

論文 フライアッシュコンクリートのひび割れ抵抗性の照査技術の構築

白井 裕規*1・下村 匠*2・田中 泰司*3

要旨：本研究では，乾燥収縮に対するフライアッシュコンクリートのひび割れ抵抗性を簡便に評価できる手法の構築を行った。有効弾性係数と有効ひずみを用いることで，クリープ計算を省略しても，コンクリート応力の経時変化を精度よく予測可能であることを示した。ひび割れ発生強度について文献調査を行ったところ，強度のばらつきが大きいので，決定論的な評価が難しいことが明らかとなった。そこで，確率論的な評価方法を導入し，既往の実験結果による検証を行ったところ，その妥当性と有用性が示された。

キーワード：収縮モデル，強度予測モデル，ひび割れ指数，ひび割れ発生確率

1. はじめに

フライアッシュは，資源の有効利用やアルカリ骨材反応の抑制対策，水和熱抑制対策としての利用が期待されている。一方，近年，コンクリートの収縮に起因した構造物のひび割れは大きな関心事になっているので，フライアッシュコンクリートの収縮ひび割れ抵抗性も把握しておく必要があり，コンクリートのひび割れの発生を予測し，制御することが重要な課題となっている。筆者らはこれまでにフライアッシュコンクリートのひび割れ抵抗性に関する実験を行ってきた^{1), 2)}。実験は普通コンクリート，フライアッシュを内割りで15%，25%置換した配合の3配合について行い，養生期間が28日以上であれば鋼材比によらず普通コンクリートと同等となることが示された。また，養生期間が7日であっても拘束鋼材比が5%以下であれば，フライアッシュコンクリートのひび割れ抵抗性は普通コンクリートと同等となることを実験的に示した。本論文では，これまでの実験結果を元に，フライアッシュコンクリートの収縮ひび割れの発生を予測できるプログラムの構築を行い，その適用性について，既往の実験結果により，検証を行った。

2. 収縮ひび割れ発生予測プログラムの概要

2.1 プログラム作成の基本方針

収縮ひび割れの発生を予測するためには，部材内部の水分移動，乾燥収縮量，内的・外的な拘束に対する力学的な応答，クリープ，水和の進行，といった事象のすべてを考慮・計算しなければならない。また，部材形状や拘束条件の影響を厳密に考慮するためには，有限要素解析を用いるのが適当であると思われる。これらのすべての要請に応えるためには高度な連成解析が必要となるが，実用面からは，より簡便なモデルの構築も必要であ

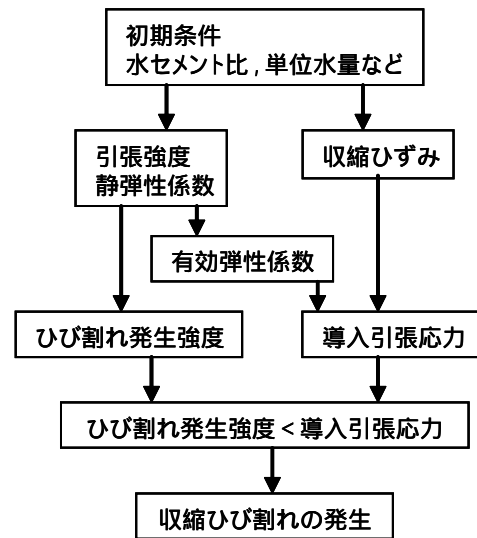


図 - 1 予測プログラムのフローチャート

ると考えられる。そこで本検討では，簡便性に主眼を置き，収縮ひび割れの発生を予測するプログラムを構築することとした。

収縮ひび割れ発生予測プログラムのフローチャートを図 - 1 に示す。ここでは，断面平均の収縮ひずみを用いることで，水分移動計算を省略した。また，コンクリートの弾性係数に有効弾性係数を用いることによって，時間依存変形の計算を省略することとした。

2.2 収縮ひずみ予測モデル

収縮ひずみ予測モデルにはコンクリート標準示方書の収縮ひずみ予測式³⁾を用いた。本検討では，収縮ひずみとして，乾燥収縮と自己収縮の2種類を考えたこととした。収縮ひずみ予測式を以下に示す。

$$\varepsilon_{cs} = \varepsilon_{ds}(t, t_0) + \varepsilon_{as}(t, t_0) \quad (1)$$

*1 長岡技術科学大学大学院 工学研究科 建設工学専攻 (正会員)

*2 長岡技術科学大学 工学部環境・建設系 准教授 博(工) (正会員)

*3 長岡技術科学大学 工学部環境・建設系 助教 博(工) (正会員)

$$\varepsilon_{ds}(t, t_0) = \frac{\varepsilon_{ds\infty} \cdot (t - t_0)}{\beta + (t - t_0)} \quad (2)$$

$$\beta = \frac{4W\sqrt{V/S}}{100 + 0.7t_0} \quad (3)$$

$$\varepsilon_{ds\infty} = \frac{\varepsilon_{ds\rho}}{1 + \eta \cdot t_0} \quad (4)$$

$$\varepsilon_{ds\rho} = \frac{\alpha(1 - RH/100)W}{1 + 150 \exp\left[-\frac{500}{f'_c(28)}\right]} \quad (5)$$

$$\eta = 10^{-4} \{15 \exp(0.007f'_c(28)) + 0.25W\} \quad (6)$$

ここに、 $\varepsilon_{ds}(t, t_0)$ ：コンクリートの材齢 t_0 から t までの乾燥収縮ひずみ ($\times 10^{-6}$)、 β ：乾燥収縮ひずみの経時変化特性を表す項、 ε_{ds} ：乾燥収縮ひずみの最終値 ($\times 10^{-5}$)、 W ：単位水量 (kg/m^3)、 V ：体積 (mm^3)、 S ：外気に接する表面積 (mm^2)、 RH ：相対湿度 (%)、 $f'_c(28)$ ：材齢 28 日におけるコンクリートの圧縮強度 (N/mm^2)、 α ：セメントの種類を表す係数 (普通および低発熱セメントの場合 $\alpha = 11$ 、早強セメントの場合 $\alpha = 15$)、 t_0 および t ：乾燥開始時および乾燥中のコンクリートの有効材齢 (日) であり、式 (7) により求めた。

$$t = \sum_{i=1}^n \Delta t_i \cdot \exp\left[13.65 - \frac{4000}{273 + T(\Delta t_i)/T_0}\right] \quad (7)$$

ここで、 Δt_i ：温度が T () である期間の日数、 T_0 ：1 である。自己収縮の計算には以下の式を用いた。

$$\varepsilon_{as}(t, t_0) = \varepsilon_{as}(t) - \varepsilon_{as}(t_0) \quad (8)$$

$$\varepsilon_{as}(t) = \gamma \varepsilon_{as\infty} \left[1 - \exp\{-a(t - t_s)^b\}\right] \quad (9)$$

$$\varepsilon_{as\infty} = 3070 \exp\{-7.2(W/C)\} \quad (10)$$

ここに、 $\varepsilon_{as}(t)$ ：凝結の始発から材齢 t までのコンクリートの自己収縮ひずみ ($\times 10^{-6}$)、 γ ：セメントおよび混和材の種類の影響を表す係数、 ε_{as} ：自己収縮ひずみの最終値 ($\times 10^{-6}$)、 a, b ：自己収縮の進行特性を表す係数、である。本検討では $a = 0.03$ 、 $b = 0.8$ とした。これらの値は水セメント比に依存し、普通ポルトランドセメントを使用した場合を対象とした値が提案されている。フライアッシュコンクリートについては、筆者らが過去に行った実験において、普通コンクリートと収縮量にほとんど差がないことが確認されているので、普通コンクリートと同じ値を用いた。

2.3 強度予測モデル

コンクリートの圧縮強度予測モデルには以下に示す阪田・池田式⁴⁾を用いた。

$$f'_c(28) = (1.52 \times C - 3.96 \times W + 552) \times 0.098 \quad (11)$$

$$f'_c(t) = (0.469 \times f'_c(28) + 40.1) \times \log(t) + 0.320 \times f'_c(28) - 58.1 \quad (12)$$

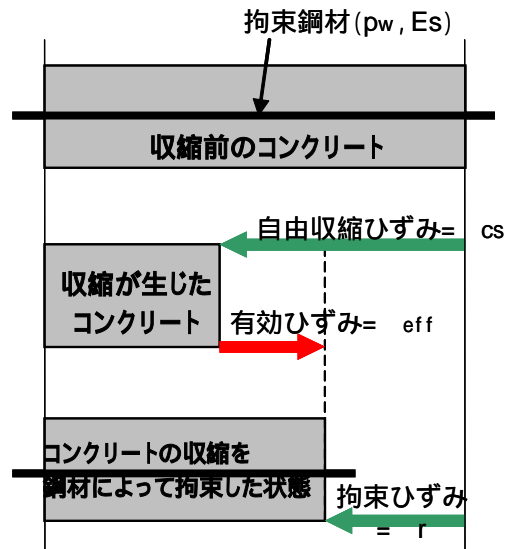


図 - 2 釣り合い状態

$$E_c(t) = (15840 \sqrt{f'_c(t)/0.098}) * 0.098 \quad (13)$$

ここに、 $f'_c(t)$ ：材齢 t 日における圧縮強度 (N/mm^2)、 $E'_c(t)$ ：材齢 t 日における静弾性係数 (N/mm^2) である。式 (12)、(13) において、 $t = 56$ 日のときは材齢の影響を無視できると考え、 $t = 56$ 日とした。なお、フライアッシュコンクリートの場合は、フライアッシュをセメントに含めずに強度計算を行った。

2.4 有効ひずみと導入応力の計算方法

有効ひずみとは、収縮ひずみのうち、外力・内力によって拘束されたひずみであり、一軸拘束試験の場合には、自由収縮量から鋼材ひずみを差し引くことで求められる。有効弾性係数が既知の場合、コンクリートに導入される応力は力の釣り合い式より有効ひずみを算出できる。図 - 2 に釣り合い状態を表した図を示す。また、力の釣り合い式を式(14)に示す。

$$\sigma_c = F_{ex} + F_{re} \quad (14)$$

ここに、 $\sigma_c = E_{eff} \times \varepsilon_{eff}$ はコンクリートの応力である。 F_{ex} は単位面積あたりに作用する外力であり、一軸拘束試験の場合は $F_{ex} = 0$ である。また、 $F_{re} = p_w \times E_s \times \varepsilon_r$ は鉄筋による内的な拘束力、 E_{eff} は有効弾性係数、 ε_{eff} は有効ひずみ、 p_w は拘束鋼材比、 E_s は鋼材の弾性係数、 ε_r は鋼材ひずみをそれぞれあらわす。外力がない場合の有効ひずみは式 (14) を整理することによって以下のようにあらわされる。

$$\varepsilon_{eff} = \frac{p_w \cdot E_s \cdot \varepsilon_{cs}}{E_{eff} + p_w \cdot E_s} \quad (15)$$

2.5 ひび割れ発生強度と有効弾性係数

コンクリートにひび割れが発生するときの強度は引張強度よりも小さくなる場合が多い。ここでは、ひび割れ強度を引張強度の 0.7 倍⁵⁾ とした。また、引張強度は以

下の式より求めた。

$$f_t = 0.23 f'_c(t)^{2/3} \quad (16)$$

コンクリートの有効弾性係数は応力 - 有効ひずみ関係より得られる直線の傾きより求めることができる。既往の実験結果²⁾より、静弾性係数と有効弾性係数の比を求めた。この比の平均値は普通コンクリートの場合は静弾性係数の 1/2.98、フライアッシュコンクリートの場合は置換率によらず、静弾性係数の 1/3.33 であった。本プログラムでは、これらの値を用いた。有効弾性係数が静弾性係数に対して小さいほど、同じひずみでも導入される応力は小さくなるので、上記の結果は、フライアッシュコンクリートは普通コンクリートに比べて応力緩和特性に優れることを示している。

3 収縮ひび割れの発生予測

上記の収縮ひび割れ発生予測プログラムを用いて既往の実験結果との比較を行った。解析対象は、JIS 一軸拘束試験⁶⁾である。試験体水準を表 - 1 に示す。乾燥開始前の養生期間は 14 日であり、普通コンクリートおよびフライアッシュを内割りで 15%、25% 置換した配合の 3 水準について収縮ひび割れの発生予測を行った。強度の計算に際しては、フライアッシュを結合材には含めず⁷⁾に水セメント比で計算を行った。

収縮ひび割れの発生予測は以下の 2 ケースで行った。Case1 では収縮量、有効弾性係数、引張強度を上述の予測モデルから求めた。Case2 では収縮量、有効弾性係数、引張強度に、一軸拘束試験より得られた実測値を用いた。各配合の収縮ひずみの計算結果を図 - 3~5 に示す。ここで、Case2 では収縮量の実測値を用いているので、当然ながら実測値と一致する。一方、予測モデルを用いた Case1 では、乾燥開始前(材齢 14 日以前)の自己収縮ひずみを含め、乾燥開始後のひずみの計算結果も実験値に比べて最大で 100 μ 程度小さくなった。しかし、予測式による収縮ひずみの算定精度を考えると、十分精度良く予測できている方である。

各配合の導入引張応力の計算結果を図 - 6~8 に示す。NC, FA15, FA25 の 3 配合ともに予測モデルを用いた Case1 は実験値より導入引張応力が低い結果となった。一方、収縮量、有効弾性係数に実測値を用いて計算した Case2 は実験値に概ね一致しているので、収縮量、有効弾性係数が正確に予測できれば、導入引張応力も精度よく計算できるといえる。

図 - 9 に各配合のひび割れ発生材齢の計算結果を示す。ひび割れ発生材齢は Case1, 2 とともに計算値と実測値が大きく異なる結果となった。特に、Case2 のように、コンクリートに導入される応力を経時的に正確に予測している場合であっても、ひび割れ発生日が精度よく予測で

表 - 1 各種配合の設定値

	NC	FA15	FA25
水セメント比 (%)	50.0	56.0	62.1
単位水量 (kg/m ³)	163		
養生日数 (日)	14		
拘束鋼材比 (%)	7.27		
28日圧縮強度 (N/mm ²)	39.4	34.2	29.9
自己収縮ひずみの最終値 (μ)	84	55	35
乾燥収縮ひずみの最終値 (μ)	661	662	662

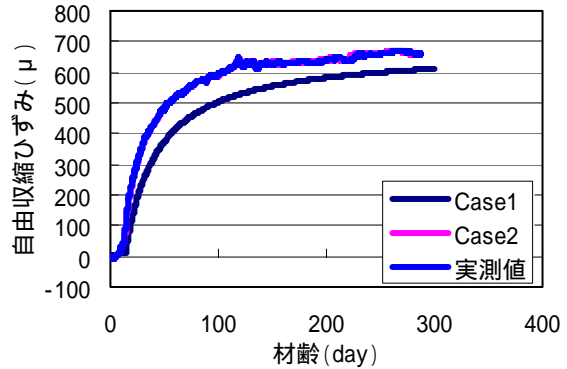


図 - 3 収縮ひずみの経時変化 (NC 配合)

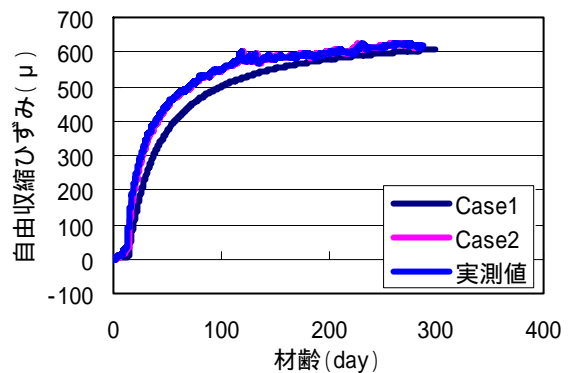


図 - 4 収縮ひずみの経時変化 (FA15 配合)

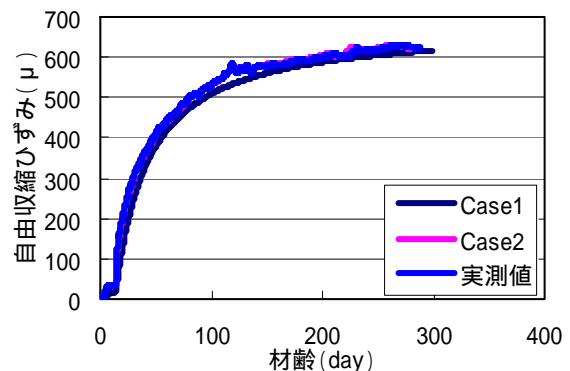


図 - 5 収縮ひずみの経時変化 (FA25 配合)

きないことは、試験体のひび割れ発生強度と割裂引張強度が同値ではないことを示している。ひび割れの発生予測の精度を確保するためには、ひび割れ強度を正確に予測することが欠かせない。そこで、要素試験により得られる引張強度と、一軸拘束試験でひび割れが生じたときにコンクリートに導入されていた引張応力(ひび割れ強

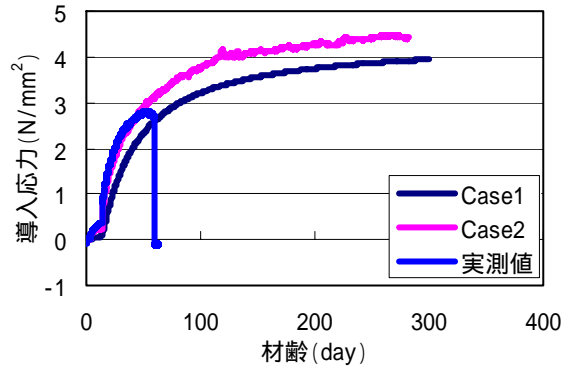


図 - 6 導入引張応力の経時変化 (NC 配合)

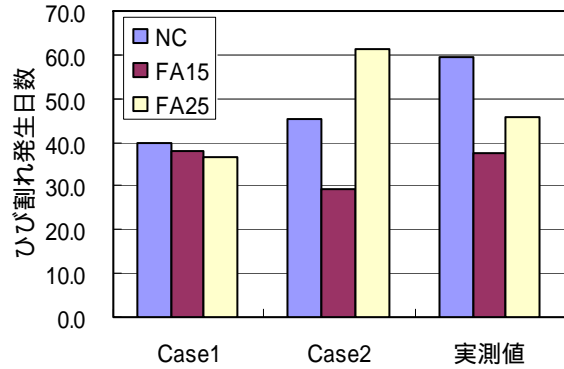


図 - 9 各配合のひび割れ発生材齢

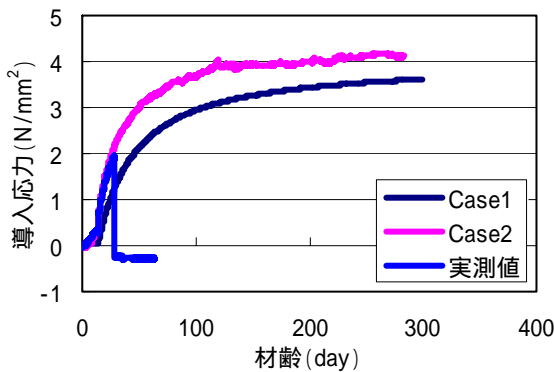


図 - 7 導入引張応力の経時変化 (FA15 配合)

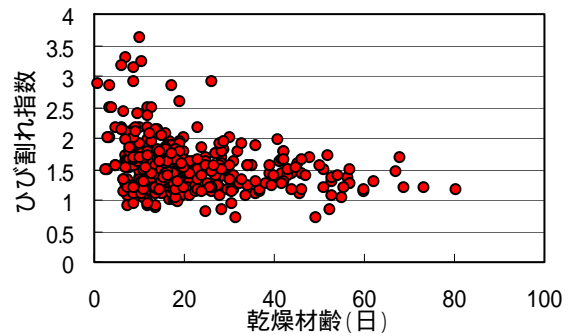


図 - 10 過去の収縮ひび割れ試験結果

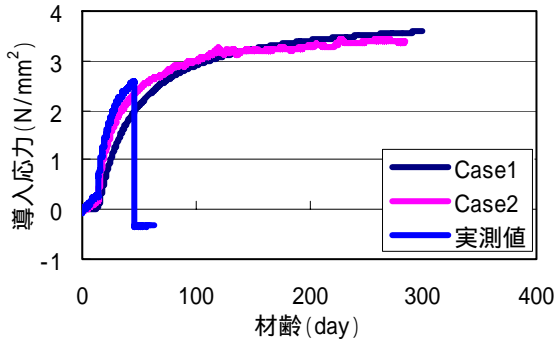


図 - 8 導入引張応力の経時変化 (FA25 配合)

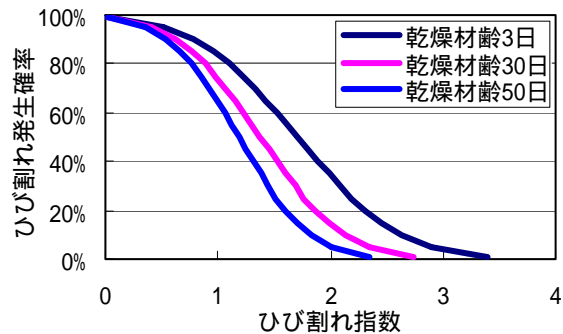


図 - 11 ひび割れ発生確率とひび割れ指数の関係

度)の関係について検討を行うこととした。

4. ひび割れ強度の確率密度関数とひび割れ発生確率

図 - 10 に既往の収縮ひび割れ試験より得られたひび割れ指数を示す。ここで、ひび割れ指数とは試験体に収縮ひび割れが発生した時の割裂引張強度を収縮ひび割れが発生した時に導入されていた引張応力で除した値である。ひび割れ指数の抽出は普通、高強度、フライアッシュ、軽量、膨張コンクリートなど既往の研究で行われた収縮ひび割れ試験結果より得られたすべての配合を対象とした。これらのデータの平均値は約 1.3 であった。この値は、Case1 でひび割れ強度を割裂強度の 0.7 倍とした計算仮定と相違しない。しかし、ひび割れ指数

は試験者や試験方法などによって大きくばらつき、一意の値を定めることが難しいことがわかる。また、このひび割れ指数は収縮ひび割れが発生した材齢によって大きく異なり、乾燥材齢が短いほどひび割れ指数の最大と最小の差は大きくなっている。この原因を特定することは困難であるが、大半のデータが割裂引張強度よりもひび割れ強度が小さくなることを示しているため、部材断面の内的拘束の影響や乾燥に伴う微細な損傷の影響などが一因として考えられる。いずれにせよ、収縮ひび割れ発生時の引張応力は大きければつきを持つので、ひび割れ発生材齢を決定論的に予測することは困難であり、統計的な評価を下すことが現実的だと考えられる。そこで、図 - 10 のデータを回帰することで、ひび割れ指数

とひび割れ発生確率の関係を導出することとした。

まず、ひび割れ指数の平均値を、乾燥材齢を従属変数とした指数関数で回帰した。回帰式を以下に示す。

$$I_m = h \cdot e^{gt} \quad (17)$$

ここで、 I_m はひび割れ指数の平均値、 g, h は定数であり、それぞれ、 $-0.02532, 0.636$ であった。次に、平均値に対するばらつきは、式(18)に示すような対数正規分布に従うものと仮定し、統計量を計算したところ、標準偏差 s は 0.232 と求められた。ここで、標準偏差は時間によらず一定と仮定した。

$$f(I) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} s \cdot I} \exp\left\{-\frac{(\log I - I_m)^2}{2s^2}\right\} \quad (18)$$

ここに、 $f(x)$ は確率密度関数である。ひび割れ発生確率は、 1.0 から式(18)の累積分布関数を差し引くことで求めることができる。式(19)に累積分布関数 $F(I)$ を、式(20)にひび割れ発生確率 $P(I)$ の計算式をそれぞれ示す。

$$F(I) = \int_0^I f(x) dx \quad (19)$$

$$P(I) = 1 - F(I) \quad (20)$$

式(18)~(20)を用いると、図 - 11 に示すような、ひび割れ指数 - ひび割れ発生確率関係が得られる。ここで、ひび割れ指数の平均値は乾燥材齢とともに減少するので、ひび割れ発生確率も時々刻々と変化することになる。たとえば、ひび割れ指数が乾燥材齢によらず、 2.0 で一定だとすると、乾燥 3 日目ひび割れ発生確率が 30% 程度なのに対し、乾燥 50 日目ではひび割れ発生確率が 5% 程度まで低下する。

5. ひび割れ発生確率を用いた評価例

図 - 11 に示すような乾燥期間依存型のひび割れ発生確率を用いて、前述の NC, FA15, FA25 配合の材齢 - ひび割れ発生確率関係を求めた結果が図 - 12 ~ 14 である。今回の試験条件では、乾燥開始から急激にひび割れ発生確率が上昇し、その後、ひび割れ発生確率がほぼ一定値で推移していく結果となった。今回予測を行った養生 14 日の実験ではひび割れ発生確率が 80 ~ 90% 程度のときに、ひび割れが発生した。この領域では、ひび割れ発生確率が横ばいになっているので、いつひび割れが発生してもおかしくない。本研究では、この領域でのひび割れ発生材齢の大小には有意性はないと考える。

ひび割れ抵抗性の大小について議論するため、その指標として、ひび割れ発生確率の最大履歴を抽出することとした。図 - 15 に、乾燥開始材齢と材齢 100 日までのひび割れ発生確率の最大値の関係を示す。フライアッシュ置換率が 25% である FA25 では、養生日数が短いと、普通コンクリート NC よりもひび割れ発生確率が大きくなる

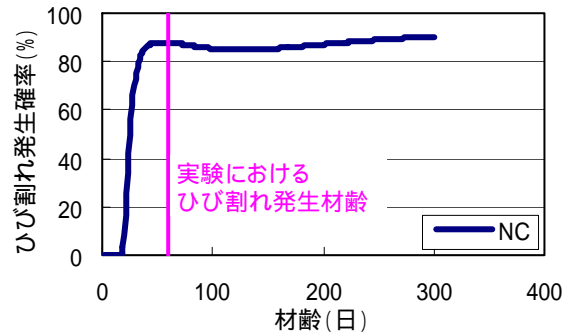


図 - 12 ひび割れ発生確率の経時変化 (NC 配合)

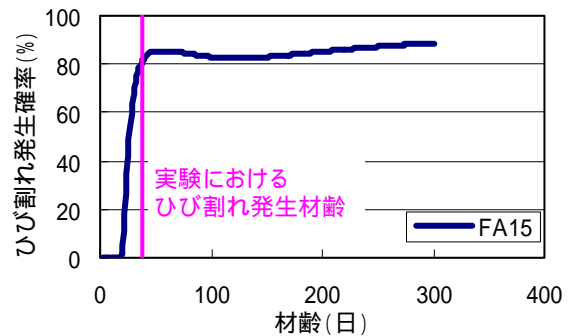


図 - 13 ひび割れ発生確率の経時変化 (FA15 配合)

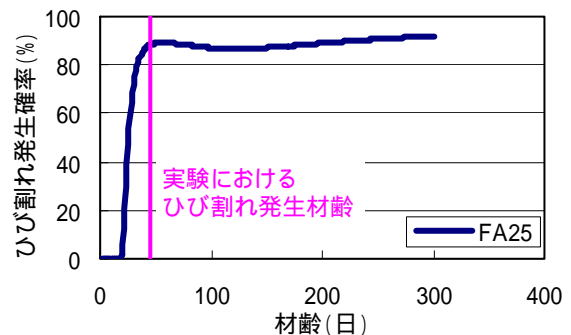


図 - 14 ひび割れ発生確率の経時変化 (FA25 配合)

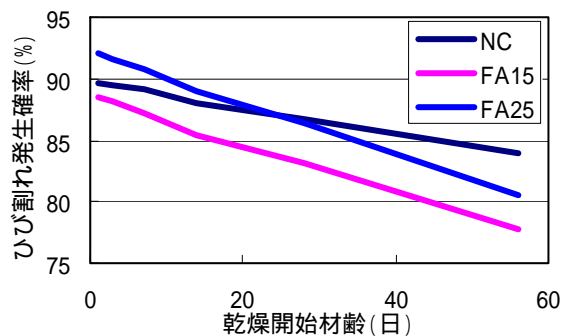


図 - 15 乾燥開始材齢とひび割れ発生確率の最大値の関係

ことがわかる。また、乾燥開始までの材齢を大きくするほど、フライアッシュコンクリートのほうがひび割れが発生しづらくなる算定結果となった。この傾向は、筆者らがこれまでにに行った実験結果¹⁾とおおむね一致する。

図 - 9 の実験値に着目すると、FA15 のひび割れ発生材齢が N、FA25 よりも早いのにに対して、図 - 15 のひび割れ発生確率は、他のものよりも低い値となっていて、両者は整合しない。これは、FA15 の割裂引張強度が計算値よりも小さかったことが主要因として考えられる。N、FA25 の場合は、強度の計算値と実験値がおおむね一致していることから、フライアッシュ置換率 15% の場合の強度発現モデルについては、今後、改良する必要がある。

6. 今後の課題

今回構築したひび割れ照査モデルを実用に供するためには、以下に述べるいくつかの課題を解決する必要がある。

一つ目の課題は、このひび割れ発生確率は、コンクリートの導入応力が正確に予測できていることを前提とした値だということである。この問題に対しては、各モデル式の精度向上が不可欠であるが、計算結果と実験結果のばらつきを考慮可能な信頼性解析を行うことも課題解決の選択肢に含まれる。

二つ目の課題は、ひび割れ発生確率の目標値の設定方法である。収縮ひび割れは、ばらつきが大きな現象なので、目標値を高く設定すると、かなり余裕度の大きな対策が必要となる場合も起こり得るので、どこまで許容ができるのかを今後、明確にする必要がある。

三つ目の課題は、大きな部材への適用性である。今回のモデルは、断面が 10×10cm の試験結果により構築されたものであるため、今後、大断面の部材への適用性を検証する必要がある。

7. まとめ

本研究では、フライアッシュコンクリートのひび割れ抵抗性の照査技術の構築を行い、以下の知見を得た。

- 1) 一軸拘束試験を行った際の導入引張応力はクリープの計算を行わなくても、クリープの影響を含んだ有効弾性係数と有効ひずみを用いることで簡便に予測することが可能である。
- 2) ただし、導入引張応力を精度よく算定するには、収縮ひずみと有効弾性係数を正確に推定する必要がある。
- 3) ひび割れ発生時の引張応力は試験体間のばらつきが大きく、一意に決定することが難しい。そのため、ひび割れの発生については、決定論的な評価よりも確率論的な評価法を用いるべきである。

- 4) 今回構築したひび割れ照査プログラムでは、ひび割れ発生確率の最大履歴を抽出することで、コンクリートの種類や養生日数が違う場合の、ひび割れ抵抗性の優劣を検討することが可能である。

参考文献

- 1) 臼井裕規, 下村匠, 田中泰司, フライアッシュを用いたコンクリートの収縮ひび割れ抵抗性, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.31, No.2, pp.613-618, 2009.7
- 2) 臼井裕規, 下村匠, 各種粉体混和材を用いたコンクリートの収縮ひび割れ抵抗性, 第 63 回土木学会年次学術講演会講演概要集, 5-430, pp.859-860, 2008.9
- 3) 土木学会, コンクリート標準示方書【設計編】, 2007.3
- 4) 阪田憲次, 池田清, コンクリートのクリープの予測に関する研究, 土木学会論文報告集, 第 340 号, pp.185-191, 1983.12
- 5) 日本建築学会, 鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ制御設計・施工指針(案)・同解説, 2006.2
- 6) 日本規格協会, JIS A 1151, 拘束されたコンクリートの乾燥収縮ひび割れ試験方法, 2002
- 7) 土木学会, フライアッシュを用いたコンクリートの施工指針(案), 2003