

再生粗骨材Mのプレキャストコンクリートへの利用に関する研究

丹野 恒紀・北辻 政文*

A Study on Utilization of Precast Concrete Products with Recycled Aggregate

Koki Tanno and Masafumi Kitatsuji*

Abstract

Form the viewpoint of renewable society, concrete wastes generated about 35 million tons every year, are needed to be reused as recycled aggregate for concrete. In this study, we examined freeze-thaw resistance, alkali-silica reaction, and drying shrinkage of concrete products made with recycled coarse aggregate M prepared from concrete wastes. Our study revealed that the concrete made with recycled coarse aggregate M showed the same quality as ordinary concrete in (in terms of) its strength and durability, and that it was feasible to apply the recycled coarse aggregate M to precast concrete products.

(Received November 4, 2009 ; Accepted February 1, 2010)

Keywords : recycled aggregate M, freeze-thaw resistance, alkali silica reaction, drying shrinkage, precast concrete products

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大で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,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をコンクリート二次製品(以下,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が利点として挙げられる。また,凍結融解抵抗性

* Corresponding author (E-mail : kitatsuj@myu.ac.jp)

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。

2. 材料と方法

2.1 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。先ずロールクラッシャーやジョーラッシャー等で一次破砕後、インパクトクラッシャーやポラウダー等により1~2回の二次破砕を行い、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。なお、再生骨材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%程度であることから、空気量の管理には留意する必要がある。

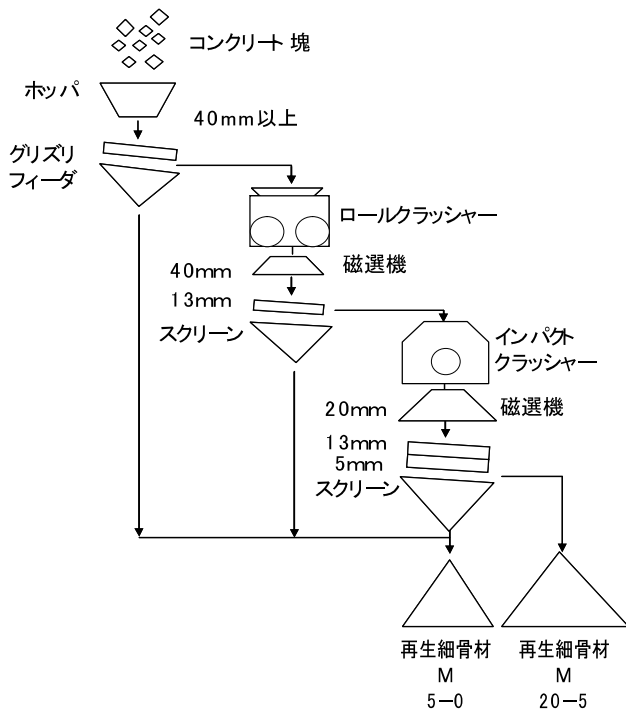


図-1 再生骨材Mの製造フロー

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	2.41	-
	絶乾	2.51	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	-
骨材修正係数	%	0.5	-
簡易凍結融解*	%	1.03	5.0以下

*土木研究所法³⁾による

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。

2.2 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3,280cm²/g）を用いた。粗骨材は最大寸法20mmの碎石（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。このため、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Ⅱ種に相当する品質であることがわかる。

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

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%

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。

2.3 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/cm³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) 総アルカリ量を3.0kg/m³とするために砕石を再生粗骨材Mで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%を使用した。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プ10±2.5cm、空気量5±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φ10×20cm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10×10×40cm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、テーブルバイブレータを用いて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℃、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. 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、スランプ10±2.5cm、空気量5±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

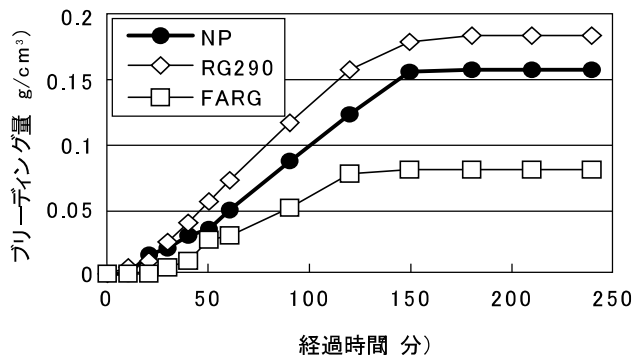


図-2 ブリーディング試験結果

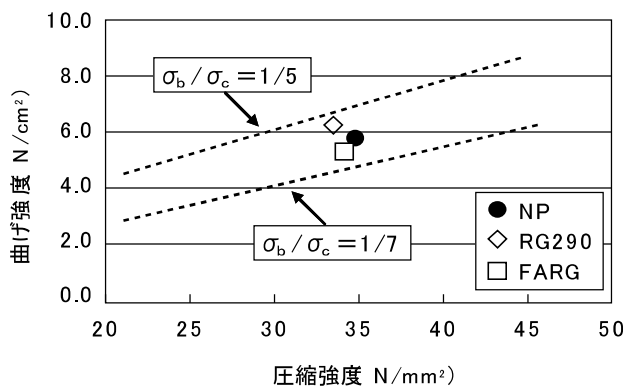


図-4 曲げ強度試験結果

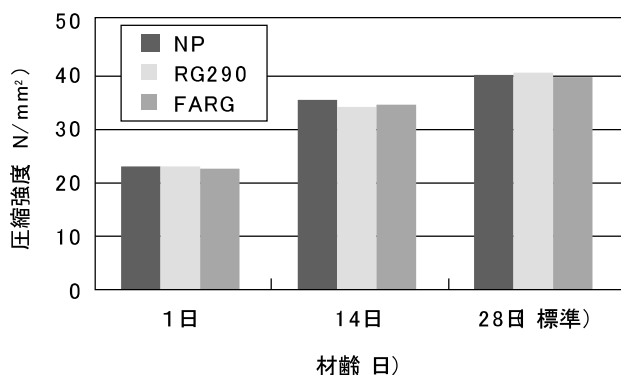


図-3 圧縮強度試験結果 (製品同一養生)

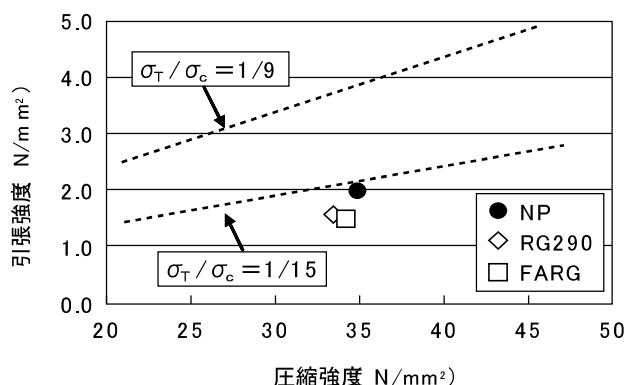


図-5 引張強度試験結果

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日強度は、設計基準強度30 N/mm²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1/5~1/8、引張強度は1/9~1/15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30 N/mm²のとき、一般的な静弾性係数の値として、28 kN/mm²としている。NとRG290は、土木学会基準と同等であるが、再生粗骨材の置換率が高くなる

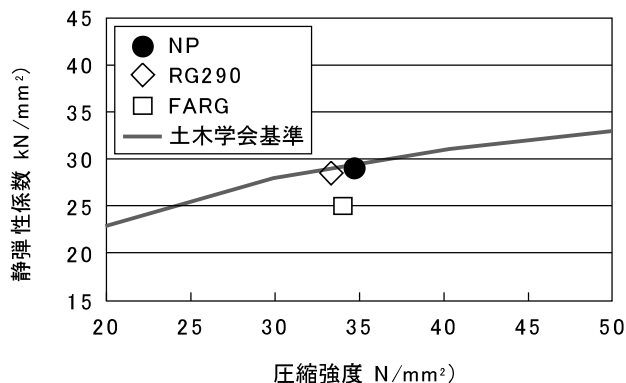


図-6 圧縮強度と静弾性係数の関係

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A E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A E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A E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、それをを用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A E剤の混入の有無に拘わらずに耐凍害性能を判定することができる。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-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%と厳しい判定基準を設けてあるが、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、大きなスケー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。これらのことから、(独)土木研究所で提案している簡易凍結融解試験法により合格と判定した再生粗骨材を用いたコンクリートの耐凍害性は高く、簡易判定法が有効な方法であると判断される。

(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300

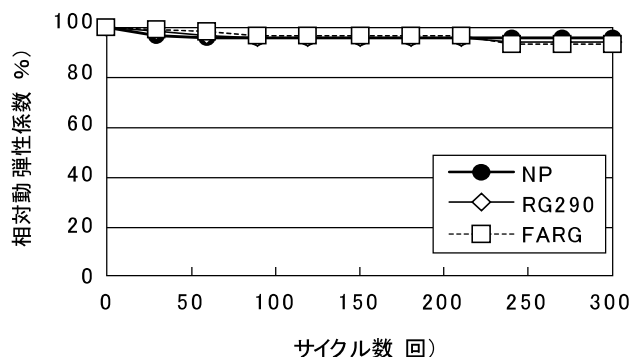


図-7 凍結融解試験結果 (相対動弾性係数)

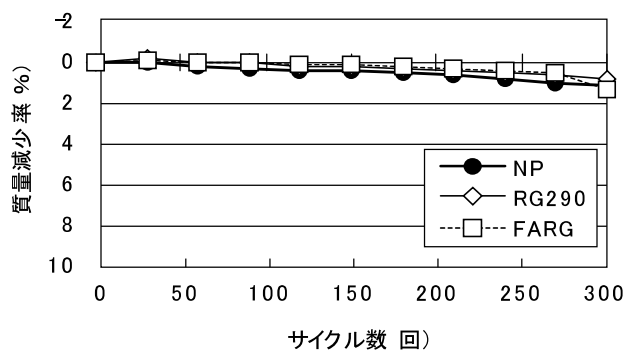


図-8 凍結融解試験結果 (質量減少率)

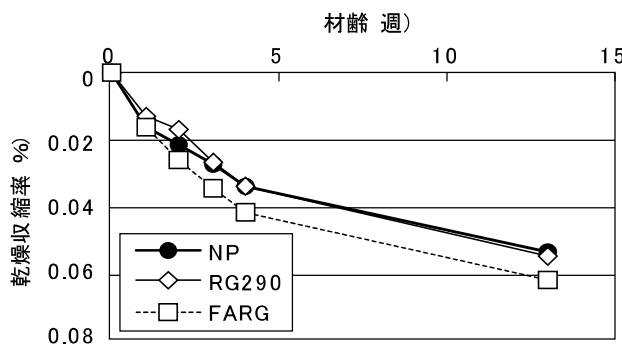


図-9 乾燥収縮試験結果

mmである。乾燥条件は温度 $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ 、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⁸⁽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M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、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係する細孔構造と細孔溶液のpH特性に関係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ズ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、ポズ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。FARGは普通コンクリートを大きく下回り、良好

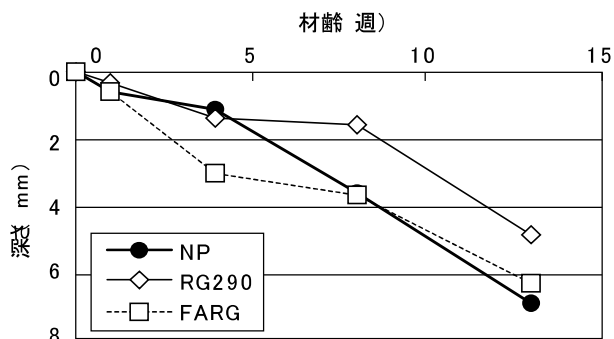


図-10 中性化促進試験結果

な結果であった。RG290についても普通コンクリートと同等の値を示している。

3.3 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300A) の本体および蓋である。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



図-11 試作した製品の的外観



図-12 製造プラント

福島県の公共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することにより、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. 摘 要

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) アルカリシリカ反応の対策としてフライアッシュを外割で15%混合し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く、再生骨材の耐凍害性の判断として有効な方法である。
- 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。

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。今後、高炉セメントと再生骨材Mの利用について検討する予定である。

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(財)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
- 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, 野田正明, 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, pp. 101-106, 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