

# 論文 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

白井 裕規\*1・下村 匠\*2・田中 泰司\*3

**要旨:**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について一軸拘束試験により検討を行った。JIS規格に基づき試験を行った場合には、普通コンクリートに比べてひび割れ抵抗性が小さかった。収縮特性、応力緩和特性、ひび割れ発生条件に着目し、検討を行ったところ、実構造物のように拘束率の低い場合や十分に養生を行った場合には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になることが明らかとなった。

**キーワード:**ひび割れ抵抗性, 収縮特性, 応力緩和特性, ひび割れ発生条件

## 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べきである。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。

## 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、自由収縮試験体の概要を図-2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, 1104mm<sup>2</sup>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 <sup>2</sup> )			
					1104	727	517		
14日養生			○			○			
低拘束	L	○							○
28日養生				○		○			
28日養生-H	H			○	○				

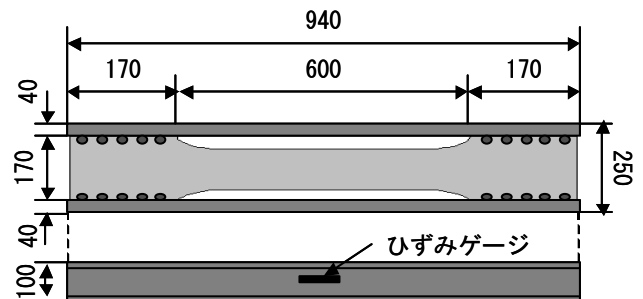


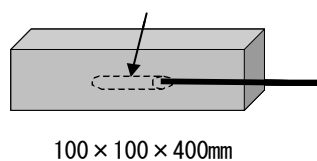
図-1 一軸拘束試験体の概要

\*1 長岡技術科学大学大学院 工学研究科修士課程建設工学専攻 (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)

### 埋め込み型ひずみゲージ



100×100×400mm

図-2 自由収縮試験体の概要

表-2 使用骨材の物性値

種類	品質
細骨材	表乾密度2.65g/cm <sup>3</sup> 、吸水率1.76% 粗粒率2.58
粗骨材	最大寸法25mm、表乾密度2.71g/cm <sup>3</sup> 吸水率1.2%、実績率58.5%

表-3 使用材料の物性値

名称	備考
普通ポルトランドセメント	密度3.16g/cm <sup>3</sup> 比表面積3300cm <sup>2</sup> /g
フライアッシュ	Ⅱ種相当 密度2.3g/cm <sup>3</sup> 比表面積3780cm <sup>2</sup> /g
高炉セメントB種	密度3.04g/cm <sup>3</sup> 比表面積3710cm <sup>2</sup> /g
AE減水剤	リゲニンスルホン酸化合物とポリオール複合体
AE剤	マイクロエア785

### 3. 使用材料および配合条件

本実験で使用した骨材および粉体の物性値を表-2、3に示す。また、コンクリートの示方配合を表-4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でそれぞれ 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-3 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-4 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<sup>1)</sup>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-5 には封緘養生 28 日の試験結果を示した。図-3～図-5 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りで 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。

実構造物の多くは、本試験体に比べて V/S (体積/表面積比) が大きく乾湿の影響もあるので、乾燥速度も緩慢となる。そのため、養生を 7 日とする一軸拘束収縮試験ではフライアッシュコンクリートの収縮ひび割れ抵抗性を過小評価する恐れがある。

次に図-4 において拘束鋼材量について着目すると、普通コンクリートの場合は拘束鋼材量によらず、ひび割れ発生日数はほぼ同じになった。一方、FA25 配合では JIS 規格の鋼材量の場合にはひび割れ発生日数が短いものの、拘束鋼材量が小さい場合にはひび割れ発生日数が長くなり、普通コンクリートと同程度となった。また、封緘養生 28 日の場合には、拘束鋼材量を増加させてもひび割れ発生日数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ると差し支えないといえる。

表-4 示方配合

配合名	スランプ (cm)	水セメント比	水結合材比	空気量 (%)	細骨材率	FA置換率 (内割り) (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )						
		W/C	W/B		s/a		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

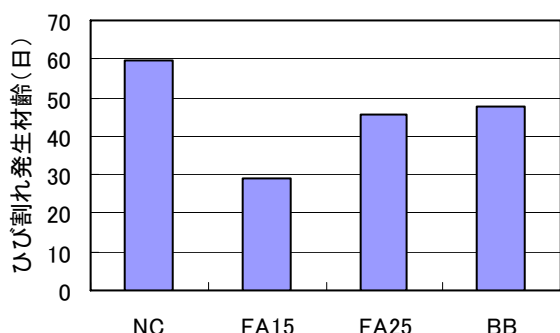


図-3 ひび割れ発生材齢の比較(封緘養生 14 日)

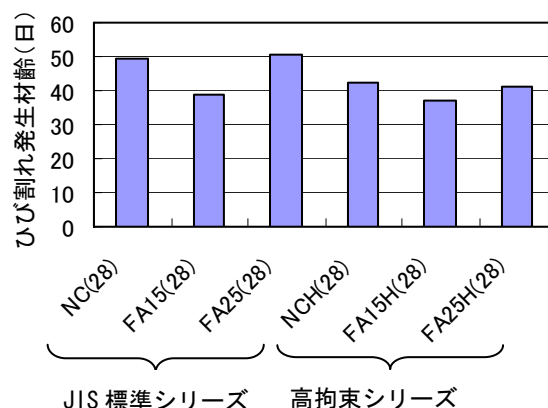
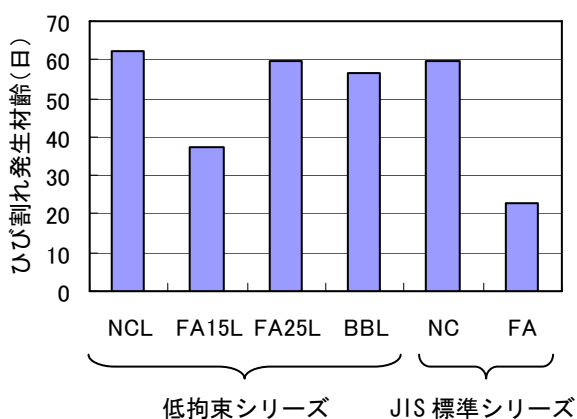


図-5 ひび割れ発生材齢の比較(封緘養生 28 日)



\* JIS標準シリーズは既往の研究結果<sup>1)</sup>

図-4 ひび割れ発生材齢の比較(封緘養生 7 日)

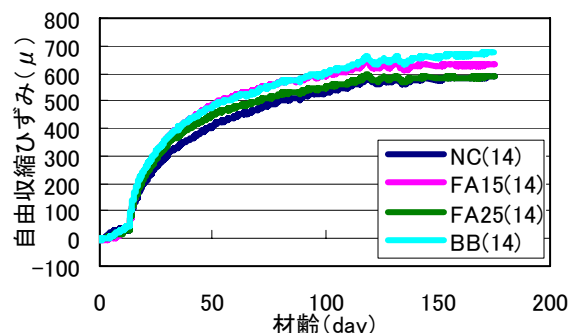


図-6 養生 14 日シリーズの自由収縮試験結果

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。

#### 4.2 収縮特性

各シリーズの自由収縮試験の結果を図-6~図-8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。このような収縮量の違いは、ひび割れ抵抗性の相違の一因となっている。

次にNC、FA15、FA25配合の乾燥収縮量を図-9~図-11に示す。NC配合では養生7日の収縮量が大きくなり、養生14日、28日ではほぼ同じ収縮量になった。

一方、フライアッシュを混入したFA15、FA25では養生日数が長くなるにつれて収縮量が小さくなっていることがわかる。これは、フライアッシュのポズラン反応によって乾燥収縮量が減少する機構が存在するものの、ポズラン反応は長期にわたってゆっくりと生じるためと考えられる。

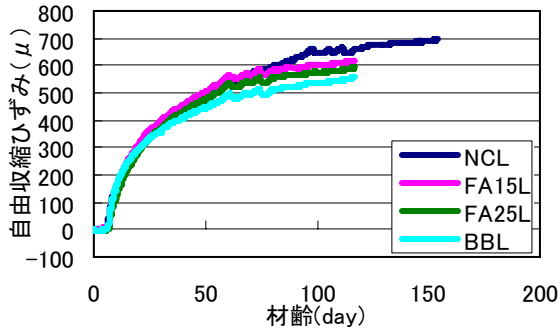


図-7 養生7日シリーズの自由収縮試験結果

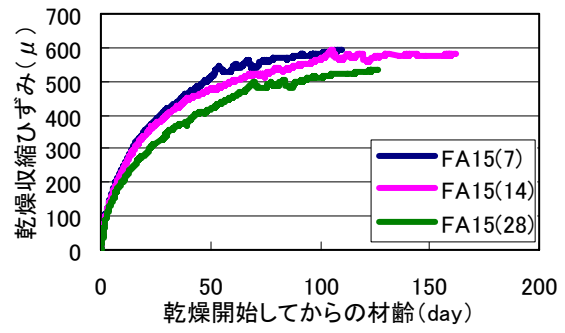


図-10 FA15 配合の乾燥収縮量

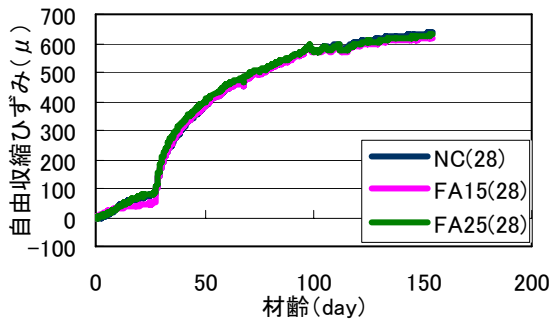


図-8 養生28日シリーズの自由収縮試験結果

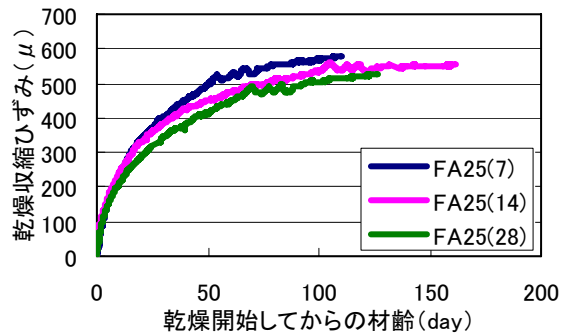


図-11 FA25 配合の収縮量

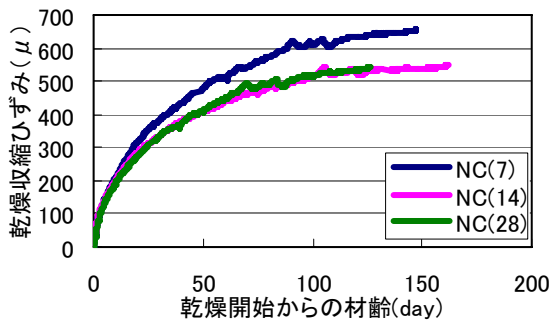


図-9 NC 配合の乾燥収縮量

### 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、 $\sigma$ ：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<sup>2</sup>)、 $A_s$ ：拘束鋼材の断面積 (mm<sup>2</sup>)、 $A_c$ ：コンクリートの断面積 (mm<sup>2</sup>)、 $E_s$ ：拘束鋼材の弾性係数 (N/mm<sup>2</sup>)、 $\varepsilon$ ：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、 $\varepsilon_{eff}$ ：有効ひずみ（引張を正とする）、 $\varepsilon_{sh}$ ：自由収縮ひずみ（収縮を正とする）、 $\varepsilon_r$ ：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-12～図-15 に各シリーズの応力-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-16 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。

一方、図-12 の養生 14 日シリーズの NC 配合に着目すると、初期の有効弾性係数はフライアッシュコンクリートに比べて大きいものの、応力が大きくなると傾きが徐々に小さくなっていることがわかる。他の配合はほぼ直線のまま破断に至るので NC 配合は他の配合と同程度まで応力緩和が起こっていることになる。このような応力緩和は、乾燥収縮ひずみが収束に向かうと同時に拘束

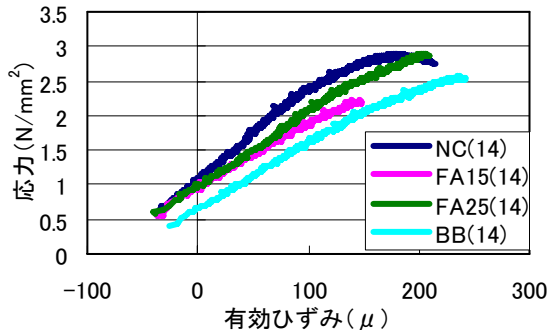


図-12 14日養生シリーズの応力-有効ひずみ関係

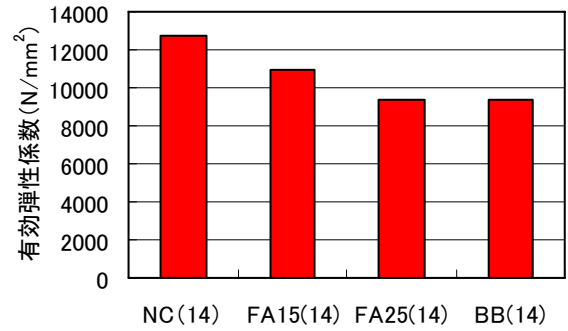


図-16 14日養生シリーズの有効弾性係数

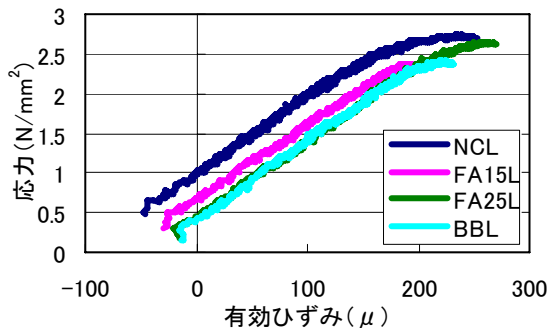


図-13 低拘束（養生7日）シリーズの応力-有効ひずみ関係

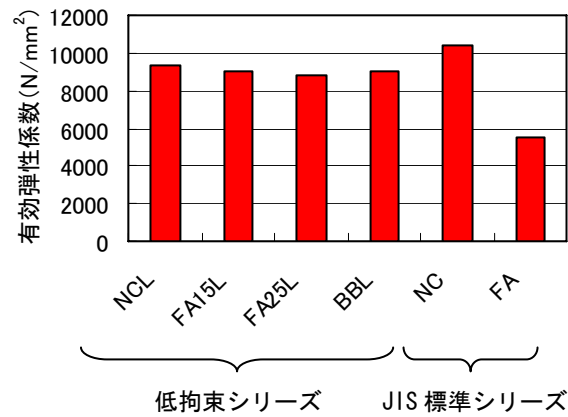


図-17 7日養生シリーズの有効弾性係数

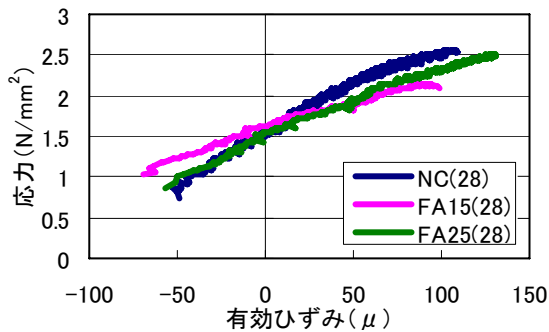


図-14 養生28日シリーズの応力-有効ひずみ関係

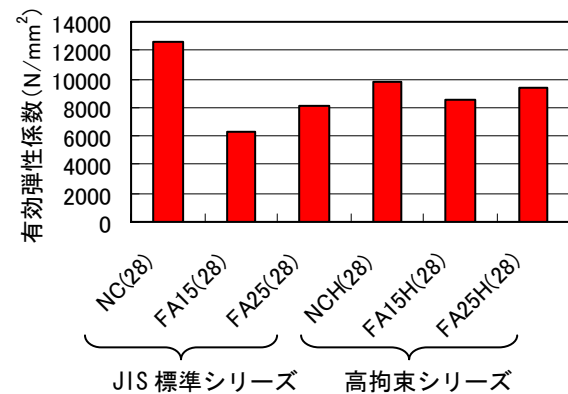


図-18 28日養生シリーズの有効弾性係数

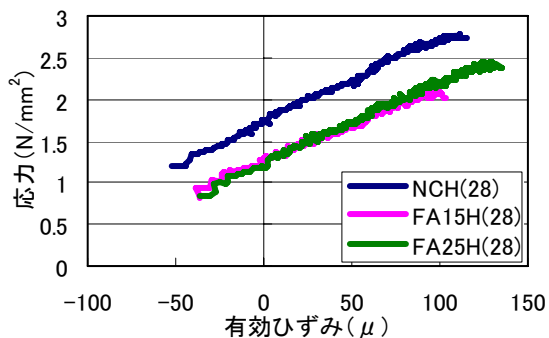


図-15 養生28日（高拘束）シリーズの応力-有効ひずみ関係

応力が引張強度付近に達したときに起こると考えられる。図-13を見ると低拘束シリーズではFA15配合を除くフライアッシュコンクリートや高炉コンクリートでも同様の応力緩和が見られた。これは、鉄筋量が少ない分だけ同じ収縮量でもコンクリートに生じる拘束力が小さくなり、ひび割れ発生前に乾燥収縮が収束しはじめたためと説明できる。以上の検討から、拘束鋼材比7.27%で養生14日の場合以外は、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のほうが応力緩和と特性に優れているといえる。

表-5 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 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		有効 ひずみ
			N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	day	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>		μ
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

#### 4.4 ひび割れ発生条件

表-5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日以降における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。

封緘養生28日の高拘束シリーズでは、FA15, FA25配合はNC配合に比べてひび割れ時の応力が小さかった。しかし、ひび割れ発生材齢の差はそれほど大きくなかった。これは普通コンクリートでは有効弾性係数が大きく、フライアッシュコンクリートよりも応力導入スピードが大きかったためである。

#### 5. 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コンクリートの自由収縮試験を行い、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と普通コンクリートの乾燥収縮量における大小関係は養生日数によって異なる結果となった。今回の実験では、養生日数が7日の場合にはフライアッシュのほうが、養生日数が14日の場合には普通コンクリートのほうが収縮量が小さくなった。また養生日数28日の場合にはほぼ同程度となった。
- 3) 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。
- 4) 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。

#### 謝辞

本研究は土木学会フライアッシュの有効活用研究委員会の研究の一環として行ったもので、実験遂行にあたりご助言を得ました。付記して謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 白井裕規, 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
- 2) 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), 2003.3