

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 圧縮強度の変動に関する研究

山田和夫

Scatter of Compressive Strength of High Strength Plain and Confined Concrete

Kazuo YAMADA

In this study, the variations of the compressive strength of high strength plain and confined concrete were examined, as a first step to establish a standard test method for the compressive strength concrete. The following results were obtained from this experiments:

1) The compressive strength of concrete increased with the increase of confined ratio and yield point of lateral reinforced steel bar. This tendency was more significant as the decrease of compressive strength of concrete matrix.

2) In the case of compressive strength of concrete matrix($F_c \geq 800 \text{ kgf/cm}^2$), the compressive strengths of concrete were hardly affected by the difference of dryness of specimen. In the case of $F_c = 400 \text{ kgf/cm}^2$, however, the compressive strengths of concrete in dry condition were higher than those in wet condition.

3) The stochastic models for normal strength concrete proposed by the author were available to the high strength concrete. The theoretical predictions on the statistical distributions of concrete strength were in good agreement with the experimental results over a wide range.

4) The coefficient of variation of concrete strength decreased with the increase of the strength of concrete matrix, the confined ratio and yield point of lateral reinforced steel bar.

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減水剤やシリカフェームなどの開発によって、比較的容易に得られるようになり、今後鉄筋コンクリート（以下、RCと略記）構造物に用いられるコンクリートは、益々高強度化していくもの考えられる。コンクリートの圧縮強度試験のための規定としては、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）があるが、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、 600 kgf/cm^2 を超えるような高強度コンクリートに対してそのまま適用できるか否かについては、十分に検討しておく必要がある。

本研究では、上記の点を踏まえて、高強度・超高強度コンクリートの圧縮強度標準試験方法の確立を最終目的とした研究の一つとして、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把握するために一連の調査を行った。

表-1 コンクリートの標準調合表

調合強度 (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	—	0.90
800	30	533	160	744	999	—	1.70
1200	25	512	160	579	1026	128	3.50

[註] C:セメント、W:水、S:細骨材、G:粗骨材、Si:シリカフューム、*:結合材 (C+Si) に対する重量比。

2. 実験方法

2.1 実験の概要

本研究では、高強度および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試験体の乾湿の影響、ならびに高強度および超高強度コンクリートの材料固有の強度の変動の実態を把握するための調査を行った。本実験で取り上げた要因は、母材コンクリートの圧縮強度(4週目標圧縮強度(F_c)=400、800および1200kgf/cm²の3種類)、横補強筋(公称直径3mmのスパイラル筋、ただし、かぶり厚さは0cmとした)の降伏点(f_y =2800、5500および13300kgf/cm²の3種類)および間隔(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%)、ならびに試験時における試験体の乾燥状態(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-1に示す。試験体は、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。なお、試験体は、いずれも ϕ 10x20cmの円柱体とした。

2.2 使用材料

試験体の製作に際しては、普通ポルトランドセメント(小野田セメント社製)、細骨材として大井川水系産の川砂(最大寸法=5mm、表乾比重=2.63、粗粒率=2.76)、粗骨材として岡崎産碎石(最大寸法=20mm、表乾比重=2.66、粗粒率=6.65、 F_c =400および800kgf/cm²用)および段戸産碎石(最大寸法=20mm、表乾比重=2.63、粗粒率=6.65、 F_c =1200kgf/cm²用)、横補強筋として軟鋼(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)、混和材としてシリカフューム(マイクロシリカ940u、比重=2.18、比表面積=200,000cm²/g、平均粒径=0.15 μ m)、並びに高性能A E減水剤として特殊スルホン基・カルボキシル基含有多元ポリマーを主成

分とした混和剤(チューポールHP-11、 F_c =400・800kgf/cm²用)およびアルキルアリルスルホン酸塩高縮合物を主成分とした混和剤(ポールファイン510AN、 F_c =1200kgf/cm²用)を使用した。

2.3 試験体の製作および養生方法

コンクリートの混練には、100 ϕ 強制練りミキサーを使用し、まずモルタル状態で1分間混練した後、直ちに粗骨材を投入してから4分間の合計5分間混練した。横補強筋は、あらかじめ試験体にセットして、コンクリートの打設を行った。打設は2層に分けて行い、各層ごとに木づちと棒状バイブレータを用いて十分に振動締固めを行った。キャッピングは、既往の実験結果¹⁾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(材令1日目に実施)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(打設後約5時間目に実施)とした。試験体は、材令1~2日目に脱型後、水槽中で標準水中(温度20 \pm 1 $^{\circ}$ C)養生を行った。乾試験用試験体は、材令27日間水中養生した後、試験時まで実験室内で空中養生を、湿試験用試験体は、試験直前まで水中養生を行った。試験材令はすべて28日とした。

2.4 載荷および測定方法

載荷には、200tf アムスラー型耐圧試験機(前川試験機製作所社製)を使用し、載荷速度が2~3kgf/cm²/secの一定となるように手動で調節しながら最大耐力まで載荷を行った。荷重の検出には、試験機付属のひずみゲージ式油圧計を用いた。また、乾試験用の試験体には、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

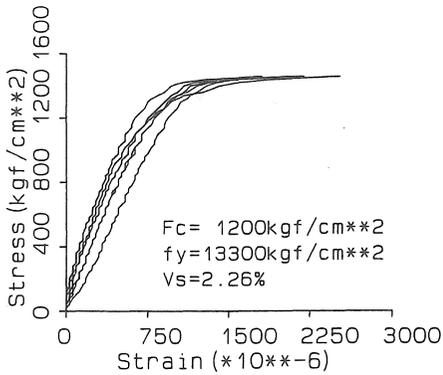


図-1 コンクリートの応力度と横補強筋のひずみ度との関係

付した。応力度とひずみ度との関係は、デジタル式ひずみ計 (TDS-301、東京測器研究所社製) とパーソナル・コンピュータ (PC-9801M2、日本電気社製) を用いて自動計測した。

3. 実験結果とその考察

図-1は、コンクリートの応力度と試験体中央付近に貼付した6枚のワーヤーストレインゲージによって計測された横補強筋のひずみ度との関係を示した一例であるが、本実験では、横補強筋は、いずれの場合も試験体が最大耐力に到達する以前に降伏していた。

3.1 コンクリート強度に及ぼす外的要因の影響

(1) 横補強筋の影響

図-2および図-3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) の影響を母材コンクリートの目標圧縮強度および横補強筋の降伏点 (f_y)

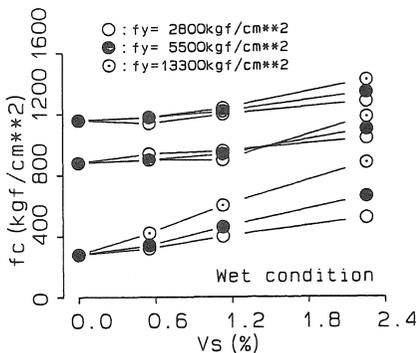


図-2 コンクリートの圧縮強度に及ぼす横補強筋の影響 (湿試験)

f_y) 別に示したものである。これらの図から明らかのように、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する傾向を示す。特に、母材コンクリートの目標圧縮強度が 400 kgf/cm^2 クラスの場合には、 V_s 値が 0.56% (横補強筋間隔 = 5.0 cm) の段階で、すでにかかなりの横補強筋効果が認められる。また、コンクリート強度と横補強筋の量との関係は、試験体の乾湿および横補強筋の降伏点にかかわらずほぼ線形関係にあることがわかる。このことから、コンクリート強度に及ぼす横補強筋の量および降伏点の影響は、母材コンクリートの強度が小さいほど顕著であるといえる。本実験の場合、前述したように、横補強筋はいずれの試験体においても最大耐力到達前に降伏していたため、横補強筋の量および降伏点と同じであれば、最大耐力近傍での横補強筋による3軸拘束応力は、母材コンクリートの強度にかかわらず等しくなる。したがって、本実験で観察された上記の現象は、母材コンクリートの強度が小さいほど、母材コンクリートの1軸圧縮強度に対する拘束応力度の割合、すなわち3軸拘束応力度比が大きくなるため、横補強筋による拘束効果が増加したことに起因しているものと推察される。

(2) 試験体の乾湿の影響

図-4 (a) ~ (c) は、コンクリートの圧縮強度 (f_c) に及ぼす試験体の乾湿の影響を母材コンクリートの目標圧縮強度別に示したものである。これらの図によれば、母材コンクリートの目標圧縮強度が 800 および 1200 kgf/cm^2 クラスの場合には、コンクリートの圧縮強度に及ぼす試験体の乾湿の影響は比較的小さいが、母材コンクリートの目標圧縮強度

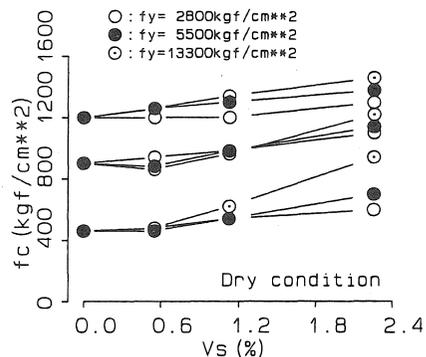
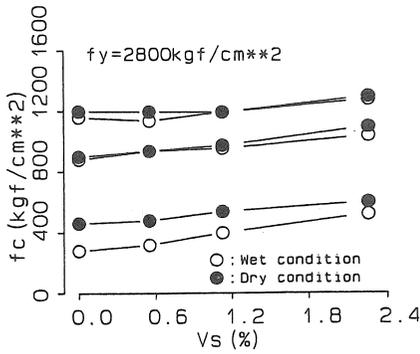
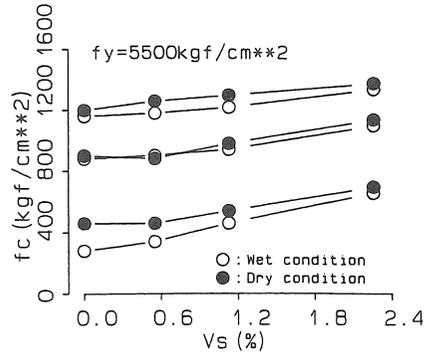


図-3 コンクリートの圧縮強度に及ぼす横補強筋の影響 (乾試験)



(a) $f_y=2800\text{kgf/cm}^2$ クラス



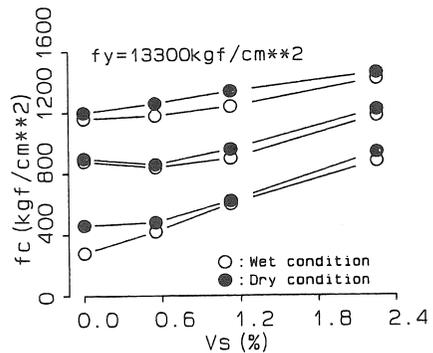
(b) $f_y=5500\text{kgf/cm}^2$ クラス

が400kgf/cm²クラスの場合には、試験体の乾湿程度によってコンクリート強度はかなり相違することがわかる。たとえば、 $F_c=400\text{kgf/cm}^2$ クラスのコンクリートの場合、コンクリート強度に及ぼす試験体の乾湿の影響を全平均で評価すると試験体が乾燥することによって圧縮強度は約19%増大するのに対して、 $F_c=800$ および1200kgf/cm²クラスのコンクリートの場合には、それぞれ約4%および3%増大するに過ぎない。したがって、コンクリート強度に及ぼす試験体の乾湿の影響は、一般的に母材コンクリートの強度、横補強筋の量および降伏点が小さいものほど顕著であるといえる。これは、おそらく $F_c=800$ および1200kgf/cm²クラスのコンクリートは、水結合材比 ($W/(C+Si)$) が30%以下で、かつ空気量も少なくコンクリートが密実であるため、 $F_c=400$ kgf/cm²クラスのコンクリート ($W/C=52\%$) に比べて、試験体の乾燥に伴う自由水の蒸発が少ないためであろう。

3.3 コンクリート固有の強度の変動の実態

(1) 確率分布性状

材料の破壊過程が2状態1段階マルコフ確率過程に従う場合、すなわち完全脆性型の破壊を示す場合には、強度の確率分布は形式上Weibull分布に一致することが知られている²⁾。一方、材料が金属材料のような延性的な破壊過程を示す場合には、Hasofer³⁾も指摘しているように、強度の確率分布はWeibull分布よりもPareto分布に近い確率分布性状を示すといわれている。しかし、コンクリートの破壊は、これらの中間的な破壊過程を示すのが一般的であると考えられる。筆者らが提案したコンクリート強度に関する2種類の確率破壊モデル(以下、Model-1⁴⁾およびModel-2⁵⁾と略記する)は、このようなコンク



(c) $f_y=13300\text{kgf/cm}^2$ クラス

図-4 コンクリートの圧縮強度に及ぼす試験体の乾湿の影響

リート特有の破壊過程をモデル化したものであるが、いずれの破壊モデルも極値としてWeibull分布とPareto分布を包含しており、上記の2種類の確率破壊モデルよりも汎用性のある破壊モデルであるといえる。

これらの強度に関する確率破壊モデルにおいて、応力 σ の下で試験体が破壊している確率 ($D(\sigma)$) は、それぞれ以下のように表される。

1) Weibull分布

$$D(\sigma) = 1 - \exp\left\{-\frac{m \cdot L}{(\beta + 1) \sigma} \sigma^{\beta + 1}\right\} \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 m : 試験体の体積、 L : 試験体の内部構造に関連する値、 σ : 公称応力、 β : 材料定数、 σ : 載荷速度。

2) Pareto分布

$$D(\sigma) = 1 - \left(\frac{\sigma}{\sigma_i}\right)^{-\theta} \dots\dots (2)$$

ここに、 σ : 公称応力、 σ_i : 破壊開始応力度、 θ : 欠陥指標と呼ばれているパラメータ。

3) Model-1

$$D(\sigma) = 1 - \exp\left\{\frac{-m \cdot L_1}{(\beta+1)\sigma} \sigma^{\beta+1} - \left\{\frac{(\beta+1)\sigma}{m \cdot L_1}\right\}^{\mu_u \cdot L_u / (\beta+1)} \cdot \sigma^{-\mu_u \cdot L_u} \cdot \Gamma\left\{\frac{\mu_u \cdot L_u}{\beta+1} + 1, \frac{m \cdot L_1}{(\beta+1)\sigma} \sigma^{\beta+1}\right\}\right\} \dots\dots (3)$$

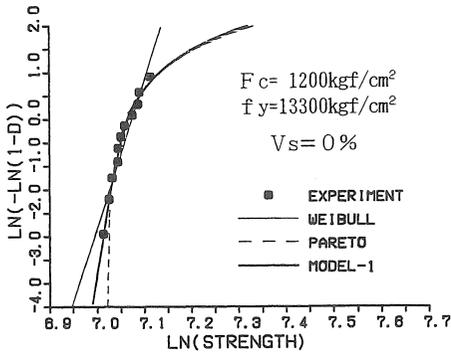
ここに、 $\Gamma(z, p) = \int_0^p \exp(-t) \cdot t^{z-1} dt$: 第1種不完全ガンマ関数、 m : 試験体の体積、 L_1 : 試験体の初期内部構造に関連する値、 σ : 公称応力、 β : 材料定数、 σ : 載荷速度、 μ_u : 不安定クラックの進展過程を支

配する領域の大きさに関連する値、 L_u : 不安定クラックの進展過程段階における試験体の内部構造に関連する値。

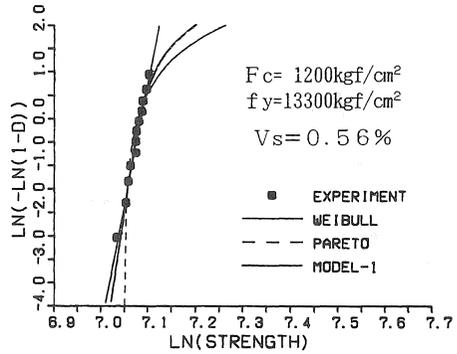
4) Model-2

① $L_1 \neq L_2$ の場合:

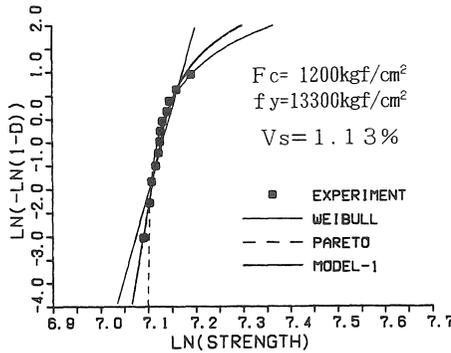
$$D(\sigma) = 1 - \frac{L_2}{L_2 - L_1} \left[\exp\left\{\frac{-m \cdot L_1}{(\beta+1)\sigma} \sigma^{\beta+1}\right\} + \left\{\frac{(\beta+1)\sigma}{m \cdot L_1}\right\}^{\mu_u \cdot L_u / (\beta+1)} \cdot \sigma^{-\mu_u \cdot L_u} \cdot \Gamma\left\{\frac{\mu_u \cdot L_u}{\beta+1} + 1, \frac{m \cdot L_1}{(\beta+1)\sigma} \sigma^{\beta+1}\right\} \right] + \frac{L_1}{L_2 - L_1} \left[\exp\left\{\frac{-m \cdot L_2}{(\beta+1)\sigma} \sigma^{\beta+1}\right\} + \left\{\frac{(\beta+1)\sigma}{m \cdot L_2}\right\}^{\mu_u \cdot L_u / (\beta+1)} \cdot \sigma^{-\mu_u \cdot L_u} \cdot \Gamma\left\{\frac{\mu_u \cdot L_u}{\beta+1} + 1, \frac{m \cdot L_2}{(\beta+1)\sigma} \sigma^{\beta+1}\right\} \right]$$



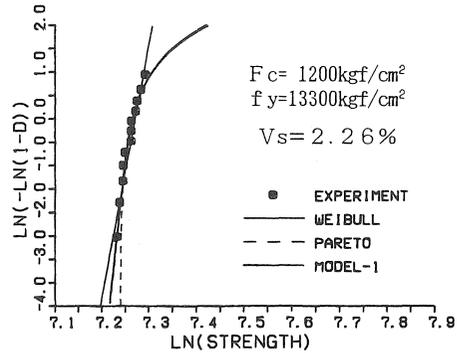
(a) $V_s = 0\%$ の場合



(b) $V_s = 0.56\%$ の場合



(c) $V_s = 1.13\%$ の場合



(d) $V_s = 2.26\%$ の場合

図-5 コンクリート強度の確率分性状に対するModel-1の適用性
($F_c=1200\text{kgf/cm}^2$ クラス、 $f_y=13300\text{kgf/cm}^2$ クラス)

$$\cdot \sigma^{\beta+1} \}] \dots\dots\dots (4)$$

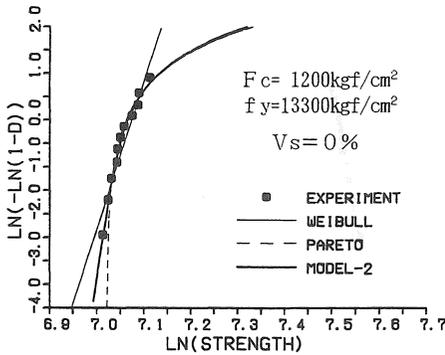
② $L_1 = L_2$ の場合 :

$$D(\sigma) = 1 - \left\{ 1 + \frac{m \cdot L_1}{(\beta+1) \sigma} \sigma^{\beta+1} \right\} \cdot \exp \left\{ \frac{-m \cdot L_1}{(\beta+1) \sigma} \sigma^{\beta+1} \right\} - \left\{ \frac{(\beta+1) \sigma}{m \cdot L_1} \right\}^{m \cdot L_1 / (\beta+1)} \cdot \sigma^{-m \cdot L_1} \cdot \Gamma \left\{ \frac{m \cdot L_1}{\beta+1} + 2, \frac{m \cdot L_1}{(\beta+1) \sigma} \sigma^{\beta+1} \right\} \dots\dots\dots (4)'$$

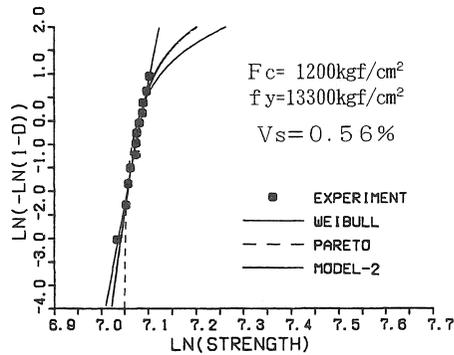
ここに、 $\Gamma(z, p) = \int_0^p \exp(-t) \cdot t^{z-1} dt$: 第1種不完全ガンマ関数、 m : 試験体の体積、 L_1 : 試験体の初期内部構造に関連する値、 L_2 : 安定した微小クラックの累積過程段階における試験体の内部構造に関連する値、 σ : 公称応力、 β : 材料定数、 σ : 載荷速度、 m_u : 不安定クラックの進展過程を

支配する領域の大きさに関連する値、 L_u : 不安定クラックの進展過程段階における試験体の内部構造に関連する値。

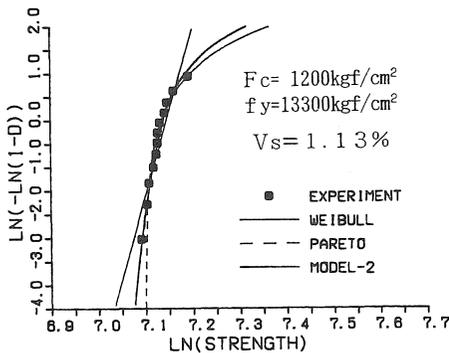
図-5および図-6は、それぞれ本実験で得られた超高強度コンクリート ($F_c=1200\text{kgf/cm}^2$ 、 $f_y=13300\text{kgf/cm}^2$ の場合) の強度の確率分布性状に対するModel-1およびModel-2の適用性をWeibull 確率紙上で調べた結果の例を示したものである。ただし、図中にはWei-bull分布およびPareto分布による当てはめの結果も併示してある。これらの図によれば、本実験結果に対する各確率分布式の適合性は、Wei-bull分布やPareto分布よりも Model-1およびModel-2の方が優れていることがわかる。なお、コンクリート強度の変動が小さくなると、強度の確率分布曲線は比較的直線的、すなわち Weibull分布に近い性状を示すようになり、かつその直線の勾配もコンクリート強度の変動が大きい場合に比べると、かなり大きくなっていることがわかる。



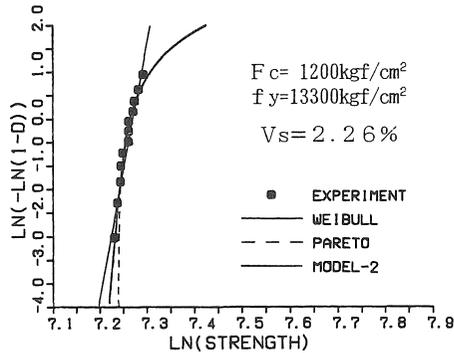
(a) $V_s = 0\%$ の場合



(b) $V_s = 0.56\%$ の場合

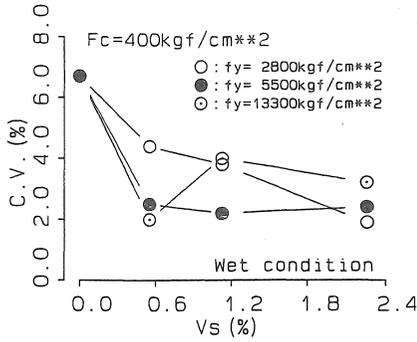


(c) $V_s = 1.13\%$ の場合

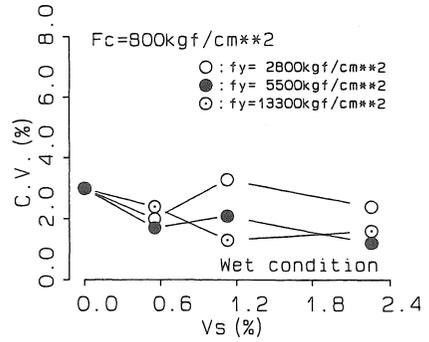


(d) $V_s = 2.26\%$ の場合

図-6 コンクリート強度の確率分性状に対するModel-2の適用性 ($F_c=1200\text{kgf/cm}^2$ クラス、 $f_y=13300\text{kgf/cm}^2$ クラス)



(a) 調合強度 = 400kgf/cm² クラスの場合



(b) 調合強度 = 800kgf/cm² クラスの場合

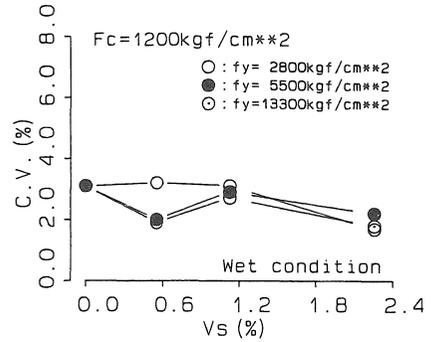
(2) 各種要因の影響

図-7 (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.) に及ぼす横補強筋量 (Vs) の影響を横補強筋の降伏点 (fy) 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降伏点が大きくて、横補強筋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。また、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、母材コンクリートの強度が小さいほど著しいこともわかる。ところで、コンクリート強度の変動係数に及ぼす母材コンクリートの目標圧縮強度 (Fc) の影響を調べてみると、Fc=800および1200kgf/cm² クラスのコンクリート強度の変動係数は、Fc=400kgf/cm² 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、前述したコンクリートの破壊過程の相違という観点からは全く予測できない傾向となっている。これは、おそらくFc=800および1200kgf/cm² 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値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、空気連行性が小さいために空隙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。

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) 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、母材コンクリートの強度が小さいほど著しい。



(c) 調合強度 = 1200kgf/cm² クラスの場合

図-7 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

- 2) 母材コンクリートの目標圧縮強度 (Fc) が800 kgf/cm² 以上のクラスの場合には、コンクリート強度は、試験体の乾湿の影響をそれほど顕著には受けないが、Fc=400kgf/cm² クラスのコンクリートでは、試験体の乾湿の影響を顕著に受ける。
- 3) 筆者らが普通強度コンクリートに対して提案した確率破壊モデルは、高強度・超高強度コンクリートの材料固有の強度の確率分布性状に対しても適用性がある。
- 4) 本研究で対象としたような高強度の範囲では、コンクリート強度の変動係数は、母材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大きいコンクリートほど、減少する。

[謝辞]

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化・超高層化技術の開発」の一環として、分担研究者である三重大学

工学部谷川恭雄教授からの委託により実施したものである。実験の計画から実施に至るまでご指導を賜わった同谷川教授、また、実験の実施に際して御助力を賜わった柴田辰正君（三重大学院生）、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）に対して謝意を表します。

[引用文献]

- 1) 谷川恭雄、畑中重光、柴田辰正：高強度・超高強度コンクリートの圧縮試験方法に関する研究、日本建築学会東海支部研究報告集、第28号、平成2.2、pp.17-20.
- 2) 横堀武夫：材料強度学（第2版）、岩波全書、昭49.10、334pp.
- 3) A.M. Hasofer : A Statistical Theory of the Brittle Fracture of Steel, Int. Jour. of Fracture Mechanics, Vol.4, No.4, Dec.1968, pp.439-452.
- 4) 谷川恭雄、山田和夫：セメント系複合材料の強度に関する確率論的研究（第1報）、日本建築学会論文報告集、第267号、昭53.5、pp.1-10.
- 5) 小阪義夫、谷川恭雄、山田和夫：コンクリート強度に関する確率破壊モデルとその特徴、日本建築学会構造系論文報告集、第347号、昭60.1、pp.18-29.

(受理 平成2年3月20日)