論文　再生細骨材の物理的性質がコンクリート性状に及ぼす影響について

麓　　隆行[*1]・船橋　康史[*2]・長峰　　慎[*3]・山田　　優[*4]

要旨：再生細骨材は品質変動が大きく，コンクリート用骨材として用いることが難しい。しかし，コンクリート性状と再生細骨材の性質との関係を明らかにし，その細骨材の性質により管理することができれば，利用促進につながると考えられる。本研究では，普通細骨材および再生細骨材 6 種類を用いてコンクリートを作製し，その性状を調べた。その結果，細骨材中に吸収されている水分がコンクリートの強度性状に大きな影響を及ぼしており，コンクリート中の総水量を管理することで強度管理が可能であることなどがわかった。

キーワード：再生細骨材，セメント水比，吸水率，コンクリート中の総水量，圧縮強度

1.　はじめに

良質な天然細骨材である川砂が環境破壊などの理由により枯渇し，陸砂や海砂だけでなく，スラグ細骨材，再生細骨材といった副産物細骨材の利用が望まれている。しかし，副産物細骨材の場合，細骨材の持つ品質は製造場所およびその過程により変動が大きいため，現在の配合設計方法では，使用する細骨材を用いた試し練りを必要する。特に再生細骨材の品質変動は大きく，配合決定が煩雑で，その利用促進を妨げている要因の一つである。仕様規準が性能照査型へと移行している現状では，細骨材の性質からコンクリート性状を予測，評価することが望ましい。しかし，細骨材の性質とコンクリート性状との関係は必ずしも明確ではない。

本研究では，再生細骨材を用いたコンクリートの配合設計方法を検討するため，再生細骨材の物理的性質とコンクリート性状との関係を調べた。実験では，まず 6 種類の細骨材を用い，コンクリートのフレッシュ性状および硬化後の強度と，細骨材の物理的性質のうち，吸水率，表面積との関係を考察した。次に，その結果から再生細骨材を用いたコンクリートの強度改善策についても検討した。

2.　実験概要

2.1　実験に用いた材料

本実験に使用した材料を，**表－1** および**表－2** に示す。細骨材として，普通細骨材 3 種，再生細骨材 3 種，計 6 種を使用した。普通細骨材としては，揖斐川産川砂，中国福建省産川砂，石灰石砕砂を用いた。再生細骨材には，コンクリート用再生骨材プラントにて製造された 1 種類および著者らが建築物の解体現場で入手したコンクリート塊を破砕して製作した 2 種類の計 3 種類を用いた。解体建築物は，昭和 7 年施工(解体時平均圧縮強度 28.2N/mm^2)および昭和 32 年施工 (解体時平均圧縮強度 32.9N/mm^2)のもので，搬出したコンクリート塊をジョークラッシャおよびコーンクラッシャを用いて 25mm 以下の大

表－1　細骨材以外の使用材料

種別	使用材料	備考
セメント	普通ポルトランドセメント	密度 3.15g/cm^3
粗骨材	高槻産 硬質砂岩砕石	密度 2.67g/cm^3 吸水率 0.78% 実積率 59.8%
AE 減水剤	リグニン スルホン酸系	遅延型
空気量 調整剤	変性アルキル カルボン酸系	—

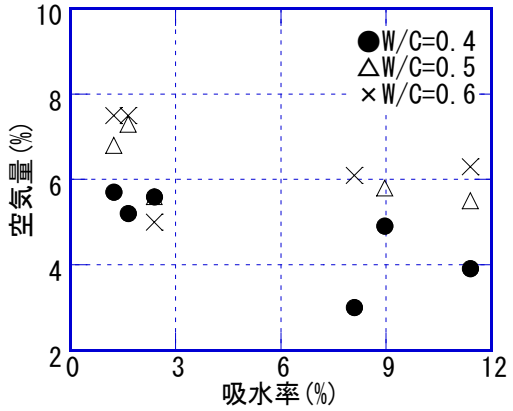
*1 大阪市立大学大学院助手　工学研究科土木工学専攻　修(工)（正会員）
*2 大阪市立大学　工学部土木工学科
*3 大阪市立大学大学院　工学研究科土木工学専攻
*4 大阪市立大学大学院教授　工学研究科土木工学専攻　工博（正会員）

表－2　実験で用いた細骨材

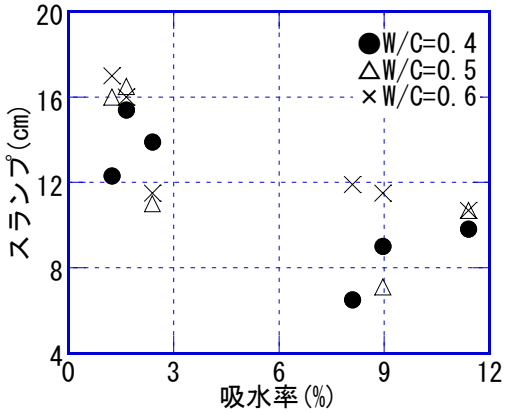
分類	記号	産地，原料または製造場所	絶乾密度 (g/cm^3)	吸水率 (%)	F.M.	実積率 (%)	粒径判定実積率(%)	BET 比表面積 (m^2/g)
普通細骨材	NS-I	揖斐川産川砂	2.52	2.39	2.58	67.0	58.6	1.83
	NS-C	中国福建省産川砂	2.55	1.65	2.61	62.7	59.7	0.82
	NS-L	石灰石砕砂	2.64	1.24	2.57	63.5	55.3	0.74
再生細骨材	RS-P	再生骨材プラント	2.13	8.97	2.32	67.3	56.8	4.08
	RS-HA	建築物(昭和 7)	2.18	8.10	3.09	67.8	55.8	4.91
	RS-HB	建築物(昭和 32)	1.99	11.40	2.62	65.6	59.2	4.42

表－3　川砂および砕石を用いた場合の配合（基本配合）

W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m^3)					
		W	C	S	G	AE 減水剤(%)	空気量調整剤(%)
40	41.2	173	433	680	1004	C*0.25	C*0.0035
50	43.2	163	326	762	1037	C*0.25	C*0.0035
60	45.2	163	272	817	1025	C*0.25	C*0.0035



図－1　吸水率と空気量との関係



図－2　吸水率とスランプとの関係

きさに破砕した後，0.15～2.5mm の粒径範囲の部分を再生細骨材として回収した。

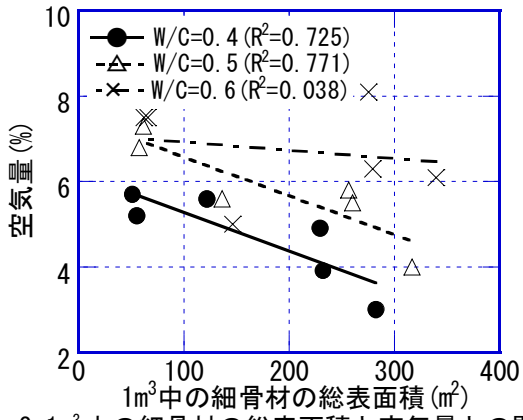
2.2　本実験での試験項目

使用した各細骨材について，絶乾密度，吸水率，粗粒率，単位容積質量，実積率および粒形判定実積率を JIS A 1109 ,JIS A 1102 ,JIS A 1104 および JIS A 5005 に従い，また比表面積を窒素ガスによる BET 吸着法により試験した。

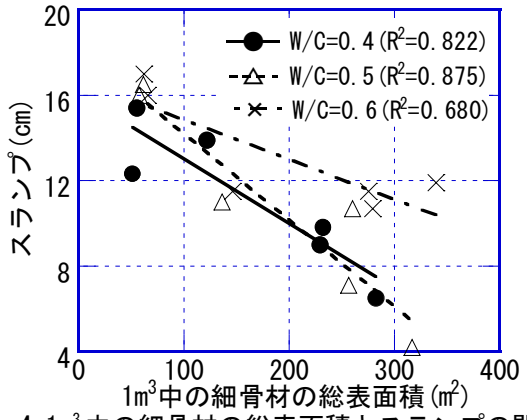
コンクリートの作製には，W/C を 40，50 および 60%の 3 種類とし，川砂(NS-I)と砕石を用いて，スランプ 12±2cm および空気量 5±1%を目標に調整した**表－3** に示した配合を基本配合とし，各種細骨材を体積置換して計 18 種類の配合を使用した。作製した 18 配合のコンクリートについて，まずスランプおよび空気量を試験した。次に，同じ 18 配合で AE 減水剤および空気量調整剤のみを変化させて，スランプ 12±2cm，空気量 5±1%に調整したコンクリートを作製し，標準養生した材齢 28 日での圧縮強度，引張強度および曲げ強度を調べた。練混ぜ方法は，粗骨材，細骨材 1/2，セメントおよび細骨材 1/2 の順に可傾式ミキサに投入し，30 秒間空練りを行った後，水を投入して 150 秒間練混ぜ，排出する手順とした。なお，再生細骨材は表乾状態を保つことが難しいため，表面水率 3%程度の状態で練混ぜに使用した。

3.　細骨材の性質とフレッシュ性状との関係

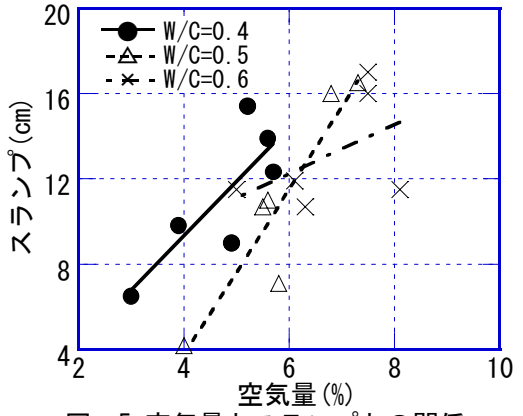
細骨材の吸水率とコンクリートのフレッシュ性状との関係を**図－1** および**図－2** に示す。



図－3 1m³ 中の細骨材の総表面積と空気量との関係



図－4 1m³ 中の細骨材の総表面積とスランプの関係



図－5 空気量とスランプとの関係

空気量およびスランプは，ともに W/C が大きいほど大きくなる傾向がある。また，細骨材の吸水率が大きくなると，すなわち再生細骨材を用いた場合，空気量，スランプともに小さくなる傾向が見られた。ただし，ばらつきが大きいため，吸水率のみを指標として空気量とスランプの低下量を予測することは難しい。

再生細骨材の場合に空気量およびスランプが低下する原因の一つに，細骨材粒子の形状や表面性状が考えられる。そこで，**表－2** に示した BET 比表面積からコンクリート 1m³ 中に占める細骨材の総表面積を算出し，それらと空気量，スランプとの関係を**図－3，4** に示す。なお，各指標のコンクリート性状への影響度を調べるため，図中には W/C ごとの最小二乗法による回帰直線とその決定係数を示し，以下の考察も同様に行った。フレッシュ性状との関係は W/C によって異なるが，いずれも細骨材の総表面積が大きいほど空気量およびスランプは減少した。

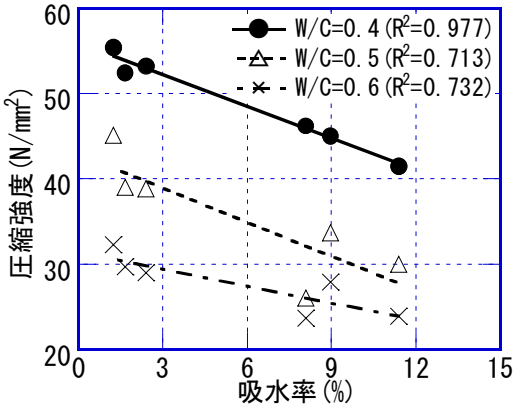
また，空気量の多少がスランプの大小に関係している可能性がある。そこで空気量とスランプとの関係を**図－5** に示す。空気量の増加に伴い，直線的にスランプが増加する傾向が見られた。既往の文献から空気量が 1%増加すると単位水量を 2～4%程度減らすことができること [1)]，また単位水量を約 3%増加するとスランプが約 3cm 増加すること [2)]がわかっている。すなわち，空気量がおよそ 1%低下するとスランプが 3cm 程度低下することになる。本実験結果においても，空気量とスランプとの関係が見られ，W/C=40，50%では空気量 1%低下に対するスランプ低下量が 2.5～3.3cm 程度であった。

以上より，比表面積の大きい再生細骨材を用いた場合，空気量およびスランプが低下し，それらを所定値に維持するためには，AE 減水剤や空気量調整剤の使用量の調整が必要となる。

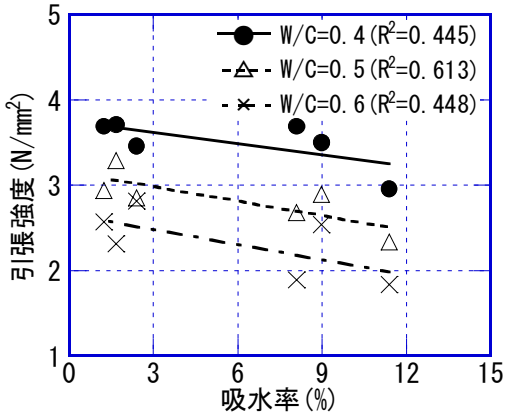
4. 細骨材の性質と硬化後の強度との関係

4.1 吸水率，W/C と硬化後の強度との関係

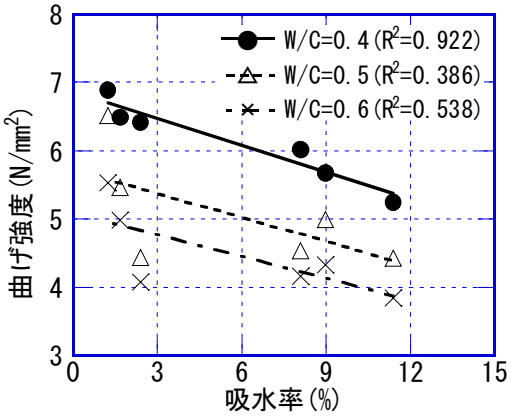
まず，**図－6～8** に示すように各強度試験結果が細骨材の吸水率によってどのように変化するかを調べた。引張強度および曲げ強度では，ばらつきが大きく相関が低いが，各強度は，W/C が大きくなると低下し，いずれの W/C の場合も吸水率の増加とともにさらに低下する。その低下率は，W/C に影響されず，同程度であった。すなわち，W/C=40～60%では，吸水率の高い細骨材を使用した場合にコンクリートの強度が低くなっており，このことから様々な細骨材を用



図－6　吸水率と圧縮強度との関係



図－7　吸水率と引張強度との関係



図－8　吸水率と曲げ強度との関係

いる際に，W/C の他に細骨材の吸水率がコンクリート強度に及ぼす影響が大きいことがわかる。

4.2　総単位水量と C/TW の導入

前項で示した実験結果から，細骨材は粗骨材に比べ表面積が大きく，細骨材の吸水率は硬化後のコンクリートの強度に影響を及ぼしやすい。従来の普通細骨材では，吸水率は 3%以下であったが，再生細骨材は吸水率 10%以上の低品質な場合もある。現在の配合設計では W/C により強度を管理しており，その単位水量には細骨材の吸水量は考慮されず，強度への影響は考えられていない。しかし，RS-P のように吸水率が約 9%になると，コンクリート 1m^3 あたりの細骨材の全吸水量は，配合にもよるが，約 50kg/m^3 に達し，無視できない量となる。そこで，次の考え方を導入することとした。

まず，コンクリートの配合から細骨材および粗骨材が吸水している水量を算出し，単位水量に加算することで，コンクリート中の総水量を求めた。これを単位総水量（TW）と呼ぶこととし，下記の式(1)のとおり定義した。また単位セメント量と単位総水量との比を計算し，これをセメント総水量比（C/TW）と呼ぶこととした。

$$TW = W + s \times \gamma_{ds} \times w_s + g \times \gamma_{dg} \times w_g \quad (1)$$

ここで，TW:単位総水量(kg/m^3)
W:単位水量(kg/m^3), s:単位細骨材体積(l/m^3),
γ_{ds}:細骨材絶乾密度(kg/l), w_s:細骨材の吸水率(%)
g:単位粗骨材体積(l/m^3), γ_{dg}:粗骨材絶乾密度(kg/l),
w_g:粗骨材の吸水率(%)

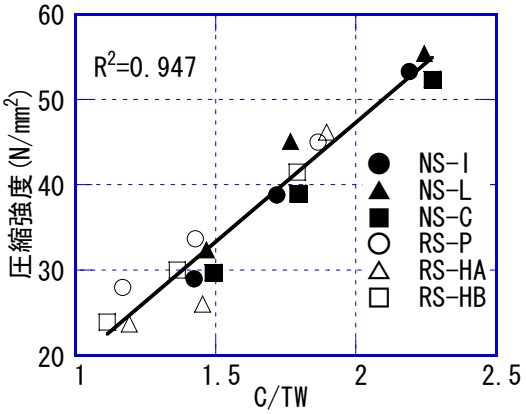
図－9～11 に C/TW と各強度性状との関係を示す。圧縮強度だけでなく，引張強度および曲げ強度との関係においても，C/TW は高い決定係数を示した。異なる細骨材を用いた場合でも，C/TW が同じであれば，ほぼ同じ強度を示している。これは，普通細骨材および再生細骨材の違いに関係なく，骨材に吸水された水分もコンクリートの強度に影響を及ぼすことを意味する。すなわち，高い吸水率の再生細骨材を用いる場合には C/W よりも C/TW によるほうがコンクリートの強度を管理しやすいといえる。

5.　細骨材の使用時の含水状態がコンクリート強度に及ぼす影響

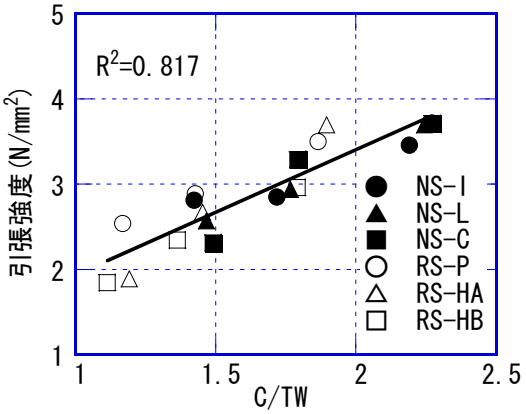
5.1　実験概要

上記の実験結果から，細骨材の使用時の含水状態を変化させれば，コンクリート全体の C/TW が上昇し，強度改善が期待できる可能性がある。既往の研究でも気乾状態の再生粗骨材

を用いた実験で，強度が改善されたとする報告がある[3]。そこで，絶乾状態の細骨材を使用し，細骨材が吸収する水量を補正水量として練混ぜ水に加水し，細骨材の含水状態を変化させてコンクリートを作製する実験を行った。なお，補正水量は，スランプ 12±2cm，空気量 5±1%が得られるように調整した。また，高性能 AE 減水剤(SP)を用い，補正水量を大幅に減少させ，普通細骨材を表乾状態で用いた場合と同じ C/TW に調整した配合も検討した。使用材料は**表－1** に加えて，ポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤，細骨材は**表－2** に示した NS-I，RS-P および RS-HB である。練混ぜは**表－4** に示した配合で行い，前章と同じ方法で行った。なお，粗骨材はいずれも表乾状態で使用した。



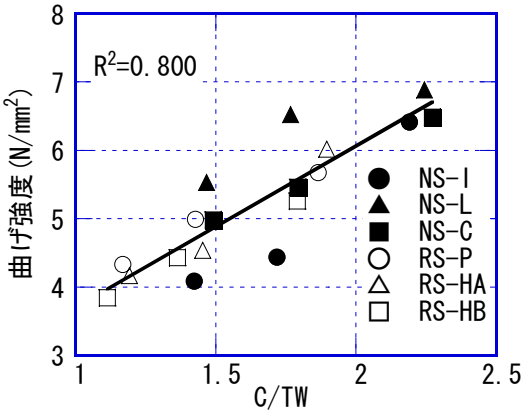
図－9　C/TW と圧縮強度との関係



図－10　C/TW と引張強度との関係

5.2 実験結果

まず，所定のフレッシュ性状を満たすために，補正水量を調整した結果，**表－4** に示すように NS-I の場合，吸水率の 60%，RS-P の場合は，吸水率の 65%，RS-HB では，吸水率の 75%を必要とした。これにより，絶乾状態で用いた場合の C/TW は，普通細骨材で表乾状態の場合より 0.06，再生細骨材で表乾状態の場合より 0.13 または 0.1 大きくなった。また，高性能 AE 減水剤を単位セメント量の 0.6%使用することにより，普通細骨材を用いた場合と同じ程度の C/TW が得られた。



図－11　C/TW と曲げ強度との関係

表－4　コンクリート中の総水量を調整する実験に用いた配合（スランプ 12±2cm，空気量 5±1%）

細骨材の種類	細骨材の状態	C/TW (%)	s/a (%)	単位量(kg/m³) W	C	S	G	AE 減水剤	AE 助剤**	Air (%)	SL (cm)	温度 (℃)	補正水量 (×吸水率)
NS-I	表乾	1.72	43.2	163	326	762	1037	0.815	1.141	5.6	11.0	27.4	—
	絶乾	1.78	43.2	172	326	744	1037	0.815	1.141	6.0	11.9	21.0	60%
RS-P	表乾	1.42	43.2	163	326	697	1037	1.222	0.326	5.5	12.0	23.8	—
	絶乾	1.55	43.2	196	326	644	1037	0.815	0.326	5.4	13.8	20.4	65%
RS-HB	表乾	1.36	43.2	163	326	656	975	0.815	1.141	5.5	11.0	22.3	—
	絶乾	1.46	43.2	223	326	588	1037	1.223	1.630	5.2	12.6	25.4	75%
	絶乾	1.72	43.1	212	366	584	1034	2.196*	1.098	4.2	11.0	24.4	—

*高性能 AE 減水剤(SP)を使用，**100 倍希釈溶液での使用量

強度試験結果を図－12～14 に示す。まず，圧縮，引張および曲げ強度とも前章で示した直線上にほぼプロットされる。また，絶乾状態で用いた場合，表乾状態で用いた場合に比べ C/TW の増加により 1 割程度の強度改善が見られた。さらに，絶乾状態の RS-HB を用いて高性能 AE 減水剤を使用したコンクリート（NS-I を表乾状態で用いた場合の C/TW に調整した）の強度は，いずれの強度の場合も表乾状態の NS-I を用いた場合と同程度以上の強度が得られた。すなわち，絶乾状態の細骨材を使用したため，練混ぜ水の吸収によるペーストの強度増加も考えられるが，その水量を考慮する必要なく，コンクリートの強度は C/TW により管理できる。

以上より，高い吸水率の再生細骨材を，乾燥状態で使用し，フレッシュ性状を調整するだけでもコンクリートの強度低下を減少させることができ，さらに高性能 AE 減水剤を用いて C/TW を調整すれば，普通細骨材と同等の強度を得ることができることがわかった。

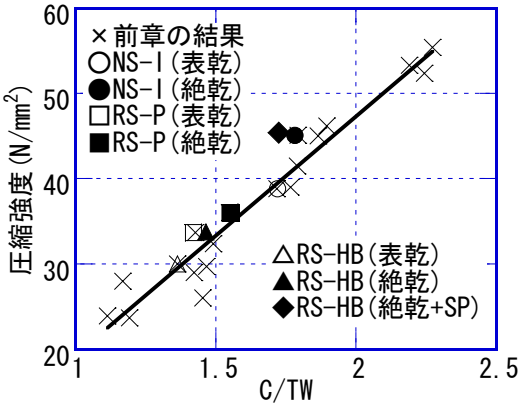
6. 結論

(1) 同一配合のコンクリートの空気量およびスランプは，コンクリート中の細骨材の総表面積が大きいほど低下する。

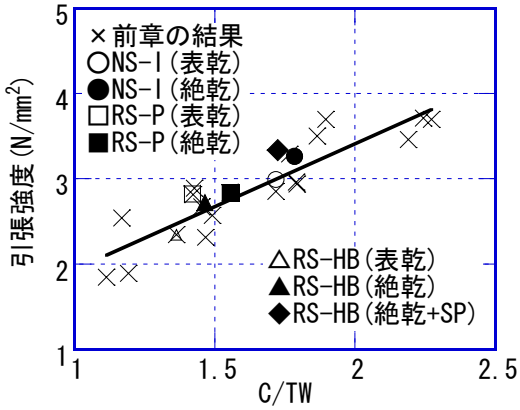
(2) 再生細骨材を用いたコンクリートの圧縮，引張および曲げ強度は，単位水量と骨材の総吸水量の和と単位セメント量との質量比(C/TW)と相関が高い。

(3) 高い吸水率の再生細骨材を使用する場合，乾燥状態で使用する，さらに高性能 AE 減水剤を使用することによりコンクリートの強度低下を防ぐことができる。

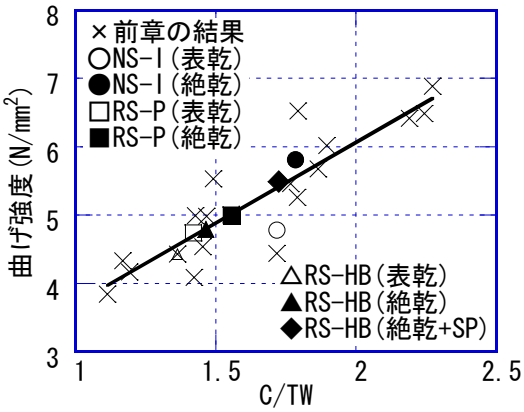
なお，本研究の一部は，（社）近畿建設協会研究助成により実施されたものである。



図－12　単位総水量が圧縮強度に及ぼす影響



図－13　単位総水量が引張強度に及ぼす影響



図－14　単位総水量が曲げ強度に及ぼす影響

参考文献

1) 岡田清,六車熙編:改訂新版コンクリート工学ハンドブック,朝倉書店,pp.618,1981.

2)日本建築学会編:コンクリートの調合設計指針・同解説,日本建築学会,pp.131,1999.

3)島崎磐,国枝稔,鎌田敏郎,六郷恵哲：含水状態が異なる再生粗骨材を使用したコンクリートの諸特性，コンクリート工学年次論文集,Vol.21,No.1,pp.199-204,1999.