

論文 マスコンクリートの温度ひび割れ照査法の改訂の変遷と要因整理 による本質的な改善についての一提案

杉橋 直行^{*1}・岸 利治^{*2}

要旨：マスコンクリートの温度ひび割れ照査方法として一般化している，構造物に許容するひび割れ発生確率を定め，これを満足するように引張強度と最大主引張応力度との比で定義されるひび割れ指数を照査する方法について検討を行った。この照査方法の根幹となるひび割れ指数とひび割れ発生確率との関係図について，これが初めて提示された昭和 61 年制定コンクリート標準示方書（土木学会）から現在に至る 3 度の改訂を振り返り，改訂毎に変化をもたらした要因を整理して，同図を利用したひび割れ照査法の確率論的意味を再考した。そして，考慮すべき要因と排除すべき要因を整理した上で，本質的な改善策の提案を行った。

キーワード：マスコンクリート，ひび割れ，ひび割れ発生確率，安全係数，引張強度

1. はじめに

コンクリートにひび割れが発生するのは，引張応力が引張強度を超えた時であり，引張応力と引張強度が一致する時にひび割れが発生する確率は 50%になることは概念的に当然である。引張応力よりも引張強度の方が大きい場合，確定論的にはひび割れは発生せず，ひび割れ発生確率は 0%となる。このためひび割れが発生する確率は，引張応力と引張強度のばらつきをモデル化して，引張応力が引張強度よりも大きくなる確率をひび割れ発生確率とする説明が行われてきた。例えば，引張応力の平均値が 2.5N/mm^2 ，引張強度の平均値が 3.0N/mm^2 ，ひび割れ指数（引張応力に対する引張強度の比）が 1.2 となる図-1 を想定する。図-1 は，引張応力のばらつきを 1 種類，引張強度のばらつきを 2 種類想定して，正規分布させた場合の確率密度を示している。引張強度のばらつきが違えばひび割れ指数が 1.2 と同じでもひび割れ発生確率は 26%と 20%と異なることは，確率密度関数の形状からも想像できるであろう。このひび割れ発生確率は，引張応力，引張強度がそれぞれ正規分布している場合に，引張応力が引張強度を超える確率を一般的な確率論¹⁾から計算したものである。ところがこのような計算をしても，ひび割れ指数が 1 の時だけは，ばらつきがどのようなであっても引張強度が引張応力を超える確率は 50%と一義的に決まることにも留意が必要である。

一方で，現在，土木構造物におけるマスコンクリートのひび割れ照査はコンクリート標準示方書²⁾に示される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），図-2 を利用するのが一般的である。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，図-2 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。このようなひび割れ発生確率図を利用したひび割れ照査法は，昭和 61 年（1986 年）制定コンクリート標準示方書³⁾において初めて体系化されてから，既に 30 年あまりが経過し，実務上は一般化していると言ってよい。

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

ここに， $f_{tk}(t)$ ：材齢 t 日におけるコンクリート供試体

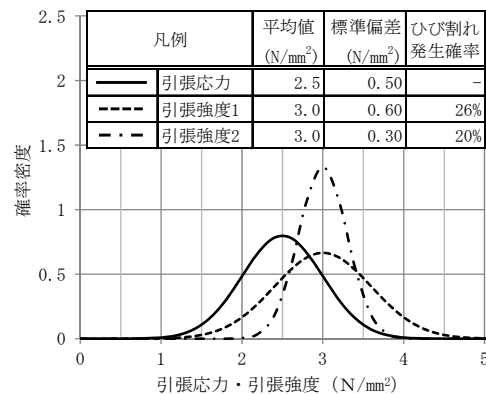


図-1 引張応力・引張強度のばらつきと確率密度

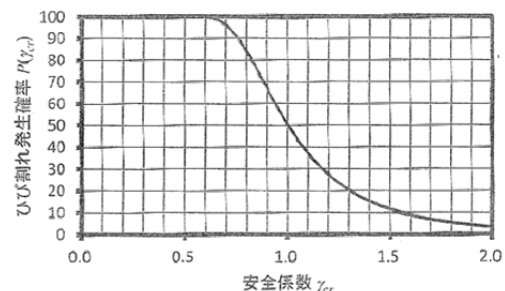


図-2 安全係数とひび割れ発生確率²⁾

*1 清水建設株式会社 土木技術本部 バックエンド技術部 課長 修（工）（正会員）

*2 東京大学 生産技術研究所 教授 博（工）（正会員）

の引張強度（特性値）， $\sigma_k(t)$ ：材齢 t 日における構造物中の最大主引張応力度， $I_{cr}(t)$ ：ひび割れ指数 $I_{cr}(t) = f_{tk}(t) / \sigma_k(t)$ ， γ_{cr} ：ひび割れ発生確率に関する安全係数である。

しかし、前述のとおり強度や応力のばらつきから確率論的にひび割れ発生確率を算定した場合には、ひび割れ指数 1.2 で 28%程度となる図-2 のひび割れ発生確率図のように、ひび割れ指数により一義的にひび割れ発生確率が決まらないことを示した。これは、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 回の同図の改訂の結果、理解が困難になってきている現状もある。

以上よりここではまず、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、ひび割れ照査法の改訂の変遷とその要因の整理を行うこととした。

その上で、打設管理記録のデータベースを活用し、各種のひび割れ抑制対策を採用した図-3⁴⁾に示される山口県の高品質な構造物群のように、ひび割れ発生確率が、図-2 に示される確率（図-3 中のマスコン指針）より、同一指数で比較すると小さくなるような場合も一貫して取り扱えるひび割れ照査法を検討することとした。

2. ひび割れ照査法の改訂の変遷とその要因

2.1 ひび割れ発生確率図制定以前

マスコンクリートのひび割れ制御について、初めてオーソライズされたのは、昭和 49 年（1974 年）制定コンクリート標準示方書⁵⁾においてと考えられる。ここでは、「部材厚さが 1 m 以上のものをマスコンクリートのめやすとし、これらにおいては温度上昇、ひび割れ防止が重要であることを指摘し、構造上差支えない場合は継手を設けること、打込み温度を 25℃以下とする」ことを規定している。1974 年当時、1970 年にトヨタ自動車がデミング賞を受賞して Total Quality Control(TQC)の重要性が日本で認識されると、ゼネコン各社でも一斉にデミング賞受賞に向けて、品質と施工との定量的関連性の把握のために膨大なデータ収集が行われるようになっていた。その品質としてコンクリートのひび割れ、特にマスコンクリートのひび割れ制御がゼネコン各社で着目されるようになったことも 1974 年当時のコンクリート標準示方書に取り上げられる契機となった一因であろう。

その後の示方書の改訂毎のマスコンクリートの記述の変遷を見ると、まず昭和 52 年（1977 年）改訂版にお

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

昭和 55 年（1980 年）改訂版での変更はされず、次の昭和 61 年（1986 年）制定版で、現在のひび割れ照査法の基礎体系を形作ることになる、ひび割れ発生確率図を利用する方法に大改訂される。昭和 61 年当時、TQC により集積された膨大な施工と品質に関する定量的なデータの相関や要因を分析する時代に入っていた。遡ること 5 年、昭和 56 年（1981 年）には、日本コンクリート工学会（旧工学協会、以降、JCI と呼ぶ）にマスコンクリートの温度応力研究委員会が組織され、温度応力発生メカニズム、応力算定方法について広範に議論されることになる。さらに、昭和 58 年（1983 年）には土木学会からコンクリート構造物の限界状態設計法指針（案）が示されることになり、強度などの特性値の考え方や定式化が図られたことで、温度ひび割れを数値的に捉え、解析的に評価するという機運が高まっていた。パソコンの進歩がその解析的なひび割れ評価をより簡易にした。このような背景もあり、温度ひび割れに関する研究は図-4 のように昭和 49 年当初から昭和 60 年まで右肩上がりに増加し、JCI において昭和 61 年 3 月にマスコンクリートのひび割れ制御指針が刊行される基礎研究となった。同ひび割れ制御指針では、未だひび割れ発生確率図は示されていなかったものの、ひび割れ指数が定義され、コンクリートの熱特性、力学特性が提示、温度応力算定方

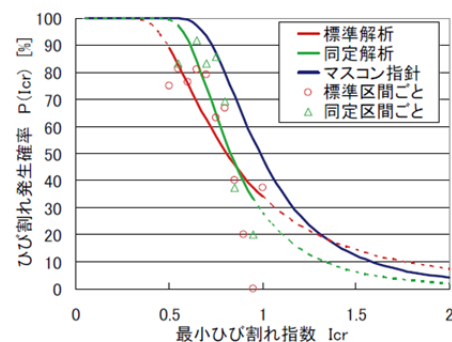


図-3 山口県の構造物群のひび割れ発生確率⁴⁾

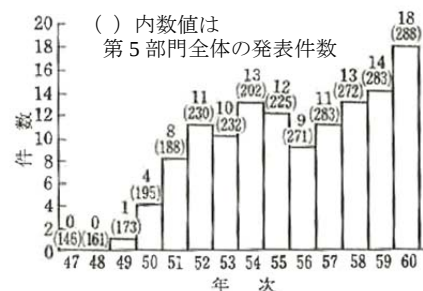


図-4 土木学会年次講演会におけるマスコンクリート温度応力関係の発表件数⁶⁾

法が体系化されるに至った。これらの研究成果を踏まえ、前述のとおり昭和 61 年 10 月に示方書がひび割れ発生確率図を用いたひび割れ照査体系に大改訂された。

2.2 ひび割れ発生確率図の変遷

(1) 昭和 61 年 (1986 年) 制定版

昭和 61 年制定版コンクリート標準示方書における、初めてのひび割れ発生確率図を図-5 に示す。図-5 は、大崎など⁷⁾のひび割れ発生有無に関する調査結果 150 件と吉岡など⁸⁾の同調査結果 56 件を合わせて、それぞれが個別の方法で算出したひび割れ指数相当の値との関係から設定された図である。2 種類別々の方法で算出したひび割れ指数を同一の横軸として確率分布を評価するという整理ではあったものの、温度ひび割れ指数を算出すれば、ひび割れ発生確率を一義的に決定できるようになったことで、ひび割れ制御方法の相対的比較や制御効果の評価が可能となった。ひび割れを制御した品質の良い構造物の構築に著しい貢献を果たしたと評価できる。

一方で、ひび割れ指数が 1 の時のひび割れ発生確率を 40%としている理由などは説明されておらず、前述の確率論から算定されるひび割れ発生確率との整合については、あまり意識されていなかったと考えられる。

次の平成 3 年 (1991 年) 制定版では、クリープの補完方法が追記される改正が行われたものの、ひび割れ発生確率図の見直しは行われなかった。

(2) 平成 8 年 (1996 年) 制定版

平成 8 年制定版コンクリート標準示方書では、ひび割れ発生確率図に用いる新たな全てのデータについて、有限要素法による温度解析、CP 法による応力解析を示方書に示される入力パラメータで実施し、図-6⁹⁾に示されるひび割れ発生確率図に改訂された。ここでは、ひび割れ指数を算出するための引張強度を構造体の引張強度として、割裂引張強度の特性値を 0.8 倍して用いることとしている。これは、ひび割れ指数が 1.0 の場合にひび割れ発生確率が 50%となるのが合理的であるのに対して、実構造物のひび割れ発生確率が 50%となった温度ひび割れ指数は 1.27 程度となったため、割裂引張強度の特性値を 0.8 倍すること（すなわち、温度ひび割れ指数 1.27 を 1.0 とすることに同義）で構造物内の強度を評価できるとして便宜上取扱うこととした¹⁰⁾と説明されている。

構造物中の引張強度とひび割れ指数に使用される引張強度（割裂引張強度の特性値）との差を説明することで、前述の確率論から算定されるひび割れ発生確率との整合のために一つの説明が加えられたのである。ただし、ひび割れ指数が 1 以外の状態に関しては、確率論と整合する説明は未だなされていない。

また、この時の引張強度の取り扱いに関しては、実務者の理解があまり進まなかった。引張強度算定(2)式にお

ける圧縮強度は配合強度を前提⁶⁾⁹⁾としているが、やむを得ない場合設計基準強度としてよいとの説明や、試験でえられた値を 2 割低減して用いるという記述、特性値、割裂引張強度、直接引張強度などの整理と使い分けが実務レベルでは困難で、理解が難しかったのである。

$$f_t(t) = c \sqrt{f'c(t)} \quad (2)$$

ここに、 $f_t(t)$ ：材齢 t 日のコンクリートの引張強度、 $f'c(t)$ ：材齢 t 日のコンクリートの圧縮強度、 c ：0.44 (S61 年版)、0.35 (H8 年版) を標準とする。

(3) 平成 11 年 (1999 年) 制定版

このような事もあり、平成 11 年制定版では構造体の引張強度を直接利用せずに、引張強度の特性値をひび割れ指数の算出する図-7 に示されるひび割れ発生確率図に改訂されている。図-7 のひび割れ発生確率図は基本的には図-6 の横軸を 1/0.8 倍して曲線を右にシフトしていると説明されている¹²⁾。すなわち、ひび割れ指数の算定に使用する引張強度を割裂引張強度の特性値を 0.8 倍せずにそのまま利用すれば、平成 8 年制定版とひび割れ発生確率はほぼ変わらないものとなる。

また、この改訂では構造体に発生する引張応力 μ_s 、引張強度 μ_R のばらつきを正規分布として与え、図-8 の S-R モデルを用いた説明を加えている。図-8 に示されるとおり構造体の引張応力の平均値 μ_s と解析による予測値 σ_t との差を考慮する修正係数 ρ_p と、構造体の引張強度の平均値 μ_R と割裂引張強度の特性値 f_{tk} との差を考

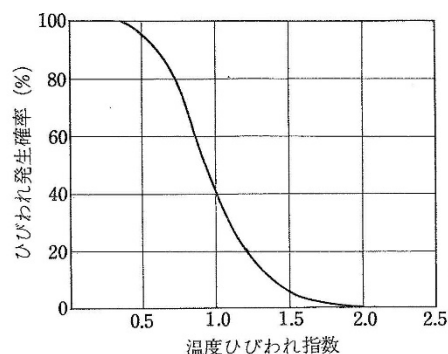


図-5 昭和 61 年制定版のひび割れ発生確率³⁾

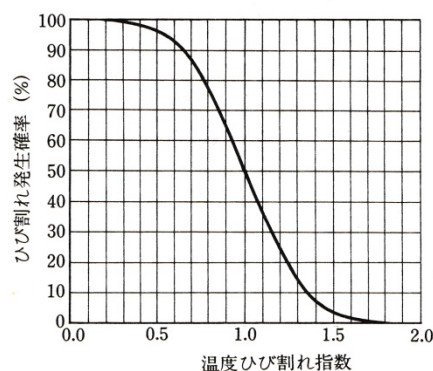


図-6 平成 8 年制定版のひび割れ発生確率⁹⁾

慮した修正係数 ρ_c を導入し、ひび割れ指数 I_{cr} を引張強度の特性値 f_{tk} と引張応力の予測値 σ_t との比と再定義した。さらに性能照査型への移行という時代背景に合わせ、ひび割れ指数を安全係数 γ_{cr} 以上にするという照査法に改訂し、ここではほぼ式(1)の表現とした。このため、ひび割れ発生確率図は、許容するひび割れ発生確率を設定し、その際の安全係数を設定する図として、横軸がひび割れ指数から安全係数 γ_{cr} に変わる事となる。

またここにおいて初めて、引張強度を引張応力が超える確率がひび割れ発生確率であるという図-8 に示される確率論的な説明をひび割れ発生確率図に与えた。これらの説明の基礎となる研究¹⁾が前年1995年に発表されているが、ここでは応力解析の入力値をパラメトリックに扱いひび割れ指数に対するひび割れ発生確率の変化を図-9 のとおり示している。ひび割れ指数に対してひび割れ発生確率が一義的に決まらないことを端的に表している。一方、前述の改定でのひび割れ発生確率図において、ひび割れ指数によりひび割れ発生確率を一義的に決めている説明として、改訂資料では、引張応力も引張強度も変動係数が0.22、 ρ_c を1.26、 ρ_p を1とする説明がある。 ρ_c を1.26とするのは、先の引張強度を0.8倍、指数を1.27倍して用いる説明となり、このため ρ_p を便宜上1としている。しかし変動係数については、ひび割れ発生確率図から逆に算定されることの説明があるが、その意味に言及はない。

ここで変動係数の合理的意味を考えれば、ひび割れ発生確率図におけるひび割れ発生確率は、実施工の結果のひび割れ発生確率であり、これから逆算して推定した変動係数がある一定値で示されたことは、我が国の平均的な技術と倫理を有する施工者が施工する場合に、引張強度も引張応力も、ある一定範囲のばらつきに収まることを示唆していることを意味すると考えられる。逆にひび割れ発生確率図は、平均的ばらつきを有する標準的施工結果のひび割れ発生確率を示しているとすれば、ひび割れ指数に対してひび割れ発生確率を一義的に決められることに留意が必要である。

この改訂では、構造体の引張強度を直接利用せずに、引張強度の特性値をひび割れ指数の算出に用いるため、その差を考慮する修正係数 ρ_c の影響をひび割れ発生確率図に取り込んだことになる。以降、土木学会では2002年制定版(H14年)、2007年制定版(H19年)とひび割れ発生確率図の改訂は行われずに、2012年制定版(H24年)の図-2に改訂されるまで、およそ14年にわたり平成11年版の確率図が利用されてきた。

(4) 2012年制定版ひび割れ発生確率図

JCIではひび割れ制御指針(1986年)を約20年ぶりにマスコンクリートのひび割れ制御指針2008¹³⁾に改定し、

ここで新たに図-10のひび割れ発生確率図を示した。

2012年版(H24年)示方書ではこれをそのまま掲載することとなった。このひび割れ発生確率図の改訂は、パソコン計算能力の飛躍的な向上で3次元有限要素法による

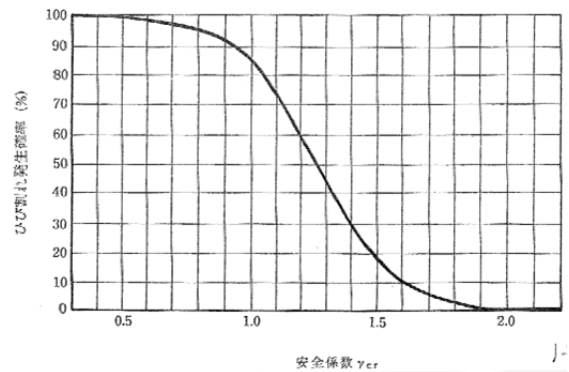


図-7 平成11年制定版のひび割れ発生確率¹⁾

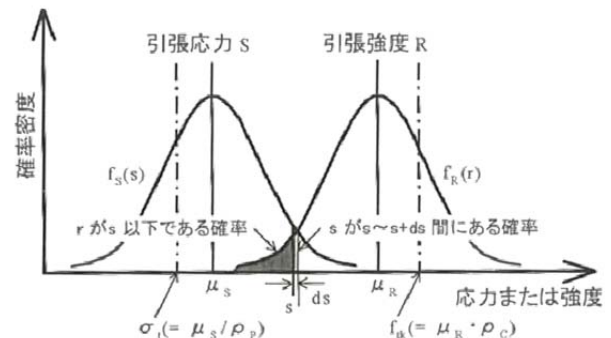


図-8 平成11年制定版のS-Rモデル¹²⁾

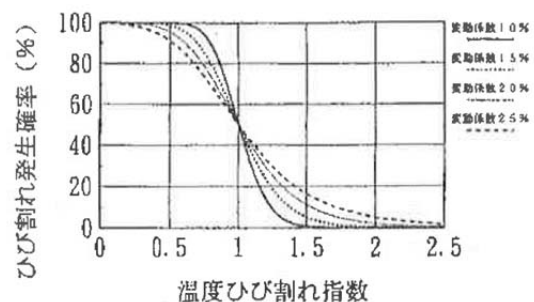


図-9 パラメータのばらつきとひび割れ指数¹⁾

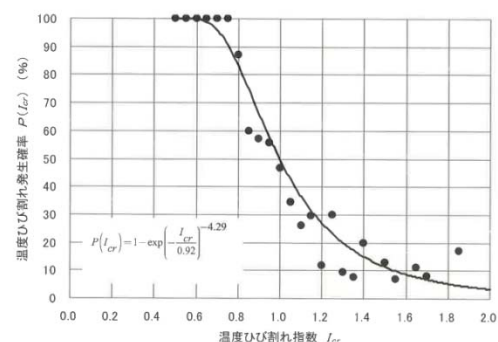


図-10 ワイブル分布による発生確率の整理¹³⁾

温度、応力の解析が一般的に用いられることになった時代の要請に応えたものである。新たに 65 件の実構造物の 724 の部材について、3 次元有限要素法による温度応力解析で算出した最小のひび割れ指数と実際のひび割れ発生確率とをひび割れ指数 0.05 刻みで整理し、図-10 のとおりワイブル分布として回帰した曲線を示した。従前の正規分布からワイブル分布に確率モデルを変更した理由は、数学モデルとしての説明性と回帰適合性の高さが改訂資料¹³⁾で説明されている。

数学モデルとしてワイブル分布の累積分布関数¹⁴⁾を適用しているので、あるひび割れ指数以下となる時のひび割れ発生確率を返すと捉えるのが一般的であるが、ここではあるひび割れ指数一点のひび割れ発生確率を返す式として適用され、また、一般に正の値で用いられる形状係数¹⁴⁾を負の -4.29 として与えていることは、特殊な適用にも思われる。

また回帰関数として正規分布と比較して適合性の高さが示されている。しかし、正規分布の回帰適合性が小さくなった理由は、ひび割れ指数が 1.6 以上と大きい場合でも、ひび割れ発生確率が 10% 程度以上と大きいプロットが存在するためである事が、図-9 との比較からイメージできる。このようにひび割れ指数が大きい範囲でひび割れ発生確率が従前よりも大きくなっていることは、平成 11 年までのひび割れ発生確率図で整理された、平均的な施工者の施工によるある一定範囲のばらつきに収まっていないデータとなっている事も想起される。

平成 11 年版と 2012 年版ともに割裂引張強度の特性値を用いてひび割れ指数を算定している。しかし、ひび割れ指数が 1 の時のひび割れ発生確率は、平成 11 年版では 85%、2012 年版では 50% と大幅に相違する。この差は、平成 11 年版の説明にある修正係数 ρ_p を平成 11 年版のとおり 1 (実構造物の応力を予測できている) と仮定すれば、2012 年版では構造体における引張強度の平均値と割裂引張強度の特性値との差も無い状況と同じとなる。部材内部温度上昇の影響と標準養生の違いは、平成 11 年版と 2012 年版でそれほど変わらないとすれば、このように、ひび割れ発生確率が 85% から 50% と飛躍的に向上する契機は材料、施工の観点からは乏しく、前述のとおり平均的なひび割れデータ以外の影響を受けた可能性もあるようにも思われる。平成 11 年版が平均的標準的施工結果かどうかの議論はあるが、図-10 にあるひび割れ指数 1.85 でひび割れ発生確率 20% 弱のプロットなどは標準的施工結果から外れていると扱って良いように思われ、このようなプロットにひび割れ発生確率曲線形状全体が影響を受けるのは、ひび割れ発生確率をひび割れ指数に対して一義的に決定する趣旨から考えて好ましくはないと考えられる。割裂引張強度の特性値が実際よりも小さ

い、あるいは発生応力を大きく推定していることなどについても検討する余地があるように考えられる。

また 2012 年版では、引張強度の特性値の算出式と有効ヤング係数の算出式を改訂している。これらは近年のセメントの物性の変動傾向や直近の知見を反映したものであり、これらの改訂がひび割れ指数にどのように影響するか次章で検討する。

3. 力学物性値の変遷とひび割れ指数への影響

3.1 引張強度

示方書における引張強度の変遷を図-11 に示す。2012 年版の引張強度は、圧縮強度が 30 N/mm² 程度以下の場合に H11 年版を下回る。マスコン指針では、2012 年版の引張強度の算定式とセメントメーカー各社の試験結果とを図-12 のとおり示している。例えば圧縮強度 20 N/mm² の割裂引張強度は 2 N/mm² 程度にデータプロットを中心があり、算定式では 1.66 N/mm² と算出される。従前設定されていた構造体の引張強度の平均値と割裂引張強度の特性値との修正係数 1.26 (0.8 倍と同じ) 程度の差で構造体の引張強度に近い小さめの数値を返すようにも見える。

3.2 有効ヤング係数

有効ヤング係数は現在まで 2 回しか改訂されていない。クリープ影響が変化する材齢を圧縮強度 15 N/mm² 程度までと仮定して、それ以降の材齢(それ以上の圧縮強度)で 2012 年版有効ヤング係数は、圧縮強度に関わらず H11 年版の 0.7 倍程度となっている。2012 年版では、従来よりも応力も小さめに算定される傾向があると推察される。

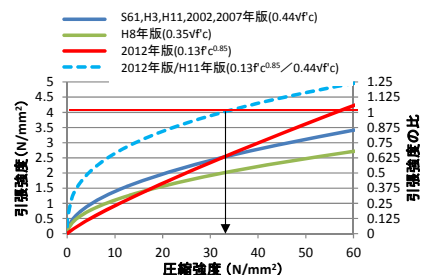


図-11 温度ひび割れ指数の算定に用いる引張強度

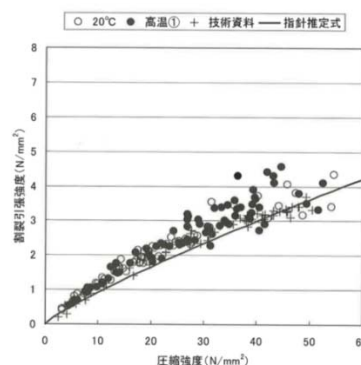


図-12 引張強度の改訂資料¹³⁾

3.3 ひび割れ指数への影響

2012 年版と平成 11 年版的引張強度と有効ヤング係数をそれぞれ用いて、拘束ひずみを同一とした場合に、算定されるひび割れ指数の比を図-13 に示す。クリープ影響が変化する材齢に依存するものの、圧縮強度が 15 N/mm^2 程度以下と小さい場合に、2012 年版的ひび割れ指数は H11 年版よりも小さくなる傾向がある。

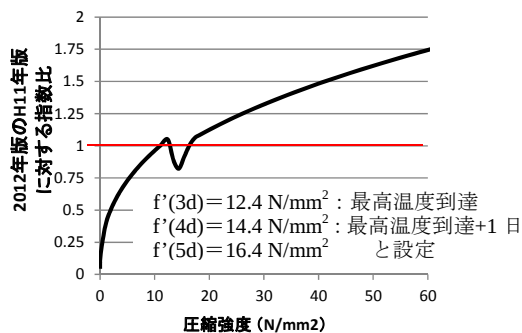


図-13 2012 年版的 H11 年版に対する指数比

4. まとめ

ひび割れ照査法について歴史的な変遷と要因を整理したことで、現在のひび割れ発生確率図は、我が国の平均的な技術と倫理を有する施工者が、引張強度と引張応力のある一定のばらつきの範囲で、標準的に施工した場合のひび割れ発生確率を示すものであることを明らかにした。一方で、山口県の構造物群のような品質管理のレベルが高い場合、我が国の平均的なものに含めることはできず、残念ながら別扱いする必要があることが分かった。逆に、我が国の平均的な技術と倫理を有していない施工者が構築した構造物についても、我が国の平均的なものからは排除してひび割れ発生確率曲線を定める必要があることも明らかにした。

今後、さらにそのような構造物群も一貫して扱うことができるように、ひび割れ照査法を改善することを提案する。提案するひび割れ照査法は、標準的な施工のばらつきを想定している現在のひび割れ発生確率図は利用せずに、ばらつき自体を個々に取り扱える高い自由度を持つ照査法である。従来とおりの最小ひび割れ指数の算出に加えて、引張強度、引張応力のばらつきを表す標準偏差、実構造物中の平均値とのずれを正す修正係数を新たに設定する。引張強度と引張応力に分布をあたえることで確率論的にひび割れ発生確率を算出、評価するひび割れ照査法を考えている。個々の標準偏差や修正係数の具体的な設定方法は議論する余地が大きいものの、そのような照査体系とすることで、施工によるばらつきや応力解析精度を具体的に評価することにつながり、現実的にはそれらの技術の差別化につながることから、ひいては

温度ひび割れの抑制にさらに貢献できる温度ひび割れ照査方法になると考える。

謝辞：本研究を進めるにあたり、佐藤良一名誉教授（広島大学）、金津努博士（株式会社セレス）、溝渕利明教授（法政大学）のご意見が大変参考になりました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 中村秀明, 浜田純夫: 材料の不確定性を考慮したマスコンクリートのひび割れ発生確率, 土木学会論文集, NO.514/V-27, pp.29-40, 1995.5
- 2) 社団法人土木学会: 2012 年制定 コンクリート標準示方書 設計編, pp.304, 2012
- 3) 社団法人土木学会: コンクリート標準示方書 (昭和 61 年制定), pp.119-136, 1986
- 4) 細田暁, 二宮純, 田村隆弘, 林和彦: ひび割れ抑制システムによるコンクリート構造物のひび割れ低減と表層品質の向上, 土木学会論文集 E2(材料・コンクリート構造), Vol.70, No.4, pp.336-335, 2014
- 5) 社団法人土木学会: コンクリート標準示方書 (昭和 49 年制定), pp.67-68, 1974
- 6) 社団法人土木学会: コンクリート標準示方書 (昭和 61 年制定) 改訂資料, pp.49, 昭和 61 年 10 月, 1986
- 7) 大崎幸雄, 庄野昭, 杉山律, 河田秋澄: 温度ひび割れ発生危険度の簡易評価システムについて, 第 7 回コンクリート工学年次講演会論文集, pp.657-660, 1985
- 8) 吉岡保彦: マスコンクリートのひび割れ予測システムの開発とその適用例, 第 2 回マスコンクリートの温度応力発生メカニズムに関するコロキウム論文集, pp.29-34, 1984.3
- 9) 社団法人土木学会: コンクリート標準示方書 (平成 8 年制定) pp.183, 1996
- 10) 社団法人土木学会: 平成 8 年制定コンクリート標準示方書改訂資料, コンクリートライブラリー 85, pp.106-110, 平成 8 年 2 月, 1996
- 11) 社団法人土木学会: コンクリート標準示方書 (平成 11 年制定) pp.26,
- 12) 社団法人土木学会: 平成 11 年制定版コンクリート標準示方書 (施工編) - 耐久性照査型 - 改訂資料, pp.43-48, 平成 11 年
- 13) 社団法人日本コンクリート工学協会: マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008, pp.16-18, pp.119-125, 2008
- 14) 荻谷千風彦: 統計学入門, 東京図書株式会社, pp.202, 1994