

論文 未利用の粗骨材を用いたポーラスコンクリートの調合設計手法

武田 浩二^{*1}・村上 聖^{*2}・山口 信^{*3}・池崎 智美^{*4}

要旨：本研究では、使用実績のない未利用の粗骨材を用いてポーラスコンクリートを製造する際の調合設計手法を導き出すことを目的とし、がいし廃材破砕骨材・パルプスラッジ焼却灰造粒物・フライアッシュ造粒物の3種類の粗骨材を用いて実験的に検討した。ポーラスコンクリートの製造においてセメントペーストの過不足のない良好な練り上がり状態とするためにはセメントペーストの粘性即ちフロー値の管理及び粗骨材表面の性質に応じた調合の検討が必要となるが、フロー値を設定しその後試し練りにより良好な練り上がり状態となる目標空隙率を特定することにより、適切な調合を選定することが可能であることが分かった。

キーワード：ポーラスコンクリート, エコマテリアル, 粗骨材, 調合設計

1. はじめに

ポーラスコンクリートはエコマテリアル(親水護岸材, 植栽基盤材, 藻場復元材など)として種々の適用が試みられている。また, ポーラスコンクリートに使用する粗骨材には様々なリサイクル資材を活用することが可能であり, その意味でも環境にやさしい材料であるといえる。

近年のリサイクル活動の進展に伴い, これまで再資源化されなかったような廃棄物や産業副産物にも目が向けられるようになり, 使用実績のない素材の活用が求められることも多くなってきた。それらの素材において, 団塊状のものは破砕し, 粉体状のものは造粒して粒子状に成形し, ポーラスコンクリートの粗骨材として使用することによって, リサイクルの幅が広がり, エコマテリアルとしてのポーラスコンクリートの適用性を高めることにつながると考えられる。

使用実績のない素材を粗骨材として用いる場合, 砂利・碎石とは異なる特殊な性質を有していたり, また, ポーラスコンクリートの製造において未知の性質を示したりすることもあるため, 通常の方法では適切に製造できない場合がある。今回, このような未利用の粗骨材を用いてポーラスコンクリートの製造を行なう際の調合設計手法について実験的に検討したので, その結果について報告する。

2. 良好な練り上がり状態について

ポーラスコンクリートに求められる性能として, 表面・内部に連続空隙を有し, 透水性を備えていることが挙げられる。不適切な調合によりセメントペーストが過多となった場合, 写真-1に示されるようにセメントペーストが垂れて底部に溜まり, 空隙を閉塞させ, 所定の

性能が得られないことになる。逆にセメントペーストが過少の場合, 粗骨材同士を接着するために必要なセメントペーストが不足し, 低強度で脆くなってしまう。従って, ポーラスコンクリートの調合においては, セメントペーストの過不足のない良好な練り上がり状態となるようにすることが重要となる。

セメントペーストの過不足のない状態となるためには, 「セメントペーストの粘性」と「粗骨材表面の性質」が影響してくる。同一の粗骨材を同量使用し, 同一のセメントペースト量にて混練しても, セメントペーストの粘性が低い(軟らかい)場合はペーストが垂れやすく, 粘性が高い(硬い)場合はペーストが垂れにくく, 練り上がり状態が異なってくる。また, 粗骨材が異なれば, 実積率や粒度分布等のデータが同じでセメントペーストの条件が同じであったとしても, 粗骨材の形状や表面の摩擦の程度の違いにより, セメントペーストの垂れ具合に差が生じ, 練り上がり状態が異なってくる。従って,



写真-1 セメントペーストの垂れ

*1 熊本大学大学院 自然科学研究科准教授 工博(正会員)

*2 熊本大学大学院 自然科学研究科教授 工博(正会員)

*3 熊本大学大学院 自然科学研究科助教 工博(正会員)

*4 熊本大学大学院 自然科学研究科大学院生

良好な練り上がり状態とするためには、セメントペーストの粘性のコントロールと、粗骨材表面の性質の把握が必要となる。

セメントペーストの粘性はフロー値の管理によりコントロールできるが、例えば、フロー値が等しい2種のセメントペーストにおいて、水セメント比や混和剤使用量が異なっている場合、ポーラスコンクリートの最終的な練り上がり状態が同等となるかは未知であり、フロー値の管理のみでペーストの粘性をとらえることが可能かは不明である。

また、粗骨材表面の性質に関しては、通常の砂利や碎石などの粗骨材と異なる場合があり、例えば、形状が異なる（丸い・角ばっている）、表面の摩擦が異なる（つるつる・がさがさ）等の影響で、通常の粗骨材と同様の方法に基づいて調査設計したとしても、セメントペーストの付着の程度が異なり、本来からみつくペーストが下に垂れてしまったり、逆にからみつくペーストが多くその結果ペースト不足となったり、意図しない練り上がり状態となってしまうことが起こりうる。このような粗骨材表面の性質は素材特有のものであり、粗骨材の種類ごとにデータ化し、調査計算時において骨材表面による係数を設けて補正する等の対応により、従来の調査計算にのせることは可能と思われる。しかしながら、実績のない未知の骨材一つ一つについて骨材の特性を調査し、補正係数を算定することは時間と労力が必要であり、数多くの素材を用いて次々にポーラスコンクリートを作製してその適用性を検討したい場合などには大きなネックとなりうる。

そこで、未知の骨材を使用してポーラスコンクリートを混練する際において、セメントペーストの過不足のない良好な練り上がり状態となるような調合を効率よく導く簡便な手法を実験的に検討してみた。最少回数での試し練りを繰り返すことにより、種々の性質を有する骨材それぞれに応じた適切な調合を迅速に導き出すことが可能となる手法である。

3. 使用材料

実験に使用した材料の仕様を表-1に示す。セメントは高炉セメントB種を、混和剤として高性能AE減水剤を使用した。また、今回使用する粗骨材として、材質・形状などが広範囲となることを意図し、がいし廃材破砕骨材、パルプスラッジ焼却灰造粒物、フライアッシュ造粒物の3種類を設定した。

がいし廃材破砕骨材(写真-2)は電気絶縁体として用いるがいし(磚子)の廃材を粒子状に破砕したものであり、破砕面が鋭利である、表面が平滑で摩擦が小さい、吸水率がほぼ0%である、といった特徴を有する。粒径2

表-1 使用材料

セメント	高炉セメントB種 密度 3.03 g/cm ³
粗骨材	がいし廃材破砕骨材 密度 2.57 g/cm ³ 吸水率 0% 〈がいし-S〉粒径 2~5mm 実積率 50.7% 〈がいし-M〉粒径 5~10mm 実積率 51.4% 〈がいし-L〉粒径 10~20mm 実積率 50.6%
	パルプスラッジ焼却灰造粒物 〈PS-M〉粒径 5~15mm 表乾密度 1.73 g/cm ³ 吸水率 49.8% 実積率 63.1% 〈PS-L〉粒径 15~20mm 表乾密度 1.72 g/cm ³ 吸水率 49.4% 実積率 62.6%
	フライアッシュ造粒物 〈FA-M〉粒径 5~13mm 表乾密度 1.76 g/cm ³ 吸水率 32.4% 実積率 61.2% 〈FA-L〉粒径 13~20mm 表乾密度 1.76 g/cm ³ 吸水率 30.3% 実積率 60.3%
混和剤	高性能AE減水剤

~5mmに調整したものを「がいし-S」、粒径5~10mmに調整したものを「がいし-M」、粒径10~20mmに調整したものを「がいし-L」として使用した。

パルプスラッジ焼却灰造粒物(写真-3)は製紙工場で発生する廃棄物のパルプスラッジを焼却した灰をセメント系固化材で造粒固化したものであり、丸みを帯びた形状であるが表面は平滑でなく摩擦が大きい、吸水率が高い、といった特徴を有する。粒径5~15mmに調整したものを「PS-M」、粒径15~20mmに調整したものを「PS-L」として使用した。

フライアッシュ造粒物(写真-4)は石炭火力発電施設で発生するフライアッシュをセメント系固化材で造粒固



写真-2 がいし廃材破碎骨材



写真-3 パルプスラッジ焼却灰造粒物

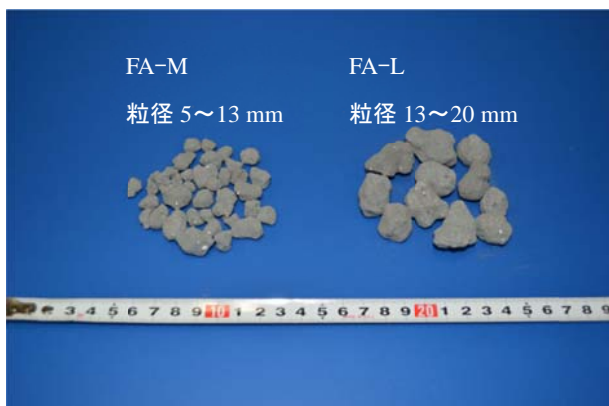


写真-4 フライアッシュ造粒物

化したものであり、性質はパルプスラッジ造粒物によく似ているが、粒径のレンジが異なり、粒径 5~13mm に調整したものを「FA-M」、粒径 13~20mm に調整したものを「FA-L」として使用した。

既報¹⁾において、がいし廃材破碎骨材を用いたポーラスコンクリートの調合の検討として、セメントペーストの調合を水セメント比 25%、混和剤使用量を対セメント比で 0.5%とする特定の 1 種類のみとした場合での実験結果について報告した。今回は、その結果を含め、複数のセメントペースト調合で実験を行ない、より汎用性のある結果を導いた。

表-2 設定フロー値が得られるセメントペースト調合

設定フロー値	水セメント比 (%)	混和剤使用量 (対セメント比) (%)
175±15	22	0.65
	25	0.35
	28	0.20
215±15	22	0.75
	25	0.50
	28	0.30
255±15	22	0.85
	25	0.60
	28	0.40

4. 調合選定方法

今回行なった、良好な練り上がり状態となる調合の選定方法は以下のステップとなる。

ステップ 1 セメントペーストのフロー値を 3 種類設定する

ステップ 2 目標空隙率を変動させた調合で試し練りを繰り返し、良好な練り上がり状態となる調合を特定する

ステップ 3 ステップ 2 で得られた調合において、同一フロー値で水セメント比及び混和剤混入率を変動させたペーストの調合で混練し、同様に良好な練り上がり状態となることを確認する

ステップ 1 では、セメントペーストフロー値を 175±15 (硬粘性)、215±15 (標準粘性)、255±15 (軟粘性) の 3 種類に設定した。即ち、セメントペーストの粘性について硬粘性から軟粘性まで幅広く対応可能となるようにした。予備実験により、上記 3 種類のフロー値となる水セメント比と混和剤使用量の組み合わせをフロー試験を繰り返して求め、各フロー値が得られるセメントペースト調合を水セメント比 22%、25%、28%の 3 種類それぞれにおいて導いた。得られたセメントペースト調合を表-2 に示す。これにより、水セメント比が低い調合から高い調合まで対応可能となるようにした。

ステップ 2 では、表-2 における水セメント比 25% の場合の 3 種類のセメントペースト調合において、目標空隙率を 5%きざみで変動させた調合で試し練りを繰り返し、良好な練り上がり状態となる調合を特定していった。目標空隙率はポーラスコンクリートの調合計算をする際に設定する空隙率であり、型枠に粗骨材のみが投入されたと仮定した場合に生じる空隙中に、セメントペーストが充填されて埋められた残りの空隙の割合となる。即ち、ポーラスコンクリートの空隙率は、粗骨材のみの場合の

空隙をセメントペーストが充填した割合と対をなす物理量であり、ポーラスコンクリートの空隙率が高いことはセメントペースト充填量が低く、ポーラスコンクリートの空隙率が低いことはセメントペースト充填量が高いことを意味する。目標空隙率を変動させることは、セメントペーストの量を変動させることであり、目標空隙率を高く（低く）すると、それに応じてセメントペースト量が少なく（多く）なる。このことを用いて、セメントペーストの過不足の調整を、目標空隙率を変動させることでコントロールし、良好な練り上がり状態が得られた目標空隙率による調合を、適切な調合と評価した。

ステップ3では、表-2を用いて、同一フロー値となる他の水セメント比である22%と28%の場合においても、ステップ2で得られた目標空隙率による調合で混練した際に良好な練り上がり状態となるかの確認を行なった。これにより、セメントペーストの粘性の条件については、水セメント比や混和剤使用量に関わらず、フロー値のみで管理できることを実験的に裏付けることが可能となる。

良好な練り上がり状態の評価方法は、練り上がったポーラスコンクリートを半透明容器に打設し、容器越しにセメントペーストの垂れや不足がないか目視で確認することによって行なった。ペーストの垂れのあるもの、良好なもの、ペーストが不足しているものの最低3パターンの練り上がり状態を確認し、「良好」な状態を特定した。また硬化後脱型して写真-1のように天地反転させて観察し、最終的な評価とした。

5. 調合選定結果及び考察

ステップ1で設定した3種類のセメントペーストフロー値を用い、がいし廃材破碎骨材（がいし-S・がいし-M・がいし-L）、パルプスラッジ焼却灰造粒物（PS-M・PS-L）、フライアッシュ造粒物（FA-M・FA-L）のすべての粒径の粗骨材について、ステップ2における水セメント比25%のセメントペーストを用いた試し練りを行ない、前述の半透明容器を用いた方法により、良好な練り上がり状

表-3 良好となる目標空隙率（水セメント比25%）

骨材	粒径	フロー値	目標空隙率(%)
がいし	がいし-S	175±15	25
		215±15	25
		255±15	30
	がいし-M	175±15	25
		215±15	30
		255±15	35
がいし-L	175±15	30	
	215±15	35	
	255±15	40	
P S 灰造粒物	PS-M	175±15	20
		215±15	25
		255±15	25
	PS-L	175±15	25
		215±15	30
		255±15	30
F A 造粒物	FA-M	175±15	20
		215±15	30
		255±15	30
	FA-L	175±15	25
		215±15	30
		255±15	30

※がいし：がいし廃材破碎骨材
PS 灰造粒物：パルプスラッジ焼却灰造粒物
FA 造粒物：フライアッシュ造粒物

態となる目標空隙率を導いた。得られた結果を表-3に、グラフ化したものを図-1にそれぞれ示す。

表及び図より、がいし廃材破碎骨材がパルプスラッジ焼却灰造粒物及びフライアッシュ造粒物に比べ良好な練り上がり状態となる目標空隙率が高くなる傾向が見られる。このことは、がいし廃材破碎骨材の表面の摩擦が小さく、セメントペーストが付着しにくく垂れが生じやす

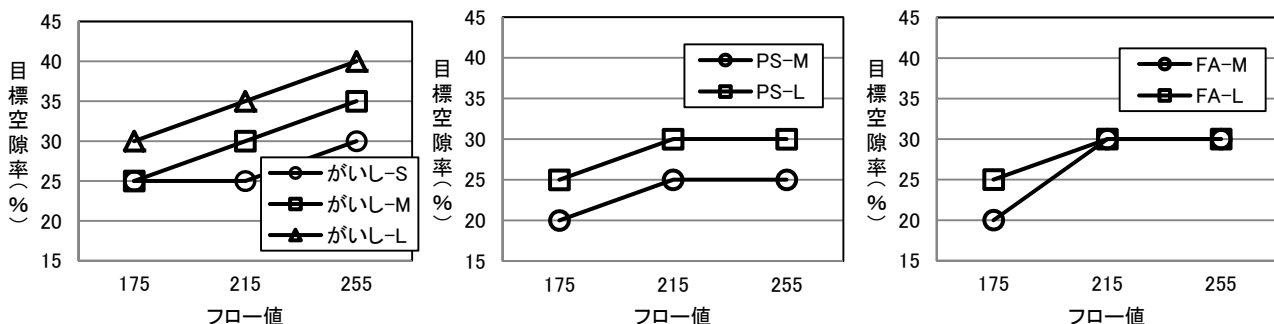


図-1 良好となる目標空隙率（水セメント比25%）

表-4 練り上がり状態の確認結果及び選定された割合

骨材	粒径	フロー値	目標空隙率 (%)	W/C (%)	Sp/C (%)	単位量 (kg/m ³)				結果
						C	W	G	Sp	
がいし 廃材 破砕骨材	がいし-S	175±15	25	22	0.65	460	101	1277	3.0	良好
				25	0.35	437	109	1277	1.5	良好
				28	0.20	415	116	1277	0.8	良好
		215±15	25	22	0.75	460	101	1277	3.5	良好
				25	0.50	437	109	1277	2.2	良好
				28	0.30	415	116	1277	1.3	良好
		255±15	30	22	0.85	370	81	1277	3.1	良好
				25	0.60	350	88	1277	2.1	良好
				28	0.40	333	93	1277	1.3	良好
	がいし-M	175±15	25	22	0.65	449	99	1294	2.9	良好
				25	0.35	425	106	1294	1.5	良好
				28	0.20	404	113	1294	0.8	良好
		215±15	30	22	0.75	358	79	1294	2.7	良好
				25	0.50	339	85	1294	1.7	良好
				28	0.30	322	90	1294	1.0	良好
255±15	35	22	0.85	267	59	1294	2.3	良好		
		25	0.60	253	63	1294	1.5	良好		
		28	0.40	240	67	1294	1.0	良好		
がいし-L	175±15	30	22	0.65	372	82	1273	2.4	良好	
			25	0.35	353	88	1273	1.2	良好	
			28	0.20	335	94	1273	0.7	良好	
	215±15	35	22	0.75	281	62	1273	2.1	良好	
			25	0.50	266	67	1273	1.3	良好	
			28	0.30	253	71	1273	0.8	良好	
255±15	40	22	0.85	190	42	1273	1.6	良好		
		25	0.60	180	45	1273	1.1	良好		
		28	0.40	171	48	1273	0.7	良好		
パルプ スラッジ 焼却灰 造粒物	PS-M	175±15	20	22	0.65	330	73	1072	2.2	良好
				25	0.35	313	78	1072	1.1	良好
				28	0.20	298	83	1072	0.6	良好
		215±15	25	22	0.75	239	53	1072	1.8	良好
				25	0.50	227	57	1072	1.1	良好
				28	0.30	216	60	1072	0.7	良好
	255±15	25	22	0.85	239	53	1072	2.0	良好	
			25	0.60	227	57	1072	1.4	良好	
			28	0.40	216	60	1072	0.9	良好	
	PS-L	175±15	25	22	0.65	249	55	1054	1.6	良好
				25	0.35	236	59	1054	0.8	良好
				28	0.20	224	63	1054	0.5	良好
215±15		30	22	0.75	158	35	1054	1.2	良好	
			25	0.50	150	37	1054	0.8	良好	
			28	0.30	142	40	1054	0.4	良好	
255±15	30	22	0.85	158	35	1054	1.3	良好		
		25	0.60	150	37	1054	0.9	良好		
		28	0.40	142	40	1054	0.6	良好		
フライ アッシュ 造粒物	FA-M	175±15	20	22	0.65	364	80	1056	2.4	良好
				25	0.35	345	86	1056	1.2	良好
				28	0.20	328	92	1056	0.7	良好
		215±15	30	22	0.75	182	40	1056	1.4	良好
				25	0.50	173	43	1056	0.9	良好
				28	0.30	164	46	1056	0.5	良好
	255±15	30	22	0.85	182	40	1056	1.6	良好	
			25	0.60	173	43	1056	1.0	良好	
			28	0.40	164	46	1056	0.7	良好	
	FA-L	175±15	25	22	0.65	289	64	1040	1.9	良好
				25	0.35	274	69	1040	1.0	良好
				28	0.20	261	73	1040	0.5	良好
215±15		30	22	0.75	198	44	1040	1.5	良好	
			25	0.50	188	47	1040	0.9	良好	
			28	0.30	179	50	1040	0.5	良好	
255±15	30	22	0.85	198	44	1040	1.7	良好		
		25	0.60	188	47	1040	1.1	良好		
		28	0.40	179	50	1040	0.7	良好		

※C : セメント, W : 水, G : 粗骨材, Sp : 混和剤 (高性能 AE 減水剤)

い（ペーストがのりにくい）ため、目標空隙率を高く（セメントペースト量を少なく）しないとペースト過多になることを示していると思われる。パルプスラッジ焼却灰造粒物及びフライアッシュ造粒物は逆に、表面の摩擦が大きく、セメントペーストが付着しやすく垂れにくい（ペーストがのりやすい）ため、目標空隙率を低く（セメントペースト量を多く）しないとペースト過少になることを示していると思われる。同一の骨材で粒径ごとに比較した場合、粒径が大きくなるほど良好な練り上がり状態となる目標空隙率が高くなる傾向が見られる。このことは、骨材粒径が大きくなると骨材表面積の総和が小さくなり、必要なセメントペースト量が減少するため、目標空隙率が高くなることを示していると思われる。同一骨材・同一粒径において設定フロー値ごとに比較した場合、設定フロー値が大きくなるほど良好な練り上がり状態となる目標空隙率が高くなる傾向が見られる。このことは、フロー値が大きい軟粘性のペーストの場合、フロー値が小さい硬粘性のペーストに比べ骨材に付着しにくく垂れが生じやすい（ペーストがのりにくい）ため、目標空隙率が高く（セメントペースト量が少なく）なることを示していると思われる。これらの結果より、本手法は、粗骨材表面の性質・粗骨材の粒径・セメントペーストの粘性などの諸条件を包含した評価が可能で、未利用の粗骨材を用いたポーラスコンクリートの適切な調合を効率よく導くことが可能な合理的な手法であるといえる。

ステップ2で得られた水セメント比25%のセメントペーストを用いた場合の調合選定結果をふまえ、ステップ3では同一フロー値となる水セメント比22%と28%のセメントペーストにおいても目標空隙率が同じであれば同様に良好な練り上がり状態となるかの確認のための混練を行ない、前述の半透明容器を用いた方法により評価した。得られた結果を表-4に示す。表は、ステップ2の水セメント比25%での目標空隙率及び「良好」となった結果も併記し、各材料の単位量も示した最終的な調合選定結果である。表より、すべての骨材、粒径、設定フロー値において良好となる結果が得られた。このことは、セメントペーストの粘性において、フロー値が等しいならば、水セメント比や混和剤使用量が異なっても、ポーラスコンクリートの練り上がり状態は等しく良好となることを示している。即ち、セメントペーストの粘性の条件においてはフロー値の管理のみでよいことが明らかになった。

これらの結果より、未利用の粗骨材を用いてポーラスコンクリートの製造を行なう際の調合設計手法として、セメントペーストのフロー値を設定し、試し練りにより良好な練り上がり状態となる目標空隙率を選定すること

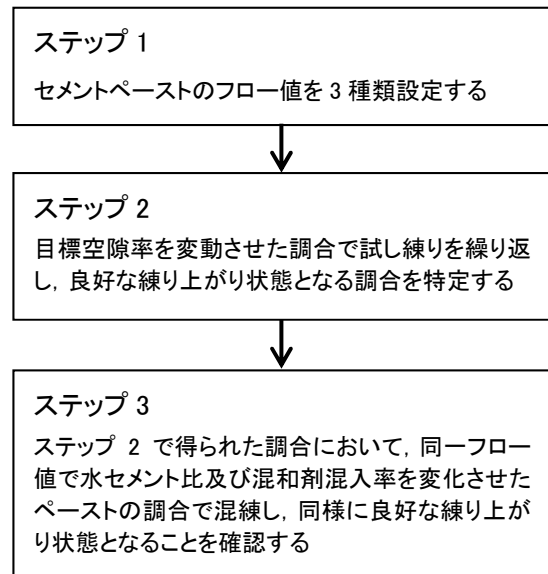


図-2 有用性が確認された調合選定フロー

により、粗骨材表面の性質や粒径が多様な条件であっても、効率よく適切な調合を見出すことが可能であることが分かった。図-2に、今回有用性が確認された調合選定のフローを示す。また、セメントペーストのフロー値を一定にして水セメント比を小さくして接着強度に期待する調合としたり、セメントペーストのフロー値を高く設定して空隙率の高いポーラスコンクリートを製造する等の種々の選択肢に対応した調合とすることができ、使用環境や必要条件に応じた任意の性能をもつポーラスコンクリートの調合を選定することが可能となり、有用な調合設計手法であるといえる。

6. まとめ

未利用の粗骨材を用いてポーラスコンクリートの製造を行なう際の調合設計手法として、セメントペーストのフロー値の管理及び良好な練り上がり状態となる目標空隙率の選定により、粗骨材表面の性質や粒径によらず適切な調合を得ることが可能であることが分かった。

謝辞

本研究は光洋電器工業（株）ならびに（有）福岡建設材の協力のもとで行ないました。実験の実施にあたっては、熊本大学技術職員 戸田善統氏ならびに熊本大学学生諸君に協力頂きました。関係各位に深謝します。

参考文献

- 1) 武田浩二, 村上聖, 牟田口克洋: がいしを粗骨材としたポーラスコンクリートの基礎物性, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.1469-1474, 2011.6