

報告 再生粗骨材 M を用いたコンクリートの適用部位の拡大に向けた基礎検討

高橋 祐一*1・松田 信広*2・竹内 博幸*3

要旨：建設廃棄物であるコンクリート塊の大部分は再利用または再生利用されているものの、今後も高い再資源化率を維持するためには、コンクリート用骨材としての利用を増大していく必要がある。本検討では、再生粗骨材 M を用いたコンクリートの適用部位を拡大することを目的に、再生粗骨材 M および H を用いたコンクリートの硬化性状ならびに耐久性性状を比較した。その結果、両者に大きな差はなく、H に近い品質の再生粗骨材 M を使用することで、所要の乾燥収縮および中性化に対する抵抗性が確保できることを確認した。
キーワード：再生骨材 M, 再生骨材 H, 凍結融解抵抗性, 中性化, 乾燥収縮, フライアッシュ

1. はじめに

近年、建設廃棄物に占めるコンクリート塊の割合が増大しており、平成 24 年度ではその 43% 程度を占めている。しかし、再資源化率は 99% 程度とそのほとんどが再利用または再生利用されている¹⁾。また、そのほとんどは路盤材として利用されており、コンクリート用骨材として利用されたのは、再資源化されたコンクリート塊の 0.2% 程度に留まっている¹⁾。さらに、地域によっては、需要が頭打ちとなる等、安定した需要が見込めないことから、今後もこの高い再資源化率を維持していくためには、コンクリート用骨材としての利用を増大していく必要がある。

再生骨材に関する JIS 規格は 2005 年～2007 年にかけて、JIS A 5021 (コンクリート用再生骨材 H), JIS A 5022 (再生骨材 M を用いたコンクリート), JIS A 5023 (再生骨材 L を用いたコンクリート) の規格化がそれぞれ行われ、再生骨材コンクリートを使用できる環境は既に整いつつある。特に、再生骨材 H は、JIS A 5308 (レディーミクストコンクリート) 附属書 A に適合する骨材であり、その適用部位は制限されていない。これに対し、再生骨材 M を用いたコンクリートは、構造体に使用することができるものの、場所打ち杭や基礎等、乾燥収縮の影響を受けにくい地下躯体に限定されているのが現状である。しかし、再生骨材コンクリートの普及を促進していくためには、コストや骨材回収率の面で、再生骨材 H と比べて有利な再生骨材 M の適用部位を可能な限り広げ、その利用を推進していくことが望ましいと考えられる。このような中、2014 年 10 月に日本建築学会から「再生骨材を用いるコンクリートの設計・製造・施工指針(案)」(以下、再生コン指針とする) が発刊され、再生骨材コンクリート M を乾燥収縮の影響を受ける部位に使用する場

合の使用材料、コンクリートの品質および調合等に対する指針が示された。

そこで、本検討では、再生骨材 M に該当する再生粗骨材を用いたコンクリートの適用部位の拡大、即ち、乾燥収縮の影響を受ける上部躯体に適用することを目的とし、その基礎的な検討として、再生粗骨材 M および H を用いたコンクリートの硬化性状ならびに耐久性性状の比較を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料

本実験で使用した材料を表-1 に示す。セメントは、上部躯体に適用することを考慮し、普通ポルトランドセ

表-1 使用材料

名称	記号	銘柄/産地	物性
セメント	C	普通ポルトランドセメント	密度：3.15 g/cm ³
普通細骨材	S1	砕砂/東京都八王子産	絶乾密度：2.62 g/cm ³ 吸水率：1.09 %
	S2	山砂/千葉県富津産	絶乾密度：2.53 g/cm ³ 吸水率：1.78 %
普通粗骨材	JC	砕石/東京都八王子産	絶乾密度：2.62 g/cm ³ 吸水率：0.56 %
再生粗骨材	AM*1	再生骨材 M/A 工場	絶乾密度：2.46 g/cm ³ 吸水率：3.26 %
	BM*1	再生骨材 M/B 工場	絶乾密度：2.49 g/cm ³ 吸水率：3.01 %
	AH*1	再生骨材 H/A 工場	絶乾密度：2.54 g/cm ³ 吸水率：2.21 %
	CH*1	再生骨材 H/C 工場	絶乾密度：2.50 g/cm ³ 吸水率：2.55 %
	DH*1	再生骨材 H/D 工場	絶乾密度：2.54 g/cm ³ 吸水率：2.24 %
混和材	FA	フライアッシュ II 種	密度：2.20 g/cm ³
化学混和剤	Ad	AE 減水剤	—
	SP	高性能 AE 減水剤	—

*1 A・B・C：再生骨材製造工場 M・H：再生粗骨材の品質区分

*1 五洋建設(株) 技術研究所 建築技術開発部 課長 博士(工学) (正会員)

*2 (株) 東京テクノ 工場長 (正会員)

*3 五洋建設(株) 技術研究所 建築技術開発部長 (正会員)



写真-1 AM

写真-2 BM

写真-3 AH

写真-4 CH

写真-5 DH

メントを使用した。しかし、普通ポルトランドセメントのみでは、水セメント比が小さくなると、単位セメント量が大きくなるため、想定している品質基準値(表-2)を用いたアルカリ総量の計算値が基準値(3.0kg/m³)を超過する。そこで、混和材として、アルカリシリカ反応の抑制効果があり、当該生コン工場で常備しているフライアッシュⅡ種を結合材の一部として使用した。再生粗骨材は、全4工場で製造されたもので、再生骨材Mに区分される2種類とHに区分される3種類の計5種類を使用した。使用した再生粗骨材の外観を写真-1~写真-5に示す。各再生粗骨材の微粒分量は1.0%以下である。また、原骨材は、再生粗骨材CHが砂利、他は碎石と推定される。なお、使用した再生粗骨材Mの品質基準値は乾燥収縮の影響を受ける部位に使用することを想定しているため、場所打ち杭や基礎等に使用する際に用いている値(絶乾密度:2.4g/cm³以上,吸水率:4.0%以下)よりも厳しい値(絶乾密度:2.45g/cm³以上,吸水率:3.5%以下)とし、再生粗骨材AMおよびBMについてはそれに近い品質となるように処理の時間を調整した。

2.2 調合

本実験におけるコンクリートの調合を表-3に示す。フライアッシュⅡ種は内割で使用し、結合材に対するフライアッシュⅡ種の混合割合は質量比で15%とした。水結合材比は、呼び強度24~42の範囲をカバーできるように、普通ポルトランドセメントを使用した調合(以下、N調合とする)で57%、45%、38%、フライアッシュⅡ種を混合した調合(以下、FA調合とする)で45%、40%、35%とした。また、再生粗骨材を使用した調合の単位水量は、当該生コン工場におけるこれまでの実績に基づき、普通粗骨材を用いた調合から3kg/m³を減じ、さらにFA調合では、N調合から5kg/m³を減じた値とした。スランプの目標値および許容差はAE減水剤を用いたN調合のW/B=57%および45%、FA調合のW/B=45%では18±2.5cm、高性能AE減水剤を用いたN調合のW/B=38%、FA調合のW/B=40%および35%では18±2cmとし、空気量は全ての調合で4.5±1.5%として、いずれも運搬によるロス(スランプ+1cm,空気量+0.5%)を考慮した値で管理した。また、表-2に示す値を用いて計算したN調合のW/B=38%におけるアルカリ総量は3.30kg/m³となる。一方、FA調合のW/B=35%では2.99kg/m³となり、

表-2 想定しているアルカリ量の品質基準値

	セメント	細骨材(山砂)	再生粗骨材	化学混和剤
品質基準値	0.68%	0.021%	0.09%	3.0%

表-3 調合

調合記号*1	W/B (%)	単位量 (kg/m ³)					Ad·SP (B×%)
		W	C	FA	S1/S2	G	
57NAM	57.0	175	307	-	603/253	876	1.1
57NBM						911	1.1
57NAH						926	1.1
57NCH						890	1.1
57NDH						926	1.1
57NJC						910	1.1
45NAM	45.0	178	396	-	546/229	876	1.1
45NBM						911	1.1
45NAH						926	1.1
45NCH						890	1.1
45NDH						926	0.9
45NJC						910	1.1
38NAM	38.0	167	439	-	535/224	883	0.8
38NBM						919	1.0
38NAH						933	0.9
38NCH						898	0.8
38NDH						933	0.8
38NJC						918	1.0
45FAAM	45.0	173	327	58	549/230	876	1.0
45FAAH						926	1.1
40FAAM	40.0	162	344	61	551/230	923	0.8
40FAAH						933	0.8
35FAAM	35.0	162	393	70	514/215	923	0.8
35FAAH						933	0.8

*1 水結合材比+結合材種類+粗骨材種類

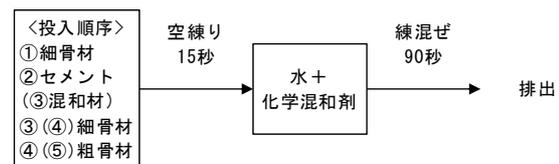


図-1 練混ぜ手順

基準値を満足している。

2.3 練混ぜ

練混ぜは、強制二軸練りミキサを使用し、材料の投入および練混ぜ時間は図-1に示す通りに行った。

2.4 試験項目および試験方法

再生粗骨材コンクリートを乾燥収縮の影響を受ける部位に使用するために必要な耐久性に関する品質管理項目として、a) コンクリートの塩化物量、b) アルカリシリカ反応性、c) 凍結融解抵抗性、d) 乾燥収縮に対する抵抗性、e) 中性化に対する抵抗性、の5項目があげられる。本実験では、これらを確認するため、表-4に示す項目について試験を行った。

表-4 試験項目および試験方法

対象	試験項目	試験方法	備考
普通粗骨材 再生粗骨材	凍結融解	JIS A 5022 附属書 D	FM 凍害指数 ≤0.08
再生粗骨材	塩化物イオン	JIS A 1154	—
フレッシュ コンクリート	スランブ	JIS A 1101	19±2.5cm 19±2cm
	空気量	JIS A 1128	5.0±1.5%
	温度	JIS A 1156	—
	塩化物含有量	JASS5T-502	≤0.30kg/m ³
硬化 コンクリート	アルカリシリカ 反応性	ZKT-206	相対動弾性係数 ≥80%
	圧縮強度	JIS A 1108	標準養生
	静弾性係数	JIS A 1149	標準養生
	長さ変化	JIS A 1129-2	≤8×10 ⁻⁴
	中性化深さ	JIS A 1153	—

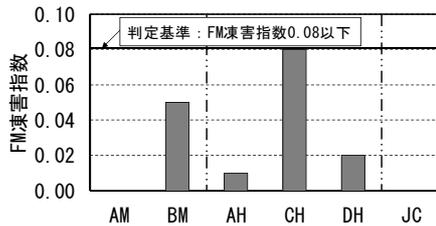


図-2 凍結融解試験結果

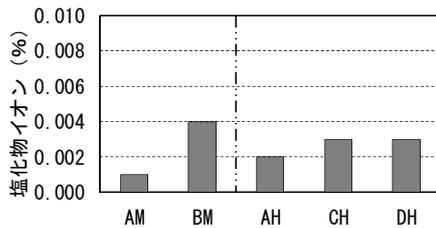


図-3 塩化物イオン試験結果

3. 試験結果

3.1 再生骨材試験結果

(1) 凍結融解抵抗性

普通粗骨材および再生粗骨材の凍結融解試験結果を図-2に示す。再生粗骨材 CH の FM 凍害指数が基準値上限と同値であったものの、いずれの粗骨材も基準値以下であった。試験結果の最小値は普通粗骨材 JC および再生粗骨材 AM であり、再生粗骨材の品質区分の影響はみられなかった。これは、いずれの再生粗骨材も原コンクリート種類が異なるためと考えられる。

(2) 塩化物イオン

再生粗骨材の塩化物イオン試験結果を図-3に示す。再生粗骨材 BM が 0.004% で最大となったものの、AM が 0.001% で最小となり、品質区分の影響はみられなかった。これも、FM 凍害指数と同様に原コンクリート種類が異なる影響によると考えられる。

3.2 フレッシュコンクリート試験結果

フレッシュコンクリートの試験結果を表-5に、試験状況の一例を写真-6~写真-11に示す。各調合のスラ

表-5 フレッシュコンクリート試験結果

調合記号	スランブ (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (°C)	塩化物含有量 (kg/m ³)
57NAM	18.5	5.0	22	0.03
57NBM	16.5	4.6	21	0.04
57NAH	19.0	4.3	21	0.02
57NCH	19.0	5.0	21	0.04
57NDH	19.5	5.9	21	0.04
57NJC	16.5	5.9	21	0.03
45NAM	19.0	5.4	22	0.05
45NBM	19.0	4.6	23	0.04
45NAH	19.5	3.9	21	0.04
45NCH	19.0	4.0	21	0.03
45NDH	18.5	5.1	23	0.04
45NJC	19.0	4.7	22	0.05
38NAM	19.0	5.5	22	0.05
38NBM	20.0	4.1	23	0.04
38NAH	20.5	5.4	22	0.04
38NCH	19.0	6.1	22	0.03
38NDH	19.0	5.0	23	0.03
38NJC	21.0	4.7	23	0.04
45FAAM	19.0	4.5	21	0.02
45FAAH	19.0	3.9	22	0.02
40FAAM	19.0	6.2	17	0.04
40FAAH	19.0	5.2	16	0.04
35FAAM	19.5	5.9	16	0.02
35FAAH	19.0	5.6	16	0.04



写真-6 45NAM

写真-7 45NBM



写真-8 45NAH

写真-9 45NJC



写真-10 40FAAM

写真-11 45FAAH

ンプおよび空気量は、全ての調合において管理値内に納まった。FA 調合では、N 調合と比べて AE 剤の使用量が多くなる傾向にあった。また、塩化物含有量は、これまでと同様に²⁾再生骨材の品質区分による一律の傾向は認

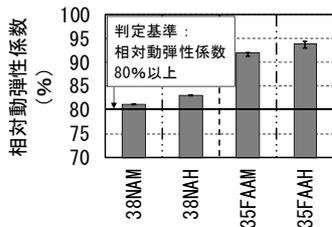


図-4 アルカリシリカ反応性迅速試験結果

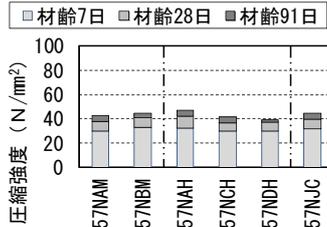


図-5 圧縮強度試験結果 (N 調合・W/B=57%)

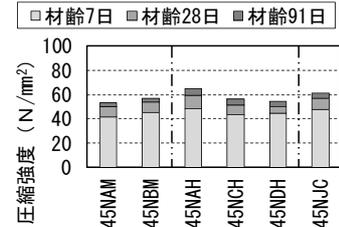


図-6 圧縮強度試験結果 (N 調合・W/B=45%)

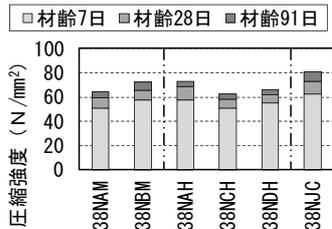


図-7 圧縮強度試験結果 (N 調合・W/B=38%)

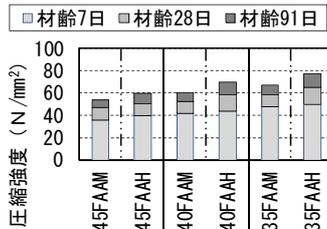


図-8 圧縮強度試験結果 (FA 調合・W/B=45・40・35%)

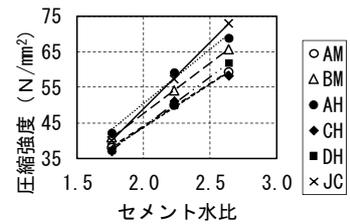


図-9 セメント水比と圧縮強度の関係 (N 調合)

められず、全ての調合で、管理値である 0.30kg/m^3 を大きく下回った。

3.3 硬化コンクリート試験結果

(1) アルカリシリカ反応性迅速試験結果

アルカリシリカ反応性迅速試験は、再生粗骨材 AM および AH の 2 種類を選定し、単位結合材量が多い $W/B=38\%$ (N 調合) と $W/B=35\%$ (FA 調合) を対象に行った。結果を図-4 に示す。相対動弾性係数 80%以上を反応性なし(A)として合格と判定するが、試験を行った全ての調合で 80%以上を確保し合格となった。

(2) 圧縮強度試験結果

圧縮強度試験結果を図-5～図-8 に示す。N 調合の普通粗骨材 JC と再生粗骨材 BM および AH は、いずれの水セメント比においても比較的圧縮強度が大きくなる傾向にあった。他は再生骨材の品質区分に関わらず、概ね同程度の値であった。FA 調合においても、再生粗骨材 AHの方が AM よりも圧縮強度が大きくなった。N 調合におけるセメント水比と圧縮強度の関係を図-9 に示す。セメント水比の増加に伴う圧縮強度の伸びは、普通粗骨材 JC に比べて各再生粗骨材は小さい。一方、各再生粗骨材と比較すると傾きはほぼ同等であり、本実験で使用した再生粗骨材では、セメント水比の増加に伴う強度の伸びに対する品質区分の影響は小さいと考えられる。圧縮強度と静弾性係数の関係を図-10 に示す。粗骨材種類および結合材種類に関わらず JASS5 に示される関係式³⁾ (以下、JASS5 式) で求められる値と概ね同程度の値を示した。

(3) 長さ変化率

長さ変化試験結果を図-11～図-13 に示す。N 調合に

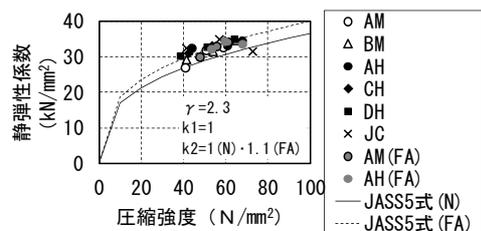


図-10 圧縮強度と静弾性係数の関係

における再生粗骨材を用いた調合の長さ変化率は、同一水セメント比の普通粗骨材を用いた調合よりも単位水量が小さいものの、普通粗骨材 JC よりも大きい。しかし、結合材種類、水セメント (結合材) 比および品質区分に関わらず、再生コン指針に示されている目標値の目安である「 8×10^{-4} 」を全ての調合で下回った。とくに、FA 調合では、N 調合よりも単位水量が小さいこともあり、再生粗骨材 AM および AH とともに 7.0×10^{-4} を下回った。再生骨材の品質区分による差をみると、再生粗骨材 AM と AH では、AMの方がやや大きいものの、いずれもほぼ同等の結果であった。一方、再生粗骨材 DH は水セメント比によって傾向が大きく異なっている。再生粗骨材 DH の原粗骨材は石灰石と推察されることから、調合 57DH では再生粗骨材中のモルタルの影響が卓越した可能性が考えられるが、推測の域を出ない。

(4) 中性化深さ

促進中性化試験結果を図-14～図-16 に示す。N 調合の $W/B=57\%$ では、再生粗骨材 AM および AH と比較して普通粗骨材 JC を用いた調合の値がやや小さいものの、 $W/B=38\%$ では大きな差はみられなかった。FA 調合では、セメントの一部をフライアッシュ II 種で置換した影響に

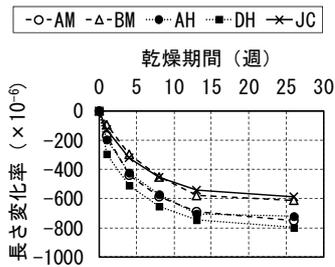


図-11 長さ変化試験結果
(N 調合・W/B=57%)

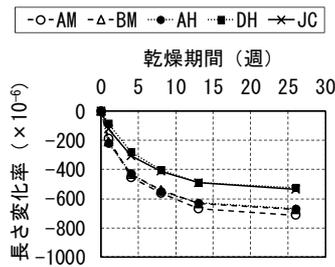


図-12 長さ変化試験結果
(N 調合・W/B=38%)

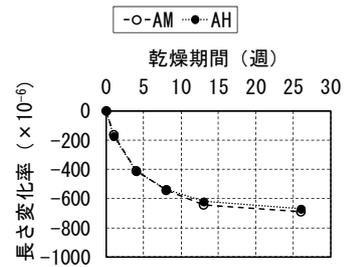


図-13 長さ変化試験結果
(FA 調合・W/B=45%)

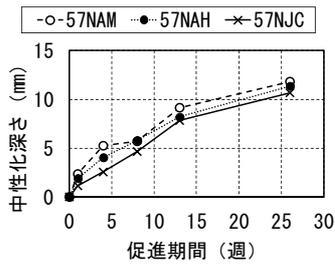


図-14 促進中性化試験結果
(N 調合・W/B=57%)

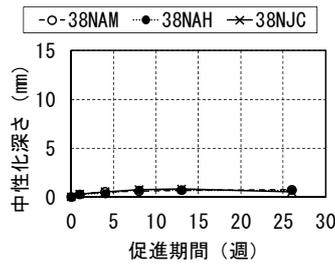


図-15 促進中性化試験結果
(N 調合・W/B=38%)

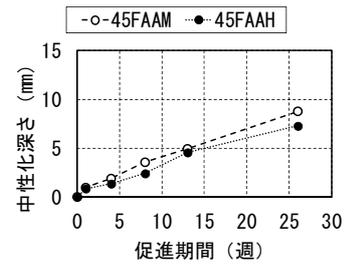


図-16 促進中性化試験結果
(FA 調合・W/B=45%)

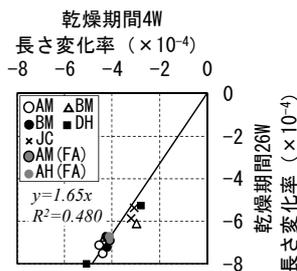


図-17 乾燥期間4週と26週の
長さ変化率の関係

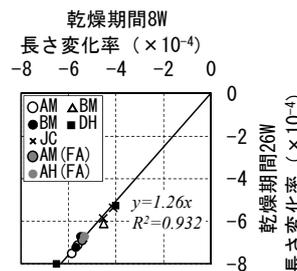


図-18 乾燥期間8週と26週の
長さ変化率の関係

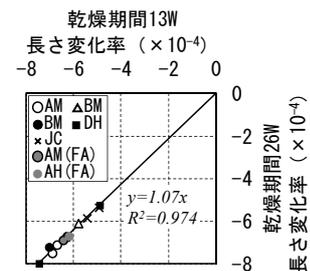


図-19 乾燥期間13週と26週の
長さ変化率の関係

より N 調合と比較して中性化深さが大きくなった。再生骨材の品質区分による差をみると、いずれの調合においても再生粗骨材 AM と AH の差はほとんどみられなかった。

4. 考察

4.1 長さ変化率

本実験の結果、再生骨材 M に該当する AM および BM を用いた調合の乾燥期間 26 週における長さ変化率は、再生コン指針に示されている目標値の目安である 8×10^{-4} を満足した。これらの結果をみると、再生骨材 M に区分される再生粗骨材であっても、H の品質基準に近いものであれば、 8×10^{-4} を下回る可能性はあると考えられる。しかし、コンクリートの長さ変化率に及ぼす粗骨材の影響は大きく、出所を特定しない再生粗骨材を使用することを考慮すると、必ずしもこれらと同様の結果を得られるとは限らない。したがって、乾燥収縮に対する品質管理を実施することが望ましい。そこで、再生コン

指針では JASS 5 11.4 に倣うとされていることから、早期判定による品質管理を検討することとした。本実験における乾燥期間 4 週、8 週および 13 週の長さ変化率と乾燥期間 26 週の長さ変化率の関係を図-17～図-19 に示す。なお、図中の近似式は普通粗骨材 JC を除いて求めたものである。それぞれの関係をみると、乾燥期間 4 週ではばらつきがみられたものの、水セメント（結合材）比や結合材種類に関わらず、乾燥期間 8 週または 13 週と 26 週の関係では、良好な相関が認められた。

早期判定による乾燥収縮に対する抵抗性の品質管理を実施する場合、JASS 5 11.4 では、ばらつきを考慮し 4% 不良率を許容して係数 α_i を求めることとされている。再生骨材コンクリートにおいても、各乾燥期間において適切な係数 α_i を設定することで、普通骨材と同様の品質管理を実施できると考えられる。

4.2 中性化に対する抵抗性

本実験における普通粗骨材 JC と再生粗骨材 AM, AH

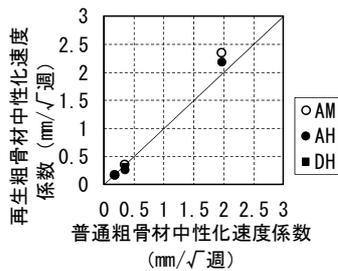


図-20 普通粗骨材と再生粗骨材の
中性化速度係数の関係

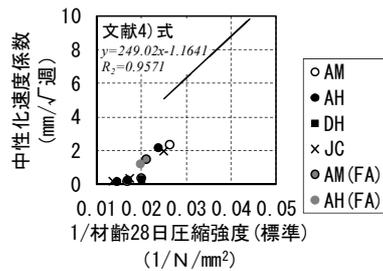


図-21 圧縮強度の逆数と
中性化速度係数の関係

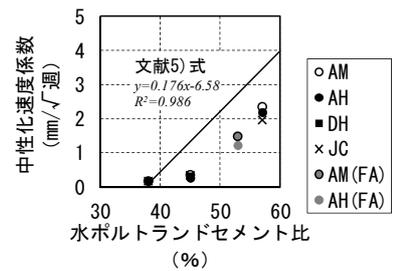


図-22 水ポルトランドセメント比と
中性化速度係数の関係

および DH をそれぞれ用いたコンクリートの中性化速度係数の比較を図-20 に示す。N 調合の W/B=57%では再生粗骨材を用いた調合の中性化速度係数がやや大きいものの、他の水セメント比では概ね同等の結果であった。

材齢 28 日の標準養生圧縮強度の逆数と中性化速度係数の関係を図-21 に示す。図中の近似式(文献4)式)は、4 種類の異なる再生粗骨材 H を用いたコンクリートについて両者の関係を確認した文献4)に記載されている式である。本実験と文献4)式では、圧縮強度の範囲が異なるため、単純な比較はできないが、本実験における再生粗骨材 M を用いたコンクリートは、N 調合および FA 調合ともに、本実験とは別の再生粗骨材 H を用いたコンクリートと比較しても同等の中性化抵抗性を確保していると推察される。水ポルトランドセメント比と中性化速度係数の関係を図-22 に示す。日本建築学会の「フライアッシュを使用するコンクリートの調合設計・施工指針・同解説」では、水ポルトランドセメント比が同じ場合、中性化速度係数が同じになる、との報告が多いと記載されている。一方、文献5)では、普通骨材を用いたコンクリートにおける両者の関係が確認されており、近似式を文献5)式として図中に記載した。本実験と文献5)式を比較すると、同一水ポルトランドセメント比における中性化速度係数は、本実験の結果が下回った。したがって、再生粗骨材およびフライアッシュ II 種を併用した場合でも、所定の水ポルトランドセメント比を確保して使用することで、十分な中性化抵抗性を確保できると考えられる。

5. まとめ

本検討では、再生骨材 H に近い品質である再生粗骨材 M を用いたコンクリートを乾燥収縮の影響を受ける部位に適用することを目的とし、再生粗骨材 M および H を用いたコンクリートの硬化性状ならびに耐久性状の比較を行った。その結果、本検討の範囲内で、以下の知見が得られた。

- (1) 再生粗骨材の FM 凍害指数、塩化物イオン量およびアルカリシリカ反応性は、再生骨材の品質区分よりも原コンクリート種類の影響が大きいため、これら

に対する品質管理が必要である。

- (2) 再生骨材コンクリートの長さ変化率は、再生粗骨材 M であっても、 8×10^{-4} 以下を満足できる可能性がある。また、乾燥収縮に対する抵抗性の品質管理としては、適切な係数 α_i を設定することで、普通骨材と同様に早期判定を用いることができる。
- (3) 再生粗骨材 M を用いたコンクリートは、再生粗骨材 H を用いたコンクリートと同等の中性化抵抗性を確保できる。また、再生粗骨材とフライアッシュ II 種を併用しても所定の水ポルトランドセメント比を確保することで、十分な中性化抵抗性を確保できる。

本検討では、再生骨材 M に区分されるが、より厳しい基準を満足する再生粗骨材を使用して、H と同等の耐久性能を確保できる可能性を示した。今後も再生骨材の性能に応じた適用範囲について検討していく予定である。

謝辞

本実験の実施にあたり、三協 Mirai(株)、日本シーカ(株)、武蔵野土木工業(株)の各位に多大なるご協力をいただきました。各位に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 国土交通省：平成 24 年度建設副産物実態調査結果参考資料，2014.3
- 2) 松田信広，竹内博幸，高橋祐一：中品質再生骨材を用いたコンクリートの実構造物への適用，コンクリート工学年次論文集，vol.34，No.1，pp.1516～1521，2012.7
- 3) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事，pp.185～186，2009.2
- 4) 池内ほか：高品質再生粗骨材の原子力用コンクリートへの適用性に関する基礎的検討 その 4：再生骨材を用いたコンクリートの耐久性，日本建築学会大会学術講演梗概集（東北），pp.197～198，2009.8
- 5) 和田真平，阿部道彦，柳啓，藤田克巳：フライアッシュコンクリートの中性化，水密性および遮塩性に関する実験：コンクリート工学年次論文報告集，Vol.20，No.2，pp.121-126，1998