

論文 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

北辻政文^{*1}・遠藤孝夫^{*2}・茅田正明^{*3}・万木正弘^{*4}

要旨： 混合セメントや再生骨材は，グリーン購入特定調達品目に指定され，循環型社会構築の観点から，今後，積極的な使用が求められている。しかし，東北地方ではこれらを使用したプレキャスト製品の製造，流通の事例は見当たらない。そこで本研究では，プレキャスト製品に限定して，混合セメントおよび再生骨材の利用の可能性を検討した。その結果，強度特性，耐久性において問題となる点は見あたらず，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が可能であると判断された。

キーワード： 混合セメント，再生骨材，プレキャスト製品，圧縮強度，耐凍害性

1. はじめに

循環型社会構築の観点から，コンクリート産業においても環境負荷の少ない，いわゆるグリーン購入特定調達品目の使用が求められている。セメントでは高炉セメント B 種およびフライアッシュセメント B 種が特定調達品目に指定されている。しかし，東北地方ではこれらの混合セメントを利用したプレキャストコンクリート製品（以下プレキャスト製品という）の製造，流通の事例は見当たらない。これは，混合セメントの特徴として，初期強度の発現が小さくプレキャスト製品へ不向きであることと，高炉セメントの場合，原料であるスラグ微粉末が東北では製造されていないため，コスト高になることが主な理由である。

同様に再生骨材においても，環境負荷低減の観点から利用の拡大が必要である。現在，その多くは下層路盤材として利用されているものの，今後のコンクリートガラの発生量の増大を考慮すると，路盤材だけの利用では全量を有効利用することは難しく，コンクリート用再生骨材としての利用が望まれる。

しかし，寒冷地においては吸水率が高い再生骨材を用いたコンクリートは耐凍害性能が低く，利用は難しいと考えられている。また，製造時期や工場の異なる原コンクリートから造られる再生骨材は，アルカリシリカ反応の有無を確認することが難しい。さらに，再生骨材の大半を占める昭和 50 年代以前のセメントはアルカリ含有量が高く，アルカリシリカ反応対策の必要があるため利用促進の妨げとなっている。

一方，JIS 工場のプレキャスト製品の場合，水セメント比が小さく，品質の変動も小さいと考えられるため，これから製造された再生骨材の品質は良く，製品への再利用の可能性が高いと考えられる。また，混合セメントが工場製品へ利用できれば，同時にアルカリシリカ反応対策にも対応できる。さらに高炉セメントを使用したコンクリートは，養生温度依存性が大きく，高温養生を行うと強度発現が大きいことが知られており¹⁾，蒸気養生に適していると考えられる。

再生骨材のプレキャス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²⁾においてプレキャスト無筋コンクリート製

*1 宮城県農業短期大学 農業土木科助教授 博（農）（正会員）

*2 東北学院大学 工学部環境土木工学科教授 博（工）（正会員）

*3 前田製管（株）技術開発本部（正会員）

*4 弘前大学 弘前大学農学生命科学部地域環境科学学科教授 工博（正会員）

品への適用について検討されているものの鉄筋コンクリートについてはまだ検討されていない。

そこで、本研究ではプレキャスト製品を原コンクリートとする再生骨材を粗骨材として、同時に高炉セメント B 種およびフライアッシュセメント B 種を結合材として用いた設計基準強度 30MPa 程度までのプレキャスト製品の製造を試み、再生骨材と混合セメントの利用を検討したので報告する。



写真-1 再生骨材の外観

2. 実験概要

2.1 使用材料

再生骨材は、製造後7年経過したプレキャスト無筋コンクリート製品からジョークラッシャー、コーンクラッシャーおよびインペラーにより破碎したものを粒度調整し粗骨材として全量使用した。原コンクリートから抜き取ったコアの圧縮強度は 42.6MPa で、中性化深さは 4mm であった。混合割合は 20~15mm のものを 64%、15~5mm のものを 36%混合して、標準粒度範囲に入るように調整した。今回は、再生細骨材は使用しなかった。混合した再生粗骨材の表乾密度、吸水率はそれぞれ 2.55 g/cm³、3.91%であった。再生骨材の外観を写真-1 に示す。コンクリート製品に使用するため最大寸法が 20mm になるように破碎したことから、原骨材に付着しているモルタル分は少なかった。また、比較のために、原コンクリートと同一の砕石を粗骨材として用いた。これらの品質を表-1 に示す。細骨材は陸砂（表乾密度 2.58 g/cm³、吸水率 1.65%、粗粒率 2.74）を用いた。

セメントは市販の高炉セメント B 種（密度：3.04 g/cm³、比表面積：3,290cm²/g）、普通ポルトランドセメント（密度：3.15 g/cm³、比表面積：3,290cm²/g）、および質量比内割で 15%をフライアッシュ II 種（密度：2.23 g/cm³、比表面積：3,500cm²/g）で置換したセメント（以下フライアッシュセメント B 種という）を用いた。

混和剤はリグニンスルホン酸およびポリオール複合体を主成分とする AE 減水剤とアルキル

表-1 骨材の品質

試験項目	砕石 20-5 (mm)	再生 20-15 (mm)	再生 15-5 (mm)	再生 5-0 (mm)
粗粒率 F. M.	6.33	7.03	6.45	3.53
密度 (g/cm ³)	2.67	2.59	2.53	2.36
吸水率 (%)	1.81	2.85	4.22	6.29
単位容積 質量(kg/l)	1.56	1.47	1.42	1.38
実積率 (%)	59.5	58.4	58.5	62.2
微粒分 (%)	0.34	0.69	0.40	1.71

アリルスルホン酸を主成分とする AE 剤を用いた。

2.2 実験方法

配合は、工場で行われている通常の条件、すなわち水セメント比 45%、スランプの範囲 8±2.5cm、空気量の範囲 5±1.5%を基準とした。ただし、水セメント比をパラメータとした予備試験の結果から、普通コンクリートと同等の強度を得るために、高炉セメントと再生骨材を同時に用いたコンクリート、およびフライアッシュセメントと再生骨材を同時に用いたコンクリートは普通コンクリートに比べて水セメント比をそれぞれ 3%、6%減じている。さらに、フライアッシュセメントを用いたものは流動性が高いことから同時に、単位水量を 4kg/m³減じている。また、フライアッシュセメントを用いたものは未燃カーボンの影響から AE 剤の使用量が増加

表-2 コンクリートの配合

コンクリートの種類	最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	空気量 (%)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)					
						水 <i>W</i>	セメント* <i>C</i>	細骨材 <i>S</i>	粗骨材 <i>G</i>	AE 減水剤	AE 剤
N+NP	20	8	5.0	45	41	168	373	702	1047	3.73	2.24
R+BB				42	40	168	400	671	1005	5.20	2.40
R+FB				39	41	164	421(63)	681	976	4.21	6.32

* () はフライアッシュの量

した。以下普通コンクリートを N+NP, 再生骨材と高炉セメントを用いたコンクリートを R+BB, 再生骨材とフライアッシュセメントを用いたコンクリートを R+FB と記す。これらの配合を表-2 に示す。

試験項目は、圧縮強度(JIS A 1108), 曲げ強度(JIS A 1106), 割裂引張強度(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 (JIS A 1129-2) による乾燥収縮試験, 中性化促進試験 (JIS A 1153), および製品による曲げ試験(JIS A 5371 および5372)である。また試作したプレキャスト製品は、落ちふた式U形側溝 (JIS A 5372推奨仕様5-3 300A)および片面歩車道境界ブロックB (JIS A 5371推奨仕様2-2) である。圧縮強度, 静弾性係数試験用の供試体はプラスチック型枠を用いてφ10×20cmの円柱とし, 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。いずれの供試体も型枠にコンクリートを詰め, テーブルバイブレーターを用いて30秒間締固めて, 型枠のまま蒸気養生を行った。

蒸気養生の方法は常圧蒸気養生で, 通常工場で行われている前置き2.0時間, 最高温度60℃, 保持2.0時間を目標とし約24時間後に脱型して, 試験材齢まで屋外空气中養生とした。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. 試験結果および考察

3.1 フレッシュコンクリートの性状

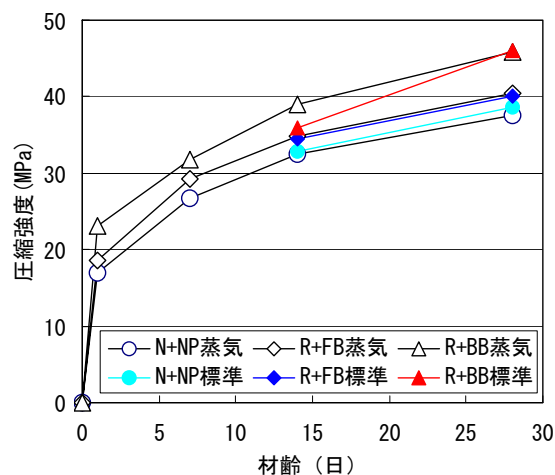


図-1 圧縮強度試験結果

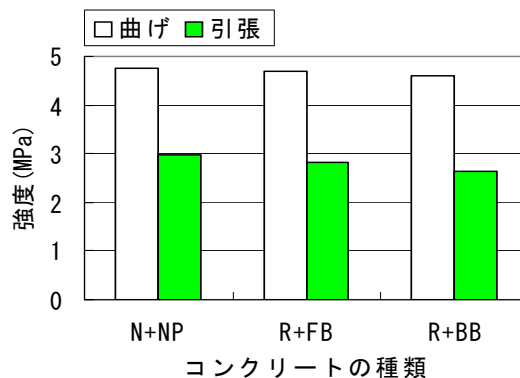


図-2 曲げおよび引張強度試験結果

練上り後のフレッシュコンクリートの性状試験値はいずれも目標範囲であった。

3.2 硬化コンクリートの性質

(1) 強度特性

圧縮強度の試験結果を図-1 に示す。工場の製品管理強度は材齢1日で12MPa, 出荷可能材齢である14日で30MPaである。いずれのコンクリートもこの規格値を満足していることがわかる。コンクリートの種類別では, すべての

材齢において、R+BB>R+FB>N+NPの順に強度が高かった。また、養生方法の違いによる影響も小さく、材齢28日ではいずれのコンクリートも標準および蒸気養生における強度発現は同等であった。

図-2は材齢14日蒸気養生における曲げおよび引張強度を示したものである。いずれのコンクリートも同等の強度発現であるといえる。

一般のコンクリートの場合、引張強度は圧縮強度の1/9~1/13、曲げ強度は1/5~1/7といわれている。R+FB および N+NP の引張強度および曲げ強度は、これらの範囲内であり、一般のコンクリートと同等であると判断できる。これに対し、R+BB の圧縮強度に対する曲げおよび引張強度の割合は、それぞれ 1/8.5, 1/14.5 とやや低い傾向であった。

図-3に材齢14日蒸気養生における静弾性係数と圧縮強度の関係を示す。各コンクリートの圧縮強度が多少異なるために静弾性係数の値も違うものの、いずれも土木学会の標準的な値と同等である。再生骨材を使用したコンクリートでは、静弾性係数は小さくなるとの報告³⁾が多いが、本研究の範囲では普通コンクリートと比べて大きな違いはなかった。これは、今回使用した再生骨材はモルタルの付着量が少なかったことによると考えられる。

(2) 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日でコンクリートを脱型して、直ちに試験に供した。測定長さは300mmである。試験結果を図-4に示す。収縮はN+NP>R+FB>R+BBの順に大きかった。また、材齢13週目のN+NP、R+FB、R+BBの質量減少率はそれぞれ1.9、2.3、1.5%であった。吸水率が高い低品質の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⁴⁾が、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⁵⁾ことが知られている。本研究で用いた再生骨材は、吸水率が3%を超えており、高品質とは言えないものの再生骨材と混合セメント

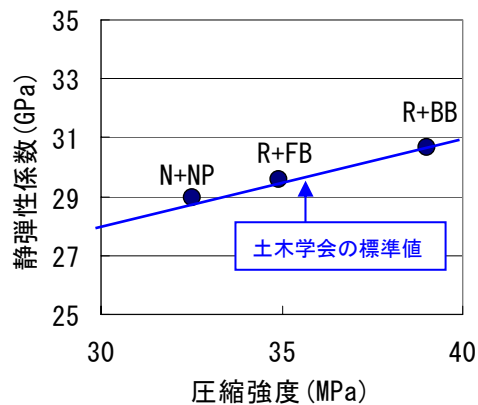


図-3 静弾性係数と圧縮強度の関係

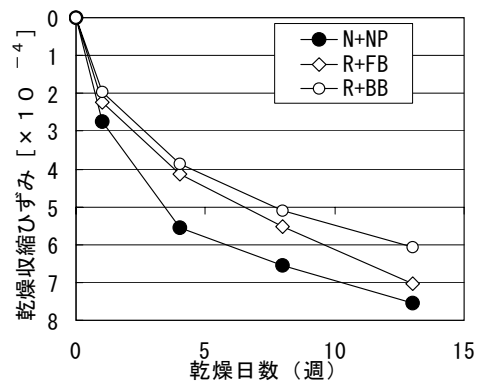


図-4 乾燥収縮の経時変化

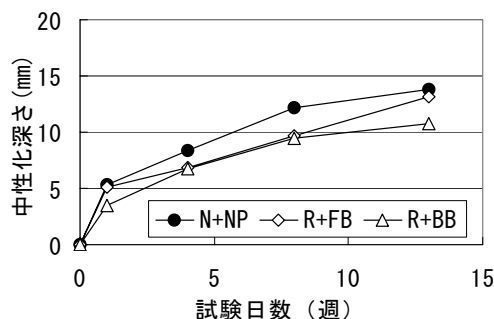


図-5 中性化促進試験結果

を同時に用いたR+BBとR+FBの乾燥収縮ひずみは、いずれも普通コンクリートに比べ小さかった。

(3) 促進中性化試験結果

用排水路等の小断面のコンクリート製品では鉄筋までのかぶり厚さを大きくとることは難しく、中性化が大きいコンクリートは不向きである。そこで、促進中性化試験を実施した。供試体は蒸気養生後、材齢14日まで室内で気中養生後、促進中性化試験を開始した。試験結果を図

-5に示す。試験開始13週時においては、N+NPとR+FBが約13mmと同程度であった。R+BBは約11mmで前者より2mmほど浅かった。混合セメントを用いたコンクリートは長期間では中性化が早まる危険性がある。しかし、本研究の範囲では、普通コンクリートに比べ、強度が高いこともあり、悪影響は認められなかった。

(4) 凍結融解試験結果

寒冷地で使用されるコンクリートでは、耐凍害性能が高いことは不可欠な条件である。各コンクリートについてJIS A 1148 A法（水中凍結－水中融解）により試験を行ったが、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おり、その影響を抑えるために、材齢14日から試験開始までの2週間水中に浸せきした。凍結融解試験結果を図-6に示す。蒸気養生したコンクリートの凍結融解試験では、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見るのが難しくなる。このため本研究では、試験前に2週間の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-6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、いずれも95%以上であり、同等に十分な耐凍害性能を有していると判断できる。とくに、N+NPとR+FBは300サイクル終了時の相対動弾性係数は99%以上であった。また、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。

また、庄谷ら⁶⁾は、フェロニッケルスラグ骨材を用いたコンクリートについて、耐凍害性能とブリーディングの関係を詳細に検討しており、コンクリートの耐凍害性能を得るためには、ブリーディング量を $0.4\text{cm}^3/\text{cm}^2$ 程度以下に抑えることが必要であると結論づけている。このことを本研究の結果にあてはめると、N+NP、

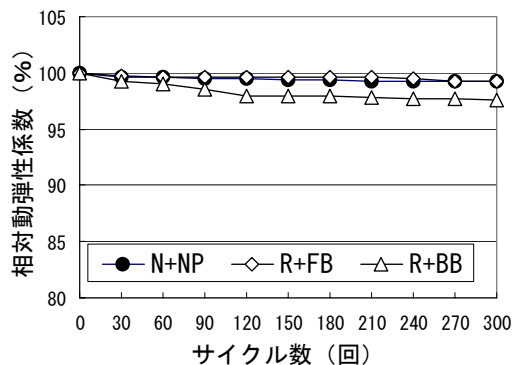


図-6 凍結融解試験結果

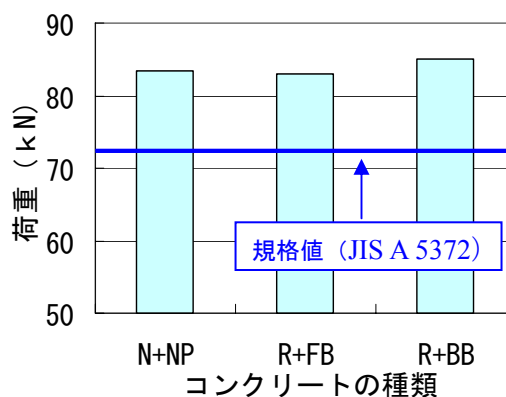


図-7 製品曲げ強度試験 (U型側溝)

R+FB, R+BBのブリーディング量はそれぞれ 0.03 , 0.04 , $0.01\text{cm}^3/\text{cm}^2$ であり、ブリーディングによる悪影響も少なかったものと考えられる。

(5) プレキャスト製品の試作

試作したプレキャスト製品は内幅300mm、長さ2,000mmの落ちふた式U形側溝 (JIS A 5372 推奨仕様 5-3 300A) および高さ300mm、長さ600mmの片面歩車道境界ブロック B (JIS A 5371 推奨仕様 2-2) である。できあがったプレキャスト製品にはジャンカおよび材料分離も認められず、良好な仕上がりであった。R+BBの製品は、高炉セメント特有の青みがかかった色むらが脱型時に認められたものの約1週間で消え、外観上問題となる点はなかった。

プレキャスト製品の曲げ強度試験は、JIS A 5372推奨仕様5-3およびJIS A 5371推奨仕様2-2に示される方法により行った。試験材齢は工場出荷可能材齢である14日とした。試験結果を図

-7, 8に示す。落ちふた式U形側溝のひび割れ荷重および歩車道境界ブロックの破壊荷重のJIS規格値はそれぞれ72.0, 40.0kNである。両者のプレキャスト製品において、いずれも規格値を満足していることがわかる。これらの結果から、混合セメントと再生粗骨材を同時に使ったプレキャスト製品は十分に実用可能であると判断される。

4. まとめ

プレキャスト製品を原コンクリートとする再生骨材を粗骨材として、同時に高炉およびフライアッシュセメント B 種を用いたプレキャスト製品の製造を試みた。本研究の範囲で、以下のことが明らかとなった。

- 1) プレキャスト製品を原コンクリートとする再生粗骨材は、吸水率が 3%を超えるものの、プレキャスト製品用再生粗骨材として利用可能である。
- 2) 高炉セメント B 種を用いた再生骨材コンクリートは、水セメント比を 3%減じた場合、脱型直後に、色むらができるが、強度および耐久性において、普通コンクリートと同等かやや高い品質を有する。
- 3) フライアッシュセメント B 種を用いた再生骨材コンクリートは、水セメント比を 6%減じた場合、強度および耐久性において、普通コンクリートと同等かやや高い品質を有する。
- 4) 混合セメントと再生粗骨材を同時に用いたプレキャスト製品は、JIS の曲げ強度規格値を満足し、実用可能である。

[謝 辞] 本研究は、(社)日本コンクリート工学協会東北支部平成 15-16 年度研究委員会の研究テーマ「高炉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調査研究」として行われた。実験に際し、東栄コンクリート工業㈱の協力を得た。また研究の一部は東北建設協会平成 15 年度技術開発支援助成金によって行

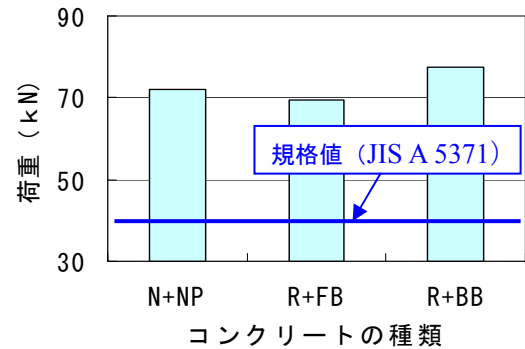


図-8 製品曲げ強度試験 (境界ブロック)

われた。ここに記して厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 北辻政文, 藤居宏一: 寒冷地コンクリートへの高炉スラグ微粉末の利用に関する研究, 農業土木学会論文集, 第 184 号, pp.73-79, 1996.8
- 2) (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
- 3) 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
- 4) 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
- 5) 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
- 6) 庄谷征美, 杉田修一, 月永洋一: フェロニッケルスラグ細骨材を用いたコンクリートの耐凍性に関する研究, 材料, Vol.43, No.491, pp.976-982, 1994.5