

論文 超臨界水処理によるアスファルト舗装用骨材のリサイクルに関する研究

山本 佳城^{*1}・湯浅 昇^{*2}・松井 勇^{*3}・秋葉 正一^{*4}

要旨：超臨界水は、環境に無害であり、反応溶媒としての分解効率が非常に高いことなどの特性を有することから、幅広い分野において適用されている。本研究では、超臨界水を用いてアスファルト舗装発生材から再生した骨材のセメントコンクリート用骨材としてのリサイクルに関する基礎検討として、骨材のアスファルトの付着程度がセメントモルタルの諸物性に及ぼす影響について実験を行った。結果として、アスファルト付着率が増加すると、強度低下や乾燥収縮の増加を引き起こすが、アスファルト付着率が0.55wt%以下であれば原骨材を用いた場合と同程度の性能が得られることを示した。

キーワード：超臨界水，分別回収，アスファルト混合物，骨材，リサイクル

1. はじめに

アスファルト舗装発生材のリサイクルでは、バインダーであるアスファルトの劣化に起因するリサイクル材のひび割れ発生や疲労抵抗性、耐久性の低下等の課題から、その利用範囲が限定されている状況にある。本研究では、無害かつ反応溶媒として高い分解性能を有する超臨界水（臨界温度：374℃，臨界圧力：22.1MPa）の特性を活かし、各種建設廃材の分別回収および再利用・再生利用技術への超臨界水処理の適用について研究開発を行っており、この一環として、超臨界水処理を用いたアスファルト混合物のバインダー除去技術^{1)・2)} およびこれにより再生した骨材の有効利用方法について検討するものである。

アスファルト発生材のアスファルト舗装材料としてのリサイクルに関しては、これまでに多くの研究や適用事例が報告されているものの、アスファルト発生材のセメントコンクリートへの適用³⁾ やアスファルト混合物がセメントコンクリートに混入された場合の影響⁴⁾ に関する検

討は少ない。一方、超臨界水のような高温高压水を利用したアスファルト発生材のリサイクルに関しては、筆者の1人である秋葉らのグループ⁵⁾ が、高温高压処理後の劣化アスファルトが混入された再生アスファルト混合物をモデルした実験を行い、劣化アスファルトの混入率が増加すると、剥離抵抗性、骨材飛散抵抗性および疲労抵抗性が低下することを明らかにしている。

そこで本研究では、超臨界水処理によりアスファルト舗装発生材から分離・再生した骨材のセメントコンクリート用骨材としての適用に関する基礎検討として、骨材からのアスファルトの分離程度（アスファルトの付着率）がセメントモルタルのフレッシュ性状、強度性状および乾燥収縮性状に及ぼす影響について検討した。

2. 実験概要

2.1 使用骨材

本実験では、a) 超臨界水処理によりアスファルト舗装廃材から再生した骨材のアスファルトの除去程度を、骨材に付着させるアスファルト

*1 日本大学 生産工学部学術フロンティアリサーチセンター研究員 博士(工学) (正会員)

*2 日本大学 生産工学部建築工学科助教授 博士(工学) (正会員)

*3 日本大学 生産工学部建築工学科教授 工博 (正会員)

*4 日本大学 生産工学部土木工学科助教授 博士(工学) (正会員)

量により模擬した骨材と、b) アスファルトを付着させた骨材から、超臨界水処理によりアスファルトを除去した再生骨材の2種類を用いた。

(1) アスファルト付着骨材の作製

高温高压水のアスファルト混合物に対するバインダー除去性能については、秋葉らのグループにより、砕砂、粗砂、石粉およびストレートアスファルト 60-80（細・微粒分×5.5wt%）からなる混合物 5g と内容積 60cm³ の反応容器を用いた実験から、表-1²⁾ に示す結果が得られている（表-1 では、5.5wt%のアスファルトが全て除去された場合を除去率 100%としている）。本実験では表-1 の結果を参考に、処理条件が水の臨界点よりも低温（325～350℃）、高压（30MPa 以上）である亜臨界水処理を行った場合を想定し、除去率が 90%、70%および 50%に相当するよう、以下のようにアスファルト付着骨材を作製した。

骨材には大井川産川砂、アスファルトにはストレートアスファルト 60-80（密度 1.04g/cm³、15℃）を用いた。アスファルト量（骨材質量に対するアスファルトの混合割合、以下、アスファルト付着率（%）とする）については、一般的な密粒度アスファルト混合物における 5.5%を基準（除去率 0%）とし、上記の除去率 90%、70%および 50%に相当するよう、アスファルト付着率の水準をそれぞれ 0.55%、1.65%および 2.75%とした。

(2) 超臨界水処理を用いた再生骨材の作製

上記 (1) と同様の方法で作製したアスファルト付着率 5.5%の骨材に対して、超臨界水処理によるアスファルトの分離・除去を行い、再生骨材を作製した。超臨界水処理には、SUS316L 製反応容器（内径φ60×280mm、容積 850cm³）と容器の加熱に、図-1 に示した攪拌機付の硝石槽（槽内寸法 W200×D200×H450mm）を使用した。

石油アスファルトに超臨界水処理を施した場合では、アスファルトの低粘度化反応と熱分解反応による飽和炭化水素の生成が競合していると考えられている¹⁾。本実験では、超臨界水処理後の反応容器を緩冷させることにより、この低

表-1 Removal Rate of Straight Asphalt (fine specimen)²⁾

	Temp. [°C]	Removal Rate [%]			
		30MPa	35MPa	40MPa	45MPa
Sub critical	300	31.2	30.4	33.6	30.6
	325	56.5	51.8	43.9	44.2
	350	94.8	97.0	92.5	93.5
Supercritical	375	97.0	99.7	96.8	102.1
	400	100.6	100.0	97.1	97.0
	425	98.5	100.2	96.4	107.1
	450	87.3	98.4	102.2	105.0

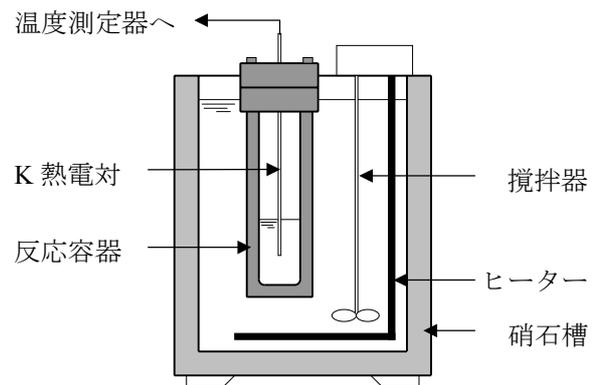


図-1 超臨界水処理装置の概要

粘度化したアスファルトを油層として分離・除去することを試みた。超臨界水処理の温度・圧力条件は、表-1²⁾ の実験結果を参考に、除去率 100%を目標として 400℃-30MPa とし、以下の手順で行った。

まず、図-1 に示す反応容器にアスファルト付着率 5.5%の骨材 150g と純水（溶媒）368g を封入し、容器を硝石槽内で加熱する。容器内の温度は加熱開始後 10 分程度で 400℃に到達する。設定温度に到達した後は、溶媒中の油層と水層を分離させるために、容器内の温度が約 250℃になるまで送風により反応容器を徐々に冷却し、それ以降は水で急冷する。その後、溶媒の上層に分離した油分を取り除き、骨材を回収する。なお、処理温度 400℃の時点における容器内の圧力は、圧力センサー付きの小型反応容器（内容積 62.9cm³）を用いて、容器内の容積、溶媒量および骨材量の比率を同条件にして別途行った実験結果から、30MPa 程度であったと推察される。

超臨界水処理後に回収した骨材は 105℃で炉

乾燥させて、式(1)により、骨材に残存したアスファルト量を再生骨材のアスファルト付着率として求めた。本実験条件で作製した再生骨材のアスファルト付着率は0.71%であり、前述(1)のアスファルト除去率にすれば87%に相当する。この除去率は、表-1²⁾の結果と比較して小さな値となったが、これは回収後の骨材に対して、ろ過やろ紙に付着した油分の有機溶媒による洗浄²⁾を行わなかったためであると考えられる。

$$R_{As} = \frac{M_{SCW} - M_{be}}{M_{be}} \times 100 \quad (1)$$

ここに、 R_{As} :アスファルト付着率(%)
 M_{SCW} :超臨界水処理後の骨材の質量(g)
 M_{af} :アスファルト付着後の骨材の質量(g)
 M_{be} :アスファルト付着前の骨材の質量(g)
 $M_{be} = M_{af} / 1.055$

(3) 使用骨材の物性

本実験で用いた骨材のアスファルト付着率、粗粒率、絶乾密度および吸水率を表-2に示す。また、骨材表面のアスファルトの付着状況を写真-1に、粒度分布を図-2に示す。なお、表-2の記号Nはアスファルトの付着を行わない骨材、Asはアスファルトを付着させた骨材、Reは超臨界水処理を用いて作製した再生骨材を表す。また、吸水率は付着しているアスファルトを除いて考えた場合の骨材の絶乾質量に対する吸水量の割合である。

写真-1に示した骨材表面の状況から、アスファルト付着率の高いAs165およびAs275では、アスファルトにより表面が被膜され、緩やかな

起伏はみられるものの、全体的に平滑化されている様子が見てとれる。また、アスファルトによる骨材同士の接着や骨材表面への粒径の小さな骨材の付着が多くみられる。一方、アスファルト付着率の低いAs055では、表面に小さな骨材の付着は認められるが、As165、As275と比較して顕著ではない。再生骨材Re071については、

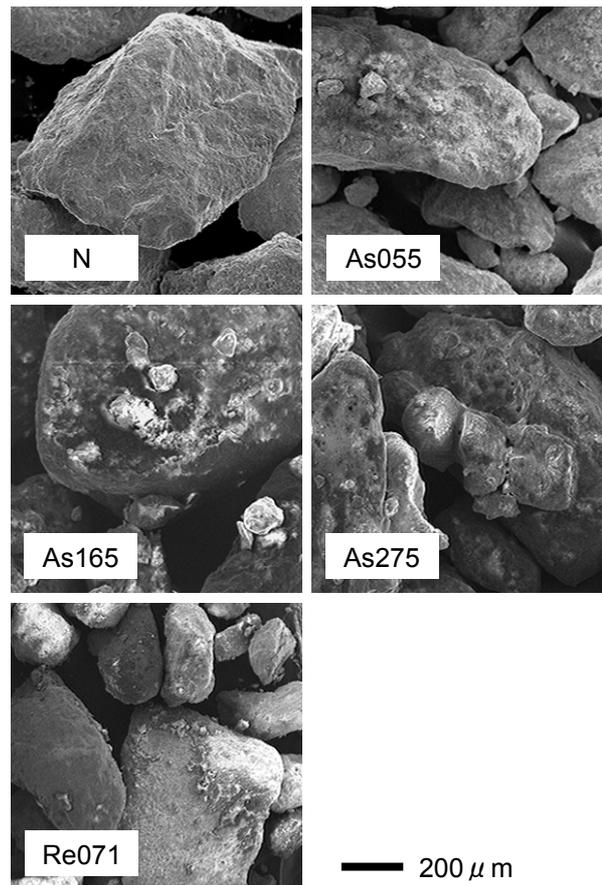


写真-1 アスファルトの付着状況

記号	アスファルト付着率 (%)	粗粒率	絶乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)
N	—	3.29	2.58	1.76
As055	0.55	3.54	2.60	1.24
As165	1.65	3.57	2.54	1.39
As275	2.75	3.77	2.44	2.38
Re071	0.71	3.40	2.54	1.88

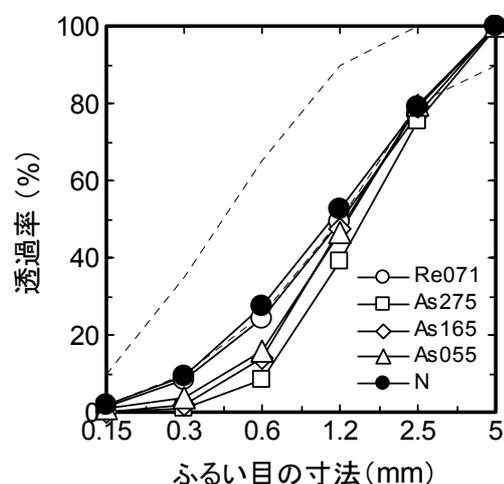


図-2 粒度分布

超臨界水処理により骨材同士が十分に分離されており、これは、**図-2** に示した粒度分布が N と同様であることから確認できる。ただし、骨材表面には数十～数 μm 以下の微粒子が部分的に付着している様子がみられた。これらは、超臨界水処理により低粘度化したアスファルトが十分に除去されず、骨材回収後に脱水、固化されて骨材表面に残留したものであると考えられる。

粗粒率はアスファルト付着率が増加するほど大きくなる傾向にあるが、これは、**写真-1** および**図-2** の粒度分布にみられるように、アスファルトの付着により骨材が凝集し、細粒分が減少したことによる。絶乾密度は As055 では N と同程度、それ以外の骨材ではアスファルト付着率の増加に伴って減少していることがわかる。吸水率については、N に比較して As055 および As165 では減少したものの、As275 では増加する結果となった。As055～As275 の間では、アスファルト付着率が増加するほど吸水率も増加する傾向にあることから、凝集した骨材粒子間に空隙が形成されたことにより見掛けの吸水率が増加した可能性が考えられる。再生骨材については、アスファルト付着率が同程度である As055 の吸水率よりも高いことから、骨材表面のアスファルト被膜が部分的には除去されているものと推測される。

2.2 モルタル供試体

モルタル供試体の作製には、セメントに普通ポルトランドセメント（密度 3.16g/cm^3 ）、砂には**表-2** に示した 5 種類の骨材を使用した。調合は水セメント比 60%、砂セメント比 3.8 とした。なお、この砂セメント比は N を用いたモルタルのフロー値が 180mm となるように調整し、各アスファルト付着率で統一したものである。

作製した供試体は、材齢 1 日で脱型し、その後は封かん養生（ 20°C ）を行った。

2.3 実験項目および実験方法

フロー、曲げ強度および圧縮強度の測定は、JIS R5201 に準じて行った。N および As055～As275

を用いた供試体については、 $\phi 50 \times 100\text{mm}$ の円柱供試体を用いて圧縮時の静弾性係数（材齢 28 日）を測定した。また、長さ変化の測定には、 $40 \times 40 \times 160\text{mm}$ の供試体を用いて、材齢 7 日に基長および基準の質量を測定した後、温度 20°C 、湿度 60%R.H.の条件下で乾燥させた場合の長さ変化率および質量変化率を測定した。なお、静弾性係数および長さ変化測定の供試体数はいずれも 3 体である。

3. 実験結果および考察

3.1 フレッシュ性状

表-3 にモルタルの練り上がり単位容積質量およびフローの測定結果を示す。単位容積質量は、アスファルト付着率の増加に伴ってわずかに減少しており、骨材密度の低下や砂セメント比を固定条件としたことによるセメントペースト量の減少による影響がみられる。

フローはアスファルト付着率 0.55%では 15mm 程度増加したが、1.65%以上になると付着率の増加とともにフローは減少する傾向にあり、2.75%ではアスファルトを付着させていない N に比較して約 30mm 減少した。このフローの減少には、

表-3 フレッシュ性状の測定結果

記号	N 055	As 055	As 165	As 275	Re 071
単位容積質量 ($\times 10^3\text{kg/m}^3$)	2.23	2.23	2.20	2.14	2.22
フロー値 (mm)	176	192	180	150	178

図-2 に示した粒度分布にみられるように、アスファルトの付着による細粒分の減少および骨材の凝集による骨材形状の悪化が大きく影響したものと考えられる。なお、再生骨材 Re071 については N と同程度のフローが得られた。

3.2 強度性状

図-3、**図-4** に曲げ強度および圧縮強度の測定結果を示す。また、**図-5** は材齢 28 日における静弾性係数の測定結果を示したものである。

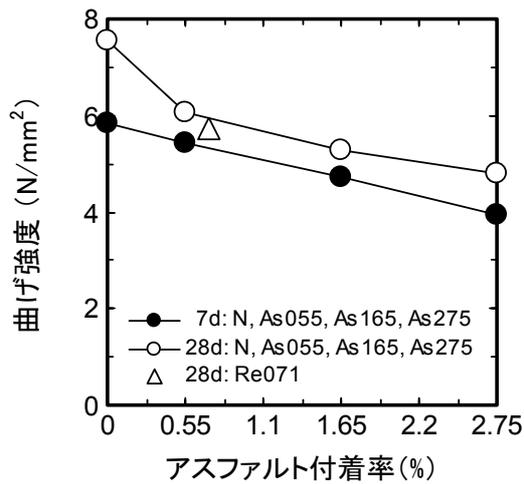


図-3 曲げ強度の測定結果

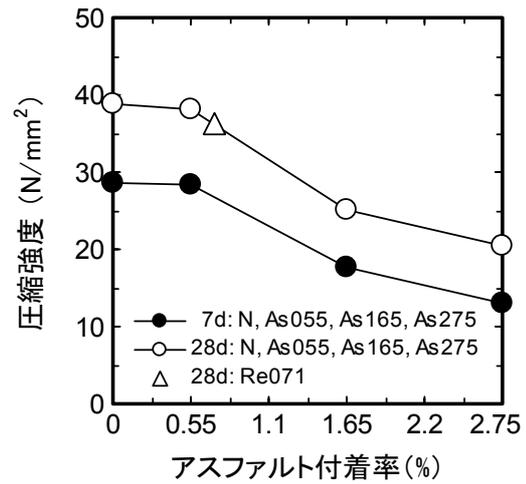


図-4 圧縮強度の測定結果

曲げ強度には、いずれの材齢にもアスファルトの付着による強度低下が認められ、付着率の増加に対してほぼ直線的に強度が低下した。また、アスファルトが付着している場合では、Nと比較して材齢7日～28日にかけての強度増進が小さく、本実験条件の範囲では、水和によるペースト強度の増加よりもアスファルトの付着による強度低下の影響の方が支配的である傾向がみられた。

一方、圧縮強度では、付着率1.65%および2.75%においては付着率の増加に伴う大幅な強度低下が認められたものの、0.55%では材齢7日および28日のいずれもNとほぼ同等の値を示した。このような結果は、図-5にもみられるように、静弾性係数についても同様であった。再生骨材Re071を用いた場合では、Nおよび付着率0.55%よりも強度はやや低下した。

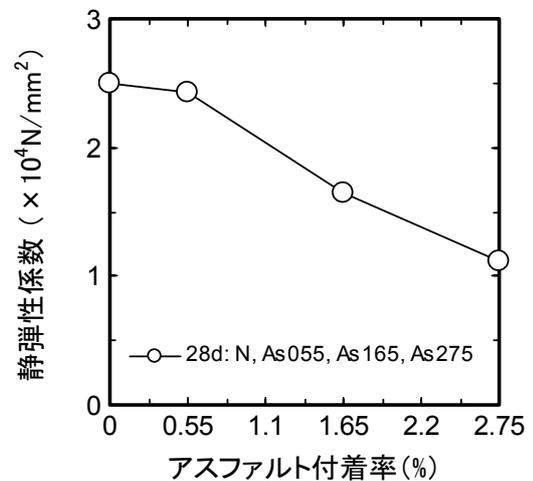


図-5 静弾性係数の測定結果

図-6は、曲げ強度、圧縮強度および静弾性係数の材齢28日における測定結果について、アスファルトを付着させていないNを用いた場合の値に対する比をそれぞれ示したものである。圧縮強度比および静弾性係数比ではアスファルト付着率が0.55%を超えた場合、曲げ強度比では0.55%を含めていずれもアスファルトの付着による強度比の低下が認められた。再生骨材Re071についても強度比の低下が認められたが、これらは、アスファルトを付着させた骨材を用いた場合の付着率に対する強度比の低下の傾向

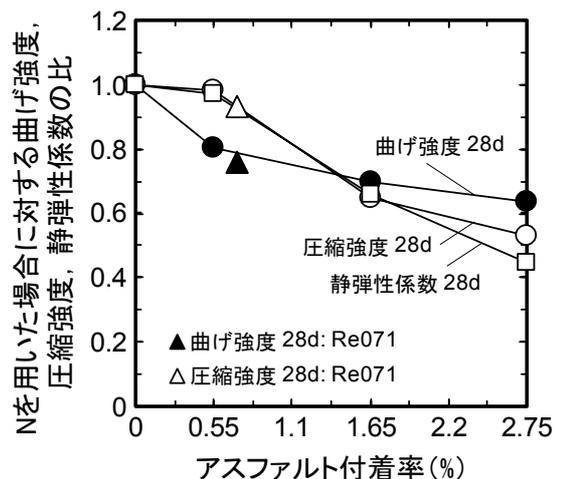


図-6 Nを用いた場合に対する強度比

に概ね一致しており、この強度低下は、超臨界水処理によるアスファルトの低粘度化よりもアスファルト付着率の影響を受けたものだと考えられる。

3.3 乾燥収縮性状

図-7 に長さ変化率の測定結果を示す。アスファルト付着率 0.55%では、骨材の吸水率は N よりも小さいが、長さ変化率はほぼ同程度の値を示した。また、アスファルト付着率が大きくなるほど長さ変化率も大きくなる傾向にある。

図-8 は長さ変化率と質量減少率の関係を示したものである。質量減少率に対する長さ変化率の程度は、アスファルト付着率 1.65%および 2.75%の場合で相対的に大きく、付着率が大きくなると乾燥収縮に対する骨材による拘束力が低下することがわかる。一方、付着率が 0.55%程度であれば、アスファルトが付着していない骨材を用いた場合と同様の乾燥収縮性状を示す。

4. まとめ

本実験条件の範囲で得られた結果を以下にまとめる。

- (1) アスファルト付着率が増加すると、骨材の密度は低下し、粗粒率および見掛けの吸水率は増加する傾向にある。
- (2) アスファルト混合物から超臨界水処理により作製した再生骨材では、原骨材と同程度の粒度分布、密度および吸水率が得られる。ただし、処理後に分離したアスファルトの除去方法については今後、検討が必要である。
- (3) アスファルトが付着した骨材を使用した場合には、曲げ強度が低下し、圧縮強度および静弾性係数は、付着率が 0.55%を超えると付着率の増加に伴って著しく低下する。
- (4) アスファルト付着率が 0.55%程度以下であれば、アスファルトが付着していない骨材を用いた場合と比較して、曲げ強度は低下するものの、圧縮強度、静弾性係数および乾燥収縮については同等の性能が得られる。

参考文献

- 1) 長尾重夫ほか:超臨界技術を用いた超重質油改質技術の開発,平成 15 年度産業公害防止技術開発事業報告会,2003

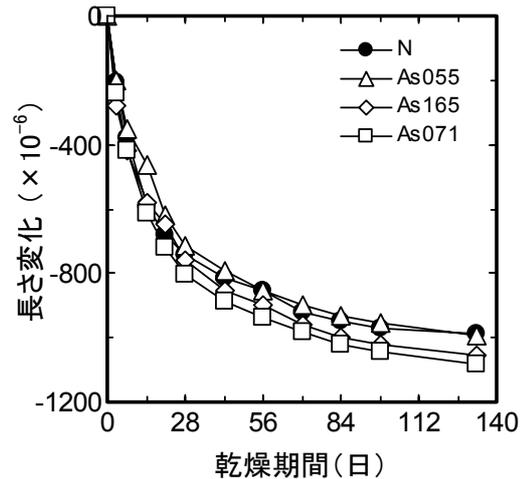


図-7 長さ変化率の測定結果

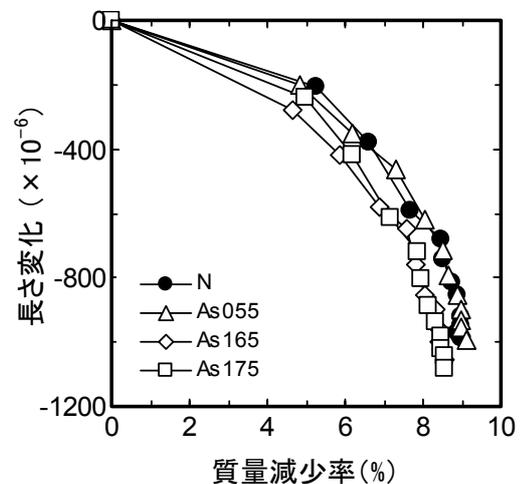


図-8 長さ変化率と質量減少率の関係

- 2) Kano.Y, Akiba.S, Kuriyagawa.Y and Kawai.T : Removal of Binder form Asphalt Mixture Using High Temperature and High Presssure Water, Journal of the Japan Petroleum Institute, 48, pp.358-364, 2005
- 3) 牧尾誠, 久保善司, 谷口克也, 不破大仁:フライアッシュを用いたセメント安定処理による道路舗装材料のリサイクリング,土木学会年次学術講演会講演概要集第5部,56巻,pp.128-129,2001
- 4) 加藤俊二, 河野広隆:アスファルト混合物の混入が再生コンクリートの物性に及ぼす影響,コンクリート工学年次論文報告集, Vol.18, No.1, pp.1053-1059, 1996
- 5) 秋葉正一, 栗谷川裕造:アスファルトバインダーを除去した舗装廃材の再利用について,第4回日本大学生産工学部学術フロンティアリサーチセンター研究発表講演会, pp.7-8, 2005