

論文 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

北辻 政文^{*1}・丹野 恒紀^{*2}・吉田 修栄^{*3}・遠藤 孝夫^{*4}

要旨：コンクリート廃材は、循環型社会の観点から再生骨材としてコンクリート材料への再利用が求められている。特に再生粗骨材Mは、製造コストが比較的安く、かつ回収率が高いことからその期待が大きい。しかし、乾燥収縮が大きいことと耐凍害性が低いため、その利用は地下構造物に限定されている。そこで本研究では、これらの課題を解決するために、再生粗骨材Mをプレキャストコンクリート製品へ利用することを検討した。研究の結果、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：再生粗骨材 M, 耐凍害性, フライアッシュ, 乾燥収縮, プレキャストコンクリート製品

1. はじめに

コンクリート廃材は年間 3,500 万トン排出され、建設系廃棄物の中では 42%を占めている¹⁾。これらの廃材は、主に下層路盤材料(クラッシュラン)として再利用が行われているもののコンクリート用骨材(再生骨材)としてはほとんど利用されていない。しかし、コンクリート廃材の発生量は増加の一途をたどると予想されているため、下層路盤としての利用だけでは処理能力に限界があり、資源循環型社会の構築の観点から、コンクリート用骨材としての再利用が期待されている。

現在、コンクリート用再生骨材はその品質を H, M, L の 3 ランクに分けて、それぞれ JIS 規格が制定された²⁾。再生骨材 H は、レディーミクストコンクリートへも利用が可能であり、その品質は天然の骨材と同等である。しかし、それを製造するためのエネルギーが多いため高コストであるため廃棄費用の大きい大都市以外の地域では現実的ではない。さらに、高度処理によって取り出せる粗骨材量はコンクリート廃材全体の 30~40%程度で、残りは微粉となり、その処理が課題となっている。

一方、再生骨材 M と L は、H に比較して骨材製造は簡易となるものの、使用範囲が限定されており、とくに再生骨材 L は品質が極度に悪いいため、水分管理が行えず、コンクリートの品質を一定水準に保つことが難しく、高い強度や耐久性が要求されない裏込めや捨てコン等にしか利用できない。再生骨材 M は品質と製造コストの面から最も利用普及の期待が大きいものの、乾燥収縮や凍結融解作用の影響からその使用にあたっては、地下構造物のみに限定されており、東北地方などの寒冷地では一般の構造物には利用できない状況にある。

そこで、本研究では、これらの課題を解決するために、再生粗骨材Mをプレキャストコンクリート製品へ利用することを検討した。プレキャストコンクリート製品に利用した場合、部材寸法が小さく、乾燥収縮による不具合が発生しにくいこと、また、凍結融解抵抗性についても土木研究所により簡易の判定法³⁾が提案され、耐凍害性の有無を容易に判断できるようになったことが利点としてあげられる。

再生骨材のプレキャストコンクリート製品への利用に関する研究は、日本コンクリート工学協会北海道支部⁴⁾によってプレキャスト無筋コンクリート製品への適用について検討されている。また、プレキャスト鉄筋コンクリート製品については北辻ら⁵⁾⁶⁾の研究がある。

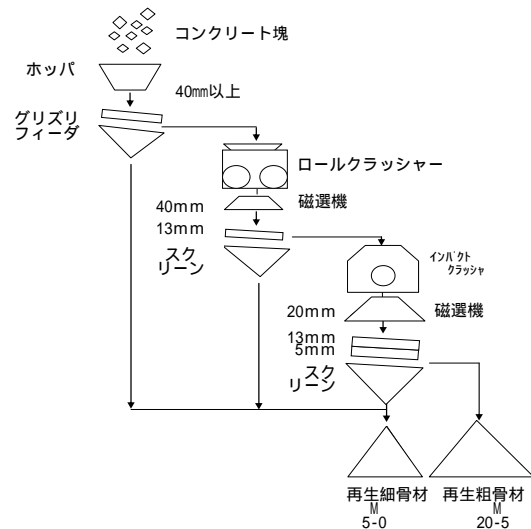


図 - 1 再生骨材Mの製造フロー

*1 宮城大学 食産業部環境システム学科 教授 博(農) (正会員)

*2 宮城大学 食産業部環境システム学科

*3 吉田セメント工業(株)

*4 東北学院大学 工学部環境建設工学科 教授 博(工) (正会員)

表 - 1 再生粗骨材Mの品質

試験項目		試験値	再生粗骨材 M JIS 規格値
密度 g/cm ³	表乾	2.51	-
	絶乾	2.41	2.30 以上
吸水率	%	4.31	5.00 以下
微粒分量	%	0.11	1.5 以下
不純物量	%	0.00	3.0 以下
塩化物量	%	0.008	0.04 以下
粗粒率		6.53	-
骨材修正係		0.5	-
簡易凍結融解*	%	1.03	5.0 以下

*土木研究所法³⁾による

2. 実験概要

2.1 使用材料

(1)再生粗骨材M

再生粗骨材 M は、中間処理業者から入手した。再生粗骨材 M の製造に用いられる破砕機は、再生骨材 H に比べ簡易であり、多くの中間処理業者で既に有している。再生骨材 M の製造の一例を図 - 1 に示す。まずロールクラッシャーやジョーラッシャー等で一次破碎後、インパクトクラッシャーやポラウダー等により 1~2 回の二次破碎を行い、脆弱なモルタル分を除去したものを粒度調整して製造される。再生粗骨材 M の回収率は 50~60% である。

使用した再生粗骨材 M の品質を表 - 1 に示す。試験結果は大きな問題となる点が 1 つもなく、JIS 規格値を満たしている。また、骨材修正係数が、0.2~0.8% 程度あることから、空気量の管理には留意する必要がある。

ここで、再生細骨材は木片やプラスチックなどの夾雑物や融雪剤等の塩分含有量が高いこと、および吸水率の規格値を満足できないことから、本研究では対象外とした。

(2)その他の材料

セメントは普通ポルトランドセメント（密度 3.15g/cm³、比表面積 3,280 cm²/g）を用いた。粗骨材は最大寸法 20mm の碎

表 - 2 フライアッシュの品質

試験項目		試験値
二酸化ケイ素	%	67.7
湿分	%	0.1
強熱減量	%	4.0
密度	g/cm ³	2.17
粉末度	45μふるい残分%	18.1
	比表面積 cm ² /g	3840
フロー値比	%	100
活性度指数 %	材齢 28 日	78
	材齢 91 日	87
メチレンブルー吸着量	%	0.89

石（表乾密度 2.65g/cm³、吸水率 0.87%、粗粒率 6.68）を用いた。細骨材は砕砂（表乾密度 2.62g/cm³、吸水率 1.74%、粗粒率 2.71）を用いた。また混和材としてフライアッシュ原粉を用いた。フライアッシュ使用の目的は、アルカリシリカ反応対策のためである。すなわち出所不明の雑多なコンクリート解体材を原料としているため、アルカリシリカ反応の有無を判断することが困難であるため、製造された再生骨材は「無害でない」と判断し、対策を講じている。フライアッシュの成分および物理試験結果を表 - 2 に示す。試験結果より、今回用いたフライアッシュは活性度指数を除くと JIS フライアッシュ 種に相当する品質であることがわかる。

混和剤には、ポリカルボン酸系化合物を主成分とする高性能減水剤（密度 1.04g/cm³）と樹脂酸塩を主成分とする AE 剤（密度 1.04g/cm³）を用いた。

2.2 実験方法

配合を表 - 3 に示す。配合設計ではプレキャストコンクリート製品工場で用いられる配合を基準とし、設計基準強度 30N/mm² を満足するための水セメント比として 45% に統一した。また、アルカリシリカ反応の対策としてコンクリート中の総アルカリ量を 3.0kg/m³ 以下に規制し、フライアッシュを使用した。すなわち、1) 普通コンクリート、2) 総アルカリ

表 - 3 コンクリートの配合

配合名	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)							
			水 W	セメント C	フライアッシュ FA	細骨材 S	粗骨材 G		混和剤 (C×%)	
							砕石 CG	再生骨材 RG	減水剤 AD	AE 剤 AE
NP	45.0	38.0	162	360	-	671	1108	-	0.70	5A*
RG290			162	360	-	671	787	290	0.70	5A
FARG			162	360	54	605	-	1003	0.70	30A

*1A = C×0.002%

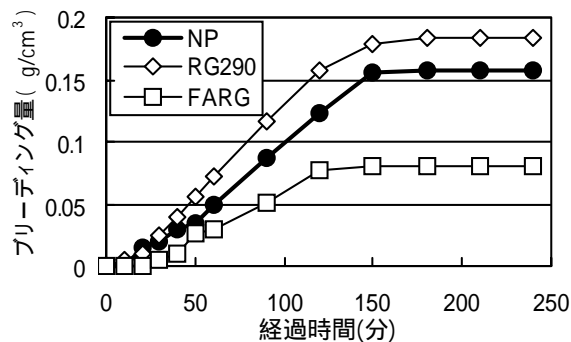


図 - 2 ブリーディング試験結果

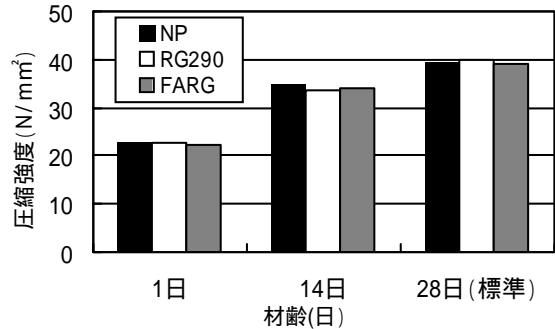


図 - 3 圧縮強度試験結果 (製品同一養生)

量を 3.0kg/m^3 とするために再生粗骨材 M で碎石を 290kg 置換したもの、および 3) 粗骨材全量を再生粗骨材 M で置換し、アルカリシリカ反応の対策としてフライアッシュを混和材に用いたものの 3 種類とした。ただし、フライアッシュを使用する場合、コンクリートの初期強度が低下する恐れがあるため、セメントの外割りで 15% 使用した。これは、フライアッシュセメント B 種相当の置換率となる。

すべての配合においてスランブ $10\pm 2.5\text{cm}$ 、空気量 $5\pm 1.5\%$ とした。以下、普通コンクリートを NP、再生粗骨材 M で 290kg 置換したものを RG290、再生粗骨材 M で全量置換したものを FARG と記す。

試験項目は、ブリーディング量試験 (JIS A 1223)、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)、中性化促進試験 (JIS A 1153)、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 $10\times 20\text{cm}$ の円柱供試体とし、曲げ強度、乾燥収縮、中性化促進および凍結融解試験用は $10\times 10\times 40\text{cm}$ の角柱供試体とした。

コンクリートの練混ぜ方法は、NP と RG290 についてはセメントと細骨材を 15 秒間の空練り後、練混ぜ水を注入し 60 秒間練り、粗骨材を投入して 45 秒間の本練りを行った。一方 FARG は注水後を 180 秒間練混ぜた。

練り上がったコンクリートはそれぞれ型枠に詰め、テーブルパイプを用いて 30 秒間締固めて、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。すべてのコンクリートにおいて、脱型までの目標マチュリティーは約 800 hr に統一した。なお、比較のために標準養生も行った。

3. 試験結果と考察

3.1 フレッシュコンクリートの性状

練り上がり後のフレッシュコンクリートの性状試験値は、スランブ $10\pm 2.5\text{cm}$ 、空気量 $5\pm 1.5\%$ であり、いずれも目標範囲内であった。ただし、フライアッシュには未燃カーボンが含まれるため、AE 剤を吸着して空気が連行しにくい⁷⁾ことが知られており、AE 剤の使用量を他の配合と比べて増やしている。

室内試験で採取したフレッシュコンクリートのブリーディング量試験結果を図 - 2 に示す。FARG はブリーディング量を抑制する効果が確認された。これは、再生粗骨材 M の吸水率が適度に高く親水性であるため、練混ぜ水と骨材中の水が引き合っていること、および結合材料多いこと等が理由として考えられる。一方、RG290 と NP では大差はなく、再生粗骨材 M の置換率が低い場合、ブリーディング抑制効果は認められなかった。

3.2 硬化コンクリートの性質

(1) 強度特性

図 - 3 に圧縮強度試験結果を示す。いずれの材齢においても 3 種類のコンクリートの強度はいずれも同等であった。一般的にフライアッシュを混和材に用いると初期強度が小さいことが知られている⁸⁾。しかし、今回はフライアッシュをセメントの外割りで使用したために強度低下は認められなかった⁹⁾。

また出荷材齢である 14 日の強度は、設計基準強度 30N/mm^2 を満足していることがわかる。

図 - 4 に曲げ強度、図 - 5 に引張強度試験結果を示す。一般に曲げ強度は圧縮強度の $1/5 \sim 1/8$ 、引張強度は $1/9 \sim 1/15$ の範囲にある。曲げ強度はすべての配合において、一般的な範囲内に入っている。一方、引張強度はやや低い値となった。これは再生粗骨材 M に付着したモルタルがコンクリート骨材の界面において悪影響を及ぼすためであると考えられる。今後、引張強度の低下の原因についてはさらに検討が必要である。

図 - 6 に静弾性係数試験結果を示す。コンクリート標準示方書では、普通コンクリートの圧縮強度が 30N/mm^2 のとき、一般的な静弾性係数の値として、 28 kN/mm^2 としている。NP と RG290 は、土木学会基準と同等であるが、再生粗骨材の置

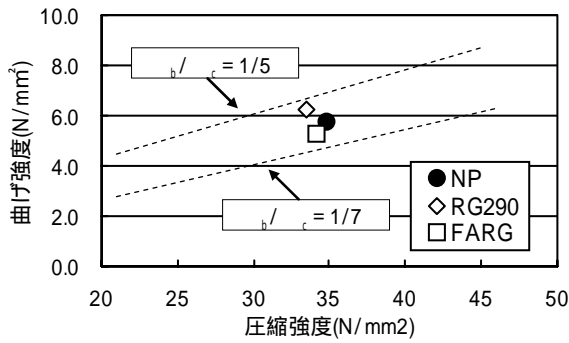


図 - 4 曲げ強度試験結果

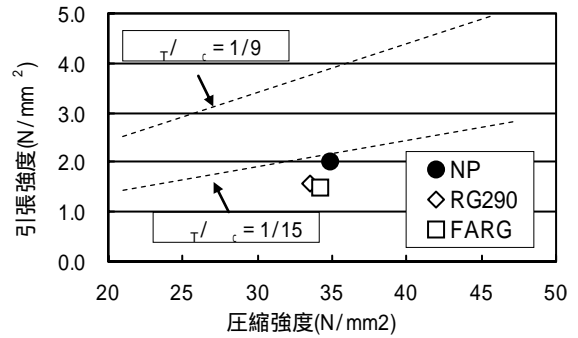


図 - 5 引張強度試験結果

換率が高くなると静弾性係数が小さくなるとの報告¹⁰⁾が多く、FARGは既報告と同様に小さくなる傾向となった。しかしながら、FARGにおいても25 kN/mm²を超えており、鉄筋コンクリートの設計上問題となる程の低下はないと判断される。

(2)凍結融解試験結果

寒冷地コンクリートにおいて、耐凍害性能が高いことは不可欠な条件である。

発生源が不明な原コンクリートはAEコンクリートであるとは限らないため、耐凍害性に留意する必要がある。とくに、JIS A 5308 レディーミクストコンクリートにおいてAE剤の使用が義務付けられたのは1978年であり、それ以前のコンクリート構造物にはAE剤が使用されていない可能性もある。

つまり吸水率が大きい再生骨材は、凍結融解作用により骨材そのものが崩壊し、それをういたコンクリートは、ポップアウトや亀裂が生じる危険性があるのである。このため、再生骨材Mを用いたコンクリートでは、地下構造物に利用範囲を限定している。

一方、(独)土木研究所では、再生骨材の簡易な凍結融解試験法³⁾を提案している。これによると、再生骨材を水中凍結(-20)16時間-水中融解(20)8時間を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判断するものである。さらに、この試験で用いられた再生骨材は、L相当の品質のものが多く、本試験で使用しているMよりも品質が劣るものであり、かつAE剤の混入の有無に拘わらないとしている。本研究の試験結果は1.03%であった。判断基準の5.0%を大きく下回り、今回用いた再生粗骨材Mの凍結融解抵抗性は高いと推察される。

図-7および図-8は、JIS A 1148 A法(水中凍結-水中融解)により凍結融解試験を行った結果である。蒸気養生を行った供試体は、脱型後は屋外気中養生を行ったため乾燥している。乾燥により水和反応が一時低下したコンクリートが試験中に水分の供給を受け、再び水和反応が促進されるため、試験中に動弾性係数が増加することがあり、劣化による動弾性係数の低下だけをみるのが難しくなる。このため本研究

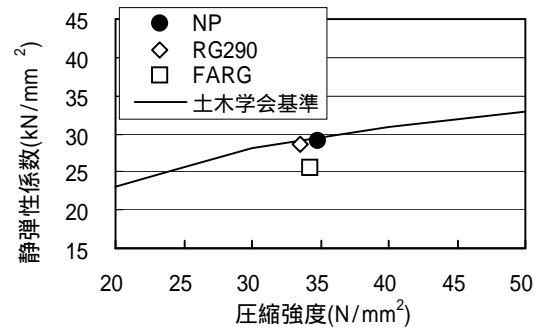


図 - 6 圧縮強度と静弾性係数の関係

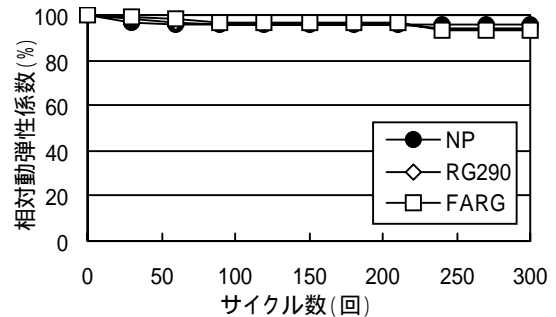


図 - 7 凍結融解試験結果(相対動弾性係数)

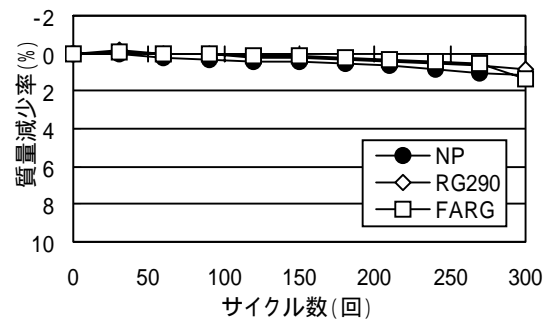


図 - 8 凍結融解試験結果(質量減少率)

では、試験前の2週間、水中養生を行うこととした。その結果、動弾性係数の増加は認められなかった。

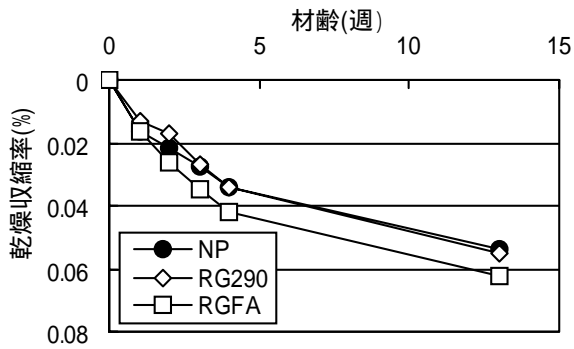


図 - 9 乾燥収縮試験結果

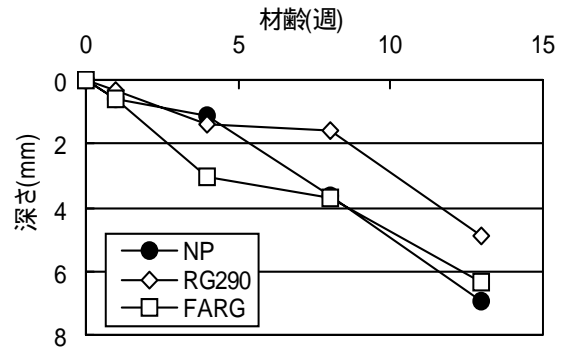


図 - 10 中性化促進試験結果

図 - 7 から、すべてのコンクリートにおいて 300 サイクル終了時の相対動弾性係数は、90%以上を確保していることが分かる。プレキャストコンクリート製品は、小断面であることが多いことから、劣化判定基準は 85%となるが、この値を大きく上回っており、十分な耐凍害性能を有していると判断できる。また、図 - 8 より 300 サイクル終了時の質量減少率は、いずれのコンクリートも 1%程度で、大きなスケリングやポップアウトも認められず、極めて良好な結果であった。このことは(独)土木研究所で提案している簡易凍結融解試験法の結果と一致している。

(3) 乾燥収縮試験結果

乾燥収縮試験の供試体は蒸気養生後、材齢 1 日で脱型して直ちに基準長さを測定した。測定長さは 300mm である。乾燥条件は温度 20 ± 1 、相対湿度 $60 \pm 5\%$ とした。試験結果を図 - 9 に示す。一般的に、吸水率が大きい低品質な再生骨材を使用したコンクリートでは、乾燥収縮が大きくなるが¹¹⁾、モルタルの付着を抑えた高品質の再生骨材を使用した場合、普通コンクリートと同等の性質を有すること¹²⁾が知られている。粗骨材の 27%を再生粗骨材で置換した RG290 は、普通コンクリートと同等であった。これに対し、再生粗骨材 M を粗骨材として全量使用した FARG は、前 2 者に比べわずかながら収縮率が大きい傾向は認められたものの、その数値差は小さいと思われる、コンクリートの品質に悪影響を及ぼすものではないと判断される。

(4) 中性化促進試験結果

用排水路等の小断面のプレキャストコンクリート製品では、十分なかぶり厚さを確保することが難しい。このため、中性化が大きいコンクリートは鉄筋の腐食の危険性が高く、不向きである。そこで、中性化促進試験を実施した。供試体は蒸気養生後、材齢 14 日まで室内で気中養生を行い、その後促進中性化試験を開始した。試験結果を図 - 10 に示す。コンクリートの中性化速度は、二酸化炭素の拡散速度に関する細孔構造と細孔溶液の pH 特性に関するカルシウム量に依存する。一般的にフライアッシュを混和したコンクリートはポゾラン反応によりカルシウムを消費するため中性化が進むが、

材齢が経過し、ポゾラン反応が進行するとセメント硬化体の細孔径分布のピーク位置が微細側に移行するため¹³⁾¹⁴⁾、二酸化炭素の拡散速度が抑えられ、中性化は抑制される。試験結果では、フライアッシュを用いた FARG の初期値は大きく、材齢が経過するにつれてその値は落ち着き、既報告と同様の結果が得られた。材齢 13 週において、FARG は普通コンクリート同等の値を示した。一方、RG290 は普通コンクリートに比べ小さい値となったが、この理由は定かでない。

(5) プレキャストコンクリート製品の試作

試作したプレキャストコンクリート製品は内幅 300mm、長さ 2,000mm の落ちふた式 U 形側溝 (JIS A 5372 推奨仕様 5 3 1 種 300 A) の本体および蓋である。配合は表 - 3 の FARG とした。プレキャストコンクリート製品の外観を図 - 11 に示す。出来上がったプレキャストコンクリート製品にはジャンカおよび材料分離も認められず、外観上問題となる点はなかった。

プレキャストコンクリート製品の曲げ強度試験は工場出荷可能材齢である 14 日とした。本体および蓋の JIS 規格値はそれぞれ 22.0kN/m、8.0kN/m である。JIS 規格値まで荷重をかけたが、いずれもひび割れは発生せず、良好な結果であった。

さらに、作製したプレキャストコンクリート製品は福島県内の国道工事現場へ設置した。製品の設置状況を図 - 12 に示す。敷設後約 5 ヶ月間が経過したが、乾燥収縮等によるひび



図 - 11 再生骨材コンクリートの外観

割れ等は発生していないことが確認された。今後も継続して観察し、再生粗骨材 M を使用したプレキャストコンクリート製品の実用化へ向けて、さらにデータを蓄積する予定である。

4. 総括

再生粗骨材 M を用いたプレキャストコンクリート製品に関する研究を行い、以下のことが明らかとなった。

- 1) 粗骨材の 290kg (約 27%) および全量を再生粗骨材 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質である。
- 2) 簡易凍結融解法において合格した再生粗骨材 M を用いたコンクリートの耐凍害性は高かった。
- 3) 再生粗骨材 M の吸水率は 4% を超えていたが、乾燥収縮による悪影響は認められなかった。
- 4) 再生粗骨材 M を用いたプレキャストコンクリート製品は JIS の曲げ強度試験値を満足した。

5. おわりに

再生粗骨材 M とフライアッシュを用いたコンクリートは室内試験、フィールド試験ともに良好な結果であった。したがって、プレキャストコンクリート用骨材としての利用の可能性を確認できた。しかし、データ数が少なく、同様な実験を行い、品質の変動等を把握するためのデータの蓄積が必要である。なお、今後、高炉セメントと再生骨材 M の組合せについて検討する予定である。

また、現状では再生粗骨材 M を製造可能な工場が極めて少なく、安定的な供給ができない状況である。これらの製造工場の普及とフィールド試験をさらに増やし、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拡張に努力したい。

謝辞：本研究は(社)東北建設協会と宮城大学の共同研究で行われたものである。フィールド試験において国土交通省東北地方整備局東北技術事務所の協力を得た。ここに記して感謝申し上げる。

引用文献

- 1) (社)日本コンクリート工学協会：骨材の品質と有効利用に関する研究委員会報告書，pp13-15，2007.7
- 2) JIS A 5021，JIS A 5022，JIS A 5023，再生骨材 H，M，L を用いたコンクリート，2007
- 3) 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



図 - 12 製品の設置状況

- 4) (社)日本コンクリート工学協会北海道支部：リサイクル研究委員会報告書，pp.1-43，2002.4
- 5) 北辻政文，遠藤孝夫，多田正明，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
- 6) 北辻政文：電柱から取出した再生骨材を用いたコンクリート製品に関する研究，プレキャストコンクリート製品の課題と展望に関するシンポジウム論文集，pp101-106，2008.2
- 7) 須藤祐未，佐藤嘉昭，清原千鶴，大谷俊浩：石炭灰の未燃炭素がコンクリートのフレッシュ性状に及ぼす影響，日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1 材料施工，pp.25-26，2004.8
- 8) 平野利光，畑元浩樹：石炭灰の利用(その 2)，電力土木，No.254，pp.69-75，1994.11
- 9) 高巢幸二，松藤泰典：再生骨材を使用したフライアッシュ外割混合コンクリートの強度性状，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.2，pp.589-594，2007.7
- 10) 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
- 11) 杉山一弥，内山則之，長谷川英規，神山行男：解体コンクリートのコンクリート用骨材への適用に関する研究，コンクリート工学論文集，第 7 巻，第 1 号，pp.91-101，1996.1
- 12) 柳橋邦生，米澤敏男，神山行男，井上孝之：高品質再生骨材の研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.21，No.1，pp.205-210，1999.7
- 13) 山本武志ほか：フライアッシュのボゾラン反応に関する研究，電力中央研究所報告，N04008，pp.1-27，2004.10
- 14) 小早川真ほか：ダムコンクリートにおけるフライアッシュのボゾラン反応率の考察，コンクリート工学論文集，Vol.15，No.1，pp.45-56，2004.1