18.25	14.07	4.69	10.62	O
	3						10.8	13.01	0.52	14.21	9.33	3.11	7.05	P
	4						9.9	14.49	0.45	43.58	15.00	5.00	11.32	Q
	5						9.7	12.98	0.43	28.58	17.07	4.32	9.79	N
	6						8.4	12.66	0.44	52.69	14.97	4.63	10.49	O
DH300-h _e 75	1	57	300	75	0.25	570.00	9.6	12.98	0.52	75.79	23.50	7.03	12.34	N
	2						10.3	12.66	0.41	24.60	11.40	3.69	6.47	O*
	3						10.9	13.01	0.49	19.87	30.13	10.04	17.62	P
	4						21.9	14.49	0.41	39.23	19.97	6.66	11.68	Q
	5						9.7	12.98	0.43	28.58	22.10	6.60	11.58	N*
	6						9.8	12.66	0.44	52.69	16.77	5.59	9.81	O
DH300-h _e 100	1	57	300	100	0.33	698.10	9.7	13.01	0.52	45.69	23.00	7.67	10.98	P*
	2						12.1	13.01	0.53	31.90	22.67	7.56	10.82	P
	3						9.2	13.01	0.53	28.13	26.73	8.91	12.76	P
	4						11.6	12.66	0.39	22.21	19.73	6.58	9.42	O*
	5						10.0	12.98	0.50	59.01	25.80	7.90	11.32	N
	6						10.6	12.66	0.47	54.63	30.00	10.00	14.32	O

凡例: MOE: ヤング係数、C_f: 割裂破壊係数

表 3.3.3 バイマツの平均値、変動係数、信頼水準 75%の時の 95%下限許容限界値

No.	MOE (kN/mm ²)	P: load (kN)	splitting strength (kN)	h_e/H	$w \sqrt{\frac{h_e}{1-\frac{h_e}{H}}}$	C_f (N/mm ^{1.5})	specific gravity	ring angle (DEG)
Ave. DH120- h_e 15	13.97	5.53	1.79	0.13	236.00	7.57	0.47	59.28
Ave. DH120- h_e 20	13.97	6.89	2.23	0.17	279.24	8.00	0.49	68.83
Ave. DH120- h_e 30	13.66	10.60	3.50	0.25	360.50	9.72	0.46	59.32
Ave. DH120- h_e 40	13.66	12.67	4.46	0.33	441.52	10.11	0.47	61.79
Ave. DH120-all	13.82	8.92	3.00	0.22	329.32	8.85	0.47	62.30
S.D. DH120-all	1.27	3.76	1.17	0.09	90.88	1.84	0.04	18.70
C.V. DH120-all	0.09	0.42	0.39	0.42	0.28	0.21	0.08	0.30
75% confidence level, the lower 5% value 120-all			0.77			5.36		
Ave. DH180- h_e 22.5	13.51	7.95	2.64	0.13	289.04	9.12	0.47	39.54
Ave. DH180- h_e 30	13.51	10.85	3.52	0.17	342.00	10.29	0.52	27.34
Ave. DH180- h_e 45	13.61	15.70	4.86	0.25	441.52	11.02	0.48	36.48
Ave. DH180- h_e 60	15.74	19.68	5.44	0.33	540.75	10.06	0.44	36.91
Ave. DH180-all	14.09	13.54	4.12	0.22	403.33	10.12	0.48	35.07
S.D. DH180-all	2.64	4.95	1.27	0.09	111.30	1.49	0.08	17.28
C.V. DH 180-all	0.19	0.37	0.31	0.42	0.28	0.15	0.17	0.49
75% confidence level, the lower 5% value 180-all			1.69			7.29		
Ave. DH240- h_e 30	12.82	9.88	3.14	0.13	333.76	9.39	0.49	36.37
Ave. DH240- h_e 40	12.82	12.01	3.54	0.17	394.91	8.97	0.49	42.02
Ave. DH240- h_e 60	11.97	14.59	4.73	0.25	509.82	9.27	0.46	40.99
Ave. DH240- h_e 80	12.67	21.32	6.16	0.33	624.40	9.86	0.44	50.09
Ave. DH240-all	12.57	14.45	4.39	0.22	465.72	9.37	0.47	42.37
S.D. DH240-all	2.05	5.00	1.56	0.09	128.52	2.16	0.07	16.05
C.V. DH240-all	0.16	0.35	0.35	0.42	0.28	0.23	0.16	0.38
75% confidence level, the lower 5% value 240-all			1.43			5.26		
Ave. DH300- h_e 37.5	13.13	10.24	3.36	0.13	373.15	9.02	0.46	25.93
Ave. DH300- h_e 50	13.13	14.23	4.46	0.17	441.52	10.09	0.45	33.34
Ave. DH300- h_e 75	13.13	20.64	6.60	0.25	570.00	11.58	0.45	40.13
Ave. DH300- h_e 100	12.89	24.66	8.10	0.33	698.10	11.61	0.49	40.26
Ave. DH300-all	13.07	17.44	5.63	0.22	520.69	10.57	0.46	34.91
S.D. DH300-all	0.57	6.80	2.23	0.09	143.69	2.40	0.04	16.77
C.V. DH300-all	0.04	0.39	0.40	0.42	0.28	0.23	0.10	0.48
75% confidence level, the lower 5% value 300-all			1.40			6.01		
Ave. all	13.39	13.59	4.28	0.22	429.77	9.73	0.47	43.66
S.D. all	2.62	4.81	1.28	0.09	97.37	1.79	0.07	15.13
C.V. all	0.20	0.35	0.30	0.42	0.23	0.18	0.16	0.35
75% confidence level, the lower 5% value all			2.03			6.32		

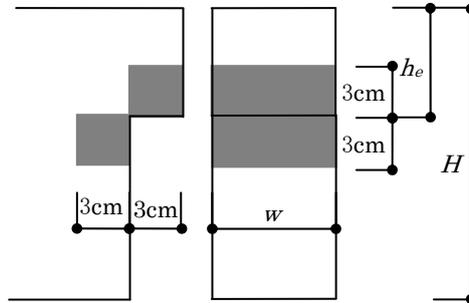
凡例: MOE:ヤング係数、 C_f :割裂破壊係数、Ave.:平均値、S.D.:標準偏差、C.V.:変動係数

表 3.3.4 スギの平均値、変動係数、信頼水準 75%の時の 95%下限許容限界値

No.	MOE (kN/mm ²)	P: load (kN)	splitting strength (kN)	h_e/H	$w \sqrt{\frac{h_e}{1-\frac{h_e}{H}}}$	C_f (N/mm ^{1.5})	specific gravity	ring angle (DEG)
Ave. CH120- h_e 15	7.50	4.08	1.36	0.13	248.42	5.48	0.30	63.44
Ave. CH120- h_e 20	7.50	5.49	1.83	0.17	293.94	6.23	0.31	66.68
Ave. CH120- h_e 30	7.50	7.39	2.46	0.25	379.47	6.49	0.32	68.18
Ave. CH120- h_e 40	7.50	9.92	3.31	0.33	464.76	7.11	0.33	69.40
Ave. CH120-all	7.50	6.72	2.24	0.22	346.65	6.33	0.31	66.93
S.D. CH120-all	0.80	2.29	0.76	0.09	95.66	0.78	0.02	8.36
C.V. CH120-all	0.11	0.34	0.34	0.42	0.28	0.12	0.07	0.12
75% confidence level, the lower 5% value 120-all			0.79			4.84		
Ave. CH180- h_e 22.5	7.76	5.92	1.97	0.13	304.26	6.49	0.31	43.60
Ave. CH180- h_e 30	7.76	7.85	2.62	0.17	360.00	7.27	0.31	46.56
Ave. CH180- h_e 45	7.76	10.63	3.54	0.25	464.76	7.63	0.31	52.13
Ave. CH180- h_e 60	7.76	13.26	4.42	0.33	569.21	7.77	0.31	55.28
Ave. CH180-all	7.76	9.42	3.14	0.22	424.56	7.29	0.31	49.39
S.D. CH180-all	0.92	3.09	1.03	0.09	117.16	1.04	0.03	16.26
C.V. CH 180-all	0.12	0.33	0.33	0.42	0.28	0.14	0.09	0.33
75% confidence level, the lower 5% value 180-all			1.18			5.31		
Ave. CH240- h_e 30	7.21	8.36	2.79	0.13	351.32	7.93	0.31	30.78
Ave. CH240- h_e 40	7.21	10.56	3.52	0.17	415.69	8.46	0.32	32.92
Ave. CH240- h_e 60	7.21	16.81	5.60	0.25	536.66	10.44	0.30	35.64
Ave. CH240- h_e 80	7.21	22.65	7.55	0.33	657.27	11.49	0.32	39.87
Ave. CH240-all	7.21	14.59	4.86	0.22	490.23	9.58	0.31	34.80
S.D. CH240-all	0.75	6.30	2.10	0.09	135.29	2.13	0.03	11.17
C.V. CH240-all	0.10	0.43	0.43	0.42	0.28	0.22	0.09	0.32
75% confidence level, the lower 5% value 240-all			0.87			5.53		
Ave. CH300- h_e 37.5	7.47	9.61	3.20	0.13	392.79	8.16	0.31	22.49
Ave. CH300- h_e 50	7.47	13.64	4.55	0.17	464.76	9.78	0.35	23.98
Ave. CH300- h_e 75	7.47	22.61	7.54	0.25	600.00	12.56	0.33	33.80
Ave. CH300- h_e 100	7.47	26.31	8.77	0.33	734.85	11.93	0.37	37.20
Ave. CH300-all	7.47	18.04	6.01	0.22	548.10	10.61	0.34	29.37
S.D. CH300-all	0.63	7.72	2.57	0.09	151.26	2.66	0.04	9.68
C.V. CH300-all	0.08	0.43	0.43	0.42	0.28	0.25	0.13	0.33
75% confidence level, the lower 5% value 300-all			1.12			5.54		
Ave. all	7.48	12.19	4.06	0.22	452.38	8.45	0.32	45.12
S.D. all	0.90	2.69	0.90	0.08	137.20	0.98	0.03	17.42
C.V. all	0.12	0.22	0.22	0.38	0.30	0.12	0.09	0.39
75% confidence level, the lower 5% value all			2.48			6.58		

凡例: MOE:ヤング係数、 C_f :割裂破壊係数、Ave.:平均値、S.D.:標準偏差、C.V.:変動係数

含水率と比重は、加力後、図 3.3.2 のように試験体の顎の部分から $2\text{cm} \times 2\text{cm} \times 4\text{cm}$ を切り出し、全乾法により計測した。また MOE の測定は、木取り前に元の平角材を縦振動法によって計測した。また年輪傾角は、割裂部分の直上の両端 2 箇所、接線の傾きで計測し、相加平均をとった。



H :材背(mm)

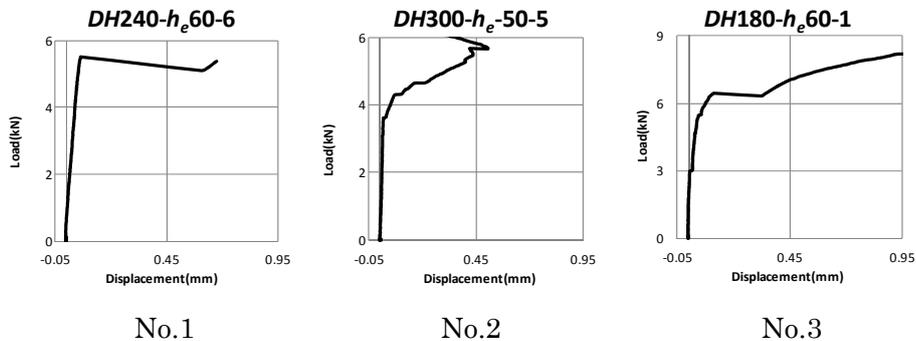
w :材幅(mm)

h_e :材天端から顎までの距離(mm)

注:グレーの部分から小試験片($2\text{cm} \times 2\text{cm} \times 4\text{cm}$) を切り出した。

図 3.3.2 小試験片の切り出し寸法

割裂耐力: V_f は、目視によって割裂が発生した時の荷重とした。荷重変形特性としては、概ね、図 3.3.3-No.1 のように割裂後、耐力は低下したが、図 3.3.3-No.2 のように一部耐力を下げないまま緩やかに耐力を上昇させるものや、図 3.3.3-No.3 のように割裂により、一旦、耐力を下げながらも再度耐力を回復するものもあった。



注: No.1;割裂後、荷重低下、No.2;割裂後、荷重が次第に上昇、No.3;割裂後、荷重が一旦低下した後、上昇

図 3.3.3 荷重変形特性

尚、表 3.3.3、表 3.3.4 より、割裂耐力の平均値は同じ寸法のものについては概してスギよりベイマツのほうが高かったが、スギの $CH240-h_e60$ 、 $CH240-h_e80$ 、 $CH300-h_e50$ 、 $CH300-h_e75$ 、 $CH300-h_e100$ については、ベイマツの同型よりも高かった。



Pseudotsuga menziesii DH240- h_e 40-2

Cryptomeria Japonica CH300- h_e 75-3

注:上の写真は試験体の側面、下の写真は試験体の木口面を撮影したものである。

写真 3.3.1 割裂破壊した試験体

3.3.2 割裂耐力推定式と寸法パラメータとの相関について

切り欠きの存在による割裂耐力の低減を表現するものとして、以下の①～⑥の寸法パラメータを仮定し、割裂耐力: V_f との相関について検証した。この時、寸法パラメータである割裂位置における縁距離: h_e 、材背: H 、及び材幅: w が限りなく 0 に近づくと V_f も 0 になると考えられることから、近似式の切片は 0 であるとして検討を行った。

$$\textcircled{1} h_e, \textcircled{2} h_e/H, \textcircled{3} w\sqrt{h_e/(1-h_e/H)}, \textcircled{4} h_e(h_e/H)^x, \textcircled{5} h_e\{h_e/(H-h_e)\}^x, \textcircled{6} w\{h_e/(1-h_e/H)\}^x$$

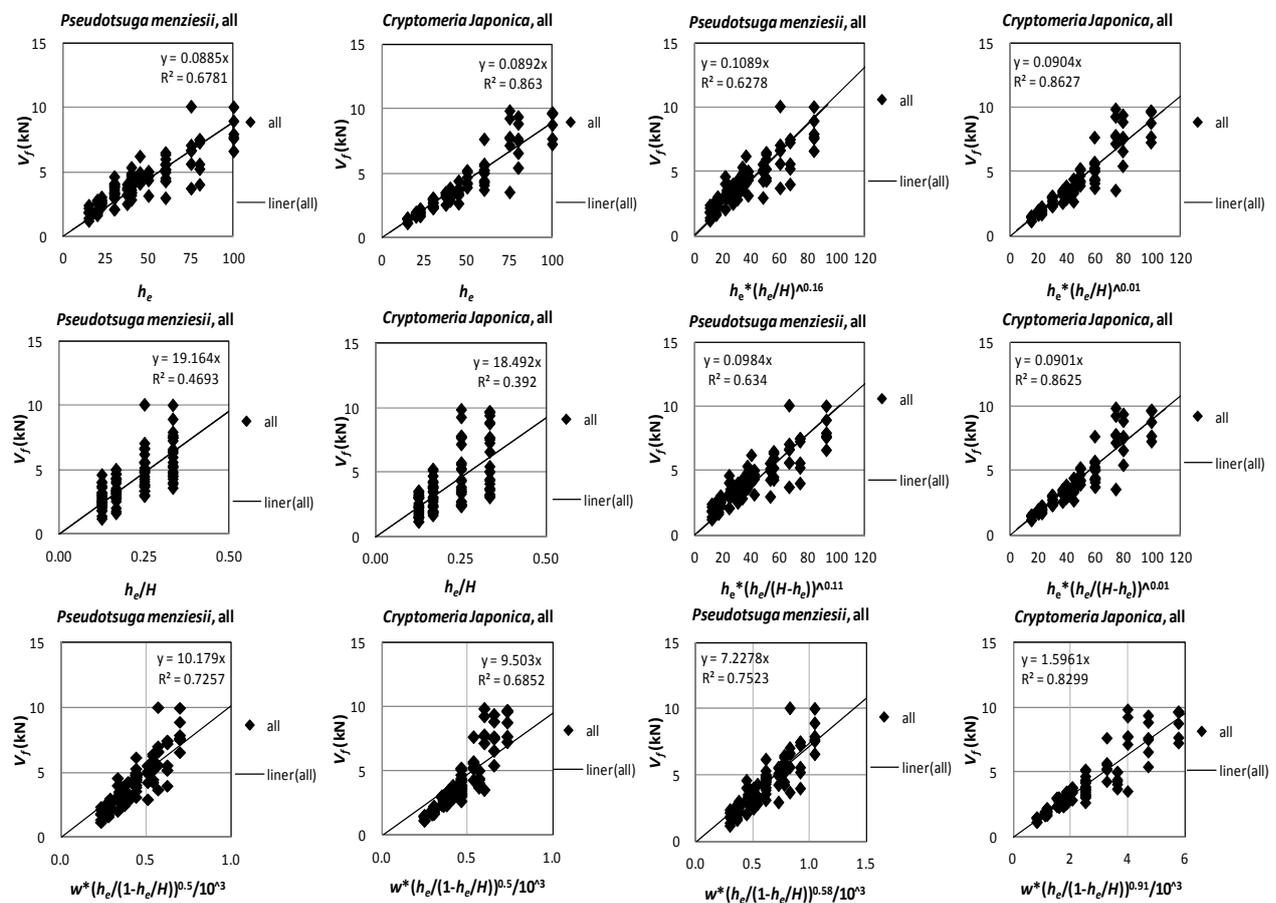
まず①、②は、既知の寸法パラメータの変化について、 V_f がどのように分布するかを検討したものである。③については、前出のグスタフソンが紹介している(3.3.1)式の $\beta=0$ の時の寸法パラメータである。また④、⑤は、②、③の寸法パラメータを試行錯誤する中で変化させたものである。そして、⑥は、③の指数部分の 0.5 を x としたものである。④、⑤、⑥の指数 x については、 x を 0.01～3 まで 0.01 刻みで変化させた時の相関を調べ、相関係数が最も高くなる時の x を求めて検討した。

図 3.3.4 にベイマツとスギについての V_f と①～⑥との相関関係をグラフで示す。その結果、両樹種において②は、相関係数が 0.5 以下と他のものに比べ相関関係が低かった。またスギの④、⑤は、 $x=0$ の時、最も相関関係が高くなることが判った。その結果、これらのケースでは①の h_e と同じものであることになった。

これらを踏まえて①～⑥の寸法パラメータについて相関係数を比較するとベイマツの場合、⑥(0.75)、③(0.73)、①(0.68)の順に相関関係が高く、特に⑥と③は相関係数が 0.7 以上であった。またスギの場合、①(0.86)、⑥(0.83)、③(0.69)の順で相関関係が高く、①、⑥が相関係数 0.8 以上であった。この時、()内の数値

は相関係数: R^2 を示している。尚、⑥の指数 x は、ベイマツの場合 0.58 のときが最も相関係数が高く、スギの場合 0.91 のときが最も相関係数が高くなった。

次に寸法パラメータ毎にみると、①、④、⑤のベイマツ、スギともに、寸法パラメータの中央値を超えると回帰直線を挟んでばらつきが大きくなる傾向がみられた。②では、ベイマツ、スギともに相関係数が 0.5 未満となり、相関関係が低下した。③では、ベイマツ、スギともに寸法パラメータが 0.5 までは回帰直線より下側に分布がみられ、寸法パラメータが 0.5 を超えると回帰直線より上側に分布がみられる傾向となった。⑥のベイマツは、寸法パラメータの指数部分が $x=0.58$ と③の $x=0.5$ と大きく異なることから分布の傾向は変化が無かった。一方、スギの場合は③が二次曲線的な分布であったものが、③の $x=0.5$ が⑥の $x=0.91$ になることによって一回帰直線を挟んで均等な分布となったが、寸法パラメータの中央値より上側では、分布にばらつきが見られた。



注: 直線は線形近似曲線を示す。

図 3.3.4 木口面における摩擦力による割裂耐力と寸法パラメータの相関

3.3.3 割裂破壊係数と比重・年輪傾角の相関について

本章 3.3.2 において割裂耐力: V_f と寸法パラメータとの相関について調べたが、その結果ベイマツ・スギともに V_f は③ $w\sqrt{h_e/(1-h_e/H)}$ との相関が比較的高いことが検証されたため、 V_f を $w\sqrt{h_e/(1-h_e/H)}$ で除した値を材料物性に依存する割裂破壊係数: C_f と定義し、ここでは C_f と比重、及び年輪傾角との関係を調べた。なお、図 3.3.4 の③の回帰直線の傾きから求めた樹種別の平均 C_f は、ベイマツで $C_f = 10.2 \text{ N/mm}^{1.5}$ 、スギで $C_f = 9.5 \text{ N/mm}^{1.5}$ であった。

3.3.3.1 割裂破壊係数と比重の相関について

図 3.3.5、図 3.3.6 は、ベイマツとスギの全試験体の C_f と比重の関係を示したものである。そこで分散分析による F 検定を行った結果、いずれも C_f と比重の効果の間には有意差は認められなかった。また、いずれの樹種も試験結果の分布から相関係数は 0.14 未満と低かった。

岩崎らは報告⁸⁾では密度の異なる樹種間において、密度と割裂破壊パラメータの関係から下限 5% 値を求め、割裂破壊パラメータ: C_f を密度との関係式で設計値を提案し、樹種の違いを明らかにしたグラフを描いている。本研究では、ベイマツとスギの同一樹種内の比重による効果において有意差が認められないことを明らかにした。そこで岩崎らの報告⁸⁾に基づいた日本建築学会の木質構造設計規準・同解説⁹⁾では、割裂破壊係数: C_f を純粋な木材の密度との関係式とグラフで示し、樹種の違いを明らかにしない単一の凡例で描いている。そのため誤解を招く恐れがあり、よって同図は樹種別のプロットに改めることが望ましいと思われる。

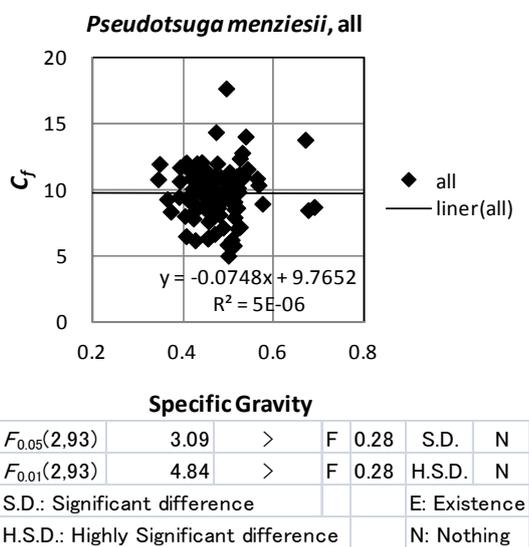


図3.3.5 ベイマツ全試験体の割裂破壊係数: C_f と比重の相関

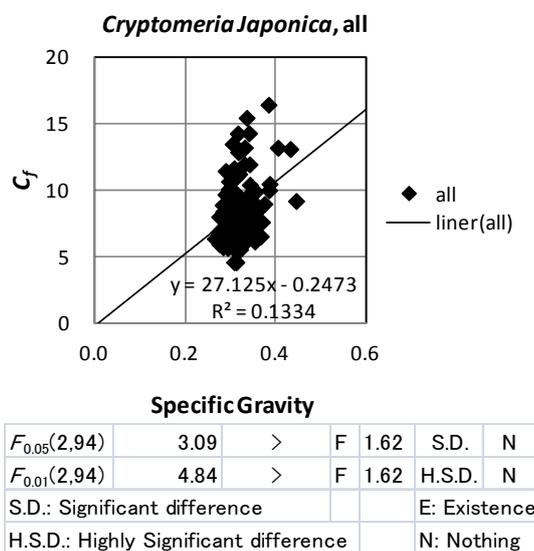


図3.3.6 スギ全試験体の割裂破壊係数: C_f と比重の相関

3.3.3.2 割裂破壊係数と年輪傾角の相関について

図 3.3.7、図 3.3.8 はベイマツとスギの全試験体の割裂破壊係数： C_f と年輪傾角の関係を示したものである。そこで C_f と比重の関係と同様に分散分析による F 検定を行った結果、年輪傾角と C_f の効果の間には、ベイマツでは有意水準 5%で有意、スギでは有意水準 1%で有意であった。そしていずれも年輪傾角が割裂面に対して立ってくると C_f はやや小さくなる傾向を示した。しかし、いずれの樹種も試験結果の分布から相関係数は 0.12 未満と低かった。

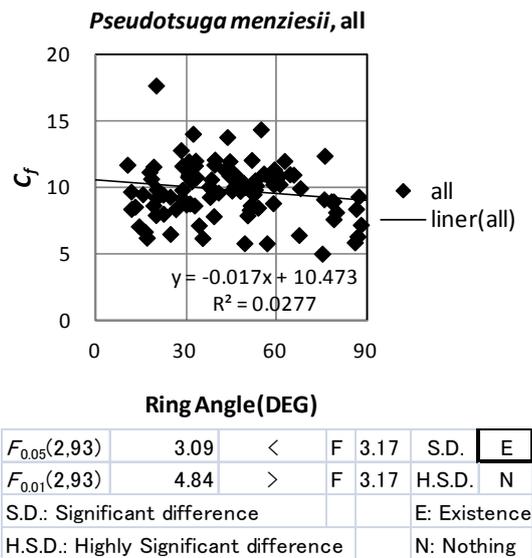


図3.3.7 ベイマツ全試験体の割裂破壊係数: C_f と年輪傾角の相関

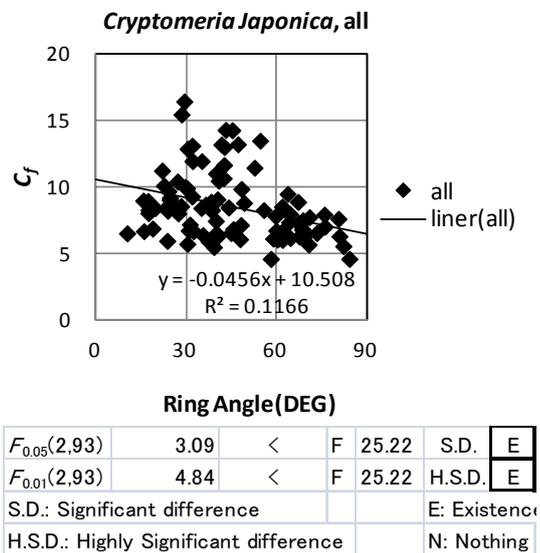


図3.3.8 スギ全試験体の割裂破壊係数: C_f と年輪傾角の相関

3.4 まとめ

本章では、追掛継の胴付面の摩擦に伴い発生する割裂耐力を予測することを目的として、縁距離： h_e の位置で割裂が生じるように顎を設けた上で試験体の顎部分の側面に木材を接着し、割裂位置より上側の両側面に一様の上向きの応力を与える加力方法によって割裂試験を行った。試験体の樹種はベイマツとスギの2種類とし、試験体の寸法パラメータは、材背： H を120、180、240、300mmの4種類とし、 h_d/H を1/8、1/6、1/4、1/3の4種類とした計16種類に設定した。試験の結果、割裂耐力： V_f と寸法パラメータ：① h_e 、② h_d/H 、③ $w\sqrt{h_e/(1-h_e/H)}$ 、④ $h_e(h_e/H)^x$ 、⑤ $h_e\{h_e/(H-h_e)\}^x$ 、⑥ $w\{h_e/(1-h_e/H)\}^x$ との相関関係を $1/8 \leq h_d/H \leq 1/3$ の範囲で検討し、摩擦による割裂破壊係数： C_f と比重、年輪傾角との関係についても検証を行った。その結果、以下の知見を得た。

1. ベイマツの場合、 V_f と寸法パラメータの内、相関係数の比較的高いものは⑥(0.75)、③(0.73)、①(0.68)、スギに関しては①(0.86)、⑥(0.83)、③(0.69)であった。()内の数値は、相関係数 R^2 を示す。⑥の指数 x についてはベイマツが $x=0.58$ の時最も相関係数が高くなり、スギでは $x=0.91$ の時最も相関係数が高くなった。その結果ベイマツ・スギともに今回の実験条件下における割裂耐力： V_f についても、 $w\sqrt{h_e/(1-h_e/H)}$ との比例関係でとらえることが妥当であることが示された。
2. V_f を $w\sqrt{h_e/(1-h_e/H)}$ で除した値を材料物性に依存する割裂破壊係数： C_f と定義し、回帰直線の傾きから求めた樹種別の平均 C_f は、ベイマツで $C_f=10.2 \text{ N/mm}^{1.5}$ 、スギで $C_f=9.5 \text{ N/mm}^{1.5}$ であった。
3. スギの $h_e(h_e/H)^x$ 、 $h_e\{h_e/(H-h_e)\}^x$ については、 x を変化させ $x=0.01$ とほぼ0に近い時、相関係数が最も高くなり、その結果、同パラメータは h_e と等しくなった。
4. C_f と比重の効果について、両樹種とも有意差は認められなかった。よって、同じ樹種内においては、木質構造設計規準・同解説に掲載されている比重と C_f との関係式(602.1.4)⁹⁾の適用性は無いものと思われる。
5. C_f と年輪傾角との効果については、両樹種ともに有意差が認められ、割裂面に対して年輪傾角が立ってくると C_f はやや小さくなる傾向が見られた。しかし、相関係数がベイマツで0.03、スギで0.1と低く、年輪傾角による C_f の補正の必要性は低いものと思われる。

第4章 追掛継の塑性域の回転剛性理論式

4.1 胴付の割裂位置の推定

4.2 塑性域の回転剛性評価式の提案

4.2.1 塑性域の力学モデル

4.2.2 塑性域の接合部の回転剛性評価式の誘導

4.2.3 割裂発生時の接合部の抵抗モーメント M_f の推定式の誘導

4.2.4 顎の下端が支圧強度に達した時の接合部の抵抗モーメント M_y の推定式の誘導

4.2.5 顎の下端が支圧強度に達した後の回転剛性評価式の誘導

4.3 まとめ

4.1 胴付の割裂位置の推定

追掛継の曲げ試験をするとまず胴付に割裂が生じる。よって塑性域の回転剛性を推定するには、この胴付の割裂耐力を考慮した力学モデルによって回転剛性評価式を導く必要がある。

そこで胴付に割裂が発生する位置を算定するにあたり、次の仮定をした。

- 割裂が発生するまで、胴付の圧縮応力の材背方向の分布は、中立軸からの距離に比例するものとする(平面保持仮定)。
- 胴付の反力は、繊維方向の圧縮力と木口面の摩擦力のみと考える。
- 割裂線の上側の胴付は、圧壊しないものとする。

以上より、図 4.1.1 の力学モデルを作成した。

ここでは、第 3 章 3.3 との対応を考えて V_f は、 $w\sqrt{h_e/(1-h_e/H)}$ との関係に基づいてこの先の検討を進めていく。すると 4.1.1 式のように木口面同士が摩擦応力により、割裂が片側のみに生じる場合の割裂耐力： V_f が求められる。同式の $w\sqrt{h_e/(1-h_e/H)}$ は、日本建築学会、木質構造基礎理論で切り欠きを有する梁の割裂耐力算定式¹⁾として提案されている式の $\beta=0$ の時のパラメータである。

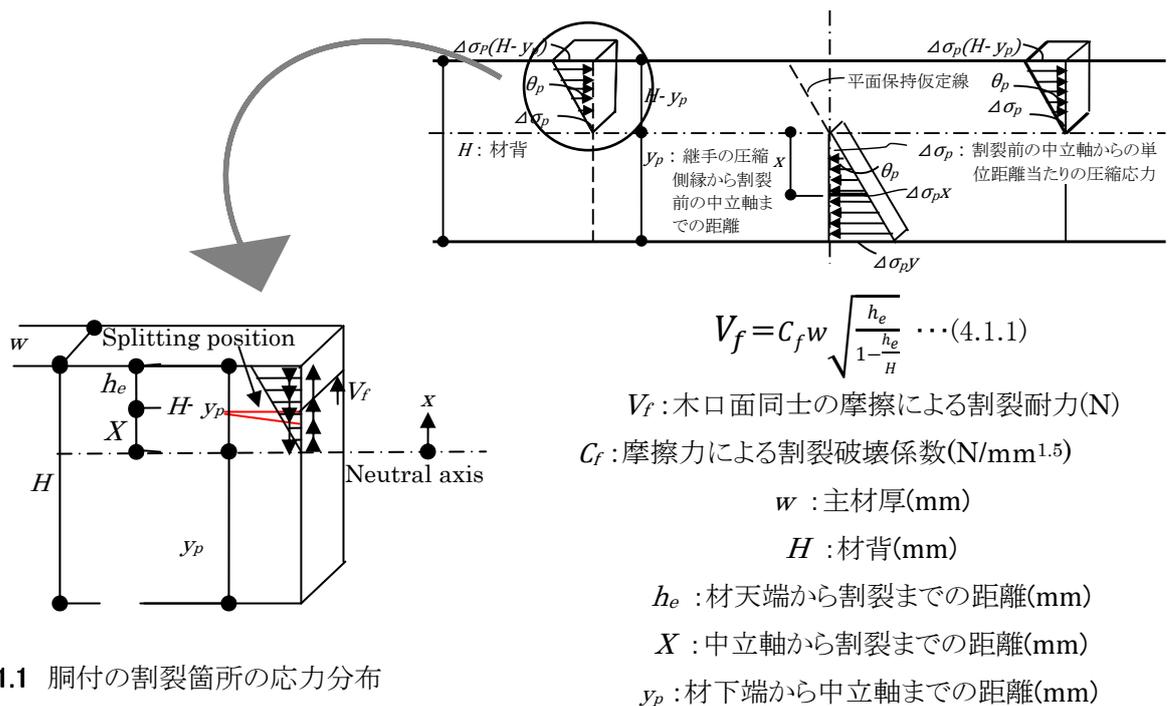


図 4.1.1 胴付の割裂箇所の応力分布

追掛継の場合、図 2.2.3、図 2.2.4 の胴付の摩擦力： $\frac{1}{2}\mu N_U$ によって、胴付に割裂が発生する。この時、図 4.1.1 のように中立軸から X の位置に割裂が生じるものとして、 X より上側部分を持ち上げようとする力 $V(X)$ は、

$$V(x) = \int_x^{H-y_p} \Delta\sigma_f \left(\frac{W}{2} - g \right) \mu x dx$$

$$V(X) = \frac{1}{2} \Delta\sigma_f \mu \left(\frac{W}{2} - g \right) \left\{ (H - y_p)^2 - X^2 \right\} \dots (4.1.2)$$

X の位置に割裂が生じる場合の割裂耐力: V_f は、

$$V_f(X) = C_f w \sqrt{\frac{H - y_p - X}{1 - \frac{H - y_p - X}{H}}} = C_f w \sqrt{\frac{H(H - y_p - X)}{y_p + X}}$$

これらより $V(X) = V_f(X)$ であることから、最小仕事の原理より、 $\Delta\sigma_f$ が最小になる時の X が割裂の位置となる。

$$\frac{1}{2} \Delta\sigma_f \left(\frac{W}{2} - g \right) \mu \{ (H - y_p)^2 - X^2 \} = C_f w \sqrt{\frac{H(H - y_p - X)}{y_p + X}}$$

$$\Delta\sigma_f(X) = \frac{2C_f w}{\left(\frac{W}{2} - g\right)\mu} \times \frac{\sqrt{H(H - y_p - X)}}{\{(H - y_p)^2 - X^2\}\sqrt{y_p + X}} \dots (4.1.3)$$

これより、 $\frac{\Delta\sigma_f(X)}{dX} = 0$ の解を求める。

$$\Delta f(X) = \frac{\sqrt{H - y_p - X}}{\{(H - y_p)^2 - X^2\}\sqrt{y_p + X}}$$

とすると、

$$\Delta f(X) = \frac{\sqrt{(H - y_p - X)}}{(H - y_p - X)(H - y_p + X)\sqrt{y_p + X}}$$

$$\Delta f(X) = \frac{1}{(H - y_p + X)\sqrt{H - y_p - X}\sqrt{y_p + X}} > 0$$

そこで $\Delta f(X)$ の分母を $g(X) = (H - y_p + X)\sqrt{H - y_p - X}\sqrt{y_p + X}$ とし、これを X で微分し、最大値を求める。

$$\begin{aligned} g'(X) &= \sqrt{H - y_p - X}\sqrt{y_p + X} - \frac{(H - y_p + X)\sqrt{y_p + X}}{2\sqrt{H - y_p - X}} + \frac{(H - y_p + X)\sqrt{H - y_p - X}}{2\sqrt{y_p + X}} = 0 \\ 2\sqrt{H - y_p - X}\sqrt{y_p + X}\sqrt{H - y_p - X}\sqrt{y_p + X} - \frac{2\sqrt{H - y_p - X}\sqrt{y_p + X}(H - y_p + X)\sqrt{y_p + X}}{2\sqrt{H - y_p - X}} \\ &+ \frac{2\sqrt{H - y_p - X}\sqrt{y_p + X}(H - y_p + X)\sqrt{H - y_p - X}}{2\sqrt{y_p + X}} = 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 2(H - y_p - X)(y_p + X) - (H - y_p + X)(y_p + X) + (H - y_p + X)(H - y_p - X) &= 0 \\ 4X^2 - (H - 4y_p)X - (H - y_p)H &= 0 \end{aligned}$$

$$X = \frac{H - 4y_p \pm \sqrt{(H - 4y_p)^2 + 16H(H - y_p)}}{8}$$

X>0 より

$$X = \frac{H \left\{ \left(1 - 4\frac{y_p}{H}\right) + \sqrt{\left(1 - 4\frac{y_p}{H}\right)^2 + 16\left(1 - \frac{y_p}{H}\right)} \right\}}{8} \dots (4.1.4)$$

表 4.1.1 より、理論上の h_e/H は 0.17~0.23 であることから、材背に対して凡そ 1/6~1/4 の位置に割裂が発生するものと推定される。

表 4.1.1 試験体種別 y_p 、 X 、 h_e の理論値

Types		W	H	e	L	g	w	y_p	y_p/H	X	h_e	h_e/H	$w \sqrt{\frac{h_e}{1 - \frac{h_e}{H}}}$
Cryptomeria Japonica	CH120-e15-L300	120	120	15	303	15	45	85.2	0.71	14.9	19.9	0.17	0.22
	CH180-e15-L300	120	180	15	303	15	45	127.8	0.71	22.3	29.8	0.17	0.27
	CH240-e15-L300	120	240	15	303	15	45	170.4	0.71	29.8	39.8	0.17	0.31
	CH300-e15-L300	120	300	15	303	15	45	213.0	0.71	37.2	49.7	0.17	0.35
	CH180-e30-L300	120	180	30	303	15	45	114.1	0.63	29.9	36.0	0.20	0.30
	CH180-e45-L300	120	180	45	303	15	45	105.4	0.59	35.1	39.4	0.22	0.32
	CH180-e60-L300	120	180	60	303	15	45	99.1	0.55	39.1	41.8	0.23	0.33
	CH180-e15-L180	120	180	15	182	15	45	127.8	0.71	22.3	29.8	0.17	0.27
	CH180-e15-L450	120	180	15	455	15	45	127.8	0.71	22.3	29.8	0.17	0.27
Cryptomeria Japonica	CH120-e15-L300	120	120	15	303	15	45	85.2	0.71	14.9	19.9	0.17	0.22
	CH180-e15-L300	120	180	15	303	15	45	127.8	0.71	22.3	29.8	0.17	0.27
	CH240-e15-L300	120	240	15	303	15	45	170.4	0.71	29.8	39.8	0.17	0.31
	CH300-e15-L300	120	300	15	303	15	45	213.0	0.71	37.2	49.7	0.17	0.35
	CH180-e30-L300	120	180	30	303	15	45	114.1	0.63	29.9	36.0	0.20	0.30
	CH180-e45-L300	120	180	45	303	15	45	105.4	0.59	35.1	39.4	0.22	0.32
	CH180-e60-L300	120	180	60	303	15	45	99.1	0.55	39.1	41.8	0.23	0.33
	CH180-e15-L180	120	180	15	182	15	45	127.8	0.71	22.3	29.8	0.17	0.27
	CH180-e15-L450	120	180	15	455	15	45	127.8	0.71	22.3	29.8	0.17	0.27

W: 材幅、H: 材背、e: 顎幅、L: 継手長さ、g: 目違幅、w: 胴付幅

y_p : 割裂前の引張側縁から中立軸までの距離、X: 中立軸から割裂までの距離

h_e : 材天端から割裂までの距離

4.2 塑性域の回転剛性評価式の提案

4.2.1 塑性域の力学モデル

胴付が割裂した後から顎の下端が支圧強度に達するまでの接合部の回転剛性評価式の誘導にあたり、次の仮定をする。

- 継手ゾーン内での曲げ変形は無視する。
- 胴付の反力は繊維方向の圧縮力と木口面の摩擦力のみと考える。
- 木口面以外の摩擦力は、上木と下木の側面に生じるものが考えられるが無視をする。
- 顎の圧縮力の材背方向の分布は、平面保持仮定が成立するものとする。
- 胴付の応力分布は台形分布とする。

以上より、図 4.2.1、図 4.2.2、図 4.2.3 の力学モデルを作成した。

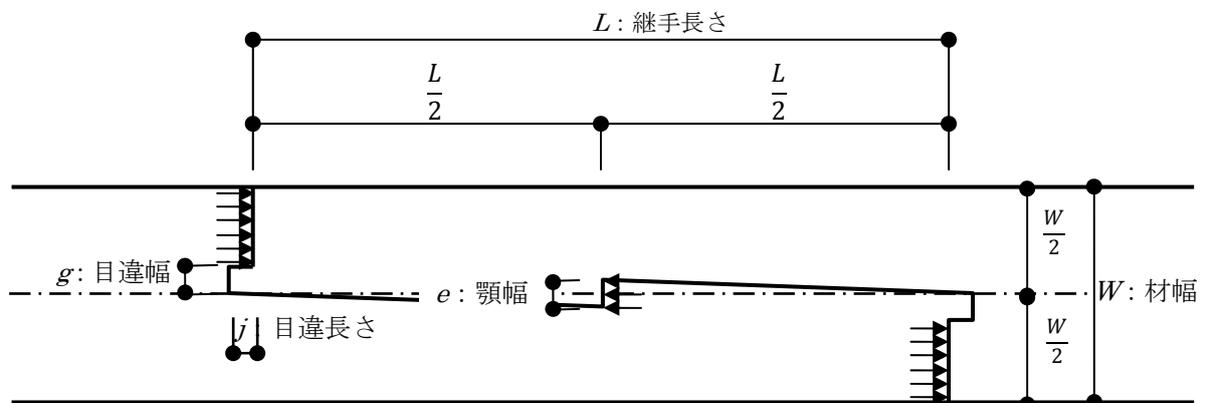


図 4.2.1 上面から見た胴付割裂後から顎の下端が支圧強度に達するまでの応力状態と各部寸法

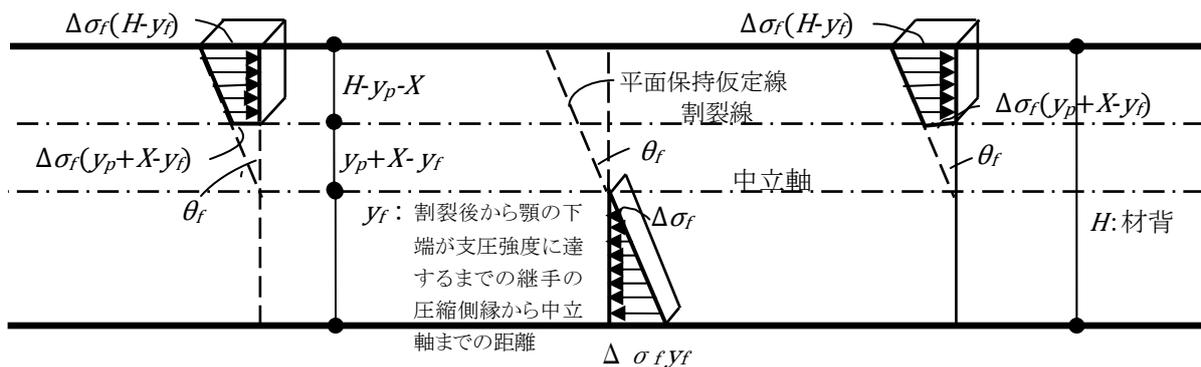


図 4.2.2 側面から見た胴付割裂後から顎の下端が支圧強度に達するまでの応力状態と各部寸法

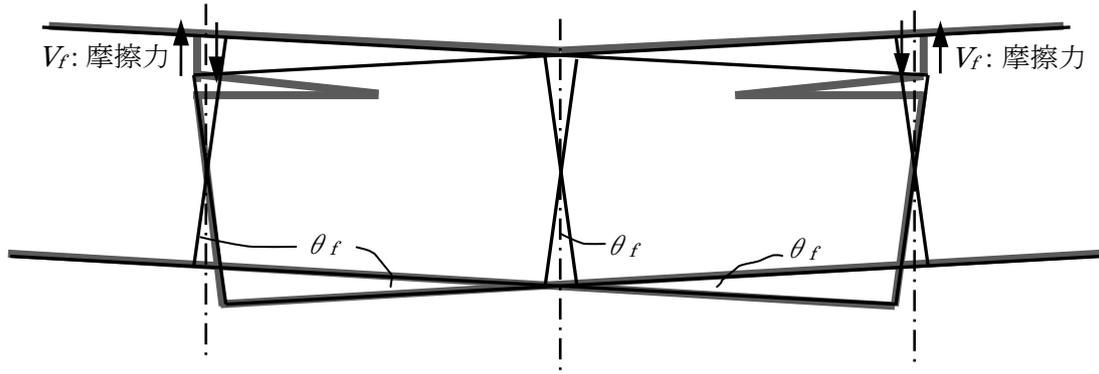


図 4.2.3 割裂後の胴付に働く摩擦力

4.2.2 塑性域の接合部の回転剛性評価式の誘導

図 4.2.1、4.2.2、4.2.3 より、割裂より上側の圧縮力は台形分布になるものとして、台形の中央の圧縮応力は次式のように求められる。

$$\Delta\sigma_f \frac{(H-y_f)+(X+y_p-y_f)}{2} = \Delta\sigma_f \frac{(H+X+y_p-2y_f)}{2} \dots (4.2.1)$$

これより、割裂より上側の圧縮合力： N_U (左右合わせたもの)は、

$$N_U = \Delta\sigma_f \frac{(H+X+y_p-2y_f)}{2} \times (W-2g) \times (H-y_p-X) = \frac{\Delta\sigma_f(H+X+y_p-2y_f)(W-2g)(H-y_p-X)}{2} \dots (4.2.2)$$

中立軸より下側の顎の三角形圧縮応力の合計： N_D は、

$$N_D = \frac{1}{2} \Delta\sigma_f \times y_f \times y_f \times e = \frac{\Delta\sigma_f y_f^2 e}{2} \dots (4.2.3)$$

第 2 章 2.2.2 と同様の手順で、割裂より上側の圧縮合力と下側の合力が等しいことから、

$$N_U = N_D \dots (4.2.4)$$

(4.2.4)式より y_f について解くと、割裂後の継手の引張側縁から中立軸までの距離： y_f が得られる。

$$\frac{\Delta\sigma_f(H+X+y_p-2y_f)(W-2g)(H-y_p-X)}{2} = \frac{\Delta\sigma_f y_f^2 e}{2}$$

$$ey_f^2 + 2(W-2g)(H-y_p-X)y_f - (H+X+y_p)(W-2g)(H-y_p-X) = 0$$

$y_f > 0$ より、

$$y_f = \frac{(W-2g)(H-y_p-X) \left\{ -1 + \sqrt{1 + \frac{e(H+X+y_p)}{(W-2g)(H-y_p-X)}} \right\}}{e} \dots (4.2.5)$$

次に第2章 2.2.2と同様の手順で接合部の抵抗モーメントを求める。この時、接合部に発生する摩擦力は次式の通りである。

$$\text{継手片側部分の摩擦力: } V_f = \frac{1}{2} \mu N_U$$

よって、接合部の「抵抗モーメント」: M_f

＝「中立軸より下側の顎部分の三角形分布圧縮力によるモーメント」
 ＋「割裂より上側の両胴付部分の台形分布圧縮力によるモーメント」
 ＋「胴付片側部分の摩擦力×継手長さ」より、

$$M_f = \int_0^{y_f} e \Delta \sigma_f x^2 dx + \int_{X+y_p-y_f}^{H-y_f} (W-2g) \Delta \sigma_f x^2 dx + \frac{\mu N_U L}{2}$$

$$= \frac{\Delta \sigma_f e y_f^3}{3} + \frac{\Delta \sigma_f (W-2g) \left\{ (H-y_f)^3 - (X+y_p-y_f)^3 \right\}}{3} + \frac{\Delta \sigma_f \mu L (W-2g) (H+X+y_p-2y_f) (H-y_p-X)}{4} \dots (4.2.6)$$

ここで、中立軸より x のところの圧縮応力: $\sigma_f = \Delta \sigma_f x$ となり、 x のところの縮み量は、接合部の両側の木材が潰れるため面圧剛性が半分になることにより、 $\delta = \frac{2\sigma_f}{K_E}$ となる。

よって、変形角 $\theta_f = \frac{\delta}{x} = \frac{2\sigma_f}{x K_E} = \frac{2\Delta \sigma_f x}{x K_E} = \frac{2\Delta \sigma_f}{K_E}$ より、

$$\Delta \sigma_f = \frac{K_E \theta_f}{2} \dots (4.2.7)$$

(4.2.7)式を(4.2.6)式に代入すると(4.2.8)式となり、割裂後から顎の下端が支圧強度に達するまでの接合部の回転剛性評価式は(4.2.9)式となる。

$$M_f = \frac{K_E \theta_f \left[4e y_f^3 + 4(W-2g) \left\{ (H-y_f)^3 - (X+y_p-y_f)^3 \right\} + 3\mu L (W-2g) (H+X+y_p-2y_f) (H-y_p-X) \right]}{24} \dots (4.2.8)$$

$$K_{Rf} = \frac{M_f}{\theta_f} = \frac{K_E \left[4e y_f^3 + 4(W-2g) \left\{ (H-y_f)^3 - (X+y_p-y_f)^3 \right\} + 3\mu L (W-2g) (H+X+y_p-2y_f) (H-y_p-X) \right]}{24} \dots (4.2.9)$$

4.2.3 割裂発生時の接合部の抵抗モーメント M_f の推定式の誘導

(4.2.7)式と(4.1.3)式より $\theta_f(x)$ の関係式を求め、得られた $\theta_f(x)$ を(4.2.8)式に代入し、割裂時の抵抗モーメント: $M_f(x)$ を求める。

$$\frac{\theta_f(X)K_E}{2} = \frac{C_f W}{\left(\frac{W}{2} - g\right)\mu} \times \frac{\sqrt{H(H - y_p - X)}}{\{(H - y_p)^2 - X^2\}\sqrt{y_p + X}}$$

$$\theta_f(X) = \frac{2C_f W \sqrt{H(H - y_p - X)}}{\mu K_E \left(\frac{W}{2} - g\right) \{(H - y_p)^2 - X^2\} \sqrt{y_p + X}}$$

$$M_f(X) = \frac{C_f W \sqrt{H(H - y_p - X)} [4ey_f^3 + 4(W - 2g)\{(H - y_f)^3 - (X + y_p - y_f)^3\} + 3\mu L(W - 2g)(H + X + y_p - 2y_f)(H - y_p - X)]}{6\mu(W - 2g)\{(H - y_p)^2 - X^2\}\sqrt{y_p + X}}$$

…(4.2.10)

4.2.4 顎の下端が支圧強度に達した時の接合部の抵抗モーメント M_f の推定式の誘導

まず追掛継の破壊は胴付に微細な割裂が発生し、割裂が進展した後、顎の引張側縁に圧壊が生じ、終局は顎のせん断破壊、または継手の曲げ破壊、あるいは顎の繊維方向のめり込みによる圧壊によっている。このことから顎の引張側縁に圧壊が生じるときの支圧強度: $F_{e\parallel}$ を木質構造設計規準・同解説(602.1.1)式²⁾より求める。

$$F_{e\parallel} = 60.68 \cdot r_0 \cdots (4.2.11)$$

$F_{e\parallel}$ (N/mm²): 木材の繊維方向の基準支圧強度

r_0 : 木材の基準比重

J1 グループのベイマツの平均比重 0.5 の時、 $F_{e\parallel}=30.34$ (N/mm²)

J3 グループのスギの平均比重 0.3 の時、 $F_{e\parallel}=18.204$ (N/mm²)

よって、顎の下端が降伏強度に達する時の木材の繊維方向の支圧応力度は次式のようになる。

$$\Delta\sigma_f y_f = F_{e\parallel}$$

$$\Delta\sigma_f = \frac{F_{e\parallel}}{y_f} \cdots (4.2.12)$$

ここで顎の下端が降伏強度に達する時の降伏変形角: θ_f を(4.2.7)式より(4.2.12)式に代入し求めると、

$$\theta_f = \frac{2F_{e\parallel}}{K_E y_f} \cdots (4.2.13)$$

(4.2.13)式を(4.2.8)式に代入すると顎の下端が支圧強度に達した時の降伏モーメント: M_y が得られる。

$$M_y = \frac{F_{e\parallel} [4ey_f^3 + 4(W - 2g)\{(H - y_f)^3 - (X + y_p - y_f)^3\} + 3\mu L(W - 2g)(H + X + y_p - 2y_f)(H - y_p - X)]}{12y_f}$$

…(4.2.14)

4.2.5 顎の下端が支圧強度に達した後の回転剛性評価式の誘導

さらに顎の下端が支圧強度に達した後の接合部の回転剛性評価式の誘導にあたり、次の仮定をする。

- 継手ゾーン内での曲げ変形は無視する。
- 胴付の反力は繊維方向の圧縮力と木口面の摩擦力のみと考える。
- 木口面以外の摩擦力は、上木と下木の側面に生じるものが考えられるが無視をする。
- 弾性状態である顎の圧縮力の材背方向の分布は、平面保持仮定が成立するものとする。
- 胴付の応力分布は台形分布とする。
- 顎の応力分布は台形分布とする。

以上より、図 4.2.4 の力学モデルを作成した。

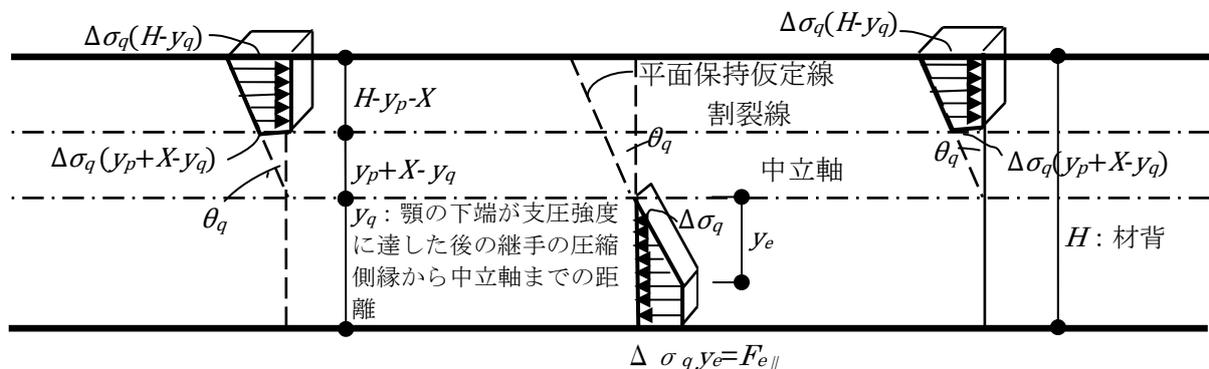


図 4.2.4 側面から見た顎の降伏後の応力状態と各部寸法

図 4.2.4 より、顎の下端が支圧強度に達した後は、その圧縮応力のまま一定で変位のみ進む塑性状態になるものとする、(4.2.12)式より、顎の中立軸から弾性範囲までの距離： $y_e = \frac{F_{e||}}{\Delta\sigma_q}$ より、割裂の上側の合力： N_U と中立軸より下側の合力： N_D が等しくなることから、引張側縁から中立軸までの距離： y_q を求めることができる。

$$y_e = \frac{F_{e||}}{\Delta\sigma_q} \dots (4.2.15)$$

中立軸より下側の顎の台形圧縮応力の合計： N_D は、

$$N_D = \frac{\Delta\sigma_q y_e^2 e}{2} + \frac{\Delta\sigma_q y_e (y_q - y_e) e}{2} \dots (4.2.16)$$

(4.2.15)式を(4.2.16)式に代入すると

$$N_D = \frac{F_{e||}^2 e}{2\Delta\sigma_q} + F_{e||} y_q e - \frac{F_{e||}^2 e}{\Delta\sigma_q} = F_{e||} y_q e - \frac{F_{e||}^2 e}{2\Delta\sigma_q} \dots (4.2.17)$$

(4.2.2)式=(4.2.17)式、すなわち $N_U = N_D$ より、

$$\frac{\Delta\sigma_q(H+X+y_p-2y_q)(W-2g)(H-y_p-X)}{2} = F_{e\parallel}y_q e - \frac{F_{e\parallel}^2 e}{2\Delta\sigma_q}$$

$$\Delta\sigma_q(H+X+y_p-2y_q)(W-2g)(H-y_p-X) = 2F_{e\parallel}y_q e - \frac{F_{e\parallel}^2 e}{\Delta\sigma_q}$$

$$2F_{e\parallel}ey_q + 2\Delta\sigma_q(W-2g)(H-y_p-X)y_q = \Delta\sigma_q(H+X+y_p)(W-2g)(H-y_p-X) + \frac{F_{e\parallel}^2 e}{\Delta\sigma_q}$$

$$\Delta\sigma_q = \frac{F_{e\parallel}}{y_e} \text{より、}$$

$$y_q = \frac{y_e^2 e + (H+X+y_p)(W-2g)(H-y_p-X)}{2\{y_e e + (W-2g)(H-y_p-X)\}}$$

ここで $\Delta\sigma_q = \frac{K_E\theta_q}{2}$ を(4.2.15)式に代入し、 $y_e = \frac{F_{e\parallel}}{\Delta\sigma_q} = \frac{2F_{e\parallel}}{K_E\theta_q}$ より、 θ_q が与えられると顎の下端が支圧強度に達した後の顎の引張側縁から中立軸までの距離： y_q が定まる。

$$y_q = \frac{4F_{e\parallel}^2 e + K_E^2 \theta_q^2 (H+X+y_p)(W-2g)(H-y_p-X)}{2\{2F_{e\parallel} e K_E \theta_q + K_E^2 \theta_q^2 (W-2g)(H-y_p-X)\}} \dots (4.2.18)$$

次に2.2.2と同様の手順で接合部の抵抗モーメントを求める。

接合部の「抵抗モーメント」： M_q

＝「中立軸より下側の顎部分の台形分布圧縮力によるモーメント」
 ＋「割裂より上側の両胴付部分の台形分布圧縮力によるモーメント」
 ＋「胴付片側部分の摩擦力×継手長さ」より、

$$M_q = \int_0^{y_e} e\Delta\sigma_q x^2 dx + \int_{y_e}^{y_q} F_{e\parallel} e x dx + \int_{X+y_p-y_q}^{H-y_q} (W-2g)\Delta\sigma_q x^2 dx + \frac{\mu N_U L}{2}$$

$$= e\Delta\sigma_q \left[\frac{x^3}{3} \right]_0^{y_e} + F_{e\parallel} e \left[\frac{x^2}{2} \right]_{y_e}^{y_q} + (W-2g)\Delta\sigma_q \left[\frac{x^3}{3} \right]_{X+y_p-y_q}^{H-y_q}$$

$$+ \frac{\Delta\sigma_q \mu L (H+X+y_p-2y_q)(W-2g)(H-y_p-X)}{4}$$

$$= \frac{e\Delta\sigma_q y_e^3}{3} + \frac{F_{e\parallel} e (y_q^2 - y_e^2)}{2} + \frac{\Delta\sigma_q (W-2g) \left\{ (H-y_q)^3 - (y_p+X-y_q)^3 \right\}}{3}$$

$$+ \frac{\Delta\sigma_q \mu L (H+X+y_p-2y_q)(W-2g)(H-y_p-X)}{4}$$

これに $y_e = \frac{F_{e\parallel}}{\Delta\sigma_q}$ を代入すると、

$$\begin{aligned}
 M_q &= \frac{F_{e\parallel}^3 e}{3\Delta\sigma_q^2} + \frac{F_{e\parallel} e y_q^2}{2} - \frac{F_{e\parallel}^3 e}{2\Delta\sigma_q^2} + \frac{\Delta\sigma_q (W - 2g) \left\{ (H - y_q)^3 - (X + y_p - y_q)^3 \right\}}{3} \\
 &\quad + \frac{\Delta\sigma_q \mu L (H + X + y_p - 2y_q) (W - 2g) (H - y_p - X)}{4} \\
 &= \frac{F_{e\parallel} e y_q^2}{2} - \frac{F_{e\parallel}^3 e}{6\Delta\sigma_q^2} + \frac{\Delta\sigma_q (W - 2g) \left\{ (H - y_q)^3 - (X + y_p - y_q)^3 \right\}}{3} + \frac{\Delta\sigma_q \mu L (H + X + y_p - 2y_q) (W - 2g) (H - y_p - X)}{4} \dots (4.2.19)
 \end{aligned}$$

(4.2.18)式と(4.2.19)式それぞれに $\Delta\sigma_q = \frac{K_E \theta_q}{2}$ を代入すると、顎の下端が支圧強度 $F_{e\parallel}$ に達した後、塑性域が少しずつ上昇する時の θ_q と y_q 、 θ_q と M_q の関係式を導くことができる。

θ_q の時の顎の引張側縁から中立軸までの距離： $y_q(\theta_q)$

$$y_q(\theta_q) = \frac{\frac{4F_{e\parallel}^2 e}{K_E^2 \theta_q^2} + (H + X + y_p) (W - 2g) (H - y_p - X)}{2 \left\{ \frac{2F_{e\parallel} e}{K_E \theta_q} + (W - 2g) (H - y_p - X) \right\}} \dots (4.2.20)$$

θ_q の時の抵抗モーメント： $M_q(\theta_q)$

$$\begin{aligned}
 M_q(\theta_q) &= \frac{F_{e\parallel} e y_q(\theta_q)^2}{2} - \frac{2F_{e\parallel}^3 e}{3K_E^2 \theta_q^2} + \frac{K_E \theta_q (W - 2g) \left\{ (H - y_q(\theta_q))^3 - (X + y_p - y_q(\theta_q))^3 \right\}}{3} \\
 &\quad + \frac{K_E \theta_q \mu L (H + X + y_p - 2y_q(\theta_q)) (W - 2g) (H - y_p - X)}{8} \\
 &\dots (4.2.21)
 \end{aligned}$$

θ_q の時の接合部の回転剛性： $K_{Rq}(\theta_q)$

$$\begin{aligned}
 K_{Rq}(\theta_q) &= \frac{M_q(\theta_q)}{\theta_q} \\
 &= \frac{F_{e\parallel} e y_q(\theta_q)^2}{2\theta_q} - \frac{2F_{e\parallel}^3 e}{3K_E^2 \theta_q^3} + \frac{K_E (W - 2g) \left\{ (H - y_q(\theta_q))^3 - (X + y_p - y_q(\theta_q))^3 \right\}}{3} \\
 &\quad + \frac{K_E \mu L (H + X + y_p - 2y_q(\theta_q)) (W - 2g) (H - y_p - X)}{8} \\
 &\dots (4.2.22)
 \end{aligned}$$

4.3 まとめ

本章で推定・誘導した式を以下に示す。

追掛継が割裂した時の中立軸から割裂までの距離： X

$$X = \frac{H \left\{ \left(1 - 4\frac{yp}{H}\right) + \sqrt{\left(1 - 4\frac{yp}{H}\right)^2 + 16\left(1 - \frac{yp}{H}\right)} \right\}}{8} \dots (4.1.4)$$

塑性域における追掛継の顎の引張側縁から中立軸までの距離： y_f

$$y_f = \frac{(W-2g)(H-y_p-X) \left\{ -1 + \sqrt{1 + \frac{e(H+X+y_p)}{(W-2g)(H-y_p-X)}} \right\}}{e} \dots (4.2.5)$$

塑性域における追掛継の接合部の回転剛性： K_{Rf}

$$K_{Rf} = \frac{M_f}{\theta_f} = \frac{K_E \left[4ey_f^3 + 4(W-2g) \left\{ (H-y_f)^3 - (X+y_p-y_f)^3 \right\} + 3\mu L(W-2g)(H+X+y_p-2y_f)(H-y_p-X) \right]}{24} \dots (4.2.9)$$

追掛継の割裂時の継手の抵抗モーメント： $M_f(X)$

$$M_f(X) = \frac{C_f w \sqrt{H(H-y_p-X)} \left[4ey_f^3 + 4(W-2g) \left\{ (H-y_f)^3 - (X+y_p-y_f)^3 \right\} + 3\mu L(W-2g)(H+X+y_p-2y_f)(H-y_p-X) \right]}{6\mu(W-2g)\{(H-y_p)^2 - X^2\}\sqrt{y_p+X}} \dots (4.2.10)$$

追掛継の顎の下端が支圧強度に達した時の継手の抵抗モーメント： M_y

$$M_y = \frac{F_{e\parallel} \left[4ey_f^3 + 4(W-2g) \left\{ (H-y_f)^3 - (X+y_p-y_f)^3 \right\} + 3\mu L(W-2g)(H+X+y_p-2y_f)(H-y_p-X) \right]}{12y_f} \dots (4.2.14)$$

追掛継の顎が支圧強度に達した後の θ_q の時の顎の引張側縁から中立軸までの距離： $y_q(\theta_q)$

$$y_q(\theta_q) = \frac{\frac{4F_{e\parallel}^2 e}{K_E^2 \theta_q^2} + (H+X+y_p)(W-2g)(H-y_p-X)}{2 \left\{ \frac{2F_{e\parallel} e}{K_E \theta_q} + (W-2g)(H-y_p-X) \right\}} \dots (4.2.20)$$

追掛継の顎が支圧強度に達してからの θ_q の時の接合部の回転剛性： $K_{Rq}(\theta_q)$

$$K_{Rq}(\theta_q) = \frac{F_{e\parallel} e y_q(\theta_q)^2}{2\theta_q} - \frac{2F_{e\parallel}^3 e}{3K_E^2 \theta_q^3} + \frac{K_E(W-2g) \left\{ \left(H - y_q(\theta_q) \right)^3 - \left(X + y_p - y_q(\theta_q) \right)^3 \right\}}{3} + \frac{K_E \mu L \left(H + X + y_p - 2y_q(\theta_q) \right) (W-2g)(H-y_p-X)}{8} \dots (4.2.22)$$

第5章 追掛継の4点曲げ試験

5.1 試験体と試験方法

5.1.1 試験体の種類と試験方法

5.1.2 試験体の物性値

5.2 追掛継の曲げ性能の予測と試験結果の解析

5.2.1 回転剛性及び曲げ耐力の予測

5.2.2 試験結果と解析

5.2.2.1 破壊モード

5.2.2.2 割裂耐力

5.2.2.3 割裂高さ

5.2.2.4 回転剛性の理論値と実験値の比較と曲げ耐力推定値の提案

5.2.2.5 接合部の抵抗モーメントと接合効率

5.2.2.6 塑性率

5.2.2.7 継手のめり込みと曲げ変形角

5.2.2.8 胴付のせん断変形

5.3 まとめ

5.1 追掛体と試験方法

5.1.1 試験体の種類と試験方法

試験体は、表 5.1.1 のように樹種をベイマツとスギ、パラメータを材背: H 、顎幅: e 、継手長さ: L とした 9 種類×各 6 体=54 体、合計 108 体とした。

試験方法は、図 5.1.1 のようにスパン $\ell=2,478\text{mm}$ 、加力点から支点までの距離 $a=669\text{mm}$ の 4 点曲げ試験とした。変位計の測定箇所は、図 5.1.2 のように中央たわみの他に顎と胴付の上下端部のめり込みと開き、胴付の上下方向のずれを計測した。

表 5.1.1 追掛継の試験体リストと記号

Specimens; Kiln-Dried Pseudotsuga menziesii, Material width: 120mm					Kiln-Dried Cryptomeria Japonica, Material width: 120mm					(mm)	
Types	Material Height	Cogging Width	Joint Length	Number	Types	Material Height	Cogging Width	Joint Length	Number		
DH120-e15-L300	120	15	300	6	CH120-e15-L300	120	15	300	6		
DH180-e15-L300	180	15	300	6	CH180-e15-L300	180	15	300	6		
DH240-e15-L300	240	15	300	6	CH240-e15-L300	240	15	300	6		
DH300-e15-L300	300	15	300	6	CH300-e15-L300	300	15	300	6		
DH180-e30-L300	180	30	300	6	CH180-e30-L300	180	30	300	6		
DH180-e45-L300	180	45	300	6	CH180-e45-L300	180	45	300	6		
DH180-e60-L300	180	60	300	6	CH180-e60-L300	180	60	300	6		
DH180-e15-L180	180	15	180	6	CH180-e15-L180	180	15	180	6		
DH180-e15-L450	180	15	450	6	CH180-e15-L450	180	15	450	6		
				Amount	54					Amount	54

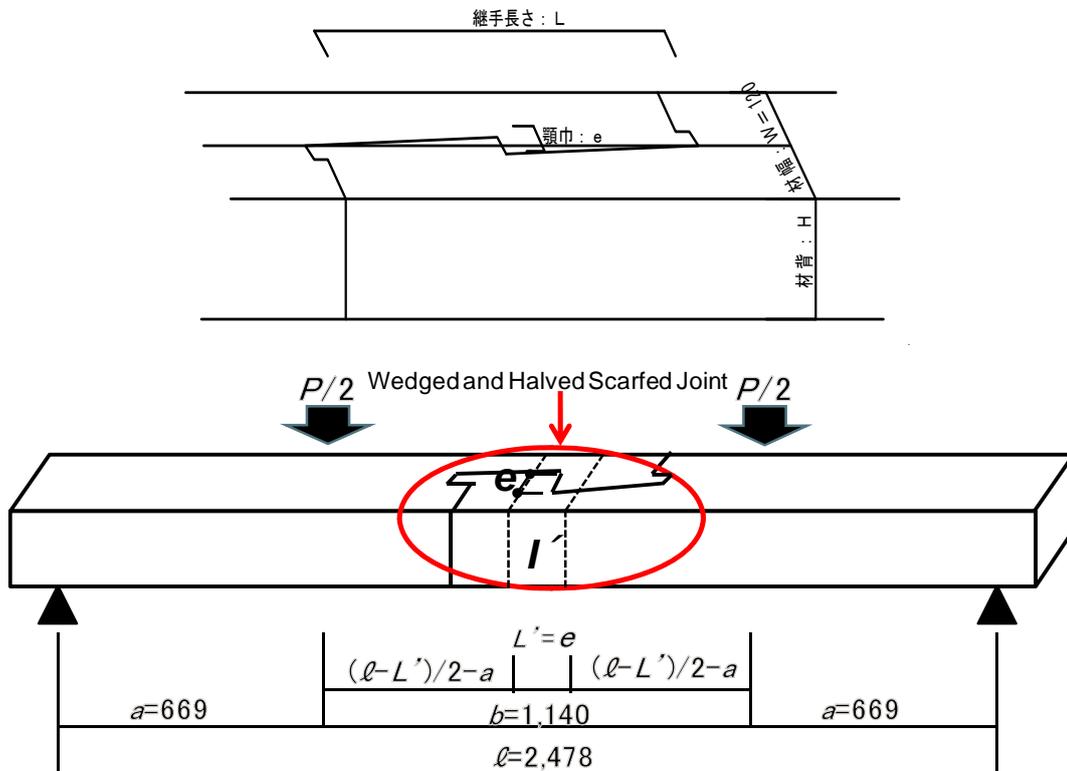


図 5.1.1 試験方法

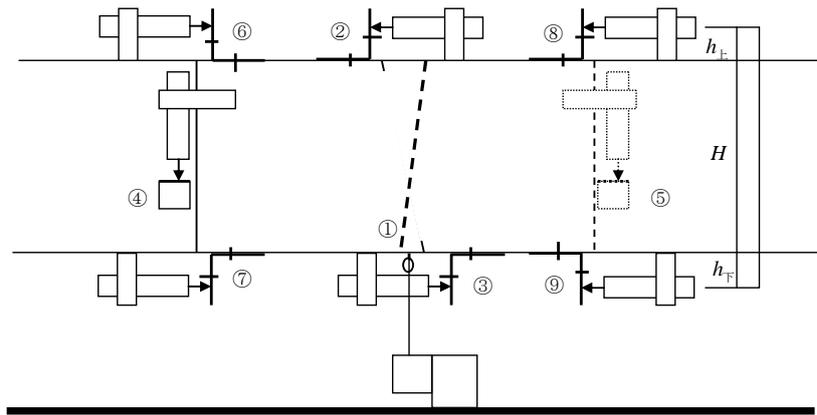


図 5.1.2 試験体の変位測定箇所



写真 5.1.1 4点曲げ試験

5.1.2 試験体の物性値

供試体のベイマツについては、中国木材のドライビームの無等級材で試験終了後に含水率とヤング係数を測定した。含水率は高周波容量式測定器(HM-520、株式会社ケツ科学研究所製)にて、ヤング率の測定は縦振動法(各試験体 1~3)と3点曲げ試験(各試験体 4~6)によって測定した。

またスギについては、山長商店より、同社スギ材のヤング係数最頻値から材料を取り出し、試験前に含水率とヤング係数を測定した。含水率は、マイクロ波透過型含水率測定器にて、ヤング係数の測定は縦振動法によって測定した。

結果を表 5.1.2 に示す。

表 5.1.2 含水率とヤング係数の測定結果

Parameter	Pseudotsuga menziesii				Cryptomeria japonica			
	Specimen Number	Moisture content (%)	Specific gravity	MOE (kN/mm ²)	Specimen Number	Moisture content (%)	Specific gravity	MOE (kN/mm ²)
Material height	DH120-e15-L300-1	13.4	0.50	12.6	CH120-e15-L300-1	15.5	0.34	6.3
	DH120-e15-L300-2	17.0	0.57	13.0	CH120-e15-L300-2	6.7	0.35	8.1
	DH120-e15-L300-3	17.7	0.52	13.8	CH120-e15-L300-3	12.0	0.36	6.3
	DH120-e15-L300-4	15.5	0.48	13.2	CH120-e15-L300-4	15.2	0.44	8.8
	DH120-e15-L300-5	10.5	0.45	12.2	CH120-e15-L300-5	8.7	0.40	9.5
	DH120-e15-L300-6	14.0	0.57	15.6	CH120-e15-L300-6	15.2	0.48	9.1
		14.7	0.52	13.4		12.2	0.40	8.0
	DH180-e15-L300-1	17.8	0.48	12.2	CH180-e15-L300-1	11.4	0.39	7.6
	DH180-e15-L300-2	17.7	0.54	15.0	CH180-e15-L300-2	13.8	0.41	9.0
	DH180-e15-L300-3	16.4	0.48	10.8	CH180-e15-L300-3	17.4	0.31	7.5
	DH180-e15-L300-4	9.0	0.45	8.1	CH180-e15-L300-4	9.9	0.32	6.2
	DH180-e15-L300-5	10.0	0.50	10.4	CH180-e15-L300-5	10.8	0.40	9.7
	DH180-e15-L300-6	17.5	0.53	7.3	CH180-e15-L300-6	15.7	0.39	6.8
		14.7	0.50	10.6		13.2	0.37	7.8
	DH240-e15-L300-1	18.8	0.48	10.4	CH240-e15-L300-1	21.8	0.48	8.3
	DH240-e15-L300-2	15.6	0.44	9.7	CH240-e15-L300-2	6.2	0.41	9.5
	DH240-e15-L300-3	15.2	0.42	10.6	CH240-e15-L300-3	13.5	0.44	9.5
	DH240-e15-L300-4	21.0	0.59	16.0	CH240-e15-L300-4	14.3	0.40	7.2
	DH240-e15-L300-5	18.0	0.50	12.8	CH240-e15-L300-5	28.0	0.45	6.3
	DH240-e15-L300-6	18.5	0.50	12.1	CH240-e15-L300-6	9.4	0.38	9.3
		17.9	0.49	11.9		15.5	0.42	8.4
	DH300-e15-L300-1	11.4	0.47	9.3	CH300-e15-L300-1	27.0	0.43	6.2
	DH300-e15-L300-2	13.8	0.47	10.4	CH300-e15-L300-2	8.6	0.43	9.4
	DH300-e15-L300-3	13.0	0.44	9.4	CH300-e15-L300-3	16.0	0.43	8.4
DH300-e15-L300-4	19.5	0.45	10.0	CH300-e15-L300-4	12.4	0.39	8.0	
DH300-e15-L300-5	19.0	0.44	9.9	CH300-e15-L300-5	26.2	0.42	6.8	
DH300-e15-L300-6	19.5	0.44	10.4	CH300-e15-L300-6	12.4	0.42	8.7	
	16.0	0.45	9.9		17.1	0.42	7.9	
Cogging width	DH180-e15-L300-1	17.8	0.48	12.2	CH180-e15-L300-1	11.4	0.39	7.6
	DH180-e15-L300-2	17.7	0.54	15.0	CH180-e15-L300-2	13.8	0.41	9.0
	DH180-e15-L300-3	16.4	0.48	10.8	CH180-e15-L300-3	17.4	0.31	7.5
	DH180-e15-L300-4	9.0	0.45	8.1	CH180-e15-L300-4	9.9	0.32	6.2
	DH180-e15-L300-5	10.0	0.50	10.4	CH180-e15-L300-5	10.8	0.40	9.7
	DH180-e15-L300-6	17.5	0.53	7.3	CH180-e15-L300-6	15.7	0.39	6.8
		14.7	0.50	10.6		13.2	0.37	7.8
	DH180-e30-L300-1	18.9	0.58	11.5	CH180-e30-L300-1	9.4	0.38	7.1
	DH180-e30-L300-2	32.0	0.74	22.4	CH180-e30-L300-2	10.1	0.39	6.2
	DH180-e30-L300-3	16.2	0.55	16.2	CH180-e30-L300-3	9.6	0.39	7.8
	DH180-e30-L300-4	18.0	0.43	10.9	CH180-e30-L300-4	12.1	0.45	8.2
	DH180-e30-L300-5	20.0	0.51	12.0	CH180-e30-L300-5	11.5	0.40	7.1
	DH180-e30-L300-6	26.0	0.56	15.1	CH180-e30-L300-6	10.0	0.37	6.6
		21.9	0.56	14.7		10.5	0.40	7.2
	DH180-e45-L300-1	24.3	0.56	16.1	CH180-e45-L300-1	19.5	0.45	7.3
	DH180-e45-L300-2	17.0	0.48	11.5	CH180-e45-L300-2	11.7	0.45	8.5
	DH180-e45-L300-3	21.8	0.52	12.5	CH180-e45-L300-3	12.7	0.48	9.6
	DH180-e45-L300-4	20.0	0.51	12.2	CH180-e45-L300-4	18.3	0.48	7.2
	DH180-e45-L300-5	17.0	0.53	15.0	CH180-e45-L300-5	21.8	0.46	5.9
	DH180-e45-L300-6	18.5	0.49	10.8	CH180-e45-L300-6	19.2	0.45	9.1
		19.8	0.52	13.0		17.2	0.46	7.9
	DH180-e60-L300-1	22.0	0.50	11.7	CH180-e60-L300-1	10.1	0.36	6.4
	DH180-e60-L300-2	26.0	0.56	15.6	CH180-e60-L300-2	9.6	0.38	8.1
	DH180-e60-L300-3	17.0	0.51	12.0	CH180-e60-L300-3	9.6	0.34	6.9
DH180-e60-L300-4	20.0	0.54	11.9	CH180-e60-L300-4	12.9	0.34	7.6	
DH180-e60-L300-5	17.0	0.50	11.0	CH180-e60-L300-5	13.2	0.38	7.5	
DH180-e60-L300-6	16.5	0.55	11.3	CH180-e60-L300-6	13.4	0.36	6.4	
	19.8	0.53	12.3		11.5	0.36	7.2	
Joint length	DH180-e15-L180-1	12.6	0.52	13.5	CH180-e15-L180-1	9.4	0.40	7.4
	DH180-e15-L180-2	16.9	0.56	14.8	CH180-e15-L180-2	6.2	0.39	9.6
	DH180-e15-L180-3	15.4	0.55	15.1	CH180-e15-L180-3	15.0	0.40	8.3
	DH180-e15-L180-4	21.3	0.48	12.5	CH180-e15-L180-4	23.0	0.50	6.6
	DH180-e15-L180-5	19.4	0.49	13.6	CH180-e15-L180-5	25.4	0.52	7.1
	DH180-e15-L180-6	14.7	0.48	10.7	CH180-e15-L180-6	19.3	0.44	6.8
		16.7	0.51	13.4		16.4	0.44	7.6
	DH180-e15-L300-1	17.8	0.48	12.2	CH180-e15-L300-1	11.4	0.39	7.6
	DH180-e15-L300-2	17.7	0.54	15.0	CH180-e15-L300-2	13.8	0.41	9.0
	DH180-e15-L300-3	16.4	0.48	10.8	CH180-e15-L300-3	17.4	0.31	7.5
	DH180-e15-L300-4	9.0	0.45	8.1	CH180-e15-L300-4	9.9	0.32	6.2
	DH180-e15-L300-5	10.0	0.50	10.4	CH180-e15-L300-5	10.8	0.40	9.7
	DH180-e15-L300-6	17.5	0.53	7.3	CH180-e15-L300-6	15.7	0.39	6.8
		14.7	0.50	10.6		13.2	0.37	7.8
	DH180-e15-L450-1	15.2	0.53	11.2	CH180-e15-L450-1	9.7	0.29	7.8
	DH180-e15-L450-2	15.8	0.56	14.6	CH180-e15-L450-2	9.6	0.30	7.4
	DH180-e15-L450-3	12.0	0.46	12.2	CH180-e15-L450-3	10.3	0.32	6.8
	DH180-e15-L450-4	24.8	0.55	16.2	CH180-e15-L450-4	24.8	0.38	7.8
	DH180-e15-L450-5	23.6	0.59	15.5	CH180-e15-L450-5	10.1	0.33	8.6
	DH180-e15-L450-6	21.6	0.53	14.7	CH180-e15-L450-6	11.5	0.29	7.3
		18.8	0.54	14.1		12.7	0.32	7.6

5.2 追掛継の曲げ性能の予測と試験結果の解析

5.2.1 回転剛性及び曲げ耐力の予測

表 5.1.2 の曲げヤング係数と比重の実測値から 9 種類の試験体について平均値を求め、先に導いた式(2.2.2)(2.2.5)(2.2.8)(4.1.4)(4.2.5)(4.2.9)(4.2.10)(4.2.11)(4.2.14)より追掛継の弾性域における継手引張側縁から中立軸までの距離： y_p と木材の繊維方向の面圧剛性： K_E 、追掛継の弾性域における回転剛性： K_{Rp} 、胴付の中立軸から割裂までの距離： X 、胴付の割裂後の継手引張側縁から中立軸までの距離： y_f 、胴付の割裂後から顎が支圧強度に達するまでの回転剛性： K_{Rf} 、式(4.2.10)と表 3.3.4、表 3.3.5 により得られた樹種毎の材背別 C_f と表 4.1.1 より計算によって求められた中立軸から割裂までの距離： X を用いて求めた割裂発生時の接合部の抵抗モーメント： M_f 、木材の繊維方向の基準支圧強度： F_{e1} 、顎の下端が支圧強度に達した時の降伏モーメント： M_y を表 5.2.1 に示した。

材幅 120mm の場合、弾性域と塑性域の回転剛性の理論値で最も高いは、ベイマツの場合、どちらも顎幅 30mm の時、スギの場合もどちらも顎幅 45mm の時であった。

割裂発生時の接合部の抵抗モーメントの理論値及び顎の下端が支圧強度に達した時の降伏モーメントの理論値が最も高いのは、ベイマツ、スギともに 60mm の時であった。

尚、曲げヤング係数や比重で校正すると理論値は材背、顎幅、継手長さが大きければ大きいほど、回転剛性が高くなる、または耐力が上昇するものと推定された。

表 5.2.1 式(2.2.2)(2.2.5)(2.2.8)(4.1.4)(4.2.5)(4.2.9)(4.2.10)(4.2.11)(4.2.14)による理論値

Specimens: kiln-dried Pseudotsuga menziesii																							
$b=W$	$h=H$	$d=e$	L	g	j	l	E_0	μ	P	a	$I_{material}$	I_{joint}	γ_p	K_E	K_{Rp}	γ_p/H	X	γ_f	M_f	K_{Rf}	r_0	$F_{e//}$	M_y
材幅 (mm)	材背 (mm)	顎幅 (mm)	継手 長さ (mm)	自達 幅 (mm)	自達 長さ (mm)	試験体 長 (mm)	ヤング 係数 (kN/mm ²)	摩擦 係数 *1	荷重 (kN)	加力点 ~支点 間距離 (mm)	材の断面 二次モー メント ($\times 10^4 \text{mm}^4$)	継手の断 面二次 モーメント ($\times 10^4 \text{mm}^4$)	割裂前の 引張側縁 から中立 軸までの 距離 (mm)	繊維方向 の面圧剛 性 (kN/mm)	割裂前の理 論による継 手の回転剛 性 (kN·m/rad)		中立軸 から割 裂まで の距離 (mm)	割裂後~顎 の下端が支 圧強度に達す るまでの引張 側縁から中立 軸までの距離 (mm)	接合部が 割裂終局 耐力に達す るまでの理論 による抵抗 モーメント (kN·m)	割裂後~顎 の下端が支 圧強度に達す るまでの理論 による継手の 回転剛性 (kN·m/rad)	木材の 比重	木材の織 維方向の 支圧強度 (N/mm ²)	顎の下端 が支圧強 度に達する 時の理論に よる抵抗 モーメント (kN·m)
120	120	15	303	15	15	2,478	13.4	0.4	1	669	1,728	1,512	85.2	0.04	150	0.71	14.9	81.9	2.24	143	0.52	31.31	2.78
120	180	15	303	15	15	2,478	10.6	0.4	1	669	5,832	5,103	127.8	0.03	344	0.71	22.3	122.9	3.89	328	0.50	30.25	5.20
120	240	15	303	15	15	2,478	11.9	0.4	1	669	13,824	12,096	170.4	0.03	837	0.71	29.8	163.9	5.08	801	0.49	29.65	8.32
120	300	15	303	15	15	2,478	9.9	0.4	1	669	27,000	23,625	213.0	0.03	1,286	0.71	37.2	204.8	7.82	1,234	0.45	27.55	11.44
120	180	30	303	15	15	2,478	14.7	0.4	1	669	5,832	4,374	114.1	0.03	581	0.63	29.9	108.0	4.39	543	0.56	34.13	10.43
120	180	45	303	15	15	2,478	13.0	0.4	1	669	5,832	3,645	105.4	0.02	563	0.59	35.1	98.6	4.67	519	0.52	31.35	13.22
120	180	60	303	15	15	2,478	12.3	0.4	1	669	5,832	2,916	99.1	0.02	558	0.55	39.1	91.9	4.87	507	0.53	32.00	16.86
120	180	15	182	15	15	2,478	13.4	0.4	1	669	5,832	5,103	127.8	0.04	374	0.71	22.3	122.9	3.38	359	0.51	30.82	4.61
120	180	15	455	15	15	2,478	14.1	0.4	1	669	5,832	5,103	127.8	0.04	532	0.71	22.3	122.9	4.52	505	0.54	32.64	6.52
Specimens: kiln-dried Cryptomeria Japonica																							
$b=W$	$h=H$	$d=e$	L	g	j	l	E_0	μ	P	a	$I_{material}$	I_{joint}	γ_p	K_E	K_{Rp}	γ_p/H	X	γ_f	M_f	K_{Rf}	r_0	$F_{e//}$	M_y
材幅 (mm)	材背 (mm)	顎幅 (mm)	継手 長さ (mm)	自達 幅 (mm)	自達 長さ (mm)	試験体 長 (mm)	ヤング 係数 (kN/mm ²)	摩擦 係数 *1	荷重 (kN)	加力点 ~支点 間距離 (mm)	材の断面 二次モー メント ($\times 10^4 \text{mm}^4$)	継手の断 面二次 モーメント ($\times 10^4 \text{mm}^4$)	割裂前の 引張側縁 から中立 軸までの 距離 (mm)	繊維方向 の面圧剛 性 (kN/mm)	割裂前の理 論による継 手の回転剛 性 (kN·m/rad)		中立軸 から割 裂まで の距離 (mm)	割裂後~顎 の下端が支 圧強度に達す るまでの引張 側縁から中立 軸までの距離 (mm)	接合部が 割裂終局 耐力に達す るまでの理論 による抵抗 モーメント (kN·m)	割裂後~顎 の下端が支 圧強度に達す るまでの理論 による継手の 回転剛性 (kN·m/rad)	木材の 比重	木材の織 維方向の 支圧強度 (N/mm ²)	顎の下端 が支圧強 度に達する 時の理論に よる抵抗 モーメント (kN·m)
120	120	15	303	15	15	2,478	8.01	0.4	1	669	1,728	1,512	85.2	0.02	90	0.71	14.9	81.9	1.58	85	0.40	24.07	2.14
120	180	15	303	15	15	2,478	7.78	0.4	1	669	5,832	5,103	127.8	0.02	252	0.71	22.3	122.9	2.84	240	0.37	22.40	3.85
120	240	15	303	15	15	2,478	8.35	0.4	1	669	13,824	12,096	170.4	0.02	587	0.71	29.8	163.9	5.49	562	0.42	25.77	7.24
120	300	15	303	15	15	2,478	7.90	0.4	1	669	27,000	23,625	213.0	0.02	1,025	0.71	37.2	204.8	8.00	983	0.42	25.50	10.59
120	180	30	303	15	15	2,478	7.17	0.4	1	669	5,832	4,374	114.1	0.02	283	0.63	29.9	108.0	3.20	265	0.40	24.08	7.36
120	180	45	303	15	15	2,478	7.93	0.4	1	669	5,832	3,645	105.4	0.02	343	0.59	35.1	98.6	3.41	316	0.46	27.82	11.74
120	180	60	303	15	15	2,478	7.16	0.4	1	669	5,832	2,916	99.1	0.01	326	0.55	39.1	91.9	3.55	297	0.36	21.77	11.47
120	180	15	182	15	15	2,478	7.63	0.4	1	669	5,832	5,103	127.8	0.02	214	0.71	22.3	122.9	2.47	205	0.44	26.72	4.00
120	180	15	455	15	15	2,478	7.62	0.4	1	669	5,832	5,103	127.8	0.02	288	0.71	22.3	122.9	3.30	273	0.42	25.28	5.05

*1. 摩擦係数については参考文献(1)~(3)より、ここでは $\mu=0.4$ と仮定した。

: parameters

: Calculation value

5.2.2 試験結果と解析

5.2.2.1 破壊モード

表 5.2.2、表 5.2.3 は試験体種別破壊モードと耐力を示したもので、これらより両樹種ともに割裂と顎のせん断破壊が最大耐力を決定する主な要因になっていることが判った。

【ベイマツ】

表 5.2.2 より、ベイマツの試験体 54 体中 48 体が最初に割裂が発生している。内 25 体が割裂後のせん断によって最大耐力が決定し、割裂とせん断の同時発生で決定しているものは 8 体、割裂のみで決定しているものは 5 体であった。これより、ベイマツの追掛継は割裂と顎のせん断破壊が最大耐力を決定する主な要因になっていると考えられる。

顎の圧壊は *DH180-e15-L300*、*DH180-e15-L300*、*DH300-e15-L300*、*DH180-e15-L450* で試験体の半数以上が見られた。これは、材背が高い、継手長さが長いなどの理由の他、*DH180-e15-L300* についてはパラメータのバランスが優れていることによるものと考えられる。

継手の曲げ破壊は、*DH120-e15-L300*、*DH180-e60-L300*、*DH180-e15-L450* で比較的多く見られた。これは、材背が低い、顎幅が大きく継手幅が小さい、継手長さが長いなどの理由によるものと考えられる。

【スギ】

表 5.2.3 より、スギの試験体 54 体中、53 体の試験体で最初に割裂が発生した。内 10 体が割裂後のせん断によって最大耐力が決定し、割裂とせん断の同時発生で決定しているものは 24 体、割裂のみで決定しているものは 15 体であった。

顎の圧壊は *CH180-e15-L450* で 6 体中 4 体に見られた。これは、継手長さの影響によるものと考えられる。

継手の曲げ破壊は、*CH180-e60-L300* で 1 体見られたのみであった。原因として、顎幅が大きく継手幅が小さくなったためと考えられる。

表 5.2.2 バイマツの試験体種別破壊モードと耐力

Types		初期接合部の割裂	接合部の割裂	顎のせん断破壊	顎の圧壊	継手の曲げ破壊	備考
DH120-e15-L300	1	①2.48kN				●2.94kN	上木の顎の節がせん断を抑制か？
	2	①1.67kN			●3.01kN		上木の顎の節がせん断を抑制か？
	3	①3.03kN		●3.66kN			
	4	①		●1.39kN			
	5	①				●2.16kN	
	6	①		●2.04kN			
DH180-e15-L300	1	①4.05kN		●5.92kN	①4.05kN		下木の顎の節の影響有
	2	①4.37kN		●6.46kN			
	3			●5.50kN			
	4	①		●3.91kN	②		顎の圧壊で長く粘る
	5	①			●4.88kN		顎の圧壊で長く粘る
	6	①		●4.98kN	②		顎の圧壊で長く粘る
DH240-e15-L300	1		●9.68kN				
	2	①4.68kN		●6.47kN			下木の顎の節の影響有
	3	①7.23kN		●8.46kN			
	4	①		●6.35kN			
	5	①		●8.60kN			
	6	①		●4.80kN			
DH300-e15-L300	1		●15.00kN		①13.68kN		
	2		●9.92kN				
	3			●7.53kN			
	4	①			●11.11kN		顎の圧壊で長く粘る
	5	①5.97kN			●12.04kN		顎の圧壊で長く粘る
	6	①		●11.22kN			
DH180-e30-L300	1		●6.46kN				
	2		●6.25kN				
	3		●4.14kN				顎内に2mm厚の薄板が入っていた。
	4	①		●4.26kN			
	5			●5.15kN			
	6	①		●5.79kN			
DH180-e45-L300	1	①5.08kN		●6.40kN			
	2	①5.26kN		●5.61kN			
	3	①5.22kN		●6.53kN			
	4	①		●4.72kN			
	5	①		●4.98kN			
	6	①		●6.09kN			
DH180-e60-L300	1					●4.35kN	
	2	①3.56kN	●5.55kN				
	3		●5.45kN				
	4	①		●5.92kN			
	5	①				●4.52kN	
	6	①		●5.45kN			
DH180-e15-L180	1		●4.86kN				
	2		●6.96kN				
	3		●5.52kN				
	4	①		●3.09kN			
	5	①		●3.26kN			
	6			●3.86kN			
DH180-e15-L450	1	①3.77kN				●7.19kN	顎の圧壊で長く粘る
	2	①6.42kN	●7.27kN				顎の圧壊で長く粘る
	3	①6.42kN	●6.82kN		●6.82kN		顎の圧壊で長く粘る
	4	①		●6.06kN	②		顎の圧壊で長く粘る
	5	①			②	●5.18kN	顎の圧壊で長く粘る
	6	①			②	●6.02kN	顎の圧壊で長く粘る

①②:破壊順を表す。●:最大耐力。記入耐力は、破壊モードが変化した時を示している。

表 5.2.3 スギの試験体種別破壊モードと耐力

Types		初期接合部の割裂	接合部の割裂	顎のせん断破壊	顎の圧壊	継手の曲げ破壊	備考
CH120-e15-L300	1		●1.87kN				
	2		●2.66kN				
	3		●2.59kN				
	4	①2.57kN		●2.63kN			
	5	①2.77kN		●3.00kN			上木顎の節の影響有か？
	6	①2.25kN		●2.69kN			
CH180-e15-L300	1	①5.39kN	●5.44kN				
	2	①5.02kN	●5.15kN				
	3	①5.66kN		●5.73kN			
	4	①4.47kN	●4.48kN				
	5		●4.41kN				
	6	①4.44kN	●4.85kN				
CH240-e15-L300	1	①6.93kN	●7.82kN				
	2	①9.10kN		●9.30kN			
	3	①5.18kN	●6.68kN				
	4		●7.46kN				
	5		●7.03kN				
	6		●7.31kN				
CH300-e15-L300	1		●9.37kN				
	2		●10.90kN				
	3		●15.13kN				
	4	①12.61kN	●13.1kN		●13.1kN		
	5	①10.04kN	●10.75kN				
	6	①12.59kN	●13.84kN				
CH180-e30-L300	1	①3.86kN	●4.39kN				
	2		●5.02kN				
	3		●4.58kN				
	4	①3.59kN		●6.18kN			
	5	①4.96kN		●5.79kN			
	6	①3.60	●4.78kN				
CH180-e45-L300	1	①5.31kN	●5.38kN				
	2	①5.29kN	●5.40kN				
	3		●5.41kN				
	4		●5.25kN				
	5		●4.77kN				
	6		●4.86kN				
CH180-e60-L300	1		●2.64kN				
	2		●4.21kN				
	3	①4.15kN	●4.21kN				
	4	①3.69kN				●4.60kN	上木顎の3個の節がせん断を抑制
	5		●4.49kN				
	6	①4.11kN	●4.57kN				
CH180-e15-L180	1		●3.09kN				
	2	①4.21kN	●4.72kN				
	3		●3.91kN				
	4		●2.88kN				
	5	①3.68kN	●4.64kN				顎に節、下木割裂部に節
	6	①3.83kN	●3.91kN				
CH180-e15-L450	1	①5.50kN		●6.44kN			
	2	①4.84kN			●6.02kN		
	3	①5.43kN	●6.48kN		●6.48kN		
	4	①5.62kN	●5.76kN		●5.76kN		
	5	①3.41kN	●5.69kN		②4.37kN		下木顎の節が、せん断、圧壊を抑制
	6		●6.05kN				

①②: 破壊順を表す。●: 最大耐力。記入耐力は、破壊モードが変化した時を示している。

5.2.2.2 割裂耐力

図 5.2.1、図 5.2.2 はベイマツとスギの試験体別割裂耐力の理論値と実験値の比較を示している。同図では、実験結果の抵抗モーメントと接合部変形角を実線で、抵抗モーメントと接合部の上下方向のずれを点線で表わしている。また割裂耐力の理論値は青の一点鎖線で表わし、実験値は赤の一点鎖線で表わした。尚、割裂耐力の実験値は、接合部に実際に割裂が発生した時の抵抗モーメントを示している。但し、ベイマツの各タイプ 4～6 番の試験体(除く、*H300-e15-L300-5*)は割裂耐力を測定していない。

両樹種とも理論値と実験値はよく一致、若しくは概ね安全側の推定できた。しかし、この安全側での推定であるが、これは第 3 章で行った木口面同士の摩擦応力を考慮した割裂試験が、割裂より上側の荷重であるのに対し、追掛継の胴付の場合、胴付に割裂が発生する直前まで中立軸から上側の部分に上向きに押し上げる力が掛かっていることから、この差が安全側の評価になったものと考えられる。

また図 5.2.1 その 1 の *DH180-e15-L300-2*、同図その 2 の *DH300-e15-L300-4*、図 5.2.2 その 3 の *CH300-e15-L300-4*、同図その 5 の *CH180-e15-L450-5* より、胴付に割裂が発生し、継手が降伏するまで割裂が進展していくことがわかる。この間、抵抗モーメントと接合部変形角は直線的に上昇し、さらに顎の圧壊で粘っている。そこで図 4.2.1～4.2.3 で想定した力学モデルは、顎の下端が支圧強度に達するまでのものであることから、図 4.3.1 に示した顎の下端が支圧強度に達した後、塑性域が少しずつ上昇する時の力学モデルから回転剛性評価式を導く必要があったことを実証した。

【ベイマツ】

図 5.2.1 より、割裂をしなかった 4 体の試験体 (*DH300-e15-L300-3*、*DH180-e30-L300-5*、*DH180-e60-L300-1*、*DH180-e15-L180-6*) を除き、概ね理論値と実験値はよく一致、若しくは安全側で推定できた。

【スギ】

同じく、スギの場合も図 5.2.2 より、割裂をしなかった 1 体の試験体 (*CH180-e15-L180-4*) を除き、概ね理論値と実験値はよく一致、若しくは安全側で推定できた。

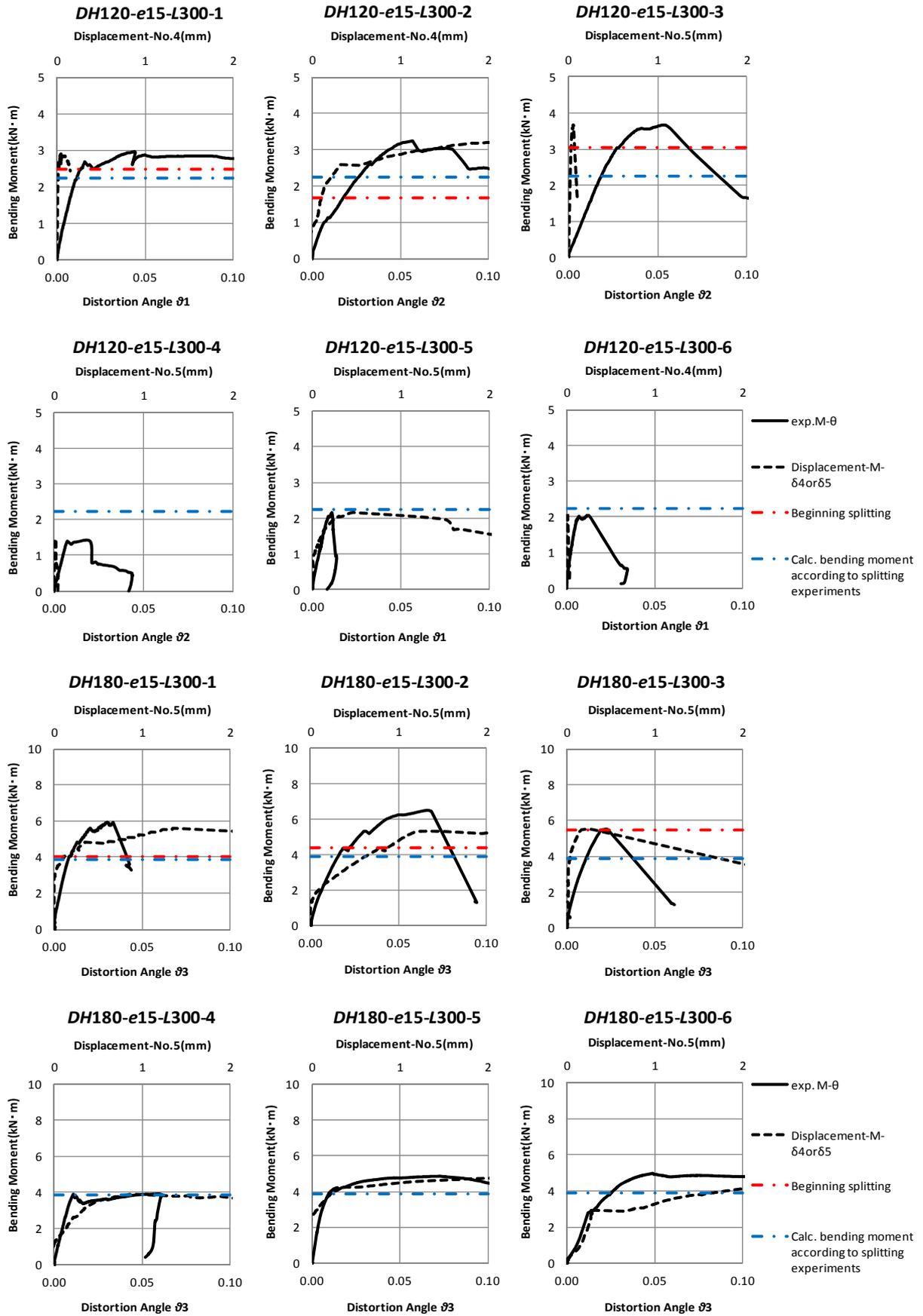


図 5.2.1 ベイマツの試験体別割裂耐力の理論値と実験値の比較その1

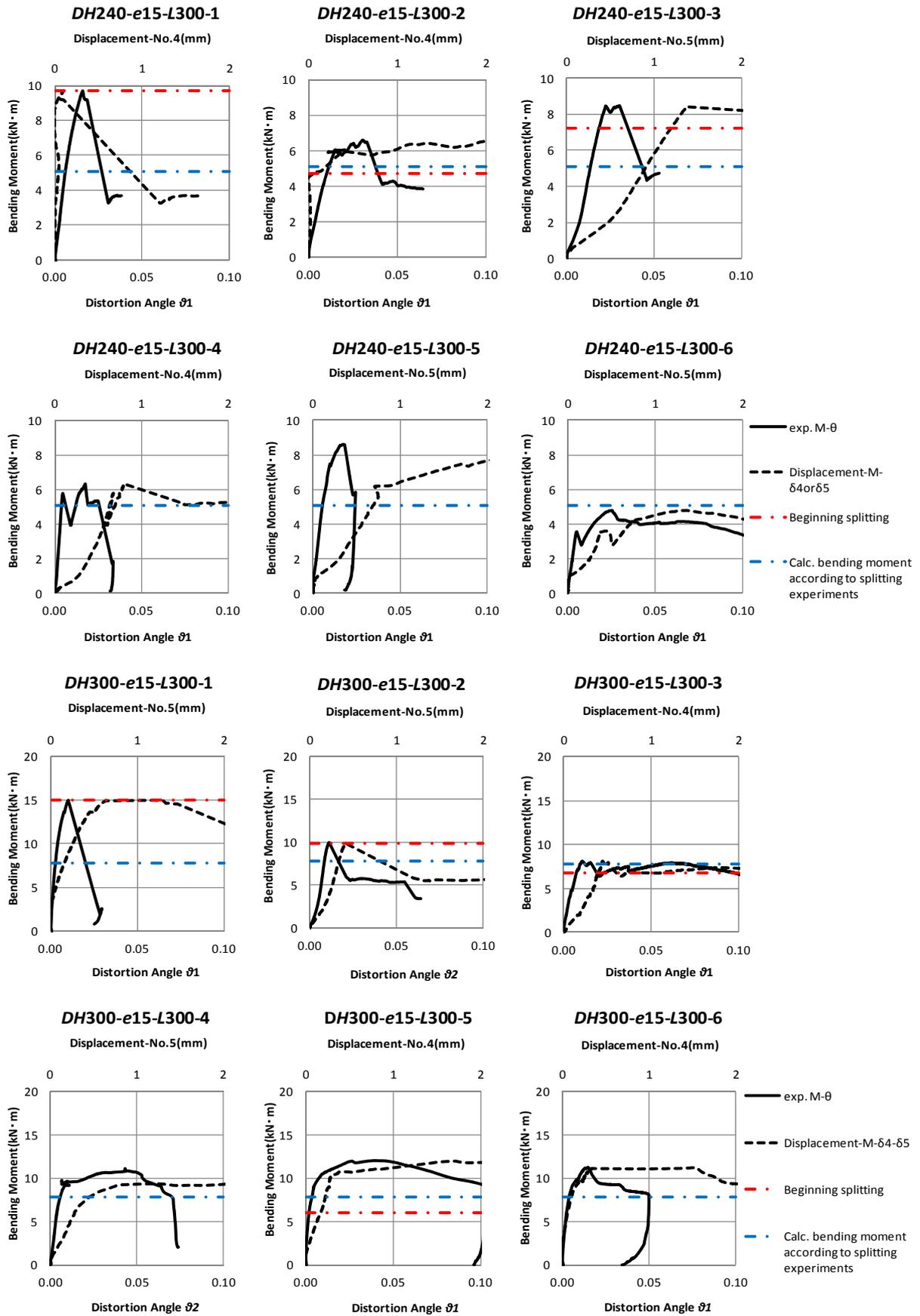


図 5.2.1 ベイマツの試験体別割裂耐力の理論値と実験値の比較その 2

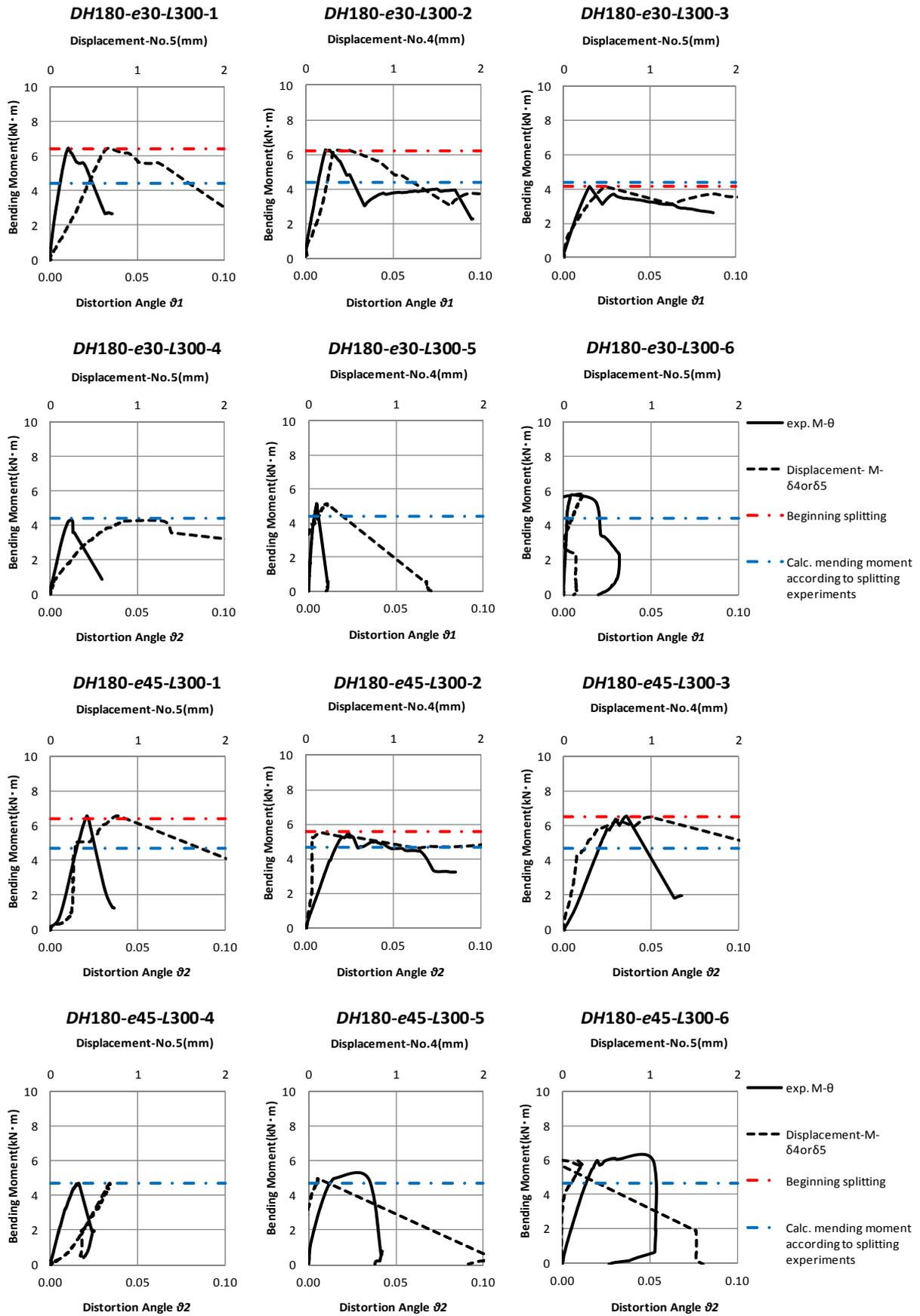


図 5.2.1 ベイマツの試験体別割裂耐力の理論値と実験値の比較その 3

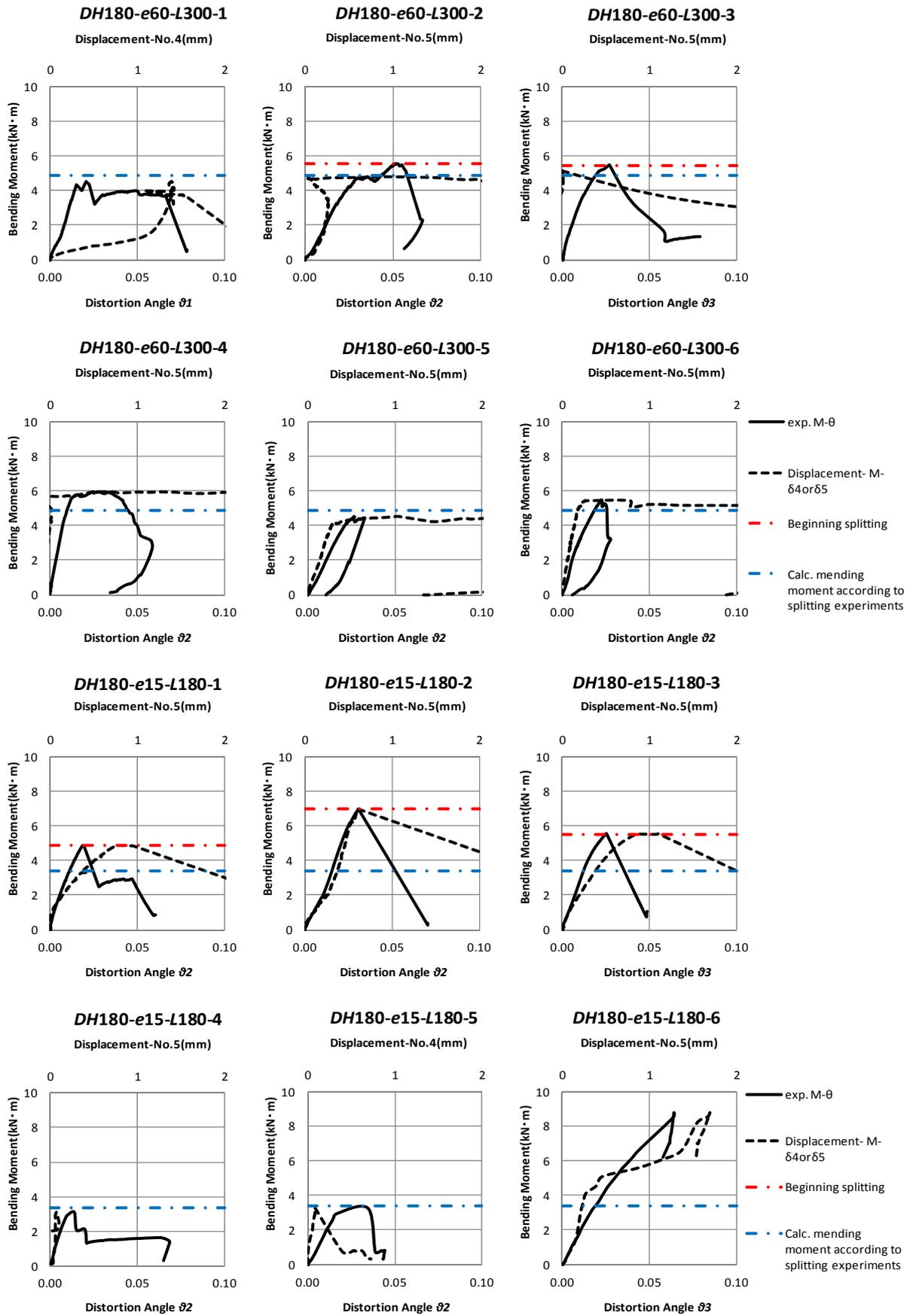


図 5.2.1 ベイマツの試験体別割裂耐力の理論値と実験値の比較その 4

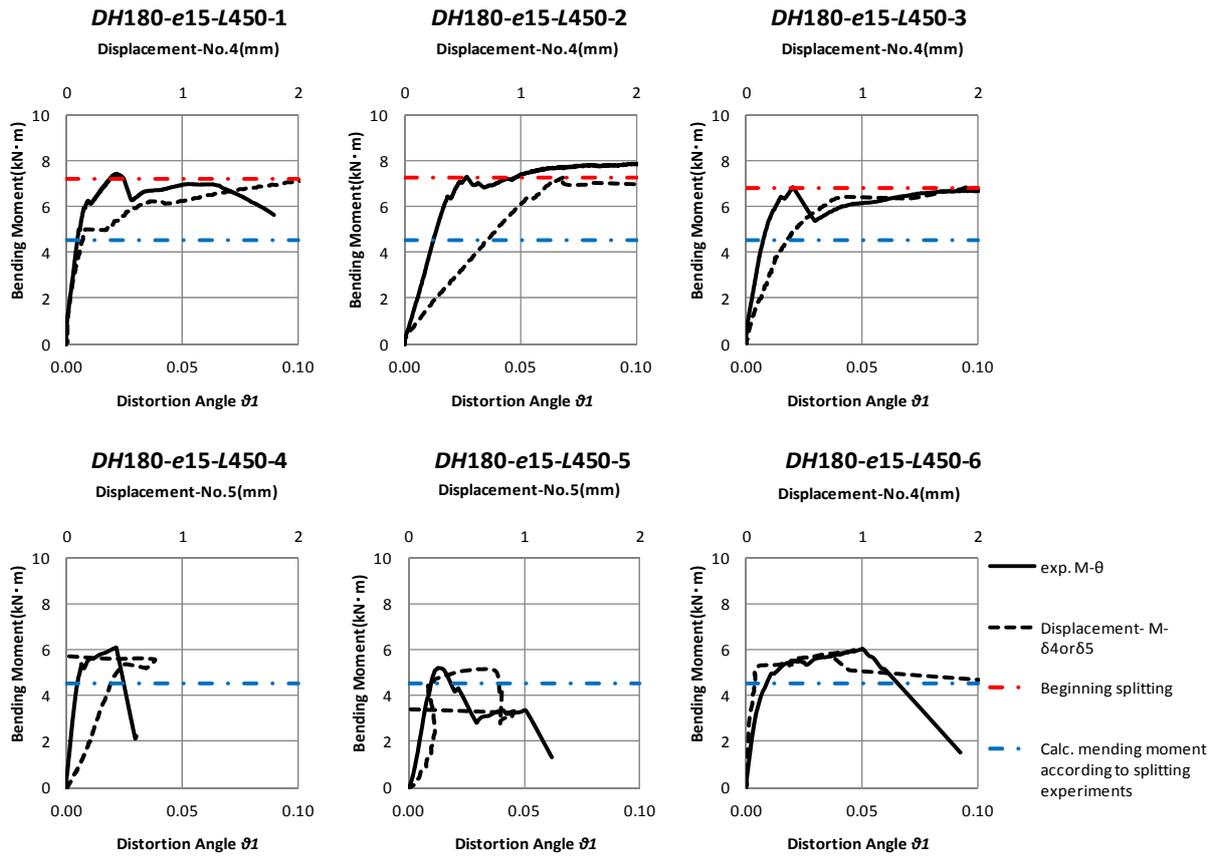


図 5.2.1 バイマツの試験体別割裂耐力の理論値と実験値の比較その 5

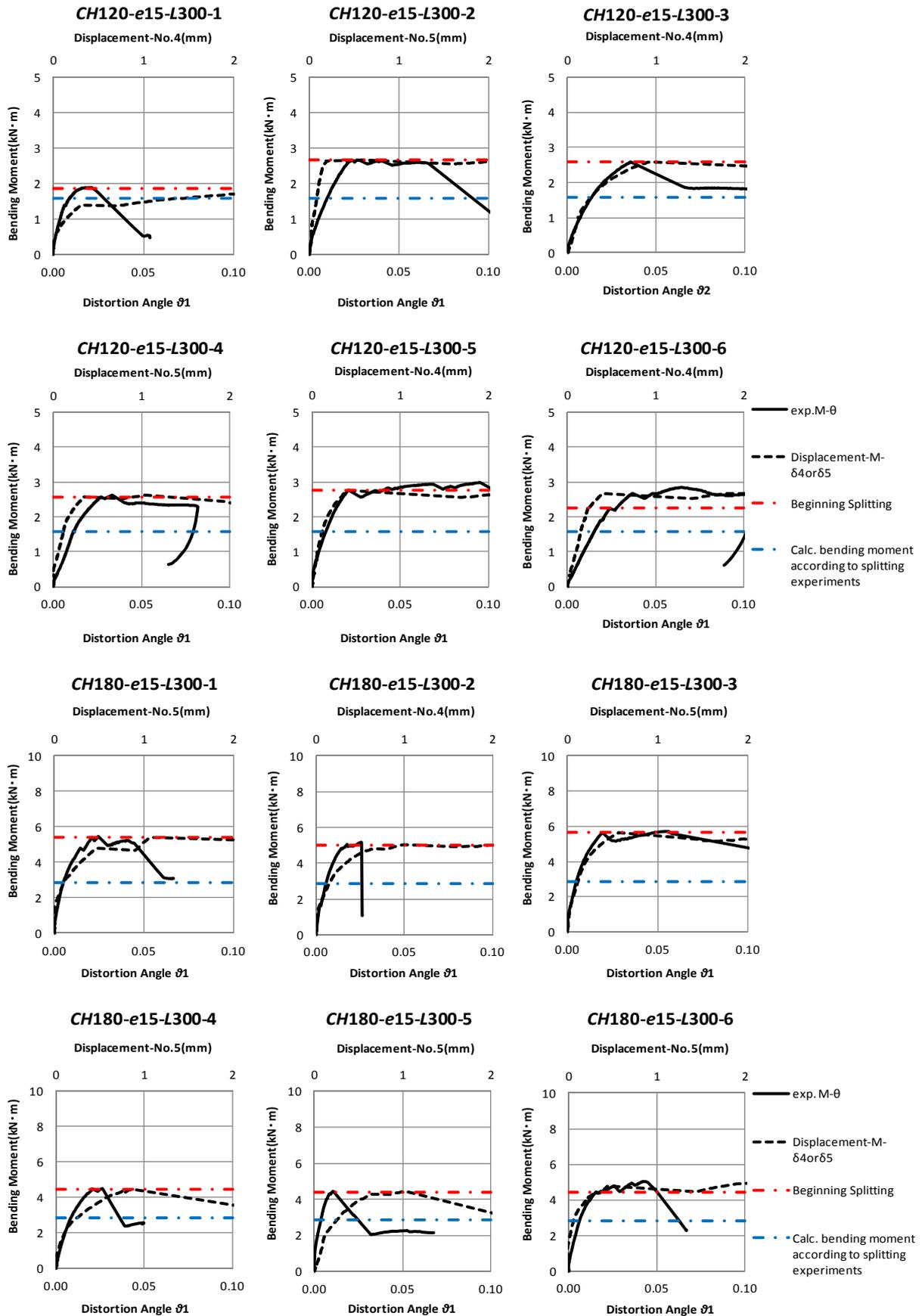


図 5.2.2 スギの試験体別割裂耐力の理論値と実験値の比較その 1

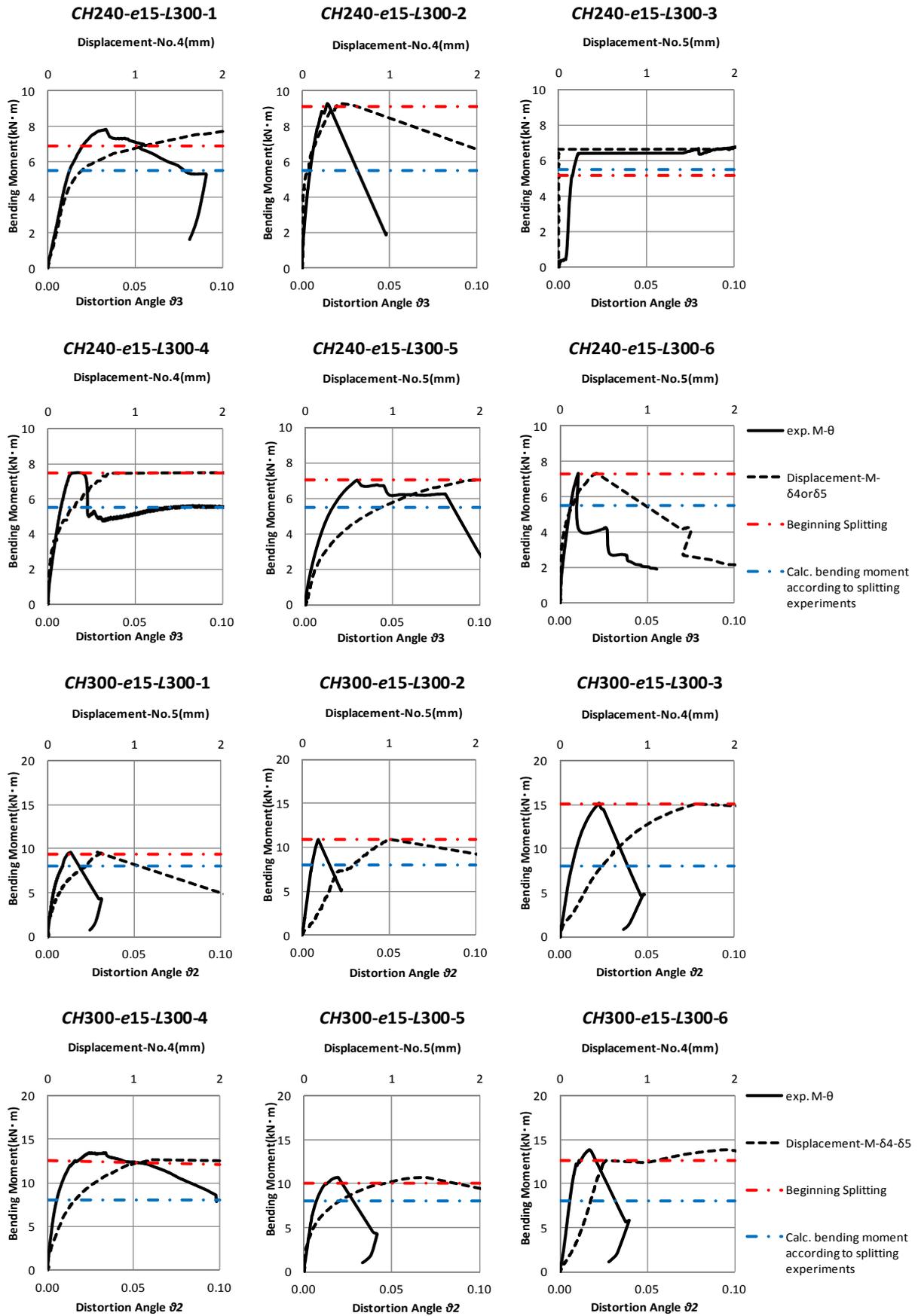


図 5.2.2 スギの試験体別割裂耐力の理論値と実験値の比較その 2

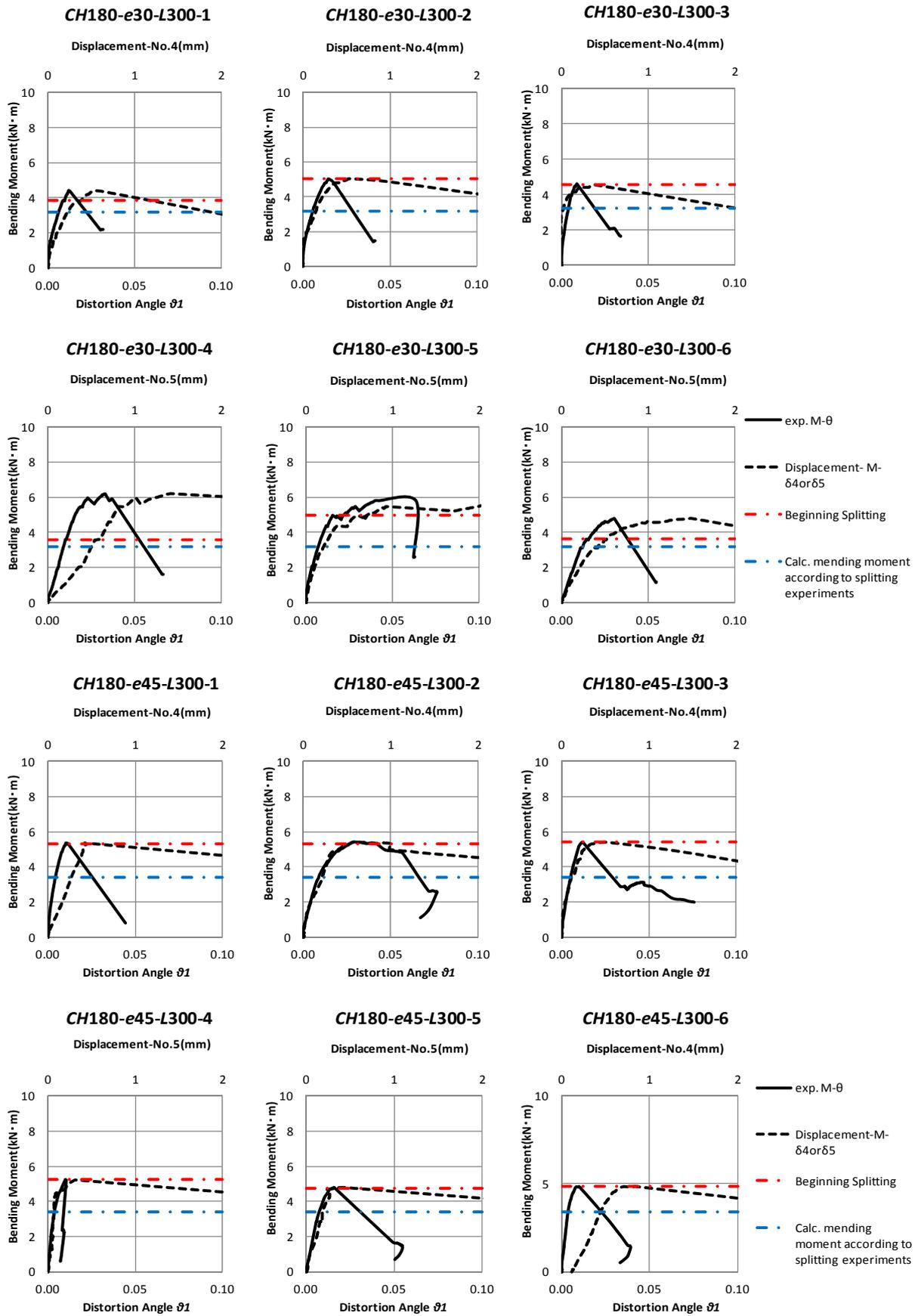


図 5.2.2 スギの試験体別割裂耐力の理論値と実験値の比較その 3

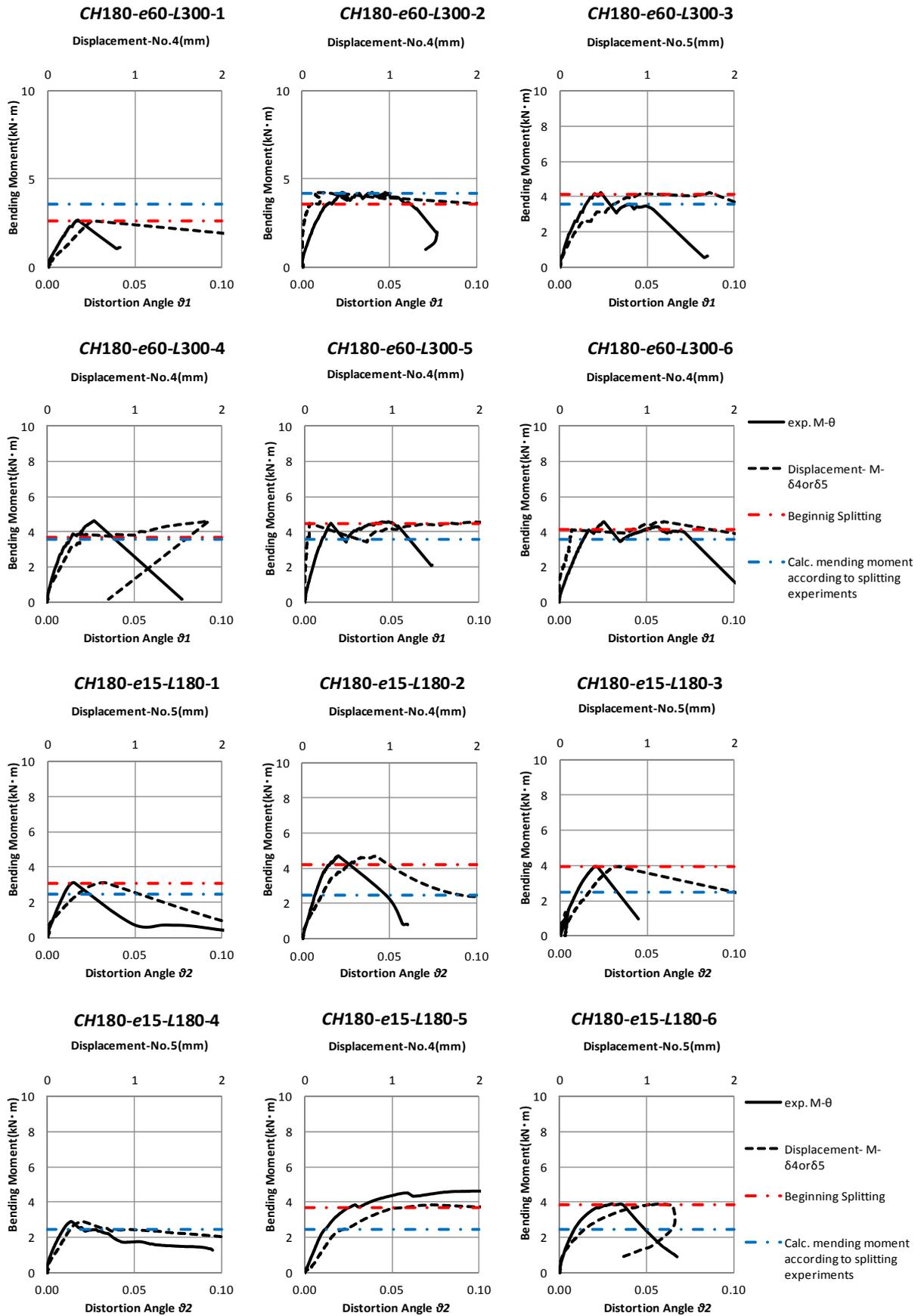


図 5.2.2 スギの試験体別割裂耐力の理論値と実験値の比較その 4

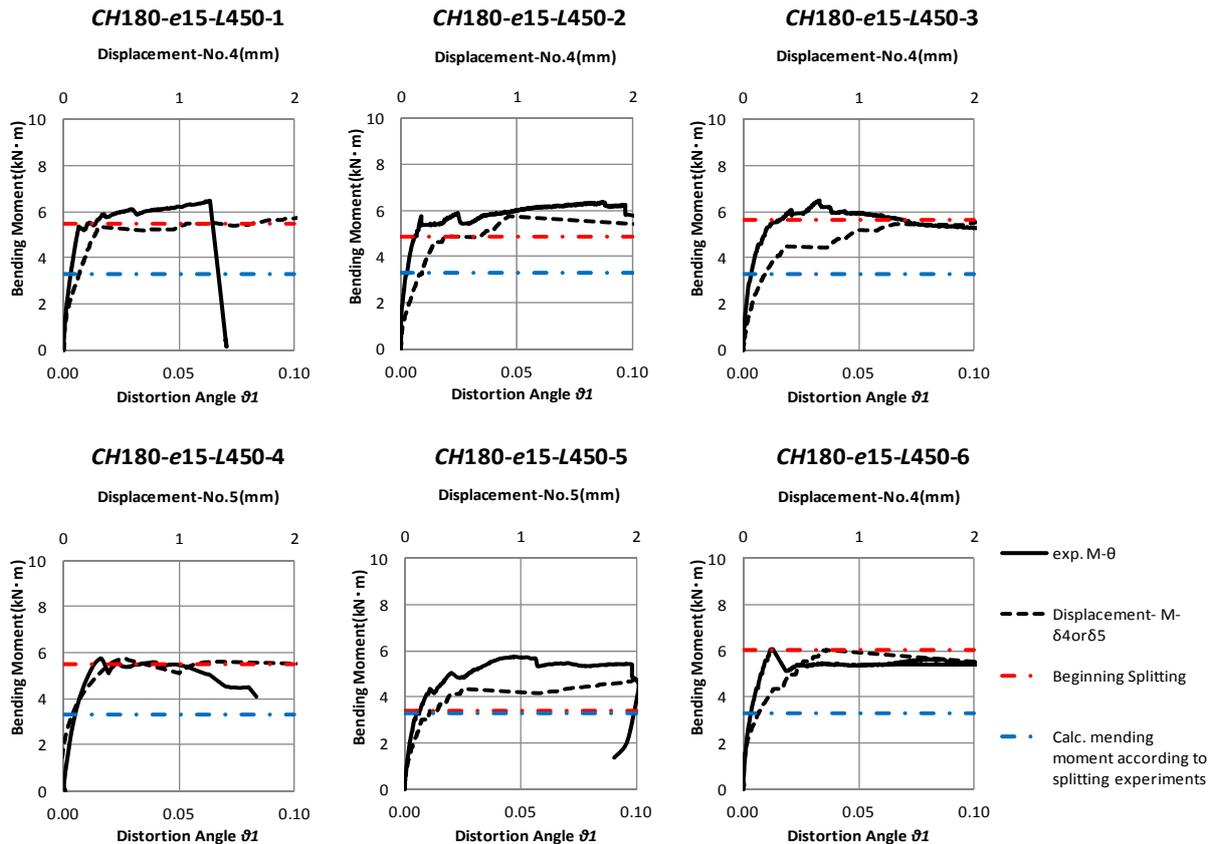


図 5.2.2 スギの試験体別割裂耐力の理論値と実験値の比較その 5

5.2.2.3 割裂高さ

表 5.2.4 は胴付に発生した割裂高さを樹種毎に試験体種別、全試験体別の平均を示したものである。割裂は複数箇所が発生することがあったが、最初に発生した割裂の高さを採用した。

【ベイマツ】

ベイマツの試験体では、96 体中 92 体で割裂が先行して発生した。割裂高さを試験体毎に見ると材背の 1/13~1/3、試験体種別平均で見ると 1/7~1/5、全試験体平均では 1/6 であった。

【スギ】

一方、スギの試験体では、96 体中 95 体で割裂が先行して発生した。割裂高さを試験体毎に見ると材背の 1/10~1/2、試験体種別平均で見ると 1/6~1/4、全試験体平均で見ると 1/5 であった。

尚、スギについては、今回、芯持ち材であったため、髄付近で割裂するものが 54 体中 28 体と約半数あった。このようなことから平角材は干割れの影響を接合部に与えないためにも芯去り材が望ましいと思われる。

表 5.2.4 追掛継の胴付に発生した割裂高さ

Parameter	<i>Pseudotsuga menziesii</i>							<i>Cryptomeria japonica</i>							
	Specimen Number	割裂高さ: h_e (mm)				平均	h_e/H	Specimen Number	割裂高さ: h_e (mm)				平均	h_e/H	
		上木		下木					上顎		下顎				
	内	外	内	外			内	外	内	外					
Material height	DH120-e15-L300-1	27.27	20.64	6.67	13.13	16.93	0.14	CH120-e15-L300-1	52.00	18.46	48.75	10.00	32.30	0.27	
	DH120-e15-L300-2	21.67	32.43	20.00	14.40	22.12	0.18	CH120-e15-L300-2	10.59	18.26	8.00	20.87	14.43	0.12	
	DH120-e15-L300-3	-	18.26	-	13.33	15.80	0.13	CH120-e15-L300-3	15.56	16.36	14.12	11.43	14.37	0.12	
	DH120-e15-L300-4	28.49	41.92	-	27.06	32.49	0.27	CH120-e15-L300-4	47.14	31.30	61.62	7.50	36.89	0.31	
	DH120-e15-L300-5	25.68	26.83	30.01	23.19	26.43	0.22	CH120-e15-L300-5	12.00	14.40	19.35	20.43	16.55	0.14	
	DH120-e15-L300-6	52.35	46.25	12.51	14.72	31.46	0.26	CH120-e15-L300-6	7.50	17.50	10.14	9.60	11.19	0.09	
		31.09	31.06	17.30	17.64	24.27	0.20		24.13	19.38	27.00	13.30	20.95	0.17	
	DH180-e15-L300-1	34.62	29.19	86.36	62.79	53.24	0.30	CH180-e15-L300-1	18.46	22.50	-	-	20.48	0.11	
	DH180-e15-L300-2	36.43	48.65	2.07	28.13	28.82	0.16	CH180-e15-L300-2	54.47	11.43	17.14	30.00	28.26	0.16	
	DH180-e15-L300-3	20.45	4.09	22.50	33.75	20.20	0.11	CH180-e15-L300-3	160.00	20.57	16.00	26.09	55.66	0.31	
	DH180-e15-L300-4	29.06	30.00	36.10	39.17	33.58	0.19	CH180-e15-L300-4	12.27	25.31	20.00	30.86	22.11	0.12	
	DH180-e15-L300-5	-	32.42	42.06	38.09	37.52	0.21	CH180-e15-L300-5	7.00	30.94	21.95	24.32	21.05	0.12	
	DH180-e15-L300-6	6.22	26.79	13.43	21.82	17.07	0.09	CH180-e15-L300-6	90.00	66.32	8.67	25.71	47.68	0.26	
		25.36	28.52	33.75	37.29	31.23	0.17		57.03	29.51	16.75	27.40	32.67	0.18	
	DH240-e15-L300-1	-	26.67	101.05	103.64	77.12	0.32	CH240-e15-L300-1	124.14	85.33	123.87	127.66	115.25	0.48	
	DH240-e15-L300-2	23.48	35.74	42.67	48.00	37.47	0.16	CH240-e15-L300-2	11.80	24.00	28.80	31.84	24.11	0.10	
	DH240-e15-L300-3	11.43	38.92	50.00	45.57	36.48	0.15	CH240-e15-L300-3	32.00	32.73	33.75	33.60	33.02	0.14	
	DH240-e15-L300-4	13.47	6.84	73.85	63.53	39.42	0.16	CH240-e15-L300-4	41.54	49.66	52.00	58.87	50.52	0.21	
	DH240-e15-L300-5	22.77	19.15	26.68	24.18	23.20	0.10	CH240-e15-L300-5	47.14	52.17	57.60	38.40	48.83	0.20	
	DH240-e15-L300-6	15.35	15.94	17.96	33.12	20.59	0.09	CH240-e15-L300-6	60.00	32.00	44.44	56.00	48.11	0.20	
		17.30	23.88	52.03	53.01	36.55	0.15		52.77	45.98	56.74	57.73	53.31	0.22	
	DH300-e15-L300-1	22.13	55.67	96.23	20.00	48.51	0.16	CH300-e15-L300-1	26.79	45.92	62.69	70.00	51.35	0.17	
	DH300-e15-L300-2	36.73	34.09	45.00	30.93	36.69	0.12	CH300-e15-L300-2	30.51	43.75	26.55	39.62	35.11	0.12	
	DH300-e15-L300-3	-	-	-	-	-	-	CH300-e15-L300-3	20.34	42.00	35.82	26.32	31.12	0.10	
	DH300-e15-L300-4	35.00	47.00	65.00	51.00	49.50	0.17	CH300-e15-L300-4	38.40	56.25	159.38	135.00	97.26	0.32	
	DH300-e15-L300-5	32.00	33.00	49.00	45.50	39.88	0.13	CH300-e15-L300-5	59.09	66.00	41.54	40.91	51.88	0.17	
	DH300-e15-L300-6	36.54	50.68	66.02	42.91	49.04	0.16	CH300-e15-L300-6	41.54	47.22	54.10	60.50	50.84	0.17	
		32.48	44.09	64.25	38.07	44.72	0.15		36.11	50.19	63.34	62.06	52.93	0.18	
	Cogging width	DH180-e15-L300-1	34.62	29.19	86.36	62.79	53.24	0.30	CH180-e15-L300-1	18.46	22.50	-	-	20.48	0.11
		DH180-e15-L300-2	36.43	48.65	2.07	28.13	28.82	0.16	CH180-e15-L300-2	54.47	11.43	17.14	30.00	28.26	0.16
		DH180-e15-L300-3	20.45	4.09	22.50	33.75	20.20	0.11	CH180-e15-L300-3	160.00	20.57	16.00	26.09	55.66	0.31
		DH180-e15-L300-4	29.06	30.00	36.10	39.17	33.58	0.19	CH180-e15-L300-4	12.27	25.31	20.00	30.86	22.11	0.12
		DH180-e15-L300-5	-	32.42	42.06	38.09	37.52	0.21	CH180-e15-L300-5	7.00	30.94	21.95	24.32	21.05	0.12
		DH180-e15-L300-6	6.22	26.79	13.43	21.82	17.07	0.09	CH180-e15-L300-6	90.00	66.32	8.67	25.71	47.68	0.26
			25.36	28.52	33.75	37.29	31.23	0.17		57.03	29.51	16.75	27.40	32.67	0.18
		DH180-e30-L300-1	83.08	50.40	7.71	17.42	39.65	0.22	CH180-e30-L300-1	45.96	10.59	24.00	10.00	22.64	0.13
DH180-e30-L300-2		57.07	43.90	5.22	45.82	38.00	0.21	CH180-e30-L300-2	63.53	87.57	38.08	36.00	56.29	0.31	
DH180-e30-L300-3		50.00	15.43	27.00	30.86	30.82	0.17	CH180-e30-L300-3	45.00	10.59	47.76	13.85	29.30	0.16	
DH180-e30-L300-4		46.41	26.48	23.05	29.07	31.25	0.17	CH180-e30-L300-4	34.05	21.82	30.00	28.42	28.57	0.16	
DH180-e30-L300-5		-	-	-	-	-	-	CH180-e30-L300-5	32.31	25.71	22.50	25.71	26.56	0.15	
DH180-e30-L300-6		41.05	16.32	40.19	38.11	33.92	0.19	CH180-e30-L300-6	106.36	85.00	16.00	25.71	58.27	0.32	
		55.52	30.51	20.63	32.25	34.73	0.19		54.54	40.21	29.72	23.28	36.94	0.21	
DH180-e45-L300-1		0.53	26.47	15.88	13.24	14.03	0.08	CH180-e45-L300-1	15.65	9.73	75.60	80.00	45.25	0.25	
DH180-e45-L300-2		20.77	26.47	-	15.88	21.04	0.12	CH180-e45-L300-2	16.00	28.29	41.71	32.50	29.62	0.16	
DH180-e45-L300-3		58.50	37.89	8.71	15.88	30.25	0.17	CH180-e45-L300-3	51.00	84.71	21.95	32.73	47.60	0.26	
DH180-e45-L300-4		18.83	15.99	64.92	34.74	33.62	0.19	CH180-e45-L300-4	-	-	40.50	21.82	31.16	0.17	
DH180-e45-L300-5		48.80	59.90	48.68	27.44	46.21	0.26	CH180-e45-L300-5	44.00	20.87	32.00	20.57	29.36	0.16	
DH180-e45-L300-6		48.60	23.61	56.32	38.38	41.73	0.23	CH180-e45-L300-6	4.86	15.43	70.24	27.27	29.45	0.16	
		32.67	31.72	38.90	24.26	31.89	0.18		26.30	31.80	47.00	35.81	35.23	0.20	
DH180-e60-L300-1		-	-	-	-	-	-	CH180-e60-L300-1	62.79	25.71	-	59.14	49.22	0.27	
DH180-e60-L300-2		5.40	6.00	120.00	83.84	53.81	0.30	CH180-e60-L300-2	-	-	21.95	15.43	18.69	0.10	
DH180-e60-L300-3		79.83	55.00	43.90	34.05	53.20	0.30	CH180-e60-L300-3	91.76	70.00	84.26	51.43	74.36	0.41	
DH180-e60-L300-4		24.99	17.74	32.92	11.92	21.89	0.12	CH180-e60-L300-4	-	-	40.21	38.57	39.39	0.22	
DH180-e60-L300-5		52.42	39.48	27.66	17.20	34.19	0.19	CH180-e60-L300-5	-	-	12.56	20.00	16.28	0.09	
DH180-e60-L300-6		23.79	20.96	12.68	24.13	20.39	0.11	CH180-e60-L300-6	48.84	17.14	58.70	26.47	37.79	0.21	
		37.29	27.84	47.43	34.23	36.70	0.20		67.80	37.62	43.53	35.17	46.03	0.26	
Joint length		DH180-e15-L180-1	-	14.21	32.73	19.29	22.07	0.12	CH180-e15-L180-1	38.82	36.82	12.00	25.71	28.34	0.16
		DH180-e15-L180-2	20.77	24.55	9.64	20.80	18.94	0.11	CH180-e15-L180-2	-	-	16.74	23.40	20.07	0.11
		DH180-e15-L180-3	23.80	32.73	3.83	20.00	20.09	0.11	CH180-e15-L180-3	-	30.64	31.15	35.29	32.36	0.18
		DH180-e15-L180-4	30.18	14.04	-	12.92	19.05	0.11	CH180-e15-L180-4	-	-	-	-	-	-
		DH180-e15-L180-5	39.62	24.64	21.95	32.58	29.70	0.16	CH180-e15-L180-5	35.12	23.08	39.77	35.22	33.30	0.18
		DH180-e15-L180-6	-	-	-	-	-	-	CH180-e15-L180-6	0.40	34.29	32.40	38.30	26.35	0.15
			28.59	22.03	17.04	21.12	22.19	0.12		24.78	31.20	26.41	31.58	28.50	0.16
		DH180-e15-L300-1	34.62	29.19	86.36	62.79	53.24	0.30	CH180-e15-L300-1	18.46	22.50	-	-	20.48	0.11
	DH180-e15-L300-2	36.43	48.65	2.07	28.13	28.82	0.16	CH180-e15-L300-2	54.47	11.43	17.14	30.00	28.26	0.16	
	DH180-e15-L300-3	20.45	4.09	22.50	33.75	20.20	0.11	CH180-e15-L300-3	160.00	20.57	16.00	26.09	55.66	0.31	
	DH180-e15-L300-4	29.06	30.00	36.10	39.17	33.58	0.19	CH180-e15-L300-4	12.27	25.31	20.00	30.86	22.11	0.12	
	DH180-e15-L300-5	-	32.42	42.06	38.09	37.52	0.21	CH180-e15-L300-5	7.00	30.94	21.95	24.32	21.05	0.12	
	DH180-e15-L300-6	6.22	26.79	13.43	21.82	17.07	0.09	CH180-e15-L300-6	90.00	66.32	8.67	25.71	47.68	0.26	
		25.36	28.52	33.75	37.29	31.23	0.17		57.03	29.51	16.75	27.40	32.67	0.18	
	DH180-e15-L450-1	40.00	38.08	18.00	24.23	30.08	0.17	CH180-e15-L450-1	32.24	40.65	24.83	40.00	34.43	0.19	
	DH180-e15-L450-2	26.34	16.67	57.45	46.80	36.81	0.20	CH180-e15-L450-2	73.64	52.26	75.00	81.00	70.47	0.39	
	DH180-e15-L450-3	37.50	31.03	26.34	33.33	32.05	0.18	CH180-e15-L450-3	20.00	26.76	86.40	36.92	42.52	0.24	
	DH180-e15-L450-4	51.57	38.71	12.46	26.13	32.22	0.18	CH180-e15-L450-4	100.47	101.25	12.86	15.43	57.50	0.32	
	DH180-e15-L450-5	28.48	17.96	57.65	48.84	38.23	0.21	CH180-e15-L450-5	81.82	100.00	29.19	6.43	54.36	0.30	
	DH180-e15-L450-6	17.77	28.44	19.08	23.45	22.19	0.12	CH180-e15-L450-6	-	35.36	19.57	24.32	26.42	0.15	
		33.61	28.48	31.83	33.80	31.93	0.18		61.63	59.38	41.31	34.02	49.08</		

5.2.2.4 回転剛性の理論値と実験値の比較と曲げ耐力推定値の提案

図 5.2.3～5.2.6 及び表 5.2.5 に弾塑性域の回転剛性と胴付に割裂が発生した時の継手の抵抗モーメント、顎の下端が支圧強度に達した時の継手の抵抗モーメントの実験値と理論値の比較を示す。図 5.2.3～5.2.5 の赤い実線は弾性域の回転剛性の理論値で、赤い一点鎖線は胴付が割裂する時の継手の抵抗モーメントの理論値である。また青の実線は、顎の下端が支圧強度に達するまでの塑性域の回転剛性の理論値で、青の一点鎖線は、顎の下端が支圧強度に達した時の継手の抵抗モーメントの理論値を示している。尚、顎の下端が支圧強度に達した後の回転剛性は、図 5.2.3～5.2.5 より適用する部分がほとんど無いことが明らかになった。

弾塑性域の回転剛性の実験値は同じパラメータ内においても大きくばらついており、材料物性や加工精度などの影響によるところが大きいものと思われる。但し、それらの影響を差し引いて見た場合、同図より、追掛継の回転剛性の実験値と理論値はよく一致していることが判る。

また表 5.2.5 及び図 5.2.6 より、材背、顎幅、継手長さのパラメータの変化に対する弾性域の回転剛性の増減の傾向についても実験値と理論値は概ねよく一致しているといえる。

今回の回転剛性の理論値は、材料から直接測定したヤング係数の値を用いて平井・小松式により面圧剛性を求め、これを使って計算値を算出しているが、曲げヤング係数と接合部の局所的な面圧剛性の相関がどの程度あるかについては確かめていない。設計式の妥当性についてより詳細に言及するには、今後はこれらの相関について検討することが必要であると考えられる。

顎の下端が支圧強度に達した時の抵抗モーメントの理論値と実験値は、いずれのパラメータでもよく一致、若しくは安全側で評価できた。よって、追掛継の曲げ耐力は、顎が支圧強度に達する時の抵抗モーメントで推定できるものと考えられる。しかし、顎幅別のパラメータにおいて、両樹種とも顎幅 30mm 以上は、顎の下端が支圧強度に達する前に顎のせん断破壊、若しくは継手の曲げ破壊によって終局を迎えていることから、理論値が実験値を推定できなかった。これは、割裂と同時に継手の平面保持仮定が崩れ、割裂より上部と顎の引張側縁からせん断破壊する高さに応力が集中することにより実験値が推定値を大きく下回ったものと思われる。よって、今後は追掛継の顎のせん断強度の評価が課題の一つとなる。

尚、胴付が割裂した時の継手の抵抗モーメントの理論値と実験値の比較は、前項で既に述べており、本項では触れない。

【材背別】

図 5.2.3、図 5.2.6、表 5.2.5 より、接合部の回転剛性と材背の関係について見ると両樹種ともに理論値と実験値はよく一致している。但し、ベイマツの材背 300mm では実験値のばらつきが大きい。

図 5.2.6 より、理論値と実験値の平均値の近次式の累乗が、2.1～2.7 の間にあるのは、断面 2 次モーメント： I の材背： H の影響をよく反映しているものと考えられる。

顎の下端が支圧強度に達した時の抵抗モーメントの理論値と実験値は、材背別の場合、概ねよく一致しているが、スギの $H120$ 、 180 、 300mm の場合は実験値より安全側での評価となった。

【顎幅別】

図 5.2.4、図 5.2.6、表 5.2.5 より、すべての顎幅で接合部の回転剛性の理論値と実験値はよく一致している。但し、スギの実験値の顎幅 15、30、45mm において安全側での評価となった。

図 5.2.6 より、理論値は顎幅の増加により回転剛性が上昇する傾向があるが、傾きは緩やかであり、回転剛性に対する顎幅の影響は、他のパラメータよりも小さいものであることが判った。

両樹種の理論値と実験値は、ベイマツの 30mm、スギの 45mm の時に最も回転剛性が高く、理論値はこれとよく一致している。但し、コントロールの *H180-e15-L300* の曲げヤング係数で校正すると、理論では顎幅が大きくなるほど、回転剛性は高くなる。

またベイマツの 45mm 以上の実験値とスギの 60mm の実験値では、回転剛性が低下した。これは継手部分の材幅が顎幅の増加により減少したため、継手部分の材の曲げ変形による影響が現れたものと考えられる。

顎の下端が支圧強度に達した時の抵抗モーメントの理論値と実験値は、顎幅別の場合、両樹種とも 30、45、60mm の時、顎の下端が支圧強度に達する前に顎のせん断破壊、若しくは継手の曲げ破壊によって終局を迎えていることから、理論値が実験値を推定できなかった。

【継手長さ別】

図 5.2.5、図 5.2.6、表 5.2.5 より、ベイマツでは、理論値と実験値とよく一致した。しかし、スギでは、実験値のばらつきがあり、特に 300、450mm において理論値は実験値に比べて回転剛性が低かった。これは、せん断長ささと面圧剛性の関係が線形の比例関係にないためであると考えられる。

また本来、接合部の回転剛性は、継手長さが長くなるにつれて理論値は高くなるが、表 5.2.1 より、ベイマツの 180mm の面圧剛性： K_E が 300mm に比べ 1.3 倍高かったため、すなわちヤング係数： E_0 が 1.3 倍高かったため、理論値が 450、180、300mm の順で回転剛性が高かった。

顎の下端が支圧強度に達した時の抵抗モーメントの理論値と実験値は、継手長さ別の場合、概ねよく一致しているが、スギの *L300*、450mm の場合は実験値より安全側での評価となった。

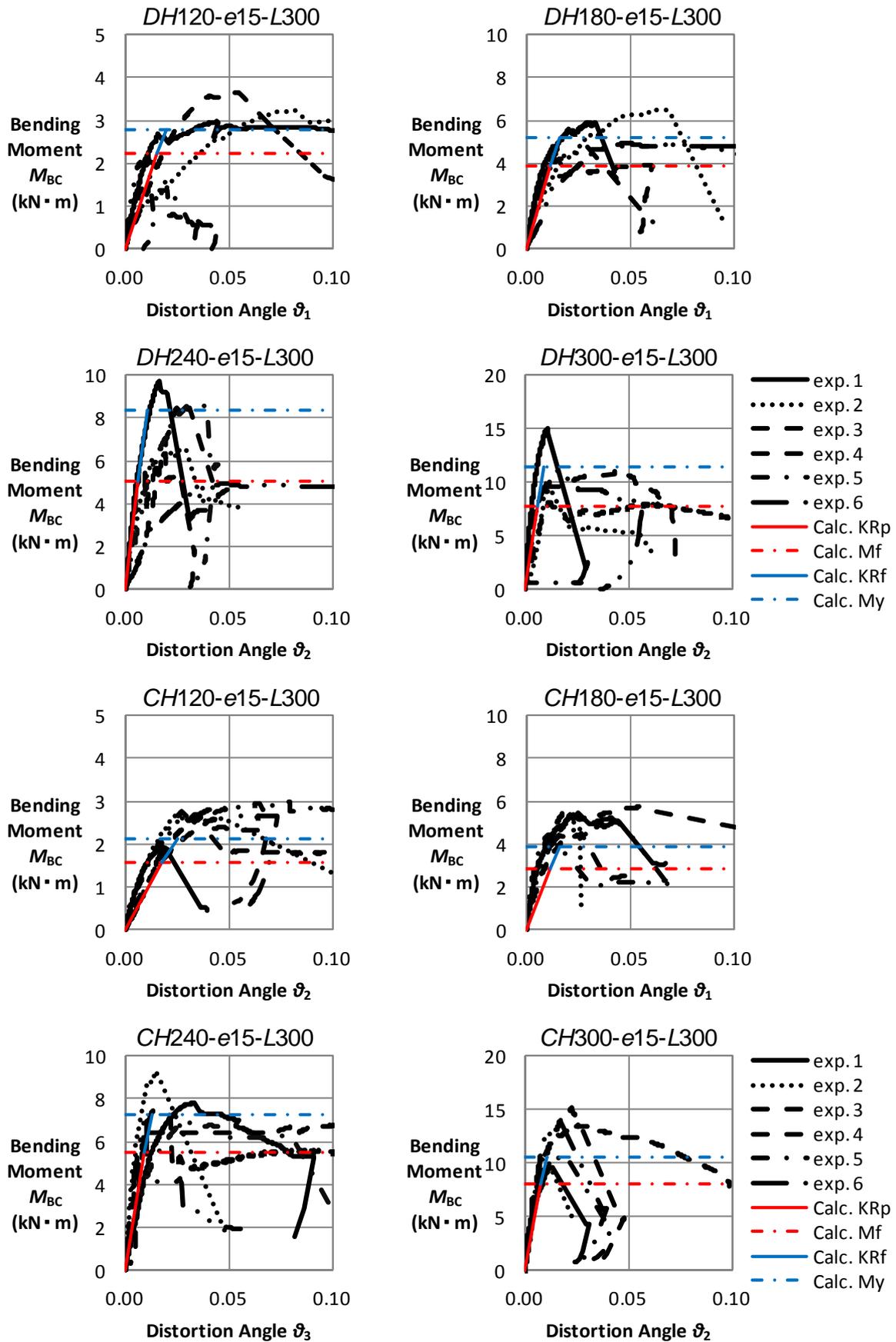


図 5.2.3 材背別 $M-\theta$ と回転剛性及び割裂耐力の理論値との比較

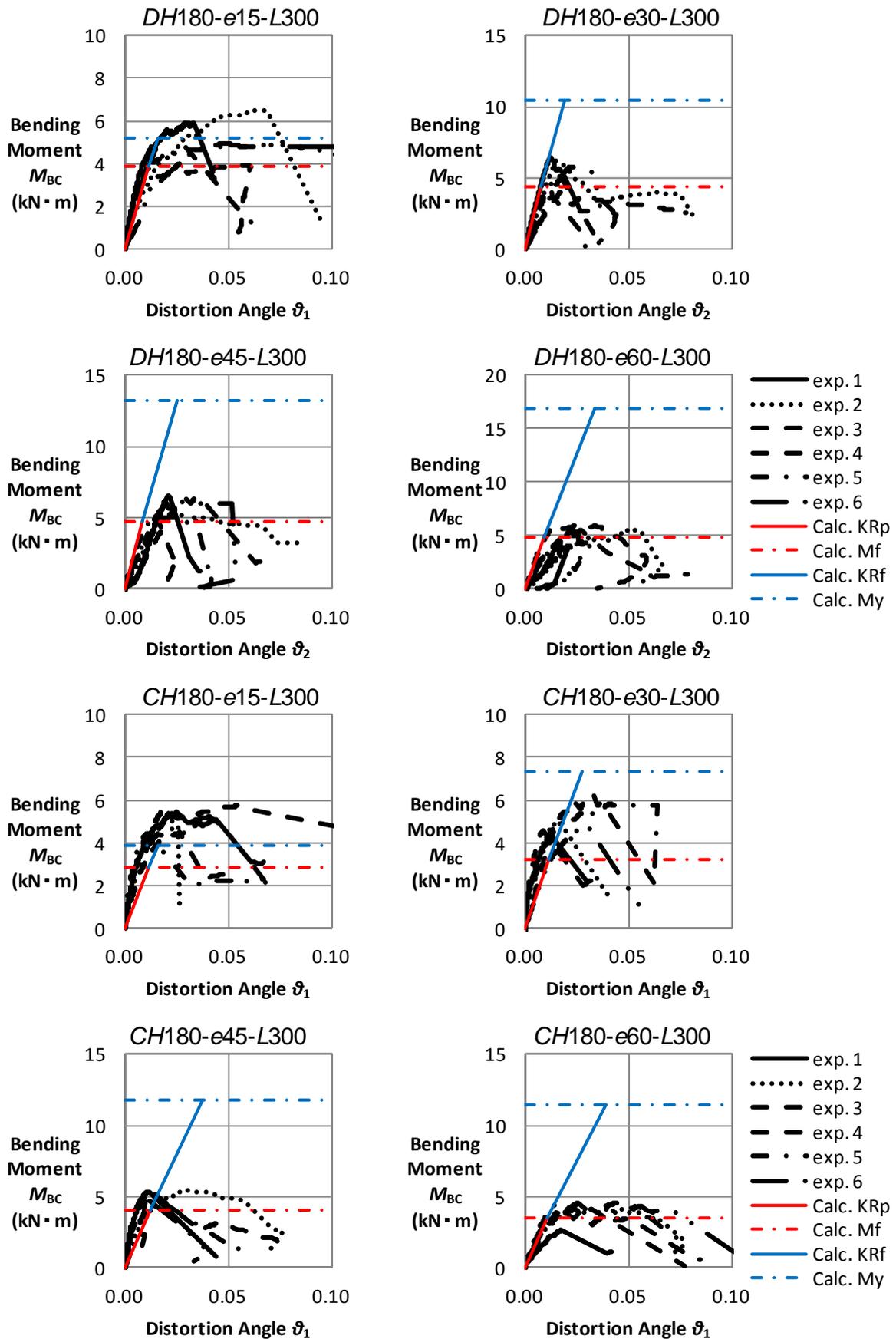


図 5.2.4 顎幅別 $M-\theta$ と回転剛性及び割裂耐力の理論値との比較

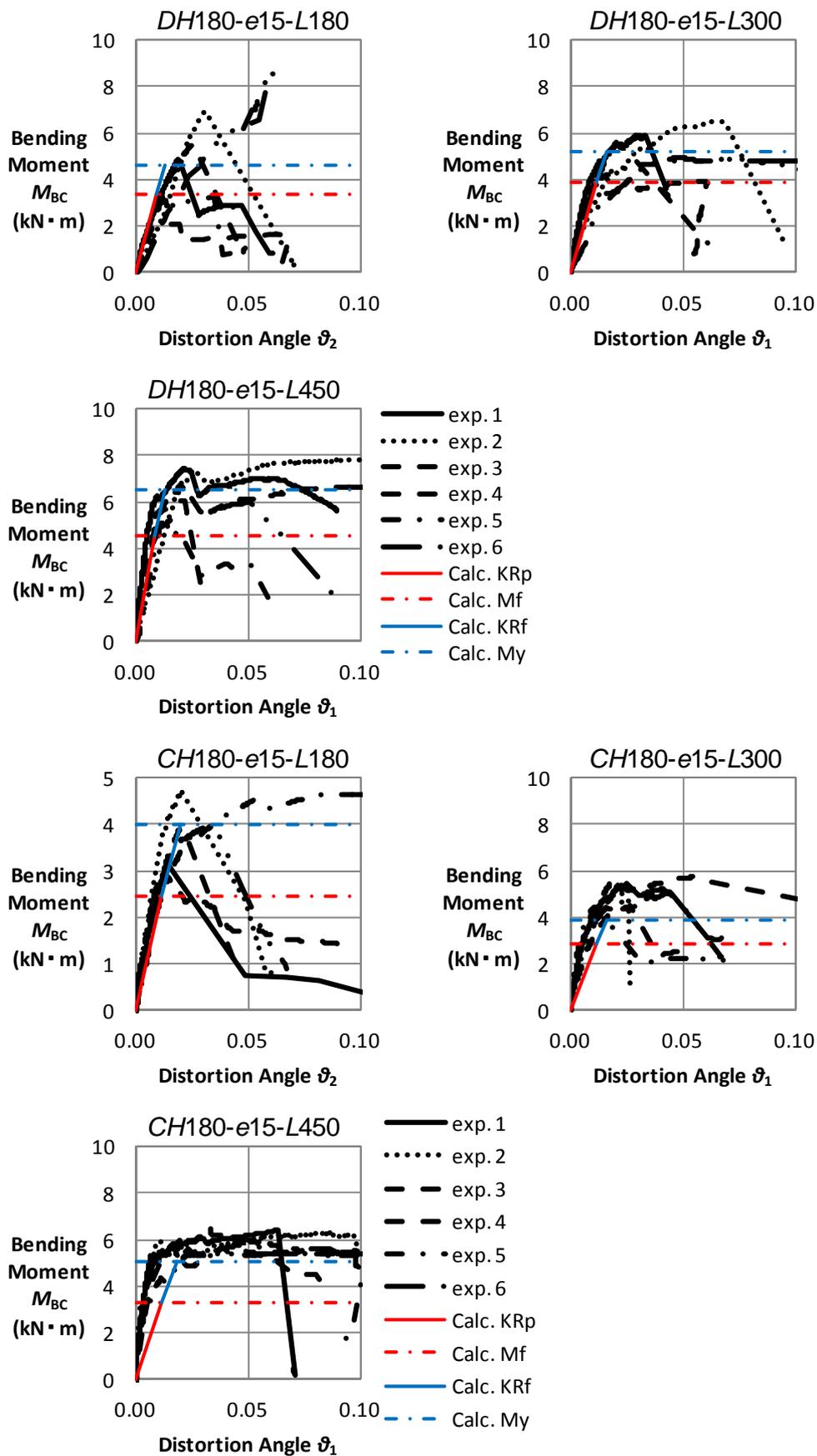


図 5.2.5 継手長さ別 $M-\theta$ と回転剛性及び割裂耐力の理論値との比較

表 5.2.5 弾性域の回転剛性の実験値と理論値の比較

Parameter	specimen number	K_R : Rotational Stiffness(\times kN \cdot m/rad)			specimen number	K_R : Rotational Stiffness(\times kN \cdot m/rad)		
		Experimental Value	C.V.	Calculation Value		Experimental Value	C.V.	Calculation Value
Material Height	DH120-e15-L300-1	224		150	CH120-e15-L300-1	99	90	
	DH120-e15-L300-2	68			CH120-e15-L300-2	154		
	DH120-e15-L300-3	122			CH120-e15-L300-3	87		
	DH120-e15-L300-4	203			CH120-e15-L300-4	95		
	DH120-e15-L300-5	251			CH120-e15-L300-5	170		
	DH120-e15-L300-6	430			CH120-e15-L300-6	177		
	Ave.	216	0.53	Ave.	130	0.29		
	DH180-e15-L300-1	503		344	CH180-e15-L300-1	517	252	
	DH180-e15-L300-2	255			CH180-e15-L300-2	504		
	DH180-e15-L300-3	419			CH180-e15-L300-3	537		
	DH180-e15-L300-4	409			CH180-e15-L300-4	369		
	DH180-e15-L300-5	480			CH180-e15-L300-5	1,025		
	DH180-e15-L300-6	192			CH180-e15-L300-6	404		
	Ave.	376	0.30	Ave.	559	0.39		
	DH240-e15-L300-1	935		837	CH240-e15-L300-1	460	587	
	DH240-e15-L300-2	615			CH240-e15-L300-2	1,261		
	DH240-e15-L300-3	283			CH240-e15-L300-3	693		
	DH240-e15-L300-4	793			CH240-e15-L300-4	821		
	DH240-e15-L300-5	453			CH240-e15-L300-5	447		
	DH240-e15-L300-6	374			CH240-e15-L300-6	1,105		
	Ave.	575	0.40	Ave.	798	0.38		
	DH300-e15-L300-1	2,360		1,286	CH300-e15-L300-1	1,434	1,025	
	DH300-e15-L300-2	684			CH300-e15-L300-2	1,354		
	DH300-e15-L300-3	826			CH300-e15-L300-3	1,634		
DH300-e15-L300-4	1,274		CH300-e15-L300-4		1,176			
DH300-e15-L300-5	4,220		CH300-e15-L300-5		1,411			
DH300-e15-L300-6	1,368		CH300-e15-L300-6		1,570			
Ave.	1,789	0.68	Ave.	1,430	0.10			
Cogging Width	DH180-e15-L300-1	503		344	CH180-e15-L300-1	517	252	
	DH180-e15-L300-2	255			CH180-e15-L300-2	504		
	DH180-e15-L300-3	419			CH180-e15-L300-3	537		
	DH180-e15-L300-4	409			CH180-e15-L300-4	369		
	DH180-e15-L300-5	480			CH180-e15-L300-5	1,025		
	DH180-e15-L300-6	192			CH180-e15-L300-6	404		
	Ave.	376	0.30	Ave.	559	0.39		
	DH180-e30-L300-1	625		581	CH180-e30-L300-1	60	283	
	DH180-e30-L300-2	442			CH180-e30-L300-2	672		
	DH180-e30-L300-3	263			CH180-e30-L300-3	1,063		
	DH180-e30-L300-4	470			CH180-e30-L300-4	334		
	DH180-e30-L300-5	428			CH180-e30-L300-5	394		
	DH180-e30-L300-6	311			CH180-e30-L300-6	259		
	Ave.	423	0.28	Ave.	464	0.70		
	DH180-e45-L300-1	254		563	CH180-e45-L300-1	938	343	
	DH180-e45-L300-2	276			CH180-e45-L300-2	400		
	DH180-e45-L300-3	255			CH180-e45-L300-3	725		
	DH180-e45-L300-4	383			CH180-e45-L300-4	995		
	DH180-e45-L300-5	584			CH180-e45-L300-5	467		
	DH180-e45-L300-6	368			CH180-e45-L300-6	879		
	Ave.	353	0.33	Ave.	734	0.31		
	DH180-e60-L300-1	201		558	CH180-e60-L300-1	196	326	
	DH180-e60-L300-2	171			CH180-e60-L300-2	311		
	DH180-e60-L300-3	346			CH180-e60-L300-3	332		
DH180-e60-L300-4	541		CH180-e60-L300-4		348			
DH180-e60-L300-5	189		CH180-e60-L300-5		420			
DH180-e60-L300-6	337		CH180-e60-L300-6		266			
Ave.	298	0.43	Ave.	312	0.22			
Joint Length	DH180-e15-L180-1	333		374	CH180-e15-L180-1	298	214	
	DH180-e15-L180-2	60			CH180-e15-L180-2	338		
	DH180-e15-L180-3	261			CH180-e15-L180-3	269		
	DH180-e15-L180-4	381			CH180-e15-L180-4	363		
	DH180-e15-L180-5	182			CH180-e15-L180-5	195		
	DH180-e15-L180-6	167			CH180-e15-L180-6	332		
	Ave.	231	0.47	Ave.	299	0.19		
	DH180-e15-L300-1	503		344	CH180-e15-L300-1	517	252	
	DH180-e15-L300-2	255			CH180-e15-L300-2	504		
	DH180-e15-L300-3	419			CH180-e15-L300-3	537		
	DH180-e15-L300-4	409			CH180-e15-L300-4	369		
	DH180-e15-L300-5	480			CH180-e15-L300-5	1,025		
	DH180-e15-L300-6	192			CH180-e15-L300-6	404		
	Ave.	376	0.30	Ave.	559	0.39		
	DH180-e15-L450-1	824		532	CH180-e15-L450-1	865	288	
	DH180-e15-L450-2	350			CH180-e15-L450-2	1,472		
	DH180-e15-L450-3	630			CH180-e15-L450-3	825		
	DH180-e15-L450-4	987			CH180-e15-L450-4	654		
	DH180-e15-L450-5	463			CH180-e15-L450-5	483		
	DH180-e15-L450-6	650			CH180-e15-L450-6	1,080		
	Ave.	651	0.33	Ave.	896	0.35		

*1. 実験値の回転剛性は、0.1Pmax-0.4Pmax間の弾性剛性とした。

*2. グレーのハッチは、計算値と大きく外れたケースを示す

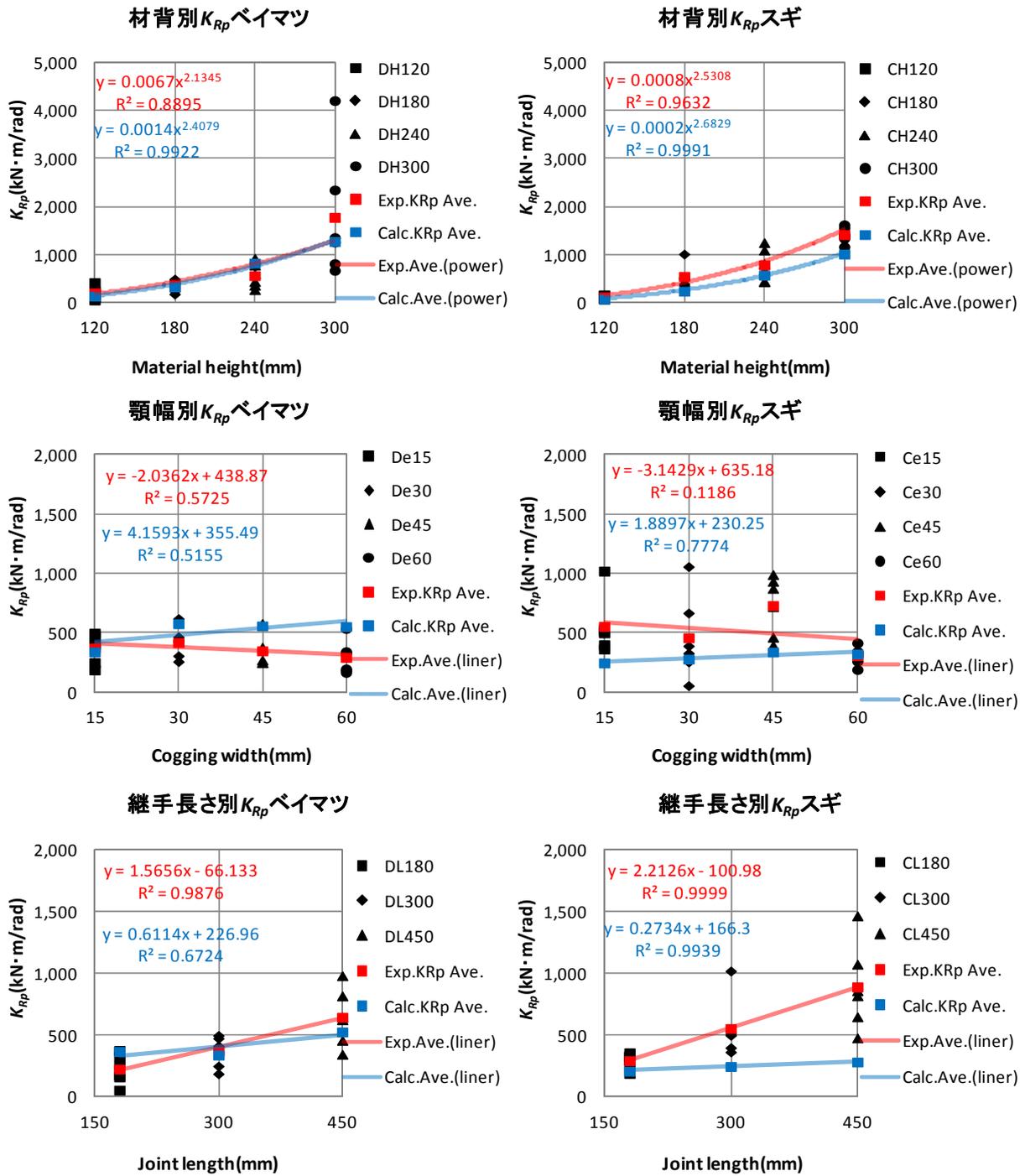


図 5.2.6 パラメータ別の弾性域における回転剛性の実験値と理論値の比較

5.2.2.5 接合部の抵抗モーメントと接合効率

表 5.2.6、図 5.2.7 より、材背別の接合部の抵抗モーメントと接合効率は、両樹種とも材背が高くなるほど接合部の抵抗モーメントは上昇するが、接合効率は低下した。また継手長さ別では、継手が長くなるほど接合部の抵抗モーメントは上昇し、接合効率も上昇した。尚、顎幅別では、両樹種とも顎幅の変化による接合部の抵抗モーメントと接合効率の影響は見られなかった。

【材背別】

表 5.2.6、図 5.2.7 より、両樹種ともに材背の概ね 2 乗に比例して最大耐力が上昇していく傾向が見られ、最大耐力は断面係数:Zの影響を受けていることが判る。

しかし、表 5.2.6 より、両樹種ともに材背別の曲げ耐力に関する接合効率を見ると、材背が大きくなるほど接合効率は低下することが判った。

また樹種別の接合効率の比較では、ベイマツの場合 0.22~0.31 と継手の無い無垢材に比べ約 1/4 の効率であり、また、スギの場合は 0.29~0.39 と継手の無い無垢材に比べ約 1/3 の効率であることがわかった。

【顎幅別】

表 5.2.6、図 5.2.7 より、両樹種ともに顎幅の変化による接合効率の明らかな影響は見られなかった。

また無垢材との接合効率の比較では、ベイマツの場合 0.29~0.31、スギの場合は 0.29~0.35 というずれの樹種においても継手のない無垢材に比べ約 1/3 の接合効率であることがわかった。

【継手長さ別】

表 5.2.6、図 5.2.7 より、両樹種ともに継手長さが長くなるにつれて接合部の抵抗モーメントが緩やかに上昇する傾向がある。これは、継手両端部の摩擦によるモーメント抵抗が寄与しているものと推察される。尚、理論式(2.2.7)と図 5.2.7 の回帰式から継手長さによる抵抗モーメント負担率を求めると、継手長さが 180mm の時、ベイマツ 27.9%、スギ 37.3%、240mm ではベイマツ 38.1%、スギ 49.8%、450mm ではベイマツ 48.0%、スギ 59.8%である。

また無垢材との接合効率の比較では、ベイマツの場合 0.25~0.35 と継手のない無垢材に比べ 30%の効率であることがわかった。また、スギの場合は 0.27~0.41 と継手のない無垢材に比べ約 1/3 の効率であることがわかった。

表 5.2.6 抵抗モーメント: M_{max} と接合効率

Parameter	Specimen Number	M_{max} (kN·m)	Z (mm ³)	F_b (N/mm ²)	M_{max} / $Z \cdot F_b$	Specimen Number	M_{max} (kN·m)	Z (mm ³)	F_b (N/mm ²)	M_{max} / $Z \cdot F_b$	
Material height	DH120-e15-L300-1	2.94	288,000	28.2	0.36	CH120-e15-L300-1	1.87	302,641	22.2	0.28	
	DH120-e15-L300-2	3.01	290,400	28.2	0.37	CH120-e15-L300-2	2.66	288,000	22.2	0.42	
	DH120-e15-L300-3	3.66	288,000	28.2	0.45	CH120-e15-L300-3	2.59	283,220	22.2	0.41	
	DH120-e15-L300-4	1.39	288,000	28.2	0.17	CH120-e15-L300-4	2.63	307,623	22.2	0.38	
	DH120-e15-L300-5	2.16	290,400	28.2	0.26	CH120-e15-L300-5	3.00	288,000	22.2	0.47	
	DH120-e15-L300-6	2.04	288,000	28.2	0.25	CH120-e15-L300-6	2.69	310,145	22.2	0.39	
		2.54	288,800	28.2	0.31		2.57	296,605	22.2	0.39	
	DH180-e15-L300-1	5.92	653,400	28.2	0.32	CH180-e15-L300-1	5.44	655,220	22.2	0.37	
	DH180-e15-L300-2	6.46	650,700	28.2	0.35	CH180-e15-L300-2	5.15	648,000	22.2	0.36	
	DH180-e15-L300-3	5.50	650,700	28.2	0.30	CH180-e15-L300-3	5.73	653,400	22.2	0.39	
	DH180-e15-L300-4	3.91	642,600	28.2	0.22	CH180-e15-L300-4	4.48	653,400	22.2	0.31	
	DH180-e15-L300-5	4.88	630,140	28.2	0.27	CH180-e15-L300-5	4.41	653,400	22.2	0.30	
	DH180-e15-L300-6	4.98	633,680	28.2	0.28	CH180-e15-L300-6	4.85	653,400	22.2	0.33	
		5.28	643,537	28.2	0.29		5.01	652,803	22.2	0.35	
	DH240-e15-L300-1	9.68	1,156,800	28.2	0.30	CH240-e15-L300-1	7.82	1,161,600	22.2	0.30	
	DH240-e15-L300-2	6.47	1,156,800	28.2	0.20	CH240-e15-L300-2	9.30	1,180,980	22.2	0.25	
	DH240-e15-L300-3	8.46	1,171,300	28.2	0.26	CH240-e15-L300-3	6.68	1,152,000	22.2	0.26	
	DH240-e15-L300-4	6.35	1,142,420	28.2	0.20	CH240-e15-L300-4	7.46	1,161,600	22.2	0.29	
	DH240-e15-L300-5	8.60	1,152,000	28.2	0.26	CH240-e15-L300-5	7.03	1,171,200	22.2	0.27	
	DH240-e15-L300-6	4.80	1,132,880	28.2	0.15	CH240-e15-L300-6	7.31	1,161,600	22.2	0.28	
		7.39	1,152,033	28.2	0.23		7.60	1,164,830	22.2	0.29	
	DH300-e15-L300-1	15.00	1,827,120	28.2	0.29	CH300-e15-L300-1	9.37	1,869,682	22.2	0.23	
	DH300-e15-L300-2	9.92	1,800,000	28.2	0.20	CH300-e15-L300-2	10.90	1,785,000	22.2	0.28	
	DH300-e15-L300-3	7.53	1,800,000	28.2	0.15	CH300-e15-L300-3	15.13	1,897,386	22.2	0.36	
	DH300-e15-L300-4	11.11	1,812,020	28.2	0.22	CH300-e15-L300-4	13.01	1,869,682	22.2	0.31	
	DH300-e15-L300-5	12.04	1,839,281	28.2	0.23	CH300-e15-L300-5	10.75	1,820,482	22.2	0.27	
	DH300-e15-L300-6	11.22	1,812,020	28.2	0.22	CH300-e15-L300-6	13.84	1,897,386	22.2	0.33	
		11.14	1,815,073	28.2	0.22		12.17	1,856,603	22.2	0.29	
	Cogging width	DH180-e15-L300-1	5.92	653,400	28.2	0.32	CH180-e15-L300-1	5.44	655,220	22.2	0.37
		DH180-e15-L300-2	6.46	650,700	28.2	0.35	CH180-e15-L300-2	5.15	648,000	22.2	0.36
		DH180-e15-L300-3	5.50	650,700	28.2	0.30	CH180-e15-L300-3	5.73	653,400	22.2	0.39
		DH180-e15-L300-4	3.91	642,600	28.2	0.22	CH180-e15-L300-4	4.48	653,400	22.2	0.31
		DH180-e15-L300-5	4.88	630,140	28.2	0.27	CH180-e15-L300-5	4.41	653,400	22.2	0.30
		DH180-e15-L300-6	4.98	633,680	28.2	0.28	CH180-e15-L300-6	4.85	653,400	22.2	0.33
			5.28	643,537	28.2	0.29		5.01	652,803	22.2	0.35
		DH180-e30-L300-1	6.46	648,000	28.2	0.35	CH180-e30-L300-1	4.39	653,400	22.2	0.30
DH180-e30-L300-2		6.25	648,000	28.2	0.34	CH180-e30-L300-2	5.02	653,400	22.2	0.35	
DH180-e30-L300-3		4.14	648,000	28.2	0.23	CH180-e30-L300-3	4.58	648,000	22.2	0.32	
DH180-e30-L300-4		4.26	648,000	28.2	0.23	CH180-e30-L300-4	6.18	648,000	22.2	0.43	
DH180-e30-L300-5		5.15	646,160	28.2	0.28	CH180-e30-L300-5	5.79	648,000	22.2	0.40	
DH180-e30-L300-6		5.79	649,760	28.2	0.32	CH180-e30-L300-6	4.78	653,400	22.2	0.33	
		5.34	647,987	28.2	0.29		5.12	650,700	22.2	0.35	
DH180-e45-L300-1		6.40	648,000	28.2	0.35	CH180-e45-L300-1	5.38	682,521	22.2	0.35	
DH180-e45-L300-2		5.61	653,400	28.2	0.30	CH180-e45-L300-2	5.40	677,061	22.2	0.36	
DH180-e45-L300-3		6.53	650,700	28.2	0.36	CH180-e45-L300-3	5.41	664,200	22.2	0.37	
DH180-e45-L300-4		4.72	640,820	28.2	0.26	CH180-e45-L300-4	5.25	664,200	22.2	0.36	
DH180-e45-L300-5		4.98	648,000	28.2	0.27	CH180-e45-L300-5	4.77	662,181	22.2	0.32	
DH180-e45-L300-6		6.09	648,000	28.2	0.33	CH180-e45-L300-6	4.86	664,200	22.2	0.33	
		5.72	648,153	28.2	0.31		5.18	669,060	22.2	0.35	
DH180-e60-L300-1		4.35	653,400	28.2	0.24	CH180-e60-L300-1	2.64	635,480	22.2	0.19	
DH180-e60-L300-2		5.55	650,700	28.2	0.30	CH180-e60-L300-2	4.21	653,400	22.2	0.29	
DH180-e60-L300-3		5.45	648,000	28.2	0.30	CH180-e60-L300-3	4.21	653,400	22.2	0.29	
DH180-e60-L300-4		5.92	648,000	28.2	0.32	CH180-e60-L300-4	4.60	648,000	22.2	0.32	
DH180-e60-L300-5		4.52	648,000	28.2	0.25	CH180-e60-L300-5	4.49	653,400	22.2	0.31	
DH180-e60-L300-6		5.45	633,680	28.2	0.30	CH180-e60-L300-6	4.57	648,000	22.2	0.32	
		5.21	646,963	28.2	0.29		4.12	648,613	22.2	0.29	
Joint length		DH180-e15-L180-1	4.86	654,320	28.2	0.26	CH180-e15-L180-1	3.09	648,000	22.2	0.22
		DH180-e15-L180-2	6.96	648,000	28.2	0.38	CH180-e15-L180-2	4.72	653,400	22.2	0.33
		DH180-e15-L180-3	5.52	653,400	28.2	0.30	CH180-e15-L180-3	3.91	648,000	22.2	0.27
		DH180-e15-L180-4	3.09	623,119	28.2	0.18	CH180-e15-L180-4	2.88	640,820	22.2	0.20
		DH180-e15-L180-5	3.26	649,760	28.2	0.18	CH180-e15-L180-5	4.64	648,000	22.2	0.32
		DH180-e15-L180-6	3.86	648,000	28.2	0.21	CH180-e15-L180-6	3.91	648,000	22.2	0.27
			4.59	646,100	28.2	0.25		3.86	647,703	22.2	0.27
		DH180-e15-L300-1	5.92	653,400	28.2	0.32	CH180-e15-L300-1	5.44	655,220	22.2	0.37
	DH180-e15-L300-2	6.46	650,700	28.2	0.35	CH180-e15-L300-2	5.15	648,000	22.2	0.36	
	DH180-e15-L300-3	5.50	650,700	28.2	0.30	CH180-e15-L300-3	5.73	653,400	22.2	0.39	
	DH180-e15-L300-4	3.91	642,600	28.2	0.22	CH180-e15-L300-4	4.48	653,400	22.2	0.31	
	DH180-e15-L300-5	4.88	630,140	28.2	0.27	CH180-e15-L300-5	4.41	653,400	22.2	0.30	
	DH180-e15-L300-6	4.98	633,680	28.2	0.28	CH180-e15-L300-6	4.85	653,400	22.2	0.33	
		5.28	643,537	28.2	0.29		5.01	652,803	22.2	0.35	
	DH180-e15-L450-1	7.19	650,700	28.2	0.39	CH180-e15-L450-1	6.44	648,000	22.2	0.45	
	DH180-e15-L450-2	7.27	648,000	28.2	0.40	CH180-e15-L450-2	6.02	648,000	22.2	0.42	
	DH180-e15-L450-3	6.82	655,220	28.2	0.37	CH180-e15-L450-3	6.48	648,000	22.2	0.45	
	DH180-e15-L450-4	6.06	637,200	28.2	0.34	CH180-e15-L450-4	5.76	648,000	22.2	0.40	
	DH180-e15-L450-5	5.18	648,000	28.2	0.28	CH180-e15-L450-5	5.69	648,000	22.2	0.40	
	DH180-e15-L450-6	6.02	655,220	28.2	0.33	CH180-e15-L450-6	6.05	660,680	22.2	0.41	
		6.42	649,057	28.2	0.35		6.08	650,113	22.2	0.42	

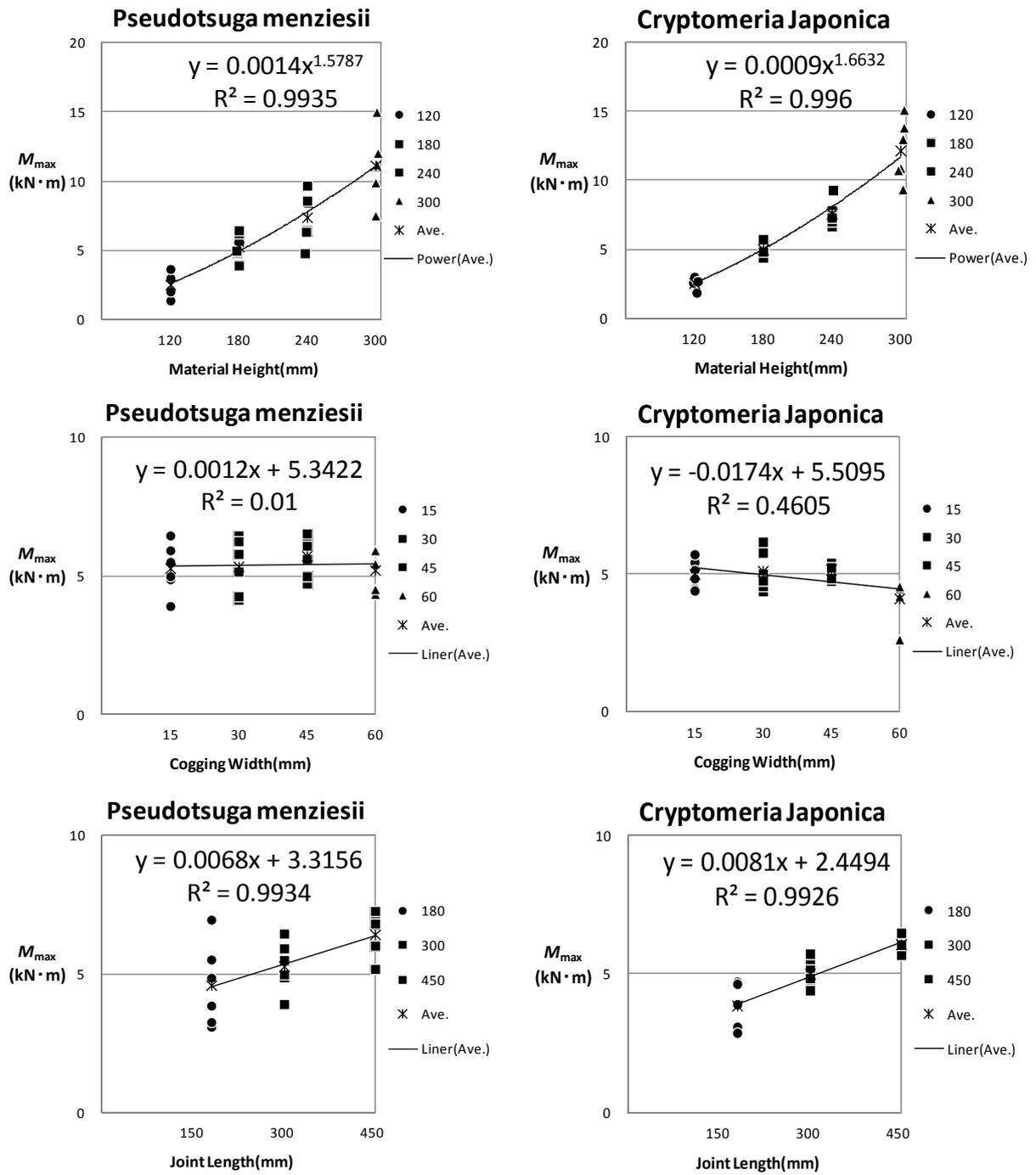


図 5.2.7 抵抗モーメント: M_{max} とパラメータとの相関

5.2.2.6 塑性率

表 5.2.7 は塑性率とパラメータの関係を示している。塑性率は両樹種ともに総じて材背が高いほど、また継手長さが長いほど塑性率が高く、顎幅による影響は見られなかった。今後は母数を増やし、さらに検証していく必要があるものと思われる。

【材背別】

表 5.2.7 より、ベイマツの塑性率の材背別平均値は、300mmで 7.15 と最も高くなり、靱性のある破壊モードを示した。次いで塑性率が高かったのは 180mmの 5.82 であった。材背 240mmは 3.49 とパラメータ内で最も低かった。

スギで最も塑性率の高かったのは、240mmの 6.17 であるが、内 1 体に塑性率が特に高いものがあった影響を受けている。そこでこれを除くと塑性率は 3.26 となり、総じてスギの材背別試験体は、ベイマツに比べて脆性的に破壊する傾向がある。

【顎幅別】

表 5.2.7 より、ベイマツの顎幅別の塑性率の平均値は、顎幅 15mmで 5.82 と最も高く、靱性に富んでいることを示した。一方、顎幅 30、45、60mmでは、塑性率の平均値が 3.00 以下と低く、弾性的な変形のまま突然せん断破壊に至る性状を示している。特に顎幅 30mmの塑性率の平均値は 1.95 と他に比べて最も低かった。顎幅が大きくなるにつれて若干、塑性率の上昇がみられるが、母数が少ないため誤差の範囲と考えられる。

スギで最も塑性率が高かったのは、顎幅 60mmの 3.86 で、次いで顎幅 15mmの 3.77 で、顎幅 30、45mmは 2.60 前後と塑性率は総じて低く、顎幅による変化は見られなかった。

【継手長さ別】

表 5.2.7 より、ベイマツの塑性率を見ると継手長さ 450、300、180mmの順に塑性率が 8.41、5.82、1.52 と継手長さが長いほど、塑性率が高くなっている。

この傾向は、スギにおいても同様に継手長さ 450、300、180mmの順に塑性率が 16.32、3.77、2.97 と継手長さが長いほど、塑性率が高い。

表 5.2.7 塑性率: μ とパラメータ

											(kN · m, rad)
Parameter	Specimen number	Ultimate distortion angle: θ_u	Ultimate resistance moment: M_u	Plastic distortion angle: θ_v	Plasticity rate: $\mu = \theta_u / \theta_v$	Specimen Number	Ultimate Distortion Angle: θ_u	Ultimate Resistance Moment: M_u	Plastic Distortion Angle: θ_v	Plasticity Rate: $\mu = \theta_u / \theta_v$	
Material height	DH120-e15-L300-1	0.15	2.75	0.01	11.96	CH120-e15-L300-1	0.07	2.74	0.03	2.65	
	DH120-e15-L300-2	0.29	2.80	0.04	7.03	CH120-e15-L300-2	0.10	2.83	0.02	5.71	
	DH120-e15-L300-3	0.06	3.48	0.03	2.02	CH120-e15-L300-3	0.07	2.50	0.03	2.39	
	DH120-e15-L300-4	0.02	1.37	0.01	3.03	CH120-e15-L300-4	0.04	2.32	0.02	1.76	
	DH120-e15-L300-5	0.01	2.14	0.01	1.36	CH120-e15-L300-5	0.05	2.53	0.01	3.33	
	DH120-e15-L300-6	0.01	1.95	0.00	3.08	CH120-e15-L300-6	0.02	1.80	0.01	2.07	
	Ave.	0.09	2.41	0.02	4.74	Ave.	0.06	2.45	0.02	2.98	
	DH180-e15-L300-1	0.03	5.41	0.01	3.09	CH180-e15-L300-1	0.04	5.01	0.01	4.63	
	DH180-e15-L300-2	0.07	5.92	0.02	2.95	CH180-e15-L300-2	0.03	4.84	0.01	2.67	
	DH180-e15-L300-3	0.02	4.97	0.01	1.98	CH180-e15-L300-3	0.06	5.40	0.01	5.78	
	DH180-e15-L300-4	0.06	3.71	0.01	6.68	CH180-e15-L300-4	0.03	4.10	0.01	2.36	
	DH180-e15-L300-5	0.13	4.57	0.01	13.67	CH180-e15-L300-5	0.01	3.90	0.00	2.89	
	DH180-e15-L300-6	0.16	4.65	0.02	6.58	CH180-e15-L300-6	0.05	4.69	0.01	4.31	
	Ave.	0.08	4.87	0.01	5.82	Ave.	0.04	4.66	0.01	3.77	
	DH240-e15-L300-1	0.02	8.70	0.01	2.13	CH240-e15-L300-1	0.06	7.10	0.02	4.12	
	DH240-e15-L300-2	0.03	6.10	0.01	2.96	CH240-e15-L300-2	0.02	8.46	0.01	2.33	
	DH240-e15-L300-3	0.03	-	-	-	CH240-e15-L300-3	0.20	6.57	0.01	20.74	
	DH240-e15-L300-4	0.01	5.99	0.01	1.26	CH240-e15-L300-4	0.02	7.14	0.01	2.49	
	DH240-e15-L300-5	0.04	8.14	0.02	2.21	CH240-e15-L300-5	0.08	6.38	0.01	5.61	
	DH240-e15-L300-6	0.10	4.16	0.01	8.90	CH240-e15-L300-6	0.01	6.58	0.01	1.74	
	Ave.	0.04	6.62	0.01	3.49	Ave.	0.06	7.04	0.01	6.17	
	DH300-e15-L300-1	0.01	13.73	0.01	1.91	CH300-e15-L300-1	0.02	13.02	0.01	1.99	
	DH300-e15-L300-2	0.01	-	-	-	CH300-e15-L300-2	0.02	9.95	0.01	2.66	
	DH300-e15-L300-3	0.10	7.66	0.01	10.98	CH300-e15-L300-3	0.07	12.36	0.01	9.84	
	DH300-e15-L300-4	0.06	10.18	0.01	8.00	CH300-e15-L300-4	0.02	13.70	0.01	2.13	
	DH300-e15-L300-5	0.03	11.25	0.00	9.38	CH300-e15-L300-5	0.01	10.03	0.01	1.31	
	DH300-e15-L300-6	0.04	9.82	0.01	5.49	CH300-e15-L300-6	0.01	8.43	0.01	2.49	
	Ave.	0.04	10.53	0.01	7.15	Ave.	0.03	11.25	0.01	3.40	
	Cogging width	DH180-e15-L300-1	0.03	5.41	0.01	3.09	CH180-e15-L300-1	0.04	5.01	0.01	4.63
		DH180-e15-L300-2	0.07	5.92	0.02	2.95	CH180-e15-L300-2	0.03	4.84	0.01	2.67
		DH180-e15-L300-3	0.02	4.97	0.01	1.98	CH180-e15-L300-3	0.06	5.40	0.01	5.78
		DH180-e15-L300-4	0.06	3.71	0.01	6.68	CH180-e15-L300-4	0.03	4.10	0.01	2.36
		DH180-e15-L300-5	0.13	4.57	0.01	13.67	CH180-e15-L300-5	0.01	3.90	0.00	2.89
		DH180-e15-L300-6	0.16	4.65	0.02	6.58	CH180-e15-L300-6	0.05	4.69	0.01	4.31
		Ave.	0.08	4.87	0.01	5.82	Ave.	0.04	4.66	0.01	3.77
		DH180-e30-L300-1	0.02	5.86	0.01	1.89	CH180-e30-L300-1	0.07	-	-	-
DH180-e30-L300-2		0.02	6.04	0.01	1.53	CH180-e30-L300-2	0.02	4.51	0.01	2.62	
DH180-e30-L300-3		0.04	3.53	0.01	3.19	CH180-e30-L300-3	0.01	4.05	0.00	2.35	
DH180-e30-L300-4		0.01	4.06	0.01	1.60	CH180-e30-L300-4	0.04	5.84	0.02	2.11	
DH180-e30-L300-5		0.02	4.75	0.01	1.57	CH180-e30-L300-5	0.06	5.55	0.01	4.52	
DH180-e30-L300-6		0.03	5.50	0.02	1.91	CH180-e30-L300-6	0.03	4.45	0.02	1.78	
Ave.		0.02	4.96	0.01	1.95	Ave.	0.04	4.88	0.01	2.67	
DH180-e45-L300-1		0.02	-	-	-	CH180-e45-L300-1	0.01	4.81	0.01	2.23	
DH180-e45-L300-2		0.07	4.85	0.02	3.72	CH180-e45-L300-2	0.06	5.03	0.01	4.53	
DH180-e45-L300-3		0.03	6.33	0.02	1.34	CH180-e45-L300-3	0.02	4.98	0.01	2.56	
DH180-e45-L300-4		0.02	4.33	0.01	1.45	CH180-e45-L300-4	0.01	4.70	0.00	2.22	
DH180-e45-L300-5		0.03	4.83	0.01	4.13	CH180-e45-L300-5	0.02	4.39	0.01	1.72	
DH180-e45-L300-6		0.05	5.95	0.02	3.18	CH180-e45-L300-6	0.01	4.54	0.01	1.98	
Ave.		0.04	5.26	0.02	2.77	Ave.	0.02	4.74	0.01	2.54	
DH180-e60-L300-1		0.02	-	-	-	CH180-e60-L300-1	0.02	2.62	0.01	1.29	
DH180-e60-L300-2		0.06	4.98	0.03	1.97	CH180-e60-L300-2	0.06	4.01	0.01	4.74	
DH180-e60-L300-3		0.03	4.95	0.01	1.87	CH180-e60-L300-3	0.05	3.55	0.01	4.82	
DH180-e60-L300-4		0.05	5.67	0.01	4.30	CH180-e60-L300-4	0.03	4.04	0.01	2.33	
DH180-e60-L300-5		0.03	4.41	0.02	1.40	CH180-e60-L300-5	0.05	4.21	0.01	5.34	
DH180-e60-L300-6		0.03	4.66	0.01	1.86	CH180-e60-L300-6	0.07	4.09	0.02	4.64	
Ave.		0.03	4.94	0.02	2.28	Ave.	0.05	3.75	0.01	3.86	
Joint length		DH180-e15-L180-1	0.02	4.36	0.01	1.50	CH180-e15-L180-1	0.02	2.90	0.01	1.55
		DH180-e15-L180-2	0.12	6.78	0.11	1.03	CH180-e15-L180-2	0.02	4.43	0.01	1.57
		DH180-e15-L180-3	0.03	5.54	0.02	1.20	CH180-e15-L180-3	0.02	3.68	0.01	1.61
		DH180-e15-L180-4	0.01	2.86	0.01	1.81	CH180-e15-L180-4	0.03	2.50	0.01	4.51
		DH180-e15-L180-5	0.03	3.09	0.02	2.05	CH180-e15-L180-5	0.12	4.41	0.02	5.28
		DH180-e15-L180-6	0.06	6.59	0.04	1.54	CH180-e15-L180-6	0.04	3.65	0.01	3.33
		Ave.	0.04	4.87	0.04	1.52	Ave.	0.04	3.60	0.01	2.97
		DH180-e15-L300-1	0.03	5.41	0.01	3.09	CH180-e15-L300-1	0.04	5.01	0.01	4.63
	DH180-e15-L300-2	0.07	5.92	0.02	2.95	CH180-e15-L300-2	0.03	4.84	0.01	2.67	
	DH180-e15-L300-3	0.02	4.97	0.01	1.98	CH180-e15-L300-3	0.06	5.40	0.01	5.78	
	DH180-e15-L300-4	0.06	3.71	0.01	6.68	CH180-e15-L300-4	0.03	4.10	0.01	2.36	
	DH180-e15-L300-5	0.13	4.57	0.01	13.67	CH180-e15-L300-5	0.01	3.90	0.00	2.89	
	DH180-e15-L300-6	0.16	4.65	0.02	6.58	CH180-e15-L300-6	0.05	4.69	0.01	4.31	
	Ave.	0.08	4.87	0.01	5.82	Ave.	0.04	4.66	0.01	3.77	
	DH180-e15-L450-1	0.08	6.78	0.01	10.30	CH180-e15-L450-1	0.06	6.01	0.01	9.12	
	DH180-e15-L450-2	0.18	7.45	0.02	8.66	CH180-e15-L450-2	0.13	5.82	0.00	32.56	
	DH180-e15-L450-3	0.19	6.26	0.01	18.65	CH180-e15-L450-3	0.11	5.67	0.01	16.03	
	DH180-e15-L450-4	0.02	5.71	0.01	3.69	CH180-e15-L450-4	0.06	5.40	0.01	7.66	
	DH180-e15-L450-5	0.02	4.66	0.01	2.14	CH180-e15-L450-5	0.10	5.38	0.01	9.05	
	DH180-e15-L450-6	0.06	5.55	0.01	7.01	CH180-e15-L450-6	0.12	5.48	0.01	23.48	
	Ave.	0.09	6.07	0.01	8.41	Ave.	0.10	5.63	0.01	16.32	

5.2.2.7 継手のめり込みと曲げ変形

図 5.2.8～5.2.13 は図 5.1.2 の試験体の変位測定箇所の変位計②③⑥～⑨によって継手のめり込み変形角と曲げ変形角と継手の抵抗モーメントを表したものである。

実線の顎 $\theta 1$ は、顎の変形角を計測しており、顎は継手の中央にあることから曲げ変形は発生しないと考えられる。一方、赤と青の点線は左右の胴付における変形角を計測しており、継手の曲げ変形が含まれる可能性がある。本研究では継手は剛体と仮定していることから、ここでは顎 $\theta 1$ と赤と青の点線を比較することによりこれを検証した。尚、赤の一点鎖線は胴付に割裂が発生した時の継手の抵抗モーメントである。

その結果、両樹種ともに総じて顎の変形角に対し、両胴付における変形角は僅かに大きい、剛体と考えてもよいほど僅かなものであった。

【材背別】

材背による変化は両樹種ともに見られなかった。

【顎幅別】

ベイマツの場合、顎幅 30mm 以上の時、試験体 4～6 について両胴付の変形が大きかったが、同じケースの 1～3 の試験体ではそのような傾向は見られなかった。

またスギの場合、顎幅 45mm の時、3～6 の試験体においてのみ両胴付の変形が大きかったが、顎幅 60mm ではそのような傾向は見られなかった。

この原因として、一見、顎幅が大きくなると継手の断面積が減少することにより曲げ変形が大きくなったのではないかと考えられるが、今回、ベイマツの 1～3 と 4～6 の試験体を加工した職人が異なったことから、加工精度の際による影響が現れたものと推察される。

【継手長さ別】

両樹種ともに継手長さ 450mm で胴付の変形角が僅かではあるが大きくなる傾向が見られた。これは継手長さが長くなったことによる材の曲げ変形の影響と考えられるが、これによる本理論式の精度に対する影響は無いものと考えられる。しかし、今後より靱性の高い継手を考える場合は、材の曲げ変形による影響について、材背と継手長さの関係において検証される必要があると思われる。

注1:変位計の取付不良; *CH180-e45-L300-2- θ 3*, *DH180-e15-L180-5- θ 1*

注2:加力初期段階の胴付の剥離によるアングルの移動; *CH180-e15-L450-4- θ 2*

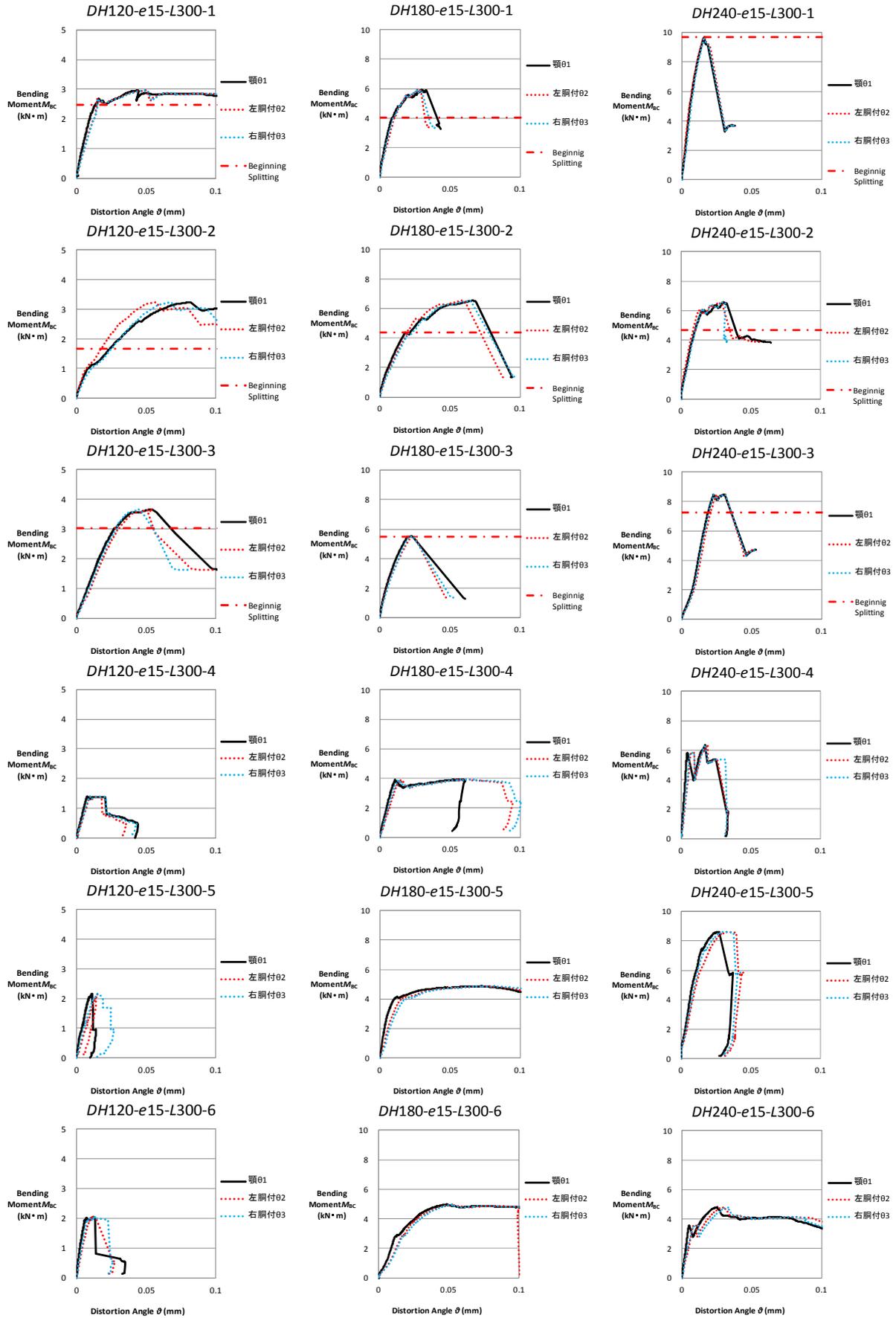


図 5.2.8 材背別の継手のめり込みと曲げ変形角(バイマツ)その 1

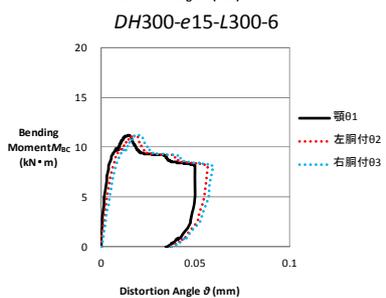
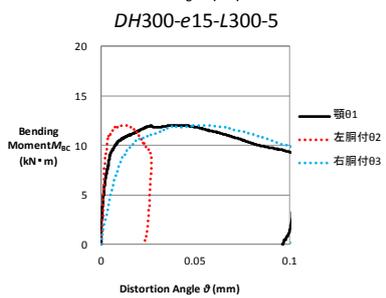
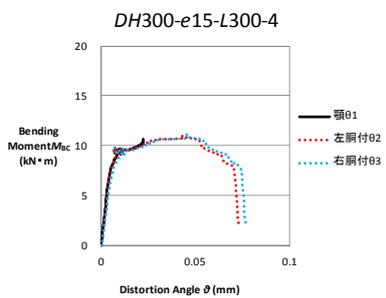
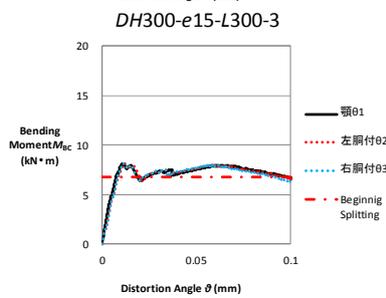
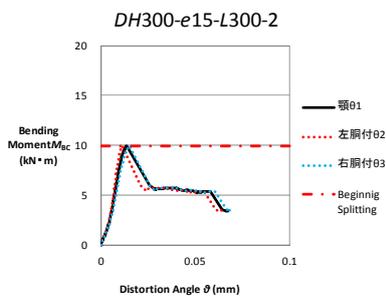
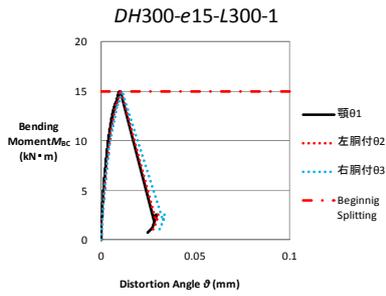


図 5.2.8 材背別の継手のめり込みと曲げ変形角(バイマツ)その 2

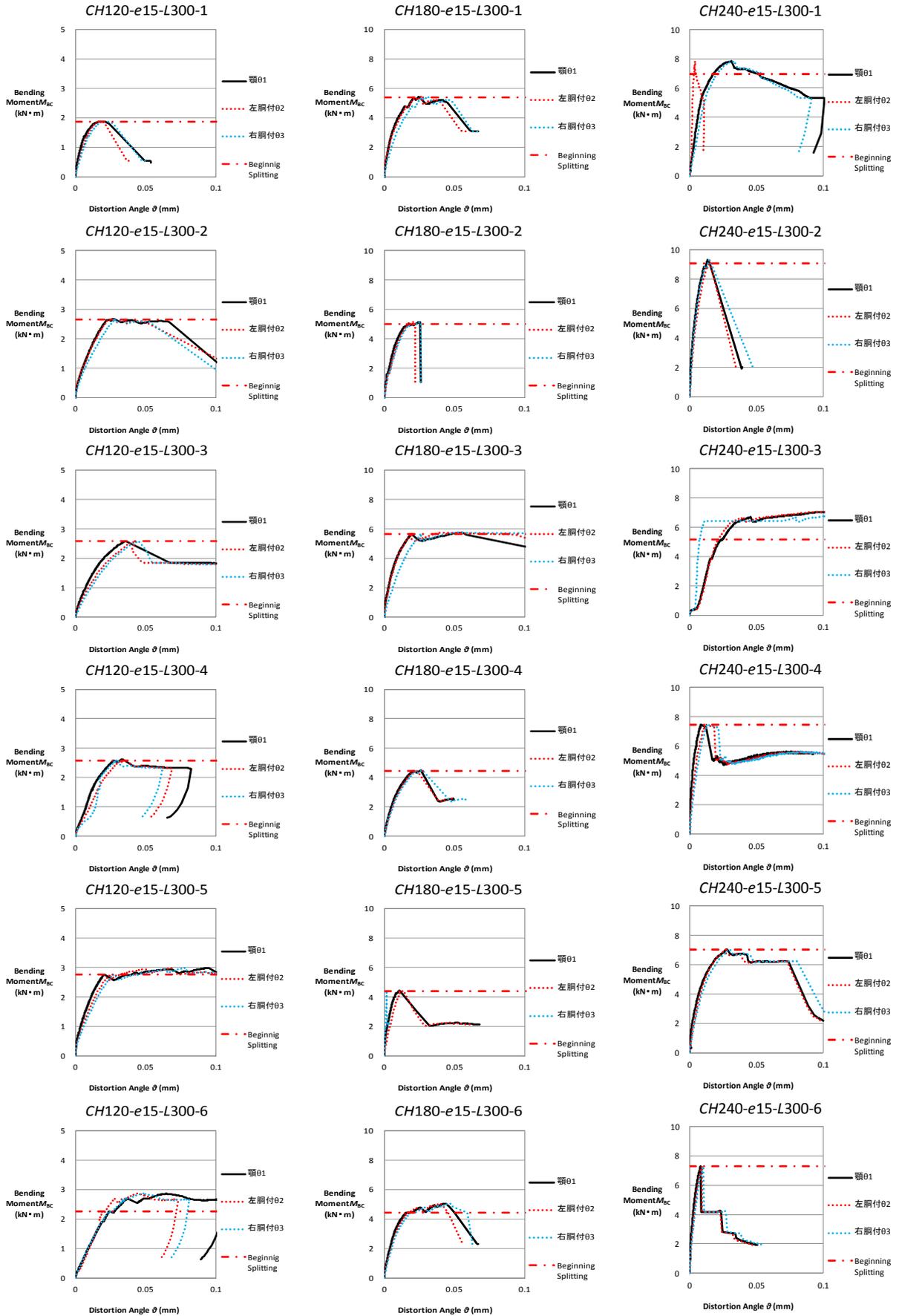


図 5.2.9 材背別の継手のめり込みと曲げ変形角(スギ)その 1

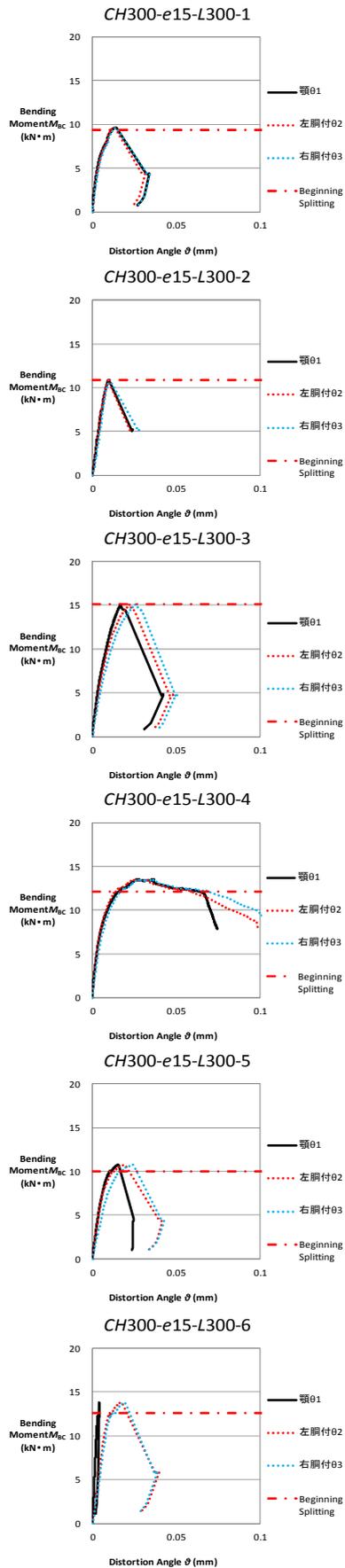


図 5.2.9 材背別の継手のめり込みと曲げ変形角(スギ)その 2

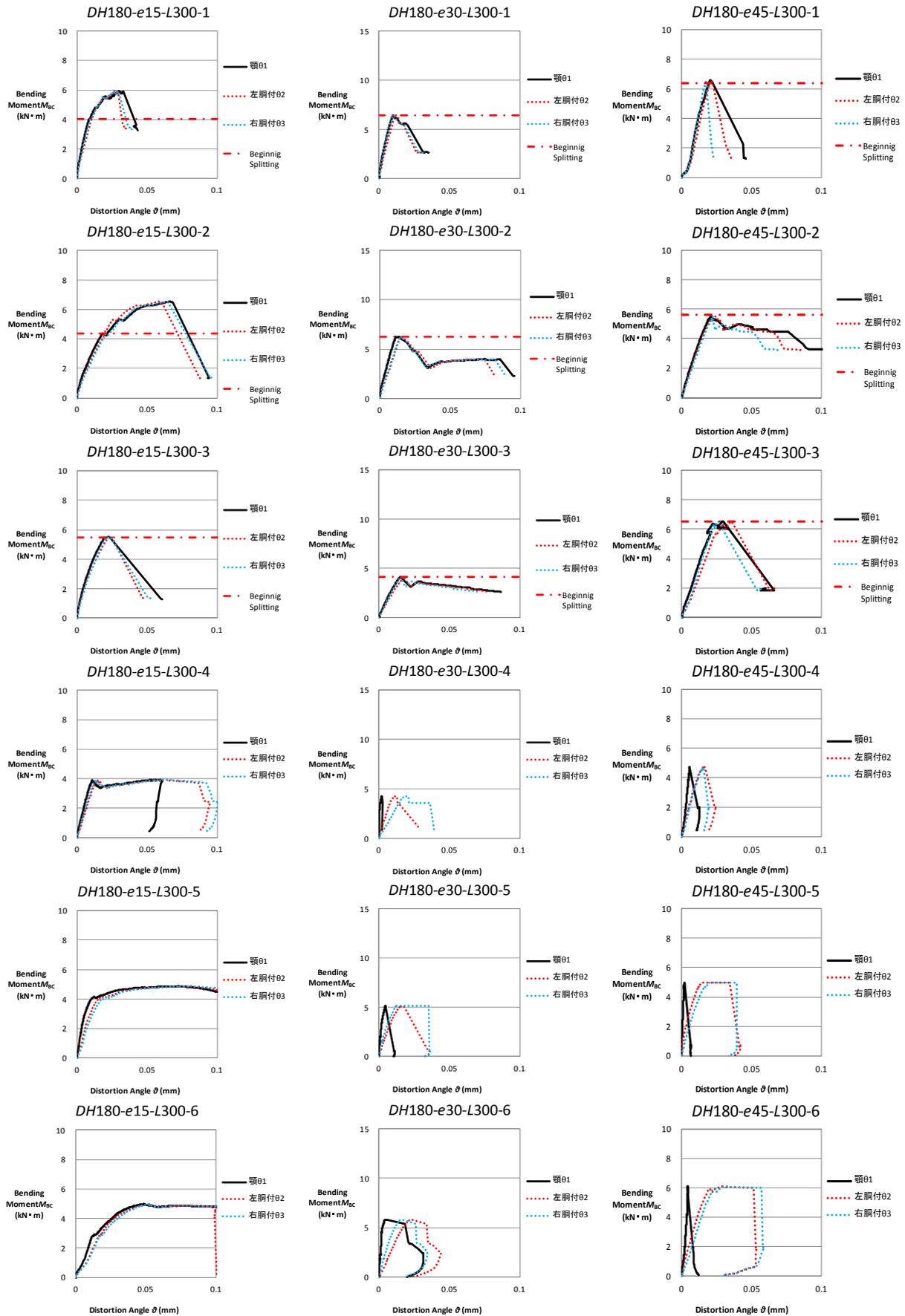


図 5.2.10 頸幅別の継手のめり込みと曲げ変形角(バイマツ)その1

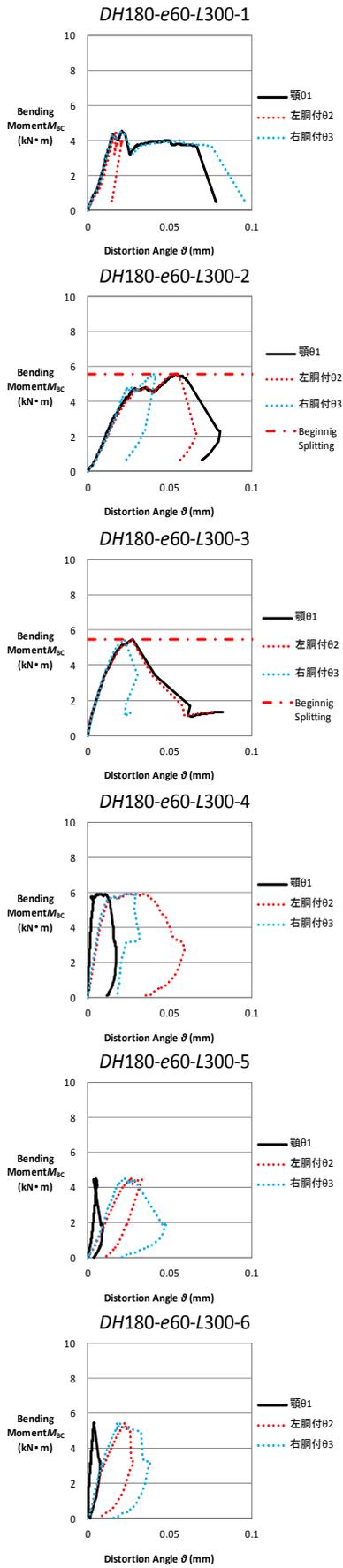


図 5.2.10 頸幅別の継手のめり込みと曲げ変形角(ベイマツ)その 2

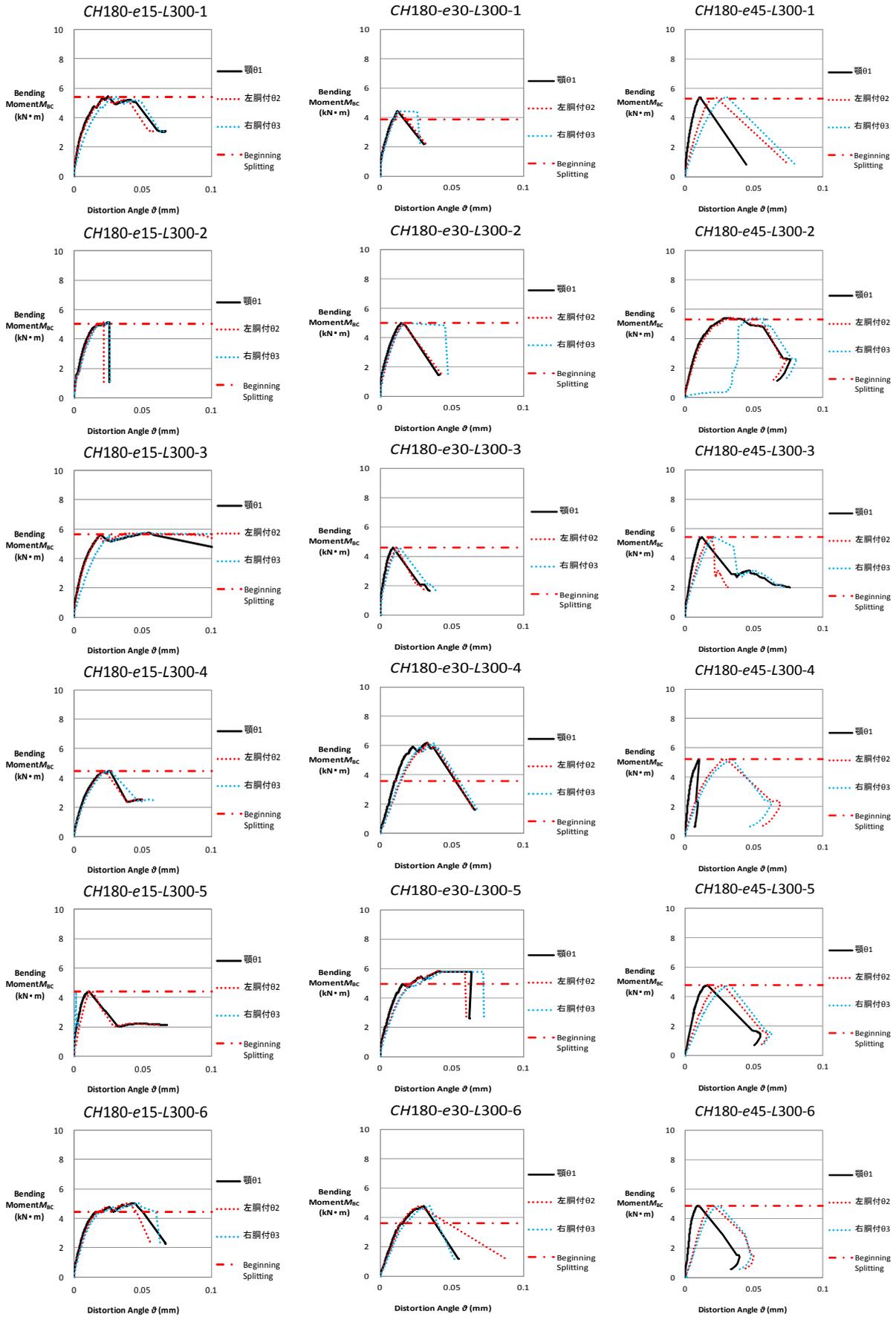


図 5.2.11 顎幅別の継手のめり込みと曲げ変形角(スギ)その1

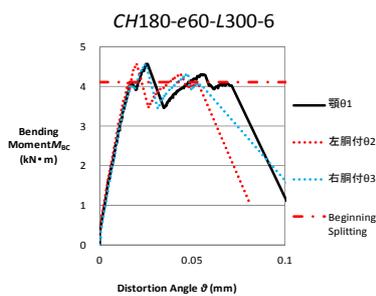
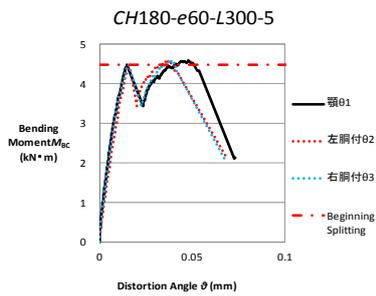
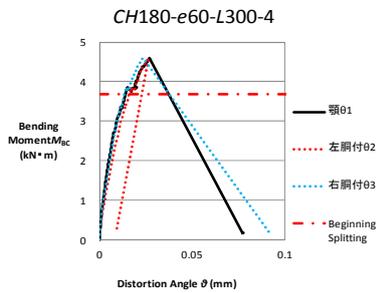
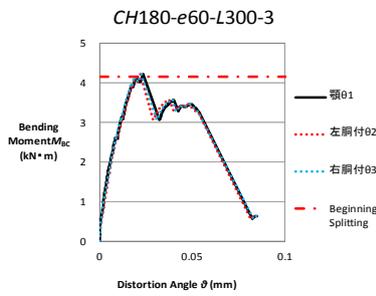
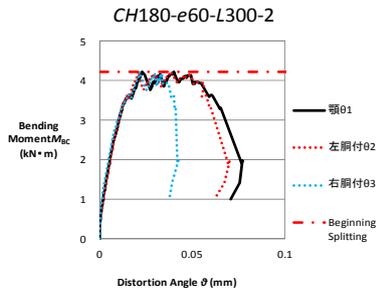
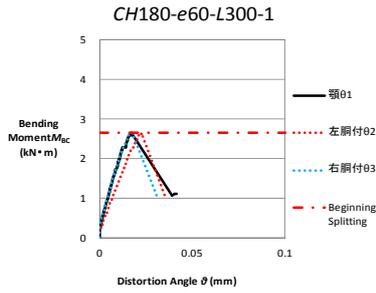


図 5.2.11 顎幅別の継手のめり込みと曲げ変形角(スギ)その 2

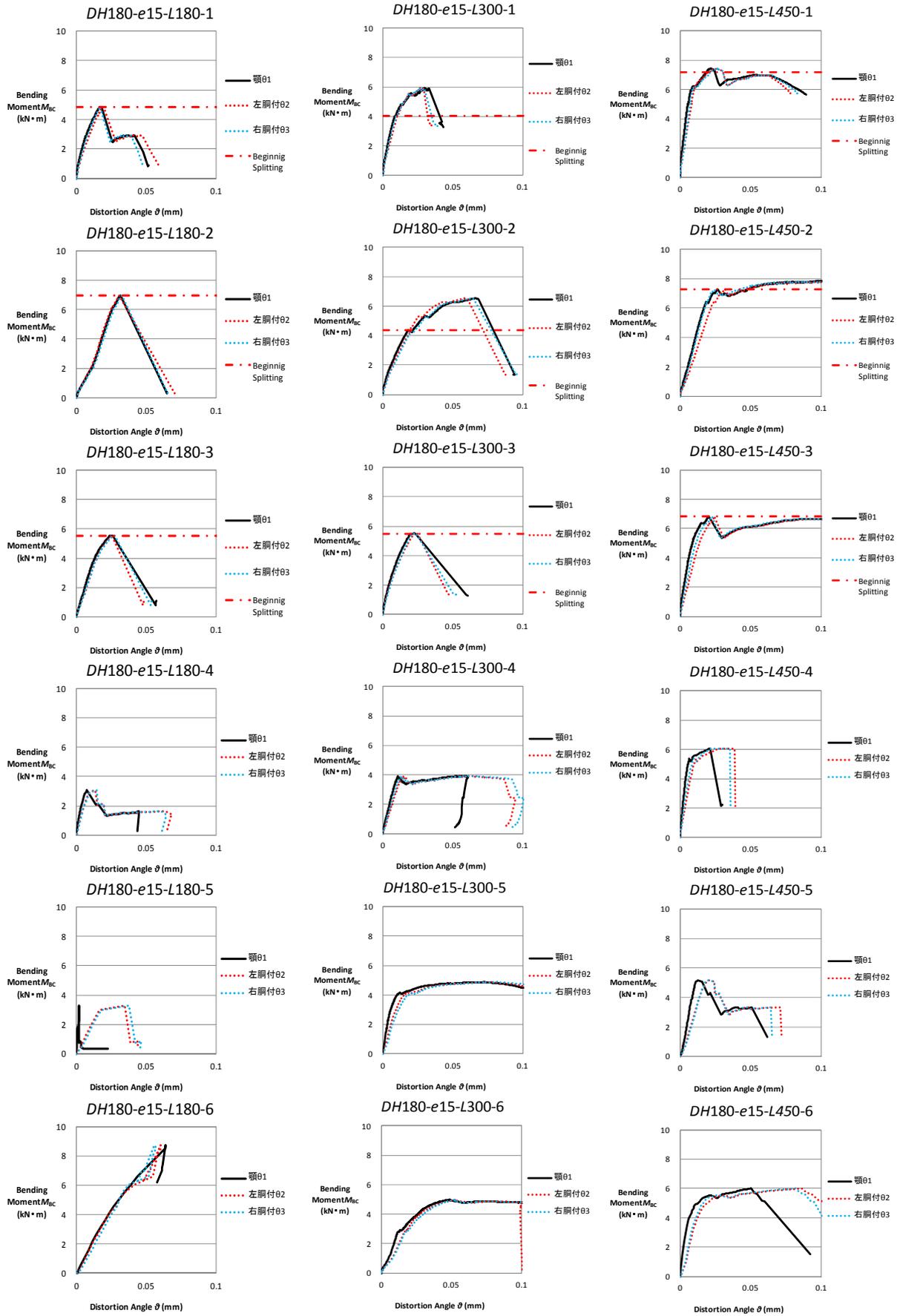


図 5.2.12 継手長さ別の継手のめり込みと曲げ変形角(ベイマツ)

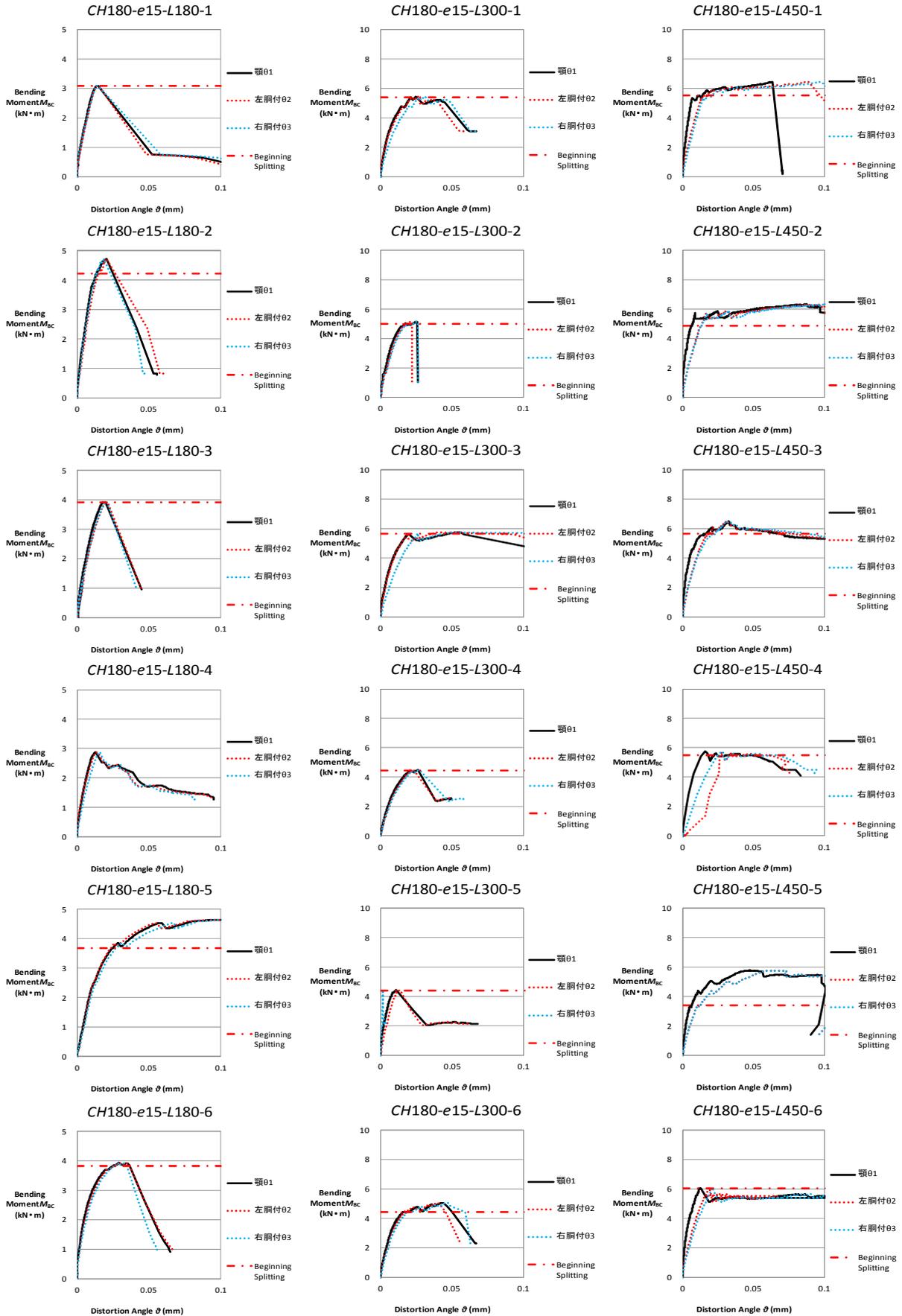


図 5.2.13 継手長さ別の継手のめり込みと曲げ変形角(スギ)

5.2.2.8 胴付のせん断変形

図 5.2.14～5.2.19 は図 5.1.2 の試験体の変位測定箇所の変位計④⑤によって胴付のせん断変形と継手の抵抗モーメントを表したものである。

実線の $\delta 4$ は変位計④、グレーの破線の $\delta 5$ は変位計⑤の変位を計測したものである。また赤の一点鎖線は胴付に割裂が発生した時の継手の抵抗モーメントを示している。

その結果、両樹種及びパラメータの影響も無く、全ての試験体において、概ね胴付の木口面同士の摩擦応力による拘束効果により変位は見られなかった。

注1:変位計の取付不良;DH180-e15-L450-4- $\delta 4$ 、 $\delta 5$

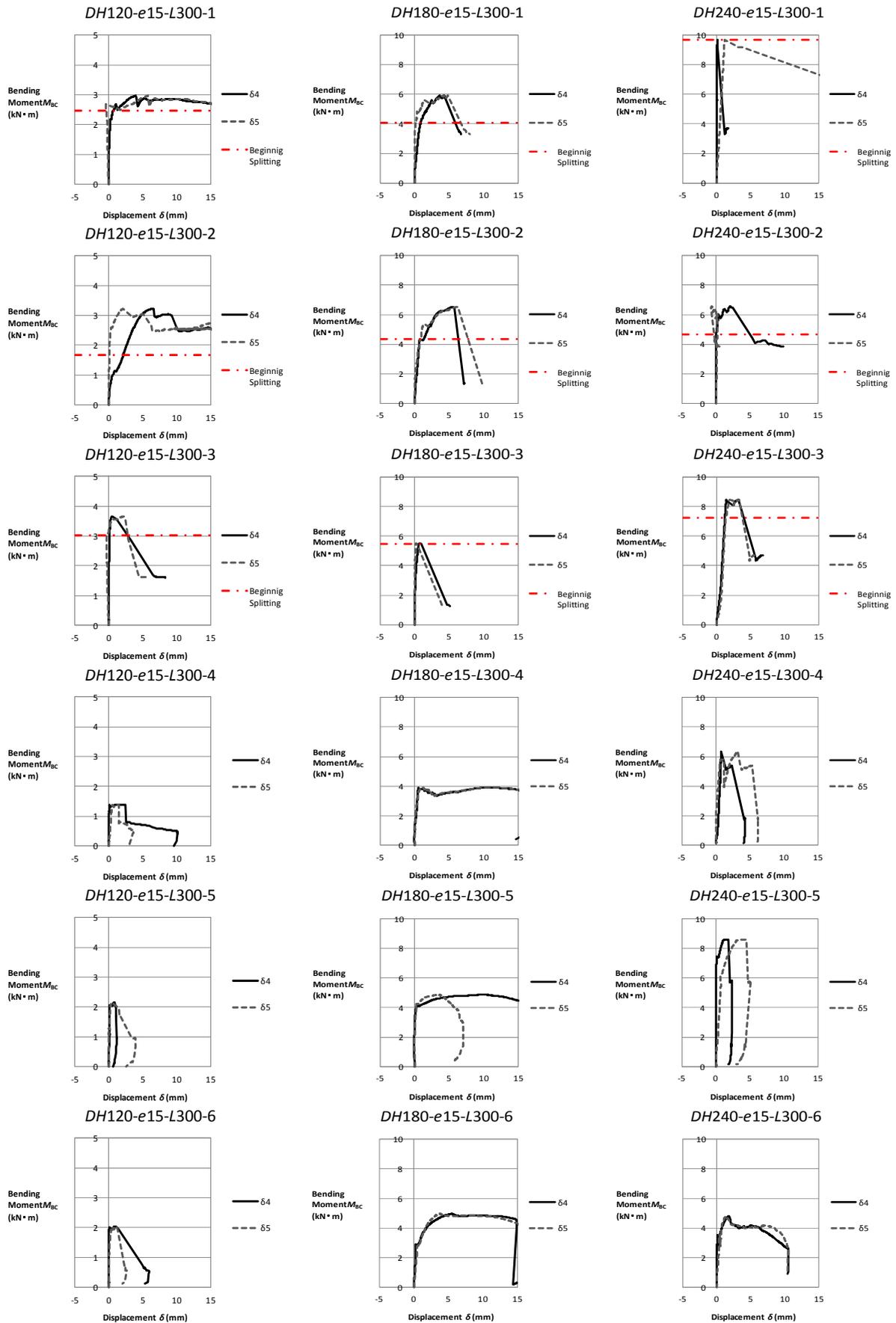


図 5.2.14 材背別の胴付のせん断変形(ベイマツ)その1

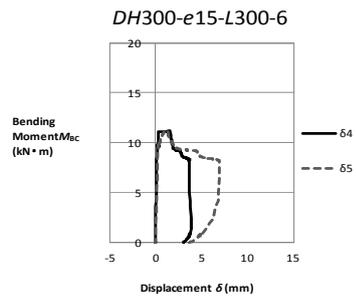
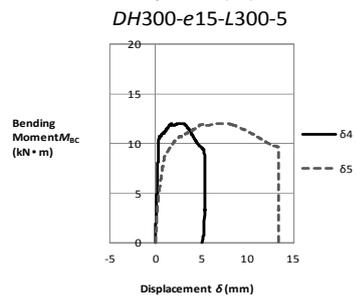
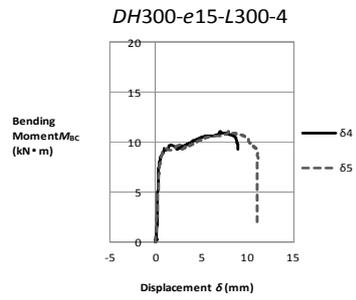
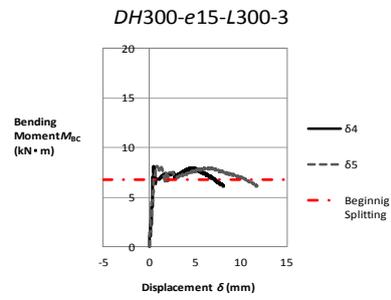
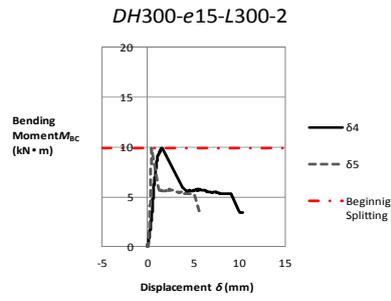
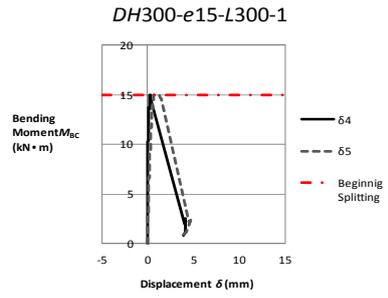


図 5.2.14 材背別の胴付のせん断変形(ベイマツ)その 2

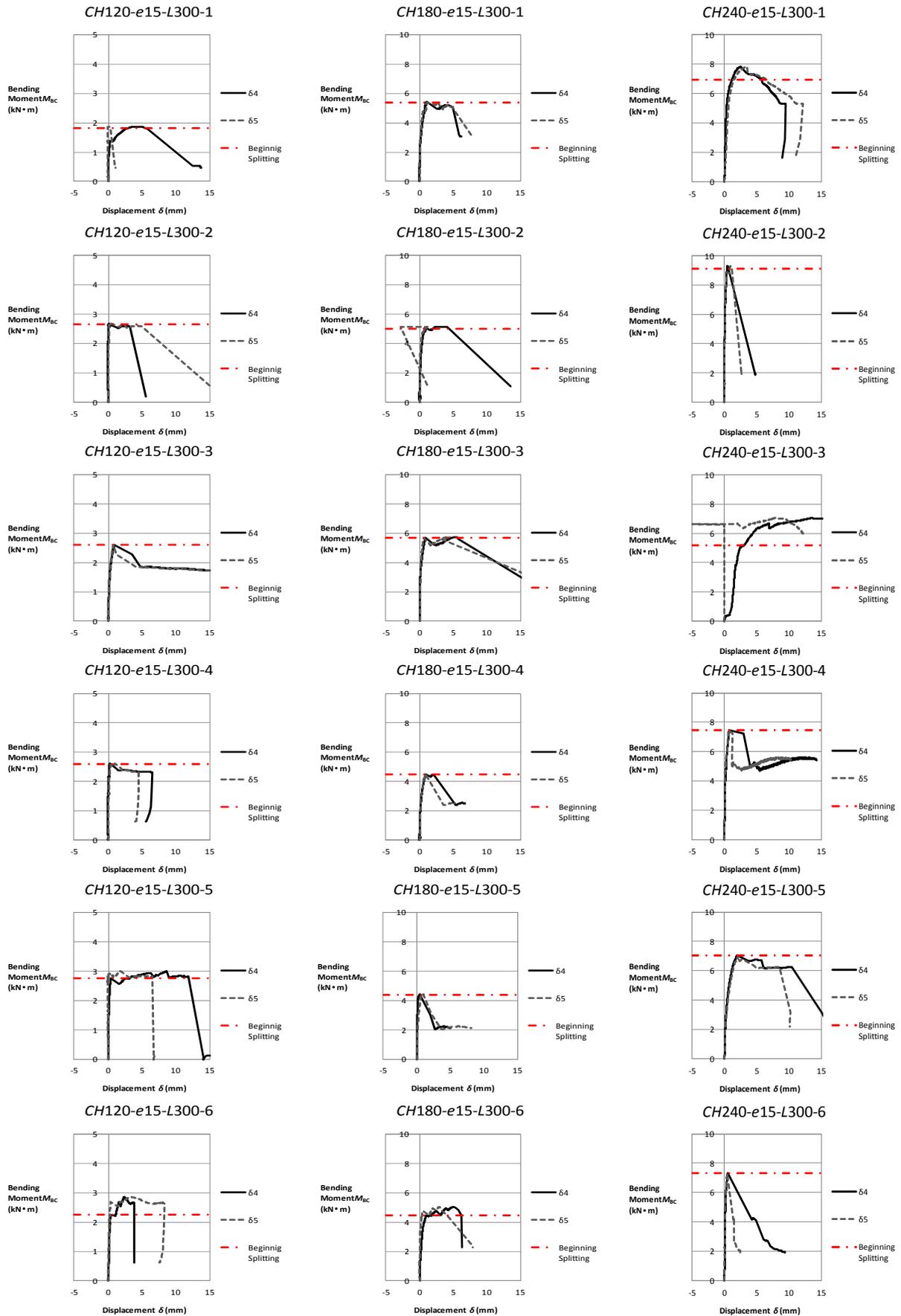


図 5.2.15 材背別の胴付のせん断変形(スギ)その1

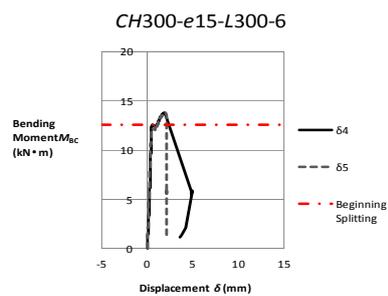
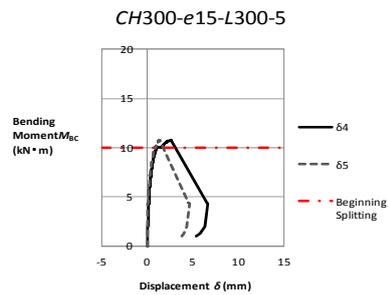
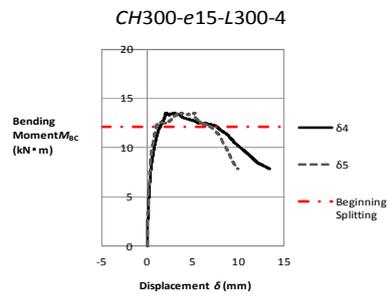
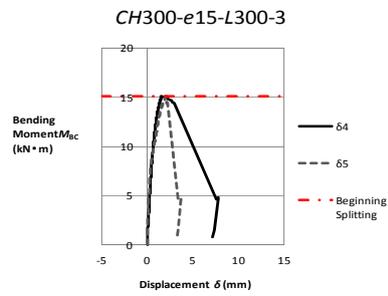
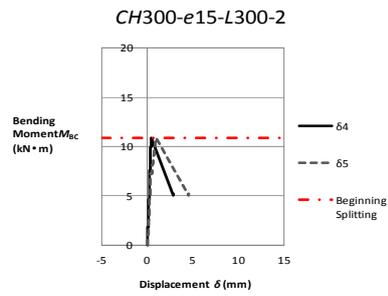
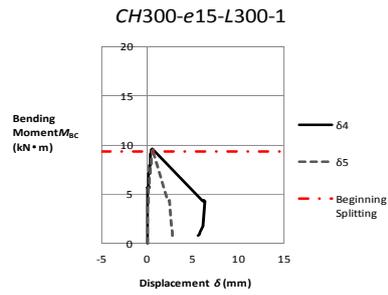


図 5.2.15 材背別の胴付のせん断変形(スギ)その 2

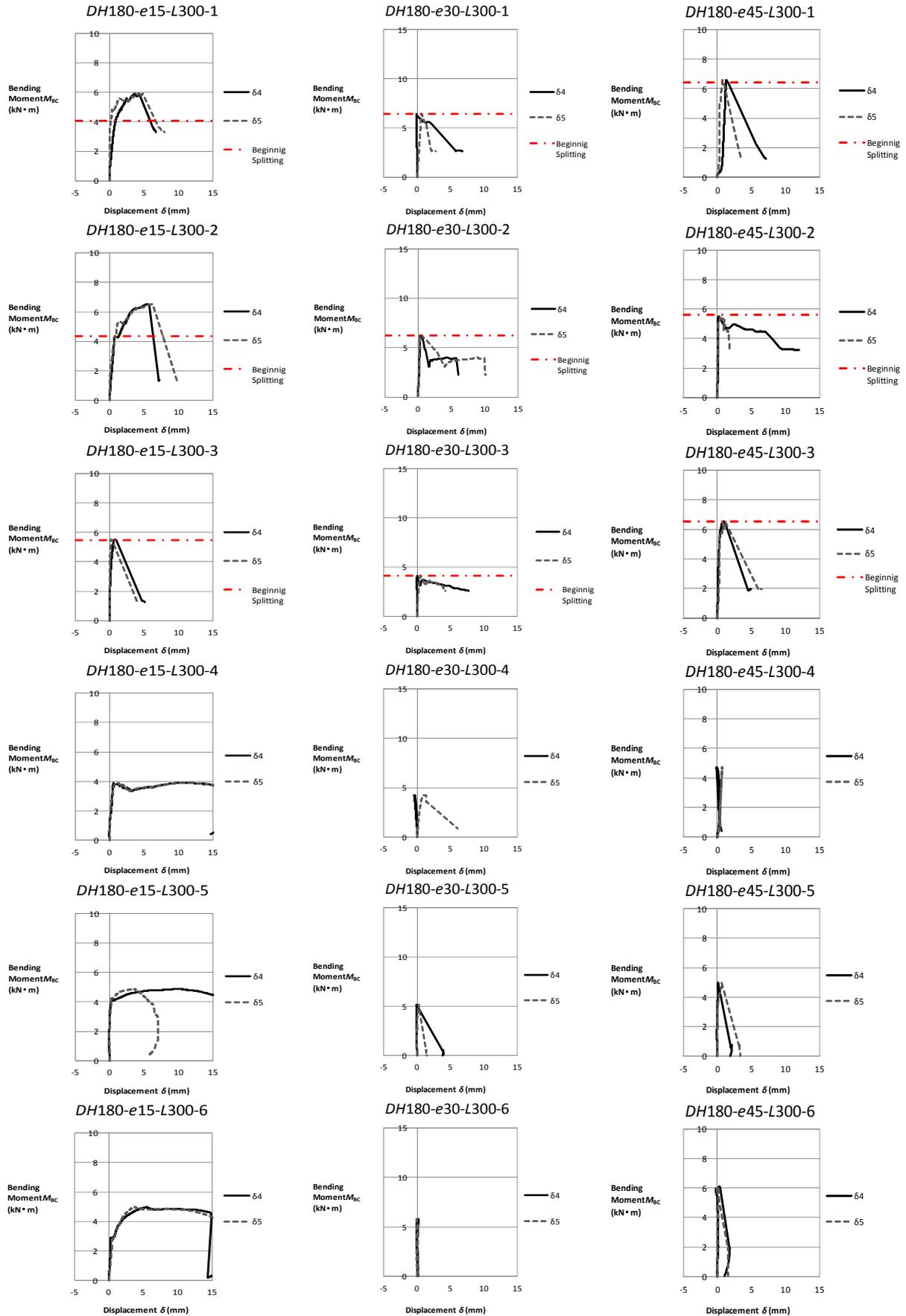


図 5.2.16 顎幅別の胴付のせん断変形(ベイマツ)その 1

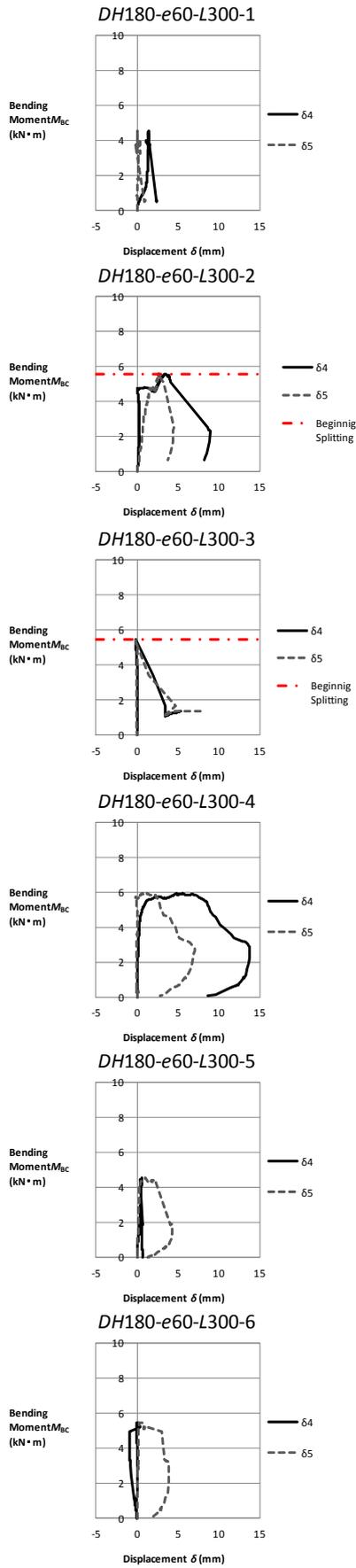


図 5.2.16 顎幅別の胴付のせん断変形(ベイマツ)その 2

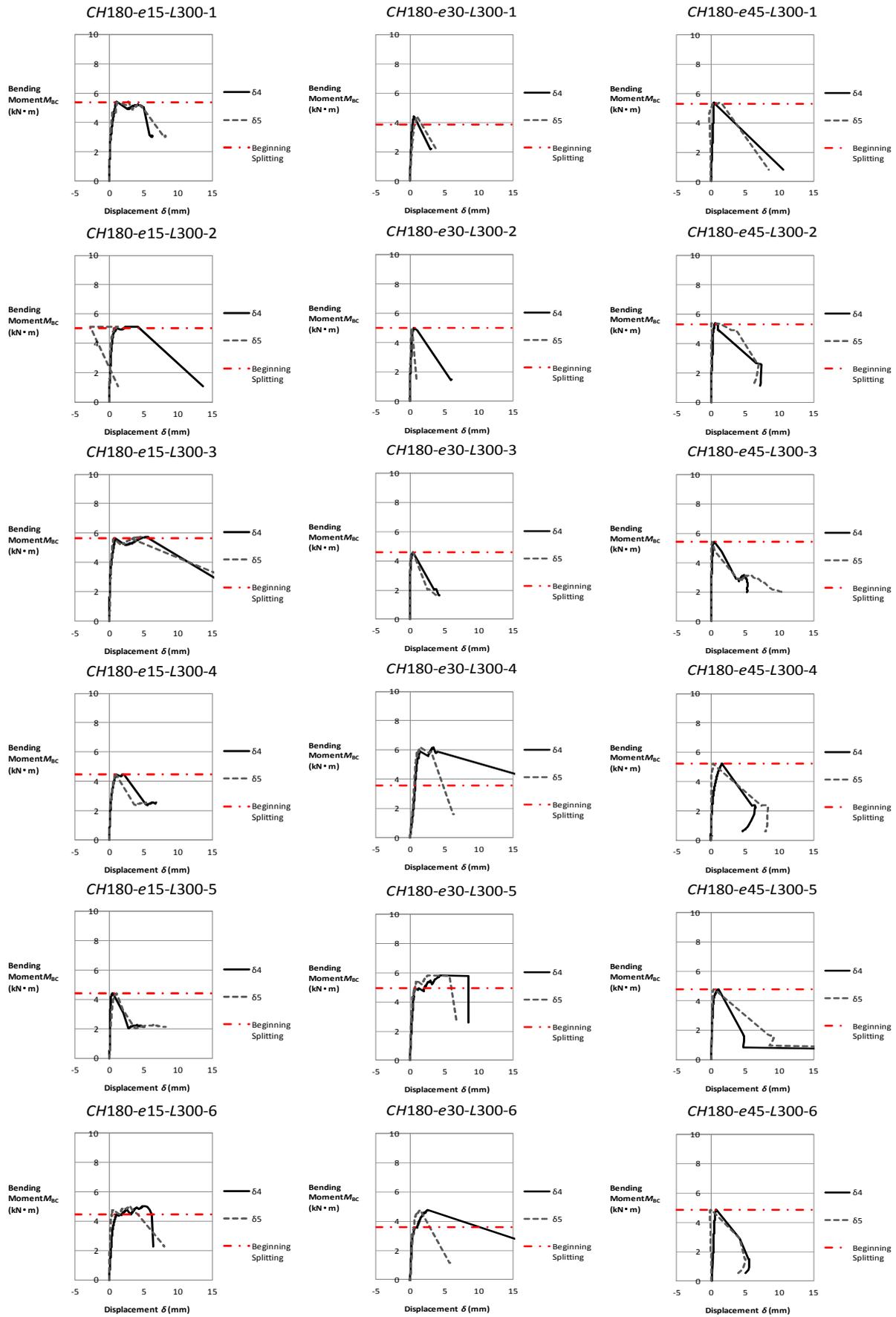


図 5.2.17 顎幅別の胴付のせん断変形(スギ)その1

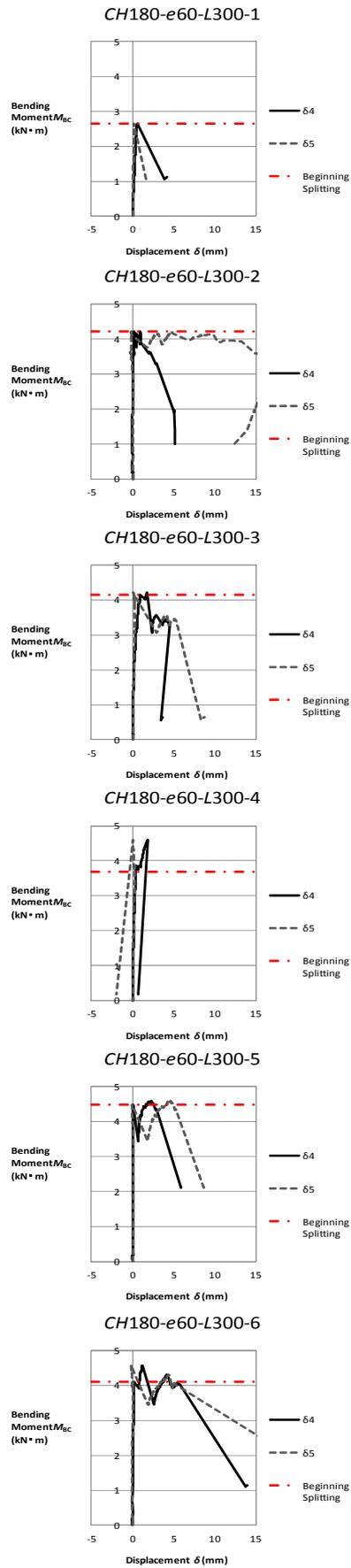


図 5.2.17 顎幅別の胴付のせん断変形(スギ)その 2

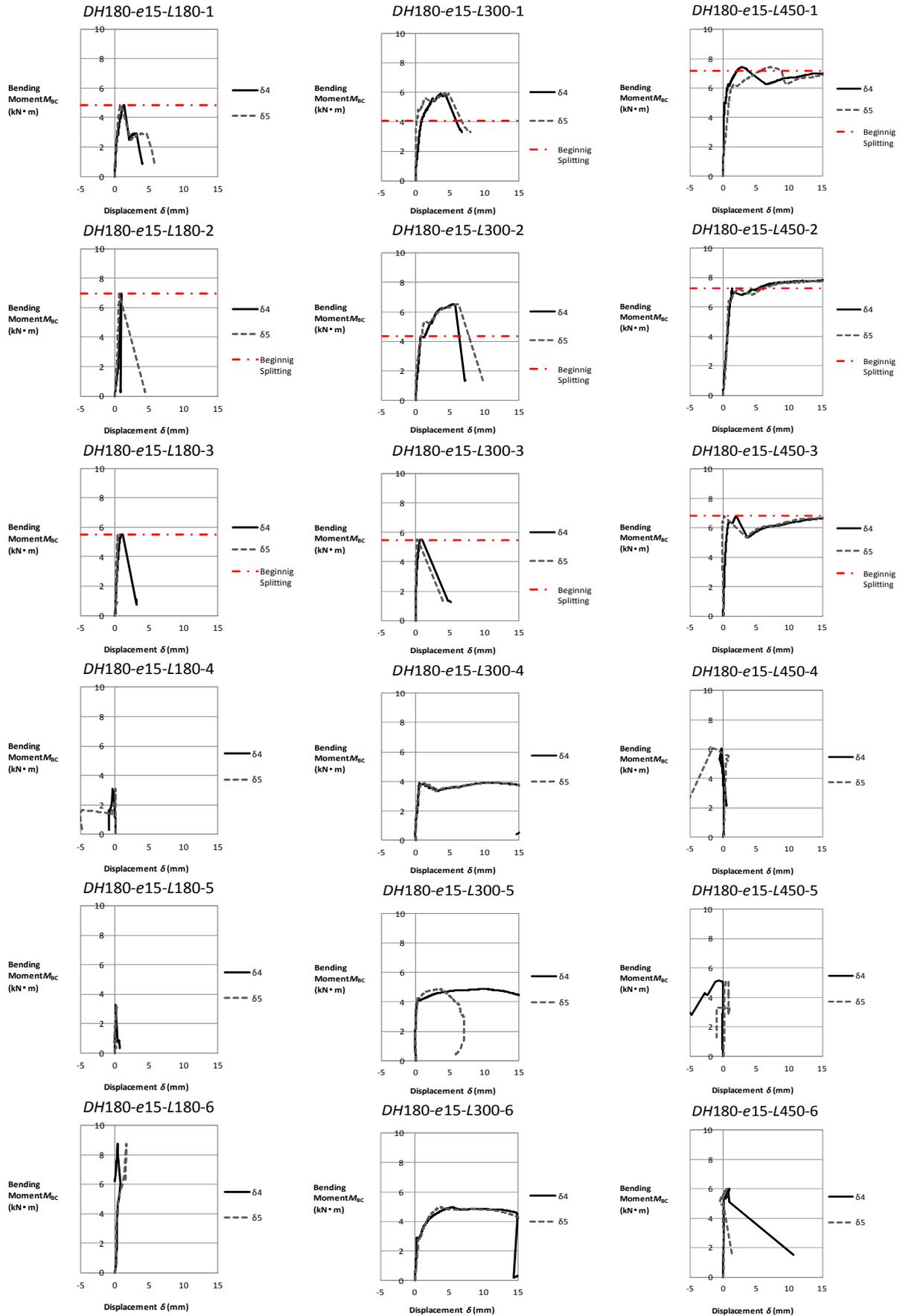


図 5.2.18 継手長さ別の胴付のせん断変形(ベイマツ)

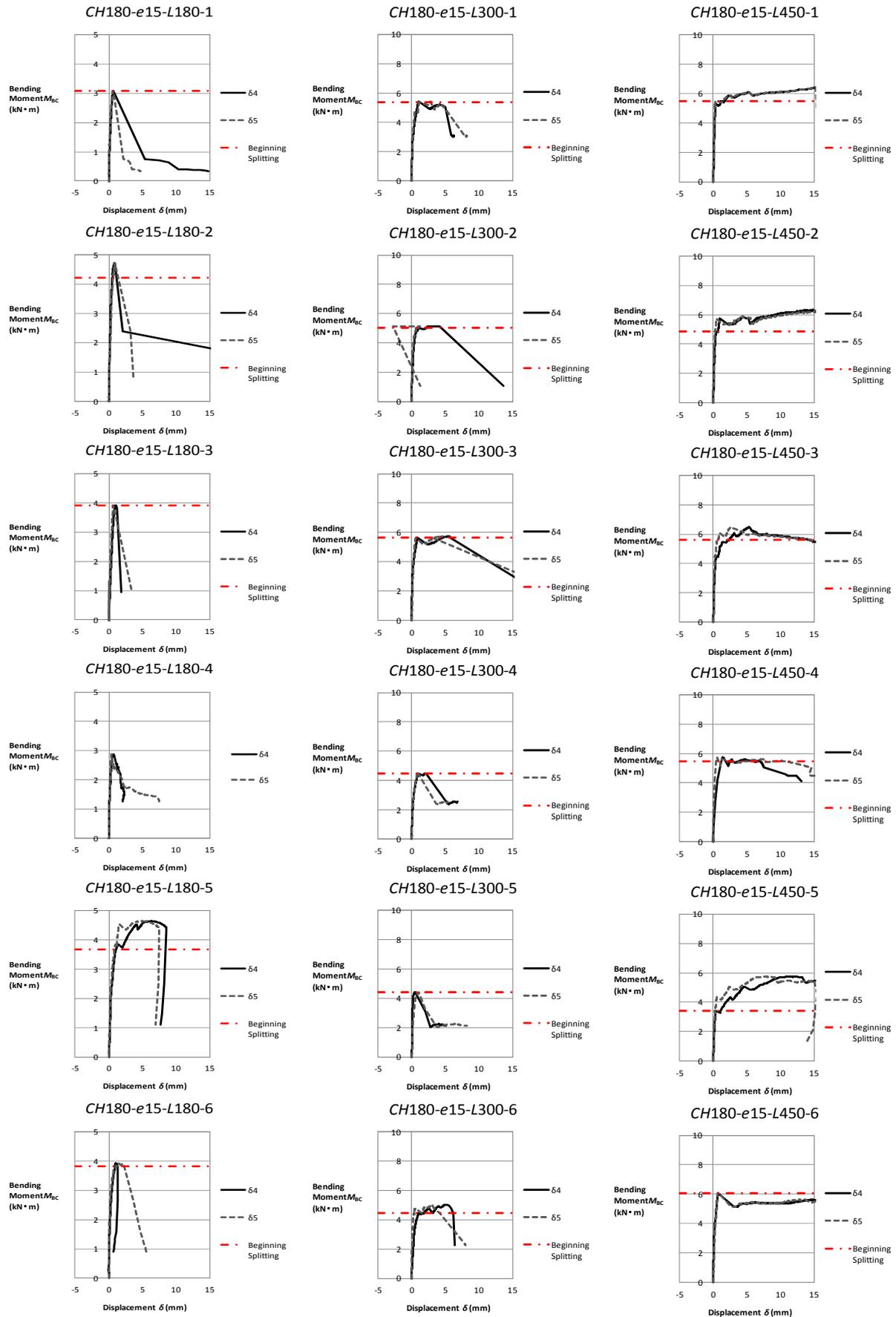


図 5.2.19 継手長さ別の胴付のせん断変形(スギ)

5.3 まとめ

本章では、追掛継の曲げ性能に関する理論値と4点曲げ試験結果の解析を行った。その結果、以下の知見を得た。

1. 回転剛性及び曲げ耐力の予測

材幅 120mm の場合、弾性域と塑性域の回転剛性の理論値で最も高いは、ベイマツの場合、いずれも顎幅 30mm の時、スギの場合もいずれも顎幅 45mm の時であった。

割裂発生時の接合部の抵抗モーメントの理論値及び顎の下端が支圧強度に達した時の降伏モーメントの理論値が最も高いのは、ベイマツ、スギともに 60mm の時であった。

尚、曲げヤング係数や比重で校正すると理論値は材背、顎幅、継手長さが大きければ大きいほど、回転剛性が高くなる、または耐力が上昇するものと推定された。

2. 破壊モード

ベイマツ、スギの両樹種ともに割裂と顎のせん断破壊が最大耐力を決定する主な要因になっていることが判った。

3. 割裂耐力

ベイマツ、スギの両樹種とも理論値と実験値はよく一致、若しくは概ね安全側の推定できた。しかし、この安全側での推定であるが、これは木口面同士の摩擦応力を考慮した割裂試験が、割裂より上側の荷重であるのに対し、追掛継の胴付の場合、胴付に割裂が発生する直前まで中立軸から上側の部分に上向きに押し上げる力が掛かっていることから、この差が安全側の評価になったものと考えられる。

また、胴付に割裂が発生し、継手が降伏するまで割裂が進展する間、抵抗モーメントと接合部変形角は直線的に上昇し、さらに顎の圧壊で粘っている。そこで想定した力学モデルは、顎の下端が支圧強度に達するまでのものであることから、顎の下端が支圧強度に達した後、塑性域が少しずつ上昇する時の力学モデルから回転剛性評価式を導く必要があったことを実証した。

4. 割裂高さ

ベイマツの試験体では、96 体中 92 体で割裂が先行して発生した。割裂高さは、全試験体平均で材背の 1/6 であった。一方、スギの試験体では、96 体中 95 体で割裂が先行して発生した。割裂高さは、全試験体平均で材背の 1/5 であった。

5. 回転剛性の理論値と実験値の比較と曲げ耐力推定値の提案

弾塑性域の回転剛性の実験値は同じパラメータ内においても大きくばらついており、材料物性や加工精度などの影響によるところが大きいものと思われる。但し、それらの影響を差し引いて見た場合、図 5.2.3～5.2.5 より、追掛継の回転剛性の実験値と理論値はよく一致していることが判った。尚、顎の下端が支圧強度に達した後の回転剛性は、同図より適用する部分がほとんど無いことが明らかになっ

た。また、材背、顎幅、継手長さのパラメータの変化に対する弾性域の回転剛性の増減の傾向についても実験値と理論値は概ねよく一致した。

今回の回転剛性の理論値は、材料から直接測定したヤング係数の値を用いて平井・小松式により面圧剛性を求め、これを使って計算値を算出しているが、曲げヤング係数と接合部の局所的な面圧剛性の相関がどの程度あるかについては確かめていない。設計式の妥当性についてより詳細に言及するには、今後はこれらの相関について検討することが必要であると考えられる。

顎の下端が支圧強度に達した時の抵抗モーメントの理論値と実験値は、いずれのパラメータでもよく一致、若しくは安全側で評価できた。よって、追掛継の曲げ耐力は、顎が支圧強度に達する時の抵抗モーメントで推定できるものと考えられる。しかし、顎幅別のパラメータにおいて、両樹種とも顎幅30mm以上は、顎の下端が支圧強度に達する前に顎のせん断破壊、若しくは継手の曲げ破壊によって終局を迎えていることから、理論値が実験値を推定できなかった。これは、割裂と同時に継手の平面保持仮定が崩れ、割裂より上部と顎の引張側縁からせん断破壊する高さに応力が集中することにより実験値が推定値を大きく下回ったものと思われる。よって、今後は追掛継の顎のせん断強度の評価が課題の一つとなる。

6. 抵抗モーメントと接合効率

ベイマツ、スギの両樹種ともに材背の概ね2乗に比例して最大耐力が上昇していく傾向が見られ、最大耐力は断面係数の影響を受けていることが判った。しかし、両樹種ともに材背別の曲げ耐力に関する接合効率を見ると、材背が大きくなるほど接合効率は低下することが判った。また、樹種別の接合効率の比較では、ベイマツの場合、継手のない無垢材に比べ約1/4の効率であり、スギの場合は約1/3の効率であることがわかった。

顎幅の変化による接合効率の明らかな影響は両樹種ともに見られなかった。また樹種別の接合効率の比較では、ベイマツ、スギのいずれの樹種においても継手のない無垢材に比べ約1/3の接合効率であった。

継手長さが長くなるにつれて両樹種ともに接合部の抵抗モーメントが緩やかに上昇する傾向がある。継手長さの変化による影響は、両樹種とも継手長さが長くなるにつれて効率が高くなる傾向が見られた。これは、継手両端部の摩擦によるモーメント抵抗が寄与しているものと推察される。また樹種別の接合効率の比較では、ベイマツの場合、継手の無い無垢材に比べ30%の効率であり、スギの場合は約1/3の効率であることがわかった。

7. 塑性率

塑性率は両樹種ともに総じて材背が高いほど、また継手長さが長いほど塑性率が高く、顎幅による影響は見られなかった。

8. 継手のめり込みと曲げ変形角

両樹種ともに総じて顎の変形角に対し、両胴付における変形角は僅かに大きいのが、剛体と考えるとよいほど僅かなものであった。

9. 胴付のせん断変形

ベイマツ、スギの両樹種及びパラメータの影響も無く、全ての試験体において、概ね胴付の木口面同士の摩擦応力による拘束効果により変位は見られなかった。

第6章 結論

- 6.1 追掛継の曲げ性能理論式について
- 6.2 割裂後から顎が支圧強度に達する前のせん断耐力評価式の誘導

6.1 追掛継の曲げ性能理論式について

ここでは、本論文で得た追掛継の曲げ性能理論式について総括し、その成果と残された課題について述べてみる。

まず、合計 108 体の追掛継の曲げ試験及び合計 192 体の木口面同士の摩擦応力を考慮した割裂試験により、材種、材背、顎幅、継手長さの変化と追掛継の接合部の抵抗モーメントと変形角の関係が、これまで以上に明らかになり、今後の軸組式伝統木造構法の接合部の研究に寄与する貴重なデータを提供した。

尚、今回の追掛継の曲げ性能評価式を導くため、4 点曲げ試験の結果より以下の仮定を立てた。

仮定1: 継手ゾーン内での曲げ変形は無視する。

仮定2: 胴付の反力は繊維方向の圧縮力と木口面の摩擦力のみと考える。

仮定3: 木口面以外の摩擦力は、上木と下木の側面に生じるものが考えられるが無視をする。

仮定4: 弾性状態である胴付と顎の圧縮力の材背方向の分布は、中立軸からの距離に比例するものとする(平面保持仮定)。

仮定5: 塑性状態にある胴付の応力分布は台形分布とする。

仮定6: 塑性状態にある顎の応力分布は台形分布とする。

仮定 1 は、第 5 章 5.2.2.7 で両樹種ともに総じて顎の変形角に対し、両胴付における変形角が僅かに大きい、これによる本理論式の精度に影響の無いことを確認し、継手を剛体とする仮定が妥当であることを実証した。仮定 2 について、検証はしていないが、その他の反力は力学的に考えにくい。仮定 3 は、どの程度の摩擦力が生じているのか今回の研究では明らかにできなかった。仮定 4 は、松窪らの研究¹⁾により胴付に割裂が発生するまでは平面保持仮定が成立することと割裂発生以降、平面保持仮定が成立しないことが実証されている。しかし、実験観察から弾性状態である胴付と顎の圧縮力の材背方向の分布に平面保持仮定が成立するものとしたことについて、回転剛性評価式の理論値と実験値が概ね一致していたことから、その工学的判断は間違いではなかったと思われる。仮定 5、6 については、松窪らの研究¹⁾より、割裂発生後、胴付、顎の中立軸付近の歪みが急激に減少し、割裂から上の胴付と顎の引張側縁の部分の歪みが上昇することから、その仮定についての工学的判断は正しかったと考えられる。

これら仮定 1~4 より、初等力学を用いて簡便に一方向鉛直荷重下の弾性域における継手の回転剛性理論式を、また仮定 5 を加えて、胴付の割裂後から顎の下端が支圧強度に達するまでの継手の回転剛性理論式と割裂発生時の継手の抵抗モーメント理論式、顎の下端が支圧強度に達した時の継手の抵抗モーメント理論式を導き、更に仮定 6 を加えて、顎の下端が支圧強度に達した後の継手の抵抗モーメント理論式を導いた。その結果、弾性域から塑性域までを含む $M-\theta$ 曲線を計算によって求め、最大曲げ耐力を顎の下端が支圧強度に達する時とする提案を行った。これにより弾性域から塑性域において両樹種ともに実験結果と理論曲線が概ねよく一致することが確認され、また曲げ耐力を顎の下端が支圧強度に達した時の抵抗モーメントとすることの妥当性が確認できた。このように理論を実験により検証したことから、力学モデルを作るに当たっての仮定の有用性を実証した。

尚、木質構造の設計において重視されるのが長期荷重下での変形であるが、仮想仕事法により簡便に変形量を求めることを著者は学会等で発表^{2~5)}を行っている。

次に木口面同士の摩擦応力を考慮した割裂試験における成果は、類似する既往の研究が存在しない中、追掛継の継手両端にある胴付面に繊維直交方向に押し上げる摩擦力により割裂が生じる現象を近似的に再現する実験方法を工夫した点である。一つは、割裂を発生させる位置に曲げ応力が発生しないように逆対称4点曲げ試験としたことである。二つ目は木口面を全体的に持ち上げるために試験体の端部を合じゃくりし、顎の両側面に摩擦力を伝達するためのオウシュウアカマツの製材に接着剤を塗布の上、木ビスで圧縮した上で、顎の切り欠きに荷重が集中しないよう顎全体を持ち上げ、追掛継の木口面に発生する摩擦力による割裂を近似的に再現した点である。

また本実験の成果として、1つはベイマツ・スギともに今回の実験条件下における割裂耐力: V_f については、 $w\sqrt{h_e/(1-h_e/H)}$ との比例関係でとらえることが妥当であることが示されたことである。2つ目はベイマツとスギのいずれの割裂破壊係数と比重の間にも有意差は認められなかったことである。岩崎らの報告⁶⁾では、密度の異なる樹種間の関係において、密度と割裂破壊パラメータの関係から下限5%値を求めている。これに基づき日本建築学会の木質構造設計規準・同解説⁷⁾では、割裂破壊係数: C_r を純粋な木材の密度との関係式で示している。しかし、ここに取り上げられているグラフは、先の発表で岩崎らが樹種の違いを明らかにしてプロットしていたグラフに対して、樹種の違いを明らかにしない単一の凡例で描かれており、混乱を避けるためにも改めることが望ましいと思われる。

追掛継の4点曲げ試験から得られた知見として、材幅が120mmの時、ベイマツは顎幅30mmで、スギは45mmで理論的にも実験においても最も剛性が高かった。一方、同じ条件の時、実験で両樹種ともに塑性率が最も低い結果となった。よって、材幅120mmの場合では、耐力は材背と継手長さで、剛性はベイマツの場合、顎幅30mm、スギの場合45mmで、靱性は継手長さで確保することにより、最も効率的な追掛継の設計が可能となることが判った。

また本研究を進める中で知り合った全国の大工たちへの聞き取りの中で、多くの大工が材幅120mmの時、顎幅を15mm、若しくは30mmとしていることが判った。これにより、これまで大工が、経験と勘で作ってきたものが靱性と剛性を求めた仕様となっていることを科学的に裏付けることができた。今後は、この研究成果が生かされ、樹種や製材寸法によって最適な刻み寸法を選ぶことが可能となった。さらにプレカット技術への応用や新しい継手・仕口の開発にも応用が可能となる。

我が国の軸組式伝統木造構法は、主に貫や板壁をよって構成されていることから、材や継手に曲げ応力が発生することはよく知られてきたことである。

今回、追掛継という一つの継手の曲げ性能のみではあるが、弾性域から塑性域における理論式ができたことにより、従来、大工の経験と勘とによって決定されてきた継手・仕口の設計が可能となる一步を踏み出すことができた。今後、その他の継手・仕口の性能評価式が同様に作られていくことにより、木質構造設計の王道ともいべき許容応力度設計法により、我が国の軸組式伝統木造構法の設計が可能となる。

さらにこれらの評価式が充実して行くことにより、層間変形角1/30~1/10以上で耐力が上昇する伝統木造構法の塑性域の性能が明らかになり、接合部が塑性ヒンジ化した後のエネルギー吸収能を活かした設計が可能となる。

尚、今後の課題として、今回の回転剛性の理論値は、材料から直接測定したヤング係数の値を用いて平井・小松式⁸⁾により面圧剛性を求め、これを使って計算値を算出しているが、曲げヤング係数と接

合部の局所的な面圧剛性の相関がどの程度あるかについては確かめていない。設計式の妥当性についてより詳細に言及するには、今後はこれらの相関について検討することが必要である。

また実験では、顎の下端が支圧強度に達する前に顎のせん断破壊の発生が多かったことから、今後より粘り強い継手にすることが必要となる。そこで塑性域の曲げ性能理論式をさらに有用なものへとするためにも、顎のせん断耐力理論式を導くことが必要である。同時により靱性の高い継手を考える場合は、材の曲げ変形による影響について、材背と継手長さの関係においてさらに検証される必要がある。

さらに今回、木口面同士の摩擦応力による割裂耐力を逆対称4点曲げ試験の結果を使って検証したが、今後はより追掛継の胴付に発生する摩擦応力を再現する試験方法の開発が必要である。

6.2 割裂後から顎が支圧強度に達する前のせん断耐力評価式の誘導

追掛継の顎が支圧強度に達する前の継手の破壊は、第5章 5.2.2.1より、胴付の割裂若しくは顎のせん断破壊に起因している。しかし、本論文では時間的制約により、顎が支圧強度に達する前の顎のせん断強度について言及してこなかった。そこで今後の課題として、その前提となる力学モデルと顎が支圧強度に達する前のせん断耐力評価式の誘導について述べる。

顎の下端が支圧強度に達する前の顎のせん断耐力評価式の誘導にあたり、次の仮定をする。

仮定1: 継手の曲げ変形は無視した。

仮定2: 胴付の反力は繊維方向の圧縮力と木口面の摩擦力のみと考えた。

仮定3: 木口面以外の摩擦力は、上木と下木の側面に生じるものが考えられるが無視をした。

仮定4: 弾性状態にある顎の圧縮力の材背方向の分布は、平面保持仮定が成立するものとした。

仮定5: 弾性、若しくは塑性状態にある胴付の応力分布は三角形、若しくは台形分布とした。

以上より、図 6.2.1、図 6.2.2、図 6.2.3 の力学モデルを作成した。

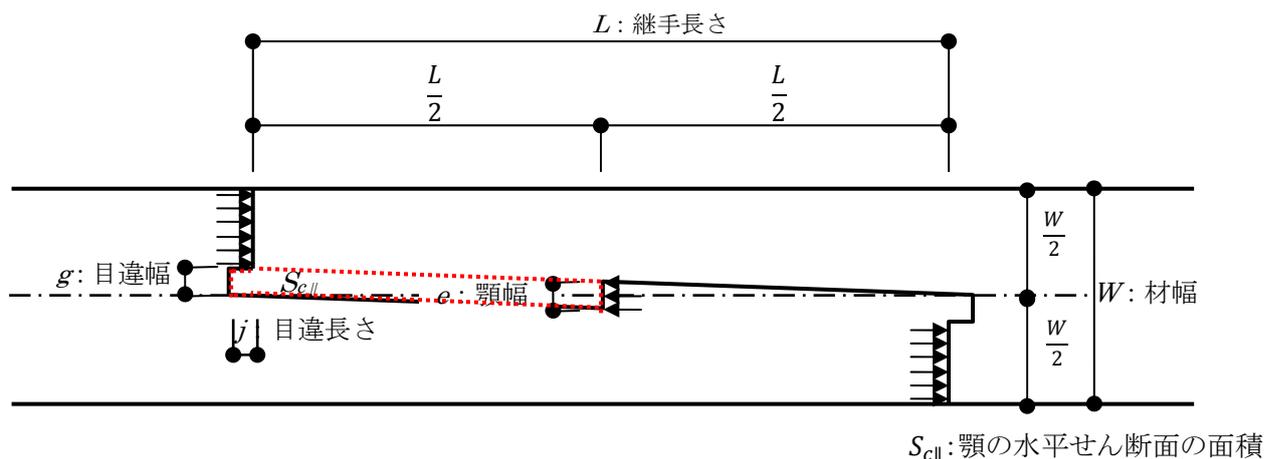


図 6.2.1 上面から見た割裂後から顎の下端が支圧強度に達する前の応力状態と各部寸法

$$\text{上底: } \frac{L-k}{2}$$

$$\text{下底: } \frac{L}{2} - \alpha = \frac{L}{2} - k \left(\frac{1}{2} - \frac{y_f - x}{H} \right)$$

よって、顎の垂直せん断面の面積: $S_{c\perp}$ は、次式となる。

$$\begin{aligned} S_{c\perp} &= \frac{1}{2} \left[\frac{L-k}{2} + \left\{ \frac{L}{2} - k \left(\frac{1}{2} - \frac{y_f - x}{H} \right) \right\} \right] (y_f - x) \\ &= \frac{1}{2} \left\{ L - k + \frac{k(y_f - x)}{H} \right\} (y_f - x) \cdots (6.2.2) \end{aligned}$$

また、顎の水平せん断面の面積: $S_{c\parallel}$ は、次式となる。

$$S_{c\parallel} = e \left\{ \frac{L-k}{2} + k \frac{(y_f - x)}{H} + j \right\} \cdots (6.2.3)$$

(6.2.1)式より、

$$S_c = \frac{1}{2} \left\{ L - k + \frac{k(y_f - x)}{H} \right\} (y_f - x) + e \left\{ \frac{L-k}{2} + k \frac{(y_f - x)}{H} + j \right\} \cdots (6.2.4)$$

この時、せん断応力度: $\Delta\sigma_s$ 、顎のせん断応力: V_{cs} とすると、

$$\begin{aligned} V_{cs} &= \Delta\sigma_s S_c \\ &= \Delta\sigma_s \left[\frac{1}{2} \left\{ L - k + \frac{k(y_f - x)}{H} \right\} (y_f - x) + e \left\{ \frac{L-k}{2} + k \frac{(y_f - x)}{H} + j \right\} \right] \cdots (6.2.5) \end{aligned}$$

次に顎をせん断破壊させた時の顎の圧縮応力度を $\Delta\sigma_{cf}$ とすると、顎がせん断破壊した時の圧縮応力 V_{cf} は、次式のようになる。

$$V_{cf}(x) = \int_x^{y_f} \Delta\sigma_{cf} e x dx$$

$$V_{cf}(X) = \frac{1}{2} \Delta\sigma_{cf} e (y_f^2 - X^2) \cdots (6.2.6)$$

ここで(6.2.5)式より、 X の位置においてせん断破壊が生じる場合のせん断耐力を $V_{cs}(X)$ とすると、

$$V_{cs}(X) = \Delta\sigma_s \left[\frac{1}{2} \left\{ L - k + \frac{k(y_f - X)}{H} \right\} (y_f - X) + e \left\{ \frac{L-k}{2} + k \frac{(y_f - X)}{H} + j \right\} \right] \cdots (6.2.7)$$

(6.2.6)=(6.2.7)より、最小仕事の原理から $\Delta\sigma_{cf}$ が最小になる時の X がせん断破壊の位置となる。

$$\frac{1}{2} \Delta\sigma_{cf} e (y_f^2 - X^2) = \Delta\sigma_s \left[\frac{1}{2} \left\{ L - k + \frac{k(y_f - X)}{H} \right\} (y_f - X) + e \left\{ \frac{L-k}{2} + k \frac{(y_f - X)}{H} + j \right\} \right] \cdots (6.2.8)$$

ここで顎のせん断応力: V_{cs} を推定する式が未知であることから、(6.2.8)式を解くことはできないが、その解法の道筋をここに提案しておく。

以上

謝辞

東京大学大学院を受験することを決意して以来、これまでお世話になった全ての方々に心から感謝申し上げます。

振り返れば今から6年前の平成18年の新年早々、太田正光教授に受験相談に乗っていただき、研究テーマとして考えていた『木造建築をする工務店のミシュラン ―認められるべき職人が正しく評価される―』に「周りの刺激になるから受験してみても？」と仰っていただいたことから始まりました。また受験の際、稲山准教授から「現在の我が国の伝統構法について、どんな課題があると思いますか？」と試問があり、研究計画書にも書いていたように「軸組式伝統木造構法の継手・仕口は、大工が勝手に決定していて設計がなされていないので、設計ができるようにこの性能を明らかにする必要があります。」と答えながら、こんな大変なことは自分には関係ないと思っていました。それをやることになるとは、とても感慨深いものがあります。

この5年間で振り返りますと、大学で学んだことを毎週、京都へ持ち帰って、朝、夕、大工たちにレジュメを渡し、「今度はこんなことを教えてもらおうきたんや。難しところは飛ばしたらええさかい、最初と最後だけ読んだらええ。あとは自分に都合のええところだけ取って読みい。解らんかったら、一緒に読もう。」と言って、この素晴らしい大工たちが少しでも先端の科学に触れるようにと努めてきました。そして何よりうれしかったことは、彼らがとても興味津々で読んだことでした。今後は在学中に設立した団体である京都リビングデザインセンターを通して、さらに多くの人々のために先端の科学技術を現場に伝えてゆけるように努力していきたいと思っています。

このように現場の職人たちにも伝えられるように体系的に木造建築を教育する場を作り、教えて下さった生物材料科学専攻の先生方に心から感謝いたします。特に本研究を進めるにあたりご指導くださいました稲山正弘准教授には心からお礼申し上げます。またゼミや木質構造研究会で多くのご助言をくださいました安藤直人教授(当時)、日頃の研究や実験においては、環境材料設計学研究室の蒲池健助教、木質材料学研究室の相馬智明助教、木質構造学研究室の福山助教には大変お世話になりました。その他、本研究をまとめるにあたりご支援してくださいました木質材料学研究室、環境材料設計学研究室、生物材料物理学研究室のみなさん、本当にありがとうございました。おかげさまで無事に学位論文をまとめることができました。

またこの5年間の成果は、京都で私の代りに現場で陣頭指揮を執ってくれた番頭の中村信哉君、生活においては家族の支援があつたればこそという思いがあり、感謝の思いで一杯です。

ここに改めてこの5年間、ご教授くださいました先生方、ご支援下さいました皆さまに重ねてお礼申し上げます。

平成24年3月

小林 良洋

参考・引用文献

参考・引用文献

第1章

- 1) 日本建築学会:木質構造接合部設計マニュアル、p.53、pp.164-168、2009.11(平成21年)
- 2) 内田祥哉:在来構法の研究—木造の継手仕口について—、財団法人住宅総合研究財団、pp.9-11、pp.26-27、1993(平成5年)
- 3) 稲山正弘:木材のめりこみ理論とその応用—靱性に期待した木質ラーメン接合部の耐震設計法に関する研究—、東京大学博士論文、pp.15-16、1991(平成3年)
- 4) 日本住宅・木材技術センター:木造軸組工法住宅の許容応力度設計、pp.3-6、2008(平成20年)
- 5) 日本住宅・木材技術センター:木造軸組工法住宅の許容応力度設計、pp.563-592、2008(平成20年)
- 6) 住吉虎七、松井源吾:木造の継手と仕口、鹿島出版会、pp.4-77、1989(平成元年)
- 7) 日本建築学会構造系論文集 第76巻 第669号、2011.11(平成23年)、追掛継の曲げ性能—方向鉛直荷重による弾性域の回転剛性評価式の提案—、pp.1943-1950、小林良洋、蒲池健、稲山正弘
- 8) 本多祥二、井上正文:在来木造継手の剛性・強度に関する実験的研究(その1)腰掛鎌継および追掛大栓継の引張実験、日本建築学会九州支部研究報告第32号、pp.185-188、1991.3
- 9) 井上正文、井英浩:在来木造継手の剛性・強度に関する実験的研究(その2)腰掛鎌継および追掛大栓継の曲げ実験、日本建築学会九州支部研究報告第33号、pp.169-172、1992.3
- 10) 藤野栄一、佐藤俊平、大橋好光:在来継手の引張耐力に関する研究(その2. 追掛大栓継)、日本建築学会大会学術講演梗概集 C-1、pp.99-100、2002.8
- 11) 松窪直人、松本渡、甲津功夫:追掛大栓継手の力学性能に関する実験的研究—継手各部の歪挙動と破壊状況—、日本建築学会近畿支部研究報告集、pp.29-32、平成18年度
- 12) 松窪直人、松本渡、甲津功夫:追掛大栓継手の力学性能に関する実験的研究—継手各部の歪挙動と破壊状況—、日本建築学会近畿支部研究報告集、pp.29-32、平成18年度
- 13) 戸田正彦、飯島敏夫:伝統的木造住宅の接合部の強度性能 その1 継手の引張性能、日本建築学会大会学術講演梗概集 C-1、pp.135-136、2007.8
- 14) 宇京斉一郎、軽部正彦、原田真樹、林知行:引張力を受ける追掛大栓継のひずみ分布解析、日本建築学会大会学術講演梗概集 C-1、pp.139-140、2007.8
- 15) 瀧野敦夫、向出静司:追掛大栓継手の最大曲げ耐力評価に関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集 C-1、pp.149-150、2009.8(平成21年)
- 16) 北田祐一、隈澤文俊、大和田義正:追掛大栓継の曲げ特性に関する実験的研究、日本建築学会大会学術講演梗概集 C-1、pp.147-148、2009.8(平成21年)
- 17) 稲山正弘:めり込み抵抗接合の設計、建築技術、No.547、p.108、1995.1(平成7年)
- 18) 北守顕久、鄭基浩、小松幸平:金輪継ぎ手の二軸曲げ特性について、第60回日本木材学会宮崎大会学術講演梗概集、2010.3(平成22年3月)

- 19) 日本建築学会:木質構造設計規準・同解説 一許容応力度・許容耐力設計法一、pp.229-232、2009(平成 21 年)

第 2 章

- 1) 日本建築学会:木質構造設計規準・同解説 一許容応力度・許容耐力設計法一、pp.230-236、2009(平成 21 年)

第 3 章

- 1) 日本建築学会構造系論文集 第 76 巻 第 669 号、2011.11(平成 23 年)、追掛継の曲げ性能 一方向鉛直荷重による弾性域の回転剛性評価式の提案、pp.1943-1950、小林良洋、蒲池健、稲山正弘
- 2) 松本渡、松窪直人、甲津功夫:伝統軸組構法に使用される追掛大栓継手の力学的性能改善に関する実験的研究(その 2)、日本建築学会近畿支部研究報告集、2007、pp.329-332
- 3) 瀧野敦夫、向出静司:追掛大栓継手の最大曲げ耐力評価に関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集 C-1、2009.8、pp.149-150
- 4) 平井卓郎、沢田稔:切り欠きを持つ木材梁の曲げ剛性と耐力(第 1 報)、北海道大学農学部演習林研究報告第 36 巻第 2 号、1979、pp.387-419
- 5) 安村基:木材の繊維直交方向加力を受けるボルト接合部の破壊シミュレーション、日本建築学会大会学術講演梗概集、C-1、構造Ⅲ、1995.8、pp.111-112
- 6) P. J. Gustafsson:A Study of Strength of Notched Beams, Proceedings of 21st Meeting of CIB-W18/21-10-1, 1988
- 7) T.A.C.M. van der Put, A.J.M. Leijten:Evaluation of Perpendicular to Grain Failure of Beams Caused by Concentrated Loads of Joints, Proceedings of 33rd Meeting of CIB-W18/33-7-7, August 2000, p.15
- 8) 岩崎晃治、安村基:繊維直交方向加力を受けるボルト接合部における割裂破壊荷重の推定:割裂破壊パラメータの提案、日本建築学会大会学術講演梗概集 C-1、2005.9、pp.273-274
- 9) 日本建築学会:木質構造設計規準・同解説 一許容応力度・許容耐力設計法一、pp.234-238、2009(平成 21 年)

第 4 章

- 1) 日本建築学会:木質構造基礎理論、2010.12、pp.53-59、330-331
- 2) 日本建築学会:木質構造設計規準・同解説 一許容応力度・許容耐力設計法一、pp.229-232、2009(平成 21 年)

第 5 章

- 1) 村瀬安英、太田基:木材の摩擦特性に関する研究(第 1 報)、木材学会誌、Vol.19、No.9、

pp.421-425、1973.9(昭和 48 年)

- 2) 村瀬安英、太田基:木材の摩擦特性に関する研究(第 2 報)、木材学会誌、Vol.20、No.6、pp.243-249、1974.6(昭和 49 年)
- 3) 和泉智也、岡村雅克、棚橋秀光、鈴木祥之:伝統木造仕口の回転めり込みにおける摩擦係数、日本建築学会大会学術講演梗概集 C-1、pp.7-8、2008.9(平成 20 年)

第 6 章

- 1) 松窪直人、松本渡、甲津功夫:追掛大栓継手の力学性能に関する実験的研究 —継手各部の歪挙動と破壊状況—、日本建築学会近畿支部研究報告集、pp.29-32、平成 18 年度
- 2) 小林良洋、蒲池健、稲山正弘:追掛継の曲げ性能、日本建築学会大会学術講演梗概集 C-1、pp.153-154、2009年8月
- 3) 小林良洋、稲山正弘:追掛継の曲げ性能、第59回日本木材学会研究発表要旨集 H15-1045、2009年3月
- 4) 小林良洋:追掛継の曲げ性能、東京大学大学院 農学生命科学研究科 木造建築コース 修士論文、2009年1月
- 5) 小林良洋、稲山正弘:追掛継の曲げ性能、木質構造研究会技術報告集(第12回)、pp.93-96、2008年12月
- 6) 岩崎晃治、安村基:繊維直交方向加力を受けるボルト接合における割裂破壊荷重の推定:割裂破壊パラメータの提案、日本建築学会大会学術講演梗概集 C-1、2005.9、pp.273-274
- 7) 日本建築学会:木質構造設計規準・同解説 —許容応力度・許容耐力設計法—、2009、pp.234-238
- 8) 日本建築学会:木質構造設計規準・同解説 —許容応力度・許容耐力設計法—、pp.230-236、2009(平成 21 年)