

# RC 超高層建物用コンクリートに関する研究 (その5)

——特殊骨材を使用したコンクリートの強度発現機構に関する一考察——

斉藤 裕司 久保田 昌吾  
中根 淳

## Experimental Study on High-strength Concrete for High-rise Reinforced Concrete Building (Part 5)

——A Study on Mechanism of Strength Enhancement of Concrete Using Special Aggregate——

Hiroshi Saito Shogo Kubota  
Sunao Nakane

### Abstract

Much development work is going on for very high-strength concrete of specified strengths over 1,000 kgf/cm<sup>2</sup>. The authors have obtained concrete which exhibits a maximum strength of 1,800 kgf/cm<sup>2</sup> using special fine aggregate having Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> as the main component. Concrete with this aggregate develops strength approximately 300 kgf/cm<sup>2</sup> higher than ordinary aggregate concrete at the same water-binder ratio.

This report describes the results of investigations concerning aggregate strength and bond strength in order to explain the reason for this strength enhancement. These results are as follows:

① The special aggregate is very hard, but the results of BS crushing tests are slightly higher than with ordinary aggregates.

② There are many narrow grooves on particle surfaces of the special aggregate. It may be expected that bond strength will be increased with entrance of binder into these grooves.

③ The content of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> in cement hydrate is higher near the boundary with the special aggregate compared with locations farther away and there is a possibility that chemical bonding has occurred between cement hydrate and the aggregate.

### 概要

コンクリートの分野では、設計基準強度 1,000 kgf/cm<sup>2</sup> 以上の超高強度コンクリートの開発が盛んに行なわれている。当社では、細骨材に Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> を主成分とする特殊な材料を使用することによって同一水結合材比と比較しても従来の骨材より約 300 kgf/cm<sup>2</sup> 以上大きく、最大で 1,800 kgf/cm<sup>2</sup> 程度のものを開発している。

本報告は、この強度増大の理由を解明するため、骨材の強度、結合材との付着力に関与する因子に着目した調査検討を述べたもので、以下のことが明らかとなった。

① 特殊骨材は非常に硬いが、BS 規格による破砕値は従来の骨材に比べてやや大きい。

② 特殊骨材の表面には幅が 25~60 μm で、長さが 30~150 μm 程度の溝が存在し、この溝に結合材が入り込むことによる付着力の増大が期待できる。

③ 特殊骨材との界面付近の水和物の化学組成は界面から離れた位置に比べて Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> の含有割合が多く、結合材と反応して化学的な結合力を生じている可能性が高い。

## 1. はじめに

鉄筋コンクリート造超高層建物を可能にするための超高強度コンクリートに対するニーズは大きく、多くの機関で盛んに研究開発が行なわれている。さらに、建設省においても超高層建築物の超高強度化技術の開発プロジェクト計画を昭和63年から発足させ60階建て以上を可能にする設計基準強度 600~1,000 kgf/cm<sup>2</sup> を目標としたコンクリートの開発が行なわれている。

従来からの知見によれば、コンクリートの高強度化の方法は図-1 のよう整理され<sup>1)</sup>、1,200 kgf/cm<sup>2</sup> 以上の超高強度のコンクリートを得るためには、種々の要素技術が必要となるが、なかでも骨材の選定は重要な要素とい

える。本報告は特殊な骨材を細骨材に使用すると超高強度コンクリートの強度を増大できることを示すデータの一部を紹介するとともに、その強度発現に影響を与えるメカニズムについて若干の検討を行なった結果について述べる。

## 2. 骨材の種類と超高強度コンクリートの強度

今までに当社で行なった各種の骨材を使用した超高強度コンクリートについて、その強度と水結合材比との関係を、図-2 に示す。当然ながら、超高強度コンクリートにおいても、従来のコンクリートと同様に、強度は結合材水比が大きくなるにつれて増大する。その際、SiO<sub>2</sub> を主成分とする従来の細骨材（以下SiO<sub>2</sub>系骨材と呼ぶ）

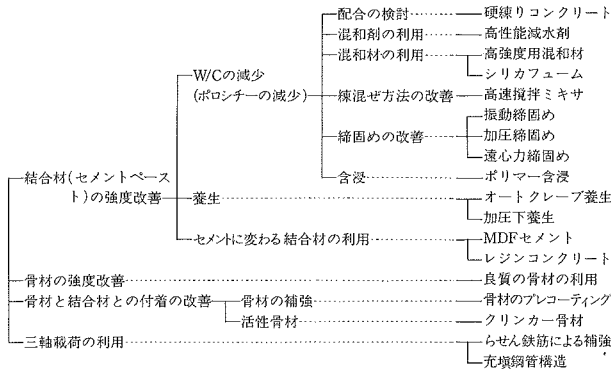


図-1 コンクリートの高強度化の方法

表-1 骨材の破砕試験結果

試験粒径 (mm)	骨材の種類	破砕値(%)			
		No.1	No.2	No.3	平均
5~10	SiO <sub>2</sub> 系骨材	19.0	20.8	19.9	19.9
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 系骨材	26.6	25.3	26.0	26.0

表-2 骨材の構成鉱物

試料	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 系 特殊骨材	SiO <sub>2</sub> 系 骨材
Corundum (α-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	◎	
Mullite (Al <sub>6</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>13</sub> )	○	◎ : 多量含有 ○ : 少量含有 △ : わずかに含有
Feldspar		◎
Quartz		○

に比べて、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> を主成分とする細骨材 (以下 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 系骨材と呼ぶ) を使用すると、同一結合材水比でも強度が増大する傾向が明確に認められ、その差は約 300 kgf/cm<sup>2</sup> となっていることが特徴的である。

### 3. 強度差を検討するための調査内容

#### 3.1 調査内容

同一の結合材水比でも使用する細骨材の種類によって約 300 kgf/cm<sup>2</sup> の強度差が生ずる理由を検討するために、以下の調査を行なうこととした。

- (1) 骨材の強度
- (2) 骨材と結合材との付着性状
  - ① 物理的な付着性状
    - 骨材表面の粗さ—マイクロスコープによる観察
    - 骨材と結合材との界面—SEM 観察 (走査型電子顕微鏡)
  - ② 化学的な付着性状
    - 骨材中の鉱物—X 線回折
    - 骨材との界面に—EDS 分析 (エネルギー分散型元素分析)

#### 3.2 供試試料

上記の調査を行なうに際して Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 系の特殊骨材と従来の SiO<sub>2</sub> 系の骨材それぞれ一種類を選定した。また、骨材と結合材との界面を調査するために単位結合材量が

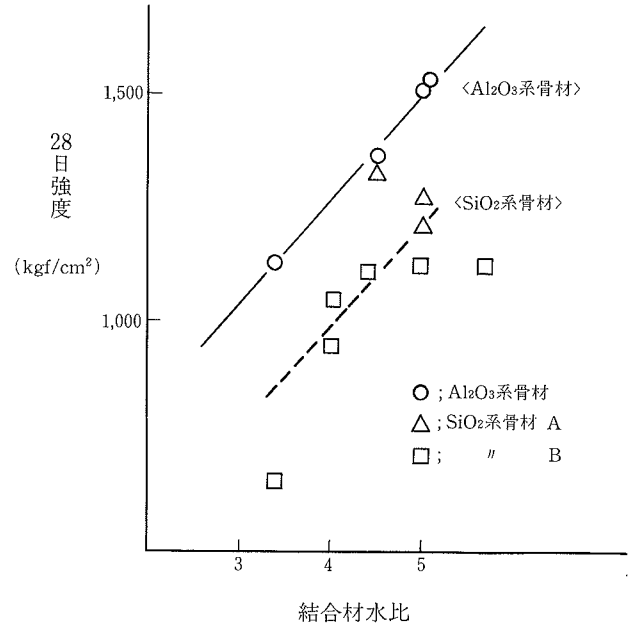


図-2 細骨材の種類とコンクリートの強度

750 kg/m<sup>3</sup>、水結合材比が20%で、粗骨材には同一の SiO<sub>2</sub> 系を、細骨材として Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 系、または SiO<sub>2</sub> 系を使用した超高強度コンクリートを供試した。

## 4. 調査結果と検討

### 4.1 骨材の強度

骨材の強度は圧縮試験、またはせん断試験などによって求めた値から評価すべきと考えられるが、これらの試験は粒径が 5 mm 以下の細骨材には適用できない。そこで、強度をそのまま評価できるものではないが、BSI の規格<sup>2)</sup>による骨材の破砕試験に準じ骨材の破砕値を測定した。5~10 mm の粒径に調整した両骨材の試験結果を表-1 に示す。SiO<sub>2</sub> 系の骨材に比べ、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 系の骨材の破砕値は約10%ほど大きく、破砕されやすいと判断される結果が得られた。

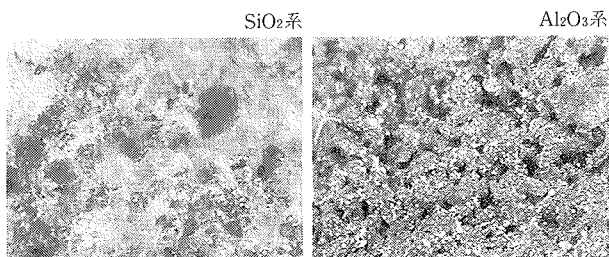
上記のように、骨材の破砕値とコンクリートの強度との間に対応関係は認められない。骨材の強度と超高強度コンクリートの強度との関係についてはいろいろ検討されているが、明確な結果は得られておらず、この点は今後の検討課題である。

### 4.2 骨材と結合材との付着性状

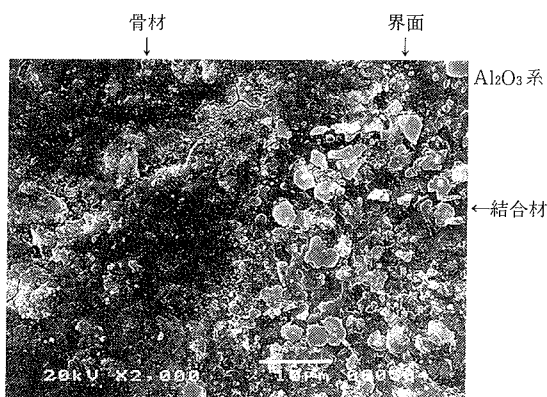
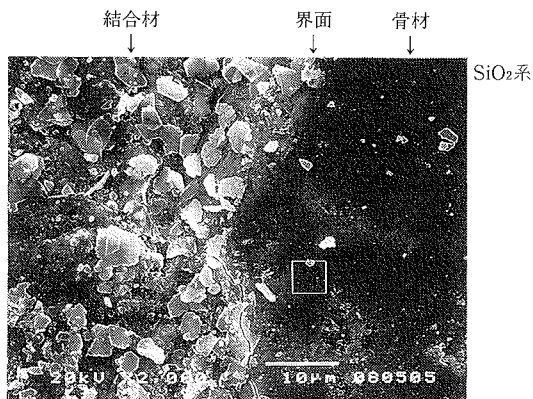
#### 4.2.1 物理的な付着性状

##### (1) 骨材表面の粗さ

SiO<sub>2</sub> 系骨材と Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 系骨材の表面を写真-1 に示す。両者を比較して、非常に特徴的なことはより高い強度を示した Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 系の骨材の表面に幅が 20~90 μm 程度で長さが 50~300 μm の溝が存在することである。このことは結合材が根を張るように骨材の内部まで侵入できることを示唆しており、単に表面が凹凸である従来の SiO<sub>2</sub> 系骨材に比べて付着力が増大する可能性がある判断される。



写真一 両骨材の表面状態



写真二 骨材と界面（2,000倍）

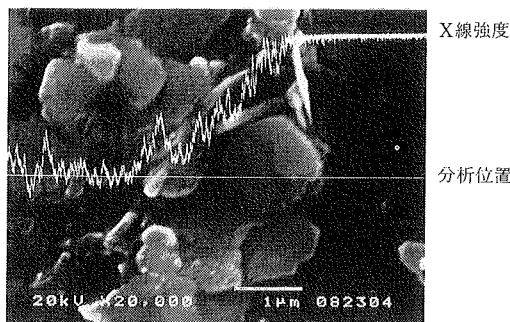
(2) 骨材と水和物との界面の状態

コンクリートを#3,000の研磨材で研磨し骨材との界面をSEM（走査型電子顕微鏡）で観察した。写真二に示すように、両骨材とも水和物と密着しており、その境界に隙間などは認められない。

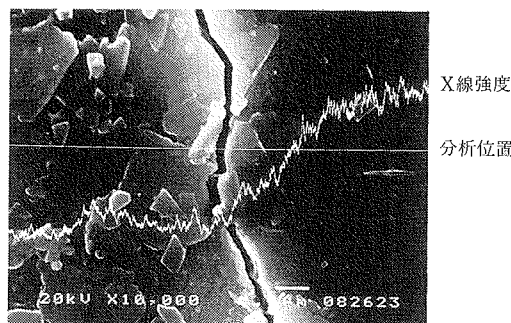
4.2.2 化学的な付着性状

(1) 骨材の鉱物組成 X線回折法によって調べたSiO<sub>2</sub>系およびAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>系両骨材の構成鉱物を表一に示す。表示のように、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>系骨材では、大部分はCorundum (α-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)で、Mullite (Al<sub>6</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>13</sub>)も少量含まれている。一方、SiO<sub>2</sub>系骨材では長石が主で、石英も含まれている。

(2) 骨材と界面における水和物の化学組成 水和物と骨材との界面において化学反応が生じているかを検討するために行なったEDS（エネルギー分散型元素分析装置）による分析結果を以下に説明する。



写真三 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>系骨材界面でのAlのライン分析



写真四 SiO<sub>2</sub>系骨材界面でのKのライン分析

EDSは走査型電子顕微鏡下で高速の電子線を試料面に照射し、試料から出てくる特性X線の強さを測定することによって元素の種類と含有量を測定する。測定方法は電子線を照射した点を分析する点分析、電子線を一直線上を走査しながら測定するライン分析、およびある範囲内の平均値として分析する面分析の三種類がある。

(3) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>系骨材との界面 写真三にAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>系骨材と水和物との境界面におけるAlの分布をライン分析法で測定した結果を例示する。写真中央の直線が走査位置を示し、ジグザグの線がAlの濃度を示すX線の強さを示している。図示したように、Alの濃度は境界面で急激に減少するのではなく、2~3 μm程度の範囲で漸減する。このことはAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>系骨材との境界付近の水和物がAlに富んでいることを示している。そこで、調査位置1では骨材およびその境界面から0.5, 3 μm, 調査位置2では骨材および境界面から0.5, 3, 5 μm程度離れた位置の水和物の化学組成について面分析した結果を表一に示す。

境界面から3~5 μm程度離れた位置の水和物の化学組成は(4)に後述のSiO<sub>2</sub>系骨材との境界面から3 μm以上離れた位置と類似している。また、そのCa/Siモル比は1.1~1.8を示し、通常セメント水和物の値（生成条件によって1~2）と近似しており、この付近は骨材の影響を受けていないセメント水和物の組成と判断される。

一方、0.5 μm程度までのごく境界付近ではAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の含有量は界面から5 μm以上離れた位置より約4倍大きい。また、境界面付近の水和物のCa/Siモル比は0.4~0.8と境界面から5 μm離れた位置に比べて半分以

表一三 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 系骨材付近の水和物の化学組成

(調査位置 1)

測定位置		骨材自身	骨材界面からの位置(μm)		
			0.5	3	
含有割合 (%)	CaO	1.9	28.8	45.1	
	SiO <sub>2</sub>	7.8	37.7	26.6	
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	77.7	25.4	13.2	
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.1	4.4	2.7	
	K <sub>2</sub> O	1.0	3.8	2.4	
Ca/Si			0.8	1.8	
Ca/Al			0.7	2.0	

(調査位置 2)

測定位置		骨材自身	骨材界面からの位置(μm)		
			0.5	3	5
含有割合 (%)	CaO	0.3	14.8	27.2	38.4
	SiO <sub>2</sub>	5.3	40.0	26.2	39.0
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	92.8	39.9	37.5	10.2
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.0	0.9	2.6	5.2
	K <sub>2</sub> O		4.3	6.4	7.2
	Ca/Si			0.4	1.1
Ca/Al			0.2	0.4	2.2

下と小さい。

以上の結果から、境界面付近の水和物の化学組成は通常のセメント水和物とは異なり、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 分に富んでいると判定される。この結果を境界面付近で水和物が析出する際、通常の水和物に比べて過剰量の Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 分が骨材から供給されているためと解釈すると、境界付近で骨材と結合材との間に化学反応が生じ、それに伴って、強い化学結合力が生じている可能性が高いと判断される。

(4) SiO<sub>2</sub> 系骨材との界面 写真一 4 に SiO<sub>2</sub> 系骨材の主要構成鉱物である長石とその界面付近における K の分布をライン分析で測定した結果を例示する。なお、K は長石に比較的多く含まれている元素である。長石の界面においても約 1 μm の範囲で K の分布がそれより内部に比べてやや多いことを示す結果が得られており、やはりこの部分で内部位置とは異なる組成の水和物が生成していることを示唆している。表一 4 に、(3)と同様に長石、およびその界面から 0.5, 3, 5 μm 離れた位置の水和物の化学組成について面分析した結果を示す。長石の反応性を示すと考えられる K<sub>2</sub>O に着目すると、その含有量は 0.5 μm の位置で大きく、長石の境界面でも化学反応が生じていると判断される。また、(3)と同様にこの位置の Ca/Si モル比は 0.5~0.7 とやはり内部位置に比べて小さい。

### 5. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 系特殊骨材の強度発現機構に関する一考察

今回の調査結果によれば、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 系特殊骨材を細骨材として使用した超高強度コンクリートが従来の SiO<sub>2</sub> 系の骨材に比べて高強度を示す理由として、下記の二つが考えられる。

- ① 骨材表面に細かい溝が存在するため、結合材が骨材内部まで入り込むことによって付着力が増大する。
- ② Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 系骨材と結合材との化学反応によって生じ

表一四 SiO<sub>2</sub> 系骨材付近の水和物の化学組成

(調査位置 1)

測定位置		骨材自身	骨材界面からの位置(μm)		
			0.5	3	5
含有割合 (%)	CaO	0.9	28.2	42.9	51.8
	SiO <sub>2</sub>	63.6	46.3	39.6	30.9
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18.8	13.5	9.7	7.8
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.6	1.7	3.0	4.2
	K <sub>2</sub> O	13.8	10.3	4.7	5.3
Ca/Si			0.7	1.2	1.8
Ca/Al			1.2	2.6	3.9

(調査位置 2)

測定位置		骨材自身	骨材界面からの位置(μm)		
			0.5	3	5
含有割合 (%)	CaO	0.9	22.8	38.8	39.1
	SiO <sub>2</sub>	63.6	49.1	43.5	40.7
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18.8	12.4	10.1	12.4
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.6	2.3	2.9	4.0
	K <sub>2</sub> O	13.8	13.5	4.6	3.7
	Ca/Si			0.5	1.0
Ca/Al			1.1	2.3	1.9

た反応生成物による化学的な付着力が発現する。

なお、従来の SiO<sub>2</sub> 系の骨材でもその界面では化学反応が生じている結果が得られている。これら反応生成物の組成は異なり、それぞれの組成の決定にはさらに精度の高い分析法の適用が必要で、今後の検討課題である。また、この組成の差異が強度発現に差異を生じていると推察されるが、この確認には更に検討が必要である。

### 6. まとめ

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> を主成分とする特殊な材料を細骨材として使用すると従来の SiO<sub>2</sub> を主成分とする骨材に比べて著しく強度が増大する理由を解明するため、骨材の強度、骨材と結合材との付着力に関与すると考えられる因子に着目した調査・検討を行なって、以下のことが明らかとなった。

- ① 両骨材とも非常に硬いが、BSIの規格による破砕値は SiO<sub>2</sub> 系に比べて Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 系の骨材が10%程度大きな値を示した。また、破砕値と強度との関連は認められない。
- ② 両骨材の表面状態は異なり、単に凹凸である SiO<sub>2</sub> 系骨材に比べて Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 系の表面には、幅が 20~90 μm 程度で長さが 50~300 μm 程度の溝が存在する。このことは、結合材が骨材内部まで根を張るように入り込み、大きな付着力を発現する可能性がある。
- ③ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 系骨材界面付近の結合材の化学組成は内部位置のそれとは異なり、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含有量が多いと判定された。この事象は Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 系の骨材界面で化学反応により従来とは異なる組成の水和物が生じ、このために強い結合力が生じている可能性がある。

### 参考文献

- 1) 長滝：高強度コンクリートに関する研究とその実用化、コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 10, No. 1, (1988)
- 2) British Standard 812, (1951)