

論文

[1042] 分級フライアッシュを混入した高強度コンクリートの諸特性

正会員○石井光裕 (四国総合研究所)

浮田和明 (四国総合研究所)

正会員 東 邦和 (奥村組筑波研究所)

正会員 山本和夫 (奥村組筑波研究所)

1. はじめに

分級フライアッシュは、現行のフライアッシュを分級して得た微粒分であり、これまでに一般的なコンクリートに用いた場合の品質改良効果が明らかになっている [1]。

本研究では、水結合材比 25~30% の高強度コンクリートに用いた場合の諸特性の改善性能をシリカフェーム、高炉スラグ微粉末の場合と比較した。また、生コンプラントでの実機混練試験および実大供試体により施工性と品質改善効果を確認した。

2. 実験概要

2.1 使用材料

- a. セメント：普通ポルトランドセメント、比重 3.16 比表面積 3190 cm<sup>2</sup>/g
- b. 粗骨材：碎石、Gmax20mm、FM 6.57 (6.62)、比重 2.67 (2.66)、吸水率 0.67 (0.37)%、笠間産  
細骨材：川砂、FM 2.31 (2.71)、比重 2.53 (2.54)、吸水率 2.11 (2.43)%、鬼怒川産  
( ) 内はシリーズ II

c. 混和材：

分級フライアッシュ、シリカフェーム、高炉スラグ微粉末を使用した。混和材の性質を表-1 に示す。

d. 混和剤：次の2種類の高性能減水剤を用いた。

- ①アニオン型特殊活性剤 (A混和剤)
- ②変性リグニン、アルキルスルホン酸、活性持続ポリマーの複合物 (B混和剤)

それぞれ空気量調整剤を併用した。

2.2 配合および実験方法

コンクリートの配合条件は、スランブ 22 ± 2cm、空気量 3 ± 1%、水結合材比を 25、27.5、30% とした。配合を表-2 に示す。

混練は遊星パン型ミキサー (50ℓ練) をシリーズ I に、強制パン型ミキサー (50ℓ練) をシリーズ II に用いた。予備試験を行い最も大きなスランブが得られた次の方法で混練した。

表-1 混和材の性質

混和材	比重	比表面積 (cm <sup>2</sup> /g)	化学成分 (%)							
			SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	水分	ig.1	
分級フライアッシュ	FA5	2.52	10580	55.2	23.0	5.4	9.2	4.8	0.4	2.0
	FA10	2.42	7670	55.3	28.4	4.8	4.1	1.1	0.2	4.2
シリカフェーム SF 顆粒型	2.24	1.45 × 10 <sup>6</sup>	92.8	-	-	-	-	-	-	-
高炉スラグ微粉末	BS1	2.90	6060	34.0	14.0	0.2	42.4	6.7	-	-
	BS2	2.91	8520	34.0	13.7	0.5	41.6	6.6	-	-

FA5、FA10：それぞれ最大粒径 5 μm、10 μm を目標に気流分級したもの。

表-2 コンクリートの配合

No	水結合材比 %	s / a %	混和材 置換率 %	単位量 kg/m <sup>3</sup>				
				水	セメント	混和材		
1	25.0	38.0	ブレン	170	680	-		
2	27.5	38.5		168	609	-		
3	30.0	39.0		165	550	-		
4	25.0	38.0	SF	15	170	578	102	
5	27.5	38.5		FA5	10	168	548	61
6	27.5	38.5		FA10	15	168	518	91
7	30.0	39.0		15	165	468	83	
8	25.0	38.0		BS	30	170	476	204
9	27.5	38.5			30	168	426	183
10	27.5	38.5	50		168	305	305	
11	27.5	38.5	FA10 + SF		10	168	487	61
12	27.5	38.5	FA10 + BS	10	168	365	61	
				30			183	

1/2 細骨材+セメント+混和材→空練 (15秒) →  
 1/2 細骨材→空練 (15秒) →水+混和剤 →  
 混練 (90秒) →粗骨材→混練 (60秒) →排出  
 測定項目を表-3に示す。

表-3 測定項目

測定項目	測定方法
スランプ	JIS A 1101
空気量	JIS A 1128
ボックスフロー	流動化コンクリート施工指針案 (建築学会)
圧縮強度	JIS A 1128
静弾性係数	JIS原案 コンプレックス法
乾燥収縮	JIS A 1129 供試体10×10×40cm コンタクトゲージ法

3. 実験結果および考察

3.1 フレッシュコンクリートの特性

(1) 高性能減水剤混入率

セメント単味でスランプを一定にした場合の単位水量と高性能減水剤の混入率の関係を図-1に示す。混入率1%の差で単位水量は20kg程度異なっている。減水剤はA混和剤を使用した。

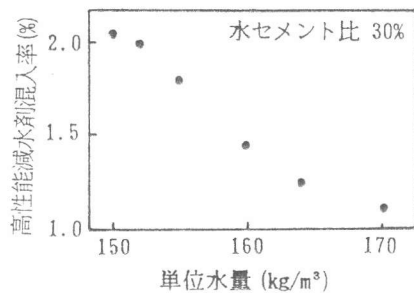


図-1 単位水量と高性能減水剤混入率

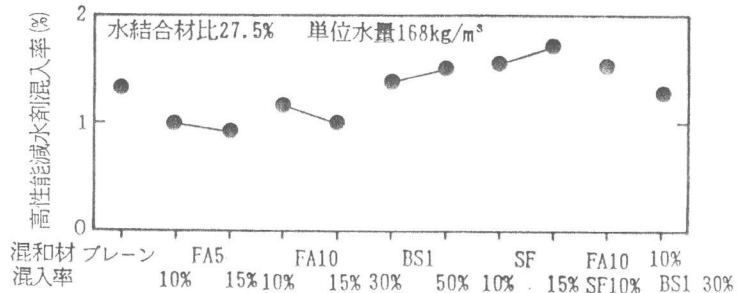


図-2 高性能減水剤混入率 (シリーズ I)

水結合材比と単位水量を一定とした場合に、同一スランプにするための高性能減水剤混入率の比較を図-2に示す。無混入の配合と比べた高性能減水剤の混入率は、分級フライアッシュでは少なく、高炉スラグ微粉末では同程度、シリカフェームでは多い結果となった。また、分級フライアッシュでは、混入率の多いほうが高性能減水剤が少なくなっており、減水性が大きく流動性に寄与していることを示している。

(2) スランプとフロー値

セメント単味 (プレーン、水結合材比30%) で高性能減水剤の混入率を変えて得たスランプ値とフロー値 (拡がりの直径) の関係を図-3に、フロー値とフロー速度の関係を図-4に示す。ここでフロー速度はスランプフローをフロー時間で割ったものであり、フロー時間はコーンの引き上げ開始から流動が停止するまでの時間である。フロー値40cm付近のコンクリートにおいて

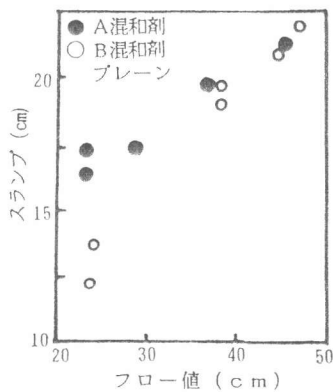


図-3 フロー値とスランプ

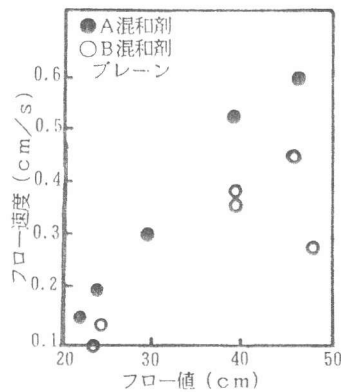


図-4 フロー値とフロー速度

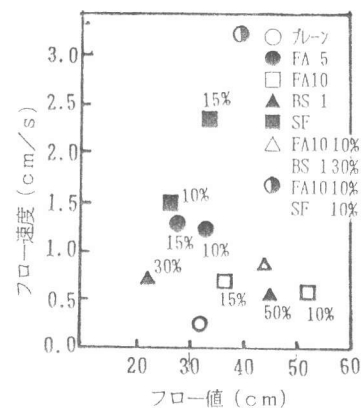


図-5 混和材種とフロー速度

2種類の高性能減水剤によるスランプの差は少ないが(図-3)、フロー速度を比較すると同一のフロー値に対しても違いが大きく表われている(図-4)。この差は粘性の違いによるものである。混和材を混入したコンクリートのフロー値とフロー速度を図-5に示す(A混和剤使用)。同一フロー値のコンクリートにおいてもフロー速度は大きく異なり、混和材の混入により大きなフロー速度となる。特にシリカフェームと分級フライアッシュを混入した場合のフロー速度は大きい値を示した。[2][3]

### (3) ミキサー電流値による比較

ミキサー電流値によるコンクリートの粘性の比較を行った。電流値は、混練終了直前の値をとった。図-6に混和材種と電流値の関係を示す。同一スランプでも水セメント比が小さい場合には、ミキサー電流値が大きくなっており、粘性の増大を示している。

水結合材比、スランプ一定の場合の電流値とフロー速度を図-7に示す。セメント単味と比べて、シリカフェーム、分級フライアッシュを置換すると電流値は小さくなる。高炉スラグ微粉末では30%置換でセメント単味と同程度であり、50%置換では大きくなっている。

フロー速度の差が、ワーカビリティの違いになると考えられることから、フロー速度の大きいコンクリートは小さい電流値を示し、粘性が小さい作業性の良いコンクリートであるといえる。

### (4) ボックスフローによる比較

ボックスフロー試験結果を図-8に示す。同一配合について高性能減水剤の添加率を変えてスランプが20cmを中心に大きいものと、小さいものと2種類のコンクリートを混練した。試験は、流動停止後の元の高さからの沈下深さ(沈下量)と、その後棒状パイプ(250w、2000v.p.m)をかけたときの両槽のコンクリートの高さが同じになるまでの時間(上昇時間)を測定し、コンクリートの充填性能を評価した。

図-8において、スランプと沈下量は比例しているが、混和材の違いにより沈下量の大きさは異っており、同一スランプで比較すると、シリカフェーム、分級フライアッシュが沈下量が大きく良好な型枠充填性を示した。また、上昇時間で

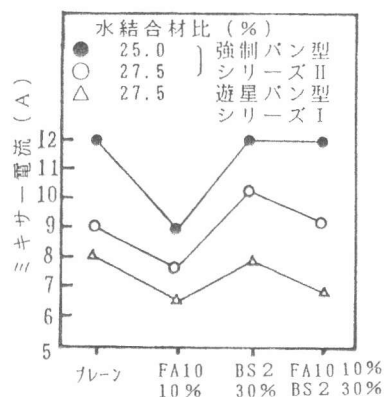


図-6 混和材種とミキサー電流値

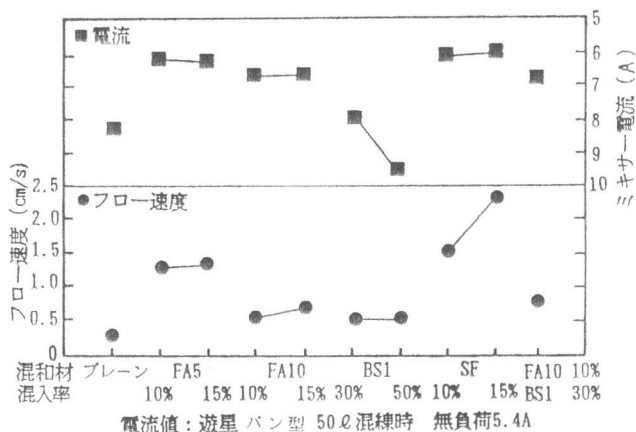


図-7 電流値とフロー速度(シリーズI)

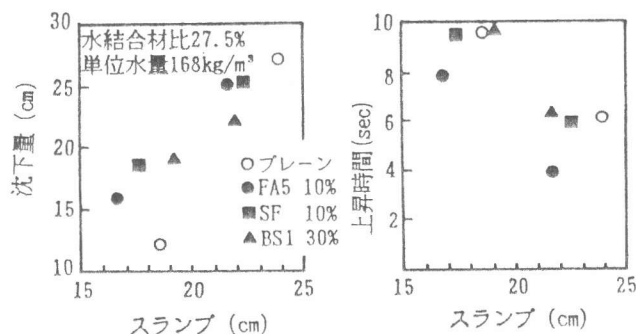


図-8 ボックスフロー試験(シリーズI)

は分級フライアッシュ、シリカフェームが短時間で上昇し、振動締固めに良好なワーカビリティを示した。

### 3. 2 硬化コンクリートの特性

#### (1) 圧縮強度

水結合材比27.5%における材令と圧縮強度（シリーズI）を図-9に示す。分級フライアッシュを混入した配合はセメント単味と比較して、材令28日までは若干低い強度を示すが、材令91日では同程度の強度発現を示す。高炉スラグ微粉末を混入した配合は材令7日以降の強度の伸びが大きく、高炉スラグ微粉末と分級フライアッシュを組み合わせると混合したものも、同様に高い強度を示している。シリカフェームは、高炉スラグ微粉末とセメント単味の中間の強度発現であった。

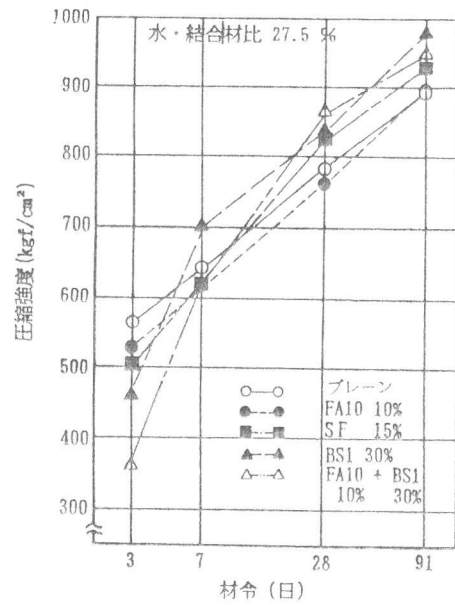


図-9 材令と圧縮強度（シリーズI）

混和材種および水結合材比と圧縮強度を図-10に示す。シリーズIIはシリーズIと骨材およびミキサーを変えており、圧縮強度の発現がシリーズIと比べて大きい結果が得られた。分級フライアッシュの混入により、材令7日では無混入のものより圧縮強度は低くなるが、材令28日以降では無混入のものを上回る強度発現がある。また、高炉スラグ微粉末は材令28日以降の強度発現が大きい。更に分級フライアッシュと高炉スラグ微粉末を組み合わせると配合したものは、材令7日強度は分級フライアッシュに近いが、材令28日以降は高炉スラグ微粉末と同様な強度発現が得られた。

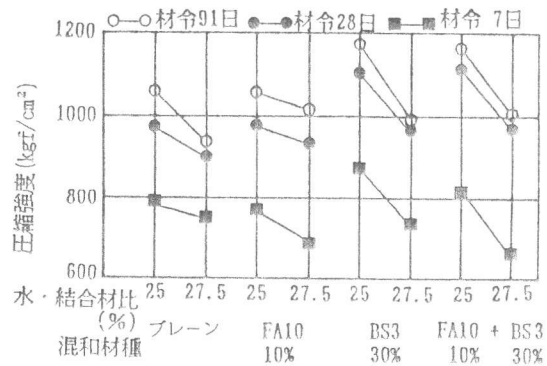


図-10 混和材種、水結合材比と圧縮強度（シリーズII）

#### (2) 静弾性係数

圧縮強度と静弾性係数の関係を図-11に示す。図中に日本建築学会のRC規準に基づき算定した曲線を併記した。混和材を混入したものも無混入のものと同程度の値であるが、シリカフェームを混入したものは若干低い値となっている。

#### (3) 乾燥収縮

乾燥収縮率を図-12に示す。乾燥材令91日での収縮率は  $3.4 \sim 4.4 \times 10^{-4}$  であった。水結合材比の違いによる比較では今回の配合では水結合材比が小さくなるとセメント量が増えることから、水結合材比25%のほうが大きい収縮率になったと考えられる。水結合材比27.5%における混和材種による違いは、無混入のものと高炉スラグ微粉末が同程度の値であり、分級フライアッシュとシリカフェームは、それよりやや大きい値となった。

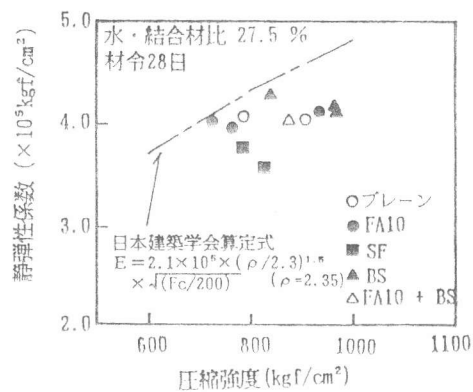


図-11 圧縮強度と静弾性係数（シリーズI）

乾燥収縮率を図-12に示す。乾燥材令91日での収縮率は  $3.4 \sim 4.4 \times 10^{-4}$  であった。水結合材比の違いによる比較では今回の配合では水結合材比が小さくなるとセメント量が増えることから、水結合材比25%のほうが大きい収縮率になったと考えられる。水結合材比27.5%における混和材種による違いは、無混入のものと高炉スラグ微粉末が同程度の値であり、分級フライアッシュとシリカフェームは、それよりやや大きい値となった。

### 3.3 プラント実験

#### (1) 使用材料

- a. 粗骨材： 碎石、 Gmax 20mm、 FM 7.41  
 比重 2.65、 吸水率 0.83% 岩瀬産  
 細骨材： 川砂、 FM2.76、 比重 2.61 吸水率  
 1.43%、 北浦産 (3割) 尻内産 (7割)
- b. 高性能減水剤： アニオン型特殊活性剤  
 および空気量調整剤 (目標空気量 3%)

#### (2) 実験方法

実プラントのミキサー (水平2軸、 3m<sup>3</sup>練り) により混練し、 混練性能およびコンクリートの品質を比較した。 1バッチ混練量は2.5m<sup>3</sup> とし、 高性能減水剤の添加率はすべて同一とした。 配合を表-3に示す。

No	混和材混入率%		単 位 量							
	分級 フライ FA10	高炉 灰 末 BS2	水 kg	セメ ント kg	FA10	BS2	細骨材 kg	粗骨材 kg	高性能 減水剤 (%)	AE補 助剤 (%)
1	—	—	170	618	—	—	607	985	2.8	0.008
2	10	—	160	524	58	—	623	1011	2.8	0.020
3	10	30	170	371	62	186	596	967	2.8	0.028
4	15	30	170	340	93	186	593	962	2.8	0.028

水結合材比： 27.5% 細骨材率： 38.5% 混和剤添加率： 結合材 × (%)

供試体は 900×900 × 2400mmの柱型供試体である。 コンクリートはホッパーで1層500mm 高さで投入しバイブレータで締固めを行った。

#### (3) 実験結果

##### a. フレッシュコンクリートの性質

混練したコンクリートのスランプ、 フロー値、 フロー速度を図-13に示す。 分級フライアッシュの混入によりスランプ、 フロー値、 フロー速度ともに上昇するが、 特にフロー速度の増大効果が大きい。

##### b. ミキサーモーター電流値

混練中にミキサーのモーター電流値を測定した。 電流値は空運転中は35~40Aであり、 材料投入時には130~160A の値を示す。 排出直前の安定した状態で測定したミキサー電流値を図-14に示す。 電流値はFA10 10%混入が最も小さく次にFA10 15%+BS2 30%であった。 この傾向はフロー速度と一致している。 W/Cが低いコンクリートの混練は負荷が大きく均一な混練状態が得難いが、 分級フライアッシュの混入により混練性能およびフレッシュコンクリートの性能が改善されている。

##### c. 硬化コンクリートの性質

プラントで混練したコンクリートの標準養生供試体の強度を表-15に示す。 圧縮強度は材令28日では、 室内実験の結果を若干下回っていたが、 材令91日では90%以上の強度発現が得られ、 プ

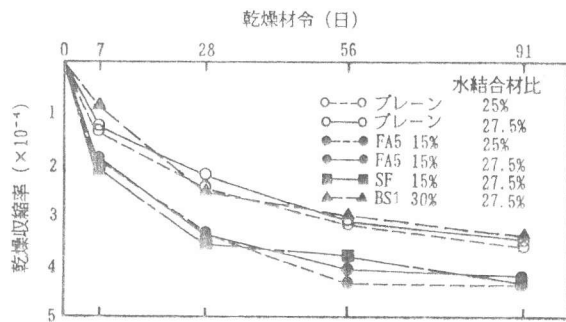


図-12 乾燥収縮 (シリーズ I)

表-3 配合

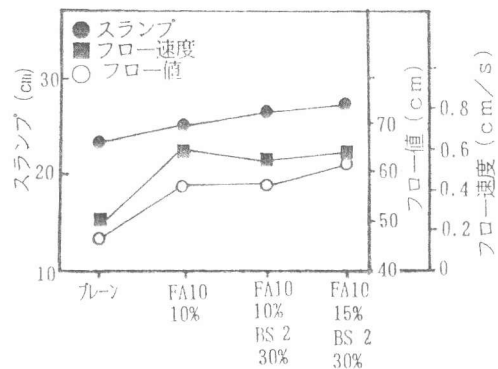


図-13 コンシステンシーの比較

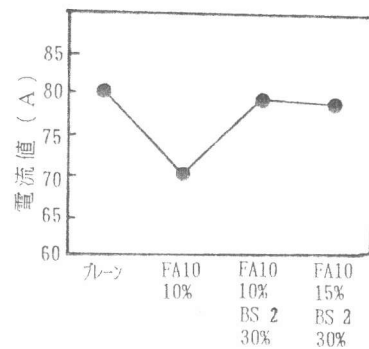


図-14 混和材種と電流値

ラントでも十分な混練が得られたことを示している。柱型供試体から抜いたコアによる圧縮強度測定結果を図-16に示す。セメント単味にばらつきが見られるが、その他はほぼ均等な強度が得られた。なお、高強度コンクリートではセメント量が多いことから温度上昇量大きくなるが、柱型供試体中心部の温度上昇量は、いずれの混和材を用いたものもセメント単味の70%程度 の値となっており、ひびわれ防止の点で有利である。

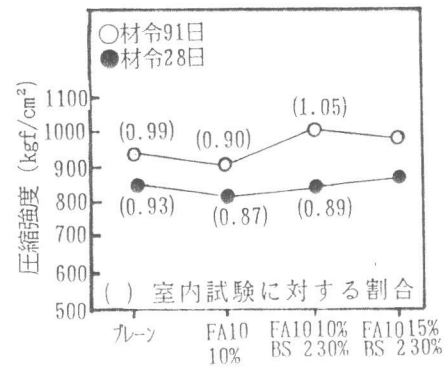


図-15 強度試験結果

#### 4. まとめ

本研究の結果は、次のようにまとめられる。

##### (1) ワーカビリチーの改善

低水セメント比のコンクリートは粘性が高く、所定のスランプ値を確保しても、きわめて扱いにくい性状を有している。このコンクリートに分級フライアッシュを混入すると粘性が小さくなる。シリカフュームにも同様な効果が見られるが、高炉スラグ微粉末の場合は若干粘性が高くなる傾向がある。

##### (2) 高性能減水剤量の低減

高強度コンクリートでは、所定のスランプを得るために多量の高性能減水剤の添加が必要となる。分級フライアッシュには球形微粒子による減水効果があり、セメント単味の配合と比べて同一スランプを得るための単位水量を減らすことができる。シリカフュームの場合には粘性の低下は大きい、スランプを同一にするためには高性能減水剤の添加量は大きい。また、高炉スラグ微粉末はセメント単味と同程度の高性能減水剤を必要とする。

##### (3) 強度発現

同一水結合材比の場合に、高炉スラグ微粉末、シリカフュームの混入により、圧縮強度はセメント単味より増加する。分級フライアッシュを混入した場合は、初期強度は若干低いが中期材令以降では同等の強度発現がある。また、高炉スラグ微粉末と分級フライアッシュを組み合わせると長期材令では高炉スラグ微粉末単体での使用と同じ強度発現が得られる。

以上のように、分級フライアッシュは高強度コンクリートの施工性を改善し、良好な強度発現性を有することが確認できた。

#### 参考文献

- 1) 重松俊一、石井光裕、山本和夫、東 邦和：分級した微粉末フライアッシュを混入したコンクリートの性質、セメント技術年報、42、pp.128-131、1988
- 2) (財)国土開発技術研究センター、高強度コンクリート分科会報告書、H2.3
- 3) 岡田 清・六車 熙 編：コンクリート工学ハンドブック、朝倉書店、1981

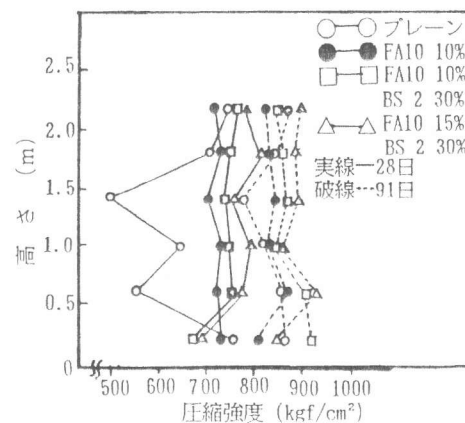


図-16 コア供試体圧縮強度