

論文の内容の要旨

論文題目 温度ひび割れ照査方法の変遷から見た現状の課題とその改善方法に関する研究

氏 名 杉 橋 直 行

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

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

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

$f_{tk}(t)$: 材齢 t 日におけるコンクリート引張強度

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

γ_{cr} : ひび割れ発生確率に関する安全係数

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

しかしながら、確率論的には、引張強度と引張応力にばらつきを考慮して、引張応力が引張強度よりも大きくなる確率をひび割れ発生確率としてこれを算定した場合、ひび割れ指数を一つ決めても、ひび割れ発生確率は一義的に決まらない。これは、同一のひび割れ指数でも、ばらつきが異なる無数の母集団を想定することが可能であり、確率が一義的に決まらないためである。強度と応力にばらつきを考えた場合、ひび割れ指数は、強度の母集団の期待値と応力の母集団の期待値の比と定義せざるをえない概念的なものになるからでもある。

前述のコンクリート標準示方書に示されるひび割れ発生確率図は、この概念を表現できていない。この理由は、ひび割れ発生確率図は、確率論から算定されるひび割れ発生確率を示したのではなく、実際の構造物のひび割れの発生確率をひび割れ指数と対応づけて示しているために生じている。このため、示方書ではひび割れ発生確率図について、その改訂の都度、確率論との整合を意識した、様々な合理的仮定や理由が説明されてきた。し

かし 30 年の時間の経過と 3 回の改訂の結果、理解が困難になってきている側面がある。

本論文は、土木構造物のマスコンクリートのひび割れ発生確率図を中心に、ひび割れ照査法の変遷を、改訂の要因と対応、関連する物性や制御目標値などに着目して整理を行い、この観点から、現状のひび割れ照査方法の課題を明らかにした。さらに、これらの課題を踏まえて、確率論に照らして説明性が高く、より汎用的で新たなひび割れ照査法の提案を行ったものである。

始めに、第 1 章で本研究の背景と目的を述べた。

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

第 3 章では、ひび割れ発生確率図を分析して現状の課題を検討整理した。

現状のひび割れ発生確率図では、割裂引張強度を用いて算出したひび割れ指数が 1 の時に、ひび割れ発生確率が 50% となることが危険側であることを、課題として示した。確率が 50% となるのは、構造物中の引張強度と引張応力が等しい時であることが明らかにされ、構造物中よりも大きな割裂引張強度を用いて算出したひび割れ指数が 1 の時には、確率は 50% よりも大きくなるためである。

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

第 4 章では、引張強度を引張応力が超える確率をひび割れ発生確率と定義し、それぞれ

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

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

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

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

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

標準的な照査方法は、確率論から算定するひび割れ発生確率図を利用する方法を提案した。ひび割れ発生確率曲線は、変動係数を 5～25% の範囲にした場合の理論的な曲線を示し、この範囲内で製造管理の程度によって適切に変動係数を設定することを提案した。標準的

な変動係数としては、強度も応力も 15%に設定することを提案した。ひび割れ指数の算定に用いる引張強度は割裂引張強度を材料係数で除したものとし、材料係数は標準的には 1.25 として、施工管理の程度によって 1.0 まで低減することを提案した。これにより、製造施工管理の程度は、材料係数、変動係数を適切に設定することで評価することが可能となり、品質管理の高度化にインセンティブを付与することが可能となった。

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

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

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

今後の課題は、ここで設定した、変動係数や標準偏差についてデータを蓄積して検証を行い、より実態に即した変動係数と標準偏差を設定することである。