論文　絶乾状態の再生骨材を使用したコンクリートの物理的特性について

麓　　隆行[*1]

要旨：再生骨材の利用促進を目的に，C/TW の考えに基づいて，絶乾状態の再生骨材を用いた場合にコンクリートの性状にどのような影響を及ぼすかを検討した。その結果，再生細骨材の吸水量の 90%程度，再生粗骨材の吸水量の 70%程度の水を加えれば，適度な流動性が得られること，経時変化には絶乾状態での再生骨材の使用による影響は小さいことがわかった。また，練混ぜ時に必要水を加えても，圧縮強度，曲げ強度および静弾性係数は，C/TW との比例関係があった。ただし，その比例関係は，粗骨材の粒子強度や単位粗骨材量などの影響も受けることがわかった。

キーワード：再生骨材，吸水率，強度，静弾性係数，単位総水量，セメント総水量比

1. はじめに

天然骨材の枯渇化が懸念され，副産物骨材の利用が数多く研究されてきた。その中でも，構造物の建替えが進む中，コンクリートがらの再利用は重要な課題として位置づけられてきた。その結果を受けて，2005 年から 2007 年にかけて，再生骨材に関連する JIS 規格が制定された。今後，コンクリートがらはコンクリート用骨材としての再利用が進むと考えられる。この時，重要となるのは，再生骨材 M の利用である。普通骨材に比べれば，密度が低く，吸水率が高いことから，含水状態の管理と，それを用いたコンクリートの性状予測が重要となる。

一方，吸水率の高い再生骨材を使用したコンクリートの強度および耐久性は，普通骨材を使用したコンクリートに比べ低下する。その評価指標の一つに，単位総水量と単位セメント量との比，すなわちセメント総水量比 C/TW がある [1)]。単位総水量(TW)とは，単位水量に細・粗骨材の吸水量を加えた，コンクリート中の総水量を表している。この C/TW は，再生細骨材を使用したコンクリートの各種強度や耐久性と関係がある [1),2)]。その原因として，再生細骨材中の吸収水が，セメント硬化体の細孔構造に影響を及ぼす可能性も指摘されている [1),2)]。

以上から，C/TW が同じであれば，硬化コンクリートの性状が同程度となる可能性を示している。そのため，絶乾状態の再生骨材を用い，その吸水量分の水を加えることでも硬化コンクリートの性状は同程度となる可能性がある。これは水量を総量で管理すればよいことから，有意義な方法だと考えられる。しかし，実際には，絶乾状態での使用に際し，再生骨材の吸水量を練混ぜ時に添加した場合，コンクリートの流動性への影響が不明であり，さらに流動性調整のために水量を増やした場合の硬化コンクリートの性状への影響も不明である。そこで，本研究では，絶乾状態の再生骨材を用いた場合に，再生骨材の吸水量の一部を練混ぜ時に加えることがコンクリートのフレッシュおよび硬化後の性状に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。

2. 実験概要

使用した骨材とその品質を**表－1** に示す。普通骨材として赤穂産流紋岩 6 号砕石および那珂川産川砂を用いた。また，再生細・粗骨材は，マンションの解体がらを，ジョークラッシャおよびコーンクラッシャで破砕後，エアセパレータで微粉分を取り除き，5-13mm と 2.5mm 以下にふるい分けて作製した。再生粗骨材は M クラス，再生細骨材は L クラスの品質であった。他に，普通セメント，水道水，ポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤を使用した。

コンクリートの配合として，実験の継続性の関係から，以前，W/C = 35%でスランプ 18cm，W/C = 50%および 65%でスランプ 12cm を目標として作成した配合を使用し，本実験で使用する川砂・砕石，川砂・再生粗骨材，再生細骨材・砕石に体積置換した**表－2** を用いた。なお，消泡剤の添加により，空気量の影響を極力小さくした。W/C は 35%，50%および 65%の 3 種類とした。ただし，再生細骨材を使用する際に，同様に体積置換しようと試みたが，流動性の低下が大きかったことから，再生細骨材と

表－1　使用した再生骨材の品質

物性	粗骨材		細骨材	
	砕石	再生	川砂	再生
表乾密度 (g/cm³)	2.60	2.54	2.64	2.32
絶乾密度 (g/cm³)	2.59	2.46	2.60	2.14
吸水率 (%)	1.42	3.06	1.59	8.40

*1 近畿大学　理工学部社会環境工学科講師　博(工)　(正会員)

表－2　使用したコンクリートの配合

骨材の種類		再生骨材の含水状態	吸水量に対する加水割合(%)	W/C (%)	s/a (%)	C/TW	単位量(kg/m^3)					
粗	細						水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	高性能 AE 減水剤 (C×%)	消泡剤 (C×%)
普通	普通	－	－	35	43.2	2.51	177	506	732	949	0.7	1
		－	－	50	46.2	1.74	177	354	843	966	0.1	
		－	－	65	48.5	1.34	185	285	902	943	0	
	再生	表乾	－	35	43.0	2.17	189	542	618	917	0.7	1
		絶乾	70			1.47	223		570			
			85			1.13	230					
			100			2.30	237					
		表乾	－	50	46.0	1.57	190	381	714	939	0.1	
		絶乾	70			1.21	229		659			
			85			2.23	237					
			100			1.52	245					
		表乾	－	65	49	1.17	200	308	775	904	0	
		絶乾	70			2.17	242		715			
			85			1.47	251					
			100			1.13	260					
再生	普通	表乾	－	35	43.2	2.34	177	506	732	927	0.7	1
		絶乾	40			1.62	188			898		
			70			1.26	196					
			100			2.54	204					
		表乾	－	50	46.2	1.76	177	354	843	944	0.1	
		絶乾	40			1.36	188			914		
			70			2.44	197					
			100			1.69	205					
		表乾	－	65	48.5	1.31	185	285	902	922	0	
		絶乾	40			2.34	196			893		
			70			1.62	204					
			100			1.26	212					

なお，消泡剤の使用により目標空気量を 2%と設定した。

砕石を用いたコンクリートで W/C と s/a をほぼ固定して，ペースト量を調整し，基本配合を再検討した。再生骨材および普通骨材の表乾状態を，24 時間水中に静置した後，気中で表乾状態になるまで含水調整して作製した。また，再生骨材の絶乾状態は，105℃の送風乾燥機で 24 時間乾燥して使用した。絶乾状態で再生骨材を用いた場合，流動性の確保等の保目的で，練混ぜ水を増やした。その加える水量を，絶乾状態の再生粗骨材の場合，吸水量の 40%，70%，100%とし，絶乾状態の再生細骨材の場合，吸水量の 70%，85%，100%とした。

10 リットルのモルタルミキサにセメントと細骨材を入れ，低速で 30 秒撹拌後，水を投入し低速 60 秒，高速 90 秒練混ぜてモルタルを作製した。そして，そのモルタルを練板上に敷き詰めた粗骨材の上に流し入れ，2 分半手練りしコンクリートを作製した。

コンクリートの練混ぜ直後にフレッシュ性状として，スランプ試験を行った。特に，絶乾状態で使用すると経時変化が課題となることから，練混ぜ直後(0 分)，30 分，60 分および 90 分経過後にスランプ試験を行った。なお，スランプ試験は，室温 20℃，相対湿度 60%の恒温恒湿室で行い，経時変化を測定する際は，直前まで練板上でビニルをかけて保存した後，試験直前にスコップで数回練混ぜてからスランプ試験を行った。

また，硬化後の性質として，圧縮強度，曲げ強度および静弾性係数を測定した。圧縮試験用供試体として φ 75×150 mm を 3 本，曲げ試験用供試体として 75×75×150 mm を 3 本製作した。各供試体は 20℃の水中で養生し，材齢 26 日に引き上げて，ひずみゲージを貼り付けて材齢 28 日に JIS A 1108，JIS A 1106，および JIS A 1149 の各試験方法に準じて試験を行った。

3. 絶乾状態で用いたコンクリートのフレッシュ性状に関する検討

3.1 練上り直後のスランプについて

図－1 および**図－2** に練上り直後のスランプ試験の結果を示す。再生粗骨材，あるいは再生細骨材に関わらず，表乾状態で用いた場合，W/C = 35%および W/C = 50%では，砕石・川砂を用いた場合と同等のスランプとなった。一方，W/C = 65%では，砕石・川砂を用いた場合よりスランプが少し大きくなったが，表乾状態の調整誤差と考えられる。

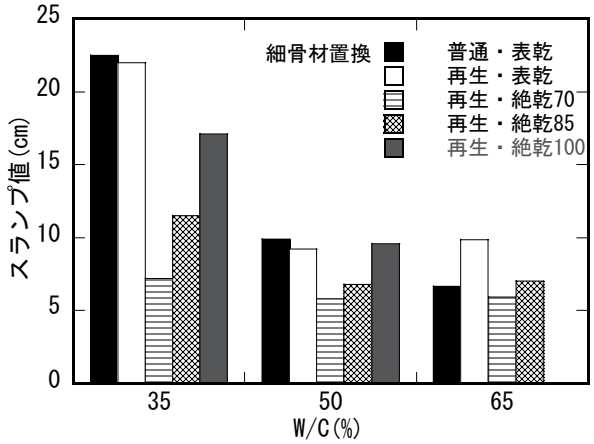
また，再生細骨材を絶乾状態で用いた場合，吸水量の85%では，砕石・川砂や表乾状態の再生骨材に比べて，スランプが小さくなった。また，吸水量と同程度の水を加えると，水量が多くなるため，目視でブリーディングが確認され，さらに W/C = 65%では分離気味となった。一方，絶乾状態の再生粗骨材では吸水量の 70%の水を加えた場合に，砕石・川砂を用いた場合と同程度のスランプとなった。それ以上，加える水量を減らすと，砕石・川砂を用いた場合の 8 割程度となった。このことから，体積置換にて絶乾状態の再生骨材を用いたコンクリートのスランプは，再生粗骨材の場合に吸水量の 70%程度，再生細骨材の場合に 90%程度を加えると，砕石・川砂を用いた場合や，再生骨材を表乾状態で用いた場合と同程度となる。これより多いと余剰水が発生し，少ないと過剰な吸水が起き，ペーストの流動性やブリーディングに影響を及ぼすと考えられる。

さらに，再生粗骨材を絶乾状態で用いた場合，W/C = 35%では，高性能 AE 減水剤の分散効果により骨材の種類や含水状態に関わらずスランプがほぼ一定となった。再生細骨材を絶乾状態で用いた場合，加える水量とともにスランプが大きくなった。これは，表面積が大きい再生細骨材を用いた場合に，高性能 AE 減水剤の吸着や表面張力低下による練混ぜ水の再生骨材への吸収量増加が影響したのではないかと推察している。

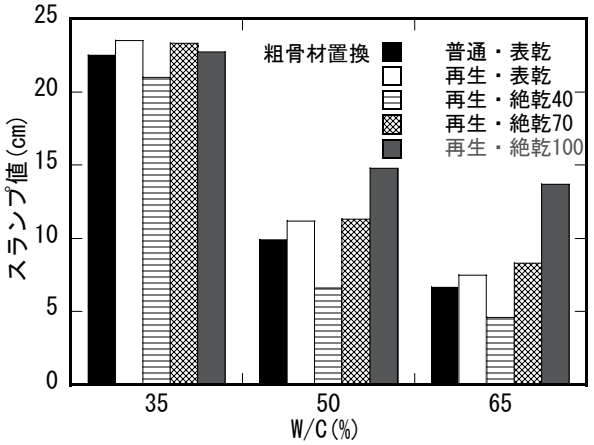
3.2 スランプの経時変化について

図－3～図－6 に W/C = 50%および W/C = 65%のスランプの経時変化を，細骨材を置換した場合，および粗骨材を置換した場合に分けて示す。なお，W/C = 65%で絶乾状態の再生細骨材を用い，100%の吸水量を加えた場合に分離気味となったため，経時変化を測定していない。

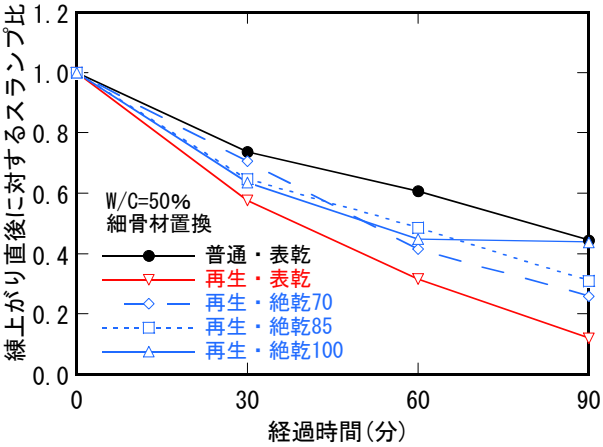
再生細骨材を用いた場合，絶乾状態として骨材の吸水量の一部を加えた場合，その水量に関わらず，スランプ



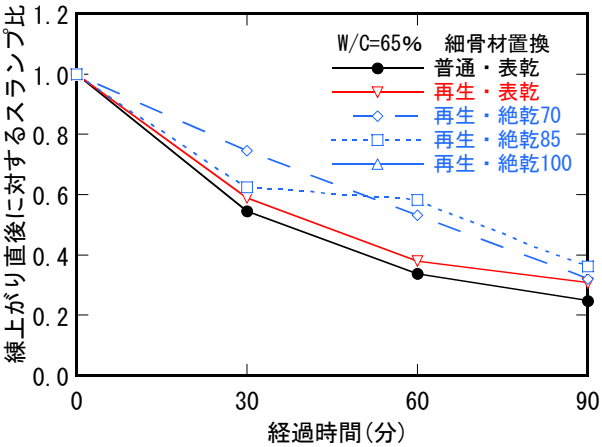
図－1　細骨材置換の場合の練上り直後のスランプ値



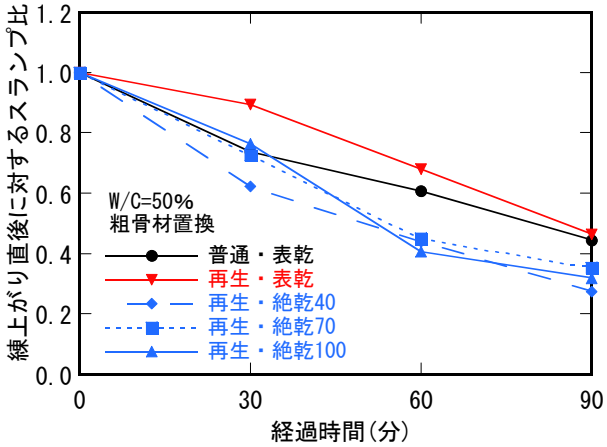
図－2 粗骨材置換の場合の練上り直後のスランプ値



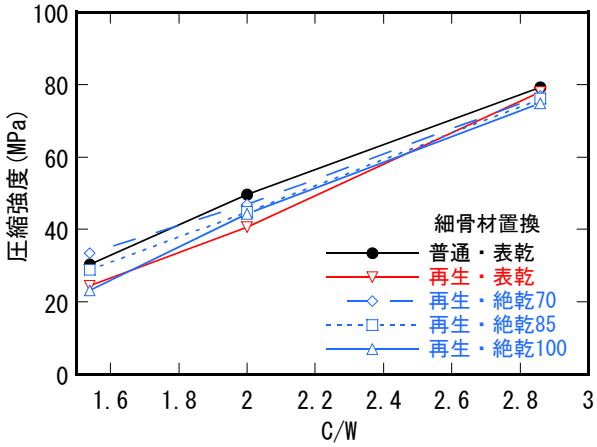
図－3 細骨材置換での W/C=50%のスランプ経時変化



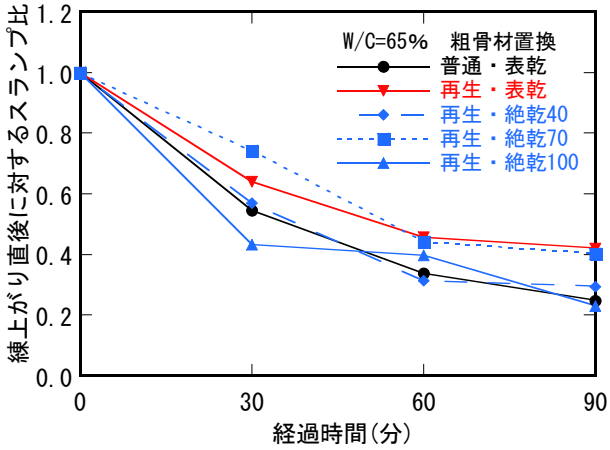
図－4 細骨材置換での W/C=65%のスランプ経時変化



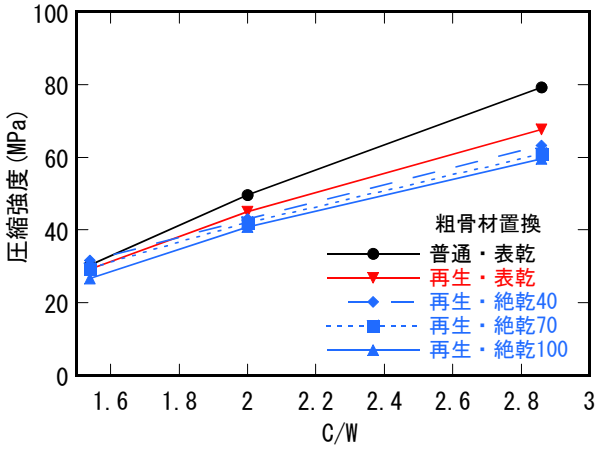
図－5 粗骨材置換での W/C=50%のスランプ経時変化



図－7 細骨材置換での C/W と圧縮強度との関係



図－6 粗骨材置換での W/C=65%のスランプ経時変化



図－8 粗骨材置換での C/W と圧縮強度との関係

の経時変化に差は見られなかった。絶乾状態の再生細骨材に水量を加えた場合，表乾状態で用いた場合よりもスランプの低下が少し小さい傾向があった。

再生粗骨材を用いた場合に，加えた水量に関わらずスランプの低下はほぼ同じであった。また，表乾状態で再生粗骨材を用いた場合との差もほとんど無かった。

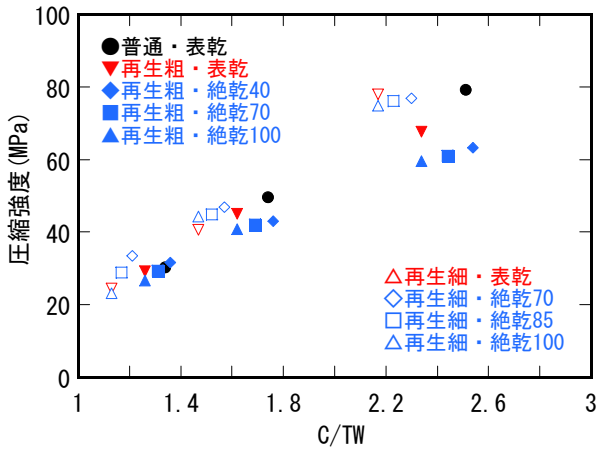
以上から，絶乾状態の再生骨材を用いた場合に，加えた水量に関わらず，スランプ低下に大きな差が見られず，セメントの水和反応等による強ばりにより，同じようなスランプ低下になったと考えられる。ただし，絶乾状態で再生粗骨材を用いた場合に比べ，再生細骨材を用いた場合，骨材の表面積が大きいため，一度吸収された水分が，骨材表面の濡れに影響を及ぼしたため，スランプの経時変化が多少小さかったのではないかと考えられる。

4. 絶乾状態で用いたコンクリートの硬化後の強度および弾性係数に関する検討

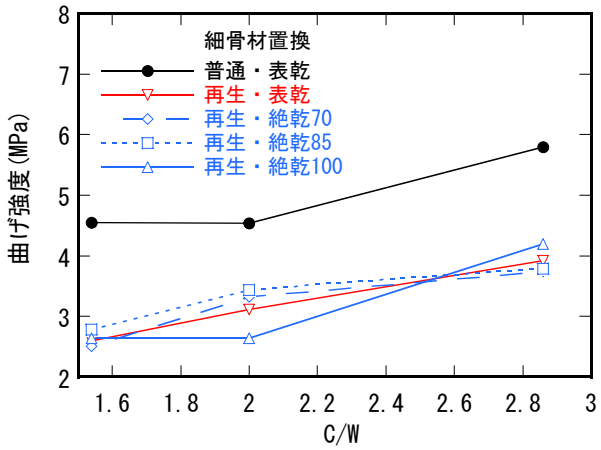
4.1 圧縮強度について

図－7～図－8 に細骨材または粗骨材を置換した場合の C/W と圧縮強度との関係を示す。再生細骨材を用いた場合，表乾状態や絶乾状態に関わらず，C/W と圧縮強度の関係は直線関係となった。一方で，再生粗骨材を用いた場合，C/W = 2.0 まで直線関係だが，C/W = 2.86 となると砕石・川砂を用いた場合より圧縮強度が小さくなった。これは，既往の研究 [3)]で指摘されるように，再生粗骨材の粒子強度の影響により，十分な圧縮強度が得られなかったことが原因と考えられる。再生細骨材では，同様の傾向は見られない。既往の研究では，モルタルの圧縮強度に再生細骨材の粒子強度が影響するとの報告がある [4)]。しかし，コンクリートに用いた場合，著者の既往の結果 [1)]でも直線関係が得られており，粗骨材の粒子強度の影響が，細骨材の粒子強度の影響よりも大きいことを示していると考えられる。

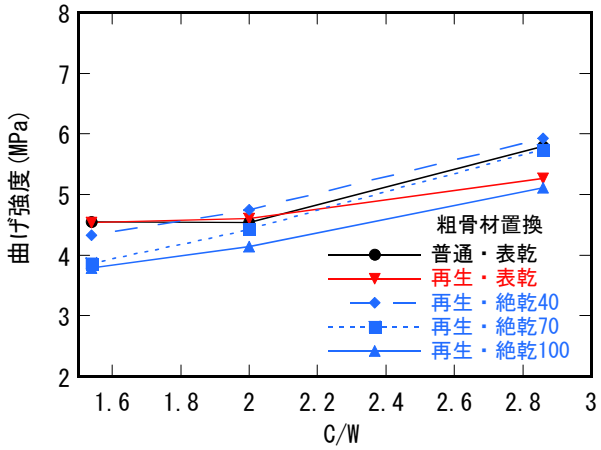
また，絶乾状態で再生骨材を用いた場合に，加える水量を少なくするほど，圧縮強度が高い傾向が見られた。そこで，加える水量の影響を確認するため，図－9 に C/TW と圧縮強度との関係を示す。砕石・川砂を用いた場合(R^2=0.988)と再生細骨材を用いた場合(R^2=0.987)はそれぞれ直線関係となった。なお，()内は，最小二乗法での直線に近似した場合の寄与率である。ただし，再生細骨材を用いたコンクリートは，粗骨材量が少ないため，圧縮強度が少し大きくなった [5)]と考えられる。再生粗骨



図－9 C/TW と圧縮強度との関係



図－10 細骨材置換での C/W と曲げ強度との関係

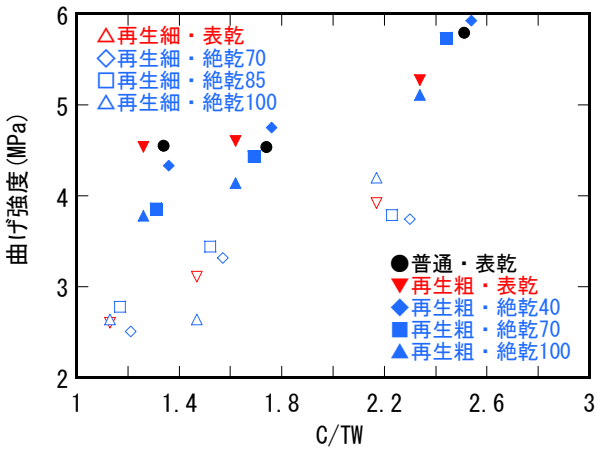


図－11 粗骨材置換での C/W と曲げ強度との関係

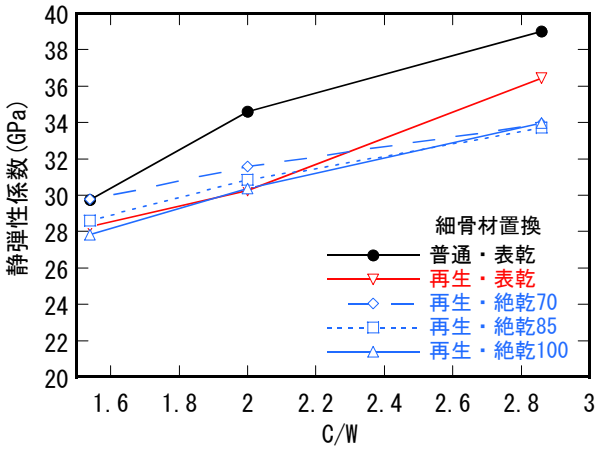
材の場合(R^2=0.991)も直線であるが，C/TW が大きいと，粒子強度の影響に加え，3.1 節で見られた絶乾状態で用いるために加えた水によりブリーディングが増加し，脆弱部が多くなり，普通骨材や再生細骨材を用いた場合より圧縮強度が低くなったのではないかと考えられる。

4.2 曲げ強度について

図－10～図－11 に細骨材または粗骨材を置換した場合の C/W と曲げ強度との関係を示す。



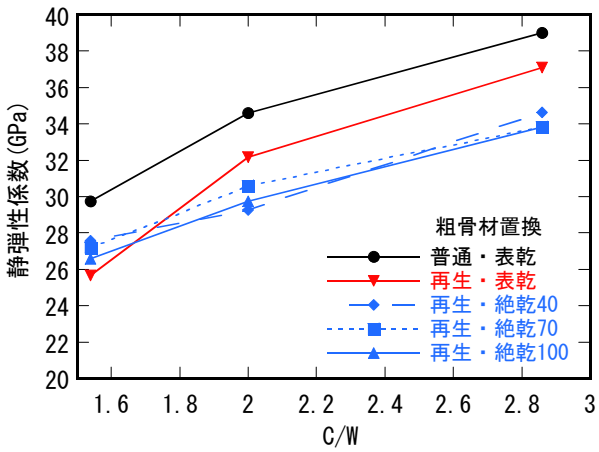
図－12 C/TW と曲げ強度との関係



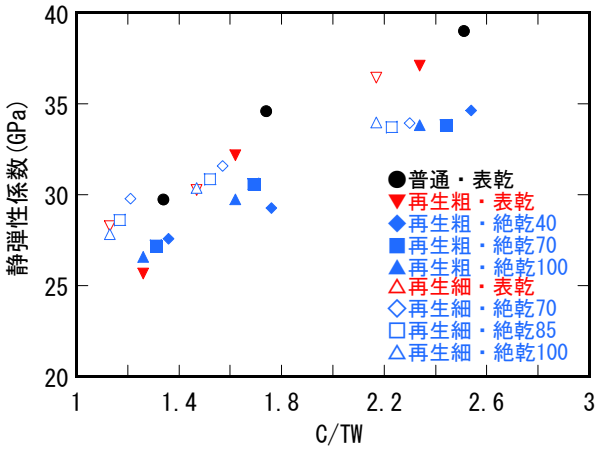
図－13 細骨材置換での C/W と静弾性係数との関係

圧縮強度の場合とは異なり，再生細骨材の場合，含水状態に関わらず砕石・川砂を用いた場合よりも曲げ強度が低下した。絶乾状態で使用した場合に，加えた水の量による変化はほとんど見られなかった。一方，再生粗骨材を絶乾状態で用いた場合，加えた水量が多いほど曲げ強度の低下が見られたものの，砕石・川砂を用いた場合の曲げ強度とほぼ同じ曲げ強度となった。

図－12 に C/TW と曲げ強度との関係を示す。川砂・砕石や再生粗骨材を使用した場合，曲げ強度と C/TW は直線関係(R^2=0.845)にあった。一方，再生細骨材を使用すると，C/TW との関係は直線(R^2=0.849)でも，川砂・砕石や再生粗骨材の場合に比べて曲げ強度が低下した。再生細骨材の含水状態に関わらず，曲げ強度の低下が起きているが，圧縮強度では大きな強度低下が見られなかったことから，モルタル部の強度低下よりも，配合上の特性，すなわち単位粗骨材量が小さいことが，本実験での再生細骨材を用いた曲げ強度の低下原因の可能性があると考えられる。



図－14 粗骨材置換での C/W と静弾性係数との関係



図－15 C/TW と静弾性係数との関係

4.3 静弾性係数について

図－13～図－14 に細骨材または粗骨材を置換した場合の C/W と静弾性係数との関係を示す。

再生細骨材および再生粗骨材を用いると，砕石・川砂を用いた場合に比べ，静弾性係数が低下した。絶乾状態での使用による静弾性係数の低下はあまり見られない。

図－15 に C/TW と静弾性係数との関係を示す。表乾状態で用いた場合(R^2=0.893)，再生細骨材を絶乾状態で用いた場合(R^2=0.893)，再生粗骨材を絶乾状態で用いた場合(R^2=0.972)の順に静弾性係数が低下したが，それぞれは C/TW と直線関係となった。

一般には，再生骨材の弾性係数が，普通骨材に比べて小さいために静弾性係数は小さくなる傾向になる。しかし，本実験での再生粗骨材の密度は比較的大きく，再生細骨材の密度は小さいものの，骨材量を少なくしたため，表乾状態での静弾性係数は C/TW と比例関係になったと考えられる。一方で，絶乾状態で用いて，必要水量を加えた場合，再生骨材の粒子が大きいほど，静弾性係数が低下した。粒子自体の弾性係数であれば，表乾状態でも低下することから，加えた水が影響していると考えられるが，本研究の結果だけでは推定できなかった。

5. まとめ

同じ構造物から発生した再生粗骨材（表乾密度 2.54g/cm^3，吸水率 2.32%），再生細骨材（表乾密度 2.32g/cm^3，吸水率 8.40%）を用いた本研究の範囲内で得られた傾向を以下に示す。

(1) 絶乾状態の再生骨材を用いたコンクリートのスランプは，再生粗骨材の場合に吸水量の 70%程度，再生細骨材の場合に 90%程度を加えると，砕石・川砂を用いた場合や，再生骨材を表乾状態で用いた場合と同程度となる。

(2) 絶乾状態で再生骨材を用いたコンクリートのスランプの経時変化は，加えた水量に関わらず，ほとんど差が見られず，経時変化への影響は少ない。

(3) 絶乾状態で再生骨材を使用し，練混ぜ時に必要水を加えた場合も，C/TW と圧縮強度は直線関係にある。ただし，再生粗骨材の場合，粒子強度や加えた水の余剰水が影響して強度低下する場合がある。

(4) 絶乾状態で再生骨材を使用し，練混ぜ時に必要水を加えた場合も，C/TW と曲げ強度は直線関係にある。ただし，再生細骨材を用いる場合に粗骨材の使用量が少ないと曲げ強度が低下する場合がある。

(5) 絶乾状態で再生骨材を使用した場合，C/TW と静弾性係数は直線関係がある。ただし，再生粗骨材を使用すると静弾性係数低下への影響が大きい。

参考文献

1) 麓隆行，山田優：再生細骨材の使用がコンクリートの性状に及ぼす影響とその原因について，土木学会論文集，No. 767/V-64，pp. 61-73，2004.8

2) 佐川康貴，松下 博通，川端 雄一郎：細孔容積に着目した再生骨材コンクリートの中性化および塩分浸透性状の評価 ，コンクリート工学，Vol. 47，No. 2，pp. 21-29，2009.2

3) 長瀧重義，佐伯竜彦，飯田一彦：再生粗骨材を用いたコンクリートの諸特性，セメント・コンクリート論文集，Vol. 52，pp. 462-467，1998.12

4) 佐川康貴，松下博通，川端雄一郎：再生細骨材の品質が細孔容積と強度の関係に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol. 29，No. 2，pp. 385-390，2007.7

5) 川上英男：コンクリートの弾性係数に及ぼす粗骨材の粒径と量の影響，日本建築学会北陸支部研究報告集(構造・材料系)，Vol. 44，pp.5-8，2001.