

# 論文 コンクリートがれきを用いたセメント硬化体の物性および施工性の評価

古田 敦史\*1・堀口 賢一\*2・松元 淳一\*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がれきが発生し、有効かつ適切な方法で処理することが課題である。本研究は、コンクリートがれきを早く、大量に処理することを目的として、粗く破碎したコンクリートを母材とし、セメントと水を混合したセメント硬化体として利用する技術を開発した。本稿は開発技術のうち、実際の施工を想定した実機実験の結果をまとめたものである。単位セメント量、単位水量が比較的小さい超硬練りセメント混合物を実機で練り混ぜ、転圧施工した。その結果、一定の品質を有するセメント硬化体を実機で製造、施工できることが確かめられた。

**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、転圧

## 1. はじめに

東日本大震災で発生したのがれきの量は、岩手、宮城、福島の3県で1800万トンを超えると推計されている。このうち、コンクリートがれき（コンクリート、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）は300万トンを超えるとみられている<sup>1)</sup>。これらのがれきは、震災の発生以降、集積と処理、再利用が順次進められている。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）については、埋戻材や道路用砕石、コンクリート用の再生骨材などとして用いるために、**図-1**に示すように細かく破碎して、分級し、用途によっては骨材に付着したモルタルを除去して洗浄する処理が必要になり、時間と労力、費用を要する。その一方で、被災地においては復興のためのコンクリートの需要が高く、コンクリート用骨材が不足しているが、震災復興に必要とされるコンクリートは、必ずしもJISで定めるような品質のコンクリートを必要としない。

このようなことから、本技術開発は、コンクリートがれきを再生資源として効率的に活用すること、および用途の拡大を目的とし、**図-1**に示すように粗く破碎したコンクリートがれきを母材としてセメントと水を混合し、



図-1 コンクリートがれきの処理方法

セメント硬化体として利用する技術を開発した。開発したセメント硬化体は、振動ローラによる転圧施工を想定し、単位セメント量と単位水量が比較的少なく、目標スランプが0cmの超硬練り仕様として検討した。

## 2. 検討の流れ

**図-2**に本技術開発の検討フローを示す。本技術開発では、コンクリートがれきを母材として、セメントと水を混合してセメント混合物を製造するために、まず、破碎したコンクリートがれきとその母材に成り得るかを粒度分布や吸水率などの材料試験により確認した。次に、セメントと水を混合したときの練混ぜ状態と加振締固め性を練混ぜ試験により確認した。練混ぜ試験では圧縮強度測定用の供試体も製作し、所定の材齢で圧縮強度と密度を測定した。これらの結果から、選定された配合につ

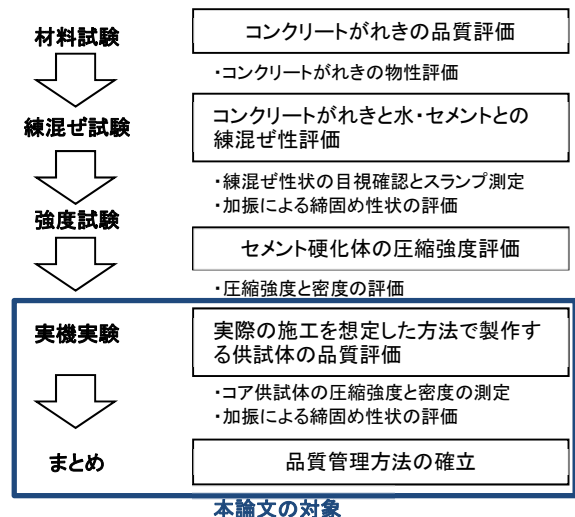


図-2 検討フロー

\*1 大成建設株式会社 技術センター 知的財産部 特許室 主任 修(工) (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 土木技術研究所 土木構工法研究室 主任 博(工) (正会員)

\*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)

いて、実際の施工を想定した方法による大型供試体の製作を実機実験として行った。最終的には、破碎したコンクリートがれきを母材として、セメントと水を混合したセメント硬化体の製造と施工方法を取りまとめ、構造物の要求性能に応じた材料が提供できる品質管理手法を確立した。本論文では、これらの実施項目のうち、実機実験により得られた知見とそれに基づく品質管理方法について述べる。

### 3. 実験概要

#### 3.1 実機練混ぜ実験

図-3 にコンクリートがれきとセメント、水との練混ぜに用いた実機ミキサを示す。実機ミキサは地盤改良土の製造に用いられる自走式混合装置を用いた。コンクリートがれきは装置後方の投入口からバックホウで供給し、セメントは装置中央のストックビンから供給される。また、水は外部に設けた水タンクから給水し、強制二軸ミキサにより連続的に混合されて、ベルトコンベアで排出される。

表-1 に実機実験での配合を、表-2 に練り混ぜたセメント混合物の評価項目を示す。実機実験での配合は、配合1と、配合2の二つとし、コンクリートがれきは、材料試験の結果より、粒度分布が適切であると判断した方法で製造した  $G_{max}80mm$  のものを使用し、セメントは高炉セメントB種を使用した。また、練り混ぜたセメント混合物の性状は、スランブと加振締固め性について評価した。なお、配合1は室内試験練りで加振締固め性が良好であった配合であり、配合2は締固め性は劣るがコスト削減を目的に単位セメント量を削減した配合である<sup>2)</sup>。これは、本実験で採用している加振締固め性は良好でないが、振動ローラによる転圧を行えば、完全充填(加振締固め性試験で充填率98%に達する充填)には及ばなくともある程度の充填性が得られ、要求される圧縮強度が比較的低いセメント硬化体に対して適用できると考えたものである。なお、配合2で最密充填できた場合の理論上の充填率は86.3%となるが、事前に行った室内試験での加振締固め性試験での実測充填率は81.1%と、理論値よりも低いものであった。

#### 3.2 転圧実験

図-4 に実機実験の手順と使用重機を、図-5 に施工断面を示す。実機実験は、軟弱な砂質地盤上にコンクリートがれきを300mm程度敷均し転圧した地盤上で実施した。コンクリートがれきとセメントを実機ミキサで練り混ぜたセメント混合物を3トン級ブルドーザで撒き出し、1層を150mmの層厚で敷均し、これを2層重ねて300mmの層厚として、3トン級振動ローラで転圧した。実機実験の状況を図-6に示す300mmの層厚に仕上げる作業を



図-3 実機ミキサ

表-1 実機実験配合

配合	W/C (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )			α	β
		水	セメント	がれき		
配合1	105	158	150	1848	1.20	1.59
配合2		105	100	2011	0.74	1.33

α : 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

β : 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

表-2 フレッシュ性状に関する試験項目

評価項目	試験名	試験方法
スランブ	スランブ試験	JIS A1101 コンクリートスランブ試験
締固め性	締固め性試験	JSCE-F 508 超固練りコンクリートの締固め性試験方法案

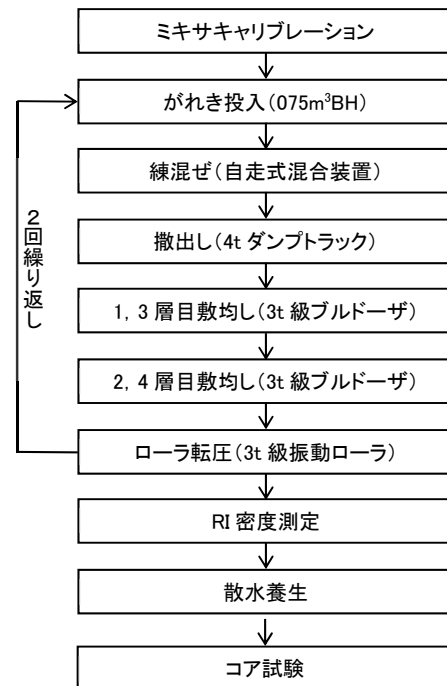


図-4 実機実験手順と使用重機

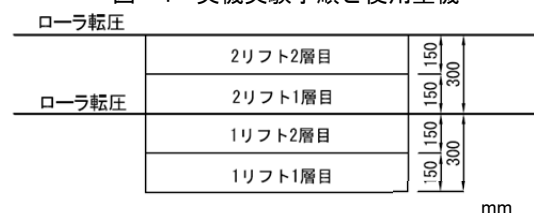


図-5 施工断面図

1 リフトとし、合計 600mm の厚さとなるように 2 リフトの転圧を行った。表-3 に転圧実験での測定項目を示す。転圧時には沈下量計測を、転圧完了時には RI 密度試験による現地密度の推定を行った。また、転圧完了後に養生マットによる散水養生を行い、約 4 週間後にコアを採取した。

表-4 に試験ケースを示す。試験ケースは、配合を 2 種類と転圧回数を 2 パターンの組合せで、合計 4 ケースとした。配合は、表-1 で示したとおりである。転圧回数は、振動ローラを振動させないで自重だけで転圧する無振動転圧を 2 回と振動させながら転圧する有振動転圧を 6 回の計 8 回転圧するパターンと、無振動転圧を 2 回と有振動転圧を 8 回の計 10 回転圧するパターンの 2 パターンとした。

### 3.3 コア試験

表-5 にコア試験での測定項目を示す。コアは、直径が  $\phi 150\text{mm}$  と  $\phi 250\text{mm}$  で長さ 600mm の 2 種類を採取した。採取したコアは、径と長さの比が 2.0 になるように切断、成形して密度と圧縮強度の測定を行った。ただし、



図-6 実機試験状況

表-3 転圧実験測定項目

評価項目	試験名	試験方法	試験回数
沈下量	沈下量測定	スタッフとレベルによる水準測量	転圧 2 回毎 各ケース 6 点
現地密度	RI 密度試験	RI (放射線) 密度計測器による推定	第 2 リフト転圧後 各ケース 3 点

表-4 試験ケース

試験ケース名	配合	転圧回数
Case1	配合 2	8
Case2		10
Case3	配合 1	8
Case4		10

表-5 コア試験測定項目

評価項目	試験名	試験方法	試験頻度
真密度	水中重量から真密度測定	コア成形前の水中質量と気中質量から真密度を算定	各ケース 3 本以上を目標
見掛けの密度	気中重量から見掛け密度測定	コア成形前の気中質量と体積から見掛け密度を算定	
圧縮強度	圧縮強度試験	JIS A 1107 コンクリートからのコアの採取方法及び圧縮強度試験方法	

コア採取の途中で折損したものは、径と長さの比が可能な限り大きくなるように切断、成形して試験に供した。切断、成形したコアは、径と長さ、および質量を測定して見掛けの密度を算出してから圧縮強度を測定した。なお、 $\phi 150\text{mm}$  のコアに関しては、切断、成形前に水中質量も測定して真密度も求めた。圧縮強度については、JIS A 1107 「コンクリートからのコアの採取方法及び圧縮強度試験方法」にしたがって測定し、径と長さの比に基づく補正値を求めた。

## 4. 実験結果

### 4.1 練混ぜ性状・締固め性状

表-6 に実機実験に用いた配合 1 と配合 2 の練混ぜ性状、締固め性状の結果を示す。また、図-7 に 3 分間加振締固め後の状況を示す。

いずれの配合もスランプは 0cm であったが、図-7 に示すように、配合 2 は明らかに充填性が低い状態であった。また、配合 1 は室内試験では充填できる配合として選定したが、実機試験では水が足りない状態であった。これは、コンクリートがれきの含水状態が影響したと思われる、実際の施工時には、RI 法などでコンクリートがれきの含水率を連続的にモニタリングし、含水状態に応じた表面水の補正を的確に行う必要があると考えられる。

### 4.2 沈下量

図-8 に 2 リフトを転圧した時の沈下量の推移を示す。配合 1 (Case3,4) のように完全充填できる配合では、転圧回数 8 回で沈下量が収束している。配合 2 については転圧 8 回 (Case1) で沈下はほぼ収束しているが、転圧 10 回 (Case2) でも沈下は完全に収束していない。これは、配合 2 の練上がり時の間隙が多いため、今回使用した振動ローラの能力では、収束までさらに転圧が必要であったためと考えられる。

表-6 練混ぜ性状および締固め性状の測定結果

配合	練混ぜ性状		締固め性状	
	スランプ (cm)	温度 (°C)	初期充填率 (%)	加振 3 分時充填率 (%)
配合 1	0	21	75.1	97.2
配合 2	0	21	72.2	78.8



図-7 3 分間加振締固め後の状況

Case1 の沈下量が他のケースより大きいのは、Case1 の地盤が他のケースの場所と比較して軟弱であったためと考えられる。

#### 4.3 現地密度試験 (RI 密度試験)

表-7 に RI 推定密度と配合密度の比較を示す。配合が同じ Case1 と Case2, Case3 と Case4 の RI 推定密度を比較すると、それぞれ同程度であることから、転圧回数の違いが密度に及ぼす影響は小さいことがわかる。また、RI 推定密度と配合密度の比は、配合2の0.9程度に対し、配合1では1.0に達しており、配合上の密度が現地密度でも得られた。これは、今回使用した振動ローラ能力では、配合2では締固めが不十分であったのに対し、配合1では十分な締固めが行えたためと考えられる。

#### 4.4 コア圧縮強度

図-9 に供試体の高さの影響を補正した後のコア供試体の圧縮強度の平均値、加振締固めにより製作した供試体の圧縮強度の平均値およびその範囲を示す。ここで×印で示した測定データは、他の供試体より著しく強度が大きかったため、平均値の算定からは除外した。

コアの直径が150mmと250mmの供試体を比較すると、圧縮強度は直径250mmに比べ、直径150mmは同程度かやや小さくなる傾向が見られる。このことから、JISに準拠した骨材最大寸法80mmの3倍以上の直径(本実験では240mm以上)のコアで圧縮強度を測定した場合に比較して、直径150mmのコアで圧縮強度を測定した場合は、やや安全側の評価になると考えられる。次に、転圧回数とコア圧縮強度の関係を比較すると、配合2の直径250mmのコアの結果によれば、転圧回数10回のCase2(平均圧縮強度5.3N/mm<sup>2</sup>)に比べ、転圧回数8回のCase1

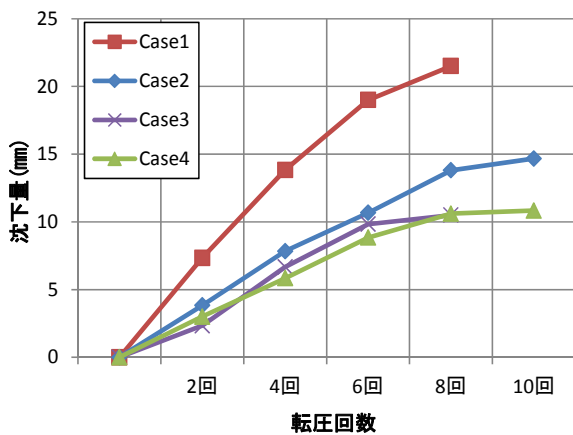


図-8 転圧回数と沈下量の関係 (2リフト)

表-7 RI 推定密度と配合密度の比較

Case No.	配合	RI 推定密度 (t/m <sup>3</sup> )	配合密度 (t/m <sup>3</sup> )	RI/配合密度比
1	配合2	2.041	2.216	0.92
2		2.017		0.91
3	配合1	2.167	2.156	1.01
4		2.170		1.01

(平均圧縮強度 3.6N/mm<sup>2</sup>)での圧縮強度が低い。このことから、完全充填できない配合2では、転圧による締固めの効果が転圧回数8回では不十分で、10回についても十分であった可能性が考えられる。一方、配合1の直径250mmのコアの結果によれば、転圧回数10回のCase4(平均圧縮強度8.3N/mm<sup>2</sup>)と、転圧回数8回のCase3(平均圧縮強度8.4N/mm<sup>2</sup>)の圧縮強度は同じである。このことから、完全充填できる配合1では、転圧回数8回で十分な締固め効果が得られたと思われる。

さらに、コア供試体と加振締固め供試体の圧縮強度を比較すると、配合2のCase2(転圧回数10回)では、コア直径250mmで5.3N/mm<sup>2</sup>、コア直径150mmで4.1N/mm<sup>2</sup>に対し、加振締固め供試体では2.3N/mm<sup>2</sup>と低く、完全充填できない配合では、転圧締固めと加振締固めの締固め効果の違いが見られた。一方、配合1のCase4(転圧回数10回)では、コア直径250mmで8.3N/mm<sup>2</sup>、コア直径150mmで6.8N/mm<sup>2</sup>に対し、加振締固め供試体では8.1N/mm<sup>2</sup>とほぼ同程度であり、完全充填できる配合では、転圧締固めによっても、加振締固めと同程度の締固め効果が得られたと思われる。

#### 4.5 コア密度

図-10 に加振締固め供試体密度とコア密度の測定結果を示す。直径250mmのコア供試体では、水中重量を

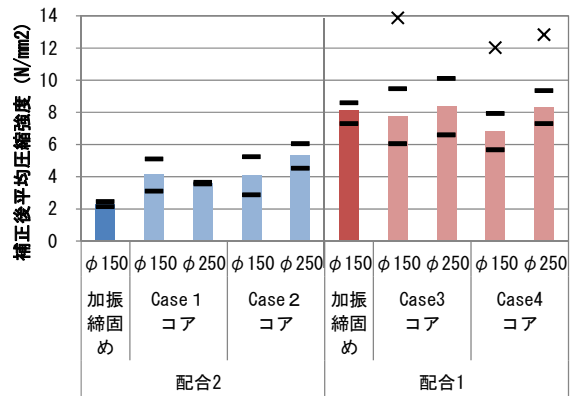


図-9 コア供試体と加振締固め供試体の圧縮強度

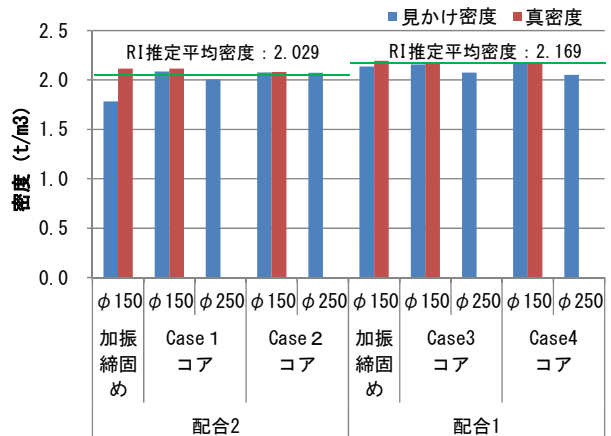


図-10 加振締固め供試体密度とコア供試体密度の比較

精度よく測定できず、真密度は得られていないため、図示していない。

見掛けの密度について、配合2では、コア直径や転圧回数による大きな違いは見られないが、締固め方法の違いによる影響は見られ、転圧コア密度に比べて、加振締固め供試体密度の方が小さくなることがわかった。一方、配合1では、コア直径や転圧回数、締固め方法の違いによる影響は見られず、加振締固め性試験によって転圧締固めの効果を評価できることがわかった。

真密度について、配合2と配合1の締固め充填性が異なるにもかかわらず、それぞれの配合における転圧コア密度と加振締固め密度の違いは見られない。真密度は水中重量から算出されるが、見掛けの密度が小さい配合2の加振締固め供試体のような場合では、供試体内部の間に水が満たされた状態での重量が測定されてしまうため、正確な真密度の測定ができないと思われる。このことから、転圧コア供試体の密度を評価する場合には、供試体質量をコア外寸法から求まる体積で除した見掛けの密度で評価する方が、転圧締固めの効果を適切に評価できると考えられる。

また、それぞれの配合での RI 推定密度と見掛け密度を比較すると、同程度の値であることから、見掛けの密度は現地密度試験により精度よく推定出来ると言える。

## 5. 構造物に適用するための品質管理手法の提案

### 5.1 実構造物への適用性

完全充填できる配合1のセメント硬化体では、水セメント比に応じた圧縮強度が得られることも確認できた。ただし、この場合のセメント硬化体の実機転圧によるコア圧縮強度は、今回実験した水セメント比105%で5.7~12.0N/mm<sup>2</sup>であることから、6N/mm<sup>2</sup>程度を超える圧縮強度が要求される材料として適用できる。一方、水セメント比を大きくすることは、材料分離しやすくなることから難しく、この管理方法で低強度の配合を選定することは現実的でないと考えられる。このようなことから、コンクリートがれきのセメント硬化体について、水セメント比に応じた圧縮強度が発現することを前提とした管理方法を適用する場合には、実強度で6N/mm<sup>2</sup>程度が圧縮強度範囲の下限になると考えられる。

これに対し、加振締固め性が良好でなく、完全充填が得られない配合2でも転圧実験を行い、施工性とセメント硬化体として得られる圧縮強度の確認を行った。その結果、今回の実験で採用した加振締固め性試験では十分な充填性が得られない配合でも、振動ローラによる転圧締固めによれば、コア圧縮強度で2.9~6.1N/mm<sup>2</sup>の圧縮強度が得られた。このようなことから、圧縮強度が6N/mm<sup>2</sup>程度以下の比較的低い強度でよい場合には、完

全充填できない配合を用いることもできると考えられ、このような配合の選定は、従来のダム用コンクリートなど、貧配合のコンクリートの品質管理で行われている、タンピングにより成形する供試体の圧縮強度で評価できると考えられる。

### 5.2 配合設計方法

図-11に配合決定フローを示す。この方法は、水セメント比に基づいて配合を選定するものである。この方法では、まず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。本実験の結果によれば、この安全率は2.15となる。例えば、設計基準強度が6.0N/mm<sup>2</sup>の場合には、小型ミキサで練り混ぜて製作する供試体の圧縮強度で12.9N/mm<sup>2</sup>が必要強度となる。これを水セメント比と供試体圧縮強度との関係に当てはめ、水セメント比が決定される。次に、室内実験を行い適切な配合を選定し、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。さらに、実機ミキサによる試験練りでスランプと加振締固め性を確認し、転圧実験で製作したセメント硬化体からコアを採取して圧縮強度と密度を確認することで配合が選定される。このとき、コアの直

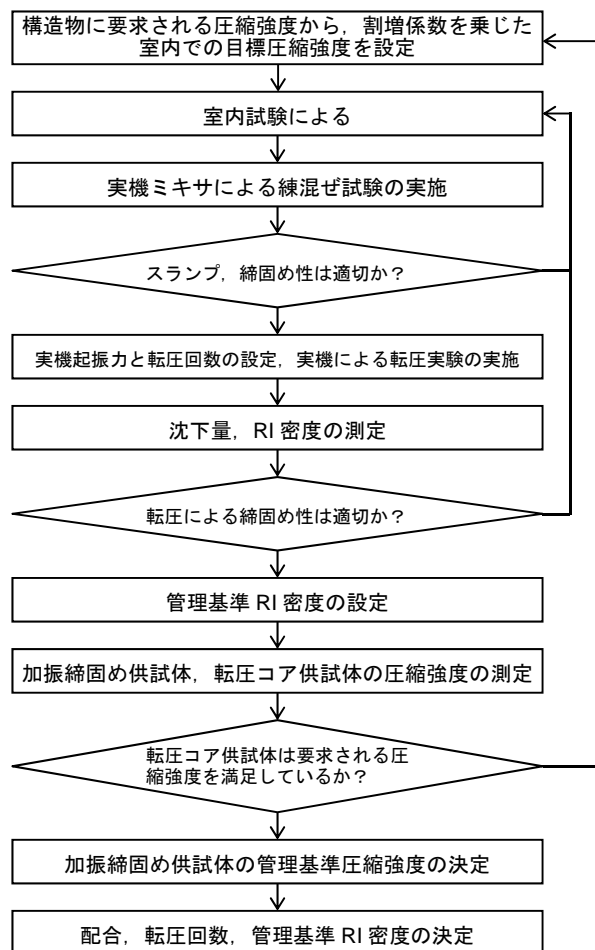


図-11 配合決定フロー

径は、破碎したコンクリートがれきの最大寸法 80mm の 3 倍以上を確保するため、φ250mm を基本とする。ただし、室内試験供試体や実機実験での加振締め供試体の直径は、最大寸法 40mm にウェットスクリーニングをしてφ150mm となることから、実際の施工時の品質管理でもφ150mm を用いる。そのため、コアはφ150mm も採取して、直径の影響がどの程度であるかを実機実験の際に確認する。

実機転圧コアで所定の圧縮強度が得られない場合には、フローの最初に戻って再検討する。このフローにしたがえば、水セメント比に基づく配合、振動ローラの起振力と転圧回数、管理基準 RI 密度、および実機ミキサで混合したセメント混合物を加振締めした供試体による管理基準圧縮強度が決められる。

### 5.3 品質管理手法の提案

表-8 に実施工における品質管理方法を示す。実施工では、まず破碎したコンクリートがれきの粒度分布を管理する。実機ミキサでの練混ぜでは、練混ぜ性状を確認する。このとき、練混ぜ性状が適切でない場合には、コンクリートがれきの含水率を測定し、必要に応じて表面水の補正を行う。含水率の測定方法としては、フライパンを用いて強制的に乾燥させる方法や、乾燥炉を用いて乾燥させる方法が通常行われているが、結果が得られるまでに時間を要する。そのため、本技術開発では検討を行っていないが、RI 測定法などにより効率的に含水率を連続測定する方法の適用も考えられる。また、実機で練

り混ぜたセメント混合物からテストピースを採取して圧縮強度と密度を測定し、要求される圧縮強度を満足することを確認する。このときの成型方法としては、完全充填の配合では本実験で用いた加振締め試験装置を用い、完全充填の配合でない場合には、タンパーを用いて予め定められた締めエネルギーを加えて行う。実機による転圧では、沈下量と RI 密度を測定する。沈下量は適切な転圧締めが行えていることを確認する指標となり、予め定められた転圧回数と沈下量との関係を基準に評価する。以上の品質管理の結果は、品質管理記録として残し、日常の品質管理に反映させる。

### 6. まとめ

- (1) 加振締め性が良好な配合と良好でない配合で練り混ぜ、敷均し、転圧を行ったが、いずれの配合でも振動ローラによる転圧では締めが行え、各締め性に応じた圧縮強度を有するセメント硬化体を得られることを確認した。
- (2) 実験結果とその知見に基づいて、構造物に適用するための品質管理手法を提案した。水セメント比に基づく配合設計の方法および実施工における品質管理方法についてとりまとめて提案した。

### 謝辞

本技術開発は、国土交通省が主管する平成 23 年度補正予算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、本技術開発に際しては、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関係会合資料，2012,3
- 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

表-8 品質管理方法

測定対象	測定項目	測定方法
破碎したコンクリートがれき	含水率	RI 法（放射線測定法）
		強制乾燥法
		強制乾燥法
	粒度分布	画像解析法 ふるい分け法 (JIS A1102)
	密度・吸水率	JIS A1109, JIS A1110
セメント混合物	有害物質溶出量	環境省告示 46 号の方法
	スランプ	JIS A1101
	加振締め性	JSCE-F508
セメント硬化体	供試体圧縮強度・密度	JIS A1108
	現地密度	RI 法（放射線測定法）
	有害物質溶出量	環境省告示 46 号の方法
	コア圧縮強度・密度	JIS 法