

論文 骨材の平均吸水率に着目した再生コンクリートの特性評価

今野 克幸^{*1}・松村 宇^{*2}・佐藤 靖彦^{*3}・田口史雄^{*4}

要旨：本研究ではコンクリートを作製する際に用いた粗骨材として普通骨材，再生骨材，それらを混合したものを用いており（以降，それらを総称して使用骨材と呼ぶ），使用骨材の平均的な吸水率を変化させ，再生コンクリートの圧縮強度，凍結融解抵抗性，乾燥収縮特性を明らかにする目的で実験を行った．再生骨材は3種類用意しており，使用骨材の平均的な吸水率が等しくなるよう普通骨材と再生骨材の混合割合を調整した供試体も作製した．使用骨材の平均的な吸水率に着目した結果，平均吸水率がコンクリートの圧縮強度と凍結融解抵抗性に与える影響は見られなかったが，乾燥収縮ひずみの大きさに与える影響は顕著であった．

キーワード：平均吸水率，圧縮強度，凍結融解抵抗性，乾燥収縮

1. はじめに

粗骨材として再生骨材を100%用いたとき，あるいは再生骨材を混合して用いた場合の再生コンクリートの圧縮強度は粗骨材の吸水率に依存しないことが既往の研究¹⁾により示されているが，再生骨材とバージン材を混合したときの平均的な吸水率を一定とした場合についての再生コンクリートの特性については明らかになっていない．本研究では再生骨材を用いたコンクリート，再生骨材とバージン材を混合使用したコンクリートを用い粗骨材の平均的な吸水率に着目し，圧縮強度試験，凍結融解試験，乾燥収縮試験を行った．

2. 実験概要

2.1 再生骨材の作製

本実験で使用した骨材は表-1に示すとおりで，3種類の再生骨材を用いた．普通骨材は当麻町月形山産砕石である．再生骨材1は枚方産コンクリート廃材をジョークラッシャーで破碎し，ロッドミルでモルタルを剥離した後，湿式選別機を用い製造した．再生骨材2は実構造物を解体した際に発生したコンクリート塊を札幌

表-1 使用した骨材

骨材		比重	吸水率(%)	モルタル 付着率(%) (質量率)
粗骨材	普通骨材	2.87	2.04	—
	再生骨材1	2.54	2.90	30
	再生骨材2	2.50	6.17	45
	再生骨材3	2.57	4.60	25
細骨材		2.70	—	—

表-2 使用骨材の吸水率と混合割合

供試体	使用骨材平均吸水率 (%)	再生骨材吸水率 (%)	混合割合 (%)	
			再生骨材	普通骨材
A-1	2.0	—	0	100
B-1	2.5	2.9	50	50
C-1	2.9		100	0
C-2		4.6	35	65
C-3		6.2	22	78
D-1	4.6	4.6	100	0
D-2		6.2	63	37
E-1			6.2	100

リサイクルセンターにおいてジョークラッシャーにより処理して作製したもので，再生骨材3は再生骨材2をロッドミルでモルタルを剥離し作製したものである．なお，原コンクリートは

* 1 北海道工業大学助教授 工学部社会基盤工学科 博士(工) (正会員)

* 2 北海道立寒地住宅都市研究所 生産技術部材料開発科 (正会員)

* 3 北海道大学大学院助手 工学研究科 博士(工) (正会員)

* 4 北海道開発土木研究所 構造部材料研究室室長 (正会員)

表-3 コンクリートの配合

供試体	C (kg/m ³)	W (kg/m ³)	再生骨材 (kg/m ³)	普通骨材 (kg/m ³)	細骨材 (kg/m ³)	AE 減水剤 (cc/m ³)	空気調整剤 (cc/m ³)	s/a (%)	スランプ [°] (cm)	空気量 (%)
A-1-40	400	160	0	1116	753	1000	6.0	41.8	11.0	4.6
A-1-50	320	160	0	1116	824	800	4.8	43.9	12.0	4.6
A-1-60	267	160	0	1116	869	668	4.0	45.3	9.5	4.5
B-1-40	400	160	526	526	751	1000	6.0	41.6	11.0	4.5
B-1-50	310	155	526	526	842	775	4.7	44.4	8.5	4.0
B-1-60	267	160	526	526	867	668	4.0	45.1	11.0	4.9
C-1-40	400	160	988	0	753	1000	6.0	41.8	10.5	3.8
C-1-50	320	160	988	0	824	800	4.8	43.9	11.0	4.6
C-1-60	267	160	988	0	868	668	4.0	45.2	9.0	4.8
C-2-40	400	160	376	699	752	1000	6.0	41.7	10.5	4.6
C-2-50	320	160	376	699	820	800	4.8	43.8	12.0	4.9
C-2-60	267	160	376	699	866	668	4.0	45.1	9.0	4.3
C-3-40	400	160	239	846	751	1000	6.0	41.6	9.0	3.8
C-3-50	320	160	239	846	819	800	4.8	43.7	10.5	4.7
C-3-60	267	160	239	846	864	668	4.0	45.1	9.0	4.8
D-1-50	320	160	1000	0	822	800	4.8	43.9	12.0	4.8
D-2-50	320	160	644	378	822	800	4.8	43.9	10.0	4.6
E-1-50	320	160	973	0	822	800	4.8	43.9	12.0	4.4

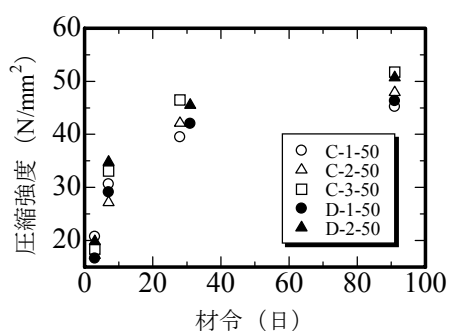


図-1 使用骨材平均吸水率と圧縮強度

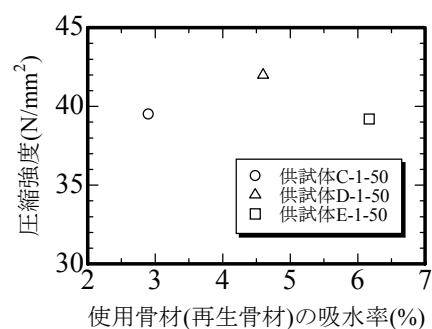


図-2 使用骨材吸水率と圧縮強度

いずれも AE コンクリートで、原骨材はいずれも玉砂利であり、再生骨材 2, 3 の原骨材の吸水率は 3.3% であった。表-1 に示した比重と吸水率は JIS A 1110 に基づいた試験方法によって求めた。再生骨材においてはそれらの値のばらつきが普通骨材よりも大きかったため 12 回の試験の平均値を特性値として採用した。

2.2 実験方法

表-2 に各供試体シリーズの骨材の吸水率および普通骨材と再生骨材の混合割合を重量比で示す。菊池ら²⁾は再生コンクリートに用いた骨材の相対品質値を、使用する骨材の物性値とその絶対容積の積の和を、使用した全骨材の絶対

容積の和で除して求めたが、本研究でいう平均吸水率は試験によって求めたものである。混合割合を求めるにあたって予備試験を行った。その概要は再生骨材 1 を例にすると、再生骨材 1 と普通骨材を 8:2, 6:4, 4:6, 2:8 の割合で混合した 4 ケースについてそれぞれ 12 回の比重・吸水率試験を行い、その平均値を求めた。その結果得られた、混合割合と吸水率の関係から目標の平均吸水率となるように混合割合を推定した。推定された割合によって混合した使用骨材について、吸水率試験を行い目標の平均吸水率となることを確認した。A~C シリーズは水セメント比を 40%, 50%, 60% の 3 水準とし D シリー

ズと E シリーズの水セメント比は 50%の 1 水準とした。再生コンクリートの作製には全ての供試体について普通ポルトランドセメント（比重 3.16）を用い、混和剤にはリグニンスルホン酸系 AE 減水剤を用いた。打設約 24 時間後に脱型し水中養生を行った。配合を表-3 に示す。

圧縮強度試験用供試体は直径 100mm、高さ 200mm の円柱供試体で、材令 3, 7, 28, 91 日目に圧縮強度試験を行った。なお、D シリーズと E シリーズについては材令 28 日ではなく 31 日目で圧縮強度試験を行った。

凍結融解試験用供試体は 100×400×400mm の角柱供試体で、14 日間の水中養生の後に凍結融解試験を開始した。凍結融解試験は ASTM C666 の水中凍結水中融解試験法に準じて行い相対動弾性係数と質量を測定した。乾燥収縮試験は、7 日間水中養生を行った時点を乾燥開始材令として長さ変化の測定を行った。

なお、図表中における二桁の数字は水セメント比を表している。

3. 圧縮強度

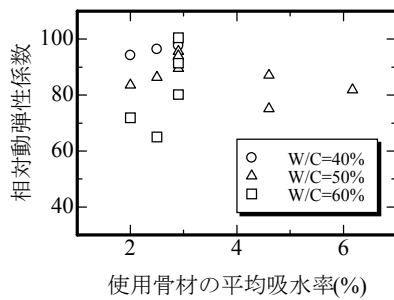
図-1 は使用骨材の平均吸水率に着目し、C シリーズと D シリーズについて材令と圧縮強度の関係を示したものである。使用骨材の平均吸水率が 2.9% (C シリーズ)、4.6% (D シリーズ) のそれぞれの場合において使用骨材の平均吸水率が等しくても圧縮強度が異なる結果となった。骨材の寸法や形状、表面組織、粒度分布、鉱物組成などはコンクリート強度に影響を与えるため、一般に骨材の吸水率が等しくても異なる骨材を異なる混合割合で用いると圧縮強度が異なる場合があり得る。つまり、使用骨材が同一の平均吸水率であっても、その構成によってもコンクリートの圧縮強度に影響を受けると考えられる。このことから本実験において使用骨材の平均吸水率が等しくてもコンクリート強度に差異が現れた要因の一つとして、バージン材（碎石）の混入率が異なることが考えられる。そのような要因を排除し使用骨材の平均吸水率の違

いがコンクリートの圧縮強度に与える影響を見るために再生骨材を 100%用いた供試体の実験結果を示したものが図-2 である。図-2 から既往の研究¹⁾のとおり使用骨材の吸水率が圧縮強度に与える影響は現れていないことが確認された。

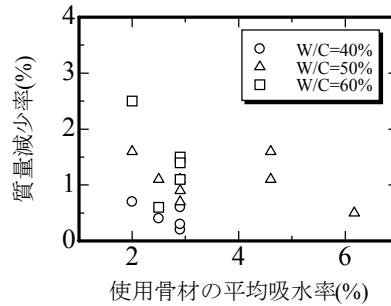
4. 凍結融解抵抗性

図-3 は全供試体の使用骨材の平均吸水率と 300 サイクル後の相対動弾性係数の関係、図-4 は使用骨材の平均吸水率と質量減少率についてまとめたものである。これらより W/C が 40% から 60%の範囲では使用骨材の平均吸水率の変化にともなう相対動弾性係数、質量減少率の変化は明確には現れなかったと言える。図-5 と図-6 は C シリーズ及び D シリーズについて、それぞれ同一の使用骨材平均吸水率における凍結融解抵抗性の差異について着目したものである。両シリーズとも相対動弾性係数、質量減少率に差異が見られた。圧縮試験の結果と同様に、使用骨材の平均吸水率が等しくても内部劣化やコンクリート表層のペースト剥離の程度は異なる結果となった。

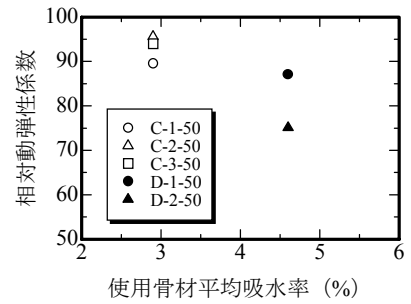
図-7 と図-8 は同じ再生骨材を用いた供試体 B-1, C-1 と普通骨材コンクリート供試体 A-1 の比較を行ったものである。使用骨材の平均吸水率が大きいほど相対動弾性係数は大きく、質量減少率は小さいという相関が見られる。これら供試体の比較では使用骨材の平均吸水率が大きいことは再生骨材の混入率が大きいことを意味している。本実験で用いたバージン材よりも再生骨材 1 の原骨材の方が良質な骨材であることにより、再生骨材の混入率が大きい方が凍結融解抵抗性に優れる結果となった可能性がある。一般に、今後コンクリートの製造現場において天然骨材の枯渇によりバージン材の性質が悪化した場合、良質の天然骨材が原骨材として含まれる再生骨材を用いた方が凍結融解抵抗性に優れたコンクリートを製造することができ得ると考えられる。



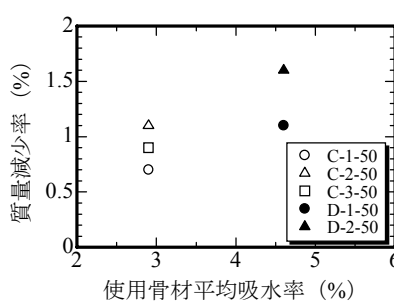
図－3 使用骨材平均吸水率
と相対動弾性係数



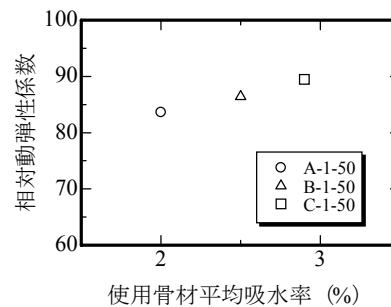
図－4 使用骨材平均吸水率
と質量減少率



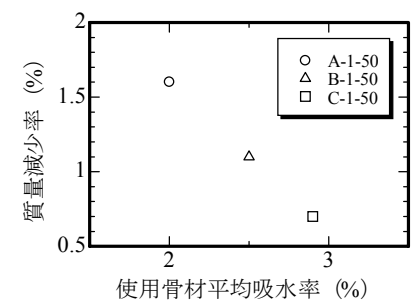
図－5 同一吸水率における
相対動弾性係数



図－6 同一吸水率における
質量減少率



図－7 相対動弾性係数
(同一再生骨材使用)



図－8 質量減少率
(同一再生骨材使用)

5. 乾燥収縮特性

5.1 骨材の平均吸水率と乾燥収縮

図－9 はバージン材および再生骨材を 100% 用いた場合の長さ変化率である。これより使用骨材の吸水率が大きいほど乾燥収縮ひずみは大きくなる傾向が顕著である。図－10, 11 はそれぞれ使用骨材の平均吸水率が 2.9% と 4.6% のときの長さ変化率である。これらの図より、再生骨材そのものの吸水率によらず使用骨材の吸水率が等しければ長さ変化率は経時変化、最終値ともにほぼ一致することが示されている。使用骨材の平均吸水率が等しければ乾燥収縮ひずみは概ね一致すると考えられる。

5.2 乾燥収縮量の予測について

コンクリートの乾燥収縮は温度・湿度、形状・寸法、単位水量、骨材量、単位セメント量等に影響を受けることが知られている。式(1)はコンクリート標準示方書³⁾に示されている乾燥収縮ひずみの推定式である。

コンクリートの 材令 t_0 から t までの

収縮ひずみ ($\times 10^{-5}$)

$$\varepsilon'_{cs}(t, t_0) = [1 - \exp\{-0.108(t - t_0)0.56\}] \cdot \varepsilon'_{sh} \quad (1)$$

ここに

$$\varepsilon'_{sh} = -50 + 78[1 - \exp(RH/100)] + 38 \log_e W - 5[\log_e(V/S)/10]^2$$

ε'_{sh} : 収縮ひずみの最終値 ($\times 10^{-5}$)

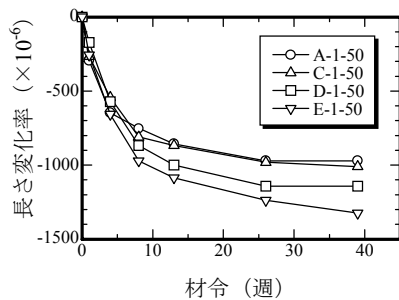
RH : 相対湿度 (%)

W : 単位水量 (kg/m^3)

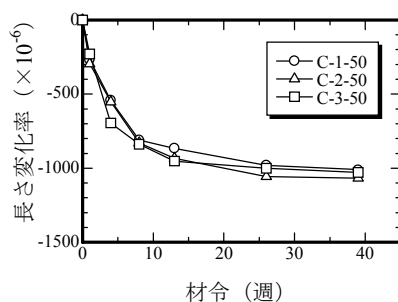
V : 体積 (mm^3)

S : 外気に接する表面積 (mm^2)

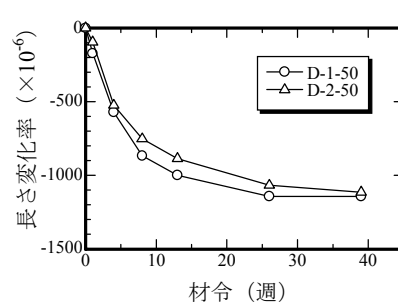
式(1)ではコンクリートの乾燥収縮に影響を与える要因として単位水量が考慮されている。再生骨材は原骨材の周りにモルタルが付着しており、モルタル部分の吸水によってバージン材のみを用いたコンクリートより見かけの単位水量が大きいと言える。よって、モルタル部分の吸水を単位水量の増分と見なして式(1)を用いた



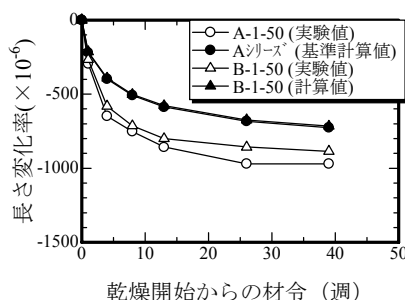
図－9 長さ変化率
(再生骨材 100%使用)



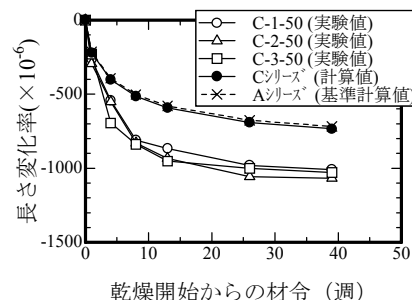
図－10 長さ変化率
(平均吸水率 2.9%)



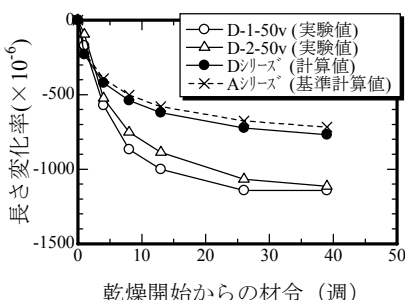
図－11 長さ変化率
(平均吸水率 4.6%)



図－12 長さ変化率
(供試体 B シリーズ)



図－13 長さ変化率
(供試体 C シリーズ)



図－14 長さ変化率
(供試体 D シリーズ)

乾燥収縮ひずみの計算値と乾燥収縮試験結果の長さ変化率との比較を行う。再生コンクリートにおける見かけの単位水量の増加を考慮した場合、示方書式の単位水量に代入する値として式(2)によって計算される W' を用いた。

$$W' = W + W_r \quad (2)$$

$$W_r = (G_n \rho_n + G_r \rho_r) - G_0 \rho_0$$

ここに

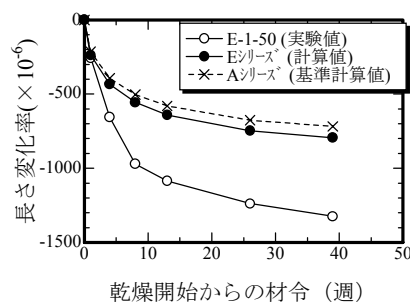
W : 示方配合における単位水量

G_n, ρ_n : それぞれ再生コンクリート中の普通骨材単位量と吸水率

G_r, ρ_r : それぞれ再生コンクリート中の再生骨材単位量と吸水率

G_0, ρ_0 : それぞれ普通コンクリート(Aシリーズ)中の粗骨材単位量と吸水率

この式によって計算される W_r は骨材が全て表乾状態にあり再生骨材コンクリート中の骨材に含まれる水量から普通骨材コンクリート(Aシリーズ)中の骨材に含まれる水量を差し引いた



図－15 長さ変化率
(供試体 E シリーズ)

ものである。式(1)では単位水量、湿度、温度、部材の体積と表面積の比をパラメータとして乾燥収縮ひずみを求め骨材の物性値は考慮されないため、本実験に用いた供試体に式(1)をそのまま適用した場合全て同じ計算値を与えることとなる。図－12～15のAシリーズの計算値は全供試体において示方配合の単位水量を用いて求めた、すなわち見かけの単位水量の増加を考慮していない乾燥収縮量の計算値であり、前述のとおり全供試体共通の計算値となる。よって、図

－12～15 では A シリーズの計算値を基準計算値として示した．なお，示方書式における部材の体積と表面積の比 V/S の適用範囲は 300 であり，本実験供試体では $V/S=22.2$ で適用範囲外であるが， $V/S=300$ とした場合と乾燥収縮ひずみの推定値を比較しても 2%以内の差であるので， $V/S=22.2$ をそのまま示方書式に適用し検討に用いた．

図－12 は A シリーズと B シリーズの結果を示したものである．B シリーズは A シリーズと使用骨材の平均吸水率が等しいため計算値同士は近い値を示しており，実験値同士についても乾燥収縮量に大きな差異は無い．図－13，14，15 はそれぞれ C シリーズ，D シリーズ，E シリーズについての実験値と計算値である．A シリーズの計算値に比較して C，D，E シリーズの順，すなわち単位水量の増分が多くなるほど乾燥収縮ひずみ計算値の値も小さくなる．この計算結果における定性的な傾向に符合するように，実験値についても C，D，E シリーズの順に長さ変化率の値が小さくなっている．

本実験に用いたコンクリートでは普通コンクリートである A シリーズについても実験値と計算値の差が大きい，平均吸水率の大きい使用骨材を用いた再生コンクリートではそれ以上に実験値と計算値の差が大きい．その要因として，再生コンクリートは普通コンクリートに比べ見かけの単位水量の増加が考えられる他，普通コンクリートと使用骨材の体積が等しくなるよう配合設計を行うと原骨材量が普通コンクリートより少なくなることが考えられる．つまり，再生コンクリートの乾燥収縮量が普通コンクリートより大きくなる要因として見かけの単位水量の増加以外に原骨材量の違い等も考慮する必要があると考えられる．

圧縮強度試験と凍結融解試験においては使用骨材の平均吸水率の影響が現れていなかったが乾燥収縮には顕著に現れていた．使用骨材の平均吸水率が大きいということは見かけの単位水量の増加とともに原骨材量が少ないことを意味

しており，平均吸水率が乾燥収縮の大きさに影響を与えると考えられる．一方，圧縮強度試験におけるコンクリートの破壊と凍結融解試験におけるコンクリートの劣化は遷移帯でのひび割れが進展することにより引き起こされるため，たとえ使用骨材の平均吸水率が等しくても骨材の粒形等の違いにより骨材とペーストの付着力が異なりコンクリート強度にも差異が現れることがあると思われる．

6. まとめ

- 1) 使用骨材の平均吸水率が圧縮強度に与える影響は見られないことが確認された．
- 2) 使用骨材が同一の平均吸水率であっても，その構成によってもコンクリートの圧縮強度と凍結融解抵抗性が影響を受けると考えられる．
- 3) 使用骨材の平均吸水率が凍結融解抵抗性に与える影響は見られなかった．
- 4) 使用骨材の平均吸水率が等しいと乾燥収縮ひずみは同程度となることが示された．
- 5) 使用骨材の平均吸水率の増加にともなって乾燥収縮ひずみも増加することが示された．

参考文献

- 1) 長瀧重義ら：ライフサイクルを考慮した建設材料の新しいリサイクル方法の開発，日本学術振興会未来開拓学術研究推進事業研究成果報告書
- 2) 菊池雅史，道正泰弘，安永亮，江原恭二，増田彰：再生骨材の品質が再生コンクリートの品質に及ぼす影響，日本建築学会構造系論文集，第 474 号，11-20，1995
- 3) 土木学会コンクリート委員会：[平成 8 年制定] コンクリート標準示方書設計編，土木学会，1996

謝辞：本実験を行うにあたり，共和コンクリート工業（株）の成田義昭氏と宮原宏司氏には多大なる協力を得た．ここに感謝の意を表す．