

再生粗骨材の吸水率が再生コンクリートの圧縮強度に及ぼす影響

Influences of Water Absorption of Recycled Aggregate to Compressive Strength of Recycled Concrete

北海道大学工学部土木工学科 ○学生員 奥山英俊 (Hidetoshi Okuyama)
北海道大学大学院工学研究科 正会員 佐藤靖彦 (Yasuhiko Sato)
アグロ技術 (株) 正会員 伊藤正澄 (Masazumi Ito)
共和コンクリート工業 (株) 正会員 進藤邦雄 (Kunio Shindo)
北海道工業大学土木工学科 正会員 今野克幸 (Katsuyuki Konno)

1. はじめに

現在、あらゆる分野でリサイクルが必要になってきているが、コンクリートのリサイクルも資源の有効利用や環境保全の面から見て非常に重要な課題である。

そこで本研究では再生骨材の混入率が使用骨材の吸水率のばらつきに及ぼす影響、また、再生粗骨材を用いた場合、使用骨材の吸水率及び再生骨材の混入率が再生コンクリートの圧縮強度、静弾性係数に及ぼす影響について検討した。

2. 実験概要

セメントは普通ポルトランドセメント、細骨材は沙流川

産（比重 2.70）、粗骨材は普通骨材が当麻町月形山産砕石（吸水率 2.0%・比重 2.87）を用い、再生骨材には比重選別法により作成した再生骨材（吸水率 2.9%・比重 2.54）とジョークラッシュ及びブロードミルにより作成した再生骨材（吸水率 6.2%・比重 2.50、吸水率 4.6%・比重 2.57）を用いた。

本研究では、上述の普通骨材と再生骨材を用い、両者の混合割合によって吸水率がどのようにばらつくかを調べた。さらに、本研究では、表-1 のように骨材を組み合わせ、A-1、B-1、C-1 に関しては W/C を 40,50,60%とした 3 ケース、D-1,D-2,E-1 は W/C が 50%の 1 ケースの再生骨材コンクリートを作製した。養生方法は蒸気養生（脱型後は空気中で養生）と水中養生（20℃）の 2 種類であり、A-1,B-1,C-1,C-3 は蒸気養生の供試体が材齢 1,3,14 日目、水中養生が材齢 3,7,28 日目に圧縮試験を行い（C-1 は水中 28 日目はなし）、圧縮強度と静弾性係数を測定し、養生方法、使用骨材の吸水率及び再生骨材の混入率が圧縮強度の発現性、静弾性係数にどのように影響しているかを調べた。また、A-1,D-1,D-2,E-1 は蒸気養生 14 日目の圧縮強度を測定し、使用骨材の吸水率及び再生骨材の混入率と圧縮強度のばらつきとの関係性を調べた。

表-1 使用骨材吸水率と骨材の混合割合

記 号	使用骨材 吸水率(%)	再生骨材 吸水率(%)	混合割合	
			再生(%)	普通(%)
A-1	2.0	—	0	100
B-1	2.5	2.9	50	50
C-1	2.9		100	0
C-3			22	78
D-1	4.6	4.6	100	0
D-2		6.2	63	37
E-1	6.2		0	0

表-2 コンクリートの配合

記号	C (kg/m ³)	W (kg/m ³)	再生骨材 (kg/m ³)	普通骨材 (kg/m ³)	S (kg/m ³)	s/a (%)	SL (cm)	air (%)	温度 (℃)
A-1-40	400	160	0	1116	753	41.8	11.0	4.6	18
A-1-50	320	160	0	1116	824	43.9	12.0	4.6	18
A-1-60	267	160	0	1116	869	45.3	9.5	4.5	18
B-1-40	400	160	526	526	751	41.6	11.0	4.5	17
B-1-50	310	155	526	526	842	44.4	8.5	4.0	16
B-1-60	267	160	526	526	867	45.1	11.0	4.9	15
C-1-40	400	160	988	0	753	41.8	10.5	3.8	15
C-1-50	320	160	988	0	824	43.9	11.0	4.6	16
C-1-60	267	160	988	0	868	45.2	9.0	4.8	15
C-3-40	400	160	239	846	751	41.6	9.0	3.8	10
C-3-50	320	160	239	846	819	43.7	10.5	4.7	12
C-3-60	267	160	239	846	864	45.1	9.0	4.8	10
D-1-50	320	160	1000	0	822	43.9	12.0	4.8	8
D-2-50	320	160	644	378	822	43.9	10.0	4.6	9
E-1-50	320	160	1000	0	822	43.9	12.0	4.4	9

コンクリートの配合は表-2 に示す。なお、混和剤にはポゾリス 70 (10 倍液) と AE-101 (100 倍液) を使用した。目標スランプは 10 ± 2 cm、目標空気量は 4.5 ± 1 % とする。コンクリートの練り混ぜには 100 リットル強制パンタイプミキサを用い、セメント、砂、粗骨材を投入して 30 秒空練りし、水と混和剤を投入して 1 分 30 秒本練りした。練り量は $W/C=40,60\%$ が 1 バッチ 40 リットル、 $W/C=50\%$ が 1 バッチ 50 リットルとした。

圧縮強度は JIS A 1108-1993、静弾性係数はコンプレッションメータ、JSCE-G 502-1988 により比較、検討した¹⁾。

3. 実験結果および考察

3. 1 骨材の吸水率のばらつきの検定

表-3、4 は、骨材の吸水率が正規分布に従うことをコルモゴロフスミルノフ検定によって調べたものである²⁾。

コルモゴロフスミルノフ検定の基本的な手法は、累積度数の実験値と仮定した理論分布関数を比較することであり、両者の差が、与えられた標本サイズから普通に予想されるものより大きければ、理論モデルを棄却する。

ここで、コルモゴロフスミルノフ検定方法を、表-3 を例に具体的に説明する。表-3 は、再生骨材吸水率 2.9%、混合割合が再生骨材 40% 普通骨材 60% である骨材の吸水率を検定した結果である。

- ① 再生骨材吸水率 2.9%、混合割合が再生骨材 60% 普通骨材 40% である骨材の吸水率の平均値および標準偏差を求める。各吸水率から平均値を引き、標準偏差で割って標準化する。この標準化した値を x とし、小さい順に並べる。
- ② 各 x に対する相対度数 $S_n(x)$ を計算する。データ数は 12 であるから、度数 1 は相対度数にすると $1/12=0.083$ に相当する。従って、 i 番目の順位の x 値がもつ相対累積度数は、 $0.083 \times i$ となる。
- ③ 標準正規分布のパーセント点の表から、 x の値に対応した累積（下側）確率を読みとる。これが、 $F_0(x)$ の値となる。
- ④ $D=S_n(x)-F_0(x)$ を計算する。 D の正值のうち最大の値を D^+ 、負値のうち絶対値が最大のものを D^- とする。さらに、 D^+ と $|D^-|$ のうち、大きい方を D_n とする。表-3 から $D_n=0.174$ である。
- ⑤ コルモゴロフスミルノフ検定の有意点表より、データ数 12 および有意水準 $\alpha=20\%$ における $D_n(\alpha)=0.295$ を得る。
- ⑥ $D_n(\alpha)>D_n$ であるから、再生骨材吸水率 2.9%、混合割合が再生骨材 40% 普通骨材 60% である骨材の吸水率は、正規分布に従うことが検定される。

表-4 は、他の骨材の吸水率の検定結果を示したものである。ただし、表中の値は D_n で $D_n(\alpha)$ は有意水準 20% における D_n 値である。この表より、いずれの場合においても $D_n(\alpha)>D_n$ であるから、全ての吸水率が正規分布に従っていると考えられる。

表-5 は、検定に用いた骨材の吸水率の平均値を示した

ものである。

図-1 は、再生骨材と普通骨材の混合割合によって変動係数がどのように変化するかを示したものである。これによると、再生骨材の吸水率が 2.9% の場合は、再生骨材の混入率が増すにつれ、骨材の変動係数が徐々に大きくなっている。しかし、再生骨材の吸水率が 6.2% の場合にはその傾向は現れなかった。吸水率が 6.2% の場合は、測定点が 2 点しかなく、より多くの点を測定する必要がある。

表-3 コルモゴロフスミルノフ検定の結果
(再生骨材吸水率 2.9%、再生 40% 普通 60% の場合)

No.	吸水率(%)	x	$S_n(x)$	$F_0(x)$	D
1	2.161	-1.76	0.083	0.039	0.044
2	2.192	-1.43	0.250	0.076	0.174
3					
4	2.312	-0.15	0.333	0.440	-0.107
5	2.323	-0.04	0.500	0.484	0.016
6					
7	2.359	0.35	0.583	0.637	-0.053
8	2.365	0.41	0.667	0.659	0.008
9	2.380	0.57	0.750	0.716	0.034
10	2.422	1.02	0.833	0.846	-0.013
11	2.438	1.19	0.917	0.883	0.034
12	2.449	1.31	1.000	0.905	0.095

表-4 コルモゴロフスミルノフ検定の結果
(D_n の値)

混合割合 再生：普通	再生骨材 吸水率 2.9%	再生骨材 吸水率 6.2%
100：0	0.159	0.238
80：20	0.093	—
60：40	0.134	—
50：50	—	0.201
40：60	0.174	—
20：80	0.113	—
$D_n(\alpha)$	0.295	0.358
n	12	8

表-5 骨材の混合割合による吸水率 (%)

混合割合 再生：普通	再生骨材 吸水率 2.9%	再生骨材 吸水率 6.2%
80：20	2.678	—
60：40	2.581	—
50：50	—	4.184
40：60	2.326	—
20：80	2.102	—
0：100	2.041	2.041

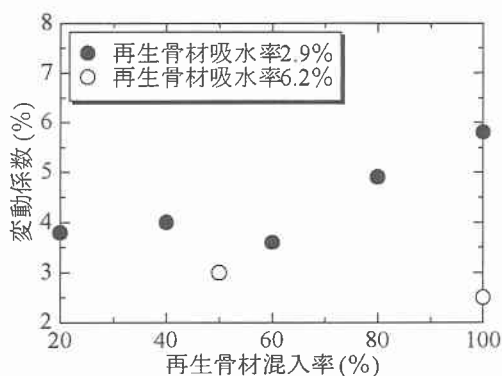


図-1 再生骨材混入率と吸水率の変動係数

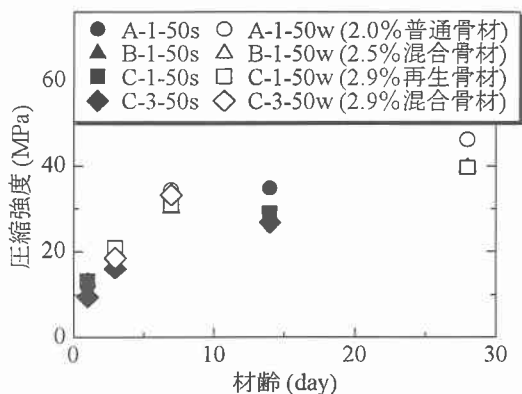


図-2 圧縮強度の発現性

3. 2 圧縮強度の発現性

図-2 は、W/C=50%を例にとり、養生方法と吸水率の相違を要因として圧縮強度の発現性を示したものである。これによると、材齢3日目の強度発現性には養生方法による差が見られない。蒸気養生14日目の圧縮強度に着目するとC-1-50sとC-3-50sにほとんど違いがないことから再生骨材の混入率が異なっても使用骨材の吸水率が同じであれば圧縮強度には差が見られないことが明らかである。また、材齢が長くなると使用骨材の吸水率が高いものの方が圧縮強度は低くなる。

図-3、4 は、蒸気養生は材齢14日目、水中養生は材齢28日目を例にとり、C/Wと圧縮強度の関係を示したものである。使用骨材の吸水率が大きくなると、C/Wを大きくしていても圧縮強度の増加の割合がやや小さい。しかし、C-3-s-14は異なる傾向を示す。この理由として、打設時と圧縮試験時の温度がA-1,B-1,C-1とC-3では3～10℃ほど違うことやB-1,C-1とC-3では用いている再生骨材のバージン骨材部分の品質が違うことが影響している可能性もある。だが、全体としては吸水率が大きいほどC/Wの傾きが小さくなると言えそうである。

3. 3 圧縮強度のばらつきの検定

表-6 は、骨材の吸水率のばらつきの検定と同様に、圧縮強度が正規分布に従うことをコルモゴロフスミルノフ検定によって調べたものである。この表より、いずれの場合においても $D_n(\alpha) > D_n$ であるから、全ての圧縮強度が正規分布に従うことが検定される。

表-7 は、検定に用いた圧縮強度の平均値を示したものである。

図-5 は、骨材の種類によって変動係数がどのように異なるかを示したものである。これによると、普通骨材のみを用いたコンクリートよりも普通骨材と再生骨材を用いたコンクリートの圧縮強度の変動係数が大きくなっている。D-1-50s-14とD-2-50s-14の変動係数がほぼ等しいことから、使用骨材の吸水率が同じであれば、再生骨材の混入率が異なっても圧縮強度のばらつきは同程度であると考えられる。

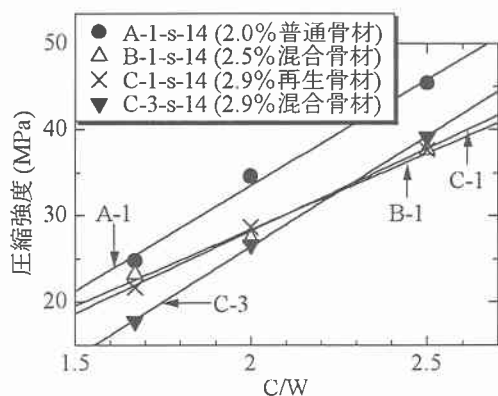


図-3 圧縮強度とC/Wの関係（蒸気養生）

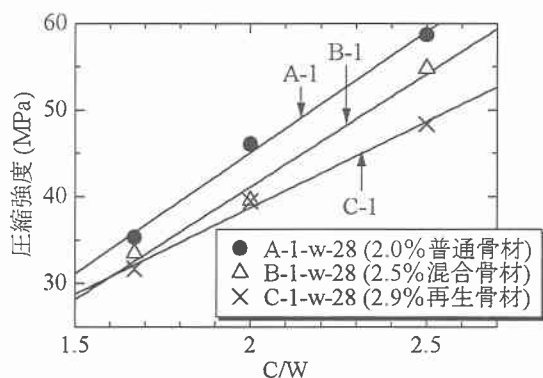


図-4 圧縮強度とC/Wの関係（水中養生）

表-6 コルモゴロフスミルノフ検定の結果
(D_n の値)

A-1-50s-14	0.159	—
D-1-50s-14	—	0.211
D-2-50s-14	—	0.151
E-1-50s-14	—	0.114
$D_n(\alpha)$	0.322	0.284
n	10	13

表-7 骨材の種類による圧縮強度

記号	A-1-50s	D-1-50s	D-2-50s	E-1-50s
圧縮強度 (MPa)	27.7	24.1	27.4	23.6

V: 変動係数 (%)

$$\frac{1}{1 - \frac{3V}{100}} : \text{割増係数}$$

表-8 は、実際に今回行った実験で割増係数を求めてみたものである。これによると、骨材の吸水率が高くなっても割増係数は大きくは変わらないことがわかる。

表-8 割増係数

供試体 (吸水率)	A-1-50s (2.0)	D-1-50s (4.6)	D-2-50s (4.6)	E-1-50s (6.2)
割増係数	1.11	1.24	1.23	1.17

7. まとめ

コンクリートの吸水率について検討した結果、本実験の範囲内で以下のことが明らかになった。

- 1) 再生骨材の混入率が増せば、粗骨材の吸水率の変動係数は徐々に大きくなるが、いずれの場合も 6%以下であった。
- 2) 使用骨材の吸水率が高い方が、材齢が長くなるにつれ圧縮強度の伸びが小さい。また、使用骨材の吸水率が同じであれば、再生骨材混入率が異なっても圧縮強度は変わらない。
- 3) 使用骨材の吸水率が高くなると、C/W を大きくしていても圧縮強度の増加の割合がやや小さい。
- 4) 普通骨材のみを用いたコンクリートよりも普通骨材と再生骨材を用いたコンクリートの圧縮強度の変動係数の方が大きい。また、使用骨材の吸水率が同じであれば、再生骨材の混入率が異なっても圧縮強度のばらつきは同程度である
- 5) 骨材の吸水率が 2.0～2.9%であれば、静弾性係数の大きさには影響を与えない。

謝辞

本研究を行うにあたって、北海道立寒地住宅都市研究所の桂修氏、北海道開発局開発土木研究所の熊谷守晃氏、にご指導を賜った。また、共和コンクリート工業（株）の成田義昭氏、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。また、再生骨材をご提供いただきました札幌リサイクル骨材（株）の田子根氏に厚くお礼申し上げます。なお、本研究は、平成 12 年度産業技術研究助成事業により実施したものである。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書 [規準編]
- 2) A.H-S.Ang ら：土木・建築のための確率・統計の基礎、丸善（株）
- 3) 南波ら：再生コンクリートの品質改善に関する実験、コンクリート工学年次論文報告集 Vol.17, No.2, 1995
- 4) 日本規格協会：JIS ハンドブック 生コンクリート -1988
- 5) （社）日本コンクリート工学協会：コンクリート技士研修テキスト
- 6) （社）全国土木コンクリートブロック協会：土木用コンクリートブロック製造指針

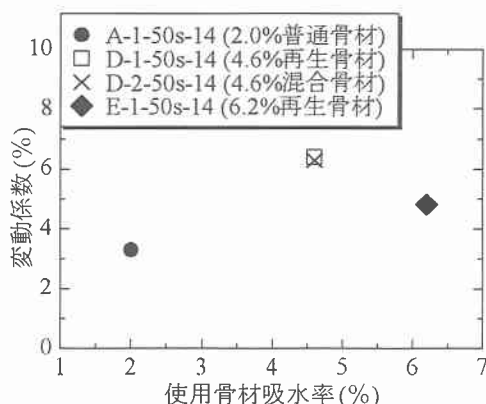


図-5 骨材の種類と圧縮強度の変動係数

3. 4 静弾性係数

図-6 は、A-1,B-1,C-1,D-1 の圧縮強度と静弾性係数の関係を示したものである。

南波らの研究によると、同一圧縮強度に対する静弾性係数は碎石がもっとも高く、ほぼ吸水率が高くなるにつれて低い値になるとしている³⁾が、今回の実験では吸水率が 2.0～2.9%と品質の良い粗骨材を使用しているため、吸水率による静弾性係数の差はほとんど見られない。

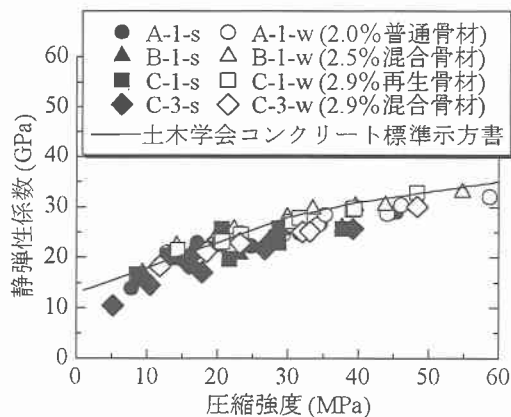


図-6 静弾性係数と圧縮強度の関係

3. 5 割増係数

例えば、二次製品における配合強度はコンクリート強度のばらつきを考慮して次式で示すことができる⁴⁾⁵⁾⁶⁾。

$$f'_{cr} \geq f'_{ck} + 3\sigma \quad \text{または} \quad f'_{cr} \geq \frac{1}{1 - \frac{3V}{100}} \cdot f'_{ck}$$

ここに、 f'_{cr} : 配合強度 (MPa)

f'_{ck} : 設計強度 (MPa)

σ : 標準偏差 (MPa)