

論文 震災コンクリートがらから製造した再生粗骨材Mのプレキャスト コンクリート製品への利用

開米 浩久*1・北辻 政文*2・澤田 達哉*3・遠藤 孝夫*4

要旨：東日本大震災からの早期復興が求められている中、建設資材や作業員不足により復旧工事が遅れている。特にコンクリート用骨材不足は深刻な状況にあることから、本研究では震災により発生したコンクリートがらから再生粗骨材 M を製造し、これを用いたプレキャスト製品（以下、PCa 製品という）の利用可能性を検証した。研究の結果、震災コンクリートがらから製造した再生粗骨材 M の品質は、放射能汚染や津波による塩化物の影響も少なく良好であった。さらに、それらの再生粗骨材 M を用いたコンクリートおよび PCa 製品の強度および耐久性は、普通コンクリートと同等の品質を有することが明らかとなった。

キーワード：震災コンクリートがら、再生粗骨材 M , PCa 製品, 耐凍害性, 放射能

1. はじめに

東日本大震災は、地震、津波および放射能汚染の3重の災害となり、歴史的な惨事であった。この震災からの早期な復興が求められている中、建設資材や作業員が不足し、復旧が遅れている。とくにコンクリート用骨材の不足は深刻な状況にあり、コンクリートの価格が高騰している。東日本大震災による震災廃棄物の処理について、環境省¹⁾によれば、コンクリートがらは建設資材として利活用することを示している。また、震災で発生したコンクリートがらは膨大なため、一般的に利用される路盤材 (RC-40) 以外にも震災復興で大量消費が期待できるコンクリート用粗骨材 (以下、再生骨材という) としての利用が望まれている。

再生骨材は H, M, L の3つのランクに分類される。再生骨材 H はレディーミクストコンクリートに利用できるものの製造コストが高いことや回収率が少ないことが課題となっており、大都市を除けば殆んど利用実績はない。また、再生骨材 L は、水分管理が難しく、汎用的な鉄筋コンクリート製品への利用は難しい。これに対し、再生骨材 M は、乾燥収縮や耐凍害性が小さいことから、地下構造に限定されているものの、北辻ら^{2), 3)}は、プレキャストコンクリート製品 (以下、PCa 製品という) に限定すれば、利用は可能であるとしている。その理由として、プレキャストコンクリート製品は、部材寸法が小さく乾燥収縮の影響を受けにくく、小ロット製造が可能であることから品質のバラつきを少なくできること、耐凍害性については片平ら⁴⁾により、簡易試験方法が提案され、再生骨材を用いたコンクリートの耐凍害性評価が容易であることを挙げて

いる。さらに、出所の不明なコンクリートがらから製造された再生骨材のアルカリシリカ反応は評価が難しく、対策として高炉スラグまたはフライアッシュを用いた混合セメント利用を前提としている。

そこで、本研究では東日本大震災で発生したコンクリートがらの復興資材としての利用を目的として、再生粗骨材 M を用いた PCa 製品の実用性検証結果を報告するものである。

2. 震災ガレキの有効利用

2.1 震災コンクリートがら

東日本大震災により発生した災害廃棄物の総量は 2,700 万トンにも及び、災害廃棄物の総量に対するコンクリートがらの割合は重量ベースで約 50% を占め、最も多い震災廃棄物となっている⁵⁾。

震災で発生したコンクリートがらは、道路用コンクリート製品、コンクリート舗装版、津波により被災した家屋の基礎構造物、更に、取壊しを予定しているコンクリートの住宅、工場等が発生源となる。

コンクリートがらには、海水塩分、土砂、陶磁器、石膏ボードや木片などの異物が混入していることが予想され、破碎・分級して建設資材として再生利用する場合には品質低下が懸念されるため、分別の徹底や状況に応じて水洗浄を行う必要がある。また、注意すべき課題として、東京電力 福島第一原子力発電所の放射能漏れ事故による放射性物質による汚染が挙げられ、これについては放射線量を十分確認した上で再利用を行うことが必要である。

岩手、宮城県のがれきは、2次仮置き場 (図-1) に集め

*1 (株) 復建技術コンサルタント (正会員)

*2 宮城大学 食産業学部環境システム学科 教授 博 (農) (正会員)

*3 東日本旅客鉄道 (株) 仙台支社

*4 東北学院大学 工学部環境建設工学科 教授 博 (工) (正会員)

られ、その大部分が再生クラッシュラン（図-2）となり、海岸防波堤、地盤沈下盛土、路盤材として利活用された。両県のがれきは、2014年3月までに全量処理された。しかし、図-3に示すように、がれき処理が終了した地域でも住宅基礎部分のコンクリートは、境界が不明となるため、撤去されていない。このため、地域整備が行われる際には、今回集積された量と同程度のコンクリートがらが発生すると見込まれている。また、福島県の浜通りでは、放射線量が高いこともあり、図-4に示すように手つかず状態である場所も少なくない。



図-1 コンクリートがらの保管状況
(仙台市内, 2012年3月)



図-2 再生クラッシュランの保管状況
(仙台市内, 2012年3月)

2.2 震災再生粗骨材Mの製造

震災再生粗骨材の製造フローを図-5に、2次破碎機の概略を図-6に示す。

この工程では、コンクリートがらをロールクラッシャーやジョークラッシャー等で一次破碎後、インパクトクラッシャーで二次破碎を行い、付着モルタルや微細クラックによる脆弱部分を除去している。一般的に、再生粗骨材 M の回収率は50%程度である。これら破碎設備は中間処理業者が既に有している簡易的な破碎機のため、製造は容易である。

図-6は再生骨材製造のために開発されたもので、骨材同士が接触し揉みすりを行うために、骨材形状が丸みを帯びる。



図-3 住宅基礎の状況
(名取市内, 2014年12月)



図-4 放置コンクリート塊の状況
(南相馬市内, 2014年12月)

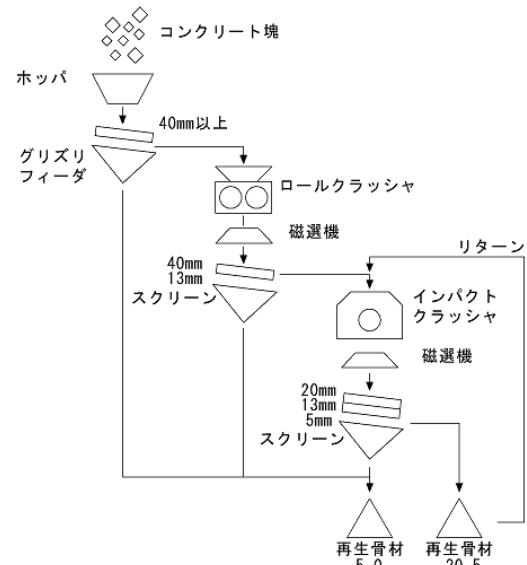


図-5 再生粗骨材製造フロー

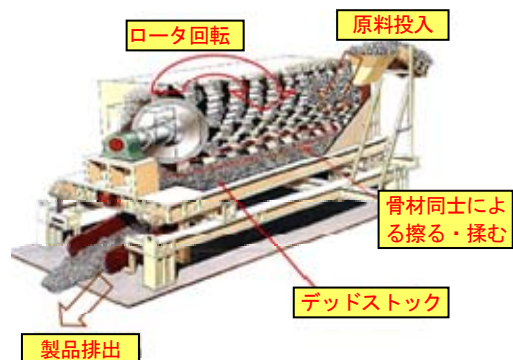


図-6 2次破碎機

仮置場に集積されたコンクリートがらを用いて、2種類の震災再生粗骨材 M を製造した。製造した震災再生粗骨材 M の外観を図-7 に示す。再生粗骨材 M1 は仙台市で発生したコンクリートがらを図-5 に示した従来型クラッシュ機により製造したものである。一方、再生粗骨材 M2 は宮城県本吉郡南三陸町で発生したコンクリートがらを図-6 に示した2次破碎機で製造したものである。



再生粗骨材 M1 再生粗骨材 M2
図-7 再生粗骨材の外観

2.3 震災再生粗骨材Mの物性

製造した震災再生粗骨材 M の品質を表-1 に示す。黒瀬ら⁶⁾によれば、震災再生粗骨材 M は付着モルタルの影響から密度および吸水率の JIS 規格を満たすことが困難と言われている。しかし、今回製造した震災再生粗骨材 M は、すべての項目において JIS 規格を満たした。これは、二次破碎を複数回行うことにより、微細クラックや脆弱なモルタルの大部分を除去したことによると考えられる。

津波の影響により、骨材中に含まれる塩化物イオン量は多いことが予想されるため、塩化物含有量試験(JIS A 1154, イオンクロマトグラフ法)を実施した。その結果、塩化物含有量は 0.004%と規格値を満たしていた。これは、震災

表-1 再生粗骨材Mの品質

	M1	M2	JIS 規格値
ふるい分け(FM)	6.69	6.70	—
表乾密度 (g/cm ³)	2.50	2.49	—
絶乾密度 (g/cm ³)	2.40	2.39	2.3 以上
吸水率 (%)	4.20	4.37	5.0 以下
微粒分量 (%)	0.58	0.60	1.5 以下
塩化物イオン (%)	0.004	0.004	0.04 以下
不純物量 (%)	0.69	0.65	3.0 以下
単位容積質量 (kg/l)	1.42	1.46	—
実積率 (%)	59.10	61.30	—
簡易凍結融解による質量減少率 (%)	1.90	0.40	5.0 以下
最大寸法 (mm)	20	20	—

コンクリートがらへの塩水の浸透が小さかったことや塩化物が降雨等によって洗い流されたものと推察される。

製造した震災再生粗骨材 M には木くず、ゴム、ビニールなどの様々な不純物が混入していたが、その量は、0.69～0.65%と規格値を満足していた。また、比較的軽量な不純物であることから、骨材製造後に風選除去の実施により、品質を高めることができると判断される。

気象条件の厳しい東北地方では、耐凍害性が求められることから、簡易凍結融解試験⁴⁾により耐凍害性を判断した。粗骨材を水中凍結 16 時間(-20℃)ー水中融解 8 時間 (20℃)を 1 日 1 サイクルとして 10 日間行い、質量減少率が 10%未満の場合、耐久性指数は 60%以上、5.0%未満の場合、耐久性指数は 85%以上を確保できるとするものである。

本研究で使用した震災再生粗骨材 M の質量減少率は 1.9～0.4%と耐凍害性判断基準の 5.0%を大きく下回り、耐久性指数 85%以上を確保できると判断される。

福島第一原子力発電所の事故を受け、再生骨材の安全性を確認する必要がある。そこで、震災再生粗骨材 M の放射能濃度をヨウ化ナトリウムシンチレーション放射能測定装置で計測した。測定核種はセシウム 137, セシウム 134 とし、環境基準は経済産業省の砕石出荷基準濃度 100Bq/kg を目安とした。測定結果は、いずれも非検出(ND)で安全性が確認された。これは、セシウムがコンクリート表面のみに付着しており、全体として少量だったこと、降雨等によって洗い流されたこと、および破碎工程に於いて細骨材に移行したことなどが挙げられる。また M2 の骨材の製造は、発災から 3 年以上経過しており、線量が自然減少したことによると推察される。

しかしながら、福島第一原子力発電所近郊では、依然として高い放射線量が予想されることから、材料の使用基準を改めるなど地域事情に応じた対応が待たれる。

3. 再生粗骨材Mを用いたコンクリート製品の製造

3.1 使用材料およびコンクリートの配合

宮城県内の 2 か所および山形県内の 1 か所の PCa 工場において、再生骨材を用いてコンクリート試験体および製品を作製した。コンクリート配合を表-2 に示す。すべての配合において、骨材の再大寸法を 20mm とし、目標空気量は 5%とした。また粗骨材全量を再生粗骨材 M で置換した。

表-2 コンクリートの配合

配合名	最大寸法 Gmax (mm)	空気量の範囲 (%)	水結合材比 W/B (%)	細骨材率 s/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)									
					水 W	結合材 B			細骨材 S	粗骨材 G		AE 減水剤 AD	空気量調整剤 AE*	
						普通 C	高炉 B 種 BB	フライッシュ F		砕石 CG	再生 RG		MAE	PAE
BB(N)	20	5±1	42	38.0	158	—	375	—	671	—	1058	2.20	0.01	—
BB			42	45.1	160	—	381	—	800	—	973	1.38	0.02	—
FA1			35	47.4	170	395	—	85	780	—	813	4.32	—	1.50
FA2			35	42.0	160	340	—	60	702	—	939	3.00	—	2.00
N			40	40.5	160	364	—	—	702	1067	—	3.28	4.00	—

MAE : 普通 AE 剤, PAE : プレフォーム型 AE 剤

配合 BB(N)は一般のコンクリートがらから製造された市販の再生粗骨材 M (表乾密度 2.50g/cm³, 吸水率 4.2%) を用いたものである。配合 BB および FA1 は、震災コンクリートがらより製造した再生粗骨材 M1 を, FA2 は震災コンクリートがらより製造し M2 を用いた。また FA1 は高流動コンクリートの配合であるため、粉体量が多くなっている。さらに普通コンクリートと比較するため一般碎石 (5~20mm) を用いた N も作製した。

高炉セメントやフライアッシュセメント等の混合セメントは、初期強度の発現が小さいことから、促進養生を行う PCa 製品に用いられることは少ないが、再生骨材の原骨材は出所不明な震災コンクリートがらであることから、事前に ASR 対策として混合セメントを用いた。配合 BB(N) および BB は高炉セメント B 種を用いたものである。また、フライアッシュを用いたものは、酒田火力発電所から排出されるフライアッシュ原粉 (密度 2.33g/cm³) を粉体の 15~18% 混合した。陶山ら⁷⁾によれば、フライアッシュには未燃カーボンが含まれるため、AE 剤を吸着し空気が連行しにくいとされている。このため、FA1 および FA2 のコンクリートでは、未燃カーボンの影響が少ないプレフォーム型 AE 剤 (PAE)^{8), 9)}を用いた。減水剤はポリカルボン酸系の物を用いた。

3.2 試験方法

練り上がったコンクリートはそれぞれ型枠に詰め、テーパーパイププレートを用いて 30 秒間締め固め、型枠のまま蒸気養生を行った。蒸気養生は、通常工場で行われている前置き 2 時間、最高温度 65°C、保持 2.0 時間を目標とし約 24 時間後に脱型して、試験材齢まで屋外気中養生とした。

試験項目は、圧縮強度試験 (JIS A 1108)、曲げ強度試験 (JIS A 1106)、引張強度試験 (JIS A 1113)、静弾性係数試験 (JIS A 1149)、凍結融解試験 (JIS A 1148 A 法)、コンタクトゲージ法による乾燥収縮試験 (JIS A 1129 - 2)、およびプレキャストコンクリート製品の曲げ試験 (JIS A 5372 推奨仕様 5-3) である。

圧縮、割裂引張強度および静弾性係数試験用の供試体は φ10×20cm の円柱供試体とし、曲げ強度、乾燥収縮および凍結融解試験用は 10×10×40cm の角柱供試体とした。強度試験は、いずれも出荷可能材齢である 14 日に実施した。

凍結融解試験では、材齢 14 日まで屋外気中養生を行った後、標準養生を 14 日行い、材齢 28 日から試験に供した。

乾燥収縮試験は、蒸気養生終了後の材齢 1 日を基長として 26 週まで測定した。

3.3 試験結果

(1) 圧縮強度試験結果

圧縮強度試験結果を図-8 に示す。すべてのコンクリートにおいて、初期強度 (1 日) は脱型に必要な 12N/mm²、出荷材齢 (14 日) では目標とする設計基準強度 30N/mm² を

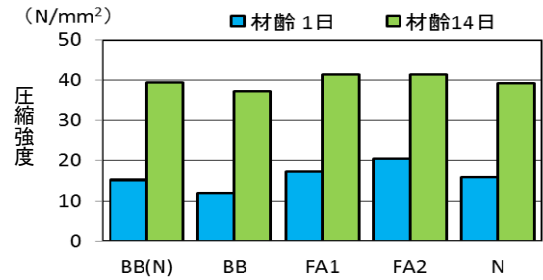


図-8 圧縮強度試験結果

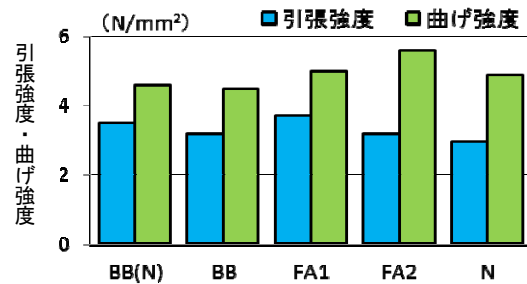


図-9 引張強度および曲げ強度試験結果

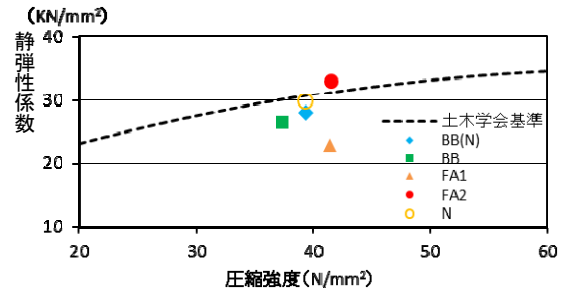


図-10 静弾性試験結果

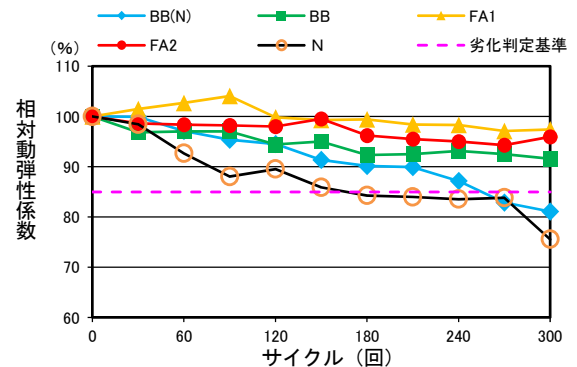


図-11 凍結融解試験結果

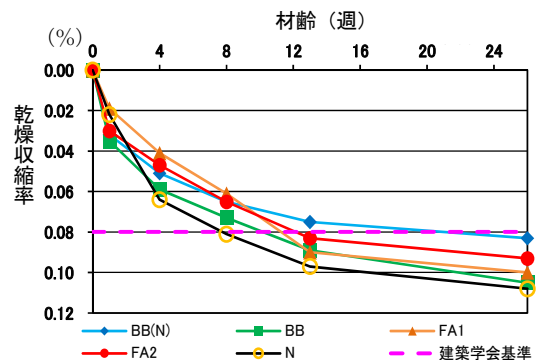


図-12 乾燥収縮試験結果

いずれも上回った。とくに BB(N), FA1, FA2 の強度が高かったのは、水結合材比の影響であると推察される。

(2) 引張強度および曲げ強度試験結果

引張強度および曲げ強度試験結果を図-9 に示す。普通コンクリートの場合、引張強度は圧縮強度の 1/10~1/13、曲げ強度は 1/5~1/8 の範囲にある。引張強度はいずれも標準範囲にあるが、曲げ強度はやや低い値を示しているものの 4.0N/mm²以上を確認しており、構造上問題ない範囲であると判断される。

(3) 静弾性試験結果

静弾性係数試験結果を図-10 に示す。土木学会コンクリート標準示方書¹⁰⁾では、設計基準強度（圧縮強度）が 30N/mm²の場合、静弾性係数は 28kN/mm²としている。FA2 を除き、土木学会基準よりわずかに小さい値を示しているが、柳ら¹¹⁾によれば、再生粗骨材の置換率が高くなると静弾性係数が小さくなると報告されており、本試験においても同様の結果となった。

(4) 凍結融解試験結果

凍結融解試験結果を図-11 に示す。東北地方で用いられるコンクリートは、耐凍害性が高いことが必要不可欠である。コンクリートに凍結融解作用が働くと、スケーリングやポップアウト等の劣化が生じる。このため、耐凍害性確認を目的として凍結融解試験（JIS A 1148 A 法（水中凍結一水中融解））を行った。一般のコンクリートは、300 サイクル終了時の相対動弾性係数が 60%以上で耐凍害性が高いと判断されるが、PCa 製品は小断面のため、85%と厳しい劣化判定基準が設けられている。

再生コンクリートのうち BB(N)が 85%を下回る結果となったが、他については 300 サイクル終了時においても劣化判定基準を満足しており耐凍害性が確保できていると判断できる。BB(N)についても、空気量を多めに設定するなどのコントロールで対応可能な範囲と判断される。なお、300 サイクル終了時の質量減少率は最大 2%程度と小さかった。

(5) 乾燥収縮試験結果

吸水率が大きい再生粗骨材を用いたコンクリートは、普通コンクリートと比較して乾燥収縮が大きくなるといわれている¹²⁾。また、高炉セメントを添加したコンクリートは収縮率が大きくなることが知られている。

日本建築学会では、乾燥収縮率 0.08%以下の場合、構造物に悪影響を及ぼさないと示されている。

乾燥収縮試験結果を図-12 に示す。本試験では材齢 13 週で 0.08%に達していることから、収縮低減剤、膨張剤等の添加による乾燥収縮対策が必要と考えられる。ただし、本研究で想定している PCa 製品は、道路側溝や L 型擁壁である。そのため、鉄筋による拘束力は小さくなく、製品寸法も 2.0m 以下であることから、乾燥収縮の悪影響を受け

にくいと考えられ、ひび割れ発生の危険性は小さいものと推察する。

(6) 再生粗骨材Mを用いた PCa 製品の製作

震災コンクリートがらより製造した再生粗骨材 M を用いて製造した PCa 試作製品（L 形擁壁、落蓋式 U 形側溝）の外観を図-13、図-14 に、落蓋式 U 形側溝の設置状況を図-15 示す。いずれの製品も締固め不良などは見られず良好な外観を呈し、色も普通コンクリートと同色であった。

PCa 製品の曲げ試験は、落蓋式 U 形側溝本体および蓋について行った。規格値はそれぞれ 22.0kN/m および 8.0kN/m である。JIS 規格値まで荷重をかけたが、ひび割れはいずれの PCa 製品にも発生せず、規定強度を満足し、普通コンクリート（配合 N）と同等の性能を確認できた。再生骨材 U 形側溝は、宮城県内の工事現場に 20m 敷設しており、乾燥収縮によるひび割れ、凍害による表面変状等の経過観察を行っている。



図-13 L形擁壁の外観



図-14 落蓋式U形側溝の外観



図-15 落蓋式U形側溝の設置状況

4. まとめ

本研究では、材料不足対策の一つとして、震災により発生したコンクリートがらから再生粗骨材 M を製造し、これを用いた PCa 製品の利用の可能性を検証した。その結果、以下のことが明らかとなり、再生骨材使用 PCa 製品は復興資材として利用が可能であると判断された。

- 1) 宮城県内の震災コンクリートガラから生成した再生粗骨材 M は JIS 規格値を満足した。また、放射能や津波による塩分の影響も少なく、品質は良好であった。
- 2) 粗骨材の全量を再生粗骨材 M で置き換えたプレキャストコンクリートは、強度および耐久性において普通コンクリートと同等の性能を有し、高品質であった。
- 3) 再生粗骨材 M を用いたプレキャストコンクリート製品の曲げ強度試験値は JIS 規格値を満足した。また、外観上も普通コンクリートに遜色なかった。

5. おわりに

本研究において、震災コンクリートがらの復興資材として利用の可能性が高いことが分かった。震災復興には、未だ長い期間が要すると考えられる。本研究が、建設材料不足を補い、東日本大震災からの復興の一助となれば幸いである。

謝辞：本研究は、平成 25 年度日本学術振興会科学研究費補助金（基盤 B 一般 25292146）によって行われたものである。ここに記して感謝申し上げる。

参考文献

- 1) 環境省：東日本大震災に係る災害廃物処理方針（マスタープラン）
https://www.env.go.jp/jishin/attach/haiki_masterplan.
- 2) 北辻政文，遠藤孝夫，埴田正明，万木正弘：混合セメントおよび再生骨材のプレキャスト製品への利用に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.27，No.2，pp.589-594，2005.7

- 3) 北辻政文，丹野恒紀，吉田修栄，遠藤孝夫：再生粗骨材 M のプレキャストコンクリート製品への利用に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.31，No.1，pp.1469-1474，2010.7
- 4) 片平博，渡辺博志：再生骨材の簡易凍結融解試験法の提案，コンクリート工学年次論文集，Vol.27，No.1，pp.1351-1356，2005.7
- 5) 環境省 HP: 災害廃棄物処理の経過，
http://kouikishori.env.go.jp/disaster_waste/progress/
- 6) 黒瀬英樹，江本幸雄，橋本紳一郎，吉里哲郎：中品質再生骨材を用いたコンクリートの基礎的研究，土木学会第 63 回年次学術講演会，pp.781-782，2008.9
- 7) 陶山裕樹，小山智幸，小山田英弘，伊藤是清，松藤泰典：フライアッシュスラリーの品質管理に関する研究（その 1 スラリー中の未燃カーボン量測定についての提案），日本建築学会九州支部研究報告，第 47 回，pp.29-32，2008
- 8) 北辻政文，青山宏昭，小川誠一郎：FA コンクリートへのプレフォーム型 AE 剤の適用に関する基礎的研究，Vol.29，No.1，pp.207-212，2007.7
- 9) 小林 忠司，遠藤 孝夫，北辻政文，俵谷 祐吉：品質の異なるフライアッシュのプレキャストコンクリート製品への利用，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.1，pp.121-126，2013.7
- 10) コンクリート標準示方書 設計編，土木学会 pp.39，2013.3
- 11) 柳啓，松井勇，笠井芳夫：再生骨材コンクリートの静弾性係数に関する一考察，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.1035-1036，2000.9
- 12) 松村嘉之，勝木太，福田萬大：再生骨材がコンクリートのフレッシュ性状と乾燥収縮に与える影響，土木学会第 60 回年次学術講演会，pp.769-770，2005.9