

論文 超硬練りおよび硬練り再生コンクリートの締固め強度および乾燥収縮性状

上野 敦^{*1}・秋山 崇^{*2}・国府勝郎^{*3}

要旨：再生骨材の利用を比較的低強度の範囲で検討することとし、超硬練りコンクリートおよび硬練りコンクリートにおける締固め性状、強度および乾燥収縮の差異を碎石を用いた場合と比較検討した。この結果、再生粗骨材コンクリートの圧縮強度は、一般に碎石コンクリートより小さいが、強度レベルの小さな所ではその差が小さいことがわかった。また、再生骨材を超硬練りコンクリートに使用すると、圧縮強度で250～450 kgf/cm²を得ることができるとともに、配合上の特性から乾燥収縮も小さくなることがわかった。

キーワード：再生粗骨材, 超硬練りコンクリート, 圧縮強度, 乾燥収縮, 締固め性試験

1. はじめに

近年、資源の有効利用とともに建設廃材の処分場の不足等のために、コンクリート塊からの再生骨材の有効活用が重要な課題となってきている。しかし、再生骨材は一般に吸水率が大きく、また再生骨材を用いたコンクリートは所要のスランプを得るための水量が増加しやすいために乾燥収縮が大きく、強度発現も普通骨材を使用したものに比べて劣りやすいことなどから、積極的な活用が未だ行われていない。

本研究は、再生骨材の利用を比較的低強度の範囲で検討することとし、超硬練りコンクリートおよびスランプ5 cm程度の硬練りコンクリートにおける締固め性状、強度および乾燥収縮の差異を碎石を用いた場合と比較検討したものである。

表-1 骨材の物理試験結果

2. 使用材料および試験方法

2.1 使用材料

セメントは、比重3.16の普通ポルトランドセメントを使用した。細骨材は上野原産砕砂と陸砂の混合砂を使用した。粗骨材は普通粗骨材として八王子産碎石2005を、再生粗骨材

区分	産地・種類	比重		吸水率 (%)	単位容積質量 (kg/l)	実積率 (%)	粗粒率	
		表乾	絶乾					
普通細骨材	上野原砕砂+陸砂	2.55	2.46	3.64	1.655	67.3	2.41	
粗骨材	普通	八王子碎石	2.64	2.61	0.92	1.566	59.9	6.67
	再生	20~5mm	2.42	2.30	5.20	1.335	58.0	6.92

として20～5mmのものを使用した。なお、再生骨材は近隣の処理工場から、路盤用粒状材料として出荷しているものを入手して使用した。使用した骨材の物理試験結果を表-1に示す。なお、再生粗骨材の付着モルタル量は、5mmふるいに留まる絶乾状態の試料約7kgを5%塩酸溶液に10日間浸漬し、試験前の絶乾質量に対する浸漬後の5mmふるい通過量の比として表した。なお、

*1 東京都立大学助手 工学部土木工学科、(正会員)

*2 東京都立大学学生 工学部土木工学科

*3 東京都立大学教授 工学部土木工学科、工博(正会員)

塩酸溶液は1日ごとに取り替えた。この結果、付着モルタル量は平均41.6%となった。

2. 2 試験方法

(1) 配合条件と締固め性

a) 配合条件

超硬練りコンクリートの締固めが良好な細粗骨材の粒度構成、すなわち最適細骨材率を後述の締固め性試験[1]によって検討した。具体的には、ペースト細骨材空隙比(Kp)および単位水量を一定とし、モルタル粗骨材空隙比(Km)を変化させ、「E98」に対するKmの影響を検討した。次にKmの最適値を定め、単位水量を一定として、Kpを変化させて最適な配合を定めた。

硬練りコンクリートの配合は、W/Cおよび単位水量を一定としてs/aを変化させ、スランプが極大となるs/aを定めた。

なお、超硬練りコンクリートの配合はプレーンであり、硬練りコンクリートの場合はAEコンクリートとしている。

b) 締固め性試験

締固め性試験[1]は、振動台上で試料を締固める際の締固めエネルギーEによる充填率の変化を式(1)に示す締固め関数で近似することによって、コンクリートの締固め性を評価するものである。具体的には、締固め関数から誘導される「初期充填率(Ci)」、「達成可能充填率(Cf)」、締固めの効率を示す「締固め係数(Ce)」および充填率98%に達するまでに必要なエネルギー「E98」の4指標によって締固め性を評価するものである。ゼロ空隙の示方配合の単位容積質量に基づいて、φ10×20cmの型枠に充填率100%に相当する量を投入し、振動開始からのコンクリートの沈下量をレーザ変位計で計測して充填率に換算し、締固め関数を自動処理によって得るものである。

試験時の振動条件は、超硬練りコンクリートについては、振動数75Hz、加速度5Gで3分間締固めを行い、スランプのあるコンクリートについては、振動数50Hz、加速度2Gで1分間締固めを行った。

$$\gamma = C_i + (C_f - C_i) \cdot \{1 - \exp(-bE^d)\} \quad (1)$$

ここに、 γ ：締固めエネルギーEにおける充填率(%)、E：締固めエネルギー(J/l)、 C_i ：試験開始時の初期充填率(%)、 C_f ：締固めエネルギー無限大における達成可能充填率(%)、b、d：実験係数

(2) 強度および乾燥収縮

a) 圧縮強度

圧縮強度試験は、締固め性試験後の供試体を標準養生し、材齢28日で行った。なお、超硬練りコンクリートでは、締固め終了時の充填率から空隙率を計算し、また硬練りコンクリートについては実測の空気量からセメント空隙比を求めた。

b) 乾燥収縮

乾燥収縮試験は、ゼロ空隙の示方配合の単位容積質量に基づいて、ホoppaを取り付けた10×10×40cmの型枠に充填率100%に相当する量を投入し、質量20kgのおもりを載せて、テーブルバイブレーションによって締固めを行った。翌日脱型した後、材齢7日まで湿布養生を行って基長を設定した後、20℃、60%RHの恒温恒湿室に保管し、コンタクトゲージによる長さ変

化および質量を測定した。

3. 実験結果および考察

3. 1フレッシュコンクリートの性状

(1) 超硬練りコンクリート

碎石および再生粗骨材を用いた超硬練りコンクリート (NNRCCおよびNRRCC) において、 K_p を 1. 2、単位水量を 110 kg/m^3 として K_m を 1. 1~1. 6の範囲で変化させた時の、締固め性試験による E_{98} の変化を図-1に示す。 E_{98} は K_m が増加すると低下し、 K_m がより大きくなってもほぼ一定値を示した。このことから K_m の最適値を再生粗骨材では 1. 3、碎石の場合 1. 4と定めた。また、図-1に示す結果から再生粗骨材を用いた場合、充填率 98% を得るための締固めエネルギー (E_{98}) は碎石の場合よりも小さく、また締固め中のペーストの浮き上がり等の性状から、再生粗骨材を用いた場合の単位水量は低減してもよいと判断された。

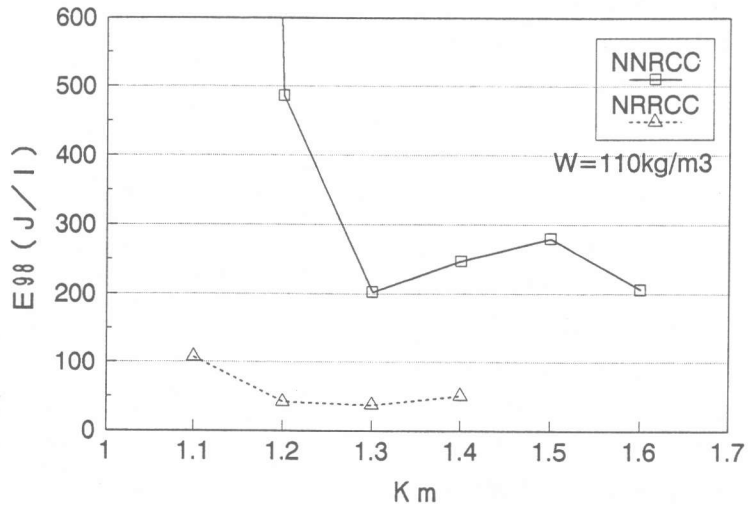


図-1 E98と K_m の関係

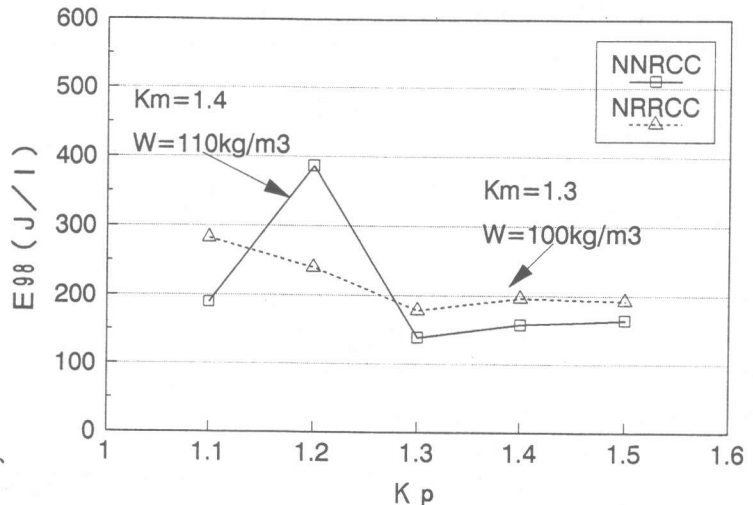


図-2 E98と K_p の関係

再生粗骨材を用いた場合の単位水量を 100 kg/m^3 、碎石では 110 kg/m^3 とし、 K_m をそれぞれ最適値としたもとで K_p を 1. 1~1. 5の範囲で変化させた。このときの締固め性試験における E_{98} の変化を図-2に示す。この結果から、いずれのコンクリートも細骨材は同じであるので K_p はともに 1. 3としてよいと考えられ、この値で十分な締固めが行えることが判断された。

これらの試験結果から、再生粗骨材および碎石をそれぞれ用いた場合、同等の締固め性状を得るための配合条件は、再生粗骨材の方が単位水量が少なく、またモルタル粗骨材空隙比 (K_m) が減少した。この理由は、本実験に使用した再生粗骨材の実積率は 58% で、碎石より約 2% 小さいが、再生粗骨材に比べて碎石は強固で鋭い角ばりが多いためにモルタル量が多く必要になったためと思われる。

(2) 硬練りコンクリート

碎石および再生粗骨材をそれぞれ用いた硬練りコンクリート（NNSLおよびNRSL）の配合は、W/Cが60%のもとでs/aを37.5, 42.5および47.5%に変化させたときのスランプ試験およびコンクリートの観察結果から最適細骨材率を41.0%とした。

なお、目標スランプを5cmとしたときの再生粗骨材および碎石コンクリートの単位水量は、それぞれ148および150 kg/m³とした。

3. 2 圧縮強度

圧縮強度試験は、3.1に示した最適配合条件を基本として、超硬練りコンクリートの場合はK_pを1.2, 1.3および1.4に変化させることによって水セメント比を変化させたものについて行った。また、硬練りコンクリートにおいては、水セメント比を40, 50, 60%に変化させて試験した。圧縮強度試験に供したコンクリートの配合を表-2に示す。

セメント空隙比と圧縮強度との関係を図-3に示す。この図から、碎石コンクリートのセメント空隙比と圧縮強度との関係は、超硬練りおよび硬練りコンクリートがほぼ同一の直線関係にあり、コンクリートのコンシテンシーによる強度発現の差異はないものと考えられる。一方、再生粗骨材コンクリートの圧縮強度は、強度水準が小さな範囲では碎石コンクリートとほぼ同一の直線となった。圧縮強度が300 kgf/cm²程度以上の範囲では、碎石コンクリートよりも強度は小さくなっている。これは、圧縮強度の発現が再生粗骨材の付着モルタルに影響を受けており、本実験の場合には約300 kgf/cm²より小さい範囲ではこの影響が無視できることを示していると考えられる。

また、再生粗骨材コンクリートであっても水セメント比を30~35%程度とした超硬練りコンクリートで空隙をほとんどなくせば、400 kgf/cm²程度の強度を得ることが示された。

表-2 コンクリートの配合

配合記号	K _m	K _p	s/a (%)	W/C (%)	単位量 (kg/m ³)					
					W	C	S	G	混和剤	
NRCC-1	1.4	1.2	37.2	50.9	110	216	779	1362	—	
	-2	1.4	1.3	36.5	44.9	110	245	756	1362	
	-3	1.4	1.4	35.8	40.4	110	272	734	1362	
NRCC-1	1.3	1.2	36.1	40.1	100	249	780	1247	—	
	-2	1.3	1.3	35.4	36.1	100	277	757	1247	
	-3	1.3	1.4	34.7	32.9	100	304	735	1247	
NNSL-1	(2.0)	(2.5)	37.0	40.0	150	375	648	1142	AE	
	-2	(2.0)	(2.2)	39.0	50.0	150	300	706	1144	減水剤
	-3	(2.0)	(1.9)	41.0	60.0	150	250	759	1130	C×0.25%
NRSL-1	(1.8)	(2.5)	37.0	40.0	148	370	651	1052	AE	
	-2	(1.8)	(2.1)	39.0	50.0	148	296	709	1053	減水剤
	-3	(1.8)	(1.9)	41.0	60.0	148	247	762	1041	C×0.25%

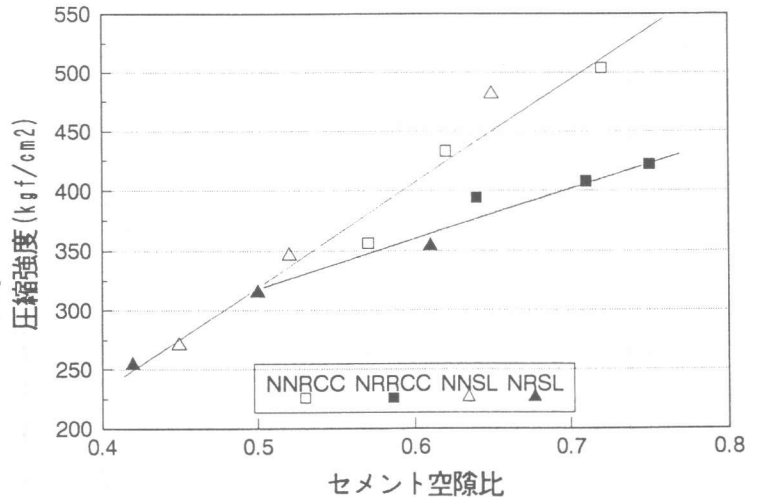


図-3 セメント空隙比と圧縮強度の関係

3. 3 乾燥収縮

乾燥収縮は、3. 1 に述べた NNRCC-2、NRCC-2、NRSL-3、NNSL-3 の最適配合条件で試験した。すなわち、既往の研究によれば、スランプのある通常の再生骨材コンクリートの品質は、一般に水量の増大のために劣る傾向が示されていることから、単位水量の小さな超硬練りコンクリートにおける品質改善効果を検討することとした。図-4 に曝露期間46日までの乾燥収縮の変化を示す。超硬練りコンクリートの乾燥収縮は、硬練りコンクリートよりも小さい結果となっており、単位水量の低減効果が明かである。また、それぞれのコンクリート中では既往の研究[2]と同様に、再生骨材コンクリートの乾燥収縮が大きくなっている。これらの供試体の質量変化率は、図-5 に示すとおりであり、乾燥収縮と質量変化率は概ね対応していることが認められる。

コンクリートの乾燥収縮

は、基本的にペースト部分に生じ、また水分の蒸発量に影響を受けると考えられるので、単位ペースト量当たりの乾燥収縮ひずみとコンクリート単位量からの水分蒸発量との関係を図-6 に整理した。超硬練りコンクリートの乾燥収縮は、単位水量の低下によって減少するが、単位ペースト量当たりでは、逆に大きな収縮を示す結果となった。これは、一定量の水分が蒸発した場合に生じる乾燥収縮が、セメントペーストの品質（水セメント比）に支配されることを意味しているものと考えられ、再生粗骨材の付着モルタルの影響は比較的小さいものと考えられる。

しかし、硬練りコンクリートでは、水分蒸発量が 50 g/l 程度以上となると、再生粗骨材を用いた場合は碎石の場合よりも単位ペースト量当たりの収縮が小さい傾向が顕著となり、また超硬練りコンクリートの場合にもその傾向が推察される。これは再生粗骨材の吸水率が大きいため、

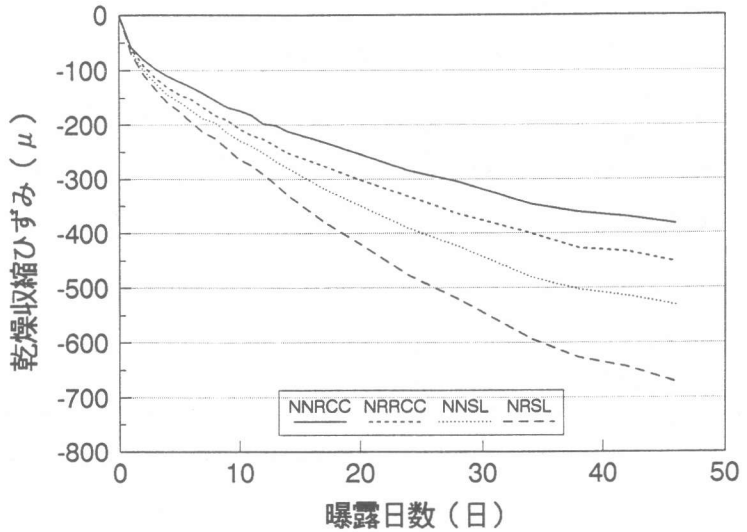


図-4 曝露後の乾燥収縮ひずみ

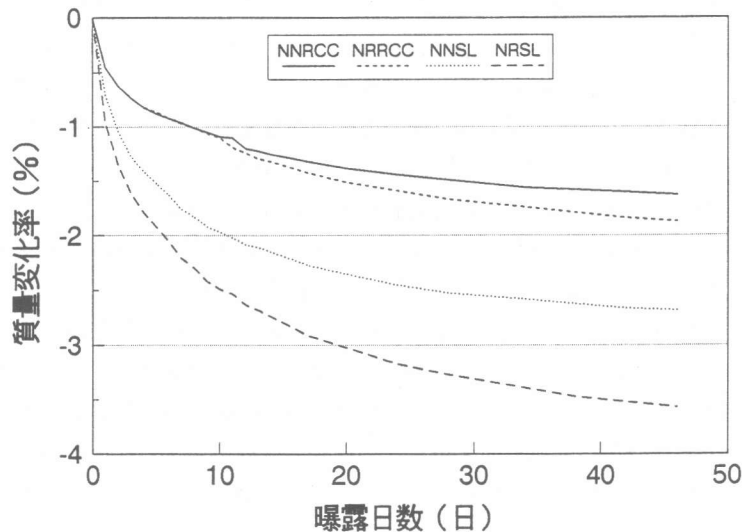


図-5 曝露後の質量変化率

その付着モルタル部分からペースト部分に水分が供給されていることによるものと考えられる。

4. まとめ

粗骨材に再生骨材および碎石をそれぞれ用いたコンクリートのフレッシュ時の性状と硬化後の強度および乾燥収縮を、超硬練りコンクリートと硬練りコンクリートの両者について比較検討した。その結果次の事柄がわかった。

①本実験に用いた再生粗骨材の実積率は、碎石より

若干小さいが超硬練りコンクリートに用いた場合、同等の締固め性を得るための単位水量は 10 kg/m^3 小さくすることができた。また、硬練りコンクリートでは単位水量はほぼ同程度となった。

②超硬練りコンクリートおよび硬練りコンクリートにかかわらず、碎石コンクリートのセメント空隙比と圧縮強度の関係は同一の直線となる。一方、再生粗骨材コンクリートの圧縮強度は、 300 kgf/cm^2 程度までは碎石コンクリートと同等であるが、強度がこれより大きくなるとセメント空隙比に対する強度の増加割合が低下する傾向が認められた。

③単位水量の小さな超硬練りコンクリートの乾燥収縮は、硬練りコンクリートよりも小さく、また、それぞれのコンクリートにおいて再生粗骨材を用いた場合の方が大きな乾燥収縮を示した。

④単位セメントペースト量当たり乾燥収縮と水分蒸発量との関係で検討した場合、同一の水分蒸発量ならば水セメント比を小さくした超硬練りコンクリートの方が硬練りコンクリートよりも大きな収縮を示した。また、水分蒸発が小さい初期の乾燥期間では、再生粗骨材と碎石の場合で変化がないが、乾燥期間が長くなり水分蒸発量が大きくなると、再生粗骨材の方が収縮が小さくなる傾向があり、再生粗骨材の付着モルタルからペースト部分に水分が供給されていることが推察された。

⑤再生粗骨材を水セメント比 $30 \sim 35\%$ 程度とした超硬練りコンクリートに使用し、空隙をほとんどなくせば、 400 kgf/cm^2 程度の圧縮強度を得ることができ、乾燥収縮も小さい。しかし、超硬練りコンクリートは転圧施工することになるので、施工中の骨材破碎の程度を検討する必要がある。

5. 参考文献

- 1) 國府勝郎・近藤拓也・上野 敦：RCCP用コンクリートの締固め性試験方法に関する研究、セメント・コンクリート論文集、No. 46、pp. 964~969、1992
- 2) 神山行男・後藤太一・樋口克己：再生骨材を用いたコンクリートの耐久性に関する 1, 2 の実験、土木学会第47回年次学術講演会講演概要集第5部、pp. 860~861、1992

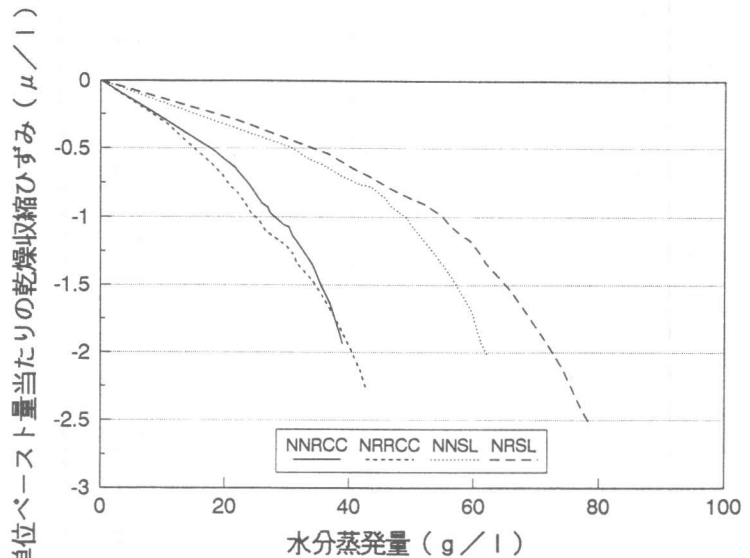


図-6 単位ペースト量当たりの乾燥収縮ひずみと水分蒸発量