

論文 セメントを使用しないコンクリートの配合が即脱成型平板の性能に与える影響

橋本 紳一郎^{*1}・加地 貴^{*2}・橋本 親典^{*3}・渡辺 健^{*4}

要旨：本研究は、既往の研究により用いられているセメントを使用しない即脱成型平板（以降、ノンセメント即脱平板と称す）用の配合で4種類のフライアッシュ（以降、FAと称す）を使用して、FAの品質の影響を検討した。FAの品質によってノンセメント即脱平板の曲げ強度が全く異なる結果となった。そこで、FAの品質に影響されないノンセメント即脱平板用の最適配合を検討し、ノンセメントとセメントを使用した即脱成型平板を作製し、各種性能試験を行い比較検討した。その結果、最適配合を使用することにより、ノンセメント即脱平板は規格値を満たし、十分実用可能であることを示した。

キーワード：即脱成型平板, フライアッシュ, 水酸化ナトリウム水溶液, 性能試験

1. はじめに

現在、発電所から発生される石炭灰は、海域あるいは陸域で埋め立て処理されている。今後は大規模な灰捨場の確保が困難になってきていることなどから、フライアッシュ（以降、FAと称す）をセメント・コンクリート分野へ用途を拡大し、その使用量を増加させることが緊急の課題となっている。

これに対して、平塚ら¹⁾は、セメントを使用しないで産業副産物からなる即脱成型平板（以降、ノンセメント即脱平板と称す）の研究を行い、十分な強度が得られることを確認している。このコンクリート2次製品である即脱平板（インターロッキングブロック）は、歩行者系道路を中心に車道舗装や空港、港湾といった重荷重エリアにも適用されるまでに普及し、2000年時点でおおよそ900万m²/年、総供用面積では1億m²に至っている。今後、これらのノンセメント即脱平板が実用化することにより、多くのFAの有効利用に期待ができる。

一方、ノンセメント即脱平板はセメントを使用しないでFAを多量に使用するため、FAの品

質の影響が懸念される。著者ら²⁾は、セメントを使用しないで石炭灰を多量に使用した場合、FAの塩基度の影響によりノンセメントコンクリートの強度が全く異なることを明らかにした。平塚らの提案する即脱成型平板は、アルカリ刺激剤を使用することにより強度の安定を保っているが、様々なFAを使用して製造の検討が行われていない。

以上から、本研究では、FAの品質の影響を考慮した即脱成型平板用配合の検討と、その配合を使用した即脱成型平板とセメントを使用した即脱成型平板（以降、セメント即脱平板と称す）により、各種性能試験を行い実用性について検討した。

2. フライアッシュの品質影響の検討（シリーズ1）

2.1 使用材料

(1) セメント代替材

セメント代替材として、II種フライアッシュ（以降FAII種と称す、物性値は表-1に示す）、高炉スラグ微粉末、二水石膏（四国電力石炭火

*1 函館工業高等専門学校助手 環境都市工学科 博士（工学）（正会員）

*2 株式会社四国総合研究所 土木技術部 工修（正会員）

*3 徳島大学教授 工学部建設工学科 工博（正会員）

*4 徳島大学助手 工学部建設工学科 博士（工学）（正会員）

表-1 フライアッシュの物理的性状

FA II 種の種類	密度 (g/cm ³)	比表面積 (g/cm ²)	フロー値 比(%)	活性度指数(%)		二酸化けい素 (%)	湿分 (%)	強熱減量 (%)
				28 日	91 日			
A	2.32	3,460	108	81	98	54.9	0.04	1.7
B	2.35	3,660	106	84	95	56.1	0.01	1.5
C	2.32	4,240	104	82	96	58.6	0.03	2.1
D	2.26	4,400	105	82	95	70.2	0.00	1.4
JIS A 6201 規定	1.95 以上	2,500 以上	95 以上	80 以上	90 以上	45 以上	1.0 以下	5.0 以下

表-2 コンクリートの配合

配合名 (FA II 種の種類)	単体量 (kg/m ³)						
	水	P			細骨材	粗骨材	混和剤 (アルカリ刺激剤)*
		FA	スラグ	石膏			
A	107	273	110	27	1198	399	× 3.00% (NaOHaq)
B					1201	400	
C					1198	399	
D					1192	397	

*アルカリ刺激剤は、単位水量に対して使用

力発電所産の脱硫石膏，密度：2.29g/cm³）を使用した。

FA II 種は，採取場所の異なる 4 つの FA II 種を使用し，これら全て JIS 規格を満たしているものである。また，既往の研究²⁾より，FA II 種の塩基度が低いものはセメントを使用しないコンクリートの硬化状態や強度に影響を与えることから，品質の影響を検討するため B, C, D の FA II 種は既往の研究の値から塩基度の低い（塩基度<0.5）ものを使用した。

(2) 骨材

骨材は，細骨材として香川県さぬき市多和東谷産川砂（密度：2.60g/cm³，F.M：3.21）を使用した。即脱成型平板に使用する粗骨材は，通常のコンクリート用粗骨材と異なり，2mm から 7mm 範囲の骨材径である。本研究では，2mm から 7mm の徳島県美馬郡美馬町産碎石（密度：2.60g/cm³，F.M：3.21）を使用した。

(3) 水及びアルカリ刺激剤

水は，一般家庭用の水道水を使用した。アルカリ刺激剤には，水酸化ナトリウム水溶液（モル濃度：8.0mol/l，濃度：24.0%）を使用した。

2.2 コンクリートの配合

使用したコンクリートの配合を表-2 に示す。

配合は，既往の研究¹⁾の配合を使用した。

2.3 練混ぜ方法

コンクリートの練混ぜには，50 リットル用パン型ミキサーを用いて行った。練混ぜ時間は，全粉体（FA II 種，高炉スラグ微粉末，二水石膏）と骨材を投入して 2 分間，アルカリ刺激剤（水酸化ナトリウム水溶液）と水を加えて 4 分間の合計 6 分間とした。

2.4 締固め方法と供試体の寸法

締固めは，小型コンクリート平板の試作機として用いられている改良型即脱成型機を使用した。振動装置の振動条件は，周波数 50Hz，振幅 1.4mm で一定とした。また，即脱成型平板供試体は 2 層に分けて振動を行い，その振動時間は，1 層目の振動時間 2 秒，2 層目の振動時間 3 秒の合計 5 秒とした。

即脱成型平板供試体の寸法は，200×200×60mm である。

2.5 養生方法

養生方法は即脱成型機で供試体を作製後，成型用の鉄製パレットに置いた供試体をビニールで覆うようにし，外気に触れないように養生した（包装養生）。この養生条件で，所定の材齢（材齢 7，28 日）まで養生を行った。

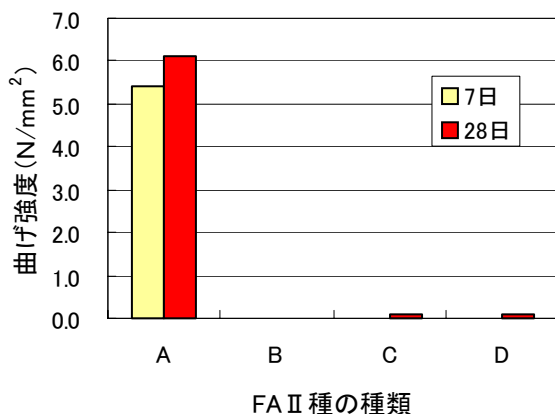


図-1 FA II 種別の圧縮強度試験結果

2.6 曲げ強度試験

曲げ強度試験は、社団法人インターロッキングブロック舗装技術協会のインターロッキングブロック舗装設計施工要領「インターロッキングブロックの曲げ試験方法」に準拠して行った。

2.7 試験結果及び考察

図-1 に 4 つの FA II 種を使用した曲げ強度試験結果を示す。A の FA II 種を使用したものは、材齢 7 日で社団法人インターロッキングブロック舗装協会の規格 5N/mm^2 を超えたが、その他の FA II 種を使用したものは、全く強度の伸びないものや B を使用したものでは硬化しない結果となった。B, C, D の 3 つの FA II 種については、塩基度の低い (塩基度 <0.5) ものを使用していることから、アルカリ刺激剤を使用した配合¹⁾であっても、塩基度の影響により硬化しない場合や強度が伸びなかったと思われる。以上から、平塚らが提案するノンセメント即脱平板用の配合は、FA II 種の品質によっては多量に有効利用できない場合もあると考えられる。

3. 配合の検討と各種性能試験 (シリーズ 2)

FA II 種の品質影響を受けない最適配合の検討とその配合を使用したノンセメント即脱平板の各種性能試験を行った。

3.1 使用材料、コンクリートの配合及び供試体の形状寸法

(1) セメント代替材及びセメント、骨材

セメント代替材の FA II 種、二水石膏及び細骨材と粗骨材は、全て (シリーズ 1) と同様のものを使用した。高炉スラグ微粉末は、高炉スラグ微粉末 4,000 (密度: 2.91g/cm^3 , 比表面積: $3,920\text{cm}^2/\text{g}$, 以降 BS4 と称す) と高炉スラグ微粉末 8,000 (密度: 2.91g/cm^3 , 比表面積: $8,330\text{cm}^2/\text{g}$, 以降 BS8 と称す) の 2 種類を使用した。BS8 を使用することにより、硬化の促進と強度増進を考慮して使用した。

また、比較検討用としてセメント即脱平板用も作製した。セメントは、普通ポルトランドセメント (密度: 3.14g/cm^3) である。

(2) アルカリ刺激剤

アルカリ刺激剤は、(シリーズ 1) で使用した水酸化ナトリウム水溶液の他、塩化ナトリウム水溶液 (モル濃度: 6.3mol/l , 濃度: 27.0%) と水酸化カルシウム水溶液 (モル濃度: 0.02mol/l , 濃度: 0.17%) も使用して行った。

3.2 コンクリートの配合

(シリーズ 1) の結果から、質量粉体比やアルカリ刺激剤の種類とその使用量から、まず硬化状態の悪かった B の FA II 種を使用して合計 13 種類の配合 (表-3) で検討し、C や D の FA II 種にも適用して確認した。

また、比較用のセメント即脱平板用の配合は、全粉体量 (FA II 種、高炉スラグ微粉末、二水石膏) をセメントに置き換えた配合である。

3.3 練混ぜ方法及び締固め方法、養生方法

コンクリートの練混ぜ及び締固め方法は、全て (シリーズ 1) と同様に行った。また、養生方法も同様にし、所定の材齢 (材齢 7, 28 日) まで養生を行った。

3.4 供試体の形状寸法

即脱成型平板供試体の形状寸法は、通常の $200 \times 100 \times 60\text{mm}$ と性能試験用 (磨耗試験, 透水性試験, 保水性能試験) として $300 \times 300 \times 60\text{mm}$ の 2 種類を作製した。セメント即脱平板用も同様の形状寸法の供試体を作製した。

3.6 試験方法及び試験項目

(シリーズ 1) と同様に曲げ強度試験を行っ

表-3 コンクリートの配合

配合名	単位量 (kg/m ³)						
	水	P*			細骨材	粗骨材	混和剤(アルカリ刺激剤)**
		FA	スラグ	石膏			
B①(BS4)	107	257(1)	129(0.5)	26(0.1)	1205	402	× 1.30% (NaOHaq)
B②(BS4)		229(1)	160(0.7)	23(0.1)	1210	403	× 0.78% (NaOHaq)
B③(BS4)		196(1)	196(1)	20(0.1)	1216	405	× 5.00% (NaOHaq) × 0.00042% (Ca(OH) ₂ aq) × 5.00% (NaCl)
B④(BS4)							
B⑤(BS4)							
B⑥(BS4)		187(1)	187(1)	37(0.2)	1214	405	× 5.00% (NaOHaq) × 0.00042% (Ca(OH) ₂ aq) × 5.00% (NaCl aq)
B⑦(BS4)							
B⑧(BS4)							
B⑨(BS4)		196(1)	196(1)	20(0.1)	1216	405	× 5.00% (NaOHaq) × 0.00042% (Ca(OH) ₂ aq) × 5.00% (NaCl aq)
B⑩(BS8)							
B⑪(BS8)							
B⑫(BS8)		187(1)	187(1)	37(0.2)	1214	405	× 5.00% (NaOHaq)
B⑬(BS8)							

配合名：FAⅡ種の種類-配合 No. 1 (高炉スラグ微粉末)

*粉体量中のカッコ内は質量粉体比を示す、**アルカリ刺激剤は、総粉体量 (P) に対して使用

た。その他は、以下の各種性能試験を行った。

(1) 磨耗試験

磨耗試験は、「ASTM C 779 円盤回転式磨耗試験方法」に準拠して行った。磨耗試験では、磨耗深さと試験結果から質量減少率 (%) を算出した。

(2) すべり抵抗試験

すべり抵抗試験は、旧日本道路公団 (KODAN-221-1985) の「英国式ポータブル・スキッドレジスタンステストによる路面のすべり抵抗値 (B.P.N) の測定方法」を参考に行った。すべり抵抗試験では、供試体表面温度を 20℃ とし、すべり抵抗値 (BPN) としてまとめた。

(3) 保水性能試験

保水性試験は、社団法人インターロッキングブロック舗装協会の保水性舗装ブロック品質規格検討委員会「保水性舗装用インターロッキングブロック品質規格」に準拠して行った。

保水性試験では、湿潤質量 (g) と絶乾質量 (g) 及び供試体の体積 (cm³) から保水量 (g/cm³) を算出した。

(4) 透水試験

社団法人日本道路建設業協会透水性舗装ハンドブックの「透水性舗装の現場透水試験方法

(案)」に準拠して行った。

透水性試験では、単位時間当たりの給水量 (ml/s)、単位時間当たりの貯水量 (ml/s)、単位時間当たりの透水量 (ml/s) から透水係数 (cm/s) を算出した。

3.7 試験結果及び考察

(1) 曲げ強度試験結果

図-2 に B の FAⅡ種を使用した配合 13 種類のうち硬化した配合 4 種類と通常のセメント即脱平板の曲げ強度試験結果を示す。ノンセメント即脱平板で曲げ強度を測定できたものは図に示す 4 つの配合であり、その他の配合は供試体が硬化していないものや全く強度がなかったため示していない。図に示す 4 つの配合は全て水酸化ナトリウム水溶液を使用した配合であることから、このような FAⅡ種の硬化促進には水酸化ナトリウム水溶液が有効であると考えられる。

4 つの配合は、材齢 28 日で全て社団法人インターロッキングブロック舗装協会の規格³⁾5N/mm² を超え、特に BS8 を使用した配合名：B⑬(BS8) は初期強度が高く、セメント即脱平板の結果と変わらなかった。B の FAⅡ種を使用した場合、既往の研究¹⁾の配合では硬化しないなど他の FAⅡ種を使用した場合に比べ最も状態が悪かったが、この配合では十分な初期強度を

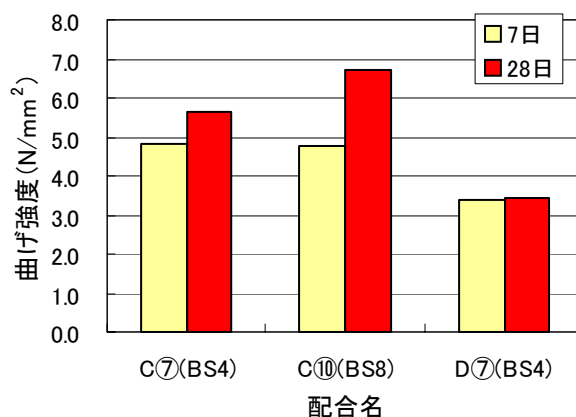
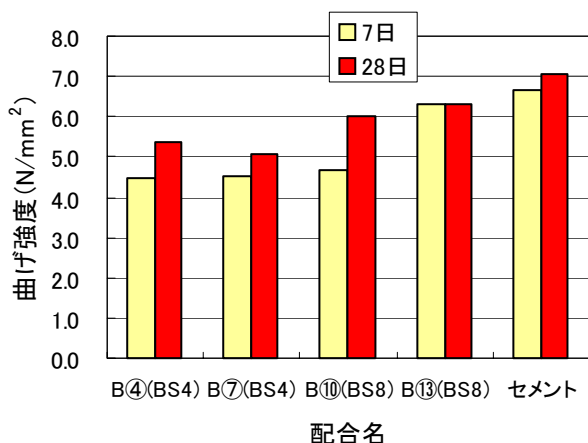


図-2 配合と圧縮強度試験結果 (BのFAⅡ種)

図-3 配合と圧縮強度試験結果 (C, DのFAⅡ種)

表-4 各種性能試験結果

項目	ノンセメント	セメント	規格値(規格法)	
寸法・幅 (mm)*	2.00	1.86	±2.5mm 以内	インターロッキング ブロック協会
寸法・長さ (mm)*	2.29	2.17	±2.5mm 以内	
厚さ (mm)*	3.50	4.79	±2.5mm 以内	
曲げ強度 (N/mm ²)	6.31	6.33	5.0MPa 以上	
保水量 (g/cm ³)	0.17	0.15	0.15g/cm ³	
透水係数 (cm/sec)	0.007	0.010	0.010cm/sec 以上	ASTM C-779
質量減少率 (%)	0.99	0.77	—	
すべり抵抗値 (BPN)	73.20	75.72	60 または 40 以上**	KODAN-221-1985

*供試体寸法の幅 (100or300mm), 長さ (200or300mm), 厚さ (60mm) に対する誤差の平均

**車道及び駐車場用: 60 (BPN) 以上, 歩道用: 40 (BPN) 以上

確保できた。そのため、配合名: B⑬(BS8)をFAⅡ種の品質の影響に有効な配合とし、CやDのFAⅡ種を使用した場合には、この配合を除いた他の配合で検討した。(図-3) その結果、BS4を使用した場合は初期強度が低く、またBS8を使用した場合でも質量粉体比によって材齢7日で5N/mm²を超えなかった。

一般に即脱成型平板では初期強度が要求される。よって、FAⅡ種の品質の影響を考慮した配合としては、初期の材齢で十分に硬化し、材齢7日の強度が最も高い配合(水酸化ナトリウム水溶液を全粉体量に対して5%使用、質量粉体比がFAⅡ種:スラグ:石膏=1:1:0.2)を最適配合とした。以下にこの配合を使用して各種性能試験を行った。

(2) 性能試験結果

表-4は最適配合を使用して材齢28日で行っ

た即脱成型平板の性能試験結果、図-4は磨耗試験結果から質量減少率と経過時間の関係を示したものである。表と図中のノンセメントはノンセメント即脱平板の試験結果、セメントはセメント即脱平板の試験結果を意味する。表中の規格値は、普通インターロッキングブロックを基準とした規格値である。また、透水係数は透水性インターロッキングブロックを基準とした。

保水性能試験結果の保水量やすべり抵抗試験結果のすべり抵抗値は、規格値を満たしており、特にすべり抵抗値は車道及び駐車場用に適用できるほどの高い値を示した。透水性試験結果の透水係数は、規格値を満たしていないが、この即脱成型平板は透水性能を満たすだけの空隙を確保していないことから、透水性のインターロッキングブロックへの適用はできない。供試体の寸法では、厚さの誤差がノンセメントとセメ

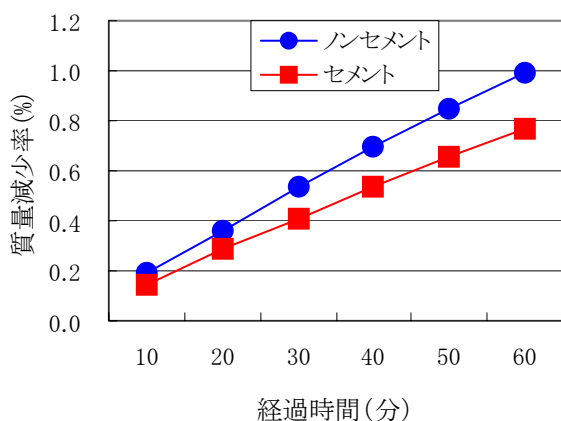


図-4 質量減少率と経過時間の関係

ント即脱平板の両方で規格値を超えている。これは、型即脱成型機での供試体の1層目と2層目の各層の締固め量の影響と考えられるが、今後、更に詳しい検討が必要である。

一方、磨耗試験結果に関しては、試験開始時から常にノンセメント即脱平板の質量減少率が大きい値を示した。これは、材齢28日の曲げ強度試験の結果に比例しており、セメント即脱平板は強度が高く、より表面が緻密であったためと考えられる。しかし、ノンセメント即脱平板の試験終了後の質量減少率は1.0%以下と小さい値であったことや試験中に粗骨材が剥がれこともなく、磨耗深さも均等であったことから、FAⅡ種を使用したことによりノンセメント即脱平板は骨材との付着もよく、表面も十分に緻密であったと考えられる。磨耗試験の質量減少率の基準となる規格値は設けられていないが、セメント即脱平板と比較して質量減少率と磨耗深さに大きな違いがないことから、ノンセメント即脱平板の耐摩耗性は高いと考えられる。

以上の結果から、FAⅡ種の品質の影響を考慮した最適配合を使用したノンセメント即脱平板の各種性能は、セメント即脱平板の性能とほぼ同程度であり、基準の規格値を満たしている。よって、普通用インターロッキングブロックとして十分実用可能である。

4. まとめ

本研究で既往の研究により用いられているノンセメント即脱平板用の配合を使用し、FAⅡ種の品質影響の検討、FAⅡ種の品質に影響されない最適配合とその配合を使用して各種性能試験を行った結果を以下にまとめる。

- (1) 既往の研究で用いられているノンセメント即脱平板用の配合は、FAⅡ種の品質の影響を受け、全く異なる曲げ強度になった。
- (2) FAⅡ種の品質の影響を考慮した最適配合は、材齢7日で十分な曲げ強度を確保できる。
- (3) FAⅡ種の品質の影響を考慮した最適配合で作製したノンセメント即脱成型平板は、普通インターロッキングブロックとして十分実用可能である。

謝辞

本研究を行うにあたり、ご協力を頂きました東洋工業株式会社の平塚和男博士(工学)をはじめとする関係各位に深謝申し上げます。

また、本研究の一部は、日本学術振興会平成17年度科学研究費補助金の基盤研究(B)(2)(課題番号:17360205, 研究代表:橋本親典)に基づき実施されたものであることを付記し、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 平塚和男, 寺石弘, 橋本紳一郎, 橋本親典: 産業副産物をセメント代替として有効利用した即脱成型平板の実用化に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.26, No.1, pp.1485-1490, 2004.6
- 2) 橋本紳一郎, 橋本親典, 渡辺健, 石丸啓輔: フライアッシュを用いたノンセメント硬化体の配合に関する検討, 土木学会第60回年次学術講演会, pp.855-856, 2005.9
- 3) インターロッキングブロック舗装技術協会: インターロッキングブロック舗装設計施工要領, 2000