

リサイクルFAコンクリート舗装 の実用化研究

吉武 勇¹

¹山口大学大学院准教授 創成科学研究科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1)

E-mail: yositake@yamaguchi-u.ac.jp

本研究の主な目的は、フライアッシュ (FA) をできるだけ大量使用し、さらにセメント原料としてリサイクルできるコンクリート舗装を開発することである。その開発・実用化に向けた研究として、本研究では石灰石骨材を用いたFAコンクリート舗装の初期～長期強度発現性や耐摩耗性・すべり抵抗性を調べるとともに、同コンクリートを主原料として、ポルトランドセメントの試製を行い、セメント原料としてのリサイクル可能性について確認した。

キーワード: コンクリート舗装, フライアッシュ, 曲げ強度, 摩耗, リサイクル

1. はじめに

石炭火力発電所から定常的に排出される石炭灰のうち、約9割を占めるフライアッシュ (FA) は、環境負荷低減の観点から、その有効活用が求められる。コンクリート舗装の多くは、鉄筋をほとんど用いず中性化対策を必要としないことから、セメントの一部代替材としてFAの大量使用が期待できる可能性が高い。そこで本研究では、FAをセメント代替材としてできるだけ大量活用し、セメント量の低減を図ったコンクリート舗装を目指すこととした。これは製造時に大量のCO₂を排出するセメントの使用量をできるだけ少なくできるコンクリート開発の一環でもある。

ここで、コンクリート舗装に石灰石起源の骨材のみを用いれば、解体後のコンクリート塊すべてがセメント原料として使用可能となり、完全リサイクルコンクリートが製造できる可能性も考えられる。

一方、FAをセメント代替材として用いることで、施工後に早期交通解放が求められる道路舗装への適用が困難となる。本研究では、石灰石骨材を用いたFAコンクリート舗装の初期～長期強度発現性を明らかにするとともに、耐摩耗性・すべり抵抗性を調べた。さらに、セメント原料としてのリサイクル可能性を明らかにするため、試験後のコンクリートを主原料として、ポルトランドセメントの試製を行い、その化学・物理特性を調べ、セメント原料としてのリサイクル可能性について確認した。

表-1 FAの物性値

	三隅産	小野田産
密度	2.18 g/cm ³	2.22 g/cm ³
ブレン値	3440 cm ² /g	3530 cm ² /g
化学組成		
ig.loss	2.70 %	2.50 %
SiO ₂	58.2 %	63.9 %
Al ₂ O ₃	23.3 %	22.5 %
Fe ₂ O ₃	3.19 %	4.47 %
CaO	0.98 %	1.33 %
K ₂ O	1.38 %	1.04 %
MgO	0.55 %	0.81 %
SO ₃	0.24 %	0.27 %
Na ₂ O	0.19 %	0.53 %

表-2 セメントおよび石灰石微粉末の物性値

	セメント	石灰石微粉末 (LP)
密度	3.15 g/cm ³	2.70 g/cm ³
ブレン値	3185 cm ² /g	5000 cm ² /g
凝結時間	2h. 19m. - 3h. 22m.	N/A
化学組成		
CaO	64.3 %	55.62 %
SiO ₂	20.4 %	0.09 %
Al ₂ O ₃	5.7 %	0.010 %
Fe ₂ O ₃	2.9 %	0.013 %
MgO	1.08 %	0.35 %
SO ₃	1.89 %	0.00 %
Cl ⁻	0.017 %	0.00 %
ig.loss	2.25 %	43.8 %

表-3 曲げ強度試験に用いたコンクリートの配合

Mix. ID	M-0	M-1	M-2	M-3
FA/cm	0.0	0.4	0.47	0.4
w/cm	0.33	0.33	0.29	0.40
W, kg/m ³	110	110	110	135
C, kg/m ³	334	200	200	202
FA, kg/m ³	0	134 ^a	174 ^a	136 ^b
LP ^b , kg/m ³	50	50	0	0
S, kg/m ³	843	820	820	725
G, kg/m ³	1062	1033	1033	1138
HRWRA, kg/m ³	4.68	4.01	3.34	1.86
AEA, kg/m ³	1.23	1.20	2.00	1.27

a: 三隅産, b: 小野田産



図-1 往復チェーン型ラベリング試験

2. 実験方法

(1) 使用材料

本研究では使用したフライアッシュFAは、中国電力株式会社の三隅発電所産¹⁾および新小野田発電所産²⁾のものであり、いずれもJIS A 6201のII種規定を満足するものである。FAの物性値を表-1に示す。また、主に普通ポルトランドセメントを使用し、初期強度改善のために、石灰石微粉末(LP)も使用した。使用したセメントおよびLPの諸物性値を表-2に示す。

さらにセメント原料としてリサイクル可能な舗装コンクリートを実現するために、骨材にはすべて石灰石骨材を使用した。細骨材は密度2.60 g/cm³, F.M. 2.90, 吸水率2.4%の石灰砕砂, 粗骨材は密度2.68 g/cm³, F.M. 6.60, 吸水率0.53%の石灰砕石である。コンクリートの乾燥収縮および熱膨張係数の低減に効果がある石灰石骨材は、ひび割れ抵抗性の向上や目地間隔の大きいコンクリート舗装を実現することができる可能性がある。また、一般的な舗装コンクリートに求められるフレッシュ性状(スランプ2~6.5cm, 空気量4.5±1.5%)を満足するように、ポリカルボン酸系の高性能AE減水剤と高級脂肪酸系のAE剤を用いて配合の調整を行った。

(2) 曲げ強度試験

本研究では、JIS A 1106に準じて静的曲げ強度試験(3等分点载荷)を行った。試験に用いたコンクリートの配合を表-3にまとめて示す³⁾。コンクリートの練混ぜには強制二軸ミキサを使用し、セメント, FA, LPおよび細骨材を投入し30秒空練り後、水および混和剤を加えてさらに180秒間の練混ぜによりモルタルを作製した。その後、15mmメッシュで二分割した粗骨材(2015:1505=1:1)を加え180秒間の練混ぜを行った。100×100×400mmの角柱供試体を作製し、コンクリート打設後20℃の養生室内に1日間静置した上で脱型し、試験材齢まで20℃水中養生を施した。なお、

表-4 ラベリング試験用コンクリートの配合

No.	0	1	2	3	4
Mix. ID	C.M. ^a	FA0-0	FA20-67	FA40-134	FA40-154
FA/cm	0%	0%	20%	40%	40%
w/cm	0.42	0.33	0.33	0.33	0.33
W kg/m ³	134	110	110	110	127
C kg/m ³	320	334	267	200	230
FA kg/m ³	0	0	67	134	154
LP kg/m ³	0	50	50	50	50
S kg/m ^{3 d}	701	871	850	820	727
G kg/m ³	1223	1033	1029	1033	1034
Ad kg/m ³	3.20	4.34	4.68	4.01	4.22
スランプ	0.5 cm	3.0 cm	1.0 cm	2.5 cm	4.5 cm
空気量	2.8%	4.0%	4.1%	3.4%	4.3%

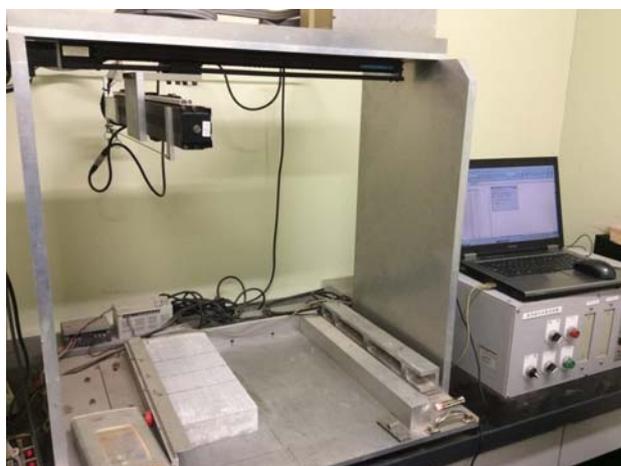


図-2 非接触型レーザースキャナー

M-0・1・2配合(w/cm=29~33%)の舗装コンクリートは、スランプ2cmレベルの硬練りコンクリートであるが、施工性の向上を考慮して、水結合材比(w/cm)を40%としてスランプを6.5cmレベルとしたM-3についても同様の検討を行った。

(3) ラベリング試験・すべり抵抗性試験

石灰石を用いたコンクリートは、比較的摩耗損傷が大きく、コンクリート舗装には不適切とされている。一方、セメント原料としてリサイクル可能なコンクリ

ート舗装を実現するには、石灰石骨材を用いることが最も合理的な手段である。そこで本研究では、セメント原料としてリサイクル可能な舗装コンクリートの耐摩耗特性を調べるため、アスファルト舗装の試験でしばしば用いられる往復チェーン型ラベリング試験(図-1)を行った⁴⁾。このラベリング試験は、66回/分で往復移動するコンクリート板に対して、12本のチェーンを備えた盤が200rpmで回転しながら摩耗損傷を与えるものである。この試験では、400×150×50mmのコンクリート板について、打設直後にコンクリート表面層の目荒らしを行った供試体を用いた。なおラベリング試験に用いたコンクリートの配合は、表-4に示すものであり、比較のため硬質砂岩砕石および海砂を用いた基準コンクリート(C.M.)も検討に加えた。

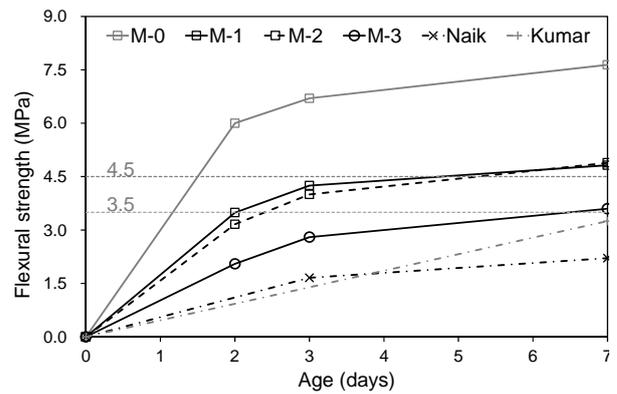
本研究では、各配合のコンクリート板供試体2体について、ラベリング試験時間0, 15, 45, 90分における摩耗損傷量を、図-2に示す非接触型レーザースキャナーを用いて凹凸の変化を調べた。

さらに上記のラベリング試験において摩耗損傷したコンクリート板供試体について、すべり抵抗性を定量化するため、しばしば舗装のすべり抵抗性指標として用いられるBritish Pendulum Number(BPN)を調べた。なお、本研究では乾燥および湿潤状態にあるコンクリート表面のすべり抵抗値(BPN)をそれぞれ調べた。

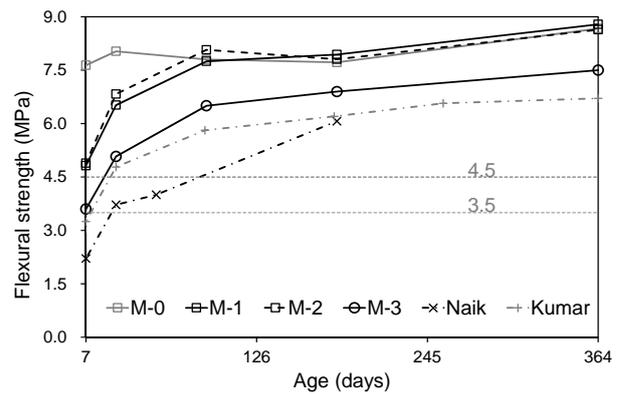
(4) リサイクルセメント試製と化学・物理試験

本研究で作製した舗装コンクリートのセメント原料としての利用性を調べるため、試験後のコンクリート塊(M-1・M-3)を用いて、リサイクルセメントの試製を行った。まずセメント試製にあたり、同コンクリートの化学成分分析を行った。この分析試験では、塊状の試料に対して、105℃で24時間程度の炉乾燥を行った後、ボールミルを用いて粉砕し、90μmふるいの残分が25~30%程度となるように行った。JIS R 5202:2010(セメントの化学分析方法)に準拠して、成分分析を行った。セメント原料としての利用の可能性を確認した後、同コンクリート塊を石灰石代替材として用いてクリンカーの試製を行った。

さらに試製したクリンカーに石こうと粉砕助剤を添加し、ブレン比表面積の一般的な値3400cm²/g程度を目標にボールミルを用いて粉砕することにより、リサイクルセメントを作製した。ここで作製したリサイクルセメントについて、JIS R 5202:2010(セメントの化学分析方法)に準拠して化学成分を調べるとともに、JIS R 5201:1997(セメントの物理試験方法)に準拠して物理試験も行った。



(a) 初期強度



(b) 長期強度

図-3 曲げ強度試験結果

3. 実験結果および考察

(1) 曲げ強度試験

静的曲げ強度試験結果を図-3に示す。なお、比較のためNaikら⁵⁾およびKumarら⁶⁾の行ったFA置換率40%の舗装コンクリートの曲げ強度を併記している。本研究で主対象とした舗装コンクリートは、単位セメント量が200kg/m³程度と少ないため、材齢7日の静的曲げ強度は、標準的なコンクリート舗装の設計基準曲げ強度4.5MPaを満足しているものの、FA無置換の舗装コンクリート(M-0)よりも著しく小さくなった。しかしながら、交通開放できる3.5MPa(=4.5MPa×1.15×70%)⁷⁾は材齢2日で達している。一方、材齢M-0の配合では、材齢28日以降の静的曲げ強度の増加はほとんどみられないが、M-1・M-2の配合では、材齢28日の静的曲げ強度は6.5MPa程度となり、FA無置換の舗装コンクリート(M-0)の材齢28日静的曲げ強度8.0MPaより小さかったが、それ以降でも静的曲げ強度の増進がみられた。そして、材齢91日ではFA無置換のコンクリート(M-0)と同等のレベルまで強度増進しており、材齢364日においてはM-0を上回った。なお、M-3のFAコンクリート舗装では、水結合材比(w/cm)が40%と高く、他と単純比較はできないものの、材齢28

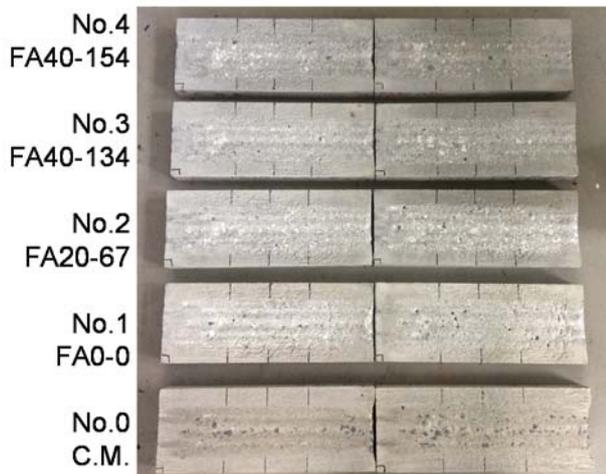
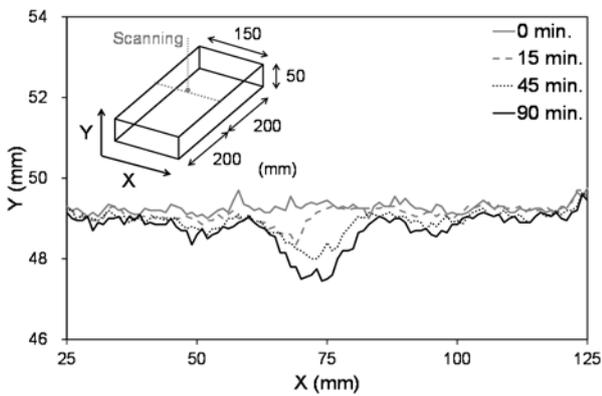
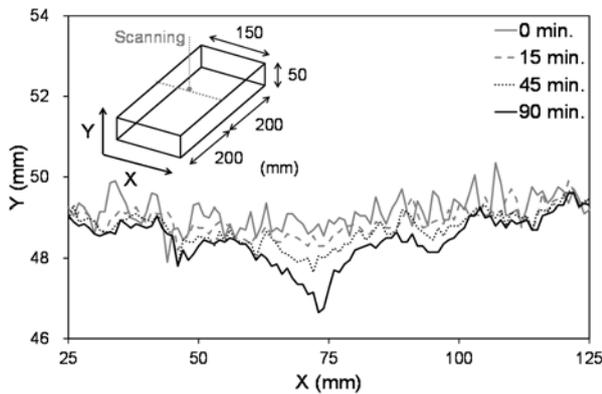


図-4 ラベリング試験後のコンクリート表面状態



(a) C.M.



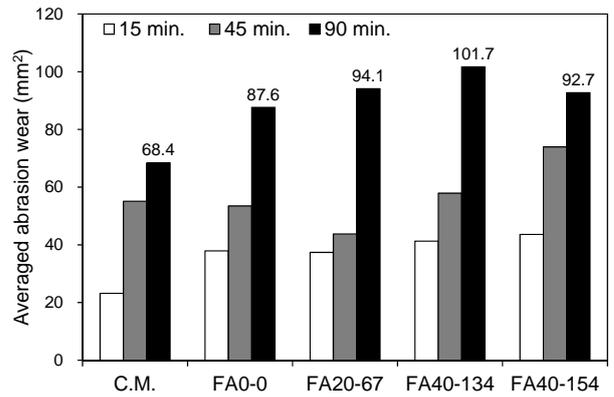
(b) FA40-134

図-5 ラベリング試験におけるコンクリート断面の変化

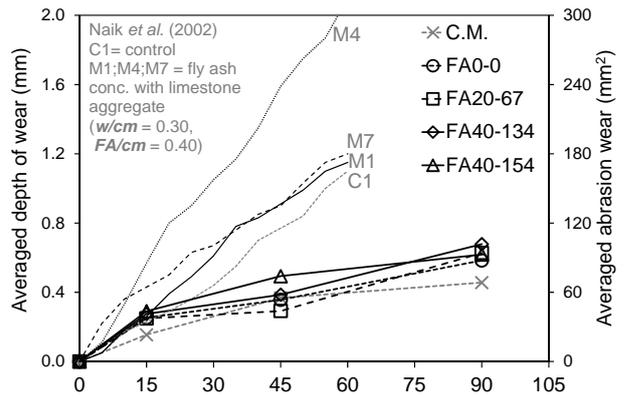
日において4.5MPaは満足し、それ以降の強度増進も確認された。

(2) 実験結果および考察

ラベリング試験後におけるコンクリートの摩耗損傷の様子を図-4 に示す。またコンクリート中央断面の変化を図-5 に例示する。さらに図-6 には本研究で実施したラベリング試験における平均摩耗量・摩耗深



(a) 摩耗量の変化



(b) 摩耗量の比較

図-6 ラベリング試験における摩耗深さ

さの変化をまとめて示す。なお図-6 (b)中には試験方法が異なる Naik ら⁸⁾の研究結果を併記している。これらの結果に示すように、一般的な硬質砂岩を用いたコンクリートと比べて、石灰石を用いた舗装コンクリートは摩耗量が若干高くなる傾向にある。特に図-5 に示すように FA 置換率の増加に応じて、摩耗量が高くなっていることから、一般に摩耗抵抗性が低い石灰石骨材を使用したことに加え、ペーストマトリックスの強度（摩耗抵抗性）が低下したことが要因の一つと考えられる。

(3) すべり抵抗性 (BPN) 試験

すべり抵抗性を示す BPN 試験結果を図-7 に示す。粗面仕上げの表面状態によって、摩耗前の BPN 値は異なる値を示したが、すべてのコンクリートについて摩耗時間の経過に伴い BPN 値が低下する傾向を示した。なお、すべてのコンクリートについて、摩耗時間 90 分後の供試体の表面状態は、ほうき目がなくなり粗骨材の露出がみられたが、摩耗試験後のすべり抵抗性の変化におよぼす石灰石骨材の影響は小さいものであった。このことから、石灰石骨材を用いることで摩耗量は若干大きくなる傾向は認められるが、すべり抵

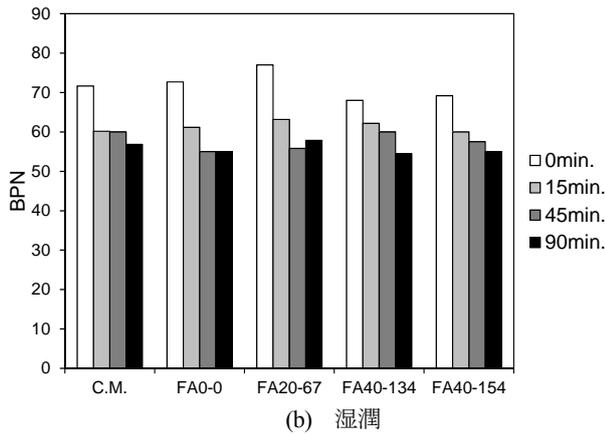
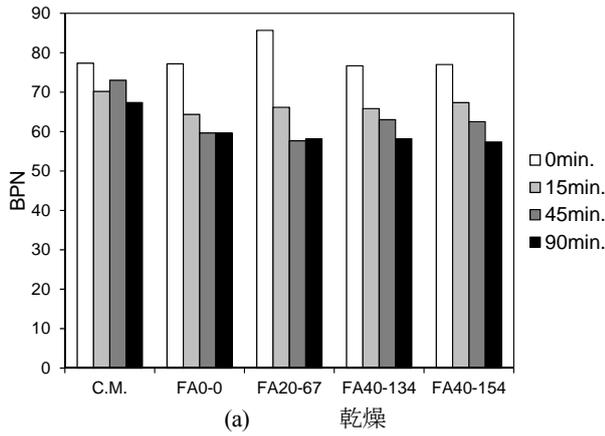


図-7 BPN 試験結果

抗値の低下におよぼす影響は小さいため、初期の目荒らし（ほうき目）を充分に行っておけば、一般的なコンクリート舗装と遜色ないすべり抵抗性が得られるものと推察される。

(4) リサイクルセメントの化学試験

M-1およびM-3配合のFAコンクリート舗装の試験片を用いて試製したクリンカーおよび（リサイクル）セメントの化学成分分析結果を表-5に示す。なお、同表にはJIS R 5210に規定されるポルトランドセメントの規準も併記する。これらの結果より、試製したリサイクルセメントは、JIS規準を十分に満足している。またこの化学成分分析結果に基づいて、Bogue式を用いて求めた鉱物組成の結果においても、FA種類や水結合材比（*w/cm*）の異なる配合であっても、化学成分に有意な差異がみられず、本研究のFAコンクリート舗装はセメント原料としてリサイクル可能であることが窺えた。

(5) リサイクルセメントの物理試験

試製した2種類のリサイクルセメントについて、JIS R 5201:1997（セメントの物理試験方法）に準拠して物理試験も実施した。リサイクルセメントの物理試験結

表-5 クリンカー・リサイクルセメントの化学成分

unit (%)	M-1		M-3		JIS R 5210
	クリンカ	セメント	クリンカ	セメント	セメント
ig.loss	0.12	1.21	0.29	1.14	< 5.0 %
SiO ₂	22.52	21.45	22.73	21.77	N/A
Al ₂ O ₃	5.42	5.16	5.14	4.99	N/A
Fe ₂ O ₃	2.96	2.93	2.85	2.75	N/A
CaO	66.04	64.41	66.46	65.04	N/A
MgO	0.83	0.79	0.90	0.88	< 5.0 %
SO ₃	0.67	2.57	0.43	2.24	< 3.5 %
Na ₂ O	0.32	0.31	0.30	0.26	N/A
K ₂ O	0.48	0.52	0.33	0.33	N/A
R ₂ O	0.64	0.65	0.52	0.48	< 0.75 %
TiO ₂	0.29	0.27	0.24	0.25	N/A
MnO	0.05	0.05	0.05	0.04	N/A
P ₂ O ₅	0.16	0.15	0.12	0.11	N/A
Cl	N/A	0.00	N/A	0.00	< 0.0035 %

表-6 リサイクルセメントの物理試験

	M-1	M-3	JIS R 5210
密度	3.12 g/cm ³	3.13 g/cm ³	N/A
ブレン値	3320 cm ² /g	3350 cm ² /g	> 2500 cm ² /g
90μm 残分	0.6 %	1.1 %	N/A
凝結始発 - 終結	1h. 53m. - 2h. 53m.	2h. 15m. - 3h. 12m.	60m. - 10h.
安定性	良	良	良
圧縮強さ			
3日	32.5 MPa	28.5 MPa	> 12.5 MPa
7日	47.5 MPa	43.8 MPa	> 22.5 MPa
28日	61.5 MPa	60.2 MPa	> 42.5 MPa
曲げ強さ			
3日	6.7 MPa	5.7 MPa	N/A
7日	8.0 MPa	7.9 MPa	N/A
28日	9.0 MPa	9.2 MPa	N/A
フロー値	208 mm	216 mm	N/A

果を表-6に示す。なお、同表にも同様にJIS R 5210に規定されるポルトランドセメントの規準も併記する。この結果より、リサイクルセメントの密度は一般的な普通ポルトランドセメントより若干小さい傾向にあるが、凝結性や安定性についても異常はなく、各JIS規準値を満足できたことから、いずれのリサイクルセメントも利用可能であることがわかった。現実的には、石灰石代替材としてFAコンクリート舗装塊のみでポルトランドセメントを製造することはほとんどないものと推察されるが、本研究のFAコンクリート舗装は、セメント製造における石灰石代替材としての利用可能性があることがわかった。将来的なセメント製造における原材料として、本FAコンクリート舗装がストックヤードとして活用することも有意な方法の一つと考えられる。

4. まとめ

本研究では、将来ポルトランドセメント製造の主原料として、石灰石の代替材となるようなFAコンクリート舗装の基本的性質を調べた。本研究の範囲内で得られた結論を以下に要約する。

- (1) セメント置換率40%のFAコンクリート舗装でも、長期材齢においてFAを用いない舗装コンクリートと同等以上の曲げ強度を示す。
- (2) 石灰石骨材を用いるFAコンクリート舗装は、硬質砂岩と用いたコンクリート舗装より摩耗しやすい傾向にあるが、そのすべり抵抗性には一般的な舗装コンクリートと有意な差異はみられない。
- (3) FAコンクリート舗装を用いて試製したリサイクルセメントは、化学成分および物理試験ともに、JIS R 5210ポルトランドセメントの規定値を充分満足できる。

本研究では、生産地の異なる2種類のFAを用いた実験的研究であるが、いずれも単一ロットで製造されたものであり、基本的にFAの品質はほぼ一定のものであった。一方、FAコンクリートの普及を妨げる一要因に、FAの品質変動があり、これらの影響を舗装コンクリートの配合設計にどのように反映させていくかが実務上の課題として挙げられる。さらに本研究のFAコンクリート舗装は、一般的なコンクリート舗装に比べて、極端に単位水量や単位セメント量が少ないものであり、練上がり時の粘性も高い。このような材料を用いて舗装を施工する場合の実務的課題についても今後いっそう検討していく必要があると考えている。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、中国電力株式会社・前田道路株式会社・宇部興産株式会社・宇部マテリアルズ株式会社・萩森興産株式会社・サンヨー宇部株式会社の方々に御協力頂いた。また実験においては、山口大学工学部施設材料学研究室の卒業・修了生に協

力頂いた。なお本研究は一般社団法人中国建設弘済会の技術開発支援制度の研究助成を頂いたものであり、また研究の一部は、JSPS科研費 基盤C26420437（研究代表：吉武勇）の助成を受けて実行したものである。ここに深甚の謝意を表す。

参考文献

- 1) Yoshitake I., Ishida T. and Fukumoto S.: Recyclability of Concrete Pavement Incorporating High Volume of Fly Ash, *Materials*, MDPI, Vol.8, No.8, pp.5479-5489, 2015.
- 2) Yoshitake I., Fukumoto S., Ishida T. and Yamato K.: Experimental Investigation of a Recyclable Fly-Ash Concrete Pavement Having Moderate Slump, *11th International Conference on Concrete Pavement*, 2016.
- 3) 時國裕也, 上野沙也加, 牛尾祐大, 福本直, 吉武勇: 石灰石微粉末を用いて初期強度を改善したFA置換率40%の舗装コンクリートの曲げ強度特性, *材料*, Vol.63, No.10, pp.710-715, 2014.
- 4) Yoshitake I., Ueno S., Ushio Y., Arano H. and Fukumoto S.: Abrasion and Skid Resistance of Recyclable Fly Ash Concrete Pavement Made with Limestone Aggregate, *Construction and Building Materials*, Elsevier, Vol.112, pp.440-446, 2016.
- 5) Naik, T.R., Ramme, B.W. and Tews, J.H.: Pavement Construction with High-Volume Class C and Class F Fly Ash Concrete, *ACI Materials Journal*, Vol.92, pp.200-210, 1995.
- 6) Kumar, B., Tike, G. K. and Nanda, P.K.: Evaluation of Properties of High-volume Fly-ash Concrete for Pavements, *ASCE Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol.19, No.10, pp.906-911, 2007.
- 7) セメント協会 舗装技術専門委員会報告R-27: 早期交通開放が可能なコンクリート舗装に関する調査研究, 2010.
- 8) Naik, T.R., Singh, S.S., and Ramme, B.W. Effect of source of fly ash on abrasion resistance of concrete, *ASCE Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol.14, No.5, pp.417-42, 2002.