

V—9 再生骨材コンクリートに関する基礎的研究

室蘭工業大学 正員 尾崎 詔
室蘭工業大学 正員 志村政雄

1. はじめに

コンクリート構造物の解体によって、年間約1000万トンのコンクリート廃棄物が出るものと推測されている。¹⁾ このように使用済みになったコンクリートの大部分は埋立などに利用されてはいるものの、廃材として投棄されているのが現状である。一方、図-1/で示すように、コンクリート用骨材の需要は最近増えてはいるものの、年間5億トンを越えている。しかも、河川砂利の供給量は年ごとに下る一方で、すでに1億トンを切っており、碎石などがコンクリート骨材の主役になってからすでに10年以上になるが、良質な骨材、とりわけ天然骨材の供給は一層困難になってきている。ところで、現在廃棄されているコンクリートが戦前・戦後(1950年以前)に建設されたコンクリート構造物の解体によるものとするならば、今後発生するであろう使用済みコンクリートは現在の10倍の1億トンにも達することが図-1/から予想される。このように一層深刻になるであろう「コンクリート廃棄物の処理」と「コンクリート用骨材の不足」という二つの問題を同時に解決する一つの方法として「使用済みコンクリートを再生骨材として再利用するための研究」を早くからやっておくことは、21世紀に向けての環境的・省資源的課題でもある。

本学では、このテーマを以前に何度か学生の卒業論文としてとりあげ、砂利や碎石を粗骨材に用いた使用済みコンクリートを再生粗骨材として利用するための研究、さらに最近では、粗骨材のみならず細骨材としても再利用するための研究をおこなってきた。ただし、これらの実験では使用済みコンクリートの代りに再生骨材の原料にするコンクリートを製作し、その性質を試験によって明らかにした上で、ハンマーあるいはクラッシャーで破碎して再生骨材としている。

本論文は、このような再生骨材の性質および再生骨材を用いたコンクリートの性質の一端を明らかにした基礎的研究であるが、再生骨材コンクリートに関する今後の研究・発展のために過去の実験資料をとりまとめて発表する。

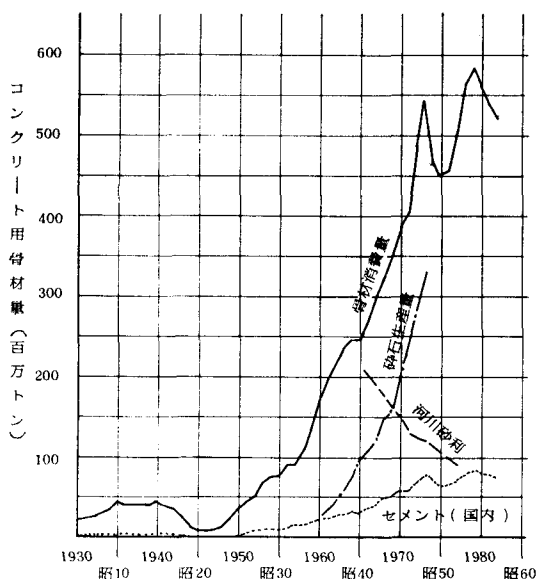


図 1. コンクリート用骨材量

2. 原コンクリート

再生骨材の原料として用いたコンクリートを原コンクリートと呼ぶことにする。本研究に用いた原コンクリートの種類は10種で、その配合を表-1/に示した。このうち、A～Fの6種類の原コンクリートは河川砂利が豊富に使えた時代に造られたコンクリートが使用済みになった場合を対象にしたもので、G～Jの4種の原コンクリートは1960年以降に建造されたコンクリートが使用済みになる時、碎石を用いたコンクリートが急増するであろうことを考慮したものである。解体されるコンクリート構造物の種類としては土木構造物と建築構造物があり、土木構造物の場合でも薄いRC部材では軟練りコンクリートが用いられたことも考慮して、スランプの大きな原コンクリートをスランプの小さな原コンクリートの対として選んでいる。コンクリートの4週強度も200kg/cm²と300kg/cm²程度のものを対象に、水セメント比の大きいものと小さいものを原コンクリートとして選び、再生骨材の強度に差

が出るようにした。 表-1. 実験に用いた原コンクリートの配合

なお、一部のものについては、PCなどの高強度コンクリートが使用済みコンクリートとして出てくる場合を想定した。さらに、AE剤が用いられなかった時代に建造されたコンクリートとAE剤の使用が常識になった

記号	粗骨材の最大寸法	スランブ (cm)	空気量 (%)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg) 又は (g)				
						水	セメント	細骨材	粗骨材	AE 剤
A	25mm砂利	6±1	1.5	4.2	4.3	153	364	832	1112	—
B	〃	16±1	1.5	7.0	5.0	182	260	973	981	—
C	〃	6±1	1.5	5.0	4.7	154	308	796	1211	—
D	〃	6±1	1.5	6.0	4.1	150	250	821	1249	—
E	〃	5±2	4.5	4.5	4.1	130	289	878	1207	68
F	〃	12±2	4.5	6.0	4.4	140	233	887	1158	52
G	25mm碎石	5±2	4.5	4.5	4.5	140	371	846	1040	62
H	〃	12±2	4.5	6.0	4.8	150	250	948	997	47
I	〃	6±2	4.5	4.5	3.6	157	349	661	1774	88
J	〃	12±2	4.5	6.5	4.2	160	246	804	1110	62

近年のコンクリートを考慮し、空気量はレデーミクストコンクリートを重視して寒冷地における標準値4.5%を採用した。

表-2. 原コンクリートに用いられた骨材

記号	種類	粗骨材					細骨材				
		比重	吸水率 (%)	粗粒率	単重 (kg/t)	実積率 (%)	種類	比重	吸水率 (%)	粗粒率	単重 (kg/t)
A,B	静内川 砂利	2.72	1.77	6.83	1.74	64.7	錦岡 海砂	2.70	1.00	2.88	1.84
C,D	〃	2.79	1.04	6.86	1.77	64.1	〃	2.65	1.10	2.67	1.08
E,F	〃	2.79	1.04	6.86	1.77	64.1	堀別 海砂	2.72	0.79	2.94	—
G,H	白老 碎石	2.64	2.07	7.16	1.58	61.1	〃	2.72	0.79	2.94	—
I,J	〃	2.67	2.04	6.78	1.60	60.0	白老 海砂	2.67	1.56	2.73	1.81

表-3. 再生骨材の原料として用いた原コンクリートの強度等

記号	標準材令時 (4週)				破砕時 (9~13週)			
	単位重量 (kg/m³)	動弾性係数 (t/cm²)	ヤング係数 (t/cm²)	圧縮強度 (kg/cm²)	単位重量 (kg/m³)	動弾性係数 (t/cm²)	ヤング係数 (t/cm²)	圧縮強度 (kg/cm²)
A	2517	4.61	3.68	42.0	2497	4.60	3.54	53.8
B	2468	3.82	3.42	22.4	2426	3.71	2.99	31.2
C	2533	4.52	3.50	35.6	2571	4.26	—	45.0
D	2527	4.33	3.20	25.1	2481	3.96	—	37.8
E	2490	4.32	—	37.3	2470	4.21	—	41.0
F	2450	3.82	—	25.0	2420	3.66	—	28.4
G	2430	4.04	—	37.2	2410	4.06	—	54.3
H	2390	3.53	—	23.1	2360	3.52	—	26.8
I	2368	3.67	—	30.7	2343	3.61	—	32.6
J	2342	3.26	—	18.6	2310	3.24	—	24.7

原コンクリートに用いられた材料についての概略を記すと、セメントは普通ポルトランドセメントのみに統一したが、A, B の原コンクリートの場合には比重が3.16、その他の原コンクリートの場合には比重が3.15のものを用了。骨材については、A~J のそれぞれの原コンクリートに対して表-2のよ

表-4. 再生骨材の性質

記号	粒度 (mm)	比重	吸水率 (%)	粗粒率	単位重量 (kg/t)	実積率 (%)	再生率 (%)	モルタル分 (%)	破砕値 (%)
A	30~5	2.55	4.48	7.43	1.39	54.4	9.0	4.6	—
B	30~5	2.51	5.43	7.54	1.37	54.7	8.5	6.1	—
C	25~5	2.60	3.70	6.99	1.45	58.1	8.0	4.1	—
D	25~5	2.56	4.54	6.79	1.41	58.0	7.5	4.9	—
E	25~5	2.57	3.92	7.12	1.46	60.8	—	4.2	3.3
F	25~5	2.51	4.20	7.29	1.45	58.5	8.7	4.8	3.3
G	25~5	2.50	4.52	7.10	1.39	57.9	—	4.0	3.5
H	25~5	2.45	4.65	6.97	1.36	58.3	8.4	4.7	3.7
I	25~5	2.39	6.89	7.03	1.37	57.3	(5.0)	5.2	2.8
J	25~5	2.35	8.34	7.08	1.36	57.9	(6.0)	5.1	3.4
I _g	5~	2.40	7.83	3.26	1.60	66.7	(1.3)	—	—
J _g	5~	2.34	9.24	3.32	1.51	64.5	(1.3)	—	—

うな性質の細骨材と粗骨材を使用した。なお、AE剤として、ビンゾールを用いた。

原コンクリートは直径/5cmの円柱供試体に製作され、28日間の標準養生後、破砕時まで大気中に放置されたが、その一部を標準材令時供試体および破砕時供試体として、材令4週および9~13週においてそれぞれ試験した。その結果を表-3に示す。

3. 再生骨材

再生骨材はさきに原コンクリートとして作った円柱供試体を破砕して製造した。破砕方法は、A~D の原コンクリートに対してはハンマーを用い、A とB は最大寸法30mmに、C とD は最大寸法25mmになるように人力で破砕した。E~J の原コンクリートに対してはジョークラッシャーを用いたが、機械の性能上、最大寸法が50mmになるので、E,F,G,H はクラッシャーによる破砕後さらにハンマーによって最大寸法が25mmになるように調整した。これらA~H のものは5mm未満の細骨材成分をカットし、5~25mmの粗骨材成分のみを使用した。I とJ はクラッシャーによる1次破砕で得られた約30%前後の25~50mm成分をさらに小型のジョークラッシャーで2次破砕をし、1次破砕で得られ

た細骨材成分に加え、それぞれ再生細骨材I_sとJ_sとした。これらの再生骨材の性質を表-4に示す。表の中にある再生率とは、使用した原コンクリートの重量に対する上記5～25mmの再生粗骨材の重量百分率を定義したが、原コンクリートIとJの場合には再生細骨材I_sとJ_sも利用するので、/次破砕時の5～25mmと5mm以下の重量百分率を括弧内に示した。

再生骨材は原コンクリートの粗骨材(原粗骨材と呼ぶことにする)にモルタルが付着したものと考えられがちであるが、再生骨材を観察すると、粗骨材が破砕したものやモルタルだけの粒もあり、セメントペーストのダスト分もかなりあって、その組成は多様である。

粒度は、図-2のように、再生粗骨材では土木学会および砕石のJISの粒度範囲に入り、砂利や砕石とはほぼ同じと考えられる。一方、再生細骨材は2.5～5mmの成分と0.15mm以下のダスト分が多いため、土木学会およびJISの砕砂粒度範囲からはずれる。建築業協会の建設廃棄物処理再利用委員会の「再生骨材および再生コンクリート使用規準(案)・同解説」²⁾ではI_s、J_sが十分入るだけの広い粒度範囲を提案している。少し広すぎるように思われるが、粒度の傾向からみて妥当な規準といえる。

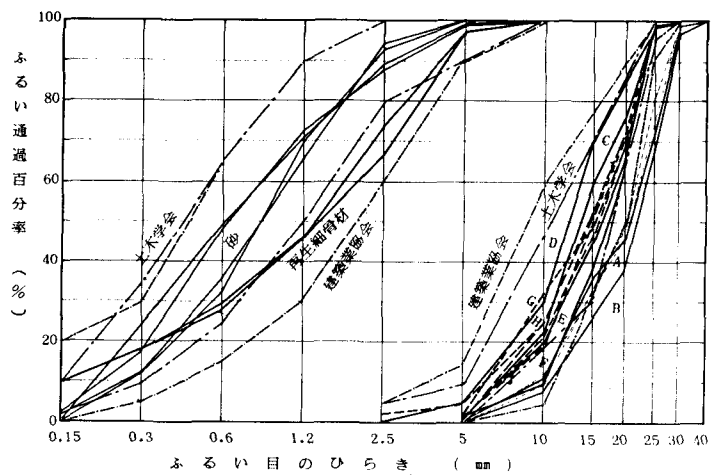


図-2. 再生骨材の粒度曲線 (鎖線は規準の粒度範囲)

比重についてみると、再生骨材には、原粗骨材にモルタルが付着したものやモルタル自体が含まれているため、再生骨材の比重は原粗骨材の比重よりも小さくなる。比重の大きな原粗骨材(砂利)を用いた場合の再生粗骨材の比重はコンクリート用砕石の規準値2.5以上を示し、これより低い比重の原粗骨材(砕石)を用いた場合には2.4前後の値を示し、ばらつきも大きい。これを原コンクリートの水セメント比ごとに原粗骨材に対する再生粗骨材の比重の比率をとってみると図-3のようになる。

これによれば、原コンクリートの種類による違いはそれほどなく、水セメント比がかなり変化しても再生骨材の比重は数%程度しか変わらず、原粗骨材の比重の90%程度以上とみてよい。なお、再生細骨材I_sおよびJ_sの場合、/次破砕のみでは2.26という小さな比重を示したが、2次破砕による成分が20～30%程度混じることによって約0.1だけ大きくなり表-4のような値となった。このことは、再生細骨材を使う場合、砕砂や天然砂の混合を試みる価値があることを示している。

吸水率は天然骨材に比べてかなり大きな値を示し、コンクリート用砕石などの規準値(3%以下)にはとても合格しない。これは、原骨材に比べて非常に大きな吸水性をもつモルタルの影響を考えると当然である。特に細骨材の吸水率は/次破砕したものだけでは/0%以上になる。

実積率は、再生粗骨材では砂利に比べて5～/0%、砕石に比べても0～3%ほど小さいが、砕石に比べてわずか角ばりが多い程度であって、砕石のJISにも合格する。

モルタル分について調べると、再生粗骨材中にあるモルタル分を、原コンクリートの比重 γ_o 、原粗骨材の比重 γ_g 、再生粗骨材比重 γ_R 、原コンクリートの配合から求めたモルタル分の体積比 V_m から

$$x = V_m (\gamma_g - \gamma_R) / (\gamma_g - \gamma_o)$$

で推定し、表-4のようになる。これを原コンクリートの

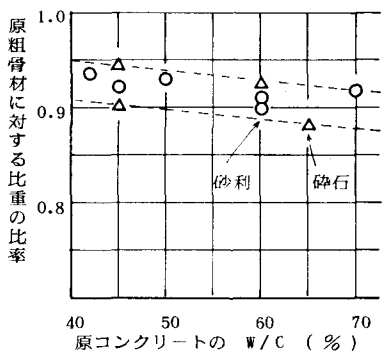


図-3. 再生粗骨材の比重 (比率)

水セメント比で表わすと図-4のようになる。モルタル分は40~50%とみられるが、 $w/c=45\sim50\%$ の原コンクリートでは再生骨材のモルタル分が最小になる。ただし、これらの値は比重試験に用いられた10mm以上の再生骨材に対する値であり、細粒のものはこの値よりもっとモルタル分が多い。

破砕値について説明すると、BS規格により求めた再生骨材の破砕値は比較に用いた砕石の破砕値2%、あるいは27%に比べ、モルタル分の影響を受ける分だけ大きくなる。このように再生骨材の場合には天然骨材の場合と違って骨材の物理試験のみでは判断できない部分があるので、BS規格の骨材破砕値試験方法を採用したが、40t破砕値が30%を越えても10%破砕値を採用しなかった。

4. 再生骨材コンクリート

再生骨材を用いたコンクリートに関する実験は4つのシリーズに分けておこなった。表-5は最大寸法30mmの再生骨材AとBを用いたNonAEコンクリート、表-6は最大寸法25mmの再生粗骨材を用いた舗装コンクリート、表-7は最大寸法25mmの再生粗骨材E~Hを用いたAEコンクリート、表-8は最大寸法25mmの再生粗骨材I、Jと再生細骨材I_s、J_sを用いたAEコンクリートの結果の一覧である。なお、表-5には、再生粗骨材を表面処理して用いた場合の実験結果を()に示した。水セメント比は良く用いられる範囲の

45~65%を選んだが、それぞれのシリーズにおいて比較のために実験した砂利または砕石を用いた場合の結果を表中に併記した。

まだ固まらないコンクリートの性質について

再生骨材コンクリートは骨材粒形が角ばっているため、砂利を用いたコンクリートと同一スランプのコンクリートを得るためには単位水量を大きくする必要がある。単位水量とスランプとの関係を示した図-5によれば、再生粗骨材の最大寸法25mmを30mmにすれば単位水量が約9kg少なくてすむこと、最大寸法25mmの再生粗骨材の場合には、最大寸法の同じ砂利の場合よりも単位水量が9kgほど多く必要なこと、

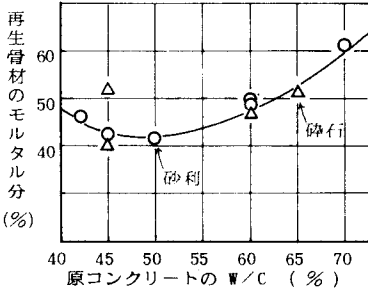


図-4. 再生骨材のモルタル分

表-5. 最大寸法30mmの再生骨材を用いた場合。()内は表面処理した再生骨材

骨材種類	w/c (%)	s/a (%)	W (kg)	スランプ (cm)	空気量 (%)	圧縮強度 (kg/cm ²)	E _d (t/cm ²)	E _c (t/cm ²)	曲げ強度 (kg/cm ²)
砂利	4.5	4.1	163	12.5	1.5	426	445	346	64.2
	5.5	4.5	165	12.0	1.0	388	432	330	51.1
	6.5	4.7	170	12.5	1.7	261	390	299	42.7
A	4.5	4.1	163	130(135)	1.0(08)	350(359)	388(402)	312(301)	55.8(55.6)
	5.5	4.5	165	115(125)	0.8(15)	330(353)	370(375)	285(290)	49.9(46.2)
	6.5	4.7	170	130(120)	1.3(13)	246(258)	360(371)	266(268)	42.4(39.5)
B	4.5	4.1	163	110(120)	0.9(12)	326(360)	377(375)	316(303)	53.3(50.5)
	5.5	4.5	165	120(135)	1.2(11)	325(341)	362(366)	280(300)	49.4(40.9)
	6.5	4.7	170	130(140)	1.0(12)	257(257)	332(363)	260(264)	41.0(37.9)

表-6. 最大寸法25mmの再生骨材を用いた場合(舗装コンクリート等)

骨材種類	w/c (%)	s/a (%)	W (kg)	スランプ (cm)	空気量 (%)	圧縮強度 (kg/cm ²)	E _d (t/cm ²)	E _c (t/cm ²)	曲げ強度 (kg/cm ²)
砂利	4.5	4.1	146	2.6	1.0	499	481	343	72.0
	5.5	4.3	150	3.5	1.8	386	453	331	62.3
	6.5	4.5	152	2.9	1.8	281	435	323	54.5
C	4.5	4.6	154	2.4	0.6	449	411	301	59.5
	5.5	4.8	157	2.4	1.0	398	408	297	53.5
	6.5	5.0	158	1.5	1.8	272	398	281	48.0
D	4.5	4.6	154	3.0	1.5	377	477	285	57.6
	5.5	4.8	157	2.0	2.2	364	384	291	53.0
	6.5	5.0	158	2.5	2.3	248	358	244	45.0

表-7. 最大寸法25mmの再生骨材を用いたAEコンクリート

骨材種類	w/c (%)	s/a (%)	W (kg)	スランプ (cm)	空気量 (%)	圧縮強度 (kg/cm ²)			E _d (t/cm ²)	E _c (t/cm ²)	E _c (%)
						3日	7日	28日			
砕石	5.0	4.5	142	8.5	4.8	134	248	349	386	232	184
E	5.0	4.5	142	7.0	4.7	142	221	355	377	290	188
F	5.0	4.5	142	7.5	4.7	158	252	331	373	310	189
G	5.0	4.5	142	7.5	4.6	118	198	326	354	314	187
H	5.0	4.5	142	10.0	4.9	96	201	(300)	326	207	188

表-8. 最大寸法25mmの再生粗骨材と再生細骨材を用いたAEコンクリート

骨材種類	w/c (%)	s/a (%)	W (kg)	スランプ (cm)	空気量 (%)	圧縮強度 (kg/cm ²)	E _d (t/cm ²)	E _c (t/cm ²)	E _c (%)
砕石	5.5	4.0	158	8.2	3.5	303	368	290	126
I	5.5	4.2	156	7.9	4.6	279	314	235	188
J	5.5	4.2	155	7.1	4.4	268	322	246	199
IS	5.5	4.4	173	8.2	3.9	305	282	206	248
JS	5.5	4.6	174	8.3	3.5	288	290	223	270

再生骨材のスランブを/cm大きくするには単位水量を/ . 8 kg (約/ . 2%) 増す必要があること、AE剤を用いることによって単位水量を20数kg減少できること、など普通のコンクリートとはほぼ同様の関係値が適用できることが推測できる。

なお、再生骨材を用いたAEコンクリートでは砕石を用いた場合とよく似たスランブ値を示しているが、再生骨材コンクリートは普通のコンクリートよりもかなりプラスチックな性状を示すことが観察された。

さらに、再生骨材 C,Dを用いたスランブ2. 5 cmのコンクリートについて、砂利に対する単位水量の増加を実積率で示してみると図-6のようになる。 実積率が/ % 減少することによって、単位水量が/ . 3 kg増加する必要があることを示しているが、この値は砕石の場合の半分以下である。

つぎに、これを細骨材率 s/a についてみると、図-7のようになり、実積率/ %の減少によって s/a (%) を0. 8増やす必要があることを示しているが、この関係は砕石の場合の概略値とはほぼ等しい。 なお、この図では、再生骨材を用いると砂利を用いた場合に比べて s/a を5%大きくする必要があるが、AEコンクリートにすることによってこの分を減少できることも示唆している。

また、細骨材にも再生骨材を用いたIS, JSシリーズによれば、再生細骨材の使用により s/a を数%大きくし、単位水量を/ 8 kg (/ / %) ほど増やす必要があった。 これは砕砂の場合と同程度の s/a の増加量であるが、単位水量の増加量は砕砂の場合の約2倍に当たる。

硬化コンクリートの性質について

再生骨材コンクリートの圧縮強度について比較に用いた砂利(または砕石)コンクリートの圧縮強度との関係を示すと図-8のようになり、再生粗骨材を用いると強度を ~50 kg/cm² 程度(高強度の場合には ~/ 00 kg/cm² あるいはそれ以上) 低下させることがある。 これを特に再生骨材 A,Bを用いた場合について、砂利を用いたコンクリートに対する再生骨材コンクリートの圧縮強度百分率を求めてみると図-9の実線のようになる。 水セメント比が55%程度のコンクリートをつくる場合には約/ 5%の強度低下を見込む必要があり、これより小さな水セメント比では約20%の強度低下を見込まねばならないが、水セメント比が特に大きなコンクリートでは数%の強度低下に過ぎず、砂利を使う場合とはほとんど変わらないようである。 一方、これらの再生骨材の表面を処理したものをを用いれば、図中の点線のように上記の強度低下率は5%ほど小さく見積ってよいことがわかる。

つぎに、材令と圧縮強度の関係について再生骨材 E,F,G,H を用いた場合のコンクリートについて調べてみると、材令28日に対する強度発現率は $\sigma/\sigma_{28} \doteq 0.63 \log D + 0.088$ で表わされ、材令3日で材令28日強度の約3. 8%、材令7日で約6. 2%となり、普通の骨材を用いた

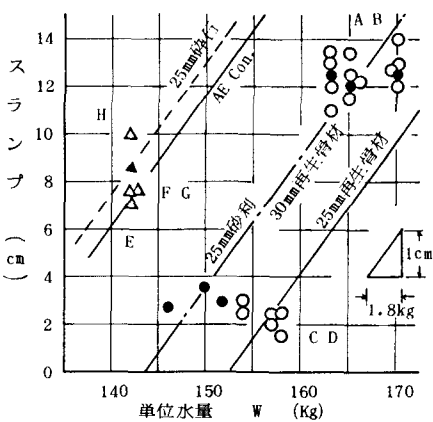


図-5. 再生骨材コンクリートのスランブ

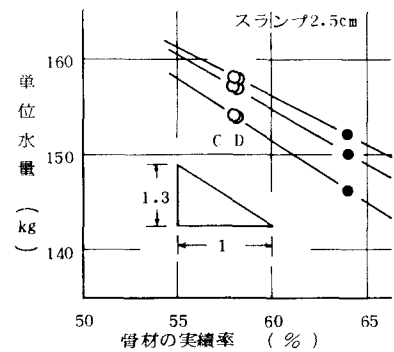


図 6. 再生骨材コンクリートの水量

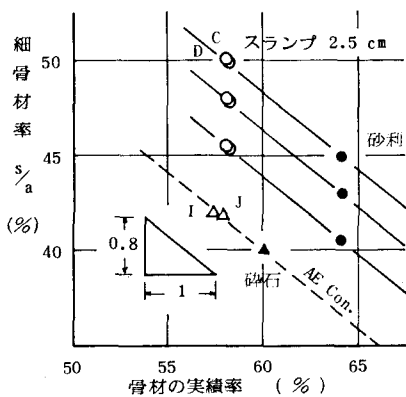


図-7. 再生骨材コンクリートの細骨材率

場合とほとんど変りがない。

再生骨材の40t 破砕値を用いて再生コンクリートの圧縮強度を表わしてみると図-10のようになり、破砕値(%)が1だけ増加すれば強度は約1%減少することが予想される。

細骨材にも再生骨材を用いた場合には20数 kg/cm^2 (8%)ほど圧縮強度が増加した。

曲げ強度についてみると、圧縮強度の1/6 ~ 1/7 で砂利を用いた場合と大体同じか、やや低い強度を示す。しかし、表面処理した再生骨材コンクリートの曲げ強度の低いことが気になる。

動弾性係数 E_d およびヤング係数 E_c の値は普通のコンクリートに比べ10%ほど低い値を示す。

最大圧縮ひずみ ϵ_c (%) は普通のコンクリートに比べて約0.06大きくなる。

5. おわりに

再生骨材の特徴は、破砕によって粒形がかなり角ばっていること、原粗骨材にモルタル分が付着していること、モルタル自体の骨材粒やダスト分が混在することである。したがって、粗骨材は碎石と細骨材は砕砂とはほぼ同様の取扱いを必要とするほか、モルタル分が再生骨材および再生骨材コンクリートの性質に影響を与えるので、これを同時に考慮して使う必要がある。しかし、原コンクリートの水セメント比の違いによる影響が少ないことは再生骨材を使う上で都合がよい。

再生骨材の規準等についてはすでに建築業協会の案があり、その先見性に敬意を表するものであるが、今後、より多くの研究がなされ、さらに検討が加えられるであろう。

最後に、ここに用いた資料は、昭和52年度からの卒論研究として、小岩昭市(52)、北川茂樹(53)、林 忠美(54)、古田孝一(54)、石山 信(56)の諸氏が本学在学中におこなった実験結果であり、再生骨材の破砕製造には本学開発工学科のジョークラッシャーを借用したことを記し、深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1)、笠井芳夫：再生骨材の使用規準；セメントコンクリート No.415, Sep.1981.
- 2)、(財)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.

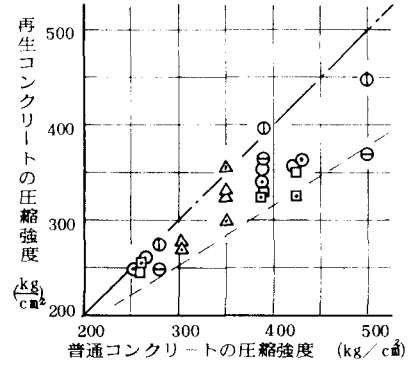


図-8. 再生骨材コンクリートの強度

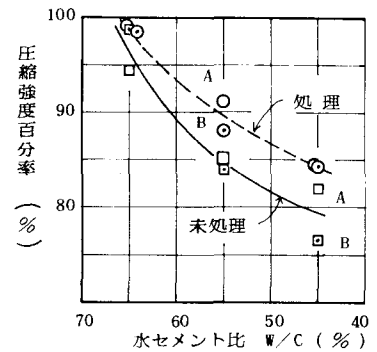


図-9. 再生コンクリートの強度比率

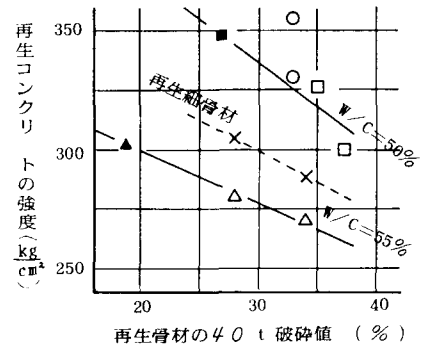


図-10. 再生骨材の破砕値と圧縮強度