

# 製紙スラッジ焼却灰による廃棄生コンクリートの 処理方法に関する実験的研究

浦野 登志雄\* 岩部 司\* 武宮 良介\*\*

## Experimental Study on Recycle of Waste Fresh Concrete Mixed with Pulp-sludge Ash

Toshio Urano\*, Tsukasa Iwabe\*, Ryouzuke Takemiya\*\*

Pulp-sludge ash generated from paper manufacturing process is handled as an industrial waste. For using the pulp-sludge ash effectively, we examined the properties of ground materials made by mixing waste fresh concrete with the sludge ash. As the results, the sample of waste concrete mixed with the sludge ash was found to be effective.

キーワード：産業廃棄物，リサイクル，製紙スラッジ焼却灰

Keywords：Industrial Waste, Recycle, Pulp-sludge Ash

### 1. はじめに

生コン工場では、建設現場で発生する廃棄生コンクリート（以下、残りコンクリートと称す）と洗車時に発生する生コンスラッジの処理が問題となっている。一方、製紙工場においては、紙の製造過程で大量の製紙スラッジが発生している。製紙スラッジは、脱水の過程を経て高温焼却されるが、この時発生する焼却灰を一般に製紙スラッジ焼却灰（Pulp-sludge Ash：PSA）と呼び、一部はセメント原料として再利用されている。

PSA は焼却温度の関係で、フライアッシュ（FA）のように、その粒子がガラス質でなく、高い吸水性を有していることが特徴である。これまでの研究で、この特徴を生かした PSA を混和材料として用いた緑化基盤用ポーラスコンクリートの実験結果について報告した<sup>(1)・(2)</sup>。本報告では、吸水性が高い PSA の特徴を活かした残りコンクリートの処理方法を提案する。工事現場で発生した残りコンクリートは、生コン工場に搬送後、無筋簡易ブロックなどの製造に使用されるほか、骨材は回収され水洗後再利用されることもあるが、このときに汚水槽に大量の生コンスラッジが発生する。生コンスラッジは、脱水後管理型処分が必要となるため、高額な処分費用が発生し問題となっている。このため、残りコンクリートの処理方法として、PSA と混合すること

表 1 PSA の主な成分

密度 (g/cm <sup>3</sup> )	比表面積 (m <sup>2</sup> /g)	強熱減量 (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)
2.31~2.38	0.23~0.33	2.4~3.9	39~43	30~33	1.2~1.4
CaO (%)	MgO (%)	SO <sub>3</sub> (%)	Na <sub>2</sub> O (%)	K <sub>2</sub> O (%)	Cl (%)
8.7~10.0	5.6~8.8	0.81~4.0	0.43~0.55	0.19~0.23	0.12~0.16

によって造粒固化を行い、再生路盤材料としてのリサイクルの可能性について調べた。

### 2. 製紙スラッジ焼却灰（PSA）を混入したコンクリートの特性

#### 2.1 実験概要

既往の研究<sup>(3)</sup>で PSA を混合した場合、同一のスランプを得るための単位水量と AE 減水剤添加量が増加することを示した。このように PSA は吸水量が大きいので、予備実験としてコンクリートの練り混ぜ水量に対する質量比で段階的に PSA を添加し、コンクリートのフレッシュ性状および圧縮特性を調べた。また、比較のために、フライアッシュ（FA）・廃石膏を同様に添加して実験を行った。表 1 に X 線回折による PSA の成分分析結果（試料数 5）を示す。PSA は一般に JIS 規格 FA と比べると密度がやや大きく、比表面積は小さい傾向にある。また、化学成分については SiO<sub>2</sub> が少なく、CaO と MgO が多く含まれていることが特徴である。

#### 2.2 実験方法

表 2 に使用材料を、表 3 に残りコンクリートを想定して作製したコンクリートの使用割合を示す。このコンクリートに対して、PSA、FA、廃石膏を練り混ぜ水量に対する質

\* 建築社会デザイン工学科  
〒866-8501 熊本県八代市平山新町 2627  
Dept. of Architecture and Civil Engineering,  
2627 Hirayama, Yatsushiro-shi, Kumamoto, Japan 866-8501

\*\* 専攻科生産システム工学専攻  
〒866-8501 熊本県八代市平山新町 2627  
Dept. of Mechanical and Intelligent Systems Engineering,  
2627 Hirayama, Yatsushiro-shi, Kumamoto, Japan 866-8501

量比で段階的に後添加し、それぞれのスランプと空気量を測定した。また、供試体型枠に打設可能な試料については、φ100×200mmの円柱供試体を作製し、材齢7日、28日、91日で圧縮強度とヤング係数を測定した。圧縮強度試験はJIS A 1108に従い、ヤング係数の評価に必要な圧縮応力-ひずみ関係は、荷重計とコンプレッソメータを用いて動ひずみ計を介してX-Yレコーダに自動記録した。供試体の養生方法は、試験材齢まで全て標準養生とした。

### 2.3 実験結果

表4に実験結果を示す。表より、PSAおよび廃石膏は、添加率の増加とともにスランプが大きく低下しており、PSAは添加率40%でほぼゼロスランプとなった。これに対して、FAは添加率60%までスランプの低下が小さい。これらの結果は、PSAおよび廃石膏の吸水作用が大きいことを示している。また、FAは粒子がガラス質であるために吸水作用が小さいものと考えられる。以上の結果から、PSAおよび廃石膏については供試体打設の限界を添加率40%と判断した。空気量については、PSAおよびFAを混入したコンクリートでは空気量の減少がみられた。これは、PSAとFAに含まれる未燃炭素による空気連行作用の低下に起因していると考えられる。これに対して、廃石膏コンクリートの空気量は測定値にばらつきが見られるが、基本調合と比較するとその低下が認められずやや増加傾向であった。

図1に円柱供試体の材齢と圧縮強度の関係を示す。実験の結果、PSA添加率30%以上で圧縮強度が増加した。これは、PSAによる吸水とコンクリートの緻密化に起因しているものと思われる。PSA添加率20%では、圧縮強度がやや低下しているが、空気量の増加が影響していると考えられる。ヤング係数についても圧縮強度と同様の傾向が認められた。FAを添加した場合は、添加率の増加とともに圧縮強度も増加しており、特に長期材齢における強度増進が顕著であることが分かる。これは、FAのポゾラン活性による強度発現による影響であることを示している。廃石膏を添加した場合は、添加率が増加しても廃石膏の吸水作用による圧縮強度の増加は認められず、ヤング係数も同様に低下傾向を示すことが明らかとなった。この原因として、廃石膏の粉末度やその中に含まれる石膏ボード表面紙の影響が考えられる。以上のことから、残りコンクリートの他、生コンスラッジ、砕石スラッジ、汚泥などの高含水廃棄物の固液処理にPSAの有効性が期待できるものと思われる。

## 3. 残りコンクリートのPSAによる造粒化

### 3.1 予備実験

表3に示すコンクリートに、単位水量に対する質量比でPSAを60~100%の範囲で段階的に添加し、その状況を目視により観察した。写真1~3にPSAを添加したコンクリートの混練状況を示す。写真より、PSAを60%添加すると造粒状態となるが、表面は湿潤状態であり、ミキサー内面に多くのモルタルが付着した状態であった。これに対して、添加率を増加させていくと添加率80%以上でモルタルの付

表2 使用材料

材料	種類	特性値
セメント	普通ポルトランド	密度3.15g/cm <sup>3</sup>
細骨材	砕砂	表乾密度2.59g/cm <sup>3</sup> , 吸水率2.15%, 粗粒率2.85
粗骨材	砕石	表乾密度2.65g/cm <sup>3</sup> , 吸水率1.14%, 実積率58.5%
PSA	製紙スラッジ焼却灰	気乾密度2.31g/cm <sup>3</sup>
FA	フライアッシュ	気乾密度2.06g/cm <sup>3</sup>
廃石膏	石膏ボード廃材	気乾密度2.06g/cm <sup>3</sup>
混和剤	AE減水剤	密度1.06g/cm <sup>3</sup>

表3 コンクリートの使用調合

粗骨材の最大寸法 (mm)	W/C (%)	sl (cm)	Air (%)	s/a (%)	W (kg/m <sup>3</sup> )	AE 減水剤 (%)	AE 調整剤 (%)
20	55	18.0	4.5	49.0	185	0.2	0.006

W/C:水セメント比, sl:目標スランプ, Air:目標空気量, s/a:細骨材率, W:単位水量

表4 実験結果

	P/W (%)	sl (cm)	Air (%)	Fc(N/mm <sup>2</sup> )			E(kN/mm <sup>2</sup> )		
				7日	28日	91日	7日	28日	91日
基本調合	0	18.5	5.8	22.5	30.9	39.3	20.7	28.6	31.5
PSA 添加	20	12.5	7.1	20.2	27.9	36.9	19.3	23.7	29.5
	30	3.5	3.9	27.5	36.0	44.5	22.9	26.7	32.9
	40	0.5	3.3	26.5	36.8	44.3	20.5	26.3	30.8
FA 添加	20	17.0	4.5	23.7	35.7	47.9	20.8	27.4	32.3
	40	17.5	1.5	26.2	39.1	54.6	22.3	27.3	33.3
	60	15.5	2.3	27.6	40.0	56.0	22.8	27.1	34.1
廃石膏 添加	20	13.5	8.1	14.4	22.7	24.9	23.5	25.2	25.8
	30	12.0	9.7	11.9	14.3	16.5	18.0	18.8	19.5
	40	5.0	5.2	13.8	16.1	18.7	18.5	18.3	19.0

P/W:粉体(焼却灰)添加率, sl:スランプ, Air:空気量, Fc:圧縮強度, E:ヤング係数

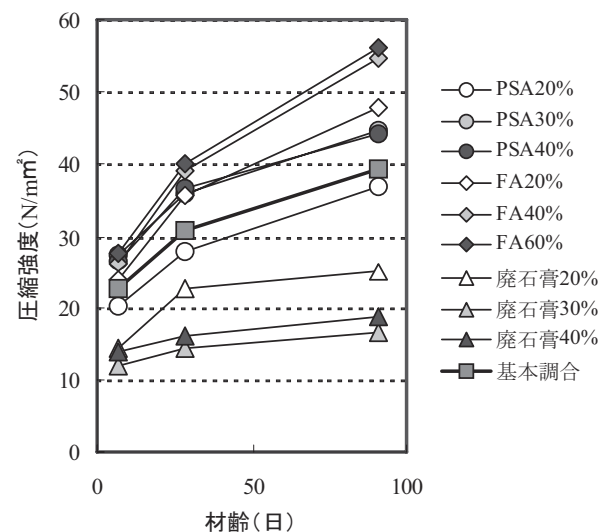


図1 材齢と圧縮強度の関係

着が減少し良好な造粒状態が得られた。写真4に作製されたPSA造粒物を示す。今回の実験では、単位水量に対する質量比で80%以上のPSAを後添加することで造粒化が可能であると判断した。FAと廃石膏に関しては、添加率がそれぞれ120%、100%で造粒化できた。ただし、FA添加の場合には、FAの粉末度が高いことに起因してモルタルの粘性が極めて大きくなり、ミキサー内部にモルタル分が多く付着する様子が確認された。

### 3.2 生コン工場での試験練り及び実機試験

本研究は、PSAによる残りコンクリートの処理に関する実験を熊本県八代市内の生コン工場で実施したので、その結果についても併せて報告する。表5に試験練りの結果と実際に生コン車にPSAを投入した場合の実験結果を示す。ここで、PSA添加率は前述と同様に練り混ぜ水に対するPSAの質量比を表す。混練終了後、スランブ、空気量及びコンクリートの温度を測定した。生コンクリートの調合は18-18-20Nである。表より、PSAの混入量が増加するにつれてスランブが大きく低下、添加率80%で造粒化が可能となり、予備実験とほぼ同様の結果が得られた。

次に、建設現場において生コンクリートを打設後、ポンプ車の洗浄時に回収される洗浄水が混ざった残りコンクリートの造粒固化を想定し、コンクリートの練り混ぜ水とほぼ等しい量の水道水を加えて水量が極めて多いコンクリート（通称シャブコンと呼ばれる）を作製、これにPSAを添加して造粒化を試みた。その結果、添加率200%で造粒化できた。ただし、投入した粉体量が多くなったため、手間がかかる上にミキサー内面に粉体が付着し、造粒体は比較的微粒分が多いものとなった。そこで、市販されている残りコンクリート処理用凝集剤（住友大阪セメント製）との併用を試みた。この凝集剤の主成分は高分子吸水材であるが、通常のコンクリートに有効であるのに対して、回収水を多く含んだコンクリートには効果がなく使用できないという問題を有している。そこで、本研究では加水後のコンクリートに添加率100%でPSAを加え、ある程度の粘度に調整した後に処理剤を添加した。その結果、造粒化が可能となりPSA添加率を抑えることができた。

写真5～8に生コン車による実機実験の状況を示す。ミキサー内の残りコン容量を目視により推定し、練り混ぜ水の推定値に対して添加率80%でPSAを投入（写真5）、3分間の混練の後で状況を確認した（写真6）。ドラム内にPSAの付着が少ない状態（写真7）が観察でき、良好な結果が得られた（写真8）。

### 3.3 PSA固化造粒物の粒度試験及びCBR試験結果

試作した試料の路盤材料への適用性を評価するために、ふるい分け試験(JIS A 1102)及びCBR試験(JIS A 1211)を行った。CBR試験とは路床や路盤の強さを評価するための相対的な強度を調べるものであり、路床土の強さを評価するための「設計CBR」と路盤材料の強さを評価するための「修正CBR」の2つがある。路盤材料としての評価を行うためには修正CBRを求める必要があるが、修正CBRは試料の



写真1 PSA無添加

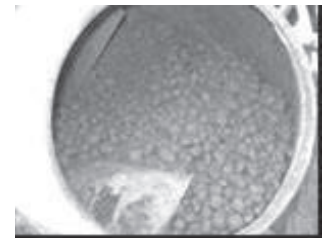


写真2 PSA添加率60%

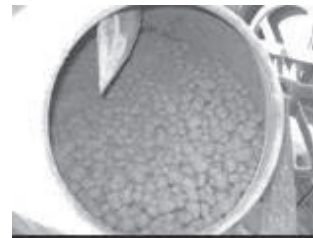


写真3 PSA添加率80%



写真4 PSA添加率100%

表5 生コン工場における実験結果

PSA添加率 (%)	スランブ (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (°C)
0	18.5	5.2	30.5
20	10.5	7.0	31.0
40	6.5	4.3	31.0
60	1.5	3.6	31.0
80	0.0	3.5	30.5
200(加水後添加)	1.0	2.4	31.5
100(凝集剤添加)	0.0	3.3	30.0
80(生コン車)		測定不能	



写真5 PSA投入状況



写真6 混練後の状態



写真7 ドラム内の状況



写真8 造粒固化後の状態

含水比を最適含水比に調整しなければならない。しかし、今回の試料は含水比調整を行わず、そのままの状態を利用することを想定している。また、設計CBRの値は、一般的にみて最大乾燥密度の95%に相当する密度での修正CBRとほぼ等しいか、やや大きい値になるといわれている<sup>(4)</sup>。こ

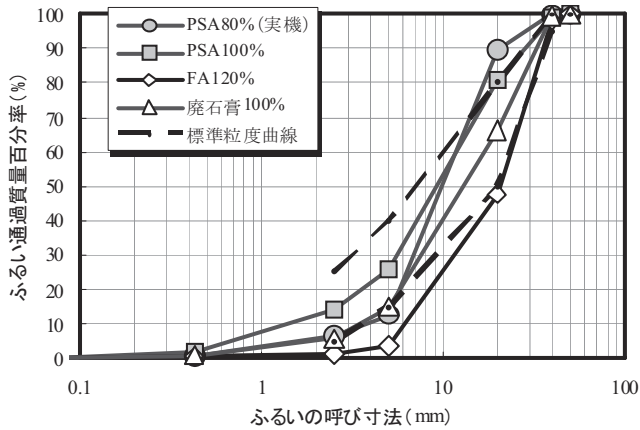


図2 造粒固化後の粒度曲線

これらの理由により、強度評価は設計 CBR の値で問題ないと判断し、試験方法がより簡便な設計 CBR で評価した。試験は試料材齢が約1ヶ月（気中養生）の時点で行い、3個の供試体の平均値で評価した。

図2にふるい分け試験結果を示す。図中には、路盤材料として使用される再生クラッシュランの標準粒度曲線を併記している。生コン車による実機試験で得られた試料「PSA添加率80%（実機）」については、一部標準曲線から逸脱しているが、粒度調整を行うことで十分に適用可能であると考えられる。

CBR 試験では、貫入試験による荷重－貫入量関係の測定その他、写真9に示す吸水膨張試験装置を使用して試料の膨張量を測定した。表6に各試料の膨張量、表7に各試料の含水比をそれぞれ示す。表より、PSA を添加した試料は、添加率が増加するほど含水比が大きくなり、膨張量も大きくなっていることが分かる。本実験の結果、膨張量が最大となっている試料は廃石膏を添加したものであった。PSA よりも含水比に対して相対的に膨張量が大きいようである。FA を添加した試料については、含水比、膨張量ともに最も小さい値を示した。これはFAを混合することで、ポズラン反応によってセメント中の遊離石灰とFAに含まれているシリカやアルミナが結合して不溶性の固い物質を作り、試料の組織が緻密化して水密性が増したことに起因しているものと思われる。今回の実験結果は、全て良好な地盤と判断される膨張率1%以下であった。

図3に本実験で測定された荷重－貫入量曲線を示す。曲線はそれぞれ供試体3体の平均で示している。写真10に示す試験装置を用いて荷重と貫入量の関係を求めた。図3より、PSA を添加した供試体については、貫入量が大きな領域で荷重に若干の差が見られるが、貫入量が7.5mm以下においてはほぼ同様の傾向にあることが示された。廃石膏についても全体的に見ると同様な傾向である。これに対して、FA を添加した供試体は、貫入量に対する荷重値が大きくなっている。これは、固化造粒物のかみ合い抵抗の他にポズラン反応による粒子自身の強度が大きいことが原因である



写真9 吸水膨張試験装置

表6 各試料の膨張量

試料名	膨張量 (mm)				
	PSA100	PSA200	FA120	廃石膏100	PSA80実機
No.1	0.017	0.033	0.005	0.042	0.011
No.2	0.035	0.029	0.003	0.070	0.010
No.3	0.018	0.042	0.003	0.047	0.023
平均値	0.023	0.035	0.004	0.053	0.015

表7 各試料の含水比

試料名	貫入試験後の含水比 (%)				
	PSA100	PSA200	FA120	廃石膏100	PSA実機
No.1	12.2	14.7	8.2	10.8	10.4
No.2	16.6	20.7	7.5	13.5	12.1
No.3	11.9	18.9	6.8	13.2	11.3
平均値	13.6	18.1	7.5	12.5	11.3

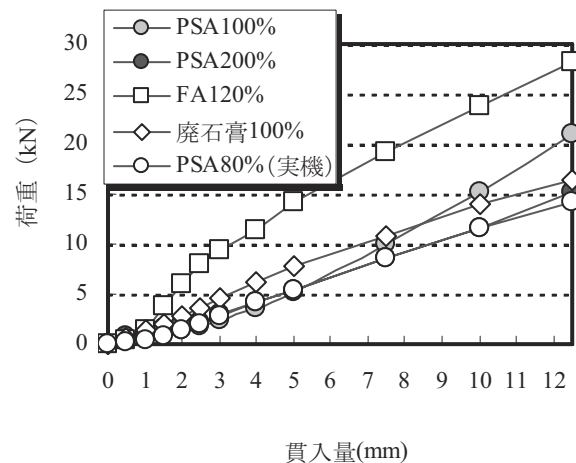


図3 荷重－貫入量曲線

ように思われるが、この点に関しては今後検証する必要がある。

次に CBR 値の評価方法について述べる。CBR(%)は、荷重－貫入量曲線から貫入量 2.5mm、5.0mm における荷重を求め、その貫入量における標準荷重（表8）を用いて次式により算出する。

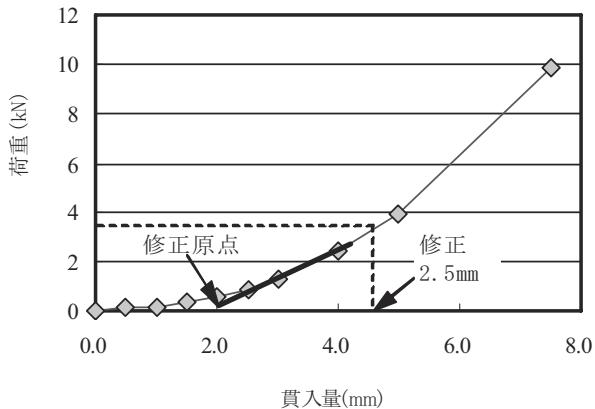


図4 修正原点を求める方法

$$CBR(\%) = \{(\text{荷重} / \text{標準荷重})\} \times 100 \quad \dots (1)$$

ここで、荷重－貫入量曲線の初期の部分が下向きに凸になり、変曲点が生じる場合がある。変曲点以降の直線部分を延長し、横軸との交点を貫入量の修正原点とする。修正原点を求める方法を図4に示す。CBRは貫入量2.5mmにおける値よりも貫入量5.0mmにおける値が大きいときは、改めて供試体を作り直して再試験を行う。再試験の結果、再び同じ結果が得られた場合には、CBRは5.0mmにおける値を採用する<sup>(5)</sup>。

表9にCBR試験結果を示す。また、表10に修正CBRに関する材料規定<sup>(5)</sup>を示す。表より、FAを添加した試料が荷重－貫入量曲線と同様に最も大きな強度を示した。これに対して、PSAを添加した試料は、全てCBRの平均値が30%以上となった。材料規定値と比較すると、一般道路及び高速道路の下層路盤の基準値が30%以上であることから、本研究で試作した固化造粒物は、すべて下層路盤の規定値を満足しており、路盤材としての適用性が認められる結果が得られた。今後の研究課題として、他の路盤材料と混合することによるCBR値への影響の他、残りコンクリートの品質がCBR値に与える影響などについてデータの蓄積が必要であると考えている。

### 3.4 有害物質の含有量及び溶出試験

本研究で試作した固化造粒物を路盤材として実用化するためには、重金属など有害物質の含有量及び溶出量を把握する必要がある。そこで、民間の試験機関に依頼して有害物質の含有量及び溶出試験を行った。

表11に特定有害物質8種について含有量試験の結果を示す。表中の基準値は、路盤材料として使用可能な有害物質の上限値である。カドミウム系化合物、六価クロム系化合物、水銀系化合物、セレン系化合物は、全試料について検出量が計測可能な最小量よりも小さな値を示した。その他の有害物質については、全ての試料で微量ではあるが、鉛系化合物及び砒素系化合物が微量検出された。FAを添加した試料でほう素系化合物、PSAを添加した試料でふっ素系

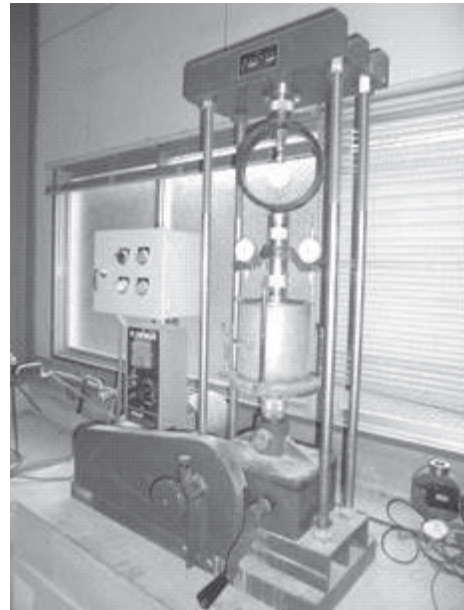


写真10 貫入量試験装置

表8 標準荷重の値

貫入量(mm)	標準荷重(kN)
2.5	13.4
5.0	19.9

表9 各試料のCBR値

試料名	CBR値(%)				
	PSA100	PSA200	FA120	廃石膏100	PSA実機
No.1	34.1	35.3	62.8	47.4	37.7
No.2	48.6	34.5	93.3	40.5	45.2
No.3	59.8	39.8	69.5	45.4	29.8
平均値	47.5	36.5	75.2	44.4	37.6

表10 修正CBRに関する材料規定

区分	一般道路	高速道路	鉄道	簡易舗装道路	
機関例	日本道路協会 国土交通省 東京都	日本道路公団	鉄道総合 技術研究所	日本道路協会 (簡易舗装)	
路盤	上層	80%以上 (an=0.35)	80%以上 (an=0.32)	80%以上 (高炉スラグ 碎石の場合)	60%以上
	下層	20%以上 30%未満 (an=0.20) 30%以上 (an=0.25)	30%以上 (an=0.25)		10%以上
路床	上部	—	10%以上	—	—
	下部	—	5%以上	—	—

化合物が微量検出された。しかし、全体的に見ると基準値を大きく下回っており、含有量試験ではほとんど問題ない結果が得られた。

表 11 有害物質の含有量試験結果

分析項目	試料名	PSA100	PSA200	FA120	廃石膏 100	基準値
カドミウム及びその化合物	mg/kg-dry	1.5 未満	1.5 未満	1.5 未満	1.5 未満	150 以下
鉛及びその化合物	mg/kg-dry	11	11	12	9.7	150 以下
六価クロム化合物	mg/kg-dry	2.5 未満	2.5 未満	2.5 未満	2.5 未満	250 以下
砒素及びその化合物	mg/kg-dry	1.7	2.1	2.8	2.5	150 以下
水銀及びその化合物	mg/kg-dry	0.15 未満	0.15 未満	0.15 未満	0.15 未満	15 以下
セレン及びその化合物	mg/kg-dry	1.5 未満	1.5 未満	1.5 未満	1.5 未満	150 以下
ほう素及びその化合物	mg/kg-dry	40 未満	40 未満	76	40 未満	4000 以下
ふっ素及びその化合物	mg/kg-dry	40 未満	65	40 未満	40 未満	4000 以下
含水率	%	6.6	1.9	3.4	2.7	—

表 12 溶出試験結果

計量の対象	試料名	PSA200	FA120	廃石膏 100	基準値
ふっ素	mg/リットル	0.08 未満	0.14	0.44	0.8以下
六価クロム	mg/リットル	0.082	0.039	0.042	0.1以下
ほう素	mg/リットル	0.10	0.02 未満	0.02 未満	1以下
含水率	%	1.9	3.4	2.7	—

あり良好な結果が得られた。

- 4) CBR 値に関しては、全ての試料について下層路盤の材料規定値 30%以上を満足しており、路盤材としての適用が期待できる。
- 5) 特定有害物質の含有量試験の結果、全ての試料が基準値以内であった。溶出試験については、検査対象項目が少ないため今後も調査が必要となるが、今回の調査の範囲内では全て基準値以内であった。

（平成 22 年 9 月 27 日受付）

#### 参考文献

- (1) 武田浩二, 村上 聖, 河上晃一郎, 浦野登志雄:「産業副産物を活用した緑化基盤用ポーラスコンクリートの開発－芝植生試験結果－」, 日本建築学会九州支部研究報告, No. 47-1, pp. 61-64 (2008).
- (2) 浦野登志雄, 村上 聖, 武田浩二, 河上晃一郎: 製紙スラッジ焼却灰を用いた緑化基盤用ポーラスコンクリートの開発, 日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1, pp. 483-484 (2007).
- (3) 浦野登志雄: 製紙スラッジ焼却灰を混和材に用いたコンクリートの物性について, 日本建築学会九州支部研究報告, No. 44-1, pp. 17-20 (2005).
- (4) (社) 地盤工学会: 土質試験の方法と解説－第 1 回改訂版, p. 285.
- (5) (社) 地盤工学会: 土質試験 基本と手引き－第 1 回改訂版, p. 79-90 (2001)

表 12 に溶出試験結果を示す。本研究では、従来コンクリート破砕材などからの溶出の危険性が指摘されている六価クロム系化合物と基準値以内であったが含有量試験で検出された、ほう素及びふっ素について溶出試験を依頼した。表より、PSA を添加した試料に対して基準値以内であるが、六価クロム化合物の溶出が認められた。その他については基準値を大きく下回っており、問題がないことが明らかとなった。溶出試験については、他の特定有害物質についても実施予定である。また、固化造粒物の材齢が進むにつれて有害物質がセメントの水和反応時に生成されるエトリンサイトによって固定化されることが期待できるため、今後の研究課題として、試料の材齢と溶出量の関係についても調査を行う予定である

#### 4. まとめ

本研究の結果、以下の知見が得られた。

- 1) 圧縮強度試験の結果、コンクリートに PSA を添加すると圧縮強度が増加する傾向が認められた。ただし、FA を添加した場合と比較すると、長期強度の増進が小さいため、PSA はほとんどポゾラン活性を有しないことが推察される。
- 2) 残りコンクリートに PSA などを添加して作製した固化造粒物について粒度試験の結果、一部粒度調整を行う必要があることが明らかとなった。
- 3) CBR 試験で行った試料の吸水膨張量の測定に関して、試料間に相違が認められたが、膨張量が最大となった廃石膏を添加した試料についても膨張率が 1%以下で