

論文 コンクリートがれきを用いたセメント硬化体の配合選定に関する実験的検討

松元 淳一*1・堀口 賢一*2・片山 三郎*3・丸屋 剛*4

要旨: 東日本大震災では、津波による沿岸部の甚大な被害とともに大量のコンクリートがれきが発生した。このコンクリートがれきの処理は、東日本大震災からの復旧・復興のため、早急に解決しなければならない重要課題の一つである。その一方で、コンクリート用骨材が不足する状態が生じている。そこで、コンクリートがれきを建設資材として有効に活用することを目的として、粗く破碎したコンクリートがれきにセメントと水を混合し、セメント硬化体として利用する技術を開発した。本稿では、開発技術のうち、コンクリートがれきの品質評価方法と、がれきを用いたセメント硬化体の配合選定方法について報告する。

キーワード: 東日本大震災, コンクリートがれき, 津波堆積物, 超硬練りセメント混合物, 配合選定

1. はじめに

東日本大震災では、岩手、宮城、福島で 300 万トンを超える大量のコンクリートがれきが発生した¹⁾。このコンクリートがれきは、震災復興に向けて、適切に、かつ有効に処理しなければならないが、コンクリートがれきと津波堆積物（津波により陸上に運ばれた砂など）は、埋立材や道路用砕石、コンクリート用再生骨材など、限られた用途に利用されている。

一方、東日本大震災からの復旧・復興のためのコンクリート用骨材が不足している状況を鑑みると、コンクリートがれきを骨材として使用することが有効であると考えられる。

そこで本研究では、粗く破碎したコンクリートがれきをセメント硬化体の骨材として活用する方法について検討を行った。なお、セメント硬化体の要求される圧縮強度は低いものを想定しており、振動ローラで転圧施工する中詰め材や嵩上げ材として活用することを目指した。

本稿では、コンクリートがれきの材料特性、粒度分布の評価方法、およびこのがれきを用いたセメント硬化体の配合選定方法について報告する。

量ブロックを含むもの（B シリーズ）、およびコンクリートに津波堆積物を含むもの（C シリーズ）の 3 シリーズとし、目視判定にてサンプリングを行った。なお、集積されているコンクリートがれきは、津波堆積物を含む C シリーズの形態がほとんどであった。いずれのコンクリートがれきも、既存の移動式破碎機を用いて破碎し、破碎機の刃間隔を 50, 60, 70mm に調整して試料を製作した。なお、ここでの刃間隔とは、移動式破碎機におけるジョークラッシュ部分の最小間隔のことである。

粒度分布については、JISのふるい分け試験に加え、画像解析処理²⁾による粒度分布推定の有用性についても併せて検証した。画像解析処理の概要を図-1に示す。この

表 - 1 材料試験の評価項目と試験方法

評価項目	試験名	試験方法
粒度分布	ふるい分け試験	0~80mm: JIS A 1102 0.075mm以下: JIS A 1103
	画像解析試験	画像解析処理を用いた粒度分布推定
密度・吸水率	密度・吸水率	5~80mm: JIS A 1110 5mm以下: JIS A 1109
単位容積質量・実積率	単位容積質量試験 実積率試験	JIS A 1104 5~80mm: 試験容器30リットル 5mm以下: 試験容器1~2リットル

2. 実験概要

2.1. コンクリートがれきの材料試験

材料試験の評価項目と試験方法を表-1に示す。また、試験に使用したコンクリートがれきの種類を表-2に示す。材料試験は、粒度分布、密度・吸水率、微粒分量、単位容積質量および実積率について JIS に準拠して測定した。コンクリートがれきの種類としては、コンクリートを主体とするもの（A シリーズ）、コンクリートに軽

表 - 2 コンクリートがれきの種類

コンクリートがれきの種類	目視の状況 (含まれているもの)	破碎機の刃間隔 (mm)	本実験での呼称記号
コンクリートがれき	コンクリートがれきを主体とする	50	A A50 A60 A70
		60	
		70	
コンクリートがれき+軽量ブロック	コンクリートがれきに加え、軽量ブロックやレンガなどを比較的多く含む	50	B B50 B60 B70
		60	
		70	
コンクリートがれき+津波堆積物	コンクリートがれきに加え、津波堆積物を比較的多く含む	50	C C50 C60 C70
		60	
		70	

*1 大成建設株式会社 技術センター 土木技術研究所 土木構工法研究室 主任 博士 (工学) (正会員)

*2 大成建設株式会社 技術センター 土木技術研究所 土木構工法研究室 課長 工修 (正会員)

*3 大成建設株式会社 技術センター 土木技術開発部 建設 ICT チーム 主任 学士 (工学) (非会員)

*4 大成建設株式会社 技術センター 土木技術研究所 土木構工法研究室 室長 工博 (正会員)

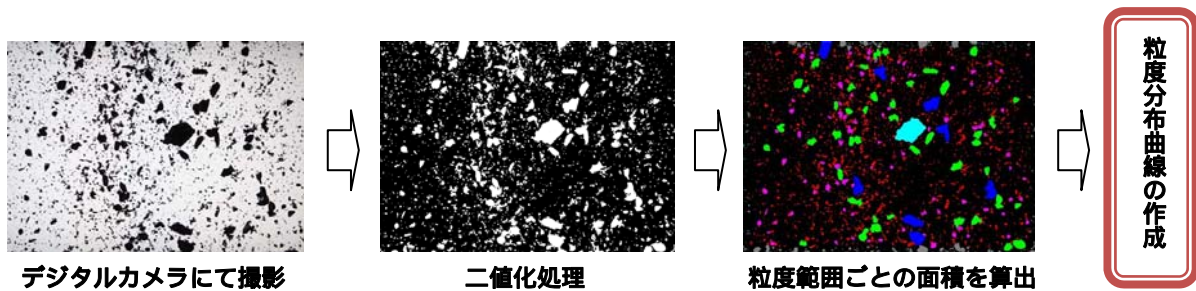


図 - 1 画像解析処理の概要²⁾

画像解析技術は、デジタルカメラで撮影した画像を二値化処理し、所定の粒径毎の合計面積を求め、粒度分布曲線を作成するものである。本実験では、1回の計測に20kgの試料を使用した。

実験では、ふるい分けにより求めた粒度分布、ならびにその粒度分布に対して、粗粒分あるいは細粒分が変化した場合を想定し、5mm以下のがれき質量率“S/A”（練り混ぜたコンクリートがれきの全質量Aに対する、5mmふるいを通過するがれきの質量Sの比率で、通常のコンクリートの細骨材率s/aに相当する値であり、質量率を意味することから、大文字のAとSで表す）により調整した粒度分布について測定し、画像解析法により推定された粒度分布と既知の粒度分布と比較して画像解析技術の適用性を検討した。

2.2. 配合選定試験

本研究で対象とするセメント硬化体においては、土木学会規準 JSCE-F 508「超硬練りコンクリートの締固め性試験方法（案）」において充填率が98%以上、すなわち完全充填の配合を選定することを目標とした。これは、安定した品質のセメント硬化体を得ることと、コンクリートがれきに有害物質が含まれた場合に、その溶出を抑制するためである。

練混ぜは、コンクリートがれきが練混ぜ中に破損することがないように、容量が150Lの傾胴ミキサを用いて、1バッチあたりの練混ぜ量を60Lとして行い、練混ぜ性状を目視により確認した。また、練り混ぜたセメント混合物は、呼び寸法40mmのふるいでウェットスクリーニングして、スランブ試験とJSCE-F 508に準拠した加振締固め性試験を行い、締固め性状を確認した。

使用材料としては、セメントは高炉セメントB種（密度3.04g/cm³）、コンクリートがれきとしてはコンクリートに津波堆積物を含むCシリーズを使用した。配合選定試験では、水セメント比を一定とし、単位水量と単位セメント量を調整した。また、S/Aが加振締固め性に及ぼす影響について確認した。超硬練りコンクリートの配合設計に際しては、コンクリートがれきの実積率に基づく間隙充填の指標を参考にした³⁾。

2.3. 圧縮強度試験

圧縮強度試験用供試体の寸法はφ150×300mmとし、配合選定試験で練り混ぜたセメント混合物を呼び寸法40mmのふるいでウェットスクリーニングしたものを試料とした。供試体の締固めは、加振締固め性試験装置を用い、供試体を成形するのに必要な試料の質量を配合から算定して、その量を型枠に充填することで製作した。試験材齢としては、材齢7日、材齢28日とし、それぞれ1体、3体とした。また養生は、製作から7日までは鋼製型枠に入れた状態で現場封緘養生し（現地外気温：13℃～20℃）、その後材齢28日までは標準水中養生とした。

3. 試験結果および考察

3.1. コンクリートがれきの材料試験結果

3.1.1. 密度・吸水率

図-2にコンクリートがれきの絶乾密度および吸水率を示す。密度・吸水率は通常のレディミクストコンクリート用骨材の規格値（密度：2.50g/cm³以上、吸水率：3.0%以下）より、絶乾密度は小さく、吸水率は大きい。なお、配合選定試験時の5mm以上のがれきの含水率は、5～10%程度、5mm以下のがれきの含水率は15～20%程度であり、通常のコンクリートよりも多い状態であった。また、粒径5mm以上のコンクリートがれきBの密度・吸水率は、他のコンクリートがれきと異なっており、軽量ブロックの混入が影響を及ぼしていると考えられる。

3.1.2. 実積率

実積率は、コンクリートがれきの種類の如何に拘らず、粒径5mm以上の粗骨材相当、粒径5mm以下の細骨材相当のいずれも60～70%の範囲内にあり、通常のコンクリート用骨材と同程度であった。

3.1.3. 微粒分量

図-3にコンクリートがれきに含まれる微粒分量を示す。通常のコンクリート用骨材（3%以下）よりも極めて多く、特に、コンクリートがれきC（津波堆積物を含むコンクリートがれき）には多く含まれており、津波堆積物由来の微粒分が含まれていると考えられる。

3.1.4. ふるい分けによる粒度分布

図-4にコンクリートがれきの種類ごとの破砕機刃間

隔と粒度分布の関係を示す。ここでの A, B, C とは、コンクリートがれきの種類であり、これら記号に付記した 50, 60 および 70 の数値は破砕機の刃間隔 (mm) のことを示している。また、図中の参考範囲とは、転圧締めめで施工する超硬練り仕様のコンクリートについての、既往の実績に基づく粒度分布の範囲であり、本研究では、この参考範囲を管理の目安とした³⁾。

コンクリートがれきのふるい分けによる粒度分布は、がれきの種類の如何に拘らず、刃間隔を狭くすると、細くなる傾向が認められ、破砕機の刃間隔を50mmとしたものは既往実績の参考範囲内に分布している傾向が認められた。また、津波堆積物を含むコンクリートがれきCは、いずれの刃間隔においても、既往実績の参考範囲内に分布しており、特に、粒径1mm以下の累積通過百分率が他の種類よりも多く、津波堆積物が多く含まれていることが影響していると推察される。

3.1.5. 画像処理による粒度分布

図-5に粒度分布の実測値とその $\pm 3\%$ の範囲、および画像解析処理に基づく推定粒度分布(測定回数4回)とその平均値を示す。ふるい分けそのままの状態、およびふるい分けの状態から粗粒分、細粒分を多く調整した状態のいずれも、粒度分布の実測値の概ね $\pm 3\%$ の範囲内にあり、実用上問題ない精度で粒度分布を推定できることが確認できた。

3.2. 配合選定試験結果

3.2.1. 練混ぜ性状

表-3に超硬練りコンクリートの配合および配合選定試験の結果の一例を示す。ここで表中のE98とは、JSCE-F508にて充填率98%が得られる、すなわち完全充填時の締固め完了仕事量と定義されている。ここでは、充填率98%以上を完全充填とし、E98を完全充填時の締固めエネルギーとした。適切なコンシステンシーを有する超硬練り

コンクリートでは、充填率98%が得られる締固めエネルギーは100J/L程度以下であり、コンクリートがれきを用

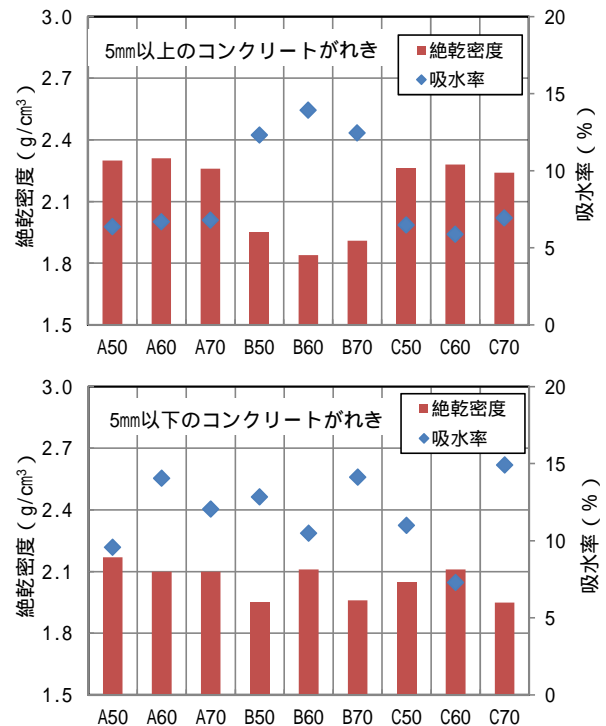


図-2 コンクリートがれきの絶対乾密度と吸水率

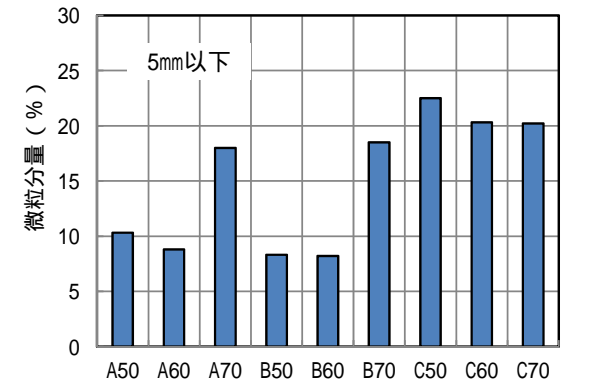


図-3 コンクリートがれきに含まれる微粒子量

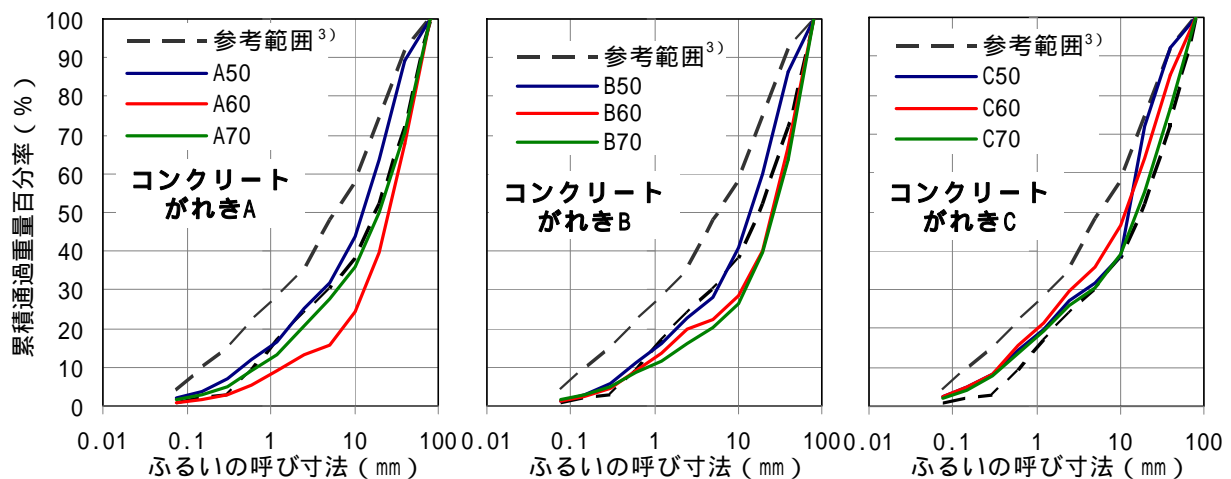


図-4 コンクリートがれきの種類ごとの破砕機刃間隔と粒度分布の関係

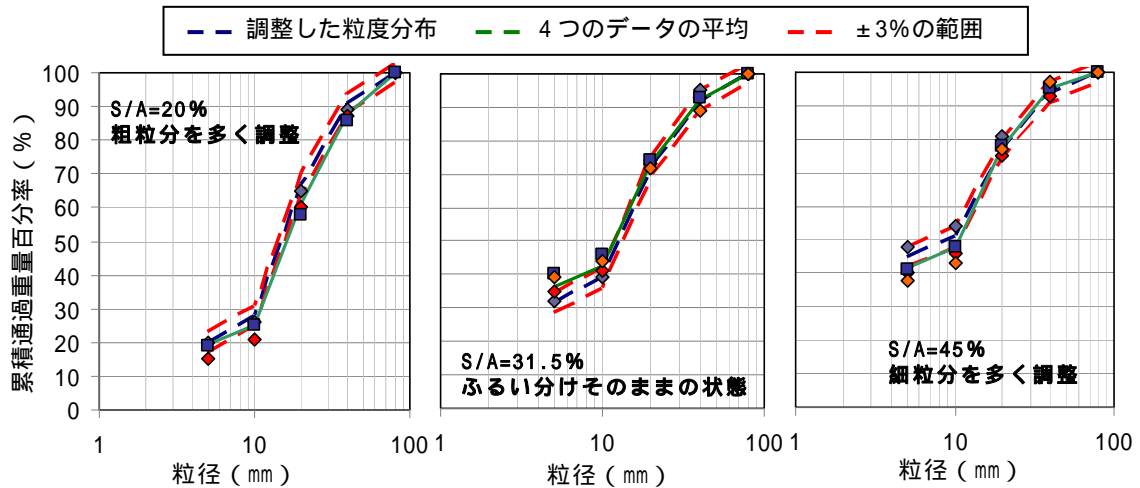


図 - 5 画像解析処理により求めたコンクリートがれきの粒度分布

表 - 3 超硬練りコンクリートの配合および配合選定試験の結果の一例

W/C (%)	S/A (%)	単位量 (kg/m ³)						練混ぜ性状		
		W	BB	コンクリートがれき				スランブ (cm)	混合物温度 (°C)	E98 (J/L) [完全充填時の 締固め完了仕事量]
				5mm以上	5mm以下					
100	36.7	158	158	1164	675	1.2	1.65	0	21.5	76.1
		150	150	1180	684	1.12	1.61	0	22.0	充填率98%にならず
105	35.8	158	150	1169	678	1.17	1.64	0	19.0	33
		105	100	1292	720	0.74	1.33	0	20.0	充填率98%にならず
	27.5	152	145	1356	514	1.49	1.20	0	21.5	131.6
		131	125	1404	532	1.24	1.10	0	20.5	充填率98%にならず
	32.1	158	150	1256	594	1.34	1.42	0	21.5	104.5
		147	140	1279	604	1.23	1.36	0	20.0	充填率98%にならず

W/C: 水セメント比, W: 工業用水, BB: 高炉セメントB種

α : 粒径5mm以下のがれきの実積率から求まる間隙体積と、それを充填するセメントペースト体積の比率を表す指数

β : 粒径5mm以上のがれきの実積率から求まる間隙体積と、それを充填するモルタル体積の比率を表す指数

いた場合でも一定の配合条件下では完全充填できるスランブ0cmの超硬練り配合のセメント混合物を製造することが可能であった。また併せて、コンクリートがれき自体の含水率は、5mm以下の細粒分で20%と高かったが、表面水の補正等の品質管理を適切に行うことで、安定した性状のものが製造可能であることが確かめられた。次節では、配合条件に関して考察する。

3.2.2. 締固め性状

図 - 6に α および β と完全充填時の締固めエネルギーの関係を示す。また併せて、配合選定において完全充填できなかった場合の α 、 β についても示した。 α 、 β とは充填性の指標であり、 α は粒径5mm以下の細骨材相当のがれきの実積率から求まる間隙体積と、それを充填するセメントペースト体積の比率を表す指数である。一方、 β は粒径5mmを超える粗骨材相当のがれきの実積率から求まる間隙の体積と、それを充填するモルタル体積の比率を表す指数であり、いずれも配合理論上は1.0を上回らなければ、完全充填が得られないことを意味する。

これより、 α は1.0~1.7で完全充填となる配合が得られる。しかしながら、 α が1.4を超えた場合、写真 - 1の左に示すようにセメント混合物表面はペーストが過多で、

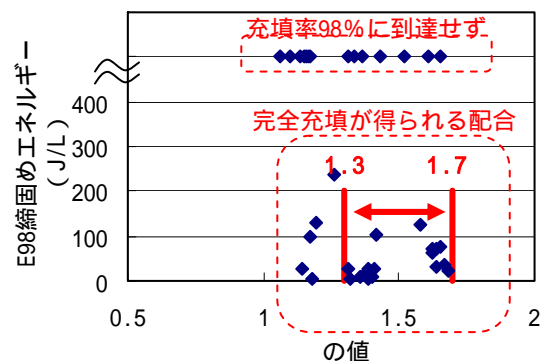
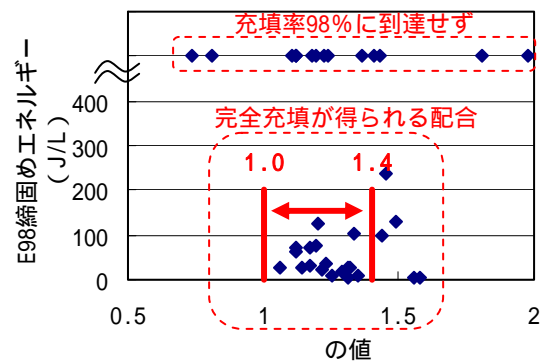


図 - 6 α と完全充填時の締固めエネルギーの関係

分離気味の状態となったことから、 α の適切な範囲としては 1.0~1.4 と考えられる。

一方、 β は1.1~1.7 の範囲で完全充填が可能であったが、1.3を下回ると、写真 - 1の右に示すとおり、モルタルが過少で空洞が認められることから、締固め性は不良と判断できる。このことから、 β の適切な範囲としては、1.3~1.7 であると考えられる。ただし、 α 、 β の値が適切な範囲であっても、配合によっては完全充填できない場合もあった。写真 - 2は、 α 、 β の値が上述の範囲にあり、完全充填が得られた配合（同写真右）と得られない配合（同写真左）の締固め性試験終了後のセメント混合物の状況を示した。セメント混合物表面の性状は明らかに異なり、 α 、 β の値のみで配合を選定することは難しいと考えられ、S/Aの違いが影響していると示唆された。

図 - 7にS/Aを変化させたセメント混合物の締固め性試験3分後の充填率と単位ペースト量の関係を示す。また併せて写真 - 3には、S/A=36.7%とし、単位ペースト量を変化させた配合における加振締固め性試験終了後のセメント混合物の状況を示す。ここで、充填率を3分間の加振締固めにより評価したのは、この程度の加振で充填率が収束したためである。

図 - 7によれば、いずれのS/A においても単位ペースト量が多くなるにしたがって、充填率は高くなる傾向を示し、S/A によって完全充填できる単位ペースト量は異なることがわかる。これは、S/A ごとにがれきの間隙を充填するのに必要な単位ペースト量が存在することを示している。このことから、例えば現場実測のS/Aが小さい場合には、粒径5mm 以下の細粒分量として津波堆積物を加えることも有効であると考えられる。

3.3. 圧縮強度試験結果

図 - 8に水セメント比とセメント硬化体の圧縮強度の関係を示す。材齢7日、28日のいずれも、水セメント比が大きくなるにしたがって、圧縮強度は小さくなり、コンクリートがれきを用いた場合でも、通常のコンクリートと同様に圧縮強度に関する水セメント比説が適用できると考えられる。

4. 品質管理方法，配合設計方法の提案

本実験から得られた知見より、実施工への適用に際して考えられるコンクリートがれきの破碎方法と粒度分布の管理方法、およびコンクリートがれき使用セメント硬化体の配合設計方法を提案する。

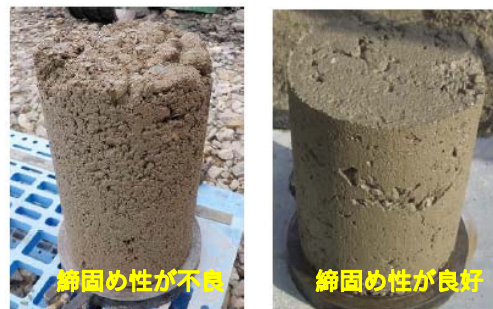
4.1. 破碎方法と粒度分布の管理方法

コンクリートがれきの粒度分布の調整は、破碎機の刃間隔の調整によるが、集積されているコンクリートがれきの状態によっては、一次破碎のみでは所定の粒度に調



α : 1.56, β : 1.32
 α : 1.37, β : 1.15
 ・ は適切な範囲外
 ・ は適切な範囲
 ・ は適切な範囲
 ・ は適切な範囲外

写真 - 1 α 、 β が適切でない場合のセメント混合物の表面状況



S/A=36.7% α : 1.20, β : 1.65
 S/A=32.4% α : 1.22, β : 1.68

写真 - 2 α 、 β の値が適切な範囲にある場合のセメント混合物の表面状況



写真 - 3 S/A=36.7%のセメント混合物の性状

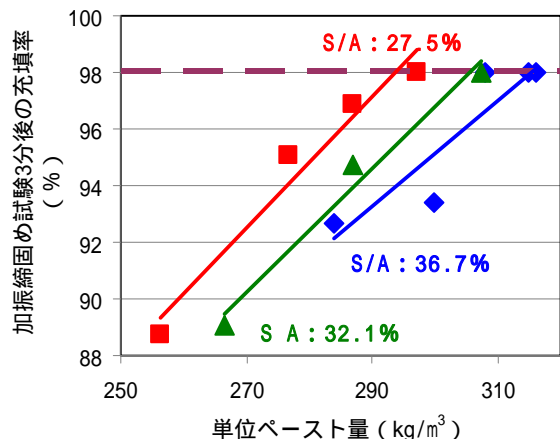


図 - 7 加振締固め 3 分後の充填率と単位ペースト量の関係

整できない場合も考えられる。このような場合には、再度、破砕機の刃間隔を調整した上で二次破砕するか、粒径5mm以下の細粒分を人工的に調整することで所定の粒度が確保できる。粒径5mm以下の細骨材としては、津波堆積物を積極的に加えることも有効な手法となる。

4.2. セメント硬化体の配合設計方法

要求される設計基準強度に対して、実構造物との差異を勘案した割増係数を乗じた供試体圧縮強度を設定する。これを水セメント比と供試体圧縮強度との関係式に当てはめ、水セメント比を決定する。次に、本実験結果から得られたS/Aと完全充填するのに必要な単位ペースト量との関係から、単位水量、単位セメント量、および単位がれき量を求める。このときの充填性は締固め性試験により評価し、充填性に関する指標 α 、 β を得て、品質管理の基準とする。充填性が不良な場合は、単位水量と単位セメント量を調整して、適切な α 、 β の範囲を定める。ただし、単位水量と単位セメント量が過大になるときは、S/Aを調整することも考えられる。これによって定めた配合で試験練りを行い、所定のスランプと加振締固め性、および圧縮強度が得られることを確認する。

5. まとめ

本研究では、東日本大震災で発生したコンクリートがれきを用いたセメント硬化体について、がれき自体の材料特性、練混ぜ・締固め特性、およびセメント硬化体の強度特性を明らかにすることを目的として実験的検討を行った。以下に得られた結果を示す。

(1) 通常のコンクリート用細骨材および粗骨材と比較して、コンクリートがれきの絶乾密度は小さく、吸水率が大きくなる結果であった。しかしながら、表面水の補正等の品質管理を適切に行うことで、安定した性状の超硬練りセメント混合物を製造できる。

(2) 画像解析処理によるコンクリートがれきの推定粒度分布は、ふるい分けによる粒度分布の概ね $\pm 3\%$ の範囲内にあった。このことから、施工時における粒度分布の品質管理に画像解析処理技術を適用することは十分可能であると考えられる。

(3) S/A（コンクリートがれきの全質量に対する、粒径5mm以下のがれき質量の比率）と、締固めエネルギーとの関係においては、S/Aの如何に拘らず、単位ペースト量が多くなるにしたがって、充填率が高くなった。また、S/Aに応じて完全充填するのに必要な単位ペースト量は異なり、コンクリートがれきのS/Aの実測データを基に、適切な単位ペースト量を定めることが有効である。

(4) 完全充填が得られる適切な α と β の範囲は、それぞれ1.0~1.4、1.3~1.7であったが、これは、S/Aに応じた適切な単位ペースト量を確保していることが条件である。

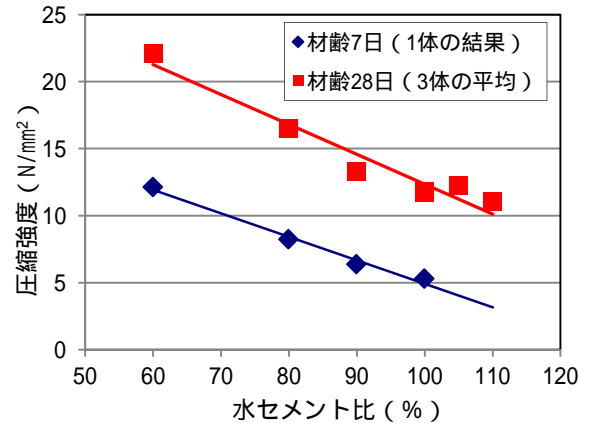


図 - 8 セメント硬化体の圧縮強度

(5) 完全充填できる配合では、水結合材比が大きくなることに比例して、圧縮強度が低くなることから、通常のコンクリートと同様に圧縮強度に関するセメント水比説が適用できると考えられる。

(6) コンクリートがれきの粒度分布は、破砕機の刃間隔の調整によるものとする。細粒分が少ない場合には、津波堆積物を加えることで調整し、所定の粒度を確保できる。

(7) コンクリートがれきを用いたセメント硬化体の配合は、設計基準強度に基づき水セメント比を設定し、完全充填するのに必要な単位ペースト量をS/Aに応じて定める。このときの充填性は締固め性試験により評価し、充填性に関する指標 α 、 β を得て、品質管理の基準とする。

謝辞

本実験は、国土交通省の平成23年度建設技術研究開発助成制度「震災対応型技術開発公募」に応募し、課題採択されて実施したものです。同制度のもとに設立した産学官テーマ推進委員会においては、宇治公隆委員長（首都大学東京大学院都市環境科学研究科教授）をはじめ、各委員から適切な助言と評価をいただきました。ここに厚く感謝申し上げます。また、コンクリートがれきと実験ヤードは、釜石市のご厚意によりご提供いただきました。重ねて御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 環境省：災害廃棄物の処理の推進に関する関係関係会合資料，2012.6
- 2) 小山哲，丸屋剛，堀口賢一，澤健男：ガボールウェーブレット変換を用いたコンクリートのひび割れ画像解析技術の開発，土木学会論文集E2，Vol.68，No.3，pp178-194，2012
- 3) 砂防ソイルセメント活用研究会編：砂防ソイルセメント活用ガイドライン，2002.1