

論文 再生骨材の吸水率が再生コンクリートの強度および耐久性に及ぼす影響

河中 涼一^{*1}・出口 雄亮^{*2}・馬場 政教^{*3}・綾野 克紀^{*4}

要旨：再生骨材を用いたコンクリートは、バージン骨材を用いたものに比べ、その強度および耐久性は劣るといわれている。しかし、骨材中に含まれる吸水量も考慮した全水量を用いた水セメント比を用いれば、どちらの骨材を用いてもその強度と水セメント比の関係は同じ関係式で表されることを明らかにした。また、乾燥収縮ひずみ等についても全水量を用いれば、強度の場合と同様なことが言えることが分かった。再生骨材を用いたコンクリートの強度および耐久性がバージン骨材を用いたものに比べて劣るのは、再生骨材に付着したセメントペーストの強度等の影響よりも、再生骨材に含まれる吸水量の影響の方が大きいことが分かった。

キーワード：再生骨材，強度，耐久性，吸水率，全水量

1. はじめに

平成 12 年度建設副産物実態調査によると、コンクリート塊およびアスファルト・コンクリート塊の再資源化率は 96%および 98%と、再利用化システムの整備によって、平成 7 年度の 65%および 81%と比べ大きく上昇している¹⁾。しかし、その再利用の主な用途は、路盤材や埋め戻し材への適用であり、コンクリート用材料としての再利用は十分とは言えない²⁾。その一方で、良質な天然骨材をはじめとするコンクリート用骨材の不足が問題となっている³⁾。これらの現状を考えると、コンクリート塊等のコンクリート材料への再利用は必須である。しかし、一般的に再生骨材、とくに再生細骨材を用いたコンクリートの圧縮強度は、バージン骨材を用いたコンクリートに比べ 5～10%も低下するといわれている⁴⁾。また、乾燥収縮ひずみについては、再生骨材に含まれるモルタルは通常の骨材に比べて静弾性係数が低く、セメントペーストの乾燥収縮に対する抵抗が低いため、通常のコンクリートに比べて大きくなるなどの理由から、バージン骨材を用いたコンクリートに比べ、

その性能は劣ると言われている⁵⁾。また、再生骨材を用いたコンクリートの強度および耐久性の低下は、原骨材の周りに付着しているセメントペーストによるものとされ、現在では、再生骨材の製造過程において、加熱処理、擦り揉み等を行い、原骨材とその周りに付着しているセメントペースト部分とを分けることで、高品質な再生骨材が製造されるようになっている。

本論文は、再生骨材の吸水量によって、再生骨材を用いたコンクリートの圧縮強度および耐久性の低下を表すことが可能であることを示すものである。耐久性試験では、耐硫酸塩性、塩分浸透性、中性化および乾燥収縮ひずみの測定を行い、再生骨材の高い吸水率の及ぼす影響を確かめた。

2. 実験概要

2.1 再生骨材を用いたコンクリートの強度および耐久性

2.1.1 再生ペーストを混入したコンクリート

再生骨材に付着したセメントペーストの強度および吸水率が再生コンクリートの強度および

*1 岡山大学大学院 自然科学研究科環境システム学専攻（正会員）

*2 三井造船株式会社（非会員）

*3 大和クレス株式会社 長船工場技術部（正会員）

*4 岡山大学大学院 自然科学研究科地球・環境システム科学専攻助教授 工博（正会員）

Table1 Mixture proportions of concrete

Max size (mm)	Air (%)	Slump (cm)	W/C	s/a	Unit weight per volume (kg/m ³)				Admix. * (×C%)
					W	C	S	G	
20	2.0	25.0	0.36	0.53	180	500	843	823	0.9
		17.3	0.40	0.45		450	748	987	0.7
		7.7	0.60	0.42		300	748	1117	0.2

*:HRWRA(High-range water reducing admixture)

耐久性に及ぼす影響を調べるために、水セメント比が 0.40 および 0.80 の 2 種類のセメントペーストを作製した。これらのセメントペーストは、破砕機を用いて破砕し、5mm のふるいを通したものを再生細骨材として用いた。セメントペーストは、材齢が 2 ヶ月以上経った後、破砕して用いた。水セメント比が 0.40 のセメントペーストを破砕した再生細骨材は、容積比でバージン細骨材の 15%および 30%と置換した。また、水セメント比が 0.80 のセメントペーストを破砕した再生細骨材は、容積比でバージン細骨材の 15%、30%および 45%と置換した。実験に用いたコンクリートの配合を **Table1** に、骨材の物性値を **Table2** に示す。バージン骨材を用いたコンクリートは、単位セメント量と細骨材率を一定とし、単位水量を増加させることで、水セメント比 0.40、0.45 および 0.50 のコンクリートと水セメント比 0.60、0.65 および 0.70 のコンクリートを作製した。

2.1.2 再生モルタルを混入したコンクリート

セメントペーストが細骨材の周りに付着したモルタルを再生細骨材として用いた試験を行うために、水セメント比が 0.20、0.50 および 0.80 のモルタルを作製した。これらのモルタルには、**Table2** に示される海砂を用いた。これらのモルタルは、破砕機を用いて破砕し、5mm のふるいを通したものを再生細骨材として用いた。モルタルは、材齢が 2 ヶ月以上経った後、破砕して用いた。これらのモルタルを破砕した再生細骨材の吸水率は、6.68%、8.94%および 9.78%である。これらのモルタルを破砕した再生細骨材を用い、水セメント比 0.40 および 0.60 のコンクリートを作製した。これらの再生細骨材を用いたコンクリートの配合は、バージン細骨材

Table2 Physical properties of aggregates

Kind of aggregate		Specific gravity (g/cm ³)	Water Absorption (%)
River sand	-	2.53	1.38
Sea sand	-	2.53	1.92
Crushed stone	-	2.74	0.40
Crushed cement paste (W/C:0.40)	Fine	2.11	11.59
Crushed cement paste (W/C:0.80)	Fine	1.94	17.95
Crushed mortar (W/C:0.20)	Fine	2.38	6.68
Crushed mortar (W/C:0.50)	Fine	2.28	8.94
Crushed mortar (W/C:0.80)	Fine	2.26	9.78
Crushed specimen	Fine	2.36	7.44
	Coarse	2.54	4.66
Demolished concrete	Fine	2.27	8.93
	Coarse	2.51	4.21
Pavement base (Water wash)	Fine	2.48	2.88
	Coarse	2.65	1.64
Pavement base (Non treatment)	Fine	2.37	6.30
	Coarse	2.61	2.00

を用いたコンクリートの配合と、空気量、単位水量、水セメント比および細骨材率が一定となるように決定した。モルタルを破砕して作製した再生細骨材の物性値を **Table2** に示す。

2.1.3 再生コンクリート骨材を用いたコンクリート

コンクリートを破砕した再生骨材には、試験室で作製したコンクリート供試体を破砕した再生骨材、アルファルト等の異物の含まれていない市販の再生骨材および路盤材用として市販されている再生骨材を用いた。試験室で作製したコンクリート供試体には、**Table2** に示される川砂および碎石を用いた。ただし、路盤材用に市販されている再生骨材は、水による洗浄で微粒分を除去したものと、未洗いのものを用いた。水によって洗浄し取り除かれた微粒分の量は、質量比で 20%である。これらの再生骨材を用い、水セメント比 0.36、0.40 および 0.60 のコンクリートを作製した。これらの再生骨材を用いたコンクリートの配合は、バージン骨材を用いた

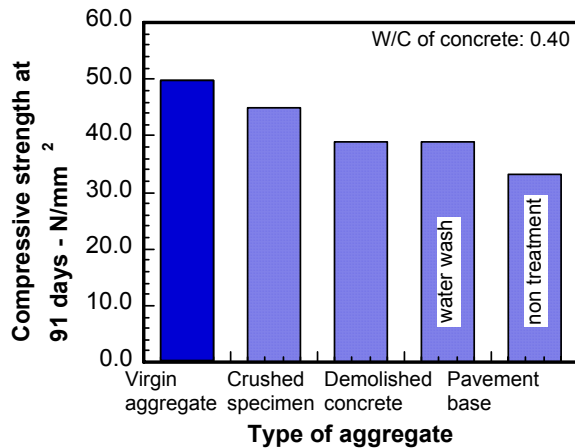


Fig.1 Effect of aggregate type on concrete strength.

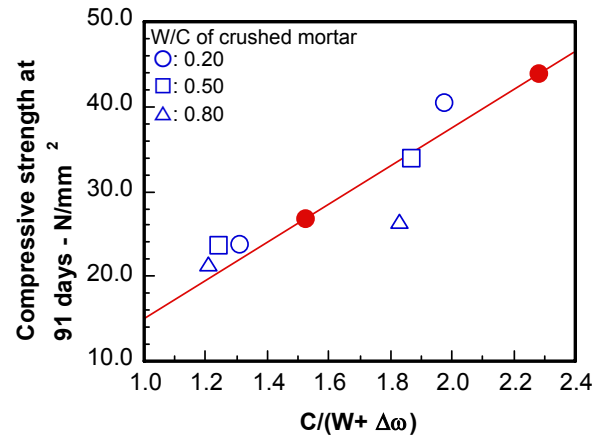


Fig.3 Relationship between $C/(W+\Delta\omega)$ and compressive strength.

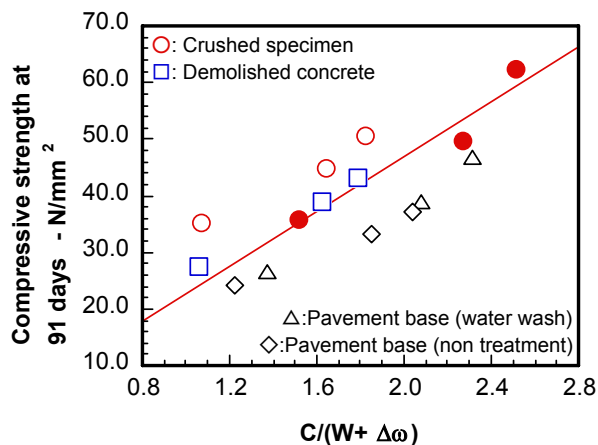


Fig.2 Relationship between $C/(W+\Delta\omega)$ and compressive strength.

コンクリートの配合と、空気量、単位水量、水セメント比および細骨材率が一定となるように決定した。これらの再生骨材の物性値を **Table2** に示す。

2.2 耐久性試験

コンクリートの耐久性として、乾燥収縮試験、中性化試験、耐硫酸塩性試験および塩分浸透性試験を行った。乾燥収縮試験は、28日間水中養生した $100 \times 100 \times 400\text{mm}$ の角柱供試体を用い、温度 20°C 、相対湿度 60%の恒温恒湿室内で測定を行った。耐硫酸塩性試験は、供試体を飽和状態の硫酸ナトリウム水溶液中に5日間、気中に2日間おくサイクルを1サイクルとし、1サイクル毎に動弾性係数を測定し、供試体の劣化

を調べた。中性化試験は、温度 30°C 、相対湿度 60%および二酸化炭素濃度 20%の条件下で実験を行った。

3. 実験結果および考察

3.1 再生骨材を用いたコンクリートの強度

Fig.1 は、試験室で作製したコンクリート供試体を破砕した再生骨材、アスファルト等の異物の含まれていない市販の再生骨材および路盤材用として市販されている再生骨材を用いた水セメント比 0.40 の配合におけるコンクリートの圧縮強度試験の結果を表したものである。この図から明らかなように、再生骨材を用いたコンクリートは、バージン骨材を用いたコンクリートに比べてその強度は劣ることが分かる。しかし、骨材中に含まれる吸水量 $\Delta\omega$ を考慮した $C/(W+\Delta\omega)$ と強度の関係を調べた **Fig.2** からは、いずれの骨材を用いたコンクリートの強度も $C/(W+\Delta\omega)$ との間にはほぼ直線関係が成り立つことが分かる。骨材中に含まれる吸水量 $\Delta\omega$ は、単位骨材量に骨材の吸水率を乗じて求めた。**Fig.2** は、**Fig.1** に示した結果を含む、水セメント比が 0.36, 0.40 および 0.60 のコンクリートの $C/(W+\Delta\omega)$ と圧縮強度の関係を示している。ただし、図中に示す●は、いずれもバージン骨材を用いたコンクリートの結果を示している。

Fig.3 は、水セメント比が 0.20, 0.50 および

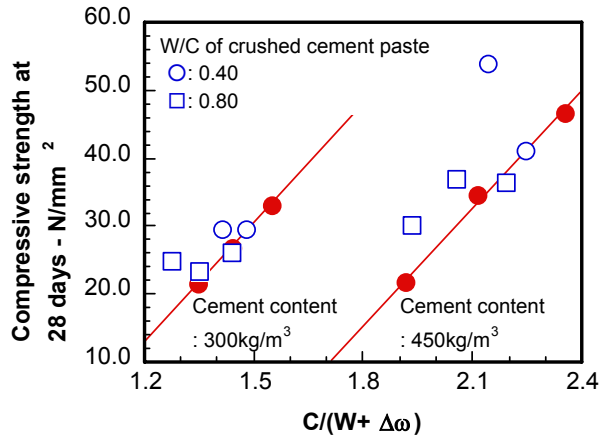


Fig.4 Relationship between $C/(W + \Delta\omega)$ and compressive strength.

0.80 のモルタルを破碎し、再生細骨材として用いたコンクリートにおける $C/(W + \Delta\omega)$ と圧縮強度の関係を示したものである。ただし、図中に示す●は、いずれもバージン骨材を用いたコンクリートの結果を示している。この図からも明らかなように、骨材中に含まれる吸水量 $\Delta\omega$ を考慮した $C/(W + \Delta\omega)$ を用いると、いずれの骨材を用いたコンクリートの強度も $C/(W + \Delta\omega)$ との間にほぼ直線関係が成り立つことが分かる。

Fig.4 は、水セメント比が 0.40 および 0.80 であるセメントペーストを破碎し、再生細骨材として用いたコンクリートの $C/(W + \Delta\omega)$ と圧縮強度の関係を示したものである。ただし、図中に示す●は、いずれもバージン骨材を用いたコンクリートの結果を示している。○は、左から再生骨材のバージン骨材との置換率が 30% および 15% のものの結果を、□は、左からその置換率が 45%, 30% および 15% のものの結果を示している。この図からも明らかなように、骨材中に含まれる吸水量 $\Delta\omega$ を考慮した $C/(W + \Delta\omega)$ を用いると、いずれの細骨材を用いたコンクリートの強度も $C/(W + \Delta\omega)$ との間にほぼ直線関係が成り立つことが分かる。

以上のことより、再生骨材を用いたコンクリートの強度の低下は、再生骨材に含まれる吸水量 $\Delta\omega$ によって表すことが可能であることが分かる。

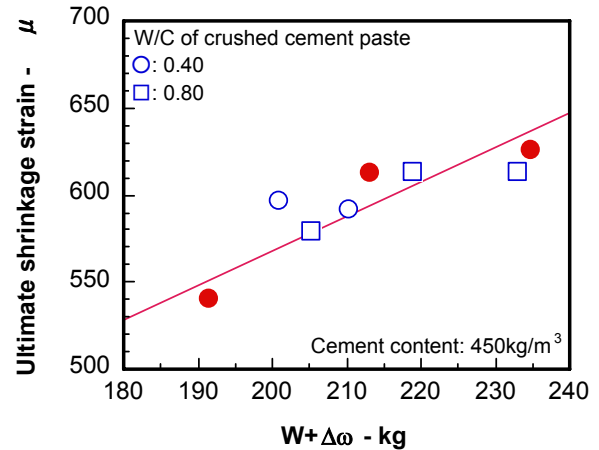


Fig.5 Relationship between $W + \Delta\omega$ and ultimate drying shrinkage strain.

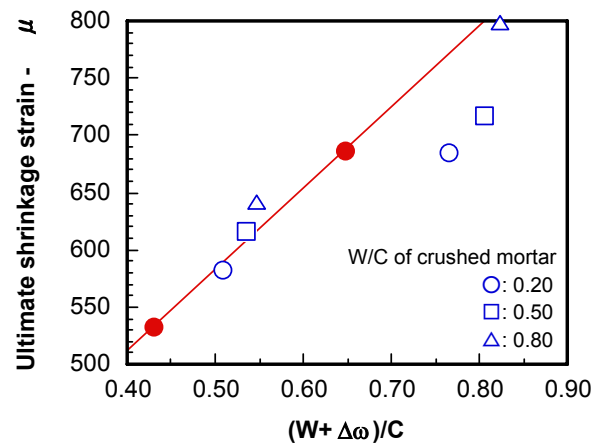


Fig.6 Relationship between $(W + \Delta\omega)/C$ and ultimate drying shrinkage strain.

3.2 再生骨材を用いたコンクリートの耐久性

Fig.5 は、水セメント比が 0.40 および 0.80 であるセメントペーストを破碎し、再生細骨材として用いた単位セメント量が 450kg/m^3 のコンクリートの乾燥収縮ひずみの最終値と全水量 $W + \Delta\omega$ の関係を示したものである。ただし、図中に示す●は、いずれもバージン骨材を用いたコンクリートの結果を示している。○は、左から再生骨材のバージン骨材との置換率が 15% および 30% のものの結果を、□は、左からその置換率が 15%, 30% および 45% のものの結果を示している。乾燥収縮ひずみの最終値は、98 日間測定を行った実験データを双曲線によって回帰して求めた。この図から明らかなように、

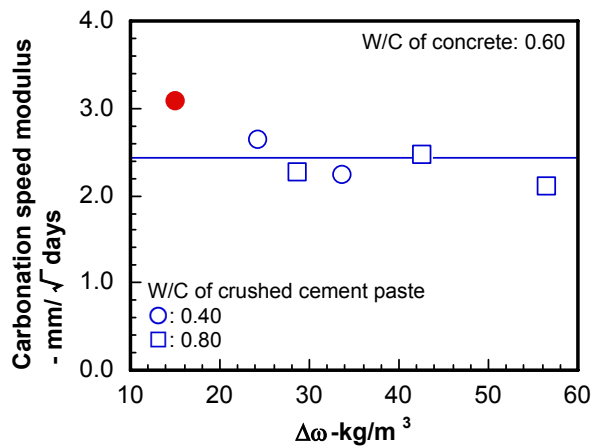


Fig.7 Relationship between $\Delta\omega$ and carbonation speed modulus.

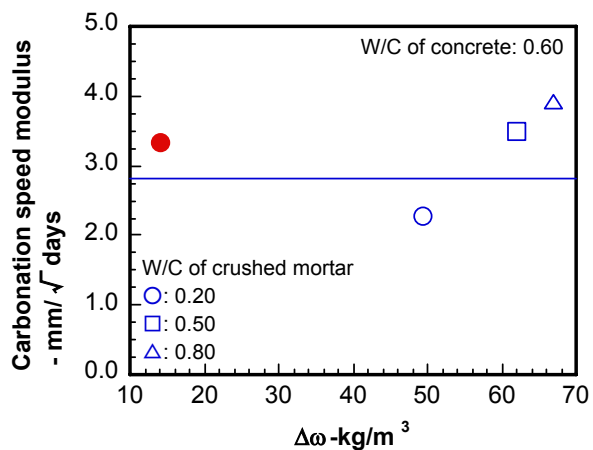


Fig.8 Relationship between $\Delta\omega$ and carbonation speed modulus.

単位セメント量が一定のとき、骨材中に含まれる吸水量 $\Delta\omega$ を考慮した全水量 $W + \Delta\omega$ を用いると、いずれの細骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみの最終値も $W + \Delta\omega$ との間にほぼ直線関係が成り立つことが分かる。

Fig.6 は、水セメント比が 0.20, 0.50 および 0.80 のモルタルを破砕し、再生細骨材として用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみの最終値と $(W + \Delta\omega)/C$ の関係を示したものである。ただし、図中に示す●は、いずれもバージン骨材を用いたコンクリートの結果を示している。この図から明らかなように、骨材中に含まれる吸水量 $\Delta\omega$ を考慮した $(W + \Delta\omega)/C$ を用いると、いずれの細骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみ

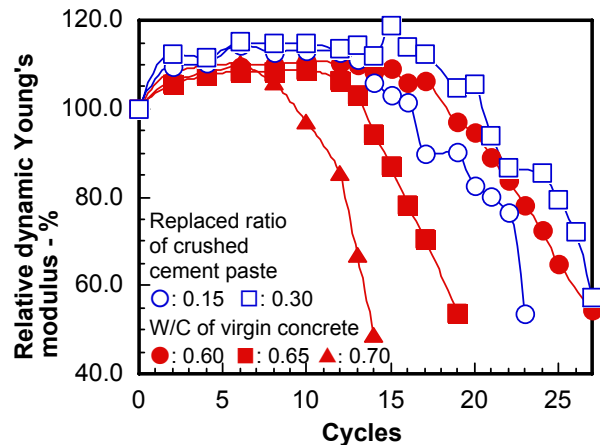


Fig.9 The result of resistance to sulfate attack test.

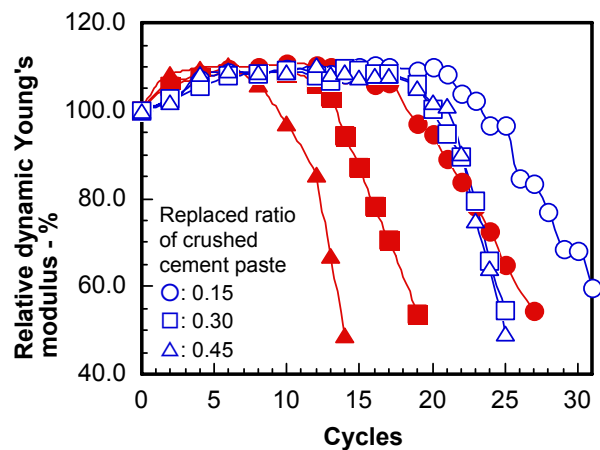


Fig.10 The result of resistance to sulfate attack test.

の最終値も $(W + \Delta\omega)/C$ との間にほぼ直線関係が成り立つことが分かる。

Fig.7 は、水セメント比が 0.40 および 0.80 のセメントペーストを破砕し、再生細骨材として用いた水セメント比 0.60 のコンクリートの中性化速度係数と骨材中の吸水量 $\Delta\omega$ の関係を示したものである。ただし、図中に示す●は、いずれもバージン骨材を用いたコンクリートの結果を示している。この図から明らかなように、中性化に関しては、再生骨材を用いたものと、バージン骨材を用いたものに大きな差がないことが分かる。

Fig.8 は、水セメント比が 0.20, 0.50 および 0.80 のモルタルを破砕し、再生細骨材として用

いた水セメント比 0.60 のコンクリートの中性化速度係数と骨材中の吸水量 $\Delta\omega$ の関係を示したものである。この図から明らかなように、セメントペーストを細骨材として用いた場合と同様に、モルタルを細骨材に用いたコンクリートの中性化は、バージン細骨材を用いたものと大きな差のないことが分かる。

Fig.9 および **Fig.10** は、それぞれ水セメント比が 0.40 および 0.80 であるセメントペーストを破碎し、再生細骨材として用いた水セメント比 0.60 のコンクリートの耐硫酸塩性を調べた結果である。また、バージン骨材を用いたコンクリートは、単位セメント量を一定とした条件で、水セメント比 0.60, 0.65 および 0.70 のコンクリートを作製した。これらの図より、再生骨材を用いた水セメント比 0.60 のコンクリートに比べて、バージン骨材を用いた水セメント比 0.65 および 0.70 のコンクリートのほうが先に劣化していることが分かる。これらの図から明らかなように、再生骨材を用いたコンクリートの耐硫酸塩性は、コンクリートの水セメント比が同じとき、バージン骨材を用いたものと大きな差がないことが分かる。

Fig.11 は、破碎したモルタルを再生細骨材として用いたコンクリートと、バージン細骨材を用いたコンクリートの塩分浸透性を比較したものである。ただし、塩分は、コンクリートの表面から 10mm までに含まれる量を測定した。図中に示す●は、いずれもバージン骨材を用いたコンクリートの結果を示している。この図から明らかなように、コンクリート中に浸透する塩分量も、骨材中に含まれる吸水量 $\Delta\omega$ を考慮した全水量 $W + \Delta\omega$ によって、再生骨材を用いたコンクリートの性能低下を表すことが可能であることが分かる。

4. まとめ

再生骨材を用いることによって、コンクリートの圧縮強度は低下し、乾燥収縮ひずみは増加する。また、再生骨材を用いたコンクリートの

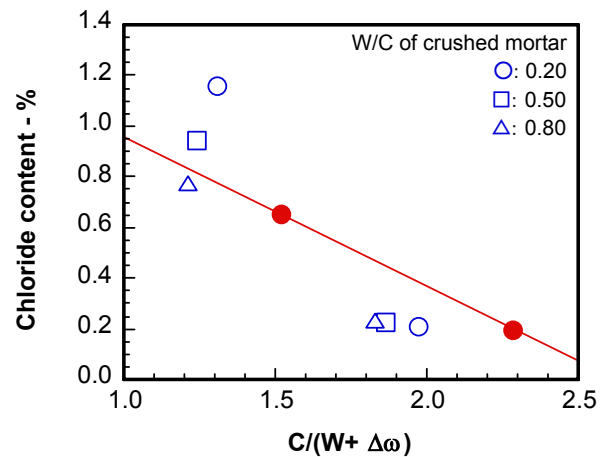


Fig.11 Relationship between $C/(W + \Delta\omega)$ and chloride content.

塩分浸透性は、バージン骨材を用いたものに比べて増加する。これらの性能低下は、再生骨材の吸水率によって説明できることが分かった。また、再生骨材を用いたコンクリートの中性化および耐硫酸塩性は、バージン骨材を用いたコンクリートと大きな差がないことが分かった。

参考文献

- 1) 北爪康弘ほか：ゼロエミッション志向コンクリート廃材のリサイクル，コンクリート工学年次論文集，Vol.21，No.1，pp.145-150，1999
- 2) 香川明人：住宅団地におけるコンクリート廃材のリサイクル・団地内リサイクルの試み，コンクリート工学，Vol.32，No.4，pp.5-14，1994.4
- 3) 吉森誠ほか：建設発生土を利用したコンクリートのエココストについて，第 54 回土木学会中国支部研究発表概要集，pp.515-516，2002
- 4) 麓隆行ほか：再生細骨材の品質がモルタル性状に及ぼす影響についての検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.22，No.2，pp.1111-1115，2000
- 5) (財)建築業協会建設廃棄物処理再利用委員会：再生骨材コンクリートに関する研究，コンクリート工学，Vol.16，No.7，pp.18-31，1978.7