

論文

[1032] 高強度・超高強度コンクリートの圧縮破壊性状に及ぼす粗骨材品質の影響

正会員 谷川恭雄（名古屋大学建築学科）

正会員 中村正行（三重大学建築学科）

正会員○柴田辰正（日本セメント中央研究所）

小高茂央（名古屋大学大学院）

1. まえがき

最近、高性能A/E減水剤やシリカフュームなどの開発により、低水セメント比で流動性に富んだ 1000kgf/cm^2 以上の圧縮強度を持つ超高強度コンクリートの製造が可能となりつつある。一方、骨材の品質がコンクリートの強度性状に大きな影響を及ぼすことは既によく知られているが[1, 2]、セメントペーストの強度を最大限に発揮させるためには、セメントペーストよりも強度の大きい骨材を選定する必要がある。しかし、骨材のような粒子状材料の強度を正確に測定する方法は、まだ確立されていない。

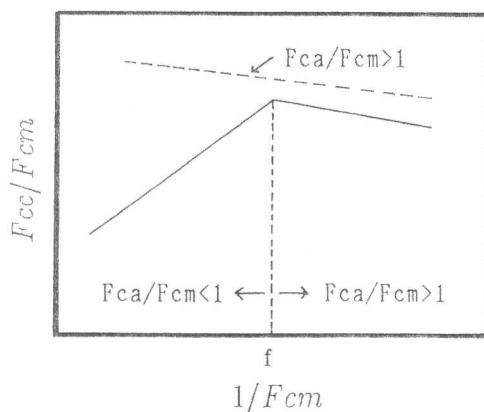
本研究では、粗骨材の品質が高強度・超高強度コンクリートの圧縮強度に及ぼす影響について検討するとともに、母材モルタル強度とコンクリート強度の関係から、粗骨材の見かけ強度を推定する方法およびマイクロクラックの発生・進展状況について、一連の実験的検討を行った。

なお、本研究は、建設省総プロNew RC（委員長：青山博之東大教授、高強度コンクリート分科会主査：友澤史紀東大教授）の一環として行ったものである。

2. コンクリートの圧縮強度に及ぼす粗骨材品質の影響

2.1 粗骨材強度推定のための仮説

筆者らは、既報[3]においてコンクリート中の粗骨材強度を推定するための次のような方法を提案した。すなわち、コンクリートの圧縮強度と母材モルタル強度との比(F_{cc}/F_{cm})は、粗骨材強度(F_{ca})が母材モルタル強度(F_{cm})よりも大きい場合($F_{ca}/F_{cm} > 1$)には、 F_{ca}/F_{cm} の値に無関係かまたは、 F_{ca}/F_{cm} の増加とともにわずかに減少するが、粗骨材強度が母材モルタル強度よりも小さい場合($F_{ca}/F_{cm} < 1$)には、 F_{ca}/F_{cm} の増加とともに直線的に増加し、 F_{ca}/F_{cm} の値が約1の場合に F_{cc}/F_{cm} は最大値を示すものと思われる。したがって、所定の骨材を用いたコンクリートの圧縮試験を行って、このような $F_{cc}/F_{cm} - F_{ca}/F_{cm}$ 図を描き、 F_{cc}/F_{cm} の値が最も大きくなる時の F_{ca}/F_{cm} の値を求めれば、粗骨材強度は、 $F_{ca} \approx F_{cm}$ として推定できるものと考えられる。しかし、実際には、強度が未知の粗骨材を用いたコンクリートの場合、このような $F_{cc}/F_{cm} - F_{ca}/F_{cm}$ 曲線を描くことはできない。そのため、横軸に F_{ca}/F_{cm} の代わりに $1/F_{cm}$ をとり、縦軸に F_{cc}/F_{cm} をとると、図-1のような模式図が描ける。この図におけるグラフの折れ曲がり位置の

図-1 $F_{cc}/F_{cm} - 1/F_{cm}$ 関係（模式図）

1/F_{cm}の値をfとすると、

$$F_{ca}/F_{cm}=F_{ca} \cdot f = 1 \quad (1)$$

となるため、粗骨材強度 (F_{ca}) は、1/f で与えられる。

この方法は、骨材固有の強度を求める方法というよりも、ある特定品種の母材中での見かけの骨材強度を求める方法とでもいうべきものである。

2. 2 実験方法

(1) 概 要

上記の方法に基づいて、実験Ⅰでは、母材モルタル強度

(水-結合材比)と粗骨材の品質がコンクリートの圧縮強度に及ぼす影響について、実験Ⅱでは、材令と粗骨材品質がコンクリートの圧縮強度に及ぼす影響について実験を行った。実験の概要をそれぞれ表-1および表-2に示す。コンクリートの調合は、目標スランプ(S_ℓ)を20cmの一定とし、試し練りによって決定した。供試体は、すべてφ10×20cmの円柱体とし、個数は各要因ごとに5個とした。

(2) 使用材料

使用した材料は、普通ポルトランドセメント (比重: 3.16)、大井川産川砂、段戸産碎石、岡崎産碎石、鈴鹿産碎石、シリカフューム (比重: 2.18、比表面積: 200,000cm²/g、平均粒径: 0.15μm) および高性能A E減水剤である。使用骨材の諸性質を表-3に示す。骨材はいずれも表面乾燥状態としたものを用いた。上記の段戸産、岡崎産および鈴鹿産碎石は、過去の使用実績により、それぞれ高品質、中品質および低品質と判断されている骨材である。

(3) 供試体の製作方法

コンクリートの混練には、パン型強制練りミキサーを使用し、全材料投入後約5分間混練した。打込みは、型枠内に2層に分けて行い、各層ごとに型枠外部を木づちでたたいた後、棒状バイブレータで振動締固めを行った。

キャッピングは、シリカフュームをセメント重量の25%混入したシリカフューム混入セメントペーストを用いて、打込み後約5時間目に行った。

材令1日目に脱型後、養生室内の水槽中 (温度23℃±2℃) で水中養生を行った。試験材令は実験Ⅰでは28日、

実験Ⅱでは3日、

7日、14日、28日および91日とした。

(4) 載荷方法

載荷には、200tfアムスラー型試験

表-1 実験Ⅰの概要

W/C* (%) [s/a (%)]	粗骨材の種類	V _{ca} /V _{cc} (%)	材令 (日)
20[26]*, 22.5[30]*, 25[33]*, 27.5[35]*, 30[39], 32.5[40], 35[41], 37.5[42], 40[42]	段戸産 (高品質) 岡崎産 (中品質) 鈴鹿産 (低品質)	40	28

[注] W/C*: 水-結合材 (C*=C+Si) 比, C: セメント, Si: シリカフューム, s/a: 細骨材率, V_{ca}/V_{cc}: 粗骨材容積比, *: シリカフューム混入

表-2 実験Ⅱの概要

W/C* (%) [s/a (%)]	粗骨材の種類	V _{ca} /V _{cc} (%)	材令 (日)
25 [33]	段戸産 (高品質) 岡崎産 (中品質) 鈴鹿産 (低品質)	40	3, 7, 14, 28, 91

[注] W/C*: 水-結合材比, s/a: 細骨材率, V_{ca}/V_{cc}: 粗骨材容積比

表-3 使用骨材の諸性質

骨材の種類	記号	表乾比重	絶乾比重	吸水率 (%)	粗粒率	単位容積重量 (kg/l)	実積率 (%)
大井川産川砂	—	2.62	2.58	1.60	2.76	1.72	66.7
段戸産碎石	NH	2.63	2.61	0.60	6.62	1.63	62.1
岡崎産碎石	NM	2.66	2.64	0.60	6.79	1.60	60.6
鈴鹿産碎石	NL	2.60	2.54	2.45	6.73	1.57	61.8

機を使用し、載荷速度は $2 \sim 3 \text{ kgf/cm}^2/\text{s}$ の一定とした。

2.3 実験結果とその考察

図-2は、本実験によるコンクリートの圧縮強度(F_{cc})と結合材-水比(C^*/W 、 $C^*=C+Si$ 、 C :セメント、 Si :シリカフェューム)との関係を示したものである。図によると、低品質骨材(鈴鹿産碎石、記号NL)を使用したコンクリートの圧縮強度は、結合材-水比 $C^*/W=2.5 \sim 3.6$ ($W/C^*=40 \sim 27.5\%$)の範囲で、結合材-水比が増加するにつれて強度が増加する傾向がみられるが、 $C^*/W=3.6 \sim 5.0$ ($W/C^*=27.5 \sim 20\%$)の範囲では、結合材-水比が増加しても圧縮強度はわずかに増加する程度である。中品質骨材(岡崎産碎石、記号NM)および高品質骨材(段戸産碎石、記号NH)を使用したコンクリートでは、 $C^*/W \geq 4.0$ ($W/C^* \leq 25\%$)の範囲において強度の増加率が小さくなっている。

図-3は、コンクリート強度と母材モルタル強度の比(F_{cc}/F_{cm})と母材モルタル強度の逆数($1/F_{cm}$)との関係を示したものである。図によれば、いずれの粗骨材を用いた場合も、これらの関係はほぼ2本の直線で表されることがわかる。

すなわち、前掲の図-1に示したように、

$1/F_{cm}$ がある値よりも小さい範囲では、 F_{cc}/F_{cm} の値は $1/F_{cm}$ の値の増加とともに増加するが、 $1/F_{cm}$ がある値よりも大きい範囲では、 F_{cc}/F_{cm} の値は一定値かやや減少する傾向を示し、2.1で述べた仮説がほぼ正しいことがわかる。低品質(NL)、中品質(NM)および高品質(NH)の粗骨材を使用したコンクリートに対する2直線の交点の $1/F_{cm}$ の値として、それぞれ $1/F_{cm}=1.25 \times 10^{-3}$ 、 0.94×10^{-3} および 0.87×10^{-3} ($1/\text{kgf/cm}^2$)が得られた。すなわち、各骨材の見かけの強度(F_{ca})は、約800、1050 および1150 kgf/cm^2 と推定できる。

なお、高品質骨材を使用したコンクリートでは、全体的に母材モルタルの強度を上回る圧縮強度を示し、 F_{cc}/F_{cm} の値は1よりも大きくなっている。このことより、品質の良い粗骨材を使用すれば、コンクリート強度は母材モルタル強度よりも増大させることができるといえる[4]。

図-4は、実験-IIによって得られたコンクリートの圧縮強度(F_{cc})と材令(T)の関係を示したものである。図によれば、低品質骨材を使用したコンクリートの圧縮強度は、材令14日まで材令とともに増加する傾向がみられるが、材令14日を過ぎると増加率が減少していく傾向がみられる。材令28日から91日では、圧縮強度はほとんど増加していない。これは、材令が14日を過

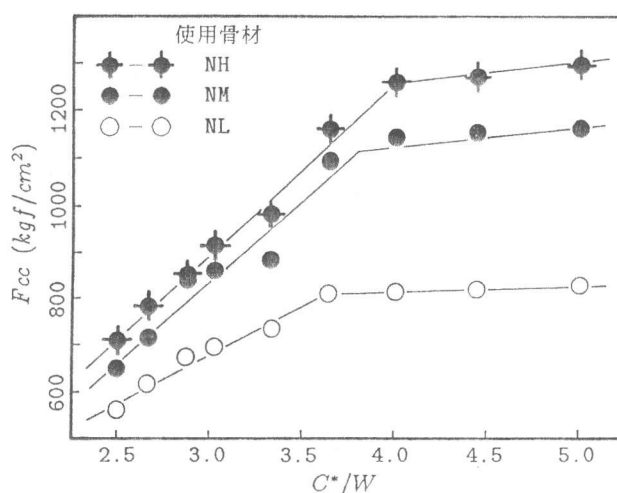


図-2 コンクリート強度(F_{cc})と結合材-水比(C^*/W)の関係

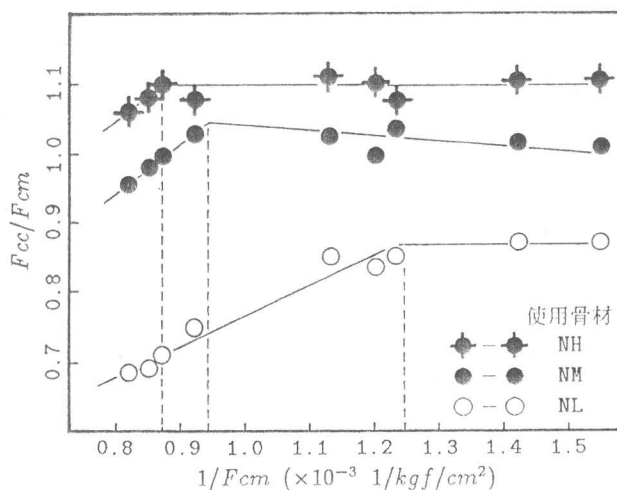


図-3 $F_{cc}/F_{cm} - 1/F_{cm}$ 関係

ぎると母材モルタルの強度が骨材の強度を上回り、コンクリートの破壊が骨材に支配されるため、母材モルタル強度が大きくなってもコンクリートとしての強度は増加しないものと考えられる。

中品質および高品質骨材を使用したコンクリートでは、材令とともに強度が増加しているが、材令28日以降に強度の増加率が、若干小さくなっている。

図-5は、コンクリート強度と母材モルタル強度の比(F_{cc}/F_{cm})と母材モルタル強度の逆数($1/F_{cm}$)との関係を示したものである。この図によれば、低品質骨材および中品質骨材を使用したコンクリートでは、それぞれ2本の直線で表されるのがわかる。すなわち、実験-Iの場合と同様に、本実験においても前掲の仮説が成立するものと思われる。2直線の交点の $1/F_{cm}$ の値として、低品質骨材を使用したコンクリートでは、 $1/F_{cm}=1.19 \times 10^{-3}$ ($F_{ca} \approx 840 \text{ kgf/cm}^2$)、中品質骨材の場合は、 0.99×10^{-3} ($F_{ca} \approx 1010 \text{ kgf/cm}^2$)となり、実験-Iとほぼ同じ値が得られた。

高品質骨材を使用したコンクリートは、材令が経過する ($1/F_{cm}$ が小さくなる)につれて、 F_{cc}/F_{cm} の値が増加していく

ことがわかる。このことより、高品質骨材を使用した場合は、さらに長期材令における圧縮試験を行わないと、折れ曲がり点が見られないものと思われる。

3. マイクロクラックの発生・進展状況

3. 1 実験方法

(1)概 要

実験-IIIでは、脆性的に破壊すると言われている高強度・超高強度コンクリートの破壊過程を明らかにするために、各載荷応力レベルにおけるマイクロクラックの発生・進展状況を観察することとした。

そのために、まず、 $\phi 10 \times 20 \text{ cm}$ の円

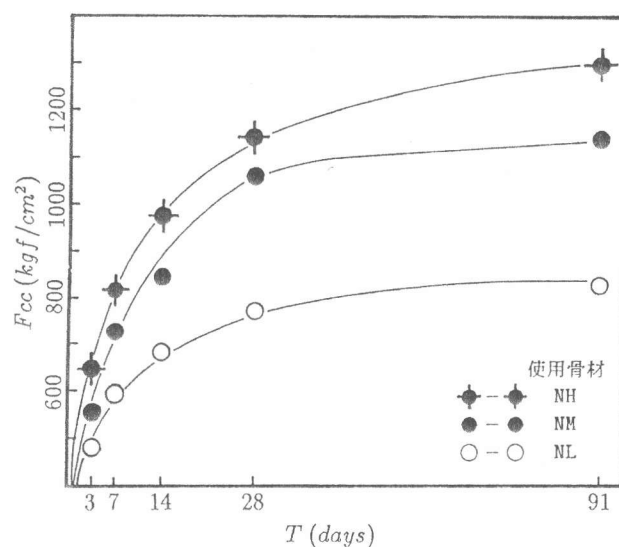


図-4 コンクリート強度(F_{cc})と材令(T)の関係

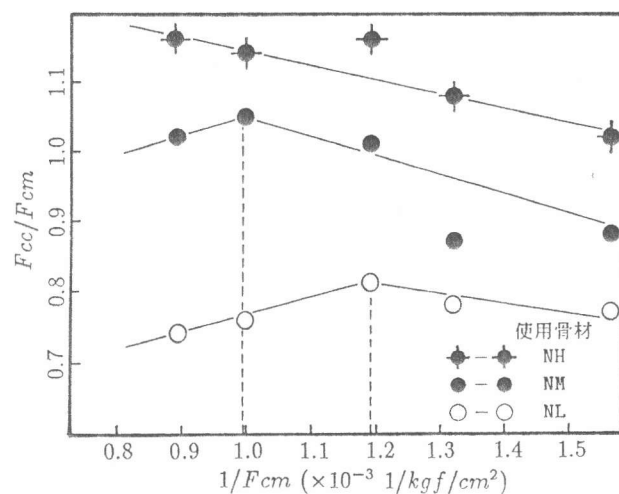


図-5 F_{cc}/F_{cm} — $1/F_{cm}$ 関係

表-4 実験-IIIの概要

Fc (kgf/cm^2)	粗骨材の種類	載荷応力度比 (%)	材令 (月)
400, 600, 800, 1000	岡崎産 (中品質)	0, 20, 40, 60,	5
1200	段戸産 (高品質)	80, 100	

[注] Fc: 目標圧縮強度

柱形供試体を用いて圧縮強度(F_{cc})を求めた。次に、供試体に所定の圧縮応力度を加えた後、コンクリートカッターを用いて供試体を載荷軸方向と平行に2等分するように切断し、切断面におけるマイクロクラックの発生・進展状況、クラックの長さなどを観察した。実験Ⅲの概要を表-4に示す。

(2) 使用材料

使用材料は、実験Ⅰで使用した材料と同様である。粗骨材は、岡崎産碎石と段戸産碎石を使用した。

(3) 供試体の製作方法および養生方法

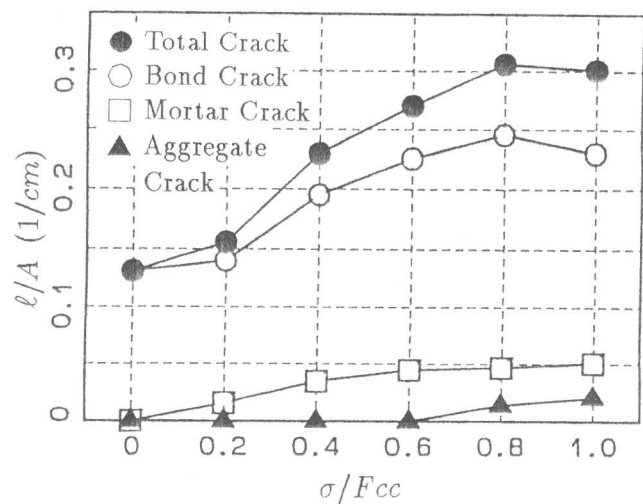
コンクリートは、目標圧縮強度(F_c)を400、600、800、1000および1200kgf/cm²の5水準とした。コンクリートの混練、打込みおよび養生方法は、実験Ⅰと同様である。試験材令は約5カ月とした。

(4) 測定および載荷方法

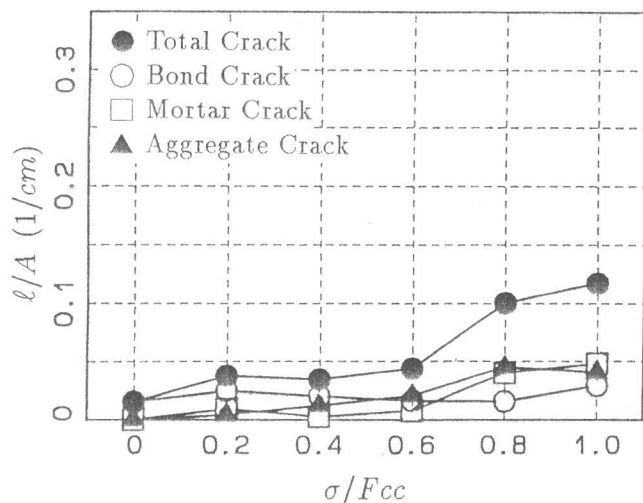
まず供試体各5個を最大耐力まで載荷し、圧縮強度(F_{cc})を測定した。次に供試体各3個に圧縮強度の約20、40、60、80および100%の応力度に相当する荷重を加えた後直ちに除荷して、コンクリートカッターを用いて載荷軸方向に切断した。切断面に蛍光塗料を噴霧し、ブラックライト(マイクロクラック中に浸入した蛍光塗料を発光させる装置)を用いて、マイクロクラックを観察した。また、コンクリート中の潜在クラックを観察するために、無載荷の供試体も準備した。載荷方法は、実験Ⅰと同様とした。

3. 2 実験結果とその考察

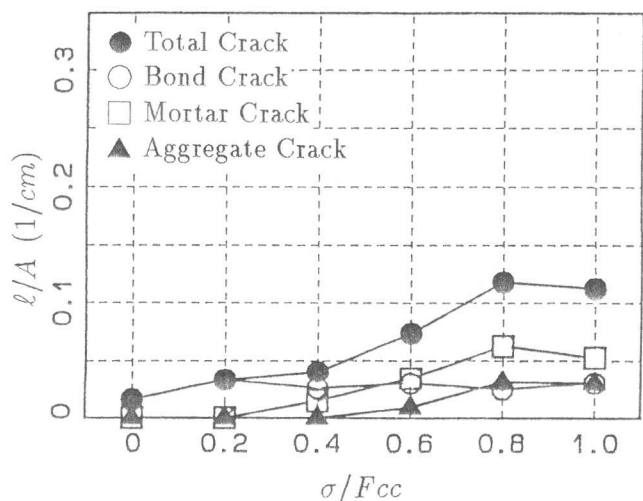
図-6は、マイクロクラックの長さ比(ℓ/A 、ここに A : 切断面面積)と載荷応力度比(σ/F_{cc})との関係の測定例を示したものである。既往の研究[5]によれば、普通強度コンクリートに発生するマイクロクラックは、ボンドクラックとモルタ



(a) $F_c = 400 \text{ kgf/cm}^2$



(b) $F_c = 1000 \text{ kgf/cm}^2$



(c) $F_c = 1200 \text{ kgf/cm}^2$

図-6 マイクロクラック長さ比(ℓ/A)と載荷応力度比(σ/F_{cc})の関係

ルクラックが大部分で、骨材クラックはほとんど観察されないが、本実験で用いた高強度・超高強度コンクリートに関してはかなりの骨材クラックが見られた。特に、母材モルタル強度と見かけの粗骨材強度が同程度と推定される $F_c=1000\text{kgf/cm}^2$ クラスのコンクリートでは、モルタルクラックと骨材クラックが、同程度の割合で発生している。高品質骨材を使用した $F_c=1200\text{kgf/cm}^2$ クラスのコンクリートでは、骨材クラックの量が、 $F_c=1000\text{kgf/cm}^2$ クラスのコンクリート（中品質骨材使用）に比べて少ない。このことから、骨材品質の違いがクラックの発生量に影響を及ぼしていることがわかる。

載荷応力度比(σ/F_{cc})が増加するにつれて、 $F_c=400\text{kgf/cm}^2$ クラスのコンクリートでは、ボンクラックの長さ比(l_b/A)が急激に増加している。 $F_c=1000$ および 1200kgf/cm^2 クラスのコンクリートでは、載荷応力度比が増加しても l_b/A の値は、ほぼ一定となり、その量もかなり少ない。これは、高強度コンクリートほどブリージングが少ないことを示すものと思われる。

クラックの長さの総和(l_t/A)は、コンクリートの強度が大きくなるほど少なく、超高強度コンクリートでは、破壊の直前に至るまで、載荷軸方向に連続した大きなクラックの発生が見られなかった。

4. まとめ

本研究では、高強度・超高強度コンクリートの圧縮強度におよぼす粗骨材品質の影響およびマイクロクラックの発生・進展状況について実験的考察を行った。本実験の結果は、およそ以下のようによまとめられる。

- 1) 高品質の骨材を使用した場合でも、圧縮強度が 1000kgf/cm^2 を超すようなコンクリートでは、強度の頭打ち現象が見られる。
- 2) 高品質の粗骨材を使用すると、コンクリートの圧縮強度は母材モルタルの強度よりも大きくなる場合がある。
- 3) 筆者らの提案した粗骨材強度推定方法によって、使用した粗骨材のコンクリート中での見かけの圧縮強度を推定することができる。
- 4) 本研究で用いた粗骨材の見かけの圧縮強度の推定値として、段戸産砕石（高品質骨材）では約 1150kgf/cm^2 、岡崎産砕石（中品質骨材）では約 1000kgf/cm^2 、鈴鹿産砕石（低品質骨材）では約 800kgf/cm^2 の値を得た。
- 5) 高品質骨材を使用した超高強度コンクリートでは、中品質骨材を使用したものに比べて、骨材クラックの量は少ない。
- 6) 超高強度コンクリートの場合、直接破壊に至らせるクラックは破壊の直前まで発生しない。

参考文献

- 1) 國府勝郎・飛坂基夫：高強度コンクリートと骨材，コンクリート工学，Vol. 28，No. 2， pp. 14-22， 1990. 2.
- 2) 小阪義夫・谷川恭雄・太田福男：コンクリートの破壊挙動に及ぼす粗骨材の影響（第1報）モデル解析法による検討，日本建築学会論文報告集，第228号， pp. 1-11， 1975. 2.
- 3) 小阪義夫・谷川恭雄：人工軽量骨材コンクリートの力学的特徴について，日本建築学会論文報告集，第240号， pp. 21-29， 1976. 2.
- 4) 鈴木清孝・桜本文敏・武居幸次郎：超高強度コンクリートに関する開発研究（その1 骨材の混入が強度に及ぼす影響），日本建築学会大会学術講演梗概集A， pp. 491-492， 1990. 10.
- 5) 小阪義夫・谷川恭雄：コンクリートの破壊挙動に及ぼす粗骨材の影響（第2報）マイクロクラック観察法による検討，日本建築学会論文報告集，第231号， pp. 1-11， 1975. 5.