

# 再生骨材の物理的特性とコンクリートへの利用に関する研究

## PHYSICAL PROPERTY OF RECYCLE AGGREGATE AND THE UTILIZATION AS CONCRETE AGGREGATE

添田政司\*・大和竹史\*\*・江本幸雄\*\*

by Masashi SOEDA, Takeshi YAMATO and Yukio EMOTO

### 1. はじめに

ヨーロッパでは、第二次世界大戦後の都市再建時にコンクリート廃棄物を破砕して再生骨材として有効利用している。日本では、建築分野で1965年頃から、土木分野で1975年頃から再生骨材のコンクリートへの有効利用に関する組織的な研究が開始された。しかし、コンクリート用骨材としての実用事例は民間で数例の報告があるのみで、依然として進んでいないのが現状である。この原因として原料となる解体コンクリートの種類により再生骨材の品質が異なること、コンクリート用骨材としての品質基準や使用基準が必ずしも明文化されていないこと、流通上の問題点が残されていることなどが挙げられる。

本研究では、まず再生骨材製造プラントで製造される再生骨材の品質を調査し、次にコンクリート強度および耐久性の観点から再生骨材の有効利用方法と問題点を検討した。また、ポーラスコンクリート用骨材としての再生骨材の適用性を実験的に検討した。

### 2. 再生骨材の物理的特性

#### 2.1 使用骨材

再生骨材製造プラントで製造された再生骨材のうち、原料となるコンクリート廃材の構造物の種類、築造年などが明らかで、比較的大量に搬入されるものを実験用試料とした。

#### 2.2 実験方法

密度・吸水率試験はJIS A 1110に従って行った。自然吸水による吸水履歴測定は、吸水率試験方法を適用し、再生骨材の水中における見かけの質量(水中質量)を連続的に測定し、24時間後に算出した吸水率から逆算して各時間における吸水率を測定した。迅速吸水試験は真空状態で60分間吸水した後、高周

\*福岡大学講師 工学部土木工学科 (〒814-0180 福岡県福岡市城南區七隈 8-19-1) \*\*同 大学教授 工学部土木工学科

波によって30分間強制乾燥させ、吸水率を求めた。モルタル付着率の測定は付着モルタルを塩酸で完全に除去して求めた。塩分含有量試験は、JCI-SC4に準じて可溶性塩分量を測定した。

### 2.3 実験結果および考察

#### (1) 再生骨材の密度・吸水率および塩分含有量

図-1は発生箇所の異なる解体コンクリート構造物から製造した再生骨材のJIS法による密度、吸水率を示したものである。一般に用いられる天然骨材の密度は2.6以上で、吸水率は3%以下とされているが、今回の実験で得られた再生粗骨材は、密度が2.5以下と小さく、吸水率はほとんどが3%を上回った。これは、天然骨材に付着したモルタルが大きく関与しているものと考えられる。そこで、原骨材に付着したモルタルについて検討を加えた。

再生骨材のモルタル付着率を図-2に示す。モルタルの付着率は、構造物の種類によって異なり、少ないもので35%、多いもので60%程度であった。これは、解体コンクリート構造物の圧縮強度によって異なり、強度が低いほどモルタルが剥がれ易くなり、付着モルタル率は少なくなる傾向にあった。<sup>1)</sup>

次に、再生骨材の塩分含有量を図-3に、それら構

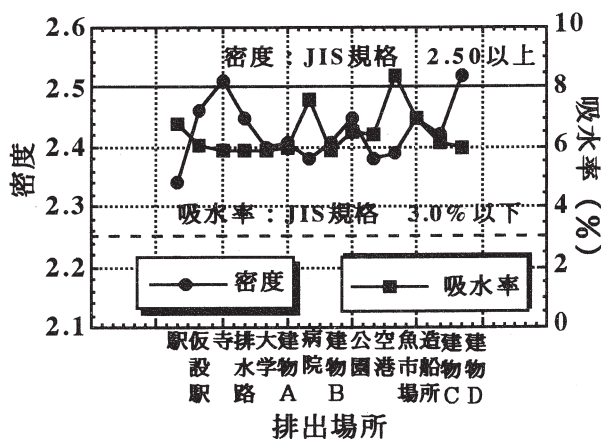


図-1 発生箇所の異なる再生骨材の密度・吸水率

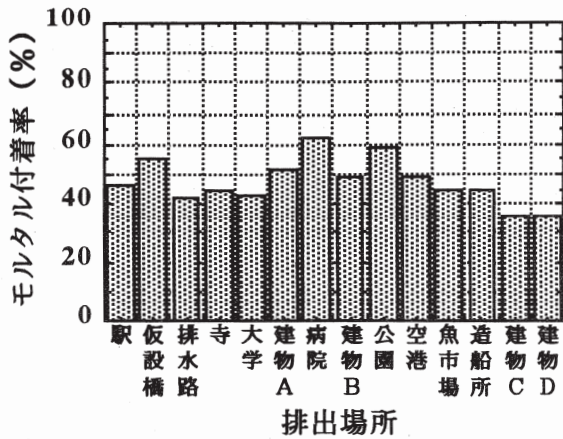


図-2 発生箇所別の再生骨材の付着モルタル量

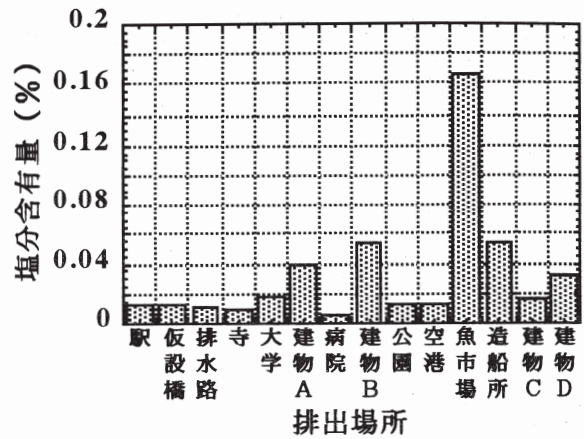


図-3 発生箇所の異なる再生骨材の塩分含有量

造物の供用年数と塩分含有量の関係を図-4にそれぞれ示す。解体構造物の種類と塩分含有量の関係では、魚市場や造船所のように海岸に近い構造物からは、0.05%以上の塩化物がモルタル中に含有されており、構造物のおかれる環境条件によって異なることが分かった。これを構造物の供用年数で見ると、九州地方ではかなり以前から海砂を使用していたため、供用年数が20～40年の解体コンクリート構造物に塩化物の多い物が見られた。これらのことから、再生骨材に付着したモルタルには、外部から浸透した塩化物や、海砂等の細骨材に内在した塩化物が多く含まれる場合があるので、その使用にあたっては十分に注意する必要があると思われる。

(2) 迅速吸水率測定<sup>2)</sup>

図-5は不特定、数種の再生骨材の自然吸水による吸水履歴を示したものである。いずれの骨材も吸水率の大小に関わらず、30分程度で80%程度吸水するものの、完全吸水するまでに10～14日程度かかることが確認された。また、完全吸水した場合、JIS吸水率に比べて、吸水率は全体的に1.0%程度大きくなった。このことから、再生骨材の吸水率をより正確に求めるためには従来のJIS法では時間的に問題があることから、今後は再生骨材に適した吸水率測定法を定める必要があると考えられる。次に、吸水、乾燥過程において時間的な短縮を図って吸水率を測定した結果が図-6である。図より、真空吸引および高周波による急速乾燥を利用した場合、吸水率の大小に関係なく再生骨材の吸水率は、JIS法によるものと比べて0.6%程度大きくなる傾向にあった。したがって、前述の自然吸水による吸水履歴(図-5)を考慮すると、本手法による迅速吸水率の測定によっても十分に適用できるものと考えられる。

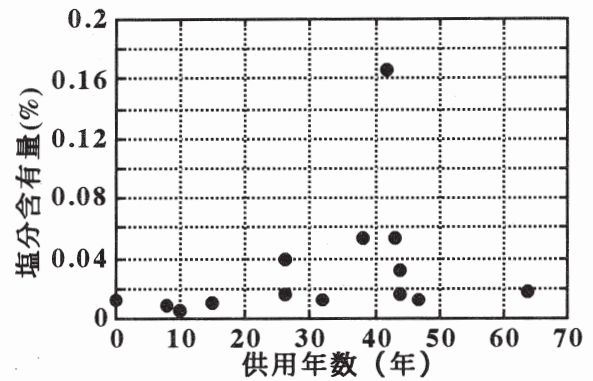


図-4 共用年数と塩分含有量の関係<sup>1)</sup>

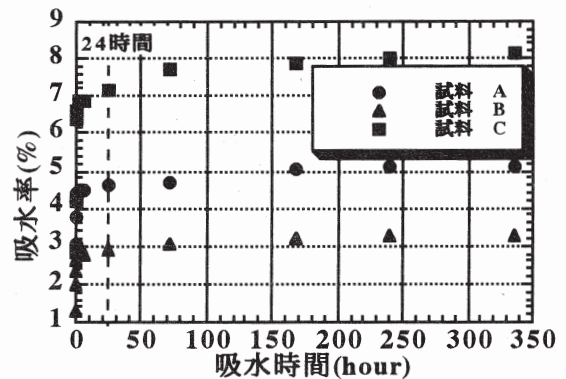


図-5 自然吸水による再生骨材の吸水履歴<sup>2)</sup>

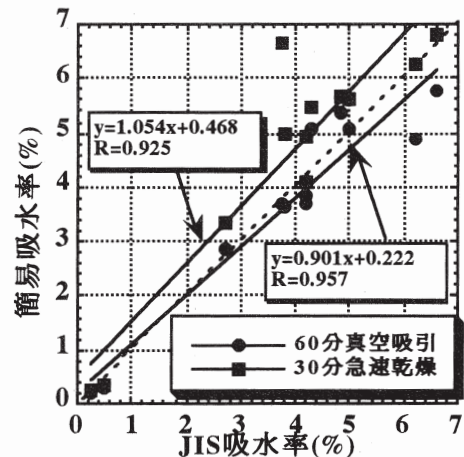


図-6 再生骨材の迅速吸水率試験結果<sup>2)</sup>

表-1 コンクリートの配合表<sup>3)</sup>

種類	スランプ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	S/a (%)	単位量					AE減水剤 ( /m <sup>3</sup> )	高性能AE減水剤 ( /m <sup>3</sup> )	AE剤 ( /m <sup>3</sup> )	収縮低減剤 (kg/m <sup>3</sup> )
					C	W	S	G1	G2				
RA0	7.9	4.0	50	44	326	163	793	1115	0	3260	0	0	—
RA30	7.3	4.0						780	287				—
RA50	7.5	4.1						557	478				—
RA100s1	9.1	4.6						0	955				7.5
RA100s2								含浸					
W/C 50	7.9	4.5	326	44	163	788	1107	0	3260	0	0	—	
W/C 55	11.5	4.3			179	804	0	889	0	0	81.5		
W/C 50	8	5			163	788	1107	945	3260	0	0		
W/C 40	7.2	4			130	788	0	1025	0	1630	0		

### 3. 再生骨材コンクリートの特性

#### 3.1 使用骨材

粗骨材として、最大寸法 20mm の再生骨材製造プラントより製造された再生粗骨材、および天然砕石として角閃岩を用いた。細骨材は十分に除塩した海砂を使用した。

#### 3.2 配合

本実験では再生骨材と天然砕石を混合使用した場合の影響および粗骨材として再生骨材を100%使用したときの水セメント比による影響について検討を行った。そのコンクリートの配合を表-1に示す。なお、表中の100s1は収縮低減剤をコンクリート中に置換したもの、s2は材齢28日後に収縮低減剤をはけ塗りしたものである。

#### 3.3 実験方法

打設したコンクリートについてJIS A 1132にしたがって円柱、角柱供試体を作成し、脱型した供試体を水温 20°C の水中で水中養生を行った。その後材齢 7 日および 28 日目に圧縮強度試験をそれぞれ実施し、耐久性に関する実験は乾燥収縮試験および凍結融解試験を行った。圧縮強度試験は JIS A 1108 にしたがって行った。乾燥収縮試験は 10 × 10 × 40cm の角柱供試体を使用し、温度 20 ± 1°C、湿度 60 ± 5% の恒温恒湿室にて材齢 28 日以降から実験を行った。長さ変化率の測定は、あらかじめ供試体に設置しておいた測点ゲージ間距離をコンタクトゲージを用いて、最初の 1 週間は毎日、その後 1 ヶ月まで 1 週間毎に、それ以降は 2 週間毎に測定した。凍結融解試験は 10 × 10 × 40cm の角柱供試体を、1 サイクルを 4 時間とした試験器に入れ、一定サイクル終了毎に供試体を取り出し、そのときの 1 次共鳴振動数を測定した。そしてその作業を 300 サイクルに達するか相対同弾性係数が試験開始時の 60% 以下になるまで行った。

#### 3.4 圧縮強度

図-7は再生コンクリートの圧縮強度と材齢の関係を再生骨材置換率ごとに比較したものである。材齢 7 日までの初期材齢においては再生骨材置換率の影響は大差ないが、材齢の進行に伴い、再生骨材置換率が大きくなるほど強度の発現性は著しく異なった。たとえば、材齢 91 日において、再生骨材置換率が 30、50、100% の場合、RA0 の約 90%、80%、70% の圧縮強度となった。このことより、再生骨材を天然骨材の 30% 程度を部分使用することにより強度低下を小さく抑えることが可能となった。

図-8は再生コンクリートの水セメント比による圧縮強度への影響を示したものである。この実験において、再生コンクリートにおける水セメント比 40% の場合は、水セメント比 50% の天然砕石コンクリートの試験結果を約 1 割程度上回ることができ、再生骨材コンクリートの水セメント比を低下させていくことによって強度を増進させることが確認できた。しかし、同一水セメント比における再生骨材コンクリートの強度は天然砕石コンクリートと比較すると約 75% 程度であり、強度的に劣るものとなった。このように同一水セメント比における天然砕石コンクリートと再生骨材コンクリートにかなりの強度差が現れた原因として、この実験で使用した再生骨材は吸水率 6.4% とかなり吸水率の高いものを使用したためであると考えられる。

#### 3.5 乾燥収縮<sup>3)</sup>

図-9は再生コンクリートの収縮低減剤の使用における乾燥収縮量への影響を示したものである。図より、収縮低減剤を置換していない再生骨材の場合 (RA100) は、天然砕石 (RA0) を用いた場合と比べ、約 1.5 倍もの乾燥収縮量を示し、著しく乾燥収縮量が大きくなった。一方、収縮低減剤を置換した場合 (RA100s1、RA100s2) は、RA0 とほぼ同程度の収縮

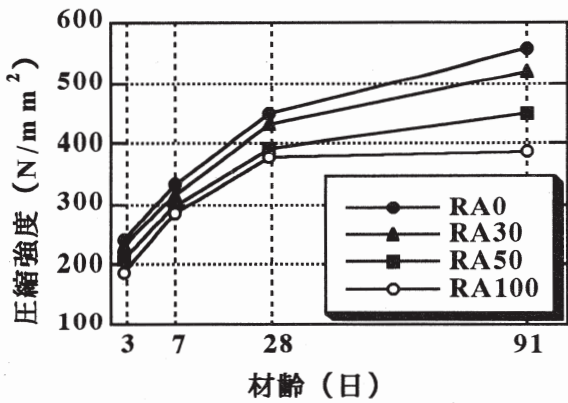


図-7 混入率ごとの圧縮強度と材齢の関係

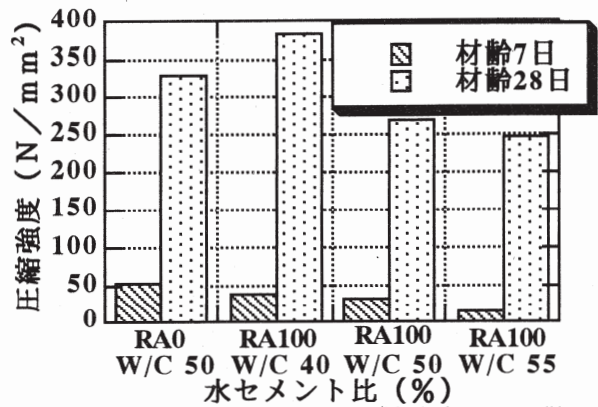


図-8 水セメント比による圧縮強度への影響<sup>2)</sup>

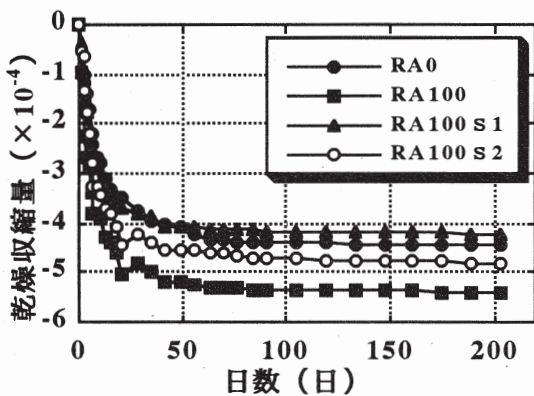


図-9 収縮低減剤使用による乾燥収縮量への影響<sup>2)</sup>

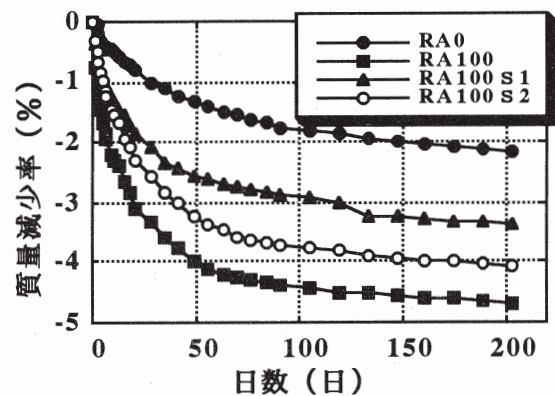


図-10 収縮低減剤による質量減少率への影響<sup>2)</sup>

量まで低減できることが確認できた。再生骨材を使用した場合の収縮低減剤の有無で比較すると、収縮低減剤を置換したものおよび含浸させたものは、置換しない物に比べて乾燥材齢約200日で約75%および約85%に低減された。また乾燥収縮低減剤の効果は硬化後に含浸する事によっても、置換した場合ほどではないが乾燥収縮量を抑制できることが確認できた。質量減少率は、図-10で示すように、天然砕石(RA0)を用いた場合が最も小さく、再生骨材を用いた場合でも収縮低減剤を用いることによって、乾燥収縮量と同様に、質量減少量は著しく低減された。これらのことより、一般に再生骨材を用いたコンクリートは乾燥収縮量が大きくなるといわれているが、収縮低減剤の使用は、乾燥収縮低減の目的で再生コンクリートにも適用可能であるということが明らかとなった。

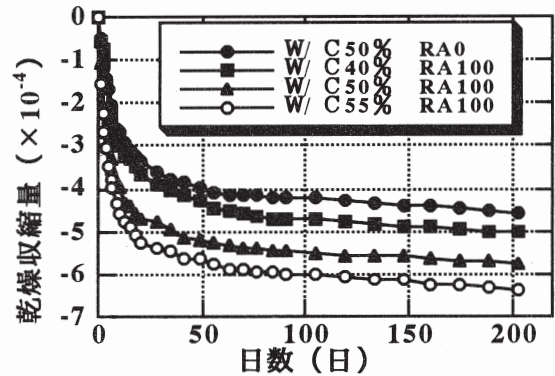


図-11 W/Cの相違による乾燥収縮への影響<sup>2)</sup>

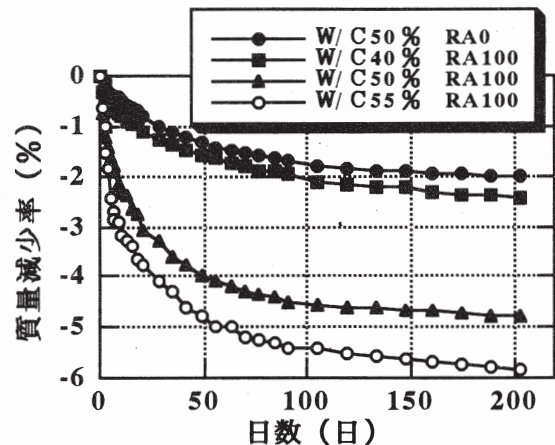


図-12 W/Cの相違による質量減少率への影響<sup>2)</sup>

図-11は再生コンクリートの再生骨材100%使用時の水セメント比による乾燥収縮への影響を、図-12にはその時の質量減少量を示したものである。図より、天然砕石を用いた場合の乾燥収縮量は、材齢200日で約200 $\mu$ mと最も小さくなった。再生骨材を用いた場合は、水セメント比が小さくなるに伴い、乾燥収

縮量は小さくなる傾向にあった。同一水セメント比で比較すると、再生骨材コンクリートは天然砕石を用いたコンクリートに比べ材齢200日で約 $120\ \mu\text{m}$ 程度大きくなったが、水セメント比を小さくすることによって、収縮量は、ほぼ同程度まで抑制できることがわかった。

質量減少率は長さ変化の時と同様に、再生コンクリートの $W/C=40\%$ は天然砕石コンクリートの $W/C=50\%$ とほぼ同程度の値を示したが、同一水セメント比で比較すると、再生骨材コンクリートは天然砕石コンクリートよりも大きな質量減少を示した。

以上の結果より、再生骨材を用いる場合の乾燥収縮量を低減する方策としては、乾燥収縮低減剤を用いるか、あるいは低水セメント比にすることによって、収縮量を抑制することが可能になるとと思われる。

### 3.6 耐凍害性<sup>3)</sup>

図-13は再生骨材置換率の異なる再生コンクリートの水中凍結融解試験結果を示したものである。RA100では約60サイクル、RA50では約160サイクルで相対動弾性係数が60%以下になった。しかし、RA30の場合は置換率0%のものに比べると劣るものの、300サイクルを過ぎても相対動弾性係数が60%以上を維持し、再生骨材置換率が増えるにつれ耐凍害性が劣るという結果が得られた。

一般的に天然砕石コンクリートでは水の凍結膨張を緩和する連行空気量を4%以上とすれば良好な耐凍害性が得られ、軽量骨材コンクリートではこれより2%程度多い空気量を連行しても普通コンクリート同様な耐凍害性は得られない。これは多孔質である軽量骨材中の水中凍結に起因する骨材自身の破壊や骨材とモルタルとの付着破壊等によるものである。そのため軽量骨材と同様に多孔質で吸水率の大きな再生骨材を用いたコンクリートは、再生骨材の置換率が大きくなるほど耐凍害性が低下する傾向を示したと思われる。したがって、耐凍害性を確保するためには再生骨材置換率を30%程度と小さくすること、空気量を6%程度と多めにすることが有効であると考えられる。

次に図-14は再生骨材を100%使用し、水セメント比の異なる再生コンクリートの水中凍結融解試験結果を示したものである。この結果より、再生コンクリートで水セメント比40%の場合、水セメント比50%の天然砕石コンクリートの耐凍害性を大きく上回るという結果が得られた。このことから、水セメント比を低く抑えておくことも耐凍害性の向上に非常

に有効であると考えられる。

このことは、図-15に示す気中凍結融解試験においても同様の傾向が見られる。ただし気中凍結融解の場合、水中凍結融解時と比べて実験条件が緩やかなため、比較的大きい水セメント比においても300サイクル終了時の相対動弾性係数は60%を上回ってお

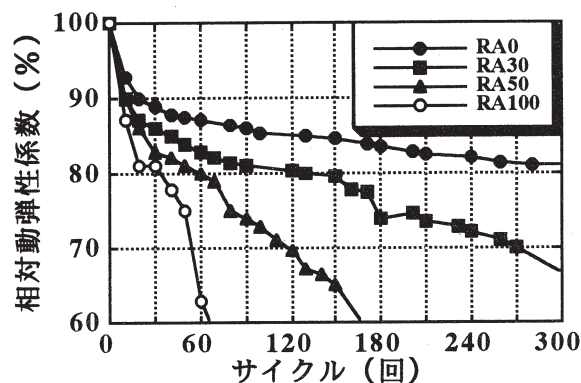


図-13 再生骨材混入率が耐凍害性に及ぼす影響<sup>3)</sup>

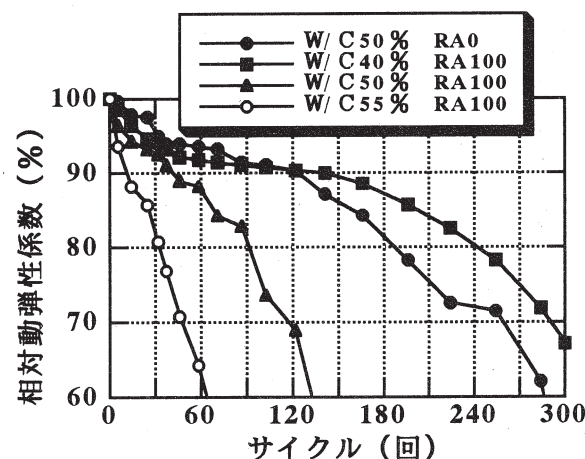


図-14 W/Cが耐凍害性に及ぼす影響 (水中)<sup>3)</sup>

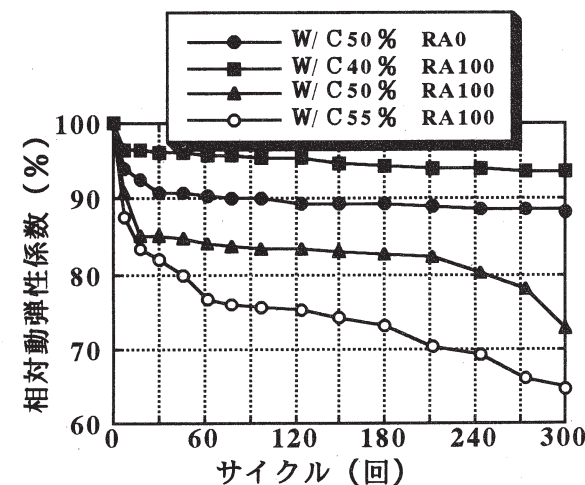


図-15 W/Cが耐凍害性に及ぼす影響 (気中)<sup>3)</sup>

り、一般的な環境で使用する場合ならば再生骨材を100%使用しても十分な耐凍害性は得られるものと思われる。

以上の結果から、再生コンクリートにおいて耐凍害性を確保するためには、①再生骨材置換率を低くする、②空気量を多くする、③水セメント比を低くすることが有効であるものと思われる。また、再生骨材を一般的な環境下で使用するのであれば、耐凍害性は十分得られるものと思われる。

#### 4. ポーラスコンクリートへの適用性

ポーラスコンクリートは連続空隙を有するため、強度面から見た場合、高強度は要求されない。そこで本節では、再生骨材のポーラスコンクリートへの利用可能性について検討を行った。

##### 4.1 使用骨材

天然骨材には、久山産の角閃岩5号、6号、7号砕石及び砕石2005を、再生骨材には再生骨材製造プラントより製造された5号及び6号の再生骨材の合計6種類を使用した。

##### 4.2 配合表

表-2に本実験で作成した5号砕石を用いた場合のポーラスコンクリートの一例を示す。なお、表中のW/Bは水結合比、SFは粉末状シリカフェーム(密度:2.20、比表面積:20m<sup>2</sup>/g、SiO<sub>2</sub>:89.8%)、SPはポリカルボン酸系の高性能AE減水剤を示す。

##### 4.3 実験結果および考察

図-16に骨材の種類による圧縮強度への影響を示す。いずれの骨材においても充填率が増加するに従い圧縮強度の増加する傾向が認められた。粒径の違いでは、5号砕石、6号砕石、砕石2005は同一充填率においてはほぼ同程度の圧縮強度を示しているが、7号砕石は他の骨材に比べ非常に低い値を示している。これは7号砕石の粒径が非常に小さく骨材

の総表面積が大きくなるため砕石に付着するペースト層の膜厚が不足したことが原因であると思われる。次に骨材の品質の違いで比較すると、6号再生骨材は、充填率60%以下では同一粒径の6号砕石とほぼ同程度の強度発現を示しているが、充填率70%において6N/mm<sup>2</sup>程度低い値を示している。この要因として、充填率が70%とペースト量が増えると、骨材そのものの強度に支配され、再生骨材に付着したモルタルが剥離し始め強度が低下したものと考えらる。

一方、5号再生骨材の場合は同一粒径の5号砕石に比べいずれの充填率においても3~5N/mm<sup>2</sup>程度低下する傾向を示していた。これは再生骨材には通常30~40%のモルタルが付着しており、その中でも粒径の大きい5号再生骨材の方が6号再生骨材に比べ、付着しているモルタル量が多いため強度の低下が生じたものと考えられる。これらのことから、再生骨材を使用する場合に、ある目標強度を確保するためには、その骨材の粒径によってペーストの充填率を増加させたほうが良いと考えられる。

図-17は再生骨材を用いたポーラスコンクリートに植生した芝の発育状況を示したものである。骨材粒径の違いでは、7号砕石は他の骨材に比べ著しく成長が悪く発芽91日で芝の背丈は30mm程度でしかなかった。これは、7号砕石の粒径が5~2.5mmと小さく、それにより形成される空隙も小さくなり、植物の根が空隙間に進入しにくかったことが原因であると考えられる。さらに7号砕石においては、散水時播種した種子が土壌と共に流れ出す傾向が目視観察により認められた。したがって、7号砕石を使用したポーラスコンクリートは、緑化コンクリートとしての使用が困難であると考えられ、むしろ7号砕石を使用した多孔質コンクリートは、植物が育成しにくいと言う特長を生かし雑草が生えてこない透水性のある駐車場の舗装や歩道として利用で

表-2 ポーラスコンクリートの配合の一例(5号砕石)<sup>4)</sup>

W/B (%)	充填率 (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				SP (%)	ペーストのフロー (mm)
		W	C	SF	G		
25	50	88	317	56	1619	1.3	168
25	50	87	317	56	1619	1.8	204
25	50	81	317	56	1619	3.2	267
35	50	111	271	48	1619	0.2	175
35	50	110	271	48	1619	0.5	171
35	50	108	271	48	1619	1.0	266
45	50	125	237	42	1619	—	167
45	50	125	237	42	1619	0.2	198
45	50	124	237	42	1619	0.5	267

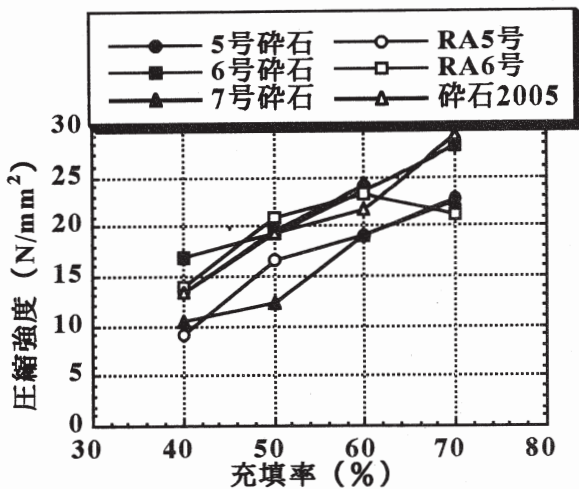


図-16 骨材の種類およびセメントペーストの充填率が圧縮強度に及ぼす影響<sup>4)</sup>

きるものと思われる。一方、5号碎石や6号碎石においては芝の育成も良好で、ほぼ同様の成長過程を示しており、骨材の粒径が6号以上であれば緑化コンクリートとして利用できるものと思われる。次に骨材の品質の違いについて検討してみると、同一粒径の6号碎石と6号再生骨材は発芽からほとんど同様の成長をたどっており、植生実験においても骨材品質の違いによる影響は認められなかった。

この結果より再生骨材は十分に緑化コンクリートの骨材として使用可能であることが確認された。

## 5. まとめ

本研究の結果をまとめると、次のようになる。

- (1)本実験で使用した再生骨材の密度および吸水率は付着したモルタルの影響を受け、いずれもJIS規格外にある。
- (2)モルタル付着率は、解体コンクリート構造物の強度に影響され、構造物の種類によって異なる。
- (3)再生骨材に付着したモルタルには、外部から浸透した塩化物や、海砂等の細骨材に内在した塩化物が多く含まれる場合がある。
- (4)再生骨材の吸水は約30分で80%程度は完了するが、完全吸水までに10~14日程度かかる。しかし、真空吸引や、高周波による急速乾燥を行うことで、短時間で吸水率を測定することが可能である。
- (5)再生骨材コンクリートの圧縮強度は、天然碎石コンクリートの約75%でしかないが、再生骨材を天然碎石の30%程度の部分使用によって同程度の強度が確保できる。
- (6)乾燥収縮量は天然碎石と比べてかなり大きくなるが、収縮低減剤の使用や水セメント比を低下させる

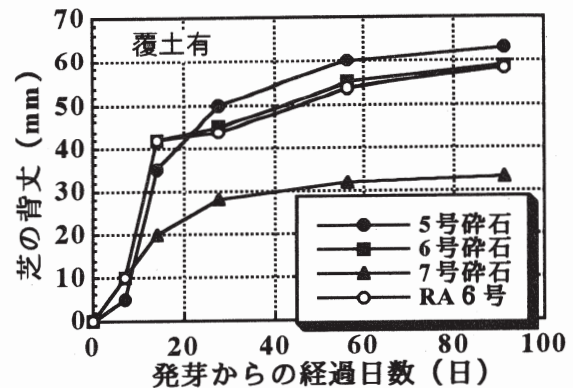


図-17 再生骨材を用いたポーラスコンクリートに植生した芝の発育状況<sup>4)</sup>

ことで同程度まで改善される。

(7)再生骨材の耐凍害性を確保するためには、再生骨材置換率を小さくする、空気量を多くする、水セメント比を低下させることが有効である。また、再生骨材を一般的な環境下で使用するのであれば、耐凍害性は十分得られる。

(8)ポーラスコンクリートの骨材として、5号再生骨材は5号碎石に比べ強度は若干低下するが、ペースト充填率を増加させることによって使用可能である。

(9)植物の生育状況において再生骨材と天然骨材との品質の違いによる顕著な差の影響は認められず、再生骨材を緑化コンクリートの骨材として利用可能である。

## 参考文献

- 1)江本幸雄,大和竹史,添田政司:各種コンクリートから製造された再生骨材の品質,セメント・コンクリート論文集 No.52,pp.444-448(1998)
- 2)尾畑成俊,大和竹史,江本幸雄,添田政司:再生骨材の急速吸水率試験方法による品質評価,土木学会西部支部研究発表会講演概要集 第1分冊,pp828-829(1999)
- 3)T.Yamato, Y.Emoto and M.soeda, FMechanical Properties, Drying Shrinkage and Resistance to Freezing and Thawing of Concrete Using Recycled Aggregate, Recent Advances in Concrete Technology Proceedings Forth CANMET/ACI/JCI International Conference Tokushima, Japan, pp105-121(1997)
- 4)添田政司,大和竹史,江本幸雄:ポーラスコンクリートへの再生骨材の適用性に関する実験的研究,コンクリート工学年次論文報告集,Vol.20,No.2,pp.1117-1122(1998)

(2000年7月24日受付 2001年1月25日受理)