

論文 フライアッシュを用いたコンクリートの乾燥収縮ひび割れ性状

中川隆夫^{*1} 大野義照^{*2} 徐泰錫^{*3} 松田成貴^{*4}

要旨: フライアッシュを用いたコンクリートの乾燥収縮ひび割れ性状を調べる目的で普通のコンクリート, フライアッシュを 20% 内割り及び 20% 外割り混入したコンクリートの乾燥収縮, クリープ及び無筋・有筋一軸拘束ひび割れ実験を行った。その結果, フライアッシュを混入したコンクリートのひび割れ発生時期及びひび割れ幅等のひび割れ性状は普通のコンクリートの性状と同等, またはそれ以上であった。また, 付着解析によって鉄筋ひずみ分布を求めひび割れ幅を算定した。

キーワード: フライアッシュ, 乾燥収縮, クリープ, 拘束ひび割れ試験, ひび割れ幅

1. はじめに

火力発電所で副産物として多量に排出されるフライアッシュをコンクリート材料として有効利用することが望まれている。本報告ではフライアッシュをセメントまたは混和材の一部に使用したコンクリートの乾燥収縮ひび割れ性状について, フライアッシュの置換率が異なるコンクリートにおいて, 埋設鉄筋の無い場合と有る場合について一軸拘束ひび割れ試験を実施し, 収縮拘束応力やひび割れ発生時期, ひび割れ幅の経時変化等を測定し, ひび割れ抵抗性能を検討した。同時に圧縮・割裂強度, ヤング係数, 乾燥収縮, クリープ性状を調べた。

2. 実験概要

2.1 使用材料および調合

コンクリートの調合を表 - 1 に示す。水セメント比 55%, 目標スランブ 18cm, 目標空気量 4.5% とするフライアッシュ置換率 0% を基本調合として, 単位水量一定で, セメントに対してフライアッシュを内割り, または外割りで 20% 置換した¹⁾。セメントは普通ポルトランドセメントを, 細骨材は川砂(表乾密度 2.57g/cm³, 吸水率 1.48%), 粗骨材

表-1 調合

試験体	調 合										スランプ (cm)	空気量 (%)
	W/C	W/C+F	F/C+F	s/a	かさ容積 (m³/m²)	単位量 (kg/m³)						
	(%)	(%)	(%)	(%)		W	C	FA	S	G		
F0	55	55	0	45.5	0.61	184	335	0	778	975	17.0	5.5
F2-I (内割)	69	55	20	44.9	0.61	184	268	67	758	975	20.0	5.4
F2-O (外割)	55	44	20	42.4	0.61	184	335	84	684	975	19.0	4.3

備考) 混和剤: AE減水剤を使用

は碎石(表乾密度 2.69g/cm³, 吸水率 0.56%)を, 混和剤は AE 減水剤を使用した。フライアッシュは 種(密度 2.29g/cm³)を使用した。拘束ひび割れ試験の埋設鉄筋には横ふし異形棒鋼 D10(降伏点応力度は 382 N/mm²)を用いた。

2.2 試験体の形状と種類

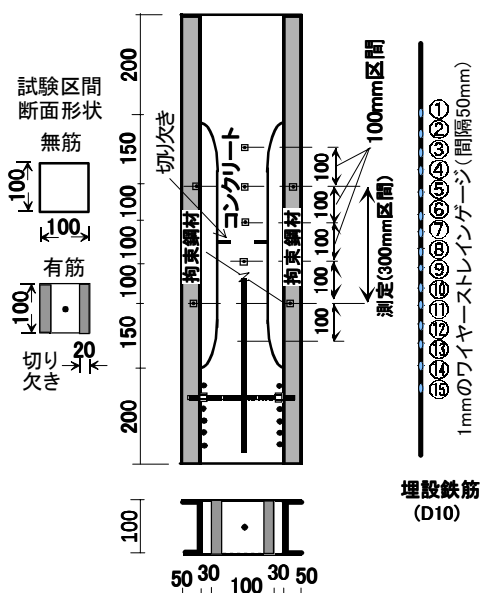
拘束ひび割れ試験体の形状を図 - 1 に, その種類を表 - 2 に示す。ただし, 鉄筋を埋設した試験体(有筋試験体)はひび割れ発生位置を試験体中央に指定するため, 同位置の両側面に厚さ 2mm のプラスチック板を深さ 20mm まで埋設し, 切り欠き(スリット)を設けた。拘束ひび割れ試験の実験変数は埋設鉄筋の有無とコンクリート種類(3 種類)で, 試験体は各条件に対して 2 体製作した。拘束鋼材は市販の軽みぞ形鋼(呼び名 1173, 100 × 40 × 40mm, 厚さ 2.3mm, 断面積は 3.97cm²)を用

*1 大阪大学大学院工学研究科 建築工学専攻 助手 (正会員)

*2 大阪大学大学院工学研究科 建築工学専攻 教授 工博(正会員)

*3 大阪大学大学院工学研究科 建築工学専攻 (正会員)

*4 大阪大学大学院工学研究科 建築工学専攻 (正会員)



図－1 拘束ひび割れ試験体の形状

表－2 拘束ひび割れ試験体

試験体記号	フライアッシュ混入率(%)	埋設鉄筋の有無
F0	0	無
RF0		有
F2-I	20%(内割)	無
RF2-I		有
F2-O	20%(外割)	無
RF2-O		有

いた。拘束鋼材比は7.9%である。乾燥収縮試験体，圧縮クリープ試験体ともに長さ500mm×幅100mm×厚さ100mmの角柱試験体で，各2体製作した。

2.3 実験方法及び測定方法

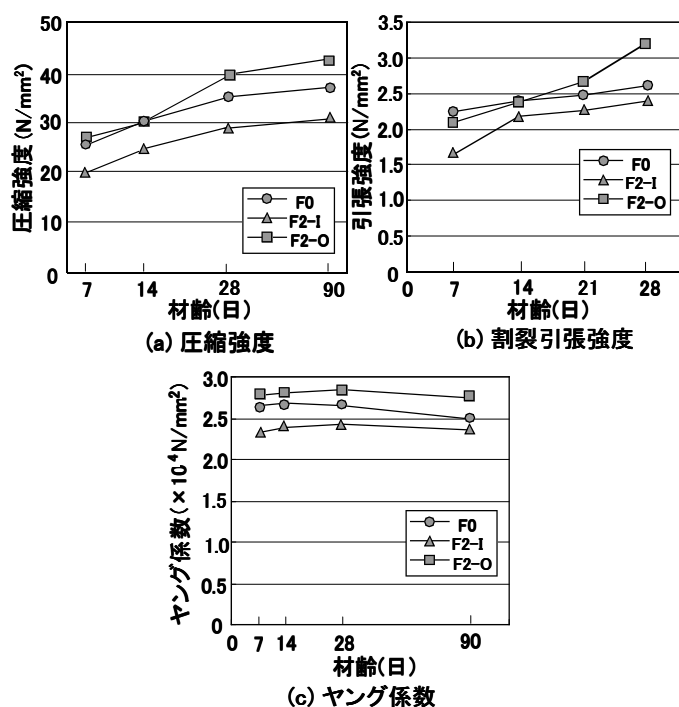
試験は 20 ± 1 ，R.H. 60 ± 5 %の恒温・恒湿室で実施した。拘束ひび割れ試験体の製作及び試験は「JIS 原案のコンクリートの乾燥収縮ひび割れ試験方法(案)」に準拠して行った。各試験体ともコンクリート打設後，湿潤養生を行い，材齢7日に型枠を脱型し，以後は気中養生を行った。測定は検長300mmのコンタクトストレインゲージ(C.S.G.)を用いて，打設面・底面の試験体中央のコンクリートとフランジ部(4箇所)の拘束鋼材ひずみを，またひび割れ幅測定のため検長100mmで試験体中央部軸方向3区間(有筋)または5区間(無筋)の変位を測定した。また箔ゲージ(F.S.G.)を埋設鉄筋および拘束鋼材に貼付してこれらのひ

ずみを4時間毎のインターバル設定で計測した。コンタクトポイント，箔ゲージの貼付位置を前掲の図-1に示す。箔ゲージの埋設鉄筋への貼付間隔は，3ふし(ほぼ5cm)間隔である。乾燥収縮およびクリープ試験ではC.S.G.を用いて，検長300mmで試験体中央4側面を測定した。乾燥収縮試験は材齢7日から，圧縮クリープ試験(持続圧縮応力: 6N/mm^2)は材齢14日から行った。なお，コンクリートの力学的性質を調べた円柱供試体($\phi 100 \times 200\text{mm}$)も拘束ひび割れ試験体と同じ養生条件下においた。

3 実験結果及び考察

3.1 コンクリートの力学的性質

コンクリートの力学的性質を図-2に示す。圧縮強度は7日，14日，28日および91日に試験を行い，割裂引張試験は，ひび割れが若材齢で生じる可能性が高いので7日，14日，21日および28日に行った。フライアッシュ外割り置換率20%のF2-Oが圧縮強度，割裂引張強度およびヤング係数ともにF0，F2-Iよりも大きく，内割り置換率20%のF2-Iがいずれも最も小さい。



図－2 コンクリートの力学的性質

3.2 乾燥収縮及び単位クリープひずみ

乾燥収縮ひずみおよび単位クリープひずみの経時変化を図 - 3 に示す。乾燥収縮ひずみは、フライアッシュを置換した試験体 F2-O と F2-I は F0 に比べて小さく、両者はほぼ等しいが時間経過と共に F2-I の方が F2-O より少し大きな収縮量を示している。単位クリープひずみは F2-I, F0, F2-O の順に小さくなった。

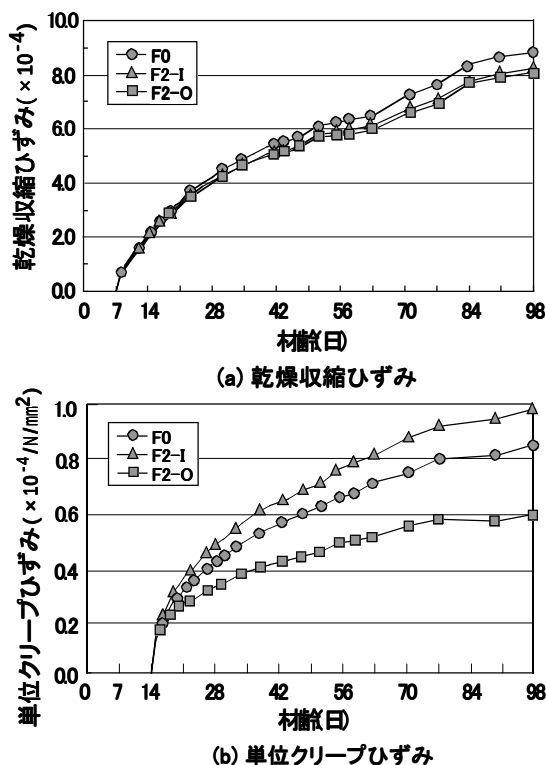


図-3 乾燥収縮ひずみ及び単位クリープひずみ

3.3 拘束ひび割れ試験

(1) 拘束試験体の拘束鋼材及びコンクリートひずみの経時変化

無筋の拘束試験体のコンクリートひずみと拘束鋼材ひずみの経時変化を図 - 4 に示す。図中の計算値は逐次計算²⁾により求めたコンクリートひずみと拘束鋼材ひずみの値である。拘束区間の拘束鋼材とコンクリートの変形は等しいが、コンクリートひずみは拘束鋼材ひずみより若干小さくなっている。これはコンクリートひずみの測定区間の断面がその両端の断面に比べて小さいことから測定区間の引張応力が大きくなり、そのため収縮ひずみは小さくなることによる²⁾。実測値と計算値

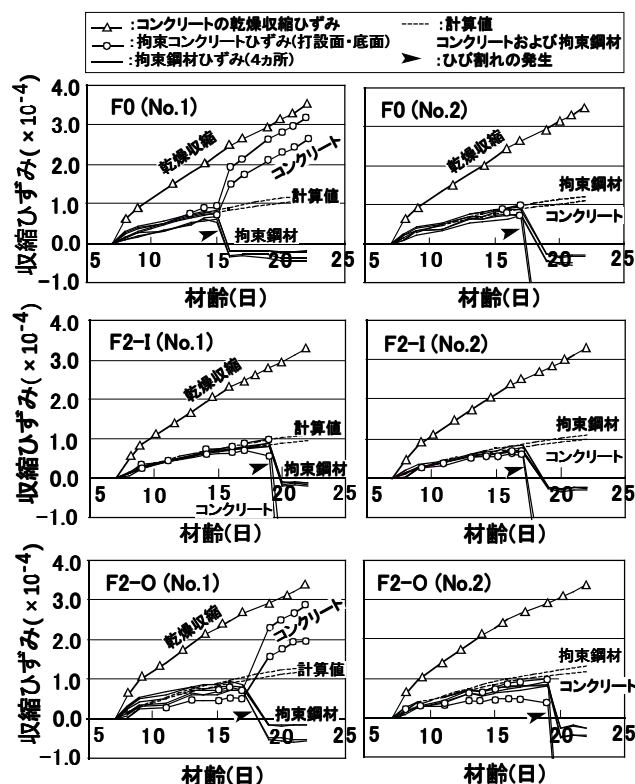


図-4 拘束試験体ひずみの経時変化

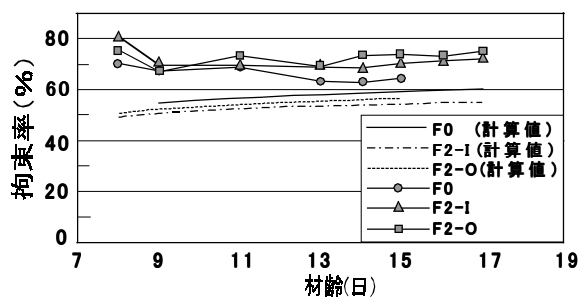


図-5 拘束率の経時変化

表-3 収縮拘束応力(無筋試験体)

無筋試験体	(N/mm ²)			
	材齢(日)	拘束応力 割裂引張強度	材齢(日)	拘束応力 割裂引張強度
F0	15	1.12 / 2.40 (0.47)	17	1.38 / 2.44 (0.57)
F2-I	19	1.40 / 2.26 (0.62)	17	1.22 / 2.18 (0.56)
F2-O	17	1.33 / 2.38 (0.56)	19	1.50 / 2.67 (0.56)

はほぼ一致している。図 - 5 に拘束率(拘束引張ひずみ / 乾燥収縮ひずみ)³⁾の経時変化を示す。拘束率は、材齢 9 日以降、70%前後で変化は少ない。図には逐次計算結果も示している。計算値は 50 ~ 60%と実測値より小さいが経時変化は同様に小さい。

(2) 収縮拘束応力

表 - 3 に拘束コンクリートのひび割れ発生 1 ~ 2 日前の収縮拘束応力と割裂引張強度を示す。収縮拘束応力は拘束鋼材のひずみ測定値(C.S.G による)を用いて求めた。ひび割れ発生時の収縮拘束応力は割裂引張強度の 50 ~ 60% で既往の実験結果⁵⁾ とほぼ同様である。

図 - 6 にコンクリートの拘束応力(引張応力度)の経時変化を示す。図には逐次計算結果も示している。ひび割れ発生前の拘束応力の計算値は $1.5 \sim 2.2 \text{ N/mm}^2$ で実測値より大きい。これは解析に用いたクリープ係数は本実験で得た圧縮持続応力 6 N/mm^2 時の値で、ひび割れ発生前の引張高応力下のクリープに比べて小さく、すなわち応力緩和を小さく見積もっていることによるものと考えられる。

(3) ひび割れ発生材齢

無筋拘束試験体のひび割れはいずれも貫通ひび割れで、4 体が中央 300mm の測定区間に、2 体

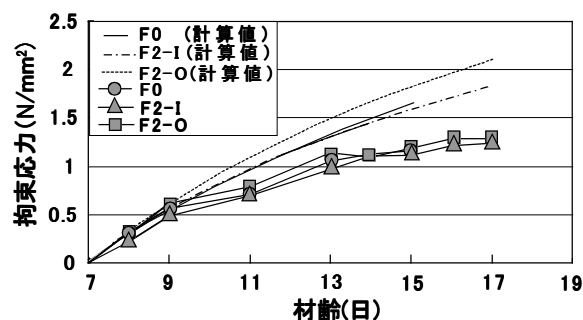


図-6 拘束応力の経時変化

表-4 ひび割れ発生材齢(日)

		試験体 No.1		試験体 No.2	
		打設面	底面	打設面	底面
無筋	F0	16		19	
	F2-I	20		19	
	F2-O	19		20	
有筋	RF0	15	13	13	9
	RF2-I	11	20	15	13
	RF2-O	13	9	20	9

が検長外に発生した。有筋拘束試験体のひび割れは RF2-O(No.2)を除いて、まず中央切り欠き位置の打設面、底面のいずれかに発生し、数日後に貫通に到った。RF2-O(No.2)はまず切り欠き位置底面に発生し、その後切り欠き位置から離れた 2 箇所

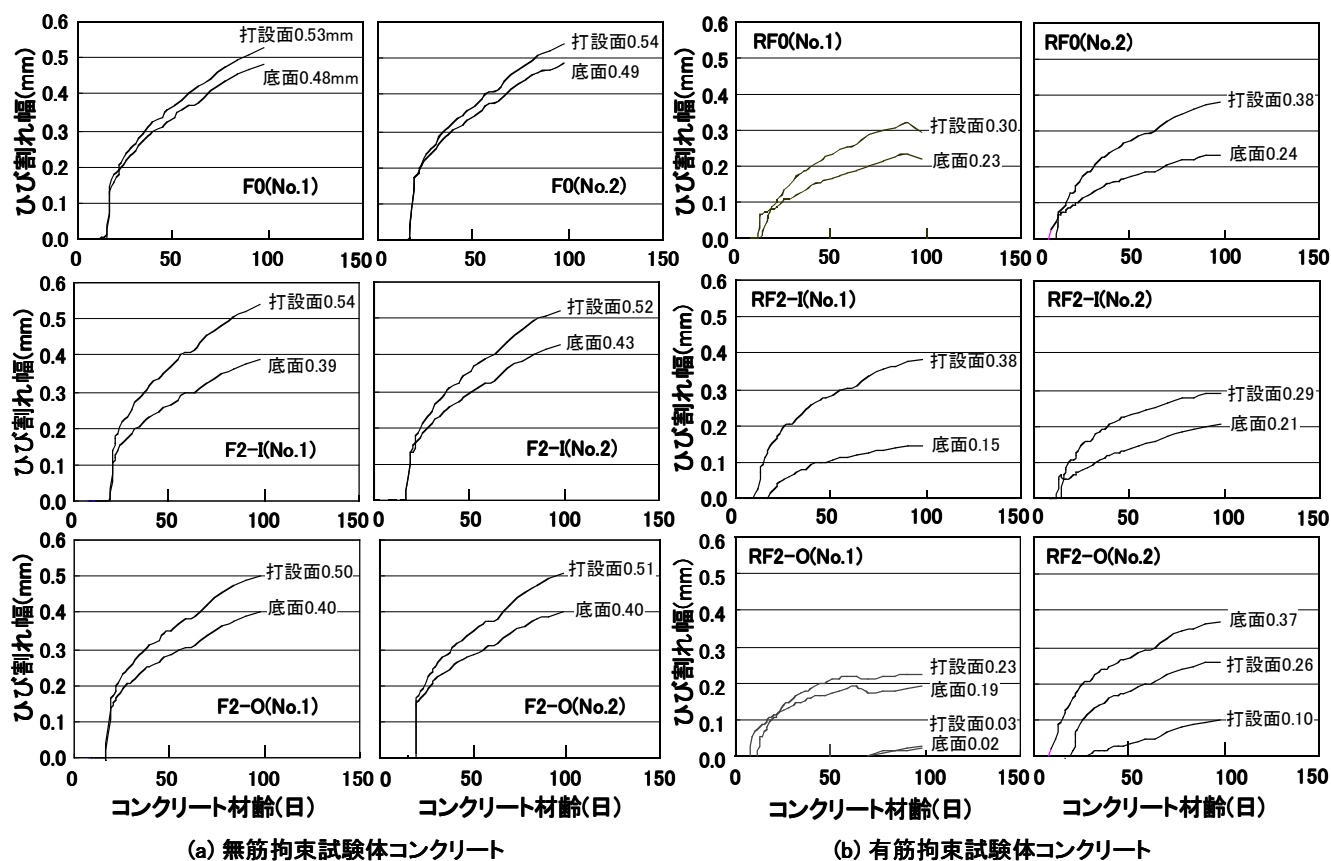


図-7 ひび割れ幅の経時変化

表-5 ひび割れ幅(発生時,材齢98日)

		試験体 No.1			試験体 No.2		
		打設面	底面	平均値	打設面	底面	平均値
F0	発生時	0.13	0.12	0.13	0.17	0.17	0.17
	98日	0.53	0.48	0.50	0.54	0.49	0.51
F2-I	発生時	0.14	0.11	0.12	0.13	0.12	0.13
	98日	0.54	0.39	0.46	0.52	0.43	0.47
F2-O	発生時	0.16	0.14	0.15	0.16	0.15	0.15
	98日	0.50	0.40	0.45	0.51	0.40	0.45
RF0		0.30	0.23	0.26	0.38	0.24	0.31
RF2-I	98日	0.38	0.15	0.26	0.29	0.21	0.25
RF2-O		0.23 (0.03)	0.19 (0.02)	0.23	0.26 (0.10)	0.37	0.36

()は2本目のひび割れ幅

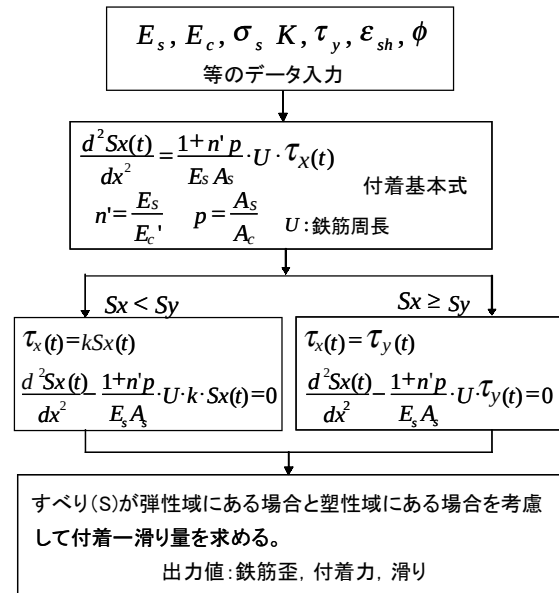
において打設面に発生した。これらのひび割れは貫通していない。RF2-O(No.1)には、材齢 63 日に新たなひび割れが打設面と底面にそれぞれ 1 本発生した。ひび割れ発生材齢を表 - 4 に示す。無筋試験体はコンクリート材齢 16 ~ 19 日に、有筋試験体は 9 ~ 13 日に最初のひび割れが発生している。有筋試験体は切り欠きがあり、埋設鉄筋も拘束材として動くため、無筋試験体に比べてひび割れの発生が 1 週間程早くなっている。F2-O は乾燥収縮は小さく、割裂引張強度は大きいにもかかわらずひび割れ発生日に大きな差が無いのは、図 - 3 に示したように F2-O のクリープが小さく応力緩和が小さかったことによると考えられる。また、割裂引張強度が最も小さい試験体 F2-I のひび割れ発生材齢が F0 より若干遅くなっているのはクリープによる応力緩和のためであると考えられる。

(4) ひび割れ幅

図 - 7 にひび割れ幅の経時変化を、表 - 5 にひび割れ発生時と材齢 98 日におけるひび割れ幅を示す。ひび割れが分散した RF-O(No.2)を除き、無筋試験体、有筋試験体ともに打設面のひび割れ幅が大きい。これはコンクリートの乾燥収縮が打設面の方が底面よりも大きいことによる。無筋拘束試験体のひび割れ幅は F0, F2-I, F2-O の順に大きく、コンクリートの乾燥収縮の大小に対応している。有筋拘束試験体においても同様な傾向があり、フライアッシュを内割りあるいは外割りで混入してもひび割れ幅は混入しない場合よりも大きくはならない。

(5) 鉄筋ひずみ分布

埋設鉄筋のひずみ分布を付着解析⁴⁾によって求



E_s, E_c : 鉄筋及びコンクリートのヤング係数
 σ_s : 鉄筋引張応力
 K : 付着剛性, τ_y : 付着強度, S : すべり
 ε_{sh} : 乾燥収縮ひずみ, ϕ : クリーブ係数

図-8 付着解析フローチャート

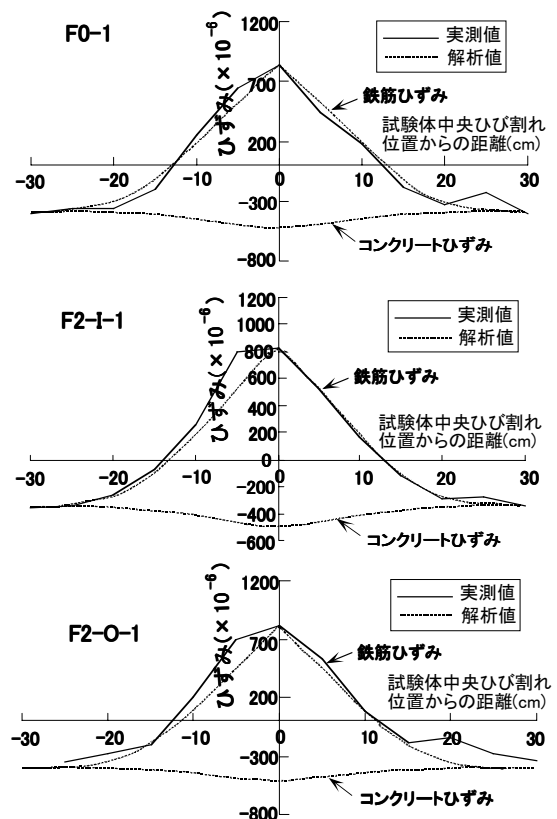


図-9 鉄筋とコンクリートのひずみ分布(材齢63日)

めた。そのフローチャートを図 - 8 に示す。コンクリートのヤング係数、乾燥収縮、クリープは本実験から得られた諸数値を、付着剛性 K 、付着強

度 τ_y は持続荷重を考慮した提案式⁶⁾を用いた。
また、ひび割れ位置の鉄筋引張力は鉄筋ひずみ実測値から算出した値を用いた。図 - 9 に鉄筋とコンクリートのひずみ分布を示す。同図の実線は鉄筋ひずみの実測値であり、破線は付着解析による鉄筋ひずみとコンクリートひずみの解析値である。鉄筋ひずみの解析値は実測値とよく一致している。

(6) ひび割れ幅の算定

ひび割れ幅は鉄筋のコンクリートからの抜け出し量あるいはひび割れ位置における鉄筋のすべり量であるので、図 - 9 における鉄筋ひずみ分布とコンクリートひずみ分布で囲まれた面積がひび割れ幅に相当する⁶⁾。同図の実測値及び解析値のひずみ分布から求めた材齢 63 日におけるひび割れ幅をそれぞれ計算値及び解析値として表 - 6 に示す。同表にはひび割れ幅実測値も合わせて示している。なお、実測値の鉄筋ひずみ分布に対応するコンクリートひずみ分布は鉄筋ひずみからコンクリート応力を計算して算出している。

ひび割れ幅の計算値、解析値ともに実験値より大きめではあるが、いずれも F0, F2-I, F2-O の順に大きく、フライアッシュを混入した方がひび割れ幅は小さくなっている。

4. まとめ

本実験結果をまとめると次のようになる。

- (1) フライアッシュを混入したコンクリートの乾燥収縮は無混入コンクリートよりもわずかながら小さかった。
- (2) フライアッシュを混入したコンクリートのひび割れ発生日は、19～20 日で、無混入コンクリートよりも数日遅かった。
- (3) 拘束ひび割れ試験体のひび割れ幅は、フライアッシュを外割りで混入したコンクリートが最も小さく、次いで内割りで混入したコンクリート、無混入の順になった。
- (4) 付着解析による埋設鉄筋ひずみ分布の解析値は実測値とほぼ一致した。その結果を用いて算定したひび割れ幅は実測値より大きめであったが、

表-6 実測値と解析値及び計算値との比較

—材齢63日(有筋試験体)— (mm)

試験体種類		ひび割れ幅 実測値		ひび割れ幅 解析値	ひび割れ幅 計算値
RF0	No.1	打設面	0.26	0.27	0.25
		底面	0.18		
	No.2	打設面	0.30	0.34	0.27
		底面	0.19		
RF2-I	No.1	打設面	0.31	0.26	0.25
		底面	0.10		
	No.2	打設面	0.25	0.26	0.23
		底面	0.16		
RF2-O	No.1	打設面	0.22	0.24	0.23
		底面	0.19		
	No.2	打設面	0.21	0.24	0.24
		底面	0.30		

コンクリート間のひび割れ幅の大小関係は捉えている。

以上まとめると、フライアッシュを外割り 20%、内割り 20% 混入したコンクリートの乾燥収縮ひび割れ性能は、無混入コンクリートと同等またはそれ以上と言える。

謝辞 本研究は日本建築学会フライアッシュ研究小委員会基本物性ワーキングの研究の一部として行ったものである。なお、コンクリートの調合、練り混ぜについて、(株)ポゾリス物産阿合延明氏の協力を得た。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本建築学会：フライアッシュを使用するコンクリートの調合設計・施工指針(案)・同解説, 1992.2
- 2) 鈴木計夫, 大野義照, 中川隆夫, 太田寛：コンクリートの収縮拘束ひび割れ試験, 第 3 回コンクリート工学年次講演会講演論文集, pp. 25～28, 1981
- 3) 仕入, 青柳, 川瀬：コン+クリートのひび割れ実験方法(案) - 乾燥収縮ひび割れ・温度ひび割れ -, コンクリート工学, Vol. 23, No. 3, pp. 40-53, 1985, 3
- 4) 鈴木計夫, 大野義照, 李振宝, 太田崇士：持続荷重下における異型鉄筋の付着応力～すべり関係, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.14, No.2, pp.51-56, 1992
- 5) 劉 勇, 大野義照, 中川隆夫, 林田都芳：コンクリートの収縮ひびわれ幅に及ぼす鉄筋量の影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 23, No.2, pp.751-756, 2001.7
- 6) 劉 勇, 大野義照, 中川隆夫：鉄筋コンクリート部材の乾燥収縮ひびわれ幅算定法の検討, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 25, No.1, pp.437-442, 2003.7