

コンクリート部材の収縮ひび割れ抵抗性の簡易照査手法の提案

コンクリート研究室 白井 裕規
主指導教員 下村 匠

1. はじめに

フライアッシュをコンクリート混和材として用いることは、コンクリートのアルカリ骨材反応の抑制対策、水和熱抑制対策としての効果があり、資源の有効利用につながる。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おり、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る。筆者らはこれまでに一軸拘束収縮ひび割れ試験を用いて、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。筆者らはこれまでに、養生期間が短いと普通コンクリートに比べてフライアッシュコンクリートはひび割れ抵抗性が低下すること、その主な原因は初期の強度発現が小さいことによるものであることを実験的に示した。本論文では、フライアッシュコンクリートのひび割れ抵抗性を確保するための養生条件および拘束条件を明らかとすることを目的として、一軸拘束試験を主体とした実験的な検討を行った。さらに本実験で得られた知見を元に、一般コンクリート部材の収縮ひび割れの発生を予測できる簡便な予測プログラムの構築を行い、その適用性を検討した。

2. 実験概要

本研究では、フライアッシュコンクリートの乾燥収縮に対するひび割れ抵抗性を確認することを目的として、乾燥開始までの養生日数と拘束鋼材量を試験因子とした一軸拘束試験を行った。拘束鋼材量を因子としたのは拘束応力導入速度を変化させるためである。打設から乾燥開始までの封緘養生日数は7, 14, 28日の3水準、鋼材の断面積はJISに定められた鋼材量を中心

とした3水準とした。実験は表-1に示すように4シリーズで構成される。各シリーズはフライアッシュ置換率が異なる3体のコンクリート試験体で構成されている。なお、14日シリーズと低拘束シリーズでは高炉セメントを使用したコンクリート試験体1体も作製し、試験を行った。セメントに対するフライアッシュ置換率を0, 15, 25%とした。一軸拘束試験と同時に、自由収縮量と圧縮強度(脱型時, 破断時, 28日強度)の測定も行った。

一軸拘束試験体の概要を図-1に示す。一軸拘束試験体は開放部の断面が100×100mmであり、4側面すべてを乾燥面とした。拘束鋼材には総断面積が517, 727, 1104mm²の3種類の軽溝形鋼を用いた。拘束鋼材にひずみゲージを貼付し、拘束収縮ひずみを測定した。自由収縮試験体は100×100×400mmの角柱試験体とし、試験体の中心に埋め込み式ひずみゲージを設置し、長さ変化を測定した。なお、乾燥条件は6面乾燥とした。一軸拘束試験体と自由収縮試験体ともに、打設直後から所要の日数にいたるまで温度20度の湿度60%の恒温室内で表面をラップで覆い、端部をテープで留め、封緘養生を行った。

表-1 試験条件の一覧

種類	記号	封緘養生日数			高拘束	JIS標準	低拘束
		7日	14日	28日			
		断面積(mm ²)					
14日養生			○		○		
低拘束	L	○				○	
28日養生				○	○		
28日養生-H	H			○	○		

表-2 示方配合

配合名	スランプ (cm)	水セメント比 W/C (%)	水結合材比 W/B (%)	空気量 (%)	細骨材率 s/a (%)	FA置換率 (内割り) (%)	単位量(kg/m ³)						
							水	セメント	フライアッシュ	細骨材	粗骨材	AE剤	AE減水剤
							W	C	FA	S	G	AE	SP
NC	12	50.0	50.0	4.5	45	0	163	326	0	821	1027	0.098	0.82
FA15		56.0	47.6			15		291	51	808	1010	0.087	0.73
FA25		62.1	46.6			25		263	88	800	1000	0.079	0.66
BB		50.0	50.0			0		326	0	817	1021	0.098	0.82

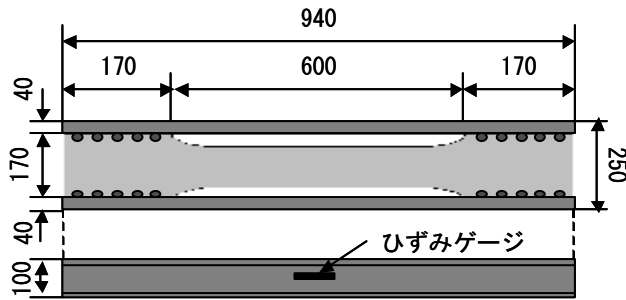


図-1 一軸拘束試験体の概要

3. 使用材料および配合条件

コンクリートの示方配合を表-2に示す。本実験では普通コンクリート配合 NC、普通コンクリートの一部をフライアッシュで内割りそれぞれ 15%、25%置換した配合 FA15、FA25、セメントに高炉セメントを用いた配合 BB の 4 つの配合を用いた。事前の強度試験結果を参考にして 28 日強度が同程度となるように、それぞれの配合の水セメント比の調整を行った。

4. 実験結果

4.1 収縮ひび割れ抵抗性

収縮ひび割れ抵抗性は一軸拘束収縮試験におけるひび割れ発生材齢により評価できる。封緘養生 14 日、拘束鋼材が JIS 標準のシリーズのひび割れ発生材齢を図-2に示す。ひび割れ発生材齢には封緘養生の期間も含まれている。普通コンクリート NC に比べて、フライアッシュや高炉スラグを混入した場合にはいずれの試験体も早期にひび割れが生じた。フライアッシュの混入量に着目すると 15%置換した FA15 配合の方が 25%置換を行った FA25 配合よりもひび割れ発生日数が短い。この傾向は、養生日数の異なる他

のすべてのシリーズで確認された。しかし、その理由については未解明である。

図-3は封緘養生 7 日の低拘束シリーズの試験結果である。参考として既往の研究⁹⁾における封緘養生 7 日の JIS 標準拘束率のシリーズの試験結果を合わせて示した。既往の試験に用いたフライアッシュコンクリートの配合は本実験とは水粉体比が若干異なるものの、単位水量や使用材料は同一である。

図-4には封緘養生 28 日の試験結果を示した。図-2~図-4の JIS 標準の鋼材を用いた場合封緘養生 7 日、14 日、28 日の結果を相互に比較すると、NC 配合は封緘養生の日数によらずひび割れ発生日数がほとんど変化しないのに対して、フライアッシュを混和したコンクリートと高炉セメントを使用したコンクリートは養生期間の増大に伴いひび割れ発生日数が長くなっている。この結果、封緘養生期間 28 日で、フライアッシュを内割で 25%置換した FA25 配合の収縮ひび割れ抵抗性は普通コンクリートと同程度となった。

本試験の拘束鋼材量は鉄筋比で 5.17%~11.0%に相当するので、鉄筋コンクリートにおける鉄筋による拘束を考えると、実構造物に比べてかなり大きい。ただし、他部材や接合による外部拘束が厳しい場合はこの限りではない。

以上に考察したように、一般的な JIS 拘束収縮試験のみによって判定すると、フライアッシュコンクリートの収縮ひび割れ抵抗性は過小評価される恐れがある。それでも、乾燥開始前の封緘養生を十分に行えばフライアッシュコンクリートのひび割れ抵抗性は向上する。実構造物

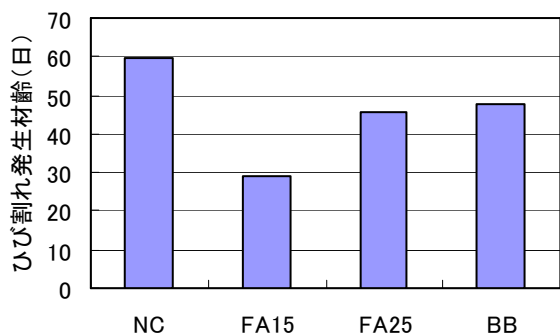


図-2 ひび割れ発生材齢の比較(養生 14 日)

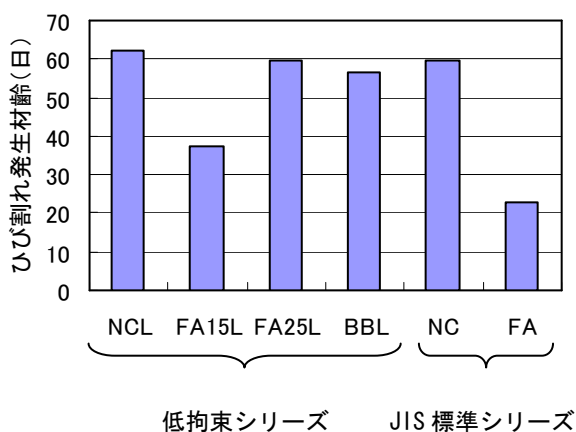


図-3 ひび割れ発生材齢の比較(養生 7 日)
* JIS 標準シリーズは既往の研究結果¹⁾

では、薄い部材を早期に脱型する場合や、外部拘束が卓越する場合を除き、フライアッシュコンクリートの収縮ひび割れ抵抗性は普通コンクリートと同等であると考えて差し支えないといえる。

次にフライアッシュコンクリートの収縮ひび割れ抵抗性が、封緘養生期間の増加や拘束鋼材量の減少によって増加した原因を、収縮ひび割れ抵抗性の構成因子である「収縮特性」(=収縮しやすさ)、「応力緩和特性」(=収縮が拘束された場合のクリープによる応力緩和のしやすさ)、「ひび割れ発生条件」(=引張応力、引張ひずみ)が導入された場合のひび割れやすさ)の3つの側面から分析することとした。

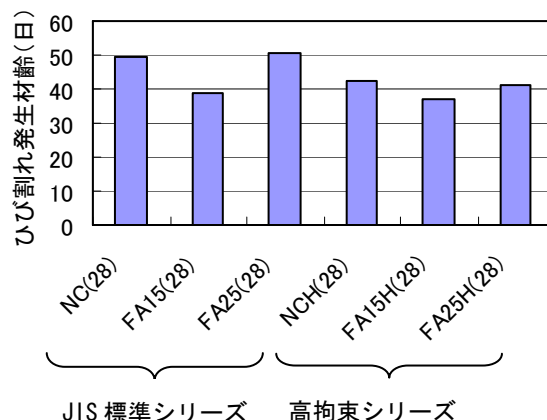


図-4 ひび割れ発生材齢の比較(養生 28 日)

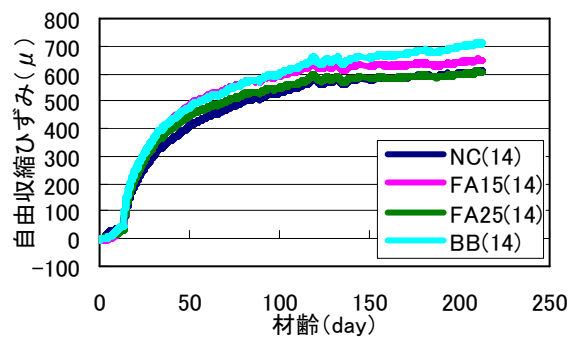


図-5 養生 14 日シリーズの自由収縮試験結果

4.2 収縮特性

各シリーズの自由収縮試験の結果を図-5～図-7に示す。これらの図を見ると養生期間によって、NC 配合と混和材の混入した配合の収縮量の関係が異なることがわかる。養生 7 日ではフライアッシュコンクリートのほうが普通コンクリートに比べて収縮量が小さいが、養生 14 日では両者の大小関係が逆転する。また、養生 28 日では収縮量はほぼ一致する。

ただし、この収縮量の差は最大で 100 μ 程度とさほど大きいものではないため、フライアッシュや高炉スラグなどの混和材を混入することによってコンクリートの収縮特性は変化しないといえる。

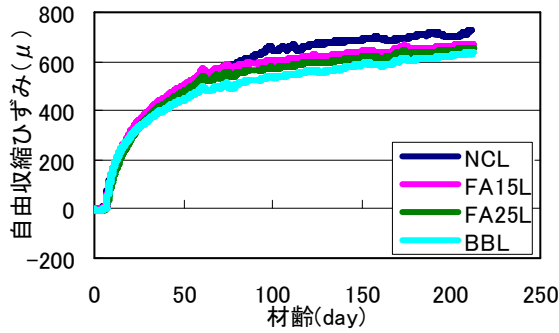


図-6 養生7日シリーズの自由収縮試験結果

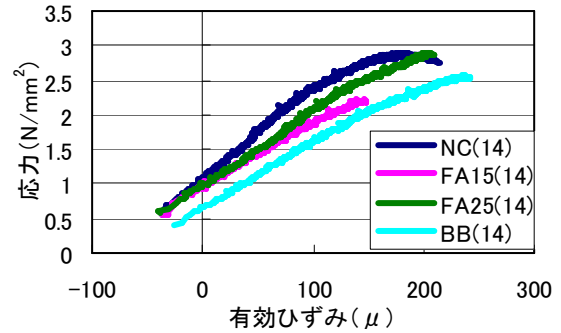


図-8 14日養生の応力-有効ひずみ関係

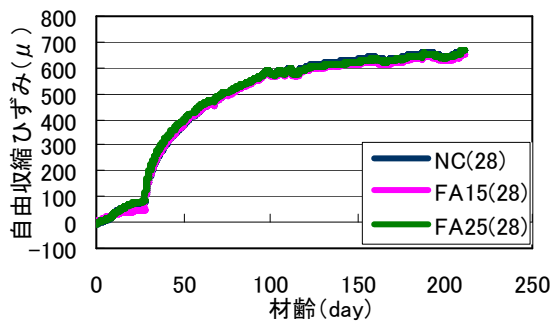


図-7 養生28日シリーズの自由収縮試験結果

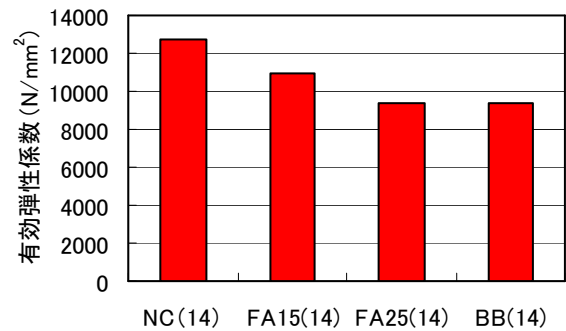


図-9 14日養生シリーズの有効弾性係数

4.3 応力緩和特性

一軸拘束収縮試験では、コンクリートは自由に収縮できないためにコンクリートには引張応力が発生する。コンクリートに発生する断面平均応力は以下の式より求められる。

$$\sigma = \frac{A_s}{A_c} E_s \varepsilon \quad (1)$$

ここに、 σ ：拘束ひずみによるコンクリートの断面平均応力（引張を正とする）（ N/mm^2 ）， A_s ：拘束鋼材の断面積（ mm^2 ）， A_c ：コンクリートの断面積（ mm^2 ）， E_s ：拘束鋼材の弾性係数（ N/mm^2 ）， ε ：拘束鋼材のひずみ（収縮を正とする）である。また、自由収縮ひずみから拘束ひずみを差し引くことによって拘束による引張変形である有効ひずみを求めることができる。有効ひずみは以下の式より求められる。

$$\varepsilon_{eff} = \varepsilon_{sh} - \varepsilon_r \quad (2)$$

ここに、 ε_{eff} ：有効ひずみ（引張を正とする）， ε_{sh} ：自由収縮ひずみ（収縮を正とする）， ε_r ：拘束収縮ひずみである（収縮を正とする）。ひずみは乾燥開始時を 0 としたが、拘束ひずみにはひび割れ発生時に応力が 0 となるように補正をしたため、自己収縮分のひずみが含まれている。

図-8に養生14日シリーズの応力-有効ひずみ関係を示す。この図の応力-有効ひずみ関係の傾きである有効弾性係数は、応力緩和特性の大小をあらわす指標となる。図-9~11に各配合の有効弾性係数を示す。いずれの養生日数、鋼材量においても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有効弾性係数が小さかった。このことは、フライアッシュコンクリートのひび割れ抵抗性に対して有利に作用する。

表-3 各強度試験結果

配合	拘束率	養生 日数	脱型時			28日		ひび割れ時					有効 ひずみ	有効 弾性 係数
			圧縮 強度	静弾性 係数	引張 強度	圧縮 強度	静弾性 係数	乾燥材 齢	圧縮 強度	静弾性 係数	引張 強度	応力		
			N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	day	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²		
NC(14)	JIS標準	14日	36.0	30021	2.48	48.8	43606	45.6	48.2	31626	3.03	2.75	264	12703
FA15(14)			24.4		1.93	30.9	37234	14.8	27.6	28495	2.63	2.21	220	10896
FA25(14)			26.2		1.98	33.9	37142	31.6	34.4	27599	2.07	2.87	258	9363
BB(14)			27.1		2.15	37.6	31903	33.9	36.4	27531	2.65	2.51	293	9393
NCL	低拘束	7日	25.5	32122	2.44			55.2	32.7	48102	2.63	2.55	286	9337
FA15L			21.5	28762	1.70			30.6	30.8	32430	2.17	2.32	222	8994
FA25L			18.6	32346	1.65			52.7	32.3	27470	2.77	2.62	272	8808
BBL			19.0	21161	1.68			49.5	33.6	36506	1.68	2.40	233	9007
NC(28)	JIS標準	28日	36.0	31321	2.82			21.2	45.1	30746	2.75	2.55	206	12611
FA15(28)			31.2	38226	2.06			10.6	34.3	31542	2.27	2.10	196	6332
FA25(28)			31.1	32441	1.75			22.6	38.3	30207	2.88	2.58	244	8137
NCH(28)	高拘束	28日	40.1	42476	2.52			14.3	47.9	31852	3.20	2.74	189	9870
FA15H(28)			32.3	35013	1.77			9.0	36.5	32266	1.86	2.00	187	8560
FA25H(28)			30.4	29970	2.09			13.4	38.7	31303	2.87	2.43	226	9366
NC(去年)	JIS標準	7日	31.6	28864	2.15	34.9	34752	52.5	38.9	28575	2.52	2.97	316	10361
FA(去年)			21.2	20958	1.97	33.5	30826	15.7	31.0	35924	1.80	1.36	263	5486

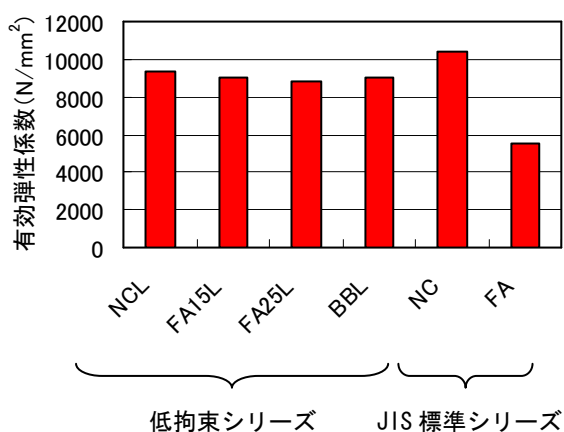


図-10 7日養生シリーズの有効弾性係数

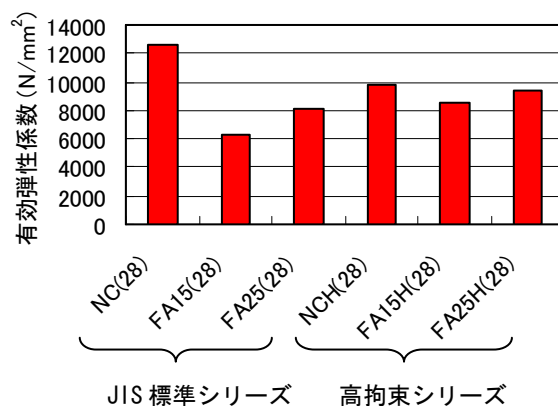


図-11 28日養生シリーズの有効弾性係数

4.4 ひび割れ発生条件

表-3に各配合の強度試験結果を示す。今回の実験では養生7, 14日, 28日ともに、フライアッシュを内割で25%置換したFA25配合はひび割れ発生時の引張応力が普通コンクリートと同程度であった。養生14日では普通コンクリートのほうがフライアッシュコンクリートよりもひび割れ発生材齢が長かったが、それは主に乾燥収縮量が小さかったことによるものであると推定される。また封緘養生28日の場合には乾燥収縮量が同程度となるので、ひび割れ発生日数も

同等となったと説明できる。一方、FA15やBB配合ではいずれのケースにおいてもひび割れ発生応力が小さかった。よって養生14日におけるFA15, BB配合でのひび割れ抵抗性低下の原因は初期の引張強度が小さいことが一因であるといえる。

5. 収縮ひび割れ発生予測プログラムの概要

5.1 プログラム作成の基本方針

収縮ひび割れの発生を現象のメカニズムに則り予測するためには、コンクリート中の水分移動およびこれに伴う乾燥収縮、収縮の内的・外的な拘束による応力の導入、さらにクリープ、水和の進行による物性の変化、といった事象を考慮しなければならない。また、部材形状や拘束条件の影響を精密にかつ一般的に考慮するためには、有限要素解析によるのがよいと思われる。しかし、実用面からは、本質を捉えた簡便なモデルの構築も有効であると考えられる。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-12に示す。一次元部材の断面平均の収縮ひずみ、応力を対象としたので、部材断面内部の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クリープの影響を含んだ有効弾性係数を用いることによって、クリープ解析を省略することとした。

5.2 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。収縮ひずみとして、乾燥収縮と自己収縮の2種類を考慮することとした。

5.3 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。

$$f'_c(28) = (1.52 \times C - 3.96 \times W + 552) \times 0.098 \quad (3)$$

$$f'_c(t) = (0.469 \times f'_c(28) + 40.1) \times \log(t) + 0.320 \times f'_c(28) - 58.1 \quad (4)$$

$$E_c(t) = (15840 \sqrt{f'_c(t)/0.098}) * 0.098 \quad (5)$$

ここに、 $f'_c(t)$ ：材齢 t 日における圧縮強度 (N/mm²)、 $E_c(t)$ ：材齢 t 日における静弾性係数 (N/mm²) である。式 (4)、(5) において、 $t \geq 56$ 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。

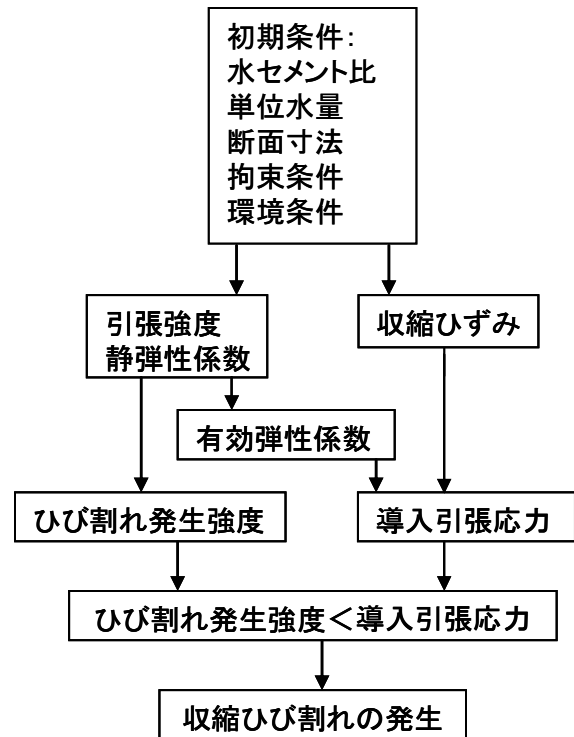


図-12 予測プログラムのフローチャート

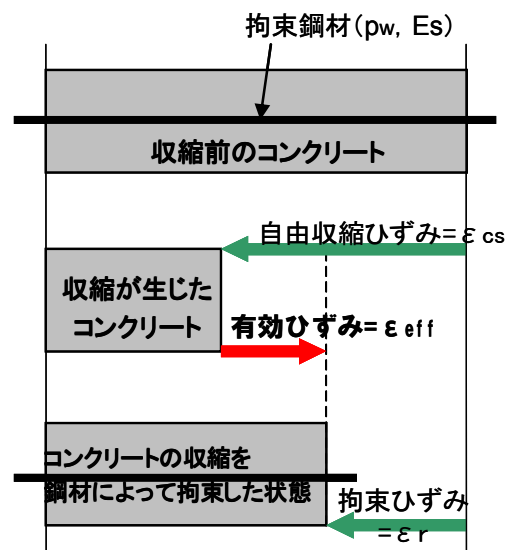


図-13 鋼材により収縮が拘束された一軸コンクリート部材の変形

5.4 有効ひずみと導入応力の計算方法

有効ひずみとは、膨張・収縮などの体積変化を伴う物体において観察されるひずみのうち、応力の作用によって生じたひずみであり、コンクリートの一軸拘束収縮試験の場合には、非拘束供試体の収縮ひずみから拘束供試体のひずみ

を差し引くことで求められる。各時点において実測される有効ひずみは、応力による瞬間ひずみとクリープが含まれる。応力と有効ひずみの比を有効弾性係数と定義する。ある時点におけ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と有効ひずみは、鋼材とコンクリートの力の釣り合いと変形の適合条件より算出できる。図-13 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 (6) に示す。

$$\sigma_c = F_{ex} + F_{re} \quad (6)$$

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、 $F_{re} = p_w \times E_s \times \varepsilon_r$ は鋼材による拘束力、 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 (6) を整理することによって以下のようにあらわされる。

$$\varepsilon_{eff} = \frac{p_w \cdot E_s \cdot \varepsilon_{cs}}{E_{eff} + p_w \cdot E_s} \quad (7)$$

5.5 ひび割れ発生強度と有効弾性係数

コンクリート部材に乾燥収縮ひび割れが発生するときの部材断面の平均応力は強度試験により得られるコンクリートの引張強度よりも小さいことが知られている。これは、断面内の不均一な乾燥収縮による内部拘束の影響によると考えられている。ここでは、ひび割れ強度を引張強度の 0.7 倍とした。引張強度は以下の式より求めた。

$$f_t = 0.23 f'_c (t)^{2/3} \quad (8)$$

コンクリートの有効弾性係数は既往の一軸拘束試験体の実験結果²⁾より、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 とした。

6 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

表-1 各配合の初期条件

	NC	FA15	FA25
水セメント比(%)	50.0	56.0	62.1
単位水量(kg/m ³)	163		
拘束鋼材比(%)	7.17		

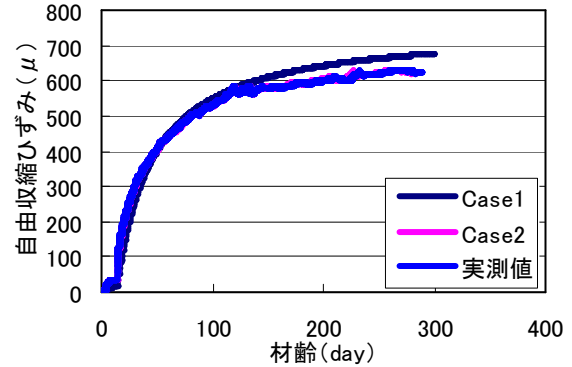


図-14 収縮ひずみの経時変化 (NC 配合)

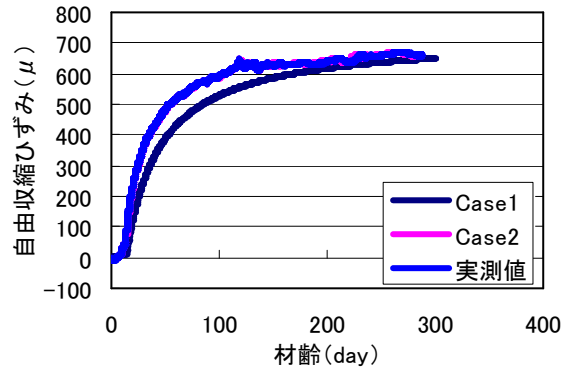


図-15 収縮ひずみの経時変化 (FA15 配合)

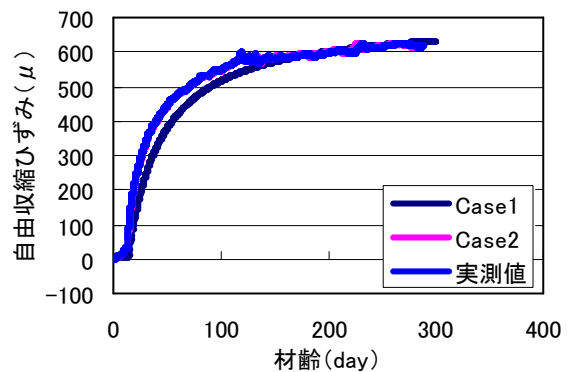


図-16 収縮ひずみの経時変化 (FA25 配合)

て既往の実験結果との比較を行った。解析対象は、JIS 一軸拘束試験である。試験体水準を表-4 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。強度は、フ

ライアッシュを結合材には含めず、水セメント比から予測した。

予測手法の検討のため収縮ひび割れの発生予測は以下の2ケースを行った。Case1では収縮量、有効弾性係数、引張強度ともに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、引張強度は、その供試体の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-14~16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-17~19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、有効弾性係数にその供試体の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推定できれば、導入引張応力も精度よく算定できるといえる。

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ともに計算値と実測値が大きく異なる結果となった。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きない。そこで、引張強度とひび割れ強度の関係について検討を行うこととした。

7. ひび割れ強度の確率密度関数とひび割れ発生確率

図-20に既往の収縮ひび割れ試験結果のひび割れ強度比を示す。ひび割れ強度比とは試験体に収縮ひび割れが発生した時に導入されていた引

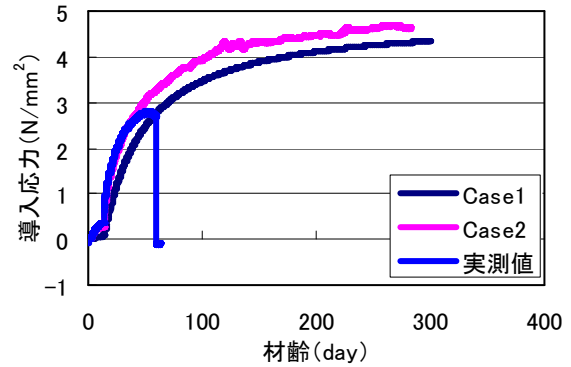


図-17 導入引張応力の経時変化 (NC 配合)

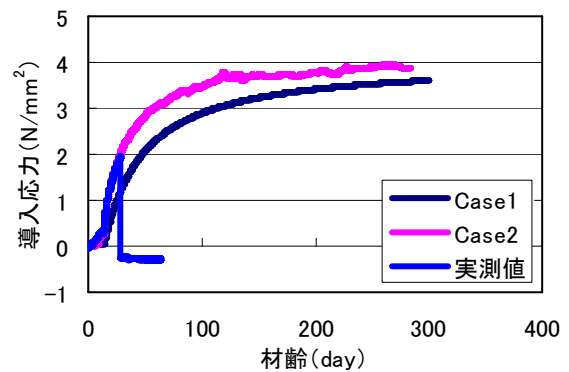


図-18 導入引張応力の経時変化 (FA15 配合)

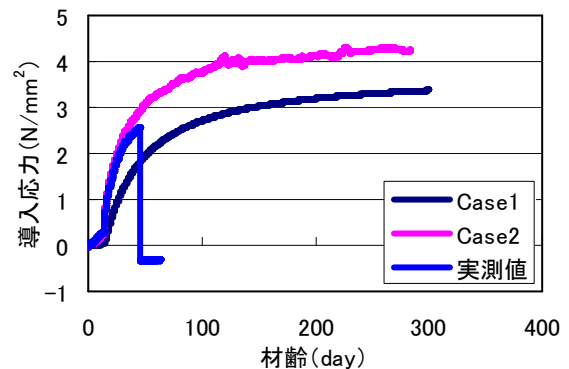


図-19 導入引張応力の経時変化 (FA25 配合)

張応力をひび割れが発生した時の割裂引張強度で除した値である。強度比は試験者や試験方法などによって大きくばらついていることがわかる。また、このひび割れ強度比は、収縮ひび割れが発生した材齢が短いほどばらつきが大きく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、急激な乾燥を受けるようなものほど、内部拘束の影響が大きいことがその一因として挙げられる。いずれにせよ、収縮ひび割れ発生時の引張強度はばらつきを持つので、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、確率論的な評価を下すことが現実的だと考えられる。そこで、**図-20** のデータを回帰することで、ひび割れ強度比とひび割れ発生確率の関係を導出することとした。

まず、**図-20** のひび割れ強度比の逆数を取り、これを I と定義する。次にひび割れ強度比の逆数の平均値を、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。

$$I_m = h \cdot e^{gt} \quad (9)$$

ここで、 I_m はひび割れ指数の平均値、 g 、 h は変数であり、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。

$$f(I) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} s \cdot I} \exp\left\{-\frac{(\log I - I_m)^2}{2s^2}\right\} \quad (10)$$

ここに、 $f(I)$ は確率密度関数である。ひび割れ発生確率は、1.0 から式 (10) 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 (11) に累積分布関数 $F(I)$ を、式 (12) にひび割れ発生確率 $P(I)$ の計算式をそれぞれ示す。

$$F(I) = \int_0^I f(x) dx \quad (11)$$

$$P(I) = 1 - F(I) \quad (12)$$

8. ひび割れ発生確率を用いた評価例

本研究で構築した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-21** である。今回の試験条件では、乾燥開

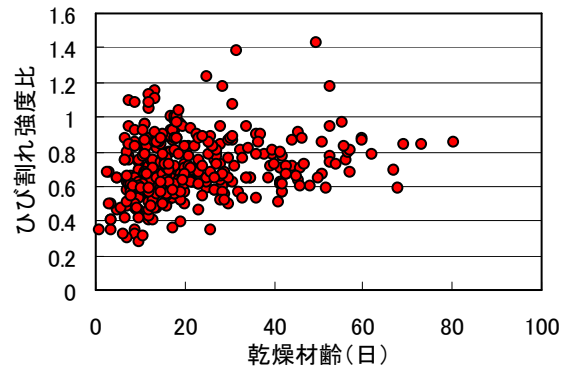


図-20 過去の収縮ひび割れ試験結果

始から急激にひび割れ発生確率が上昇し、材齢が進むにつれて徐々に発生確率が小さくなる結果となった。今回予測を行った養生 14 日の実験では 3 配合ともにひび割れ発生確率が 90%程度 のときに、ひび割れが発生した。この結果の解釈については、議論の余地があるものの、ここでは、ひび割れ発生確率の最大履歴を代表値として抽出することで、部材相互のひび割れ抵抗性の比較を行うこととした。**図-23** に、乾燥開始材齢と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のがわかる。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行った実験結果とおおむね一致する。

FA15 のひび割れ発生材齢が N、FA25 よりも早いものに対して、**図-23** 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。

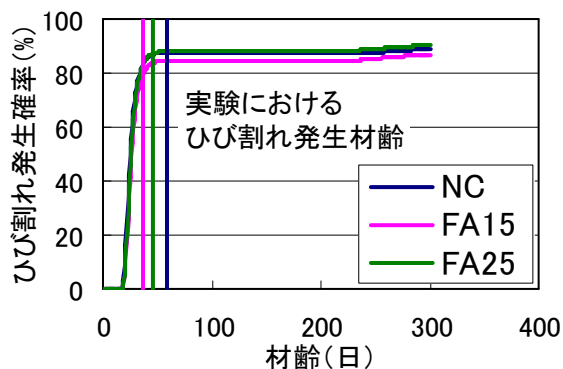


図-21 ひび割れ発生確率の経時変化

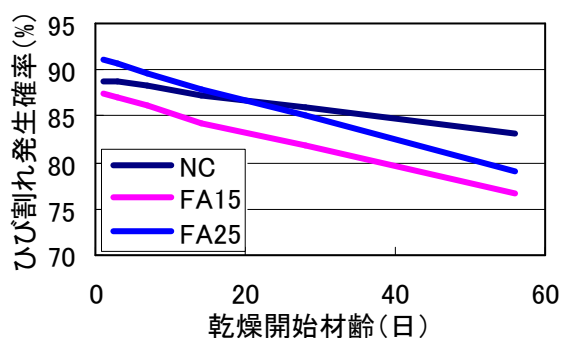


図-22 乾燥開始材齢とひび割れ発生確率の最大値の関係

9. まとめ

拘束されたコンクリートの乾燥収縮ひび割れ試験と収縮ひび割れ予測プログラムの構築を行い、以下の知見を得た。

- 1) フライアッシュコンクリートの収縮ひび割れ抵抗性は拘束鋼材量と養生期間に依存し、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。また、養生期間が7日であっても拘束鋼材比が5%以下であればひび割れ抵抗性は同等となる。
- 2) 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。
- 3) フライアッシュコンクリートの収縮ひび割れを防ぐためには、引張強度が十分発現していない段階で大きな収縮拘束応力が導入されないように、脱枠の時期、拘束の程度に配慮する必要がある。

- 4) 一軸拘束試験を行った際の収縮ひずみ、導入引張応力はクリープの計算を行わなくても、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。
- 5) 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。
- 6) 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。
- 7) 今回構築したモデルではひび割れが発生する確率が高い期間が存在し、それ以降の期間ではひび割れ発生確率が減少するが、その真偽については今後、慎重に検討を進める必要がある。

参考文献

- 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
- 土木学会, コンクリート標準示方書【設計編】, 2007.3
- 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
- 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
- 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
- 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