

コンクリートがれきのセメント硬化体としての有効利用技術

堀口賢一，松元淳一，丸屋剛

大成建設株式会社 土木技術研究所 土木構工法研究室

(連絡先：045-814-7228, kenichi.horiguchi@sakura.taisei.co.jp)

1. はじめに

東日本大震災では、300 万トンを超えるコンクリートがれき（軽量ブロック，レンガ，タイル，瓦などの無機質がれきを含む。）が発生している¹⁾。その一方で，震災からの復興に必要な建設資材，特にコンクリートの需要が高く，供給が追いつかないのが現状である。このようなことから，破碎したコンクリートがれきにセメントと水を混合して，コンクリートの代替材料となるようなセメント硬化体を開発した。本開発技術は，以下のような特徴を有している。

- ・津波堆積土砂を含むコンクリートがれきを最大寸法 80mm 程度に破碎し，セメントと水を混合して使用する。
- ・基本的に津波堆積土砂を分級しないで，また粒度調整もせずに使用する。ただし，細粒分が不足する場合は津波堆積土砂を積極的に加えることもできる。
- ・スランプ 0cm の超硬練りコンクリートと同様に，敷均し，転圧締固めにより施工する。
- ・これらの作業はすべて移動式重機を用いて行えるため，特別な設備を施工場所に設ける必要がない。

2. 実験内容

図-1 に本技術の開発フローを示す。技術開発のための要素実験として，コンクリートがれき破碎後の品質を確認する材料試験，セメントや水と混合したときの性状を確認する練混ぜ試験，および硬化後の物性を確認する強度試験を実施した。さらに要素実験の結果を受けて，実際の施工を想定した実機実験を行い，スランプ 0 cm の超硬練りコンクリートとしての製造と施工ができるか確認した。

最終的にはこれらの実験データを取りまとめて品質管理方法を確立した。これらの実験は，写真-1 に示す釜石市で集積されているコンクリートがれきを用いて実施した。



写真-1 実験に用いたコンクリートがれき

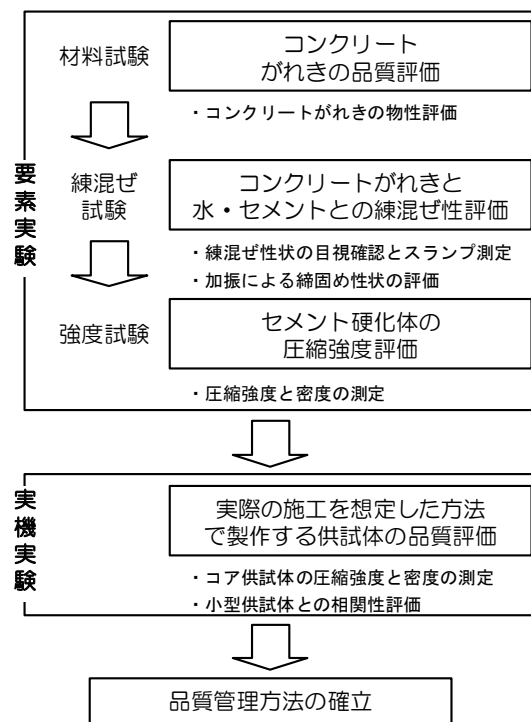


図-1 本技術の開発フロー

キーワード：東日本大震災，コンクリートがれき，津波堆積土砂，締固め性試験，締固めエネルギー
連絡先：〒245-0051 横浜市戸塚区名瀬町 344-1 大成建設（株）土木技術研究所土木構工法研究室



写真-2 実験に用いた移動式破碎機

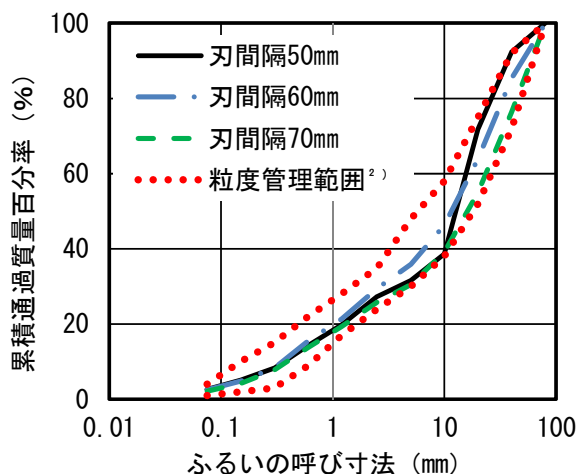


図-2 粒度分布の測定結果

3. 実験結果

3.1 要素実験

3.1.1 材料試験

材料試験は、コンクリートがれきの粒度分布、密度・吸水率、含水率、および単位容積質量・実積率を測定した。コンクリートがれきは、釜石廃棄物処理作業所に分別・集積されたものをそのまま使用した。写真-2にコンクリートがれきの破碎に用いた移動式破碎機を示す。破碎は、破碎機の刃間隔を 50, 60, 70mm に調整して行った。また、試料には見た目の状態でコンクリートを主体とするもの(試料A)、コンクリートに軽量ブロックを含むもの(試料B)、およびコンクリートに津波堆積土砂を含むもの(試料C、通常の集積状態のもの)の3つを用いた。

図-2に試料Cの粒度分布を示す。図-2に示している破線は、通常の超硬練りコンクリートで使用された骨材の粒度分布の実績範囲である²⁾。これにより、刃間隔を 50～70 mm で調整すれば、1回の破碎でセメントや水との混合に適する粒度分布に調整できることがわかった。

表-1にその他の材料試験の結果を、レディミクストコンクリート用骨材の規格値と併せて示す。この結果は、試料Cで刃間隔 50mm のものである。レディミクストコンクリート用骨材の規格値と比較すると、微粒分量はコンクリート用細骨材が 3.0%以下の規格値であるのに対し、5mm 以下のコンクリートがれきでは 22.5%と多かった。また、吸水率についても、細骨材が 3.5%以下の規格値であるのに対し、5mm 以下のコンクリートがれきでは 11.0%と大きいことがわかった。

3.1.2 練混ぜ試験

練混ぜ試験での配合は、水セメント比を 100%とし、単位セメント量と単位水量を 125～150kg/m³の間で

表-1 粒度分布以外の測定結果

測定項目	5mm以上	5mm以下	レディミクスト コンクリート用 骨材の規格値
微粒分量 (%)	2.30	22.5	粗骨材：1.0%以下 細骨材：3.0%以下
絶乾密度 (g/cm ³)	2.26	2.05	粗骨材：2.5g/cm ³ 以上 細骨材：2.5g/cm ³ 以上
表乾密度 (g/cm ³)	2.41	2.31	規定なし
吸水率 (%)	6.48	11.0	粗骨材：3.0%以下 細骨材：3.5%以下
単位容積質量 (kg/L)	1.39	1.30	規定なし
実積率 (%)	61.5	63.4	規定なし



写真-3 締固め性試験の実施状況

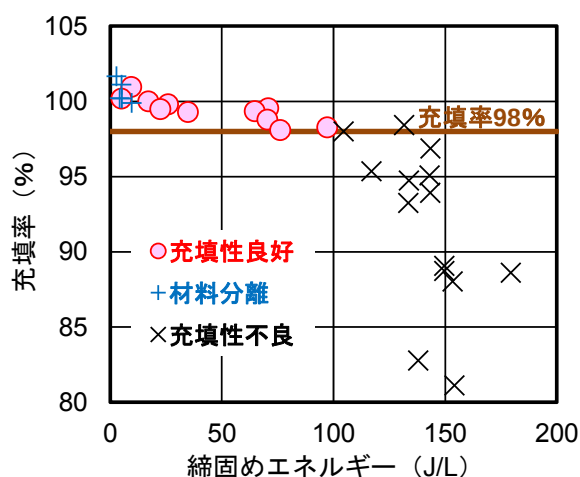


図-3 締固めエネルギーと充填率の関係

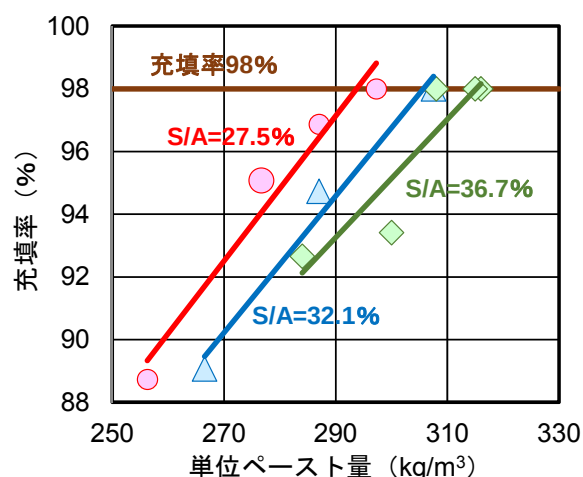


図-4 単位ペースト量と充填率の関係

変動させた。このときの単位がれき量は、およそ 1900kg/m^3 程度である。練混ぜに際しては、コンクリートがれきの表面水を通常のコンクリート製造の場合と同じように補正した。練り混ぜたセメント混合物は、スランプ (JIS A 1101: コンクリートのスランプ試験方法に準拠) と、締固め性 (JSCE-F508: 超硬練りコンクリートの締固め性試験方法 (案) に準拠) を測定した。目標スランプは 0cm の超硬練り仕様とし、締固め性は締固めエネルギーと充填率、および締固め後の供試体の表面状態を目視で確認した。

写真-3 に練混ぜ後の締固め性試験の実施状況を、図-3 に締固めエネルギーと充填率の関係を示す。また、写真-4 に締固め性試験後の供試体表面を示す。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、充填率が 98% となるときの締固めエネルギーは $100\sim 200\text{ J/L}$ 程度以下になるが³⁾、今回実験したセメント混合物では 100 J/L 以下で充填率が 98% 以上となり、写真-4(a) ように良好な充填状況が確認できた。ただし、締固めエネルギーが 10 J/L 以下と極端に小さい場合は、写真-4(b) のように表面には材料分離が生じることがあった。これに対し、締固めエネルギーが 100 J/L を上回る場合には充填率 98% 以上を得ることができず、写真-4(c) のように表面に空隙が多く見られた。これらの実験結果を、単位ペースト量と充填率の関係から整理した結果を図-4 に示す。図-4 は、 S/A (がれき全質量に対する、 5mm のふるいを通過するがれきの質量比で、通常のコンクリートでの細骨材率 s/a に相当する値) ごとに良好な充填性を得るために必要な最小ペースト量が存在することを示している。このように、締固め性試験によって適切な配合を選定すれば、津波堆積土砂を含むコンクリートがれきのセメント混合物でも、密実なセメント硬化体を製造できることが確かめられた。



(a) 充填性良好



(b) 材料分離



(c) 充填性不良

写真-4 締固め性試験後の供試体表面

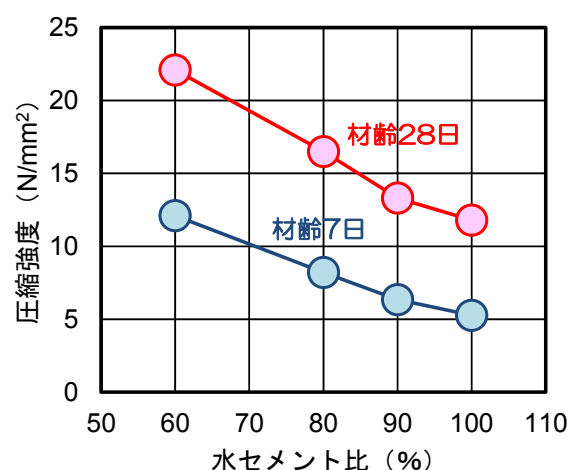


図-5 水セメント比と圧縮強度の関係

写真-3 に練混ぜ後の締固め性試験の実施状況を、図-3 に締固めエネルギーと充填率の関係を示す。また、写真-4 に締固め性試験後の供試体表面を示す。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、充填率が 98% となるときの締固めエネルギーは $100\sim 200\text{ J/L}$ 程度以下になるが³⁾、今回実験したセメント混合物では 100 J/L 以下で充填率が 98% 以上となり、写真-4(a) ように良好な充填状況が確認できた。ただし、締固めエネルギーが 10 J/L 以下と極端に小さい場合は、写真-4(b) のように表面には材料分離が生じることがあった。これに対し、締固めエネルギーが 100 J/L を上回る場合には充填率 98% 以上を得ることができず、写真-4(c) のように表面に空隙が多く見られた。これらの実験結果を、単位ペースト量と充填率の関係から整理した結果を図-4 に示す。図-4 は、 S/A (がれき全質量に対する、 5mm のふるいを通過するがれきの質量比で、通常のコンクリートでの細骨材率 s/a に相当する値) ごとに良好な充填性を得るために必要な最小ペースト量が存在することを示している。このように、締固め性試験によって適切な配合を選定すれば、津波堆積土砂を含むコンクリートがれきのセメント混合物でも、密実なセメント硬化体を製造できることが確かめられた。



写真-5 移動式ミキサーによる混合状況



写真-6 ブルドーザによる敷均し状況



写真-7 振動ローラーによる転圧締固め状況



単位セメント量 100kg/m³



単位セメント量 150kg/m³

写真-8 硬化後コアの外観状況

表-2 実機実験の配合

配合 種類	水セメ ント比 (%)	単位量 (kg/m ³)		
		水	セメント	がれき
配合1	105	158	150	1848
配合2		105	100	2011

3.1.3 強度試験

図-5 に水セメント比と圧縮強度の関係を示す。単位セメント量を 100kg/m³ で一定とし、水セメント比を 100, 90, 80% と変えて、材齢 7 日と 28 日で測定した。材齢 7 日の供試体は 1 体の測定値で、材齢 28 日の供試体は 3 体の平均を示している。いずれも供試体製作時のスランプは 0cm で、締固め性も良好であった。また、比較のために水セメント比 60% (単位セメント量 300kg/m³, 単位水量 180kg/m³) の供試体も製作して強度試験を行った。この供試体製作時のスランプは 4cm であった。締固め試験装置を用いて成型した供試体は、鋼製型枠のまま最初の 7 日間は湿空封緘養生し、それ以降は脱型して標準水中養生を行った。図-5 からわかるとおり、コンクリートがれきを用いたセメント硬化体でも、圧縮強度は水セメント比に応じて発現している。また、材齢によっても強度が増加することも確かめられた。

以上のことから、コンクリートがれきの S/A に応じて締固めできる適切な配合を選定すれば、実際の施工を想定した実機実験においても、所定の品質を有するセメント硬化体を製造、施工できると考えられたため、次項の実機実験で品質を確認した。

3.2 実機実験

表-2 に実機実験に用いた配合を示す。水セメント比を 105% で一定とし、単位セメント量を 150kg/m³ とした配合 1 と 100 kg/m³ とした配合 2 のふたつの配合で行った。配合 1 は、締固め性試験において完全充填できる配合を選定し、配合 2 は締固め性試験では完全充填できないが、振動ローラーによる転圧締固めであ

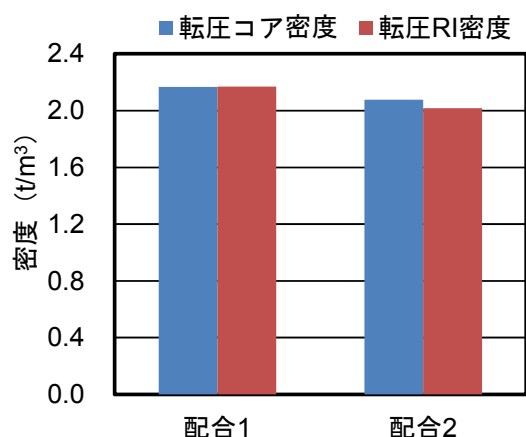


図-6 転圧後のコア密度と RI 密度の比較

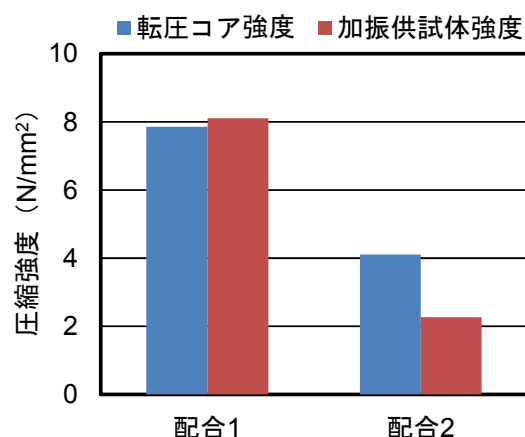


図-7 転圧後コアと締固め供試体の圧縮強度

れば施工可能と思われる配合から選定した。セメントはいずれの配合も市販の高炉セメント B 種を使用した。

写真-5～写真-7 に実際の施工を想定した実機実験の状況を示す。練混ぜには、土質改良機としても用いられる移動式ミキサーを用いた。練り混ぜられたセメント混合物は、4t ダンプトラックで受けて撒き出し、次に 3t 級ブルドーザで敷き均し、さらに 4t 級振動ローラーで転圧して締固めを行った。転圧は無振動 2 回＋有振動 8 回の計 10 回とした。その後、養生マットを敷設し、散水して材齢 28 日まで養生した。写真-8 のコア外観によれば、いずれの配合も良好な締固めが行えたと思われる状態であった。

図-6、図-7 に密度と圧縮強度の測定結果を示す。転圧コア密度が配合 1 で 2.17t/m³、配合 2 で 2.08t/m³ に対し、RI 法（放射線測定法）による現地密度の推定値は、配合 1 で 2.17t/m³、配合 2 で 2.02t/m³ とほぼ一致した。一方、圧縮強度は転圧コア強度が配合 1 で 7.9N/mm²、配合 2 で 4.1N/mm² に対し、実機で練り混ぜたセメント混合物を締固め性試験機で締固めた供試体強度は、それぞれ 8.1N/mm²、2.3 N/mm² であり、配合 1 ではほぼ一致したが、配合 2 では違いが見られた。これは締固め性について、配合 2 では振動ローラーによる場合と締固め性試験機による場合の違いが現れたものと考えられる。配合 1 のように締固め性試験で完全充填できる配合であれば、実機での転圧締固めにより得られる圧縮強度を、加振締固めで製作した供試体の圧縮強度で評価できる。一方、配合 2 のように締固め性試験で完全充填できない配合の場合は、タンピングにより供試体を成型するなど、他の方法で締固めた供試体との比較で評価する必要がある。

4. 実構造物へ適用するための品質確認方法

上述の実験結果より、津波堆積土砂を含むコンクリートがれきのセメント硬化体は、適切な品質管理を行えば、良好な施工性を有し、所要の圧縮強度を発現する配合を選定できることが確かめられた。実構造物に適用する前の品質確認としては、破碎したコンクリートがれきの品質の確認と、所定の強度を有する配合の選定が必要である。また、実構造物に適用してからは日常的な品質管理が必要となる。図-8 にコンクリートがれきの品質確認フローを、図-9 にセメント硬化体の配合設計フローを示す。また、表-3 に実構造物の施工での品質管理項目を示す。コンクリートがれきや津波堆積土砂について、ここで示した品質管理の考え方に基づいて検討を進めれば、品質の安定したセメント硬化体を製造、供給できると考えられる。

5. 主な用途とコスト試算

本開発技術は、スランプ 0cm の超硬練りコンクリートの仕様であるため、施工方法がダンプによる運搬・撒出し、ブルドーザでの敷均し、振動ローラーによる転圧締固めとなる。そのため、本技術の用途としては、このような施工が行える平面的な広さを有する構造物が適する。また、必要な圧縮強度が 10N/mm² 程度以

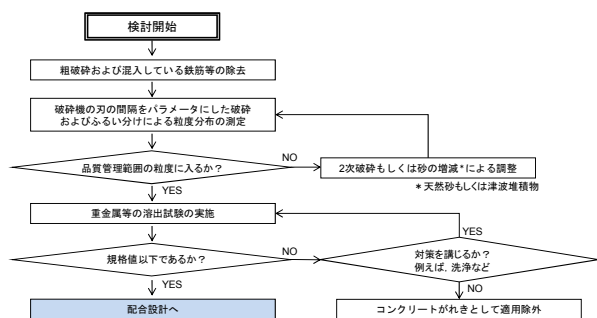


図-8 コンクリートがれきの品質確認フロー

表-3 実構造物での品質管理項目

測定対象	測定項目	測定方法	測定頻度
破砕した コンクリートがれき	含水率	R法（放射線測定法）	連続計測
		強制乾燥法（フライパン法）	1回/2時間
		強制乾燥法（乾燥炉法）	1回/日
	粒度分布	画像解析法	連続計測
	ふるい分け法（JIS A1102）		
セメント混合物	密度・吸水率	JIS A1109, JIS A1110	1回/日
	単位容積質量・実積率	JIS A1104	1回/日
	有害物質溶出量	環境庁告示第46号の方法	1回/週
	スランプ	JIS A1101	1回/日
	加振締固め性	JSCE-F508	1回/日
セメント硬化体	転圧回数	目視確認	各層
	供試体圧縮強度・密度	JIS A1108	1回/日
	（粘着力・内部摩擦角）	（土の三軸圧縮試験）	（1回/日）
	現地密度	R法（放射線測定法）	1回/日
	有害物質溶出量	土木学会標準JSCE-G 575	1回/週
	コア圧縮強度・密度	JIS A1107	必要に応じて

セメント硬化体の測定のうち、粘着力と内部摩擦角は、地盤改良土の考え方に準じて材料特性値を決定したときに測定項目に加える。

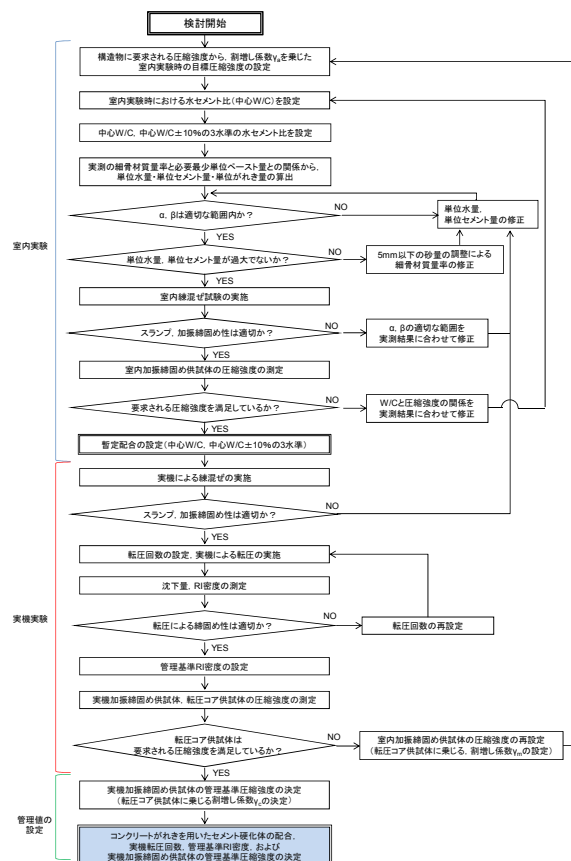


図-9 セメント硬化体の配合設計フロー

下の構造物が適する。このような構造物としては、防潮堤への盛土材や嵩上材、堰堤の中詰材、護岸の内部材などが挙げられる。

図-10 は防潮堤への適用を想定した断面例である。コストは1回の施工規模で変わるが、ここで想定した規模の防潮堤の盛土材への適用であれば、材料費と工事費で1m³あたり1.5万円程度と試算している。

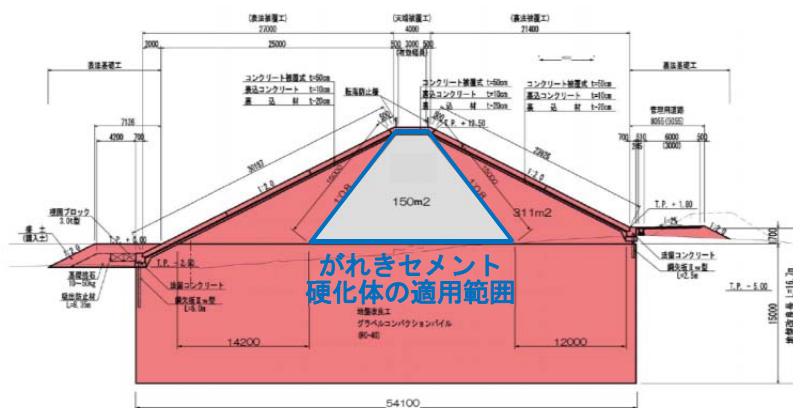


図-10 防潮堤への適用を想定した断面例

【謝辞】

本技術開発は、国土交通省が主管する平成 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、実験に際しては、釜石市のご厚意によりコンクリートがれきと実験ヤードをご提供いただきましたことに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閣僚会合資料，2012.6
- 2) 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
- 3) 村田二郎監修：コンクリート施工設計学序説，技報堂出版，2004