コンクリート破砕物の再利用に関する基礎的研究

西林　新蔵*・矢村　潔*・吉野　公*・湊　正彦*

(1981年5月30日受理)

Study on the recycled concrete

Shinzo NISHIBAYASHI*, Kiyoshi YAMURA*, Akira YOSHINO*
Masahiko MINATO*

(Received May 30, 1981)

The study on the recycling concrete from demolition waste to produce useful aggregate for new concrete can be contributed to the solution of two problems. The first, there is the shortage of aggregate from river : the enforcement of environmental laws and a standpoint of maintenance and control of river led almost to closing aggregate plants at river side, secondary, there is a waste disposal problem : recent reports indicate that waste concrete in our country reach the substantial figue of five million cubic meter a year.

In this study, the physical properties of aggregates produced by crushing waste concrete, are exmined. And mix proportions, workability of fresh state and mechanical properties of hardened state of the concrete containing the crushed waste concrete in the place of conventional coarse aggregate, are investigated.

Through the experiments, it is concluded that recycling concrete for use as aggregate in new concrete is feasible and may become routine.

1. は じ め に

コンクリート用骨材の中で最も品質が優れ，かつ使用量が多かった河川産骨材の枯渇に対処するため，旧河川敷からの骨材の採取や砕石の利用などが図られてきた。しかし，これらの骨材資源も必ずしも無限のものでなく，将来にわたっての骨材供給源の確保は勿論のこと，需要に見合った骨材の計画的な開発，未利用資源や産業副産物，廃棄物等の有効利用など，資源の合理的な循環利用の道を探っておく必要がある。このような観点から，最近では高炉スラグのコンクリート骨材への利用が試みられており，一部ではすでに実用に供されている[1]。

本研究は，同様の観点から，建設廃棄物のうち土砂の次に多量に発生し，しかも再利用のほとんど行われていないコンクリート廃材をコンクリート骨材として活用していくために計画されたものである。

コンクリート構造物の解体によって生ずるコンクリート廃棄物は年間約500万m³にも達すると試算されているが，この廃棄物の一部が割栗石や擁壁の裏込めなどに使用されている他はほとんど埋立への投棄によって処分されている。このコンクリート廃棄物は比較的安定した材料であり，かつ多量に発生するものであるから，これを有効に再利用し得る可能性は十分に考えられる。

本研究は，コンクリート廃棄物を骨材として再利用する上での諸問題を明らかにしていくための基礎資料を得ることを目的とし，本論文では，まず組成の判っているコンクリートから破砕骨材を製造し，それら骨材の基本

* 土木工学科　Dep. of Civil Engineering

的な諸性質，およびフレッシュコンクリート並びに硬化コンクリートの基本的な性質について検討を加えた。

2. 実 験 概 要

2．1 実験計画および使用材料

2．1．1 実験計画

本実験で採用した主たる要因は，破砕して骨材を製造する原料となるコンクリート（以下原コンクリートと呼ぶ，またそれから得られた骨材を再生骨材と呼ぶ）の種類および再生骨材を用いて得られるコンクリートの種類である。すなわち，セメント量が異なる3種類の原コンクリート（セメント量：250，350，450 kg/m^3）から得られた再生骨材について物理的性質を明らかにするとともに，それぞれの再生骨材をセメント量の異なるコンクリート（セメント量：250，350，450 kg/m^3，以下再生コンクリートと呼ぶ）に用いた場合の影響に関してフレッシュ状態および硬化後の各種試験を通して明らかにしていく。

2．1．2 使用材料

原コンクリートには，普通ポルトランドセメント（宇部興産社製），砕石，川砂と海砂の混合砂を使用した。骨材の物理的性質を **Table** I に示す。

再生コンクリートには，粗骨材を除いて原コンクリートと同じ材料を使用し，さらに混和剤として減水剤（ポゾリス No.8 IMP.A）を使用した。

2．2 再生骨材の製造および試験方法

2．2．1 原コンクリートの配合

構造物の解体によって発生するコンクリート廃棄物の配合は，その構造物の種類，使用箇所，建設された時代等によってさまざまである。本研究では，一般的な土木構造物を対象に考えて単位セメント量を250，350，450 kg/m^3，スランプが10 cmの3種類のコンクリートを原コンクリートとして用いた。なお混和剤は使用しなかった。それぞれの示方配合を **Table** II に示す。

2．2．2 再生骨材の製造

原コンクリートは断面寸法が10～20 cm程度の大きさのブロックとして打設し，28日間水中養生したあとシートをかぶせて屋外に放置しておいた。破砕はコンクリート材令3～4ケ月で行った。破砕にはジョークラッシャ（ラサ工業製，シシグルトッグルクラッシャ107型）を用いて，最大寸法が25 mm程度の粗骨材が得られるようにオープンセット（ジョークラッシャの圧砕歯間の開き目の寸法）を調整して行った。得られた破砕物は，5 mmふるいでふるって細粒をとり除き，再生粗骨材とした。本実験では，破砕物の細粒分は使用しなかった。

2．2．3 再生骨材の試験

原コンクリートから製造したそれぞれの再生粗骨材について以下の試験を行った。

i）ふるい分け試験（JIS A1102）

ii）比重，吸水率試験（JIS A1110）

Table I Mechanical properties of aggregate

	Max. size (mm)	Specific gravity	Water Absorption (%)	Fineness modulus (F.M.)	Bulk density (kg/m^3)
Coarse aggregate	15	2.70	1.14	6.55	1560
Fine aggregate	—	2.59	1.57	2.73	1680

Table II Mix proportions of original concrete

Kind of mix.	Max. size of agg. (mm)	Slump (cm)	Air (%)	Water Cement ratio W/C (%)	Fine agg. natio s/a (%)	Water W (kg/m^3)	Cement C (kg/m^3)	Aggregate (kg/m^3)	
								Fine S	Coarse G
Type I	15	10	1.5	74	44	186	250	1088	820
Type II				53	40	186	350	1114	713
Type III				42	38	190	450	1092	642

iii）単位容積重量試験　(JIS A1104)
iv）洗い試験　(JIS A1103)
v）安定性試験　(JIS A1122)
vi）破砕試験　(BS 812-1951)
vii）モルタル付着量試験：安定性試験に準じて，硫酸ナトリウム溶液への浸漬と炉乾燥を繰返して，モルタル分を分解し，その損失量をモルタル付着量とした。

2．3　再生コンクリートの製造および試験

再生コンクリートの配合にあたっては，単位セメント量を 250，350，450 kg/m³ の3種類とし，スランプが 7.5 cm となるように単位水量を試練りによって定めた。また s/a は，試験により求めた最適 細骨材率 を採用した。それぞれのセメント量について，3種類の再生骨材とも同一の配合とし，また比較用に同一の水セメント比，スランプを有し，粗骨材として砕石を用いたコンクリートを打設した。

再生コンクリートの練混ぜにあたっては，再生骨材は表乾状態で使用した。練混ぜ時にスランプおよび空気量の測定を行うと同時に，強度試験用の供試体（ϕ 10×20 cm）を打設した。強度試験用の供試体は試験材令まで 20°C の水中養生を行い，材令3，7，28 日において圧縮強度および割裂引張強度の測定を行った。また材令 28 日には同時に応力～ひずみ曲線の測定も行った。

3．実験結果および考察

3．1　再生骨材の性質

本実験で得られた再生骨材の物理的性質をまとめて，Table III に示す。

3．1．1　原コンクリートの強度

Table III　Physical properties of aggregate produced from original concrete

		Type I	Type II	Type III
Max. size		25	25	25
Specific gravity		2.43	2.43	2.43
Water Absorption (%)		7.02	6.93	6.76
Fineness modulus		6.95	6.96	7.02
Bulk density (kg/m³)		1310	1310	1310
Percentage of solid volume (%)		53.7	53.7	53.7
Crushing strength	40t crushed value (%)	24.6	23.1	23.0
	10% fineness value (ton)	11.3	13.0	13.3
Soundness (%)		71.4	76.9	76.1
Fine particles passed through 88μ sieve (%)		1.7	1.5	1.3
Mortar content (%)		35.5	36.7	38.4

Table IV　Strengthes of original concrete

	Ages	Type I	Type II	Type III
Compresive strength (kg/cm²)	28 days	196	327	407
	at crushed	239	414	506
Tensile strength (kg/cm²)	28 days	23.7	35.8	40.5
	at crushed	30.4	38.7	46.9
Dynamic modulus of elasticity (×10⁵kg/cm²)	28 days	3.41	4.01	4.23
	at crushed	3.57	4.04	4.38

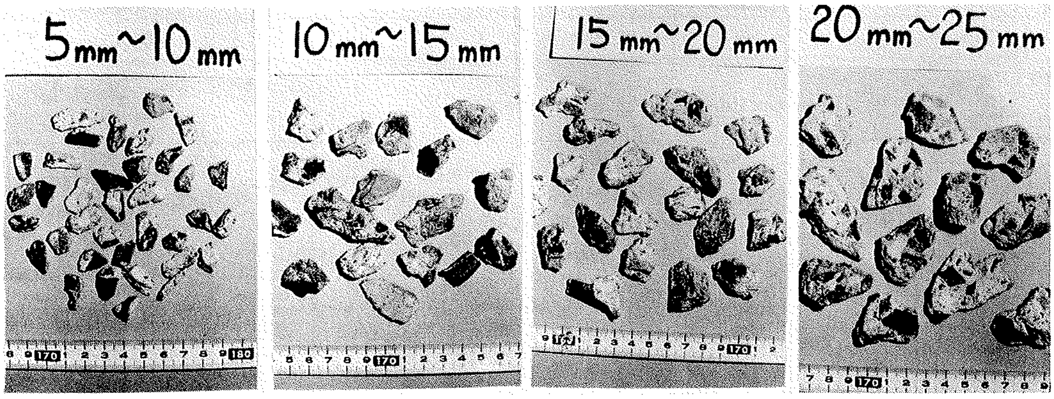

Photo. 1　Aggregates produced from original concrete

原コンクリートの材令28日および破砕時材令における圧縮強度,引張強度および動弾性係数を **Table** IVに示す。これより本実験で採用した3つのタイプのコンクリートでおおむね土木の分野で一般的に使用されているコンクリートを代表させてさしつかえないと考えられる。

3．1．2　破砕状況，粒度，粒形

再生骨材の粒度別にその破砕状況を **Photo. 1** に示す。写真から明らかなように，本試験では原コンクリートのモルタル部分あるいは原粗骨材が砕ける場合が大部分で，モルタルと原骨材の境界で砕ける場合は非常に少ない。粒度別にみると，5～10 mm では，原骨材そのものや，モルタル分だけのものが多く，10～20 mm では，原粗骨材のまわりにモルタル分が付着しているものが多く，20 mm以上では原骨材をモルタル分がおおっているものが多く，原コンクリートそのものであるといえる。

再生粗骨材のふるい分け試験結果による粒度分布曲線を土木学会標準粒度範囲とともに **Fig. 1** に示す。また参考のため原粗骨材の粒度分布も同時に示す。この図から，原コンクリートの強度が大きくなるにつれて粒径の大きい割合が若干増加する傾向が認められるが，全体として原コンクリートによる相違は極くわずかであり，得られた再生骨材は標準の粒度内におさまっている。また各タイプとも 10～15 mm の中間域に分布が偏よる傾向がみられるが，これは原粗骨材の最大寸法（15 mm）に関係していると推測される。なお本実験では 5 mm 以下の細粒分の比率は 15～17 %であった。

3．1．3　比重，吸水率，単位容積重量

Table IIIから明らかなように再生骨材の比重は2.43となり，この値は原コンクリートの比重よりわずかに大きい程度である。また原コンクリートの差による相違は認められなかった。吸水率は天然砂利や砕石と比べ，かなり大きな値を示している。これはモルタル部の吸水による影響が大きいと考えられ，原コンクリートの強度が大きくなるにつれてわずかに小さくなる傾向にある。

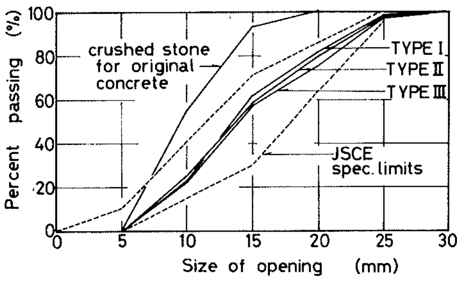

Fig. 1　Particlesize distribution of aggregate produced from original concrete

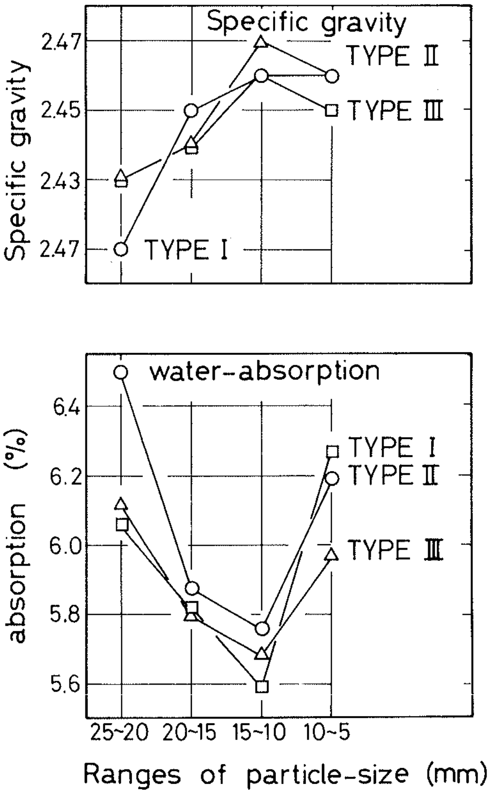

Fig. 2　Relationships between particlesize and specific gravity, and absorption

粒度別に行った比重と吸水率試験結果を **Fig.2** に示す。この図から粒径 10～15 mm の間に比重が最大，吸水率が最小になるピーク値が認められる。これから，この範囲でモルタル分が最も少なくなり，原粗骨材の骨材中に占める割合が最大になることが推測される。

単位容積重量は原コンクリートの差に関係なく 1310 kg/m^3 程度である。これを実積率に直すと 53.7 % となり，この値は原粗骨材の実積率 57.7 % より若干低い。このことは再生骨材の表面性状が角ばっていることを示している。

3．1．4　破砕強度

破砕試験における荷重と破砕率の関係を **Fig.3** に示す。また，この図から得られた 40 t 破砕率および 10 % 破砕値を **Table** IIIに示す。なお原粗骨材はそれぞれ 12 % および 33 t である。これらのことから再生骨材の破砕強度

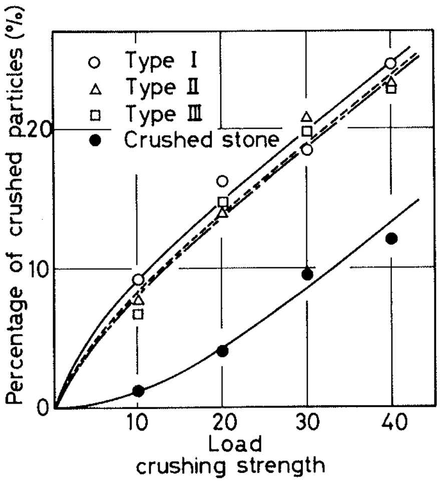

Fig. 3　Crushing strength

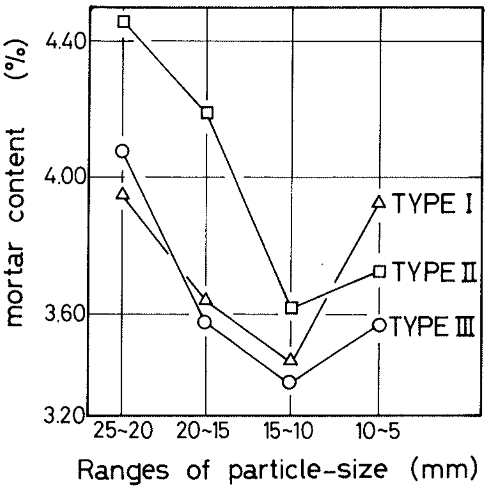

Fig. 4　Mortar contents in the aggregate produced from original concrete

は砕石と比較してかなり劣り，とくに荷重が低いレベルでの破砕量が多くなっているが，原コンクリートの強度による破砕強度の差はきわめて小さい。

3．1．5　安定性その他

再生骨材の安定性試験の結果は **Table III** に示す通り，損失重量百分率が 71.4～76.9％ であるが，原コンクリートの差による相違は認められない。この値は土木学会の規定値 12％ を大幅に上回る。これは再生骨材の場合の重量損失がほとんどモルタル部の崩壊あるいは剝げ落ちによるもので，砕石等の試験方法そのままで再生骨材の安定性を評価するのは適切でないといえる。

洗い試験結果は，洗い損失率は 1.3～1.7％ で原コンクリートの強度が大きくなるにつれて損失率は小さくなる傾向が認められた。またこの値は土木学会の砕石の場合の規定値 1.5％ より若干大きくなっているが，それほど問題とはならない値と考えられる。

3．1．6　モルタル付着量

この試験は，安定性試験方法を応用したもので，一定量の試料について硫酸ナトリウム溶液への浸漬，炉乾燥を繰返し，モルタル部分を崩壊，剝離させるものである。本実験では，浸漬 9 時間，乾燥 12 時間を 1 サイクルとし，15 サイクル続けた後 5 mm ふるいに留まる量を元の量から差引いた値の重量百分率をもってモルタル付着量とした。なお厳密にはこの中に原粗骨材自体の損失も含まれるが，本実験では特に補正は行わなかった。

各タイプの再生骨材のモルタル付着量を **Table III** に，また粒径別の値を **Fig. 4** に示す。これによると全体としてのモルタル付着量は 35～39％ 程度であり，原コンクリートの相違による顕著な差は認められない。粒径別にみると，粒径 10～15 mm でモルタル付着量が最小となっており，この間で原粗骨材の骨材中に占める割合が最大となっていることがわかる。このことは，破砕状況，比重，吸水量の項で述べた事と一致している。また，このピーク値の現われる粒径は，原粗骨材の骨材寸法に大きく支配されるものと推測される。

3．2　再生コンクリート

3．2．1　配合設計

単位セメント量 250, 350, 450 kg/m^3, スランプ 7.5 cm の条件で，試練りによって決定した再生コンクリートの示方配分を **Table V** に示す。また比較のため同時に試験した再生コンクリートと同一のスランプ，同一の水セメント比を有する砕石（最大骨材寸法 15 mm）を使用したコンクリートの示方配合を併わせて示す。再生コンクリートの細骨材率の決定は，再生骨材を用いた場合の最適細骨材率が砕石の場合とほぼ同じであることを実験により確かめた上で，砕石を用いたコンクリートの場合と同様に行った。**Table V** からも明らかなように，所定のスランプを得るのに必要とする単位水量は，再生コンクリートでは，砕石を用いたコンクリートの場合と比較して，ほぼ同程度か若干大きくなる傾向がみられる。またフレッシュな状態での条件，挙動に関する限り，再生骨材の

Table V Mix proportions of recycling concrcte and control concrete

Kind of mix.		Max. size of agg. (mm)	Slump (cm)	Air (%)	Water cement ratio W/C (%)	Fine agg. ratio s/a (%)	Water W (kg/m³)	Cement C (kg/m³)	Aggregate (kg/m³) Fine S	Aggregate (kg/m³) Coarse G	Admixture Pozz No.8 IMP. A (%)
Recycling concrete	A	25	7.5	4	62	42	155	250	789	1023	C×0.25
	B				45	39	156	350	700	1027	
	C				36	37	161	450	629	1004	
Control concrete	A	15	7.5	5	62	44	160	258	807	1071	C×0.25
	B				45	40	150	334	719	1124	
	C				36	38	160	444	639	1084	

Table VI Strength of recycling concrete

Kind of mix.	Type of aggregate	Compresive strength (kg/cm²)	Tensile strength (kg/cm²)	Modulus of elasticity (×10⁵ kg/cm²) static	Modulus of elasticity (×10⁵ kg/cm²) dynamic
A	Type I	238	22.5	2.46	3.14
	Type II	193	23.1	2.47	3.16
	Type III	235	25.6	2.53	3.19
	Control	258	28.5	3.14	3.91
B	Type I	330	30.2	2.63	3.38
	Type II	308	27.9	2.67	3.31
	Type III	358	35.3	2.66	3.62
	Control	446	39.1	3.58	4.36
C	Type I	388	33.6	2.81	3.60
	Type II	425	35.7	2.91	3.60
	Type III	470	38.2	3.16	3.78
	Control	569	46.5	3.69	4.59

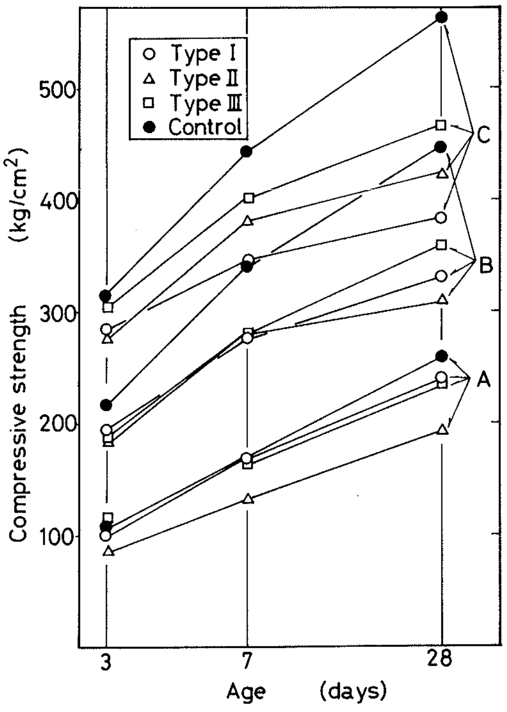

Fig. 5 Gains of compressive strength

原コンクリートの差による影響はほとんど認められなかった。

3．2．2 硬化コンクリートの力学的特性

再生コンクリートおよび比較用の砕石コンクリートの材令 28 日における圧縮強度，動弾性係数，静弾性係数および引張強度を一括して **Table VI** に示す。

それぞれの配合および使用骨材における圧縮強度と材令との関係を **Fig. 5** に示す。この図から，再生コンクリートの場合，砕石コンクリートと比較して若材令における強度発現が大きく，それ以降の材令がたつにつれての強度増進が少ない。したがって材令が経るにつれて，再生コンクリートと砕石コンクリートとの強度差がひらいていく。この傾向は，セメント量が多くなるにつれて顕著となり，また再生骨材の原コンクリートの差による影響は認められない。なおこの傾向は引張強度についてもほぼ同様のことがいえる。

次にそれぞれの骨材を用いたコンクリートについて，材令 28 日の圧縮強度とセメント水比の関係を **Fig. 6** に示す。いずれの骨材を用いた場合でも両者の間には直線関

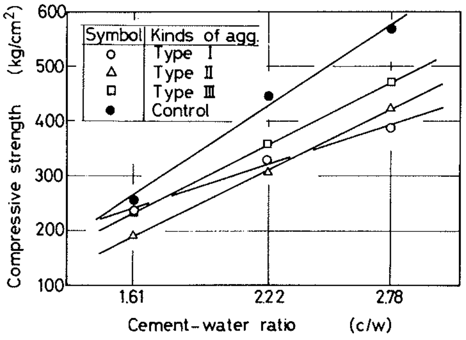

Fig. 6 Relationships between compressive strength and cement-water ratio

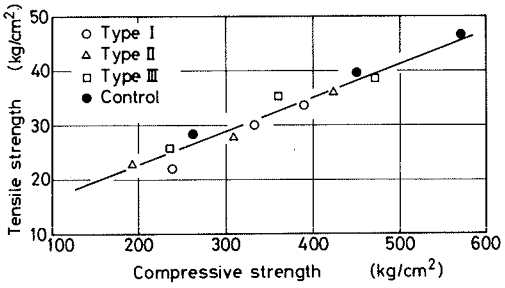

Fig. 7 Relationships between tensile strength and compressive strength

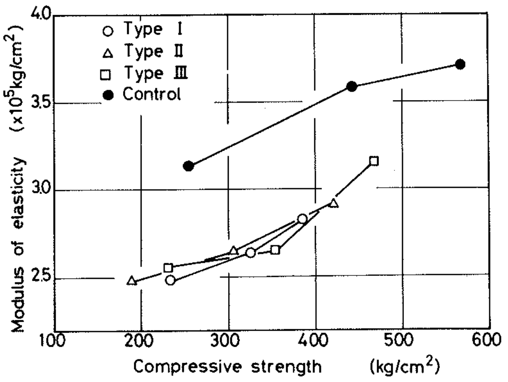

Fig. 8 Relationships between modulus of elasticity and compressive strength

係が認められ，しかもこの直線の勾配が使用されている骨材の種類によって異なっている。すなわち，セメント水比が1.5〜1.6程度であれば，骨材の違いによる強度差はほとんどみられないが，セメント水比が大きくなるにつれて骨材の種類による強度差が大きくなる。砕石を用いた場合で，セメント水比の増加に伴なう強度増加割合が最も大きく，再生骨材を用いた場合には，再生骨材の原コンクリートの強度が大きいほど，強度の増加割合が大きい。しかし，再生骨材の原コンクリートの強度差による影響はそれほど顕著ではない。このようにコンクリート強度が大きくなるにつれて骨材強度の影響が大きく現われる現象は，従来から知られていたことと一致するものである。したがって，再生骨材のように強度がそれほど大きくない骨材を高強度を必要とするコンクリートに使用するのは適切でないことがうかがえる。

次に材令28日の圧縮強度と引張強度の関係をFig.7に示す。この図から圧縮強度と引張強度の間には骨材の種類に関係なくほぼ直線関係が存在する。すなわち再生コンクリートの引張強度は砕石コンクリートと同一の方法で圧縮強度から推定し得る。

再生コンクリートの材令28日における1/3割線弾性係数と圧縮強度の関係を示したのが **Fig. 8** である。再生コンクリートの場合，再生骨材の原コンクリートの種類に関係なくほぼ一本の曲線で表現することができる。さらに，弾性係数の値は，砕石コンクリートと比較して20〜25％低くなっている。

4．結　　び

本研究は，コンクリート廃材をコンクリート骨材として再利用していくための基礎資料を得る目的で行ったもので，あらかじめ性質のわかっているコンクリートから再生骨材を製造し，再生骨材の物理的性質を把握すると同時に再生コンクリートの配合設計方法，強度，弾性係数等の力学的性質などを実験によって明らかにした。

得られた結果を以下に列挙し，本論文のまとめとする。

(1) 再生骨材の破砕状況は，粒径が小さい範囲では，原粗骨材片およびモルタル片が多く，粒径が大きくなるにつれて原コンクリートそのものの塊が多くなる。

(2) 本実験では，再生粗骨材の粒度分布は土木学会標準粒度範囲内に納まり，とくに粒度の調整をする必要はなかった。

(3) 再生粗骨材の比重は砂利や砕石より小さく，原コンクリートの比重に近い値となる。また，吸水率は砂利や砕石よりかなり大きい。これらの値は粒径によってかなり異なっている。

(4) 再生粗骨材の実積率は砕石より若干小さくなる。また，破砕強度はかなり小さい。

(5) 再生粗骨材のモルタル付着量は粒径によって異なり，またこのモルタル付着量が再生粗骨材の物理的性質に与える影響は大きい。すなわち，モルタル付着量が大きい粒径の再生粗骨材の品質は低下する。

(6) 原コンクリートの強度差による再生粗骨材の品質の相違は比較的小さい。

(7) 再生コンクリートのワーカビリチーは，砕石コンクリートの場合と同程度で，配合設計においてはとくに問題はない。

(8) 再生コンクリートの圧縮強度は，セメント水比が小さい場合は対比の砕石コンクリートと大差ないが，セメント水比が大きくなるにつれて砕石コンクリートよりかなり小さくなり，また再生骨材の原コンクリートの影響を受けるようになる。

(9) 圧縮強度と引張強度の関係は，再生コンクリートと砕石コンクリートとの間で差はみられない。また再生コンクリートの弾性係数は，原コンクリートの差に関係なく砕石コンクリートの80％程度である。

以上の結果を総合すると，再生コンクリートは，それほど高品質を要求されない場合には十分に利用可能であり，原コンクリートの影響もほとんど受けないことが確かめられた。なお本実験では原コンクリートとして砕石を使用し，モルタル部分の強度も高く，骨材との付着もよかったため，破砕骨材中に占めるモルタル分が従来の研究等[2),3)]と比較してかなり大きい傾向にあった。今後実際のコンクリート廃材を使用した実験が必要であろう。

なお最後に，本研究は著者の一人に与えられた昭和54～56年度文部省科学研究補助金（一般B）による成果の一部であることを付記するとともに，本研究を遂行するに当り終始御協力を賜った土木工学科材料研究室の諸氏に対し感謝の意を表する次第である。

参考文献

1）吉田弥智，高炉スラグのコンクリート用骨材としての利用，コンクリート工学，Vol. 14，No. 9，Sep., 1976

2）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，July, 1978

3）S. Frondistou - Yannas, Waste Concrete as Aggregate for New Concrete, ACI Jour. Vol. 77, No. 8, August, 1977