

# 論文 温度ひび割れ発生確率の直接算定法に関する研究

杉橋 直行\*1・岸 利治\*2

**要旨:** 土木マスコンクリートの温度ひび割れ発生確率は、ひび割れ指数と実際の構造物におけるひび割れ発生確率の関係を整理したひび割れ発生確率図により評価されている。本論文では、引張応力と引張強度のばらつきをモデル化することで、ひび割れ発生確率を確率的に直接的に算定する方法を提案した。この方法を用いて、ばらつきとひび割れ指数、ひび割れ発生確率の関係性を定式化して示した。また、ひび割れ発生確率図で暗に想定されているばらつきを、標準的管理状態のばらつきと評価して、定量的に同定した。ひび割れ制御方法として、ばらつきの低減も検討、評価できる今後のひび割れ照査方法を提案した。

**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

コンクリートの引張応力と引張強度が一義的に決まっていれば、「ひび割れは、引張応力が引張強度を超えた時に必ず発生する」という確定論的に定義できる。一方、引張応力と引張強度にばらつきがある場合には、ひび割れの発生は、確率的な事象となる。

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<sup>1)</sup>に示される安全係数とひび割れ発生確率の図-1(以降、ひび割れ発生確率図と呼ぶ)を利用して行うのが一般的である。構造物に許容するひび割れ発生確率を設定し、図-1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)を満足するように照査するものである。

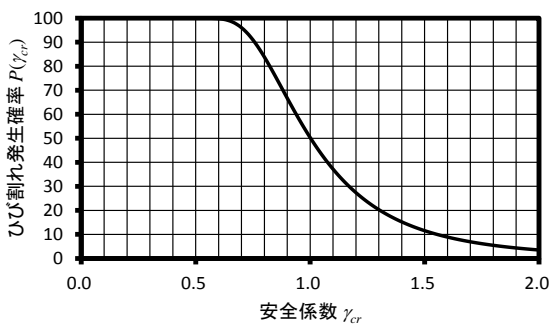


図-1 安全係数とひび割れ発生確率<sup>1)</sup>

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

ここに、 $I_{cr}(t)$ : ひび割れ指数、 $I_{cr}(t)=f_{tk}(t)/\sigma_t(t)$ 、 $\gamma_{cr}$ : ひび割れ発生確率に関する安全係数、 $f_{tk}(t)$ : 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である。

このひび割れ発生確率図は、横軸をひび割れ指数、縦軸を実際の構造物でひび割れが発生した確率として整理

して、横軸をひび割れ指数から安全係数に単純に置き換えて作成したものである。すなわち、ひび割れ発生確率図を用いれば、ひび割れ指数という一変数を決めれば、ひび割れ発生確率を求めることができる。

本来、ひび割れの発生を確率事象として扱うには、前述のとおり、引張強度と引張応力のばらつきを扱う必要がある。しかし、ひび割れ発生確率図は、引張強度と引張応力のばらつきを直接扱うことなく、ひび割れ指数だけで、ひび割れ発生確率を求めることを可能としているのである。

一方、同一のひび割れ指数でも引張強度、引張応力のばらつきが相違すれば、ひび割れ発生確率は異なる<sup>2)</sup>が、ひび割れ発生確率図はこれを反映できていない。実際に例えば、図-2<sup>3)</sup>に示す高品質な(ばらつきが小さいと想定される)構造物群のひび割れ発生確率のプロットは、マスコン指針<sup>4)</sup>の曲線(図-1と同一曲線)上にない。

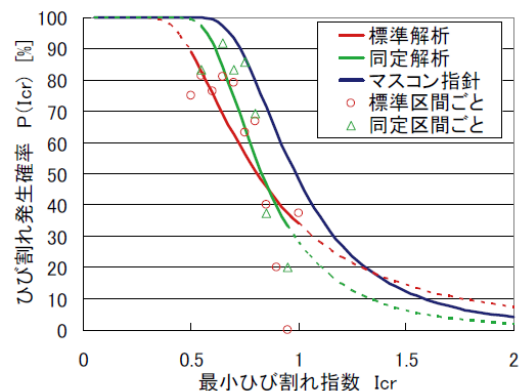


図-2 山口県の構造物群のひび割れ発生確率<sup>3)</sup>

このように、ひび割れ発生確率図を用いたひび割れ照査方法では、引張強度や引張応力のばらつきの相違によ

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

\*2 東京大学 生産技術研究所 教授 博 (工) (正会員)

ってひび割れ発生確率が変わるという事象を扱う事はできない。

本論文では、このような事象も汎用的に扱えるひび割れ照査方法を提案することを目的に、まず確率論の手順とおり、引張強度と引張応力にばらつきを与え、ここからひび割れ発生確率を直接算定する方法（以降、直接算定法と呼ぶ）を検討した。さらに、直接算定法を用いて、引張強度と引張応力のばらつきが、ひび割れ発生確率に与える影響を評価し、逆にひび割れ発生確率関で想定しているばらつきを同定し、このばらつきの持つ意味について検討を加えることとした。

## 2. ひび割れ発生確率の直接算定方法

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

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

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

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

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

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

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

ここにおいて、ひび割れ発生確率は標準正規分布表から  $Z_0$  以下となる確率として汎用的に算定可能となり、また、ひび割れ発生確率  $P(Z_0)$  は誤差関数  $\text{erf}$  を用いて式(4)のとおり定式化して表す事ができる。

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

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

## 3. ひび割れ指数とひび割れ発生確率

ひび割れ指数がひび割れ発生確率に与える影響を把握するために、式(3)をひび割れ指数  $I_{cr} (= f_{ik}/\sigma_t)$  を用いた式(5)に展開する事を試みる。

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

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

過去に、松井ら<sup>5)</sup>や中村ら<sup>6)</sup>が、ひび割れ発生確率に温度応力解析の入力パラメータが与える影響を感度解析するために、本論とほぼ同様の方法を採用している。しかし、松井ら<sup>5)</sup>は確率を算定する方法や式は示さず、中村ら<sup>6)</sup>もひび割れ指数がひび割れ発生確率の算定にどのように影響するか、その意味や式展開を示さなかった。また、コンクリート標準示方書の改訂資料<sup>7)</sup>でも、同様の論旨でひび割れ発生確率関の説明を行っているが、式(5)に至る前に  $V_R = V_S$ 、 $\rho_R/\rho_S \cdot I_{cr} = 1$  と仮定した式展開を行った。このようなことから、実務者には、ばらつきとひび割れ指数、ひび割れ発生確率の関係についての理解は、ほとんど進まなかったと考えられる。

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

#### 4. ひび割れ発生確率図

##### 4.1 直接算定法との比較分析

前章で、直接算定法によるひび割れ発生確率の算定には、ひび割れ指数の他に、ばらつきを定量化する変動係数や修正係数を設定する必要があることを説明した。このことは逆に、ひび割れ発生確率図では、変動係数や修正係数をある一定値に設定していると解釈する必要があることを示している。ひび割れ発生確率図は、ひび割れ指数だけでひび割れ発生確率を簡便に算定できるようにした大きなメリットの一方で、実務者に変動係数や修正係数を見えなくし、ばらつきを扱う事をできなくしてしまっているのである。この事が、ひび割れ発生確率図の度重なる改訂の速因ではないかと考えている。

一方で、このひび割れ発生確率図は 30 年にわたり現在まで利用され続けている。この理由は、利便性の他に、ひび割れ発生確率の算定精度が実務上大きな問題とならなかったためと言える。見えない変動係数と修正係数が実務上、問題のない値に設定されていたと同義である。すなわち、ひび割れ発生確率図の作成に用いられた、実際の構造物のひび割れ発生確率のデータが、標準的の品質管理の状態、割裂引張試験や引張応力算定も標準的な精度であったと推察できる。コンクリート標準示方書に準じて施工や管理、応力算定を実施した構造物であれば、引張強度、引張応力の変動係数、修正係数はそれぞれある一定程度の値にあったと想定できる。示方書に示されているひび割れ発生確率図は、我が国の標準的なばらつきの状態におけるひび割れ発生確率を示していると考えられる。

##### 4.2 引張強度と引張応力の変動係数

議論を簡単にするために、式(6)で表される本質的なひび割れ指数  $I'_{cr}$  を考えて、 $I'_{cr}$  を用いて式(5)を式(7) のとおり展開し、ひび割れ発生確率図における引張強度と引張応力の変動係数の影響を検討する。

$$I'_{cr} = \frac{\mu_R}{\mu_S} = \frac{\rho_R \cdot f_{tk}}{\rho_S \cdot \sigma_t} = \frac{\rho_R}{\rho_S} I_{cr} \quad (6)$$

$$Z'_0 = \frac{(-I'_{cr} + 1)}{\sqrt{V_R^2 I_{cr}'^2 + V_S^2}} \quad (7)$$

式(7)において、引張強度の変動係数  $V_R$  と引張応力の変動係数  $V_S$  を 10%、20%、30% にパラメトリックに扱い、ひび割れ指数  $I'_{cr}$  に対する  $Z'_0$  を求めて、式(4) からひび割れ発生確率を算定して図-3~5 に示す。図-3 は  $V_R = V_S$ 、図-4 は  $V_S = 30\%$  一定、図-5 は  $V_R = 30\%$  一定としたもので、図-3 のひび割れ発生確率の全範囲を水色のハッチで示し、これと同一の範囲を水色のハッチで図-4 と 5 に示した。

$V_R$  と  $V_S$  の組合せに関係なく、全てのひび割れ発生確

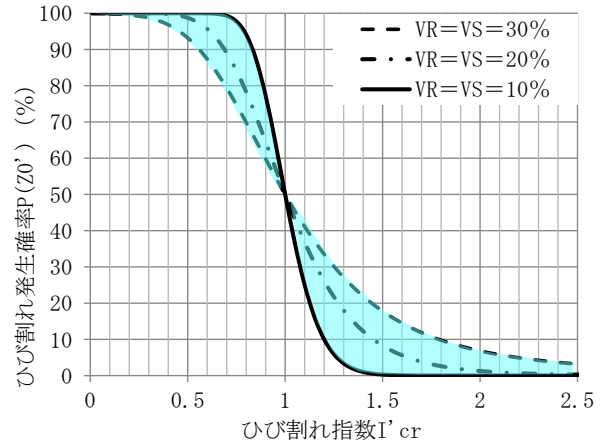


図-3  $V_R$  と  $V_S$  が同一の場合

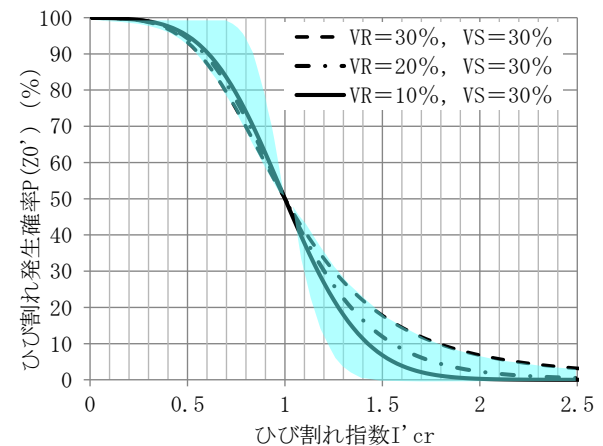


図-4  $V_S = 30\%$  で一定の場合

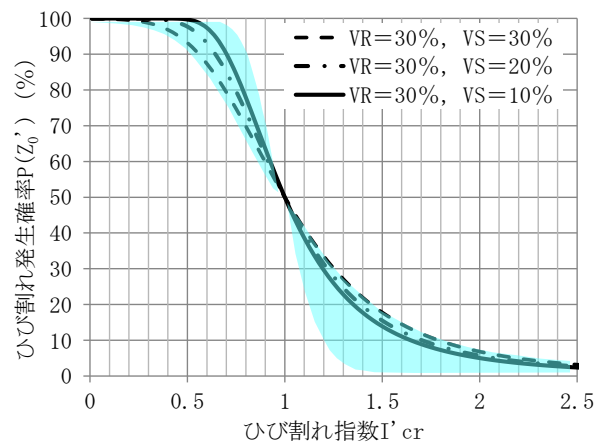


図-5  $V_R = 30\%$  で一定の場合

率曲線が  $V_R = V_S = 10\sim 30\%$  とした図-3 の水色のハッチ範囲内にある。一般的なコンクリートプラントの圧縮強度の変動係数は 10% 程度であり、現実的なひび割れ発生確率曲線は、図-3 の水色のハッチ内にあると推察できる。従来示方書に示されてきたひび割れ発生確率曲線は修正係数の影響を除けば (=ひび割れ指数 1.0 の時にひび割れ発生確率を 50% とシフトすれば) この範囲にある。

図-4と図-5では、 $I'_{cr}=1$ を境に変動係数がひび割れ発生確率に与える影響の傾向が変わる。図-4 ( $V_S=30\%$ 一定)では、 $I'_{cr}\leq 1$ の場合、ひび割れ発生確率は、引張強度の変動係数 $V_R$ の影響をほとんど受けず、 $I'_{cr}$ によりほぼ一義的に決まるが、図-5 ( $V_R=30\%$ )では、 $I'_{cr}\geq 1$ の場合、引張応力の変動係数 $V_S$ の影響が小さくなる。これは、引張強度と引張応力の比であるひび割れ指数で整理しているために起こる。

ひび割れ発生確率曲線の傾きは、変動係数が小さい場合に大きくなる。これは、変動係数が小さければ確定論に近づく事になり感覚的にも当然である。一方、 $I'_{cr}\leq 1$ の場合、変動係数が大きくなるとひび割れ発生確率が小さくなることに違和感を覚えるが、変動係数が大きければ、引張強度が平均値より大きくなる頻度が多くなることから、このような傾向となる。

#### 4.3 引張強度と引張応力の修正係数

前節で示した図-3～図-5のひび割れ発生確率図の横軸を、式(6)の本質的なひび割れ指数 $I'_{cr}$ ではなくて、割裂引張強度 $f_{tk}$ と引張応力の推定値 $\sigma_t$ を用いたひび割れ指数 $I_{cr}(=f_{tk}/\sigma_t)$ を使って表すには、式(6)から横軸 $I'_{cr}$ を $\rho_S/\rho_R$ 倍すればよい事が分かる。引張強度の修正係数 $\rho_R$ と引張応力の修正係数 $\rho_S$ は、前節のひび割れ発生確率曲線を $\rho_S/\rho_R$ 倍平行移動するように影響するのである。

引張強度の修正係数 $\rho_R$ は、土木学会コンクリート標準示方書の改訂資料<sup>7)</sup>では、おおよそ0.8となる事が示されている。構造物中のコンクリートの引張強度は、乾燥状態、載荷速度および寸法の相違等により、小型で湿潤な供試体を用いた割裂引張試験で取得した値とは異なる等の理由によると説明されている。また、日本建築学会マスコンクリートの温度ひび割れ制御指針<sup>8)</sup>では、構造物のひび割れ発生の判定に利用する引張強度(ひび割れ発生強度と呼んでいる)を、割裂引張強度に低減係数0.85を掛け合せて算出することで、修正係数 $\rho_R$ と同様の影響を評価している。また、構造物のひび割れ発生の判定に直接利用できる引張強度は、直接引張強度に近いとされ、直接引張強度と割裂引張強度との差も0.8程度としている研究<sup>9)</sup>が多い。以上の事から、引張強度の修正係数 $\rho_R$ の標準的な値は、0.8程度にして良いのではないかと考えている。

一方、引張応力の修正係数 $\rho_S$ を厳密に扱っている事例はほとんどない。前出改訂資料では、引張強度の修正係数 $\rho_R$ の影響と合わせて、 $\rho_S/\rho_R=1.26$ を過去のデータから導出し、便宜上 $\rho_S=1$ とする立場をとるとしている。日本建築学会のマスコン指針でも、この影響を個別に扱う事はしていない。引張応力の修正係数 $\rho_S$ は、応力の計測結果と解析結果との比較などから設定、検証する事が考えられる。しかしながら、現在、3次元FEM解析結果と

計測結果の比較分析等によって、入力パラメータの適合性等も向上が図られ、応力解析精度は非常に高く、引張応力の修正係数 $\rho_S$ はかなり1に近づいていると推察する。

以上より、 $\rho_S/\rho_R$ は1より大きくなると想定され、割裂引張強度を分子とするひび割れ指数 $I_{cr}$ を利用する場合、式(6)の本質的なひび割れ指数 $I'_{cr}$ を利用したひび割れ発生確率曲線を右にシフトすることとなる。この場合、ひび割れ指数 $I_{cr}=1$ の時、ひび割れ発生確率は50%よりも大きくなる。

#### 5. 標準的なばらつきを検討

ここではまず、これまでに示方書で示されたひび割れ発生確率図のうち、ひび割れ指数が1の時にひび割れ発生確率が50%となっているH8年制定版と2012年制定版のひび割れ発生確率図で想定されるばらつきを試算する。ひび割れ指数が1の時にひび割れ発生確率が50%であるので、 $\rho_S/\rho_R=1$ として、引張強度と引張応力の変動係数 $V_R$ と $V_S$ をパラメトリックに変えて、式(4)と式(7)から直接法によりひび割れ発生確率曲線を描く。この曲線と示方書の曲線がよく合致する $V_R$ と $V_S$ を求めた。

図-6に示すとおり、適合性が高いひび割れ発生確率曲線の変動係数は、2012年制定版では $V_R=26\%$ 、 $V_S=6\%$ 、H8年制定版では $V_R=6\%$ 、 $V_S=27\%$ と設定した場合であった。

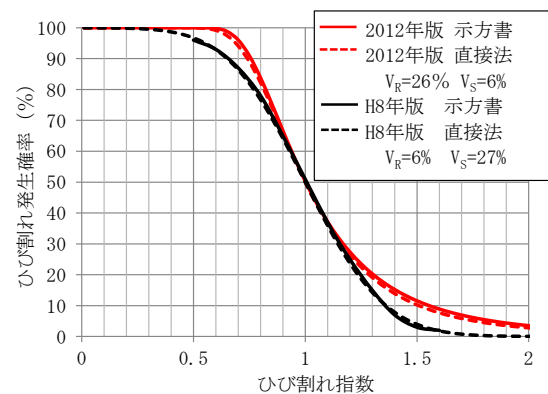


図-6 従来ひび割れ発生確率図の変動係数

曲線の適合性は、同一指数における、示方書のひび割れ発生確率を横軸、直接算定法によるひび割れ発生確率を縦軸とした回帰直線の相関係数の2乗 $R^2$ が、どれだけ1に近いことによって評価することで客観性を持たせた。図-6の2012年制定版、H8年制定版の曲線における適合性は、共に $R^2=0.999$ である。しかし、この $R^2$ は、変動係数 $\pm 2\%$ に対して $R^2=\pm 0.001$ 程度の場合もあり、感度が十分に高いとは言えない。このことから今回は、変動係数を一義的に同定できたとは考えていない。今後さ



らに適合性の評価について検討する必要があるものの、示方書の曲線によく適合させる事ができた今回同定した変動係数を一指標として見て良いとは考えている。

H8 年制定版では  $V_R=6\%$ 、 $V_S=27\%$ 、2012 年制定版では  $V_R=26\%$ 、 $V_S=6\%$  が正しいとすれば、2012 年制定版の方が、引張強度のばらつきが大きく、引張応力のばらつきは小さくなった事になる。引張応力のばらつきが小さくなった理由として、H8 年制定版ではひび割れ指数の算定に CP 法を用いて、解析モデル範囲やメッシュの大きさの決定方法等を統一していなかったのに対して、2012 年制定版では 3 次元 FEM を用いて、これらの決定方法も統一した事等から、結果として引張応力のばらつきが、27% から 6% に小さくなったと説明とを与える事ができる。一方、引張強度のばらつきが大きくなった理由の一つとして、様々なコンクリートの品質確保施策、総合評価方式による施工者の選別などにより、高品質が進む一方で、技能労働者の減少やコスト縮減等の要因で、品質の低下したコンクリートも発生していると想定され、高品質と低品質の差が大きくなっているような状態がばらつきを大きくしている可能性がある。また、セメントの種類や混和剤など多様な材料を使用するようになってきており、同一圧縮強度でも引張強度は相違するような事もみかけのばらつきが大きくなる一因になりえる。

なお、H11 年制定版の改訂資料<sup>7)</sup>では、H8 年制定版の  $V_R=V_S=28\%$  と推定しているが、筆者らが行った計算では、その場合の曲線の適合性は低い。同改訂資料では、式(5)を導出せず、過去の経緯との整合を図るために、式(7)の分母の  $I_{cr}=1$ 、 $V_R=V_S$  と少し無理な仮定をした式展開をはかっている。この改訂資料に示される式を使用し、 $V_R=V_S=28\%$  とした曲線を見ても、今回選定した曲線の方が適合性は高かった。

このようにして、ここではひび割れ発生確率図から、標準的なばらつき、変動係数の同定を試みた。しかし、ひび割れ発生確率図の作成時に既に包含されている標準を外れるようなデータの取扱いについても今後、検討の余地がある。例えば、ひび割れ指数が 2 程度あるのに、ひび割れ発生確率が 10% を超えているようなデータは、このデータを得た一連の構造物群が標準的な品質管理状態にあったか等を精査し、標準的な品質管理状態にないと判断される場合には、そのデータを棄却した上で、ひび割れ発生確率曲線のモデル化、適合性の検討をする必要がある。2012 年制定版のひび割れ発生確率曲線は、ワイブル分布を用いた累積分布関数とされ、正規分布を利用した曲線よりも実際のデータとの適合性が高いと説明されている<sup>4)</sup>。しかし、ワイブル分布を用いた累積分布関数の適合性が、上記のようなデータも含んで検討されていた場合、ひび割れ発生確率曲線の一つだけ示方書で

示す標準としての意味が小さくなることは言うまでもない。なお、正規分布を仮定した本直接算定法でも、図-6 に示すとおりワイブル分布と同様の曲線を描出する事ができている。つまり、実データとの適合性の観点から、正規分布でなく、ワイブル分布を適用する必然性は少ない。

## 6. 高品質な構造物群の分析

図-7 に修正係数比  $\rho_S/\rho_R=0.8$ 、 $V_R=6\%$ 、 $V_S=6\%$ 、として直接法により求めたひび割れ発生確率曲線を、前述の図-2<sup>3)</sup>に示される高品質な構造物群の同定解析のプロットと共に示す。5 章と同様の方法で求めた相関係数の 2 乗は  $R^2=0.912$  となり、直接法により求めたひび割れ発生確率曲線は同定解析プロットに比較的よく適合している。

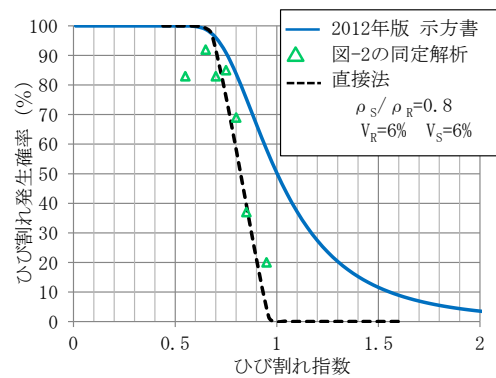


図-7 同定解析の変動係数と修正係数比

引張強度の変動係数  $V_R$  は、H8 年制定版と同様 6% で、2012 年制定版の 26% よりもかなり小さく、よく管理された状態にあったと推定できる。

一方、引張応力と引張強度の修正係数比  $\rho_S/\rho_R$  は 0.8 となっている。4.3 節で示したとおり、標準的には  $\rho_R=0.8$ 、 $\rho_S=1$  程度と推察され、 $\rho_S/\rho_R=1.25$  程度と 1 より大きくなるはずであるが、今回  $\rho_S/\rho_R=0.8$  で 1 を下回っている。図-2 のプロットは、2012 年制定版に準じた解析手法を用いて、さらに温度計測結果に同定させて指数を算定している<sup>3)</sup>との説明があることから、 $\rho_S$  は 1 に近いと考えられる。 $\rho_S/\rho_R=0.8$  が正しいとして、 $\rho_S=1$  とすると、 $\rho_R=1.25$  となり、構造物にひび割れが発生する引張強度が割裂引張強度よりも大きくなってしまい、一般論と整合しない結果となる。このことは、割裂引張強度が小さく推定されている可能性を示唆している。

割裂引張強度の推定式は 2012 年制定版で変更され、図-8 により共通試験等のデータとよく合致していると説明されている<sup>4)</sup>。しかし、同推定式は、筆者らの主観で図-8 のデータプロット群の中心を通した朱線式より、

平均で0.8倍程度小さくなっている。さらに、2012年制定版のひび割れ発生確率曲線では、 $I_{cr}=1$ の時に、ひび割れ発生確率が50%であり、修正係数比 $\rho_s/\rho_R=1$ としている事になる。2012年制定版のひび割れ照査では、割裂引張強度をそのまま利用する事が示されており、さらに $\rho_s/\rho_R=1$ であるので、割裂引張強度と構造物にひび割れが発生する引張強度が同程度と設定していることになる。2012年制定版の推定式では、割裂引張強度を小さく推定している可能性があるのではないか。

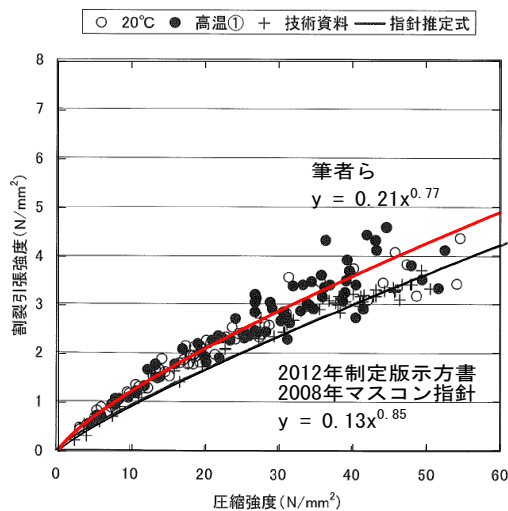


図-8 割裂引張強度の推定式の適合性評価<sup>4)</sup>に加筆

仮に割裂引張強度が0.8倍程度小さく推定されているとすれば、図-2の高品質な構造物群では、実際に構造物にひび割れが発生する引張強度が割裂引張強度と同程度に施工できていた可能性があるとして説明できる。

このようにして、品質の良否を引張強度の変動係数や修正係数等を推定することで具体的に評価、説明することが可能である。

## 7. まとめ

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

一方、従来のひび割れ発生確率図では、標準的な管理状態におけるひび割れ発生確率を簡便に求めることが可

能である。しかし、ひび割れ指数を大きくする以外の良質な施工を評価することはできなかった。

将来的にはここで示したような、確率論の手順とおり直接ひび割れ発生確率を算定し、ひび割れ制御方法を検討、評価できる照査方法にすることを提案する。この中で、標準的な管理状態にある構造物については、①変動係数と修正係数の標準値、あるいは②ひび割れ発生確率図等を事前に示しておくのが良いと考える。これにより、ばらつきを低減する良質な施工（例えば、単位水量管理や締固め管理を標準以上に確実に実施し、密実均質で、ひび割れ発生の起点となる弱部を少なくできる施工等）も、ひび割れ発生確率として数値的に評価する事が可能となり、良質な施工のインセンティブになり、その差別化が図れる。

今後、ばらつきの分布モデルとしての正規分布の適合性、標準的でない棄却すべきデータ等についてさらに検討を進める。

## 参考文献

- 1) 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
- 2) 杉橋直行，岸利治：マスコンクリートの温度ひび割れ照査法の改訂による本質的な改善についての一提案，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.38，No.1，pp.1485-1490，2016
- 3) 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
- 4) 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
- 5) 松井邦人，西田德行，土橋吉輝，潮田和司：不確定因子の影響を考慮したマスコンクリートの温度応力解析，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.15，No.1，pp.1143-1148，1993
- 6) 中村秀明，浜田純夫：材料の不確定性を考慮したマスコンクリートのひび割れ発生確率，土木学会論文集，NO.514/V-27，pp.29-40，1995.5
- 7) 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
- 8) 日本建築学会：マスコンクリートの温度ひび割れ制御設計・施工指針（案）・同解説，pp.68-70，2008
- 9) たとえば，竹下治之：マスコンクリートの基礎的物性に関する研究，土木学会論文集，NO.348/V-1，pp.143-152，1984.8