

論文 フライアッシュを混合した高強度コンクリートの施工性能および強度性状に関する実験的検討

山口 晶子*1・永野 哲平*2・橋本 親典*3・後藤 昭彦*4

要旨: フライアッシュ (FA) を用いた高強度コンクリートの実用化を目的とし、普通ポルトランドセメント、高炉セメント B 種および早強ポルトランドセメントを対象に FA を細骨材の一部に混合した W/C=40%以下の高強度コンクリートを作製した。加振ボックス充填試験による施工性能評価では、FA を混合することで高強度コンクリートの間隙通過性は著しく向上した。一方、材齢 91 日までの圧縮強度性状では、普通ポルトランドセメントや高炉セメント B 種では、FA の活性度を示す k 値が負の値となり、FA による強度増進は期待できなかった。しかし、材齢 91 日では、W/C が大きい配合ほど k 値が正の値になる傾向が確認された。

キーワード: 高強度コンクリート, フライアッシュ, 加振ボックス充填試験, 圧縮強度, ポズラン反応

1. はじめに

石炭火力発電所から排出されるフライアッシュ (以降、FA と称す) を含む石炭灰は、セメント・コンクリート分野を中心に有効利用されている。しかし、今後、灰捨場の確保が困難になる状況や、セメント需要の大幅な拡大が望めない状況を考慮すると、さらなる有効利用が求められている。

FA のコンクリート用混和材としての利用は、これまでにダムコンクリートなどで多くの実績を残してきたが、高強度コンクリートに適用された例は少ない。これは、一般に FA は、水和発熱の抑制やワーカビリティの向上を目的にセメントの一部に混合 (以降、内割混合と称す) されるため、初期強度低下の懸念があることが要因である。一方で、近年の骨材事情の悪化に伴い、FA を細骨材の一部に混合 (以降、外割混合と称す) する研究も多数報告されている。FA を外割混合することで、内割混合とは異なり、初期材齢から圧縮強度が増加することが知られている^{1) 2)}。すなわち、外割混合では、初期強度を低下させることなく、FA を混合することができる。しかし、高強度コンクリートは必然的に単位セメント量が多くなる。したがって、FA を外割混合したコンクリートでは、単位粉体量増加に伴う粘性の増加によって、施工性能への影響が懸念されるが、検討された事例は少ない。

本論文では、FA の高強度コンクリートへの適用を目的に、FA を外割混合した高強度コンクリートの施工性能および強度性状について検討した。具体的には、振動条件下での変形性をタンピング試験、鉄筋間の間隙通過性を加振ボックス充填試験によって評価した。硬化性状としては、圧縮強度試験および静弾性係数試験を実施した。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

使用材料の物理的性質を表-1 に示す。セメントは普通ポルトランドセメント (以降、N と称す)、高炉セメント B 種 (以降、BB と称す) および早強ポルトランドセメント (以降、H と称す) の 3 種類を使用した。FA は JIS A 6201 の II 種適合品である。また、骨材には砂岩系碎石・砕砂を使用した。混和剤はポリカルボン酸エーテル系の高性能 AE 減水剤 (以降、SP 剤と称す)、アルキルエーテル系の AE 剤および高アルキルカルボン酸系の FA 用 AE 剤を使用した。

コンクリートの配合を表-2 に示す。本実験では、配合強度 60N/mm²以上の配合を見出すため、水セメント比 W/C は 30%、35%、40%の 3 水準に設定した。各 W/C において、FA 無混合のコンクリート (以降、普通コンクリートと称す) と FA 混合のコンクリート (以降、FA コンクリートと称す) をそれぞれ作製した。FA は、既往の文献²⁾を参考に単位 FA 量を 70kg/m³一定とし、細骨材の一

表-1 使用材料の物理的性質

種類	記号	物理的性質ほか
普通ポルトランドセメント	N	密度: 3.16g/cm ³ , 比表面積: 3380cm ² /g
高炉セメントB種	BB	密度: 3.04g/cm ³ , 比表面積: 3720cm ² /g
早強ポルトランドセメント	H	密度: 3.14g/cm ³ , 比表面積: 4440cm ² /g
フライアッシュII種	FA	密度: 2.25g/cm ³ , 比表面積: 4080cm ² /g
硬質砂岩砕砂	S	密度: 2.57g/cm ³ , 吸水率: 1.77%, F.M.: 2.63
砂岩碎石(5号)	G1	密度: 2.57g/cm ³ , 吸水率: 1.62%, F.M.: 7.08
砂岩碎石(6号)	G2	密度: 2.57g/cm ³ , 吸水率: 1.60%, F.M.: 6.37
高性能AE減水剤	SP	ポリカルボン酸エーテル系
AE剤	AEA	アルキルエーテル系
フライアッシュ用AE剤		高アルキルカルボン酸系

*1 (株) ドーユー大地 (正会員)

*2 徳島大学大学院 先端技術科学教育部 知的力学システム工学専攻 博士前期課程 (学生会員)

*3 徳島大学大学院 ソシオテクノサイエンス研究部エコシステムデザイン部門 教授 工博 (正会員)

*4 西日本高速道路 (株) 四国支社

表-2 コンクリートの配合およびフレッシュ性状

セメント種類	配合名	W/C	s/a	単位量(kg/m ³)						SP	AEA ^{※1} (P×%) ^{※2}	Sl. (cm)	Air (%)	C.T. (°C)	
				W	C	FA	S	G1	G2						
N	N30	30%	42.8%		550	-	677				1.1	0.006	10.0	4.0	23.4
	NF30		39.7%		550	70	597			1.5	1.6	13.0	6.0	23.1	
	N35	35%	45.0%		471	-	741			1.0	0.004	11.0	4.5	22.3	
	NF35		42.2%		471	70	661			0.9	0.9	11.0	4.5	22.7	
	N40	40%	46.6%		413	-	789			0.9	0.003	12.0	6.0	22.5	
	NF40		43.9%		413	70	709			0.8	0.9	12.0	6.0	21.9	
BB	BB30	30%	42.1%		550	-	660			0.9	0.011	13.0	3.0	21.2	
	BBF30		39.0%		550	70	580			0.65	1.2	11.5	6.0	20.7	
	BB35	35%	44.5%	165	471	-	726	362	543	0.9	0.006	14.0	4.0	21.0	
	BBF35		41.6%		471	70	646			0.425	1.5	10.5	6.0	21.6	
	BB40	40%	46.1%		413	-	776			0.8	0.005	11.5	3.0	20.9	
	BBF40		43.4%		413	70	696			0.5	0.7	11.5	6.0	20.3	
H	H30	30%	42.7%		550	-	674			1.5	0.02	13.5	5.5	22.9	
	HF30		39.6%		550	70	594			1.3	1.7	13.5	4.0	23.4	
	H35	35%	44.9%		471	-	739			1.3	0.006	13.0	6.0	23.4	
	HF35		42.1%		471	70	659			0.9	1.3	11.0	5.5	22.4	
	H40	40%	46.5%		413	-	787			1.2	0.005	13.5	5.0	22.9	
	HF40		43.8%		413	70	707			0.8	1.0	13.0	6.0	22.2	

※1 : FA コンクリートには、FA 用 AE 剤を使用 ※2 : P=C+FA

部に混合した。また、全ての配合で単位水量を 165kg/m³、単位粗骨材量を一定とした。目標スランプは 12±2.0cm、目標空気量は 4.5±1.5%とし、化学混和剤の添加によって調整した。

2.2 試験項目および方法

(1) フレッシュ性状試験

コンクリートのフレッシュ性状試験では、スランプ試験を JIS A 1101、空気量試験を JIS A 1128 に従い実施した。目標スランプ 12±2.0cm、目標空気量 4.5±1.5%を満たしていることを確認した後、タンピング試験および加振ボックス充填試験を同時に実施した。スランプ、空気量およびコンクリート温度の実測値を表-2 に示す。

(2) タンピング試験

タンピング試験は、スランプ板と木製棒（質量 1.2kg）を用いて既往の報告³⁾に準拠し、以下の手順で行った。

表乾状態の細骨材を厚さ 2cm となるように敷き均し、その上にスランプ板を水平に設置する。スランプ試験

(JIS A 1101) を実施し、初期スランプ、スランプフローを測定した後、木製棒をスランプコーンの中心から 30cm の四隅に高さ 50cm から順次落下（以降、タンピングと称す）させる。タンピング回数 8 回ごとにスランプおよびスランプフローを測定し、タンピング回数が 48 回の時点で試験終了とする。本実験では、タンピング 1 回あたりのスランプフロー増加量をスランプフロー変形係数 (mm/回) として算出した。

(3) 加振ボックス充填試験

加振ボックス充填試験の概要を図-1 に示す。試験は、ボックス形容器 (JSCE-F 511 に準拠) と棒状内部振動機

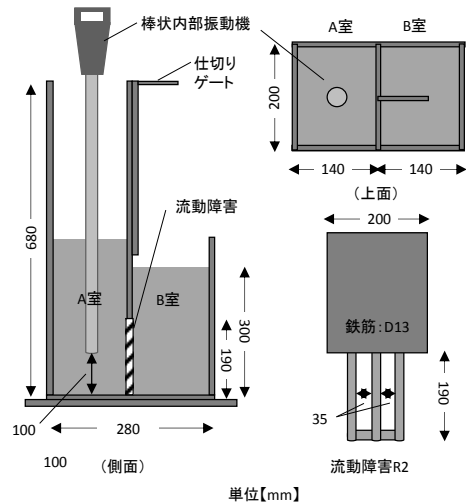
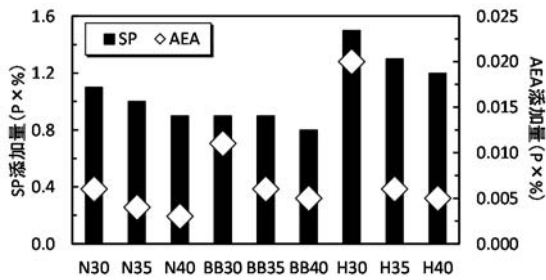


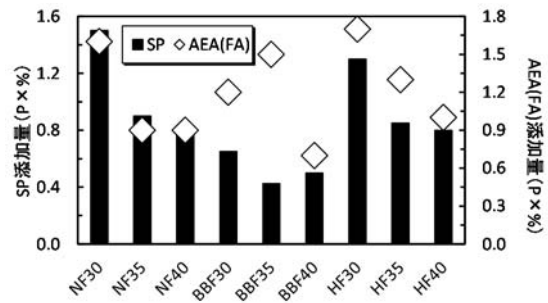
図-1 加振ボックス充填試験の概要図

(周波数: 220~270Hz、直径: 28mm)、流動障害 R2 (D13×3 本) を用いて既往の報告³⁾に準拠し、以下の手順で行った。

ボックス形容器を防振用ゴムマットの上に水平に設置する。仕切りゲートを閉じた状態で A 室にコンクリートを 3 層に分けて詰める。この時、1 層ごとにボックスを左右に 3 往復揺らす。A 室上面を均し、振動機を A 室中央に挿入する。挿入深さ位置は底面から 100mm 上で固定する。その後、仕切りゲートを引き上げ、振動機による加振を行う。加振開始直後から B 室に充填されるコンクリートの自由表面の最も高い箇所が B 室底面より 190mm および 300mm の高さに到達するまでの時間を記録する。充填高さが 300mm に達した時点で加振を停止する。本実験では、充填高さ 190mm から 300mm までの



(a) 普通コンクリート



(b) FAコンクリート

図-2 化学混和剤添加量

コンクリートの充填速度を間隙通過速度（以降、 V_{Pass} と称す）として算出した。

(4) 圧縮強度試験および静弾性係数試験

コンクリートの硬化性状試験では、圧縮強度試験を JIS A 1108 に従い材齢 7 日、14 日、28 日、56 日、91 日に実施した。また、静弾性係数試験を JIS A 1149 に従い材齢 28 日、91 日に実施した。各材齢で圧縮強度試験は供試体 3 本、静弾性係数試験は 2 本の平均値を試験値とした。養生条件は、20°C 水中養生とした。

(5) 示差熱重量分析

FA のポズラン反応に関して検討を行うため、示差熱重量分析 (TG-DTA) によって $Ca(OH)_2$ 含有量の測定を行った。分析用試料は、フレッシュコンクリートをウェットスクリーニングして得られるモルタルを使用した。得られたモルタルを $\phi 50 \times 100\text{mm}$ の円柱供試体に打設し、所定の材齢まで 20°C 水中養生を行った。試料の採取箇所は円柱供試体の中心部で統一した。採取した試料は真空下で大量のアセトンに浸漬することで水和停止を行い、0.15mm 以下に微粉碎した後、40°C 炉乾燥を行った。測定条件は、 N_2 フロー環境下で昇温速度 10°C/min.、温度範囲は 20°C から 500°C である。試験材齢は、材齢 7 日、28 日、91 日とした。

3. 実験結果および考察

3.1 化学混和剤添加量

化学混和剤添加量を図-2 に示す。全てのセメント種類において、W/C が大きくなるに従い SP 剤および AE 剤の添加量は減少する傾向を示した。一方、SP 剤添加量は、同一 W/C であれば、H シリーズが最も多く、BB シリーズが少なくなる傾向を示した。BB は N に比べて、流動性を低下させるセメントの構成化合物である C_3A および C_4AF 量が少ないためと考えられる⁴⁾。さらに、N シリーズの W/C=30% の配合 (N30 および NF30) を除いて、FA を混合することで同一 W/C における SP 剤添加量は減少した。したがって、単位量 70kg/m^3 の FA を混合した高強度コンクリートにおいても、FA による減水効果が期待できるといえる。

3.2 タンピング試験

スランプフロー変形係数を図-3 に示す。全ての配合でスランプ値は $12 \pm 2.0\text{cm}$ の範囲内であるが、同一 W/C でもセメントの種類によってスランプフロー変形係数が異なった。SP 剤の添加量が最も少なかった BB シリーズは、N や H シリーズと比べてスランプフロー変形係数が大きく、変形性が良かった。一方で、W/C の違いや FA の有無による傾向はみられなかった。本実験では、最も W/C が高い W/C=40% の配合でも、単位セメント量が 400kg/m^3 以上であり、高粉体な配合である。そのため、タンピングという軽微な振動条件では、コンクリートの粘性による変形性の差を捉えることができなかつたと考えられる。

3.3 加振ボックス充填試験

間隙通過速度 V_{Pass} を図-4 に示す。全ての配合で単位粗骨材量は一定である。したがって、 V_{Pass} は主にモルタルの粘性ならびに FA のボールベアリング作用に依存すると考えられ、充填性に対して最適な粘性が存在する。すなわち、適切な粘性よりも小さすぎると粗骨材がアーチングを起こし充填性が低下する。粘性が高すぎるとボックス壁面とのすべり抵抗力の増大や鉄筋との衝突等の要因によって充填性が低下する。

N, BB シリーズの普通コンクリートは、W/C が小さくなるに従い V_{Pass} が速くなった。さらに、FA を混合することで、同一 W/C の普通コンクリートと比べて V_{Pass} が顕著に速くなる傾向を示した。これは、FA の混合によって粘性が増加し、粗骨材のアーチングを回避させたこと、および FA のボールベアリング作用によるものであると考えられる。なお、N シリーズの普通コンクリートでは、W/C が小さくなるに従い V_{Pass} が速くなったのに対し、FA コンクリートでは遅くなった。単位セメント量の増加によるモルタルの粘性増加が、普通コンクリートでは粗骨材のアーチングの回避に対する効果が顕著になり、FA コンクリートでは粘性の増加による流動性低下に対する効果が顕著になったものと思われる。

H シリーズの普通コンクリートは、N や BB シリーズの普通コンクリートと比べて V_{Pass} が速くなる傾向があ

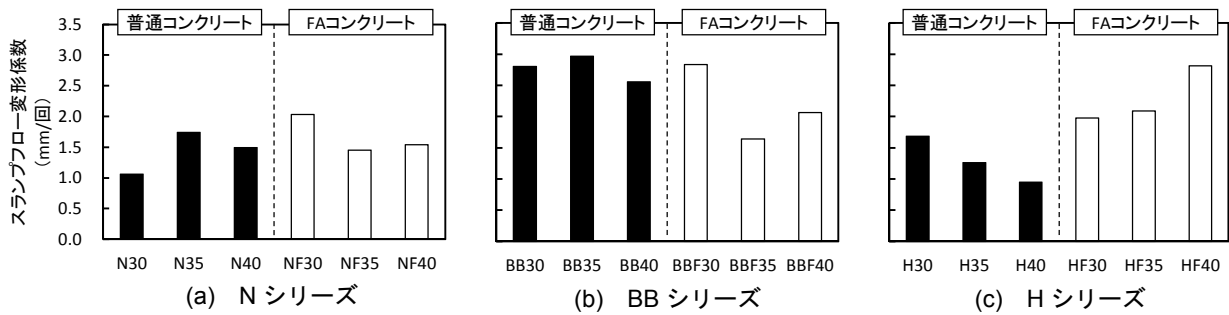


図-3 タンピング試験結果

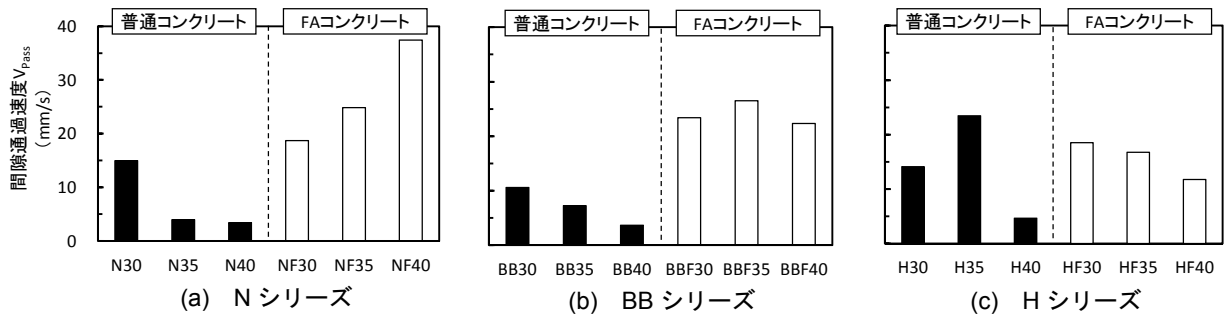


図-4 加振ボックス充填試験結果

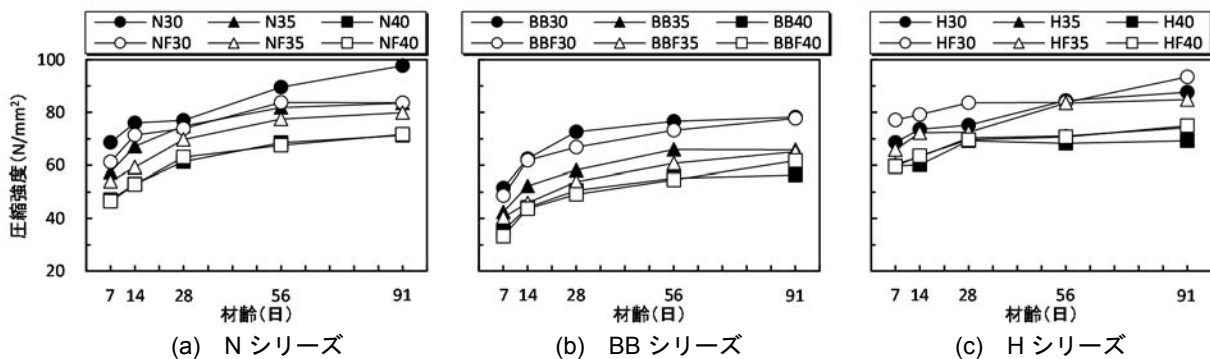


図-5 圧縮強度試験結果

った。これは、Hの比表面積が他の2種類(N, BB)に比べて800~1000cm²/g以上大きいことで、NやBBシリーズの普通コンクリートよりも適切な粘性を有したためであると考えられる。一方で、Hシリーズでは、FAによるV_{Pass}が速くなる傾向が小さかった。Hの比表面積がFAより大きく、FA混合による流動性の向上より流動抵抗の増大を招いたためであると考えられる。

3.4 圧縮強度試験

圧縮強度試験結果を図-5に示す。本実験では、FAは単位セメント量を保持する外割混合で使用した。したがって、全ての配合で単位水量および単位セメント量は一定である。

Nシリーズにおいて、W/C=30%および35%の配合は、材齢7日から91日にかけてFAコンクリートの強度が普通コンクリートの強度を下回った。一方、W/C=40%の配合では、FAコンクリートと普通コンクリートは同等の圧縮強度を示した。既往の報告によると、FAを外割混合したコンクリートは、無混合のコンクリートと比較して初

期材齢から圧縮強度が増加する^{1) 2)}。しかし、本実験では、材齢91日以前におけるFAのポズラン反応による強度増進は小さかった。特に、最も低いW/CであるNF30は、N30に比べて強度低下が大きかった。

BBシリーズは、高炉スラグ微粉末(以後、BFSと称す)混入によるセメント量の減少から、全ての材齢でNシリーズの強度を下回った。また、Nシリーズと同様にFAコンクリートの強度は普通コンクリートの強度を下回る傾向があった。しかし、材齢91日では、普通コンクリートと同等もしくは高い強度となり、BFSの潜在水硬性やFAのポズラン反応による強度増進が確認された。

Hシリーズは、NやBBシリーズとは異なり、材齢7日からFAコンクリートの強度が普通コンクリートの強度を上回る傾向があった。一般に、普通ポルトランドセメントを使用したコンクリートでは、材齢28日以降にFAのポズラン反応が起これると考えられる。しかし、エアライトを多く含んだ早強ポルトランドセメントの水和反応によって、初期材齢からCa(OH)₂が生成され、材齢7

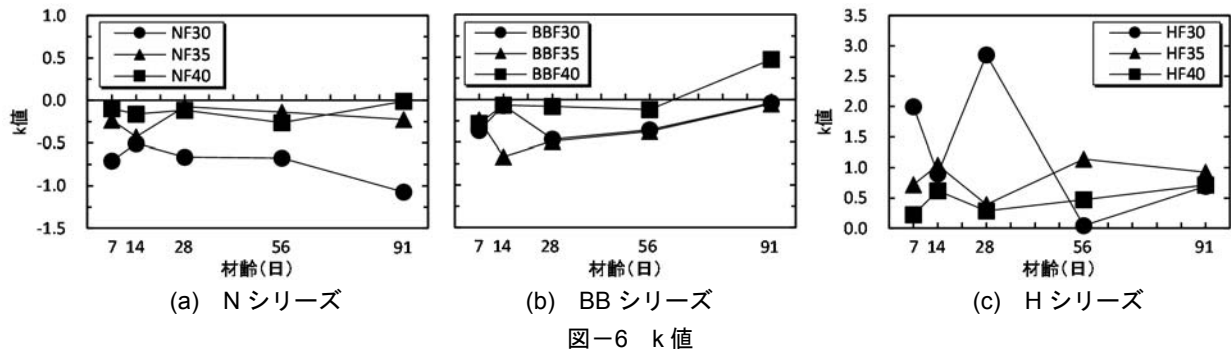


図-6 k 値

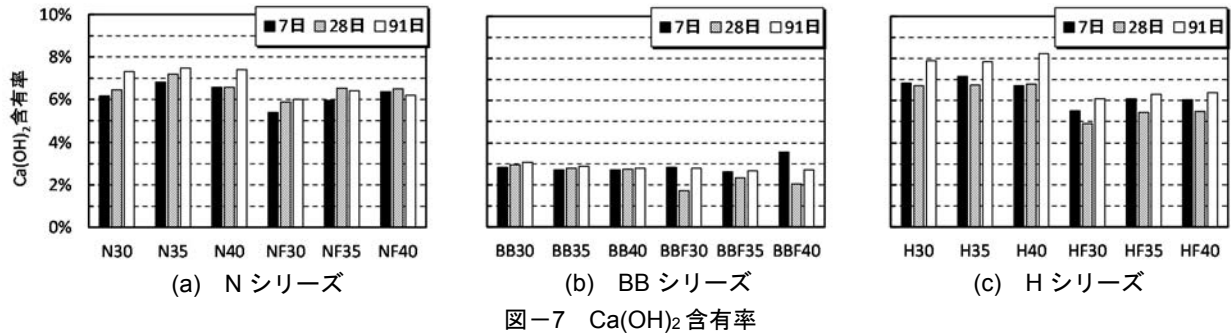


図-7 Ca(OH)₂含有率

日程度からFAのポズラン反応が起こったと考えられる。

セメント有効係数(以降、k値と称す)と材齢の関係を図-6に示す。k値は、単位量のFAの結合材としての強度発現性能を、セメントの性能に対する比で表したものであり、k<1でセメントより劣り、k=1で同等、k>1でセメントを上回ることを意味する。k値の算出方法を以下に示す。

- 1) 圧縮強度がC/Wに支配されることから、FAコンクリートの結合材水比($C_{FA}+F$)/ W_{FA} を($C_{FA}+k \cdot F$)/ W_{FA} とおく。
- 2) 本実験で実施した3水準のW/Cにおける圧縮強度試験結果より、普通コンクリートのC/Wと圧縮強度の関係を一次直線式化する。
- 3) 上記の一次直線式にFAコンクリートの圧縮強度を代入することで、($C_{FA}+k \cdot FA$)/ W_{FA} と同じ強度を有する普通コンクリートのC/Wを算出する。
- 4) 以下の式(1)より、k値を算出する。

$$(C_{FA}+k \cdot F)/W_{FA}=C/W \quad (1)$$

ここで、W:普通コンクリートの単位水量(kg/m³)、 W_{FA} :FAコンクリートの単位水量(kg/m³)、C:普通コンクリートの単位セメント量(kg/m³)、 C_{FA} :FAコンクリートの単位セメント量(kg/m³)、F:単位FA量(kg/m³)

既往の報告では、普通ポルトランドセメントの場合、材齢28日におけるk値は0.4程度である²⁾。Hシリーズは、材齢7日からk値が0.4程度の値を示し、FAと相性の良さを示した。

Nシリーズでは、k値が負の値を示した。すなわち、FAが結合材としての機能を果たしておらず、セメントの水和反応を阻害している可能性がある。特に、W/Cが小さいほどk値がより小さくなった。これは、FAの混合に

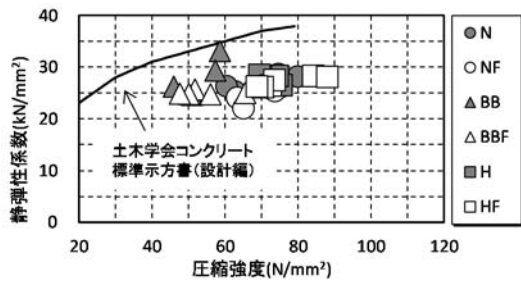
よる単位粉体量の増加によって、セメント粒子の分散性が低下し、セメント粒子と水の接触回数が低下するという物理的な要因によってセメントの水和反応が抑制されたことに起因すると考えられる。しかしながら、梶田らの論文⁵⁾では、水結合材比が30%程度の高強度コンクリートにおいても材齢7日程度からFAによる強度増進が確認されている。本実験の配合では、目標スランブが12±2.0cmであり、SP剤の添加量が梶田らの論文の配合と比較して少ない。したがって、SP剤の添加量を増加させ、スランブを大きくすれば分散性が上昇し、k値が負の値にならなかった可能性が考えられる。

BBシリーズは、Nシリーズと同様にk値が負の値を示したが、材齢の進行とともに増加傾向を示し、材齢91日のBBF40はk値が0.5程度となった。材齢がより長期になるとBFSの潜在水硬性やFAのポズラン反応による強度増進が期待できる可能性が示唆された。

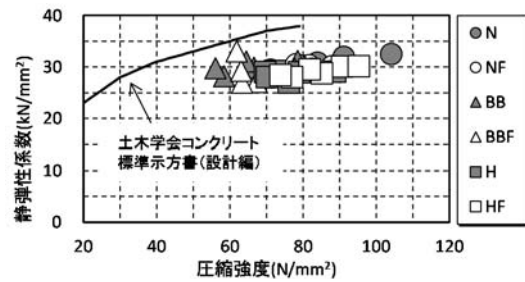
3.5 示差熱重量分析

示差熱重量分析によるモルタル硬化体のCa(OH)₂含有率を図-7に示す。一般に、ポズラン活性を有する混和材を使用していない場合、材齢の進行に伴いCa(OH)₂含有率は増加する。

Nシリーズは、FAを混合していない普通コンクリートでは、材齢の進行に従いCa(OH)₂含有率が増加した。一方、FAコンクリートでは、材齢28日と91日で同等のCa(OH)₂含有率を示した。これは、セメントの水和反応によるCa(OH)₂の生成とFAのポズラン反応によるCa(OH)₂の消費がほぼ同量であることを意味する。よって、材齢28日以降にFAがポズラン反応を起こしている。しかしながら、FA無混合の普通コンクリートと比較して



(a) 材齢 28 日



(b) 材齢 91 日

図-8 圧縮強度と静弾性係数の関係

強度が増加してない。これは、3.4 節で考察した通り、セメント粒子の分散性の低下によって、FA コンクリートの水和反応が活発でなかったために、ポズラン反応による強度増進に至らなかったものと考えられる。なお、材齢 91 日以降では、さらなる FA のポズラン反応が進行し、FA コンクリートの強度増進が期待される。

BB シリーズは、全ての配合および材齢で N シリーズと比較して $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含有率は少ない。また、材齢の進行に伴う $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の増加量も少ない。これは、BFS 混入によるセメント量の減少ならびに BFS の潜在水硬性による $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の消費に起因すると考えられる。FA コンクリートは、材齢 28 日で $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含有率が低下したにも関わらず材齢 91 日では増加した。セメント鉱物と BFS および FA による $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の生成と消費の関係は複雑であり、結果として材齢 28 日から 91 日の間で $\text{Ca}(\text{OH})_2$ が増加したと思われる。ただし、材齢 7 日と 91 日では大差なく一定であった。したがって、材齢 91 日における強度増進は、FA のポズラン反応と BFS の潜在水硬性の両方が影響したものと考えられる。

H シリーズは、普通コンクリートでは、材齢の進行に伴い $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含有率は増加した。一方、FA コンクリートは、材齢 7 日から 28 日にかけて $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含有率は減少傾向を示した。これは、材齢 28 日以前から FA のポズラン反応が起こっていることを意味する。

3.6 静弾性係数試験

圧縮強度と静弾性係数の関係を図-8 に示す。なお、試験を実施した供試体 2 本の値をプロットした。図中の実線は既往の報告⁹⁾の値を示した。本実験におけるコンクリートの静弾性係数は、材齢や FA の有無に関わらず示方書の値より小さい値を示した。一般に静弾性係数は粗骨材の品質の影響を受ける。W/C=40%以下の高強度コンクリートでは、より強く粗骨材の品質の影響を受けたと考えられる。

4. まとめ

本論文は、FA を外割混合した高強度コンクリートの施工性能および強度性状について検討を行った。以下に、本実験の範囲内で得られた知見を示す。

- (1) 普通ポルトランドセメント、高炉セメント B 種、早強ポルトランドセメントを用いた W/C=40%以下の高強度 FA コンクリートで、目標スランプ $12 \pm 2.0\text{cm}$ 、目標空気量 $4.5 \pm 1.5\%$ を満足するように化学混和剤の量を決定することは可能であった。
- (2) 普通ポルトランドセメント、高炉セメント B 種を用いた場合、FA を混合しない普通コンクリートと比較して、FA コンクリートの間隙通過速度 V_{Pass} は速くなった。
- (3) 普通ポルトランドセメント、高炉セメント B 種を用いた高強度コンクリートは、材齢 91 日以前では FA のポズラン反応による強度増進は期待できなかった。一方、早強ポルトランドセメントを用いた FA コンクリートのポズラン反応は材齢 7 日程度の初期材齢から期待できた。

参考文献

- 1) 伊藤智章, 松永篤, 仲松照隆, 佐久田朝男: フライアッシュを細骨材の一部に用いたコンクリートの強度および耐久性, コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.2, pp.217-222, 2000
- 2) 土木学会: コンクリートライブラリー132, 循環型社会に適合したフライアッシュコンクリートの最新利用技術, 2009.12
- 3) 土木学会: コンクリート技術シリーズ 102, コンクリートの施工性能の照査・検査システム研究小委員会 (341 委員会) 第 2 期委員会報告書, 2013.11
- 4) 宮本欣明, 山本康弘: 高炉セメント B 種にフライアッシュを用いた高流動コンクリートの流動特性およびコンクリートの品質に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 577 号, pp.1-7, 2004
- 5) 榎田佳寛, 手島則夫, 中村重春: 高粉末度フライアッシュを使用した高強度コンクリートの調査と諸性質に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 509 号, pp.1-7, 1998.7
- 6) 土木学会: 2012 年制定コンクリート標準示方書 [設計編], 2012.12