

論文

[1038] 高強度・超高強度コンクリートの圧縮強度の試験方法並びに変動に関する研究

正会員 谷川恭雄 (名古屋大学工学部)

正会員 山田和夫 (愛知工業大学)

正会員 畑中重光 (三重大学工学部)

正会員○柴田辰正 (三重大学大学院)

1. まえがき

高強度・超高強度コンクリートは、最近、高性能 A E 減水剤やシリカフュームの開発などによって比較的容易に得られるようになり、今後、RC 構造物に用いられるコンクリートの高強度化が進むものと考えられる。コンクリートの圧縮強度試験のための JIS 規定として、既に、JIS A 1108 (コンクリートの圧縮強度試験方法) および JIS A 1132 (コンクリートの強度試験用供試体の作り方) がある。しかし、これらの規定は、通常強度のコンクリートを対象としたものであり、600kgf/cm²を超えるような高強度コンクリートにそのまま適用できるかどうかについては、十分検討しておく必要がある。

一方、高強度・超高強度コンクリートは、普通強度コンクリートに比べて圧縮強度の標準偏差が大きいことが指摘されている¹⁾が、その実態について系統的に調べた研究はほとんど見られない。

本研究では、次の 2 つの項目について検討することを目的として、一連の実験を行った。

- 1) 高強度・超高強度コンクリートの圧縮強度を測定するための標準試験方法を確立するために、主として供試体端面の処理方法および載荷方法が圧縮強度に及ぼす影響について検討する。
- 2) 高強度・超高強度コンクリートおよびコンファインドコンクリートの圧縮強度の変動の実態を明らかにする。

なお、本研究は、建設省総合技術開発プロジェクト「鉄筋コンクリート造建築物の超軽量・超高層化技術の開発」の一環として実施したものである。

2. 圧縮強度試験方法に関する実験 (実験-I)

2.1 実験方法

(1) 概要

圧縮強度試験方法について検討するために、次の 2 シリーズの実験を行った。

実験-I・1 では、載荷面の処理方法が圧縮強度に及ぼす影響について調べた。実験要因として、コンクリート強度および載荷面処理方法を取り上げた。コンクリートの 4 週圧縮強度 (F_c) は、600kgf/cm²、850kgf/cm² および 1100kgf/cm² 程度を目標とした。表-1 および表-2 に、それぞれコンクリートの調査表および実験-I・1 の概要を示す。

実験-I・2 では、試験機の種類 (剛性、球座の有無)、載荷速度および供試体寸法の影響について調べた。コンクリートの圧縮強度 (F_c) は、850kgf/cm² および 1100kgf/cm² 程度を目標とした。実験-I・2 の概要を表-3 に示す。

表-1 コンクリートの調査表

F_c (kgf/cm ²)	$W/(C+Si)$ (%)	単 位 量 (kg/m ³)					混和剤 (%)*
		C	W	S	G	Si	
600	39	411	160	773	994	—	A 0.80
850	30	533	160	744	999	—	A 1.20
1100	22	582	160	552	987	145	B 2.75

(注) F_c : コンクリートの目標圧縮強度、 $W/(C+Si)$: 水結合材比、
C: セメント、W: 水、S: 細骨材、G: 粗骨材、Si: シリカフューム、A・B: 高性能 A E 減水剤、*結合材に対する重量比

(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（比重：2.62、粗粒率：2.76）、岡崎産碎石（最大寸法：20mm、比重：2.65、粗粒率：6.65）、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AE減水剤である。

(3) 供試体の製作

コンクリートの混練には、強制練りミキサーを使用し、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、 $F_c = 600 \text{ kgf/cm}^2$ クラスのコンクリートでは材令1日目に行い、 $F_c = 850$ および 1100 kgf/cm^2 クラスのコンクリートでは、打込み後約5時間目に行った。材令1

～2日目に脱型後、養生室内の水槽中（温度 $21^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ ）で水中養生を行った。試験材令はすべて4週とした。

(4) 載荷方法

実験-I・1では、載荷に200tfアムスラー型試験機を使用し、載荷速度を2～3 kgf/cm²/sの一定とした。実験-I・2の載荷方法は、表-3に示す通りである。

2.2 実験結果とその考察

(1) 実験-I・1

図-1は、実験-I・1による圧縮強度の実測結果を示したものである。図によれば、減摩材などを挿入しない限り、平均強度(f_c)は供試体端面の処理方法によって、それほど顕著な相違を示さなかった。

両端部にのみ横補強筋を配置した供試体（記号⑥）の圧縮強度は、通常のセメントペーストでキャッピングした場合（記号⑤）とほぼ同程度であった。また、載荷面を減摩した場合（記号⑧）の強度は、セメントペーストキャッピングの場合（記号⑤）の約0.91倍となった。

図-2は、圧縮強度(f_c)に及ぼす載荷面の平面度の影響を示したものである。研磨した場合とシリカフューム混入セメントペーストでキャッピングした場合の平面度は、JIS規定の ± 0.05

表-2 実験-I・1の概要

記号	載荷面の処理方法	押えガラス板の厚さ
①	研磨	—
②	シリカフューム混入セメントペーストキャッピング ¹⁾	19mm
③	同上	10mm
④	セメントペーストキャッピング（標準キャッピング）	19mm
⑤	同上	10mm
⑥	標準キャッピング＋両端部横補強筋配置 ²⁾	10mm
⑦	標準キャッピング＋穴空きシート挿入 ³⁾	10mm
⑧	標準キャッピング＋減摩材挿入 ⁴⁾	10mm

- (注) 1) シリカフュームをセメント重量の25%混入
 2) 供試体両端部にφ3mmのスパイラル筋（降伏点=5500kgf/cm²）を2巻き配置
 3) □7mmの穴が均等に空いた厚さ0.1mmのポリエチレンシートを両端部に挿入
 4) 厚さ0.1mmのポリエチレンシート2枚の間にシリコングリスを塗布した減摩材を両端部に挿入

表-3 実験-I・2の概要

記号	試験機の種類	球座の固定方法	載荷速度	供試体の寸法
⑨	100tfアムスラー型	自由	標準 ¹⁾	φ10×20cm
⑩	同上	同	標準×1/2	
⑪	同上	同	標準×1/4	
⑫	200tfアムスラー型	同	標準	
⑬	同上	途中固定	標準	
⑭	同上	固定	標準	φ15×30cm
⑮	同上	自由	ひずみ速度制御 ²⁾	
⑯	200tfアムスラー型	自由	通常	

- (注) 1) 2～3 kgf/cm²/s、2) (3～4)×10⁻⁵/s、3) 試験機剛性=310t/mm

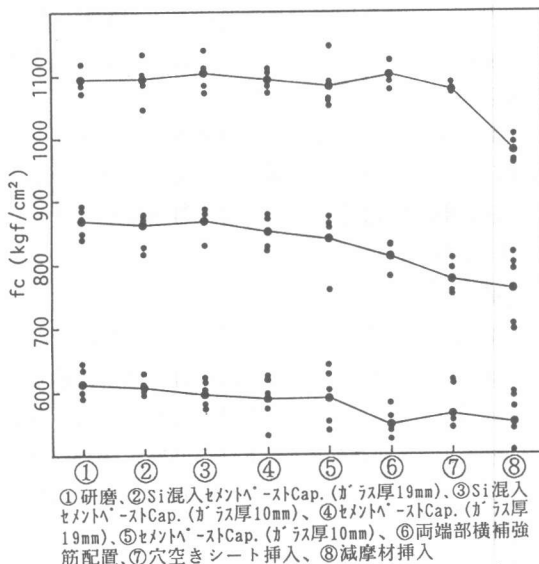


図-1 圧縮強度(f_c)の実測結果(実験-I・1)

mmの範囲内に入っているが、通常のセメントペースト(W/C=27~30%)でキャッピングした場合は、この範囲外の供試体はかなりみられた。圧縮強度は載荷面の平面度の低下とともに減少する傾向がみられるため、供試体端面の平面度の確保に十分留意する必要がある。

(2) 実験-I・2

図-3は、実験-I・2による圧縮強度の実測結果を示したものである。図-3によれば、200tfアムスラー型試験機(試験機剛性 $K=20\text{tf/mm}$)を用いた場合(記号⑫)と100tfアムスラー型試験機($K=28\text{tf/mm}$)を用いた場合(記号⑨)は、ほぼ同程度の強度が得られている。一般には、剛性の高い試験機を用いた場合の方が強度が大きくなることが報告されている²⁾が、今回の実験によれば、高剛性試験機($K=310\text{tf/mm}$)を用いた場合(記号⑮)の強度は逆に小さくなった。これは、試験機全体の剛性を高くするために、球座の剛性を通常の試験機よりも高くしてあるため、球座の回転が若干悪く、偏心荷重が加わったことが一因と考えられる。

球座の固定方法が圧縮強度に及ぼす影響について調べると、圧縮荷重 $P=20\text{tf}$ 時に球座を固定した場合(記号⑬)と球座を自由にした場合(記号⑭)とでは、ほぼ同程度の強度を示し、荷重 $P=0\text{tf}$ 時に上下の載荷板を平行状態に固定した場合(記号⑭)は、ばらつきが大きく平均強度が低くなる。これは、図-4に示すように供試体の載荷面の傾きの影響によるものと思われる。すなわち、球座が自由の場合は、載荷面の傾きは圧縮強度にそれほど影響を与えないが、荷重 $P=0\text{tf}$ 時に固定した場合は、載荷面の傾きの増大とともに圧縮強度は急激に減少することがわかる。

載荷速度が高強度コンクリートの圧縮強度に及ぼす影響は、普通強度のコンクリー

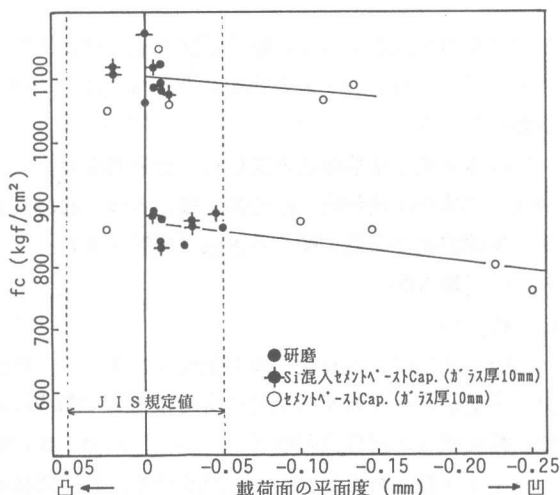


図-2 圧縮強度(f_c)に及ぼす載荷面の平面度の影響

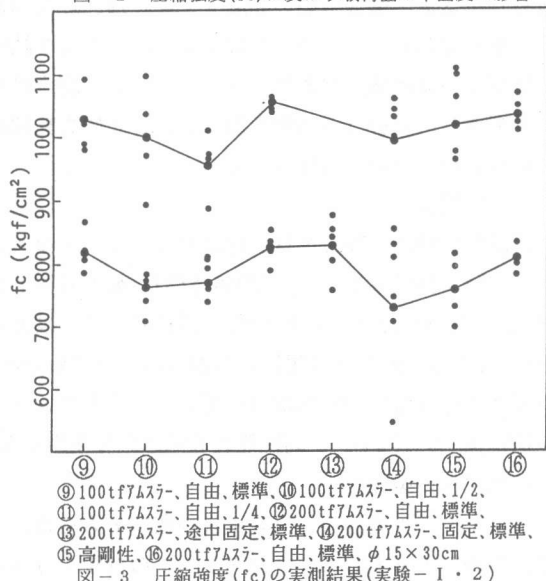


図-3 圧縮強度(f_c)の実測結果(実験-I・2)

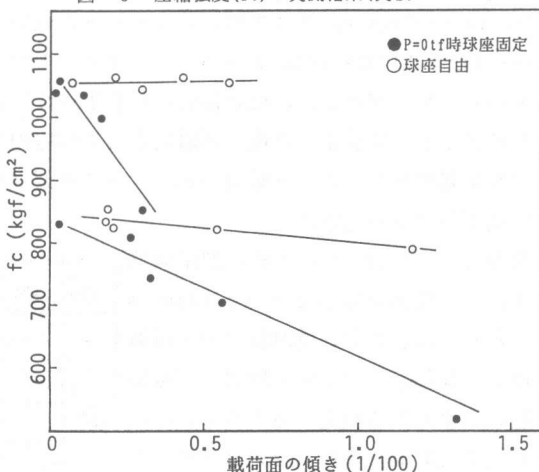


図-4 圧縮強度(f_c)に及ぼす載荷面の傾きの影響

ト³⁾に比べて顕著である。載荷速度を通常速度(2~3 kgf/cm²/s、記号⑨)の1/4とした場合(記号⑩)、約6~9%の強度低下を示した。この点については、さらにデータを増して検討する必要がある。

供試体寸法と圧縮強度の関係は、普通強度のコンクリートの場合³⁾とほぼ同様であり、φ15×30cm供試体の圧縮強度(記号⑬)は、φ10×20cm供試体強度(記号⑫)の約0.97倍となった。

3. 圧縮強度の変動に関する実験(実験-II)

3.1 実験方法

(1) 概要

実験-IIでは、高強度・超高強度コンクリートの圧縮強度に及ぼす横補強筋および供試体の乾湿の影響、並びに強度の変動の実態について調べた。本実験で取り上げた要因は、コンクリートの圧縮強度(4週目標強度(F_c)=400、800および1200kgf/cm²の3種類)、横補強筋(直径3mmのスパイラル筋、ただし、かぶり厚さは0cm)の降伏点(f_y =2800、5500および13300kgf/cm²の3種類)、および横補強筋の間隔(s =1.25、2.5、5および∞cmの4種類、体積比(V_s)に換算すると、それぞれ2.26、1.13、0.56および0%)および試験時における供試体の乾燥状態(湿試験および乾試験の2種類)である。コンクリートの調合表を表-4に示す。供試体は、同一要因ごとに15個製作し、このうち12個を湿試験に、3個を乾試験(ひずみ測定用)に用いた。供試体は、いずれもφ10×20cmの円柱体とした。

(2) 使用材料

供試体の製作に際しては、普通ポルトランドセメント、大井川産川砂(最大寸法:5mm、表乾比重:2.63、粗粒率:2.76)、岡崎産碎石(最大寸法:20mm、表乾比重:2.66、粗粒率:6.65、 F_c =400および800kgf/cm²クラス用)、段戸産碎石(最大寸法:20mm、表乾比重:2.63、粗粒率:6.65、 F_c =1200kgf/cm²クラス用)、軟鋼(f_y =2800kgf/cm²用)、磨き鋼(f_y =5500kgf/cm²用)およびピアノ線(f_y =13300kgf/cm²用)、シリカフューム(比重=2.18、比表面積=200,000cm²/g、平均粒径=0.15μm)、高性能A E減水剤を使用した。

(3) 供試体の製作

コンクリートの混練、打設および締固め方法は、実験-Iと同様である。横補強筋は、あらかじめ型枠にセットして、コンクリートの打設を行った。キャッピングは、実験-Iの結果を踏まえて、 F_c =400kgf/cm²クラスのコンクリートについては、セメントペーストキャッピングとし、 F_c =800および1200kgf/cm²クラスのコンクリートについては、シリカフューム混入セメントペーストキャッピングとした。供試体は、材令1~2日目から水中養生を行った。乾試験用供試体は、材令27日まで水中養生した後、試験時まで実験室内で空中養生を、湿試験用供試体は、試験直前まで水中養生を行った。試験材令は、すべて4週とした。

(4) 載荷および測定方法

載荷には、200tfアムスラー型試験機を使用し、載荷速度は2~3 kgf/cm²/sの一定とした。なお、乾試験用の供試体には、載荷軸方向のひずみ度および横補強筋のひずみ度を測定するために、それぞれ測定長67mmおよび5mmのワイヤーストレインゲージを貼付した。

表-4 コンクリートの調合表

F_c (kgf/cm ²)	$W/(C+Si)$ (%)	単 位 量 (kg/m ³)					混和剤 (%)*
		C	W	S	G	Si	
400	52	317	165	897	1021	—	A 0.90
800	30	533	160	744	999	—	A 1.70
1200	25	512	160	579	1026	128	B 3.50

(注) F_c : コンクリートの目標圧縮強度、 $W/(C+Si)$: 水結合材比、
C: セメント、W: 水、S: 細骨材、G: 粗骨材、Si: シリカフューム、A・B: 高性能A E減水剤、*結合材に対する重量比

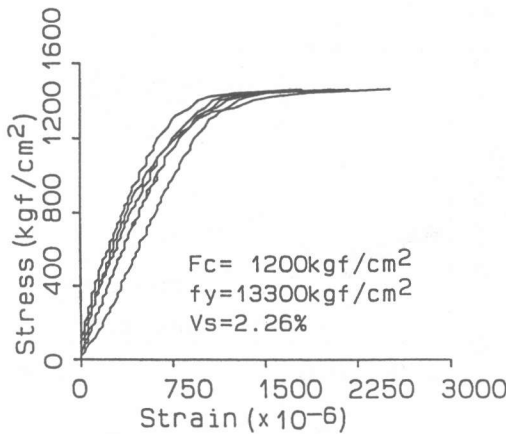


図-5 コンクリートの応力度(σ)と横補強筋のひずみ度(ε)の関係

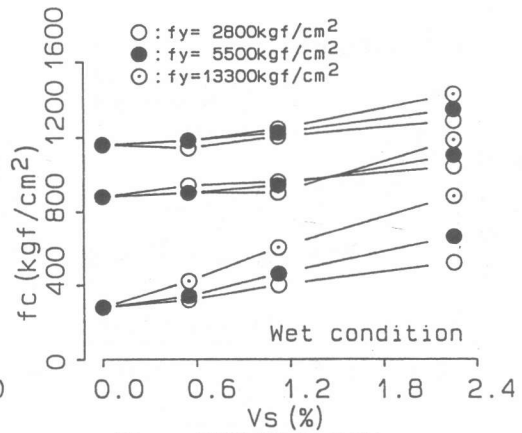


図-6 圧縮強度(f_c)に及ぼす横補強筋比(V_s)の影響(湿試験)

3.2 実験結果とその考察

図-5は、コンクリートの応力度(σ)と、供試体中央付近に貼付した6枚のワイヤーストレインゲージによって計測した横補強筋のひずみ度(ε)との関係を示した例であるが、本実験では、試験体中央部の横補強筋は、いずれの場合も供試体が最大耐力に到達する以前に降伏した。

(1) コンクリート強度に及ぼす横補強筋の影響

図-6および図-7は、それぞれ湿試験および乾試験によって得られたコンクリートの圧縮強度(f_c)に及ぼす横補強筋比(V_s)の影響をコンクリートの目標強度(F_c)および横補強筋の降伏点(f_y)別に示したものである。これらの図によれば、コンクリートの圧縮強度(f_c)は、一般に横補強筋の量(V_s)および降伏点(f_y)が大きくなるに従って増大し、それらの影響は、コンクリートの強度が小さいほど顕著である。

(2) コンクリートの圧縮強度の変動に及ぼす各種要因の影響

図-8(a)~(c)は、湿試験によって得られたコンクリートの圧縮強度の変動係数(C.V.)に及ぼす横補強筋比(V_s)の影響を横補強筋の降伏点(f_y)別に示したものである。実験結果に若干のバラツキがあるため、あまり明確ではないが、一般に横補強筋の量および強度が大きくて、横補強効果の大きいコンクリートほど強度の変動係数は減少する傾向にあることがわかる。なお、コンクリート強度の変動係数に及ぼす横補強筋の効果は、コンクリートの強度が小さいほど著しい。また、 $F_c=800$ および 1200 kgf/cm^2 クラスのコンクリート強度の変動係数は、 $F_c=400 \text{ kgf/cm}^2$ クラスのコンクリートと比べて全体的にかなり小さくなっており、コンクリートの破壊過程の相違という観点からは予測できない傾向を示すことがわかる。これは、 $F_c=800$ および 1200 kgf/cm^2 クラスの超高強度コンクリートの場合、粘性が大きいために同一スランプの普通強度コンクリートと比較して材料分離に対する抵抗性が優れていること、空気量も少ないことなどによって、コンクリート自体の均質性が高いためであろう。

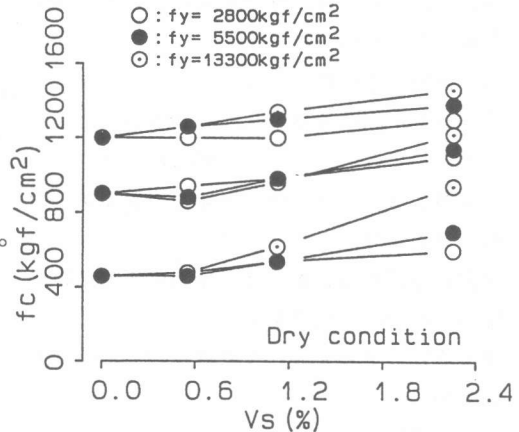


図-7 圧縮強度(f_c)に及ぼす横補強筋比(V_s)の影響(乾試験)

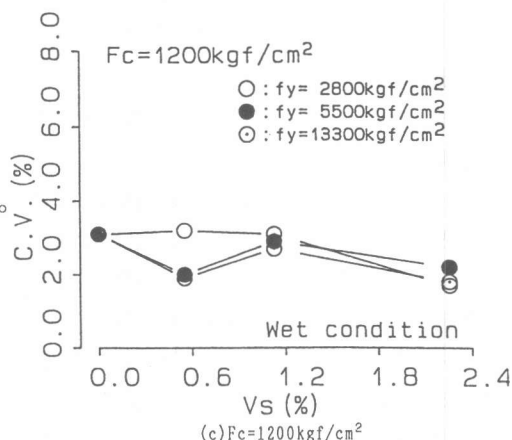
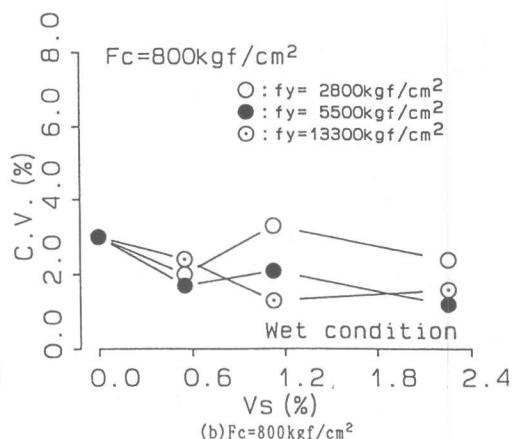
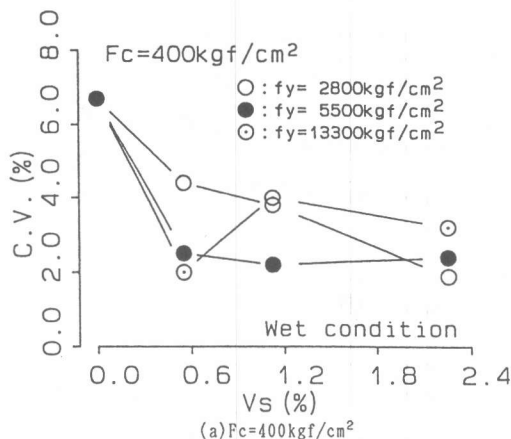


図-8 圧縮強度の変動係数(C.V.)に及ぼす横補強筋比(V_s)の影響

4. 結論

本研究によって得られた結果は、およそ次のようにまとめられる。

(1) 圧縮試験方法について

1) 載荷面の平面度は確実に ± 0.05 mm以内とする。
そのためには、キャッピング材にシリカフェーム混入セメントペーストを使用するか、研磨するとよい。

2) 球座は回転自由、または、相当の圧縮荷重が加わった段階で固定する。

3) 供試体は、 $\phi 10 \times 20$ cmまたは $\phi 15 \times 30$ cmとしてよい。

(2) 圧縮強度の変動について

1) コンクリート強度の変動係数は、コンクリートの強度が大きいほど、かつ横補強筋の量および降伏点が高いコンクリートほど減少する。

2) コンクリートの圧縮強度は、横補強筋の量および降伏点が大きくなるに従って増大するが、その増大傾向は、コンクリートの強度が小さいほど著しい。

〔謝 辞〕

本実験に際し、山本常夫氏(竹本油脂㈱)、小池狭千朗先生(愛知工業大学)、服部宏己君・梁川幸盛君(三重大学大学院生)、谷奥寛志君(三重大学4年生)、後藤雅仁君・壽賀貴浩君・中根智彦君・三岡誠君(愛知工業大学4年生)をはじめ、研究室の諸君の助力を得た。ここに謝意を表する。

〔引用文献〕

- 1) 福士 勲、横山昌寛：高強度コンクリートの品質変動に関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集A、1988、pp. 509～510
- 2) 友澤史紀、野口貴文、榊田佳寛他：高強度コンクリートの圧縮試験方法の標準化に関する研究(その1～その3)、日本建築学会大会学術講演梗概集A、1989、pp. 505～510
- 3) 岡田 清、六車 熙監修：コンクリート工学ハンドブック、朝倉書店、1983、pp. 374～383