

骨材の巨視的及び微視的性質が高強度 コンクリートの強度に及ぼす影響

INFLUENCE OF MACROSCOPIC AND MICROSCOPIC PROPERTIES OF
AGGREGATE ON STRENGTH OF HIGH-STRENGTH CONCRETE

高 建明* 岩月栄治** 森野奎二***

by jianming GAO, Eiji IWATSUKI and Keiji MORINO

1. まえがき

通常使われている水セメント比が0.4-0.7程度で、圧縮強度50MPa程度以下の普通コンクリートでは、その破壊は主に骨材とセメントペーストとの境界面でおこり、骨材規格に合格するような骨材であれば骨材強度がコンクリート強度に影響を及ぼすようなことはほとんどない。

しかし、高強度コンクリート、特に水セメント比が0.2-0.3程度で、圧縮強度100MPa程度以上の超高強度コンクリートにおいては、コンクリートの破壊はセメントペーストや骨材・セメントペースト界面だけでなく、骨材自体の破壊が起こるようになる。このような高強度コンクリートでは骨材の選定が極めて重要である。例えば、骨材の種類、強度及び鉱物学的性質がコンクリートの強度を支配した例として、次のような研究結果がある。AitcinとMehta¹⁾は4種類の粗骨材を用いて水セメント比0.275の高強度(85-100MPa)コンクリートを作製し、その圧縮強度及びヤング係数を調べた結果、骨材表面が平滑な川砂利や花崗岩砕石に比べて、石灰岩砕石及び輝緑岩砕石のほうが高い強度とヤング係数を示した。つまり石灰岩あるいは輝緑岩の場合には、応力-ひずみ曲線において、狭いヒステリシス・ループを示し、骨材強度が高く、界面付着強度も高いことを示した。Baalbakiら²⁾は90-100MPaのコンクリートで粗骨材が高強度コンクリートの弾性に及ぼす影響を調べた結果、珪岩を粗骨材として造ったコンクリートでは、圧縮強度は低いヤング係数は高い値を示しコンクリートの剛性は改善された、しかし、高い応力下では、骨材とモルタルのヤング係数が異なることから、骨材とモルタルの界面に応力集中が起こり、高いコ

ンクリート強度は得られなかった。砂岩砕石使用コンクリートでは、高い圧縮強度と低いヤング係数を示し、骨材とモルタルが同じ程度のヤング係数を持ち多孔質であって界面付着強度の良好なコンクリートが高い強度を示した。しかし、Giaccioら³⁾が高強度コンクリート、モルタル及び原石の圧縮強度、曲げ強度及びヤング係数を調べた結果では、骨材の高剛性により高強度コンクリートの強度低下が必ずしも起こるとは限らず、モルタルの強度が90MPaを越えると、モルタル強度よりコンクリート強度が低いと報告した。柿崎ら⁴⁾は粗骨材の品質がコンクリートの圧縮強度に及ぼす影響とコンクリートの圧縮変形に及ぼす影響について検討した。その結果、水セメント比0.25のとき、石灰岩砕石、安山岩砕石と山砂を用いたコンクリートの圧縮強度は、原石の平均圧縮強度にほぼ等しく、原石の圧縮強度は高強度コンクリートの圧縮強度に大きく影響を及ぼすことを示した。森野ら^{5, 6, 7, 8)}はセメントペーストと各種骨材との界面付着強度を調べ、シリカフェーム、フライアッシュなどの混和材の混入によって、マトリックスと共に界面付着性状が改善されることを示した。

本研究では、6種類の粗骨材と細骨材を組み合わせ、その28日圧縮強度を測定し、骨材種類がコンクリート強度に及ぼす影響について検討した。骨材性質については、骨材原石の圧縮、曲げ、引張強度及び走査電子顕微鏡や偏光顕微鏡観察による骨材の微細構造を調べ、また骨材と結合材の界面付着性状の観察を行った。

本研究は、高強度コンクリート用骨材の選定に寄与する基礎的データを得ることを目的として、巨視的及び微視的の両観点から検討を行ったものである。

* 愛知工業大学訪問研究員(中国東南大学助教授)

** 愛知工業大学 土木工学科 助手

*** 愛知工業大学 土木工学科 教授

(〒470-03 豊田市八草町八千草1247)

2. 実験概要

2.1 使用材料

セメントには普通ポルトランドセメント(記号:C、比重3.16)を用い、その化学成分を表-1に示す。

混和材として用いたシリカフューム(以下、SFと記す)は外国製粉末状で、平均粒径約 $0.1\mu\text{m}$ 、比重2.1、 SiO_2 92.7%のものである。混和剤には高性能AE減水剤(主成分：アルキルアリルスルホン酸塩高縮合物)を用いた。これらの混合物を本研究での結合材とした。骨材には、岩石強度、造岩鉱物、表面微細構造、粒形などが異なる細骨材、粗骨材を6種類づつ用いた。すなわち、細骨材は川砂2種(長良川、

天竜川)、山砂1種、砕砂2種(砂岩、かんらん岩)、電気炉酸化スラグ骨材1種の計6種類、粗骨材として砕石4種類(砂岩、石灰岩、チャート、かんらん岩)、山砂利1種、人工骨材1種(アルミナボール)の計6種類である。それらの性質を表-2、表-3に示す。粗骨材粒度は一定とし20-15mm:30%、15-10mm:30%、10-5mm:40%、細骨材は土木学会標準粒度範囲に入るものをそのまま使用した。

表-1 普通セメントの化学成分

化学成分	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Ti ₂ O	P ₂ O ₅	MnO	強熱減量	不溶残分
%	63.8	21.8	5.0	1.7	2.9	2.3	0.26	0.67	0.26	0.24	0.10	0.40	0.30

表-2 粗骨材の性質

骨材種類	産地	比重	吸水率%	粗粒率	単位容積重量	実積率%	構成鉱物
砂岩	愛知	2.67	0.74	6.60	1590	60.0	石英、長石、雲母、粘土鉱物
石灰岩	岐阜	2.70	0.22	6.60	1630	60.3	方解石
かんらん岩	三重	2.91	0.92	6.60	1750	61.7	かんらん石、蛇紋石、緑泥石
チャート	岐阜	2.62	0.59	6.45	1500	57.6	潜晶質石英、石英、玉髄
山砂利	愛知	2.60	0.95	6.60	1610	62.5	主としてチャート
アルミナボール	愛知	3.47	0.07	8.00	2100	60.5	アルミナボール

表-3 細骨材の性質

骨材種類	産地	比重	吸水率%	粗粒率	単位容積重量	実積率%	構成鉱物
砂岩砕砂	愛知	2.61	0.90	3.60	1440	55.7	石英、長石、雲母、粘土鉱物
かんらん岩砕砂	三重	2.86	1.52	2.73	1570	58.6	かんらん石、蛇紋石、緑泥石
長良川川砂	岐阜	2.57	1.19	2.49	1510	59.3	石英、長石、雲母、粘土鉱物
天竜川川砂	静岡	2.60	1.09	2.90	1670	64.9	石英、長石、雲母、粘土鉱物
山砂	愛知	2.55	1.99	2.73	1550	62.0	石英、長石、粘土鉱物
電気炉酸化スラグ	愛知	3.65	1.30	2.72	2420	68.6	ウスタイト、マグネタイト

2.2 コンクリートの配合

コンクリートの配合を表-4に示す。コンクリートの配合においては、普通ポルトランドセメントの一部をシリカフュームで置換(セメント質量の10%を置換)した。

表-4 コンクリートの配合

W/(C+SF)	SF/(C+SF)	S/a	単位量(kg/m ³)					
			C	SF	W	S	G	
%	%	%						
25	10	45	540	60	150	711-1026	914-1209	

2.3 実験方法

練混ぜはシリカフュームの分散をよくするため、あらかじめシリカフュームを高性能AE減水剤を入れた使用水で練り混ぜておき、これをセメントと骨材を空練りしたものに投入し、5分間強制練りミキサーで練り混ぜた。コンクリートの圧縮試験用供試体

はJIS A 1132(コンクリートの強度試験用供試体の作り方)に準じて、 $\Phi 10 \times 20\text{cm}$ のシリンダーを各種3体づつ作製した。締固めにはテーブルパイプレーター(振幅1mm、振動数6000rpm)を用いた。作製した供試体は翌日脱型して、材齢28日まで水中養生を行った。試験体の加圧面は、試験前に機械研磨を行った。骨材原石の圧縮強度の測定は $\Phi 25 \times 50\text{mm}$ あるいは $\Phi 30 \times 60\text{mm}$ の円柱形供試体各15体の試験により、原石の引張強度の測定は $10 \times 10 \times 60\text{mm}$ 供試体15体の直接引張試験により、原石の曲げ強度の測定は $25 \times 25 \times 100\text{mm}$ 供試体10体により行われたものである。原石の微細構造や骨材とセメントペーストの界面性状の観察などは走査電子顕微鏡、偏光顕微鏡及び実体顕微鏡によって行った。他に原石の造岩鉱物や粘土鉱物の種類などはX線回折法による分析でも調べた。

3. 実験結果及び考察

3. 1 原石の強度

各種原石の圧縮強度、引張強度及び曲げ強度を表-5⁹⁾に示す。表-5では砂岩の平均圧縮強度が4種類の原石の中で最も高いが、強度のばらつきが大

きい。石灰岩の強度は圧縮、引張及び曲げともに最も低い、そのばらつきがいずれも最も小さい。かんらん岩は、圧縮強度は高くないが、曲げ強度が高いのが特徴的である。

表-5 原石の強度

項目	原石の種類	強度 (MPa)			標準偏差 (MPa)	変動係数 (%)
		平均	最大	最小		
圧縮強度	砂岩	237.5	301.7	151.8	49.9	21.0
	石灰岩	113.3	138.9	90.1	17.0	14.9
	かんらん岩	131.7	231.7	81.4	50.5	38.4
	チャート	213.7	288.1	73.3	46.2	21.6
引張強度	砂岩	15.5	22.1	7.6	4.7	30.2
	石灰岩	7.6	9.9	4.8	1.7	31.8
	かんらん岩	12.6	17.8	6.8	3.1	24.9
曲げ強度	砂岩	37.1	53.6	23.9	9.3	25.2
	石灰岩	23.5	33.5	17.8	4.6	19.4
	かんらん岩	38.1	53.8	19.4	10.7	28.0

3. 2 骨材の特性

砂岩、石灰岩、チャート及びかんらん岩の微細構造を写真-1、写真-2に示す。砂岩は中生代-古生代の堆積岩で、主として石英及び長石から成る、少量の雲母、粘土鉱物及び黄鉄鉱を含む。石英及び長石の結晶粒子の直径は0.01-0.1mmであるが0.1mm粒は石英脈中のものである。石灰岩は砂岩の地質時代と同様であり、主として方解石から成り、微量の粘土鉱物を含む。方解石の結晶粒子の直径は0.005-0.2mmで、後者は方解石脈の中の粒子である。チャ

ートも中・古生代の堆積岩であり、主として0.005mm以下の微少石英(潜晶質石英)から成り、放射虫化石を置換した玉髓を含み、また、0.01mm程度の石英脈を含む。このチャートはアルカリシリカ反応性の高いものである。かんらん岩の構成鉱物はかんらん石、輝石、蛇紋石(繊維状のクリソタイル、板状のアンチゴライト)、及び緑泥石である。山砂利はほとんどチャート粒子から成るが、これらのチャートの起源は中・古生代であり、それが砂利となって第3紀に堆積したものである。山砂利粒子は

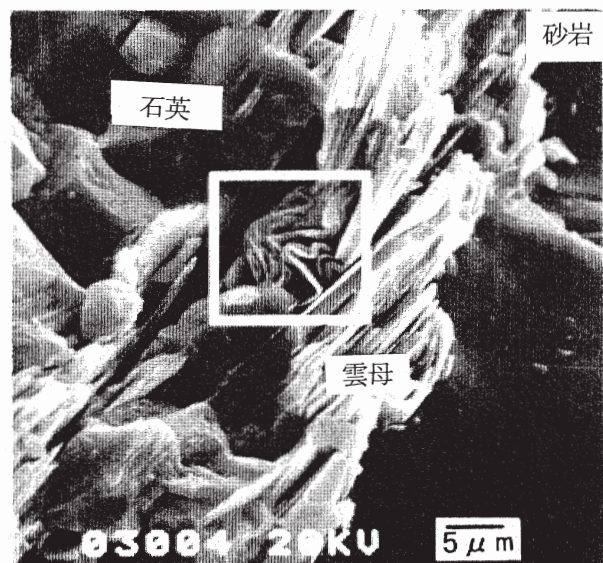
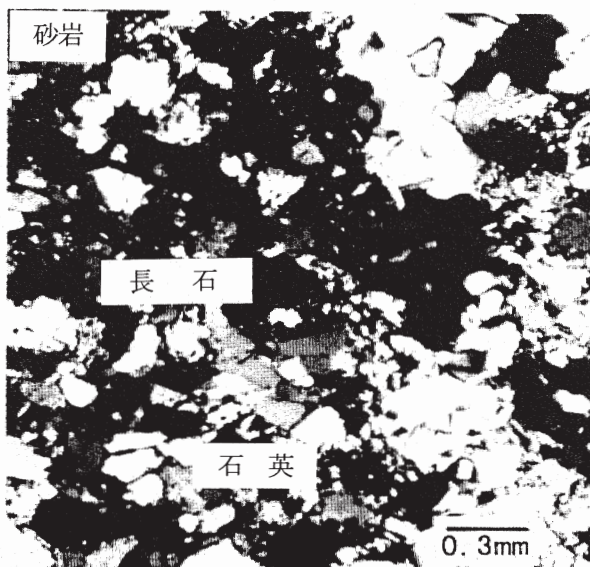


写真-1 砂岩の偏光顕微鏡及び走査顕微鏡写真

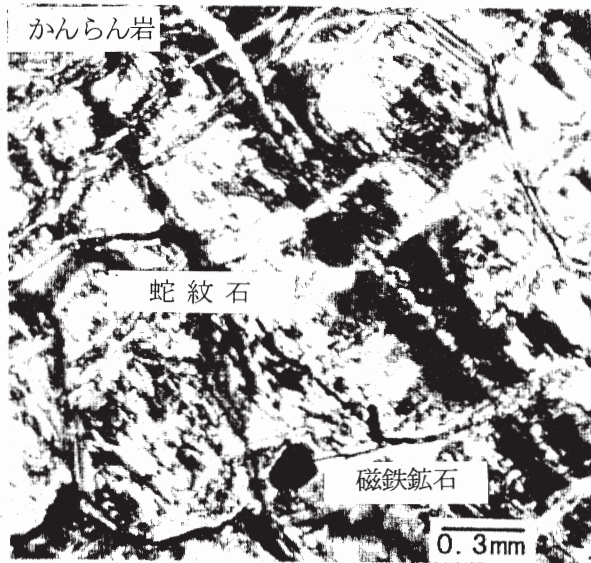
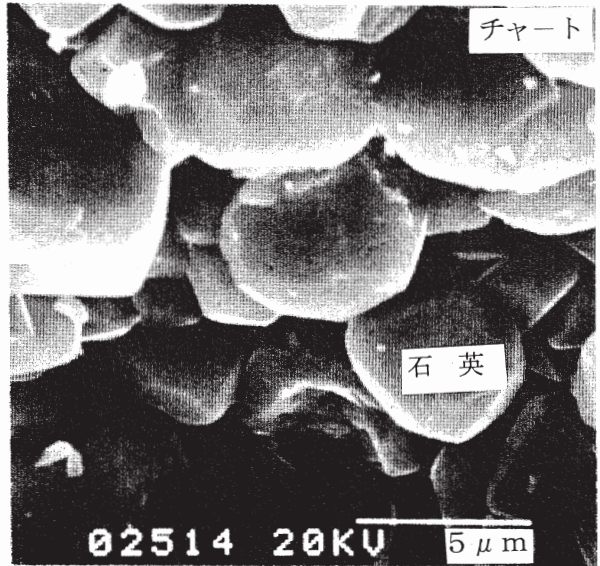
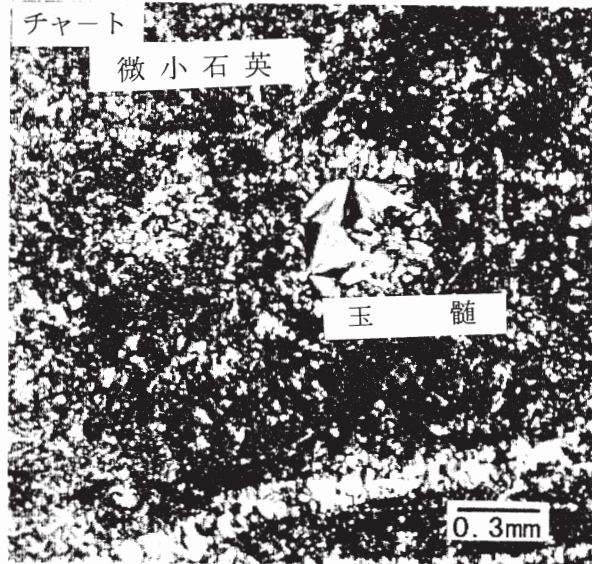
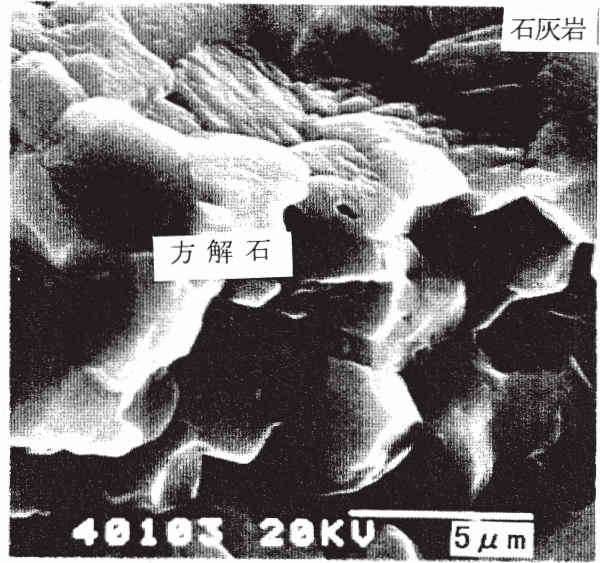
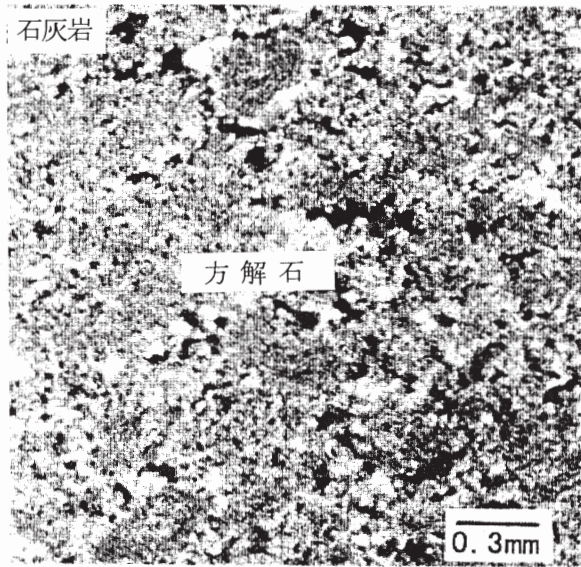


写真-2 石灰岩、チャート、かんらん岩の偏光顕微鏡及び走査顕微鏡写真

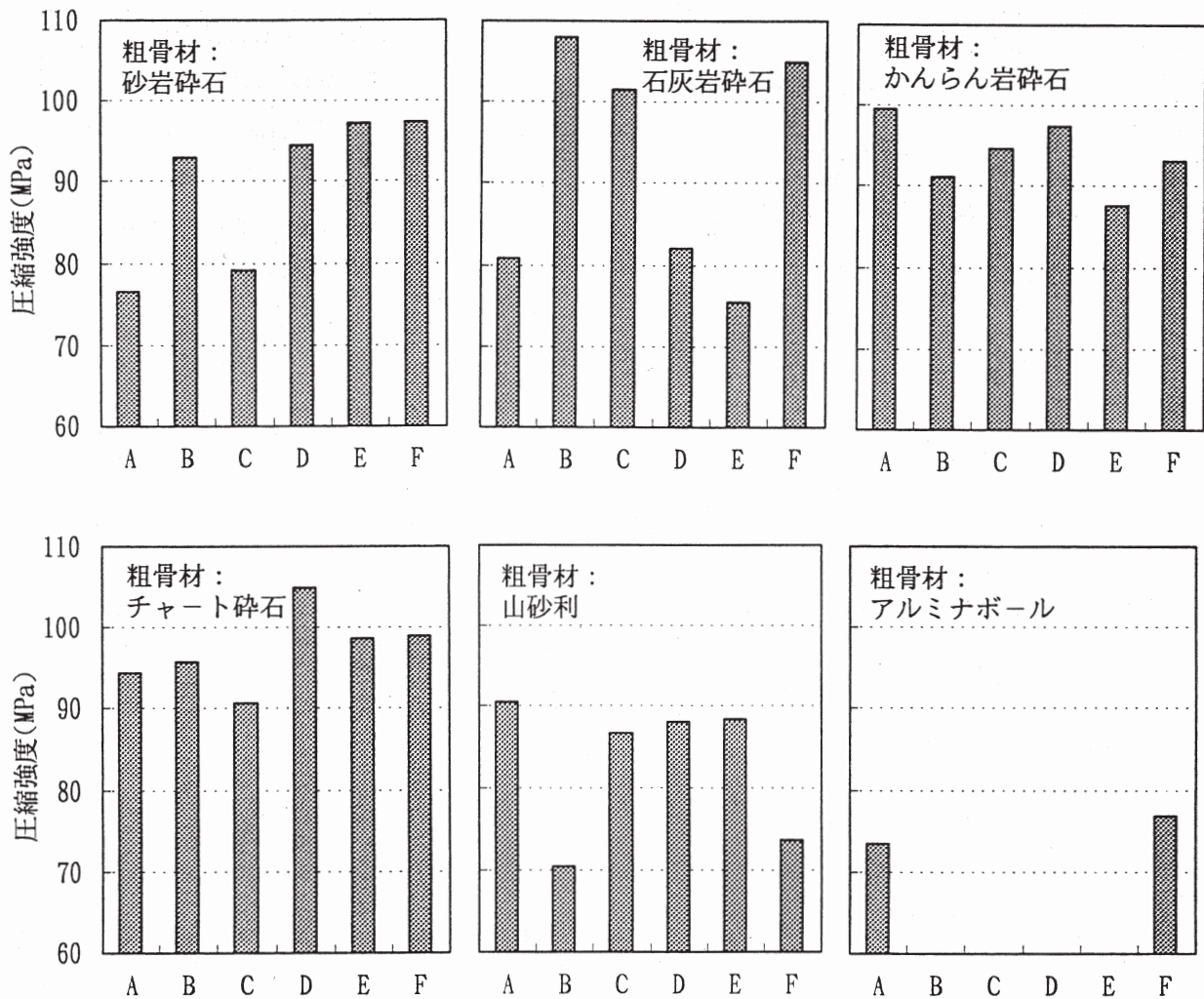


図-1 細骨材と粗骨材を各種類ずつ組合せて使用したコンクリートの圧縮強度

A: 砂岩砕砂; B: かんらん岩砕砂; C: 長良川川砂; D: 天竜川川砂; E: 山砂; F: 電気炉酸化スラグ

球形で平滑な表面を持つが、粒子には微細ひび割れがある。山砂は花崗岩の風化堆積物であり、主として石英、次いで長石、少量の雲母(黒雲母、白雲母)及び粘土(カオリン)から成る。アルミナボールは、ボールミルのボールとして使用されていたセラミックボールで、使い古しているために表面は非常に平滑である。粒径は10-20mmである。ボールの圧縮強度及びヤング係数は約400MPa及び70GPaである。電気炉酸化スラグ骨材は製鋼過程で発生するスラグを骨材としたものである。従来の電気炉酸化スラグには不安定な鋳物相を含むので、コンクリート用骨材として不適当とされていた。しかし、近年、電気炉製鋼法の改善が進んだ結果、酸化スラグについては、従来問題視されていた不安定鋳物相の含有問題が解消の方向にあり、この骨材をコンクリート用骨材として利用できる可能性が高くなっている^{11,12)}。スラグの構成鋳物はMgOを含んだWustite(FeO)、Iron

Chromite(FeO・Cr₂O₃)及び安定なSilicate Glassである。スラグ細骨材は硬い球形粒子(直径0.03-5mm)であり、比重は3.6である。

3.3 コンクリートの強度

細骨材と粗骨材を各6種類ずつ組み合わせて使用したコンクリートの28日の圧縮強度試験結果を図-1に示す。図は粗骨材別に細骨材種類を横軸にして比較した場合である。かんらん岩砕砂と石灰岩を用いたコンクリートが、他の骨材種類に比べて最高圧縮強度を示している。山砂利とアルミナボールを用いたコンクリートが、他の粗骨材を用いたコンクリートに比べて、低い強度を示している。

同じ粗骨材であっても、細骨材の種類別でかなりの強度差が生じている。例えば、同じ粗骨材に2種の川砂を組み合わせた場合、川砂の産地によって大きな強度差が生じている。これらの強度差を取り出して図示したのが図-2である。強度差が一番少な

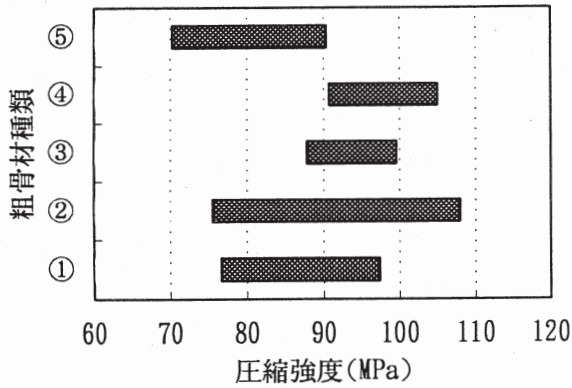


図-2 各種粗骨材によるコンクリートの強度
 ①砂岩砕石；②石灰岩砕石；③かんらん岩砕石；
 ④チャート砕石；⑤山砂利

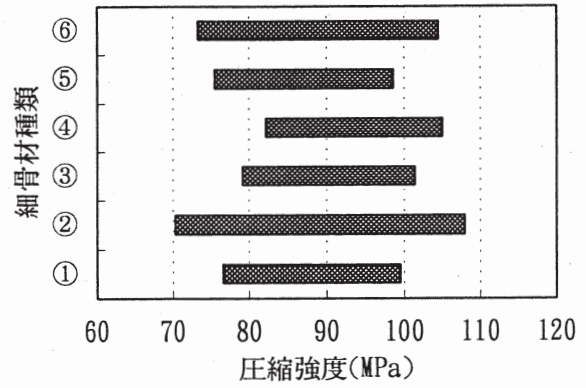
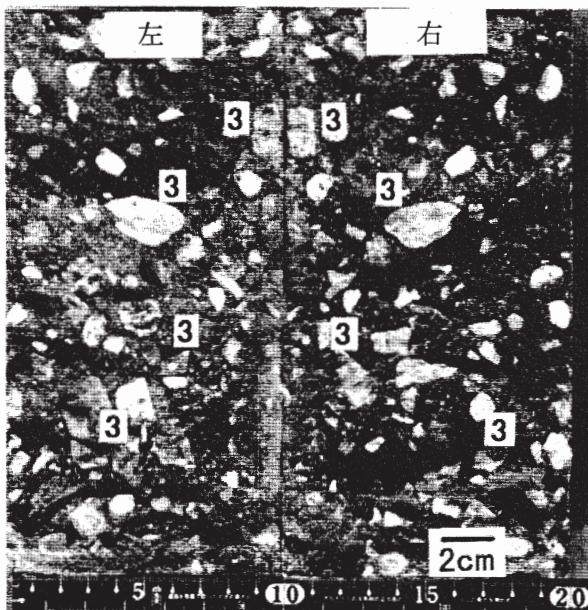


図-3 各種細骨材によるコンクリートの強度
 ①砂岩砕石；②かんらん岩砕石；③長良川川砂；
 ④天竜川川砂；⑤山砂；⑥電気炉酸化スラグ

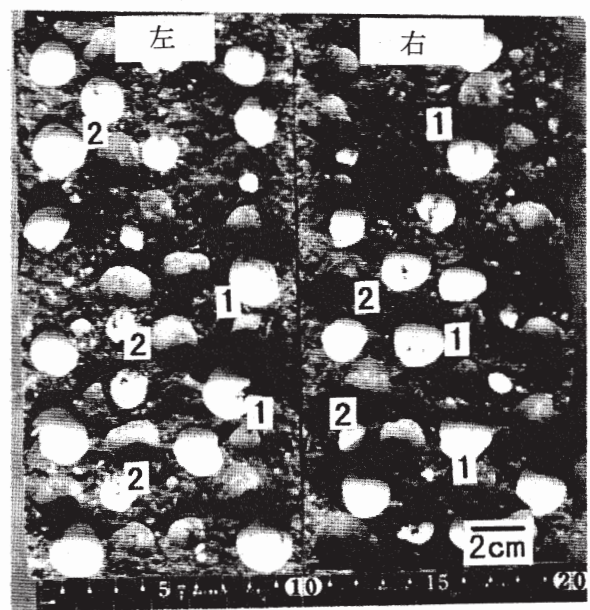
いのはかんらん岩砕石であり、石灰石砕石の場合が最も大きい。粗骨材岩質が均質であっても細骨材との組合せではコンクリート強度が大きくばらつくといえる。図-3は細骨材を一定として粗骨材別に比較して、その強度差を取り出したものである。かんらん岩砕石及び電気炉酸化スラグの強度差が大きい。図-2と図-3を比較すると、図-3の方が強度差が大きく、粗骨材が異なる方が細骨材が異なるよりも強度差は大きくなっている。すなわち、粗骨材の方が強度に及ぼす影響は大きいといえる。

写真-3(a)に示したコンクリート供試体の破断面の観察結果によって、山砂利を用いたコンクリートには、骨材自体の破壊が頻繁に起こっている。その

原因として、山砂利の粒子内部にひび割れが存在し、骨材の強度が弱いことをあげることができる。アルミナボールを用いたコンクリートの圧縮強度が低い原因は写真-3(b)から分かるようにアルミナボールとモルタルの界面付着が良くないからである。アルミナボールの材質は高い強度を示し骨材から割れることはないので付着さえ良ければ、最高のコンクリート強度を示した筈である。山砂利も平滑な表面を持ち付着は良くないが、それ以上に粒子強度が低いので、コンクリートの破断面には割れた山砂利が多数見られる。これらの両骨材の結果は、コンクリート骨材には、粒子強度が高く付着性が良いことが必要であることを示す典型例である。



a : 山砂利



b : アルミナボール

写真-3 コンクリート供試体の破断面

1 : 骨材表面からの剥離 2 : 骨材の剥離跡 3 : 骨材の破断

コンクリートの強度と原石強度の関係を図-4に示す。砂岩原石が高い平均強度を示しているが、強度の変動係数も非常に大きく、コンクリート強度が原石の強度よりかなり低い。4種類の原石の中では、石灰岩が一番低い平均強度を示しているが、石灰岩原石強度と石灰岩使用コンクリート強度がほぼ等しくなっている。この原因は、石灰岩は骨材強度があまり高くなく、今回使用したモルタル強度に近かったことが第一の原因ではあるが、石灰岩原石強度の変動係数は小さく、その内部構造が比較的均質であり、また、石灰岩とセメントペーストとの反応による石灰岩とマトリクスとの界面付着強度が高くなった¹⁰⁾(写真-4)ことなどをあげることができる。一方、砂岩やかんらん岩は表-5のばらつきの大きさや表

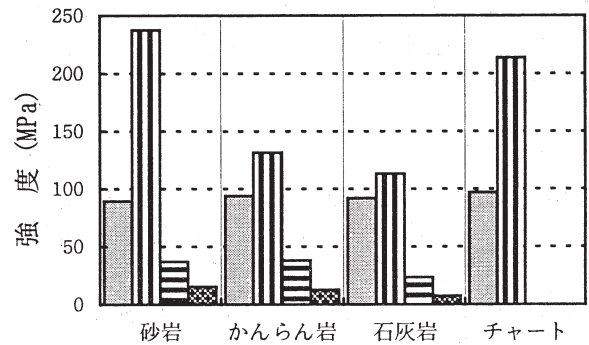


図-4 コンクリートの圧縮強度と岩石強度の関係

□コンクリートの圧縮強度 ■岩石の圧縮強度
 ■岩石の曲げ強度 ■岩石の引張強度

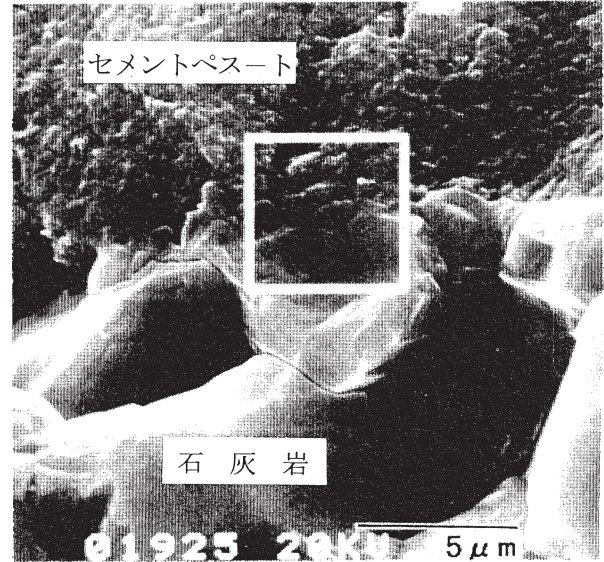
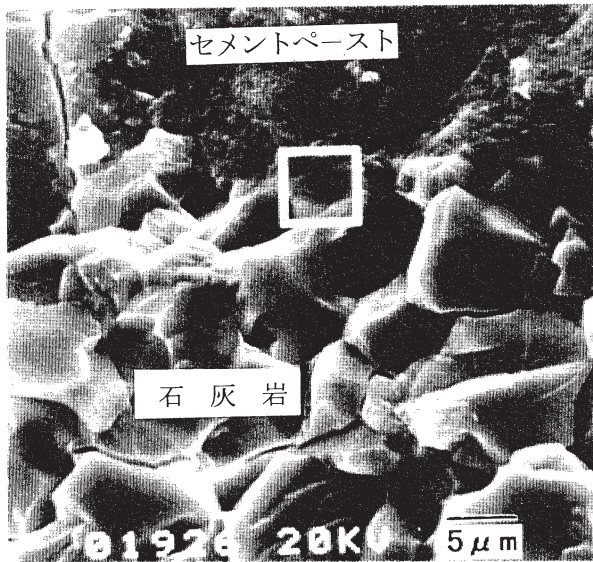


写真-4 石灰岩とセメントペーストとの境界面

表-6 圧縮強度試験の供試体破断面に骨材の表面が見える割合

粗骨材種類	細骨材					
	砂岩砕砂	かんらん岩砕砂	長良川川砂	天竜川川砂	山砂	電気炉酸化スラグ
砂岩碎石	△	△	○	△	△	△
石灰岩碎石	○	○	○	○	○	○
かんらん岩碎石	□	□	□	□	□	□
チャート碎石	○	△	△	△	△	△
山砂利	○	○	○	○	△	△
アルミナボール	◇	-	-	-	-	-

注) ・算定方法、破断面中に骨材表面が見える粗骨材の数/破断面中のすべての粗骨材の数

・ランクの範囲, ○: 0-10%, △: 10-20%, □: 20-30%, ◇: 100%

一6から分かるように非均質である。表-6に示すように、コンクリート供試体の破壊断面の観察結果を整理すると、石灰岩使用コンクリートでは界面での破壊率が低い。それに反して、かんらん岩あるいは

砂岩を用いたコンクリートでは、界面破壊率が高い。これらの原因としては、かんらん岩に存在する繊維状(クリソタイル)や板状(アンティゴライト)の蛇紋岩鉱物、砂岩に存在する劈開の顕著な雲母など

の骨材中の弱点が、骨材強度や界面付着強度を低下させ、コンクリート強度を低くする。そして、これらの弱点が高強度コンクリートの強度限界となるといえる。

4. まとめ

本研究では、種々の細・粗骨材を用いた高強度コンクリートの強度が、骨材自体の強度や内外の微細構造によって、どのような影響を受けるかについてコンクリート工学及び鉱物学的観点から検討した。得られた結果をまとめると以下のようである。

- (1) 同一配合のコンクリートにおいて、各種の細骨材と粗骨材を用いたコンクリートの強度が70-108MPaを示し、その差は38MPaであった。石灰岩とかんらん岩砕砂を用いたコンクリートが最高強度を示し、山砂利及びアルミナボールを用いたコンクリートが、他の粗骨材を用いたコンクリートに比べて低い強度を示した。
- (2) コンクリート破断面の観察によると、粒子内部にひび割れが存在する山砂利では骨材自体の破壊が多く、また一方、高い骨材強度・ヤング係数を示し平滑な骨材表面を持つアルミナボール骨材では、結合材と骨材の界面でコンクリートの破壊が起こった。このことはコンクリート骨材には、粒子強度が高く付着性が良いことが必要であることを示す典型例である。
- (3) 石灰岩を用いたコンクリートの強度は石灰岩原石の強度とほぼ同じ値になった。これは、石灰岩は骨材強度があまり高くなく、今回使用したモルタル強度に近かったことが第一の原因ではあるが、微細構造が均質であり、セメントペーストとの反応が起こりセメントペーストとの界面付着が良いことなども、その原因としてあげることができる。
- (4) 高強度コンクリートの強度発現には、粗骨材を構成する岩石の微細構造が均質であり、岩石強度が高く、雲母及び蛇紋石のような弱い鉱物を含まないこと、骨材とモルタルとの付着強度が高いことなどが重要である。
- (5) 高強度コンクリート用骨材の選定では、骨材を構成する岩石・鉱物の物理・化学的、鉱物学性質を調査することが重要である。

参考文献

- 1) P.C.Aitcin and P.K.Mehta: Effect of course aggregate characteristics on mechanical properties of high-strength concrete. ACI Materials Journal, Vol. 87,

- No. 2, pp. 103-107(1990)
- 2) W.Baalbaki, B.Benmokrane, O.Chaallal, and P.C.Aitcin: Influence of coarse aggregate on elastic properties of highstrength performance concrete. ACI Materials Journal, Vol. 88, No. 5, pp. 499-503(1991).
- 3) G.Giaccio, C.Rocco, D.Violini, J.Zappitelli, and R.Zerbino: High-strength concrete incorporating different coarse. ACI Materials Journal, Vol. 89, No. 3, pp. 242-245(1992).
- 4) 柿崎正義・枝広英俊: 粗骨材の品質が超高強度コンクリートの圧縮強度特性に及ぼす影響. コンクリート工学論文集, Vol. 4, No. 2, pp. 9-21(1993).
- 5) K.Morino: Properties of bond between various types of rock aggregate and cement paste. Transactions of JCI, Vol. 2, pp. 109-116(1980)
- 6) 森野奎二: 高強度コンクリートの骨材品質と強度発現, 建設用原材料, Vol. 2, No. 2, pp. 1-8(1992).
- 7) 森野奎二: 限界への挑戦—骨材と付着の観点から. セメント・コンクリート, No. 546, 1992. 8.
- 8) 梶本浩盟, 高建明, 森野奎二: 各種骨材とシリカフェーム添加セメントペーストとの付着強度, 土木学会中部支部研究発表会講演概要集, 第5部, pp. 494-495(1992).
- 9) 森野奎二, 山口良典: 高強度コンクリート用骨材の品質特性, 骨材資源, 通巻No. 99, pp. 113-127(1993)
- 10) 森野奎二, 田中良典, 川原好恵: コンクリート骨材と結合材ペーストとの界面性状, 土木学会中部支部研究発表会講演概要集, 第5部, pp. 573-574(1993).
- 11) 森野奎二, 中尾仁二, 瀧上栄治, 榊原健司: 球状化した電気炉酸化スラグのコンクリート用細骨材としての適用性, 建設用原材料, Vol. 3, No. 2, pp. 27-34(1993)
- 12) 森野奎二, 瀧上栄治, 岩部安喜, 服部裕治: 電気炉酸化スラグ及び徐冷スラグ骨材を用いたコンクリートの諸性質, 建設用原材料, Vol. 4, No. 1, pp. 2-9(1994)

(1997年5月8日受付 6月10日受理)