

論文

[1045] セメント量、混和剤添加量を抑えた高強度コンクリートの物性

正会員 ○ 神田 亨 (フジタ工業技術研究所)

山田 茂 (フジタ工業技術研究所)

1. はじめに

シリカフュームと高性能減水剤を併用することで、現場打ちを対象とした圧縮強度1000kg/cm²程度の高強度コンクリートが比較的容易に実現されるようになった。^{1)・2)} しかしながらその物性については完全に明らかにされているとは言い難い。例えば、この種のコンクリートはセメント量がかなり大きくなりがちであるが、その水和発熱性状については未水和のセメントが大量に残存することやシリカフュームの影響などを含めて不明の部分が多い。またセメント量が多くなれば高価なシリカフュームの添加量も増大するため経済性にも問題が残る。また圧縮強度を測定する場合にも、試験機の剛性が相対的に不足するため応力がピークに達した時点で激しい爆裂を生じそのじん性を正当に評価することができないでいる。

このような現状に鑑み、水和発熱を抑制し経済性を追及する目的で単位セメント量を400kg, シリカフューム量を44kgに制限した種々の配合に対して、400t剛性試験機を用いて応力の下降域を含む完全な応力歪曲線を測定するとともに、フレッシュコンクリートの流動性や硬化時の温度上昇などについて実験を行なった。

2. 配合および練りませ

シリカフュームの添加率に関しては、内割で10~15%の場合に比較的良好な結果が得られるようであるので、^{1)・3)} 単位セメント量を400kg, シリカフューム量を44kg (S/C+S=10%)に固定して水結合材比(W/C+S)を20, 22, 24, 26%, s/aを30, 35, 40, 45%の各々4水準に変化させた16種の配合に対して実験を行なった。この種の高強度コンクリートはnon-AEのものが多いようであるが、凍結融解に対する抵抗性に関しては諸説あるため、³⁾ 良好な流動性を確保する意味でもAE剤を使用することとした。

練りませは、1.5m³練りと60ℓ練りの2軸強制練りミキサを使用した。傾胴型やパン型では練りませ能力が劣ることと、市中の生コン工場は大半が2軸ミキサを使用していることを考慮したものである。図 1~2は1.5m³ 練りミキサの消費電流の相対的な経時変化を測定したものである。

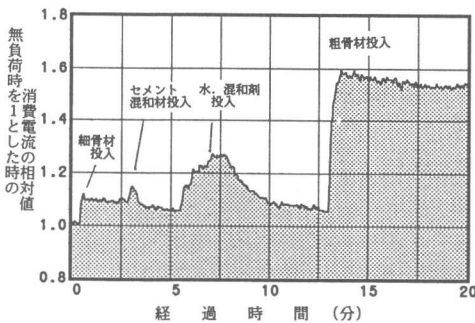


図 1. ミキサ消費電流経時変化 (W/C+S=20%, s/a=35%)



図 2. ミキサ消費電流経時変化 (W/C+S=24%, s/a=40%)

W/C+S の小さいものの方が負荷は大きくなっているが、両者とも水を投入後3分、粗骨材を投入後5分程度で平衡状態に達している。これを基に、練りませ時間を以下のように決めた。

- 1) 空練り... 細骨材, 混和材投入後 1分
- 2) モルタル ... 水, 混和剤投入後 3分
- 3) コンクリート... 粗骨材投入後 5分

使用材料を以下に示す。

- セメント 普通ポルトランドセメント
- シリカフェーム 顆粒状, 比重 2.2
- 高性能減水剤 ナフレン系 (C+S) × 2.2%
- AE 剤 天然樹脂酸塩 (C+S) × 0.06%
- 粗骨材... 釜無川産川砂利, 最大寸法20mm
- 細骨材..... 釜無川産川砂, FM2.81

3. フレッシュコンクリートの性状

前述の16種の配合に対する、スランプ、スランプフロー、空気量の測定結果を、図3~5に示す。シリカフェームを混入した低水セメント比のコンクリートは極めて粘性が高くセルフベリング性を有するため、スランプコーンを取り去って後も、ゆっくりとした流動がかなりの間継続する。図示しているのはコーンを取り去ってから1分後の値である。スランプフローはスランプとよく似た傾向を示しているが、流動性の大きい配合に対しては、スランプより敏感であり、この種のコンクリートの流動性の指標としては優れているといえる。ペースト部分の粘性が高いため全体に s/a の影響は小さく、最適 s/a は簡単には決められないが、通常のコンクリートより s/a を小さくしても材料分離の傾向は少ないようである。

いずれの配合もスランプの値は15cmを越えているが、同一スランプの通常のコンクリートのような施工性は到底期待できない。またパイプレータの効果も小さいため、実施工に当たっては20cm以上のスランプ値を確保する必要があるだろう。

シリカフェームを使用したコンクリートでは所要の空気量を得るのに必要なAE剤の量は増大する傾向がある³⁾といわれている。このためAE剤は推奨添加率の5割増しの量を使用したが、図5から分かるように、単位水量の少ないものほどエアが入りにくい傾向が見られた。

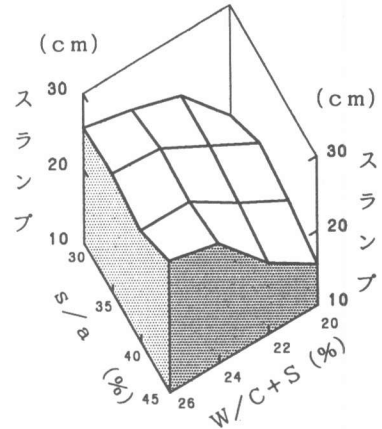


図3. スランプ

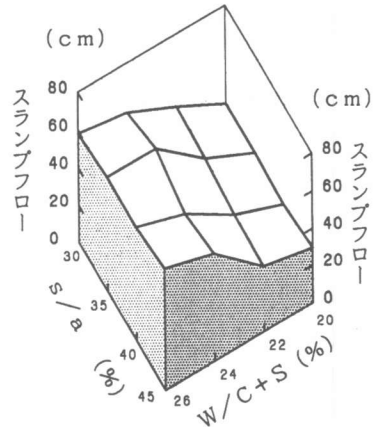


図4. スランプフロー

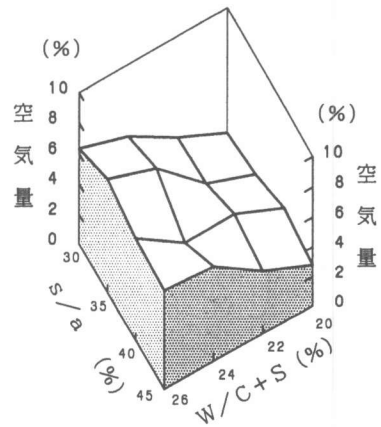


図5. 空気量

4. 剛性試験機

岩石やコンクリートのような脆質材料に対して圧縮試験を行なう場合、試験機の剛性が小さいと最大荷重を越えた時点で試験機のフレームなどに蓄えられた弾性変形が開放されることにより供試体は一気に爆裂を生じる。これを防ぐには、試験機の剛性を可能な限り上げるとともに、サーボコントロールにより油圧シリンダーからオイルを抜き取ることで試験機の見かけ剛性を高めてやる必要がある。試験機の剛性は供試体の強度が大きくなるほど相対的に小さくなるため、高強度コンクリートの場合、通常のアムスラー型の試験機で下降域を含む応力歪曲線を求めることは極めて困難となる。このため早くから剛性試験機の適用が試みられてきた。⁴⁾

しかしながら現在ではシリカフェームを使用し骨材を厳選すれば実験室レベルでは1500~2000 kg/cm²の強度を得ることは比較的容易になってきており、さらに剛性を高める必要が生じてきている。このため、0.1mm/400tという前例のないほど強大なフレーム剛性を有する剛性試験機を製作し、実験を行なった。試験機の諸元を図6~7に示す。

フレームは1845×1550×450mmの鋼材の中心部をくりぬき、ストロークを±10mmに抑えたサーボシリンダーを設置した形になっている。ネジや溶接といった不確定な要素を排除するとともに、剛性低下の原因となるロードセルを使用せず油圧計によって荷重を求めている。載荷板の間隔はφ15cm供試体に合わせてあり、φ10cm供試体の場合には高さ10cmの鋼製の台座をいれて使用する。計測、制御ともに1台のマイコンでコントロールしており、試験作業は完全に自動化されている。

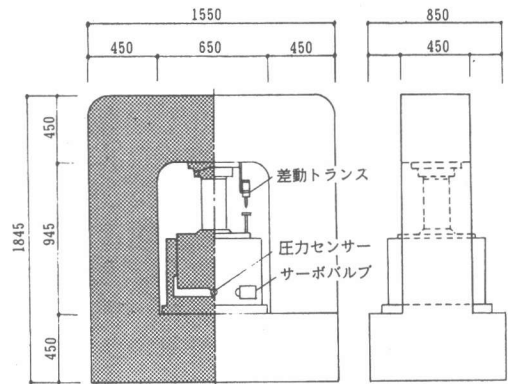


図6. 剛性試験機諸元

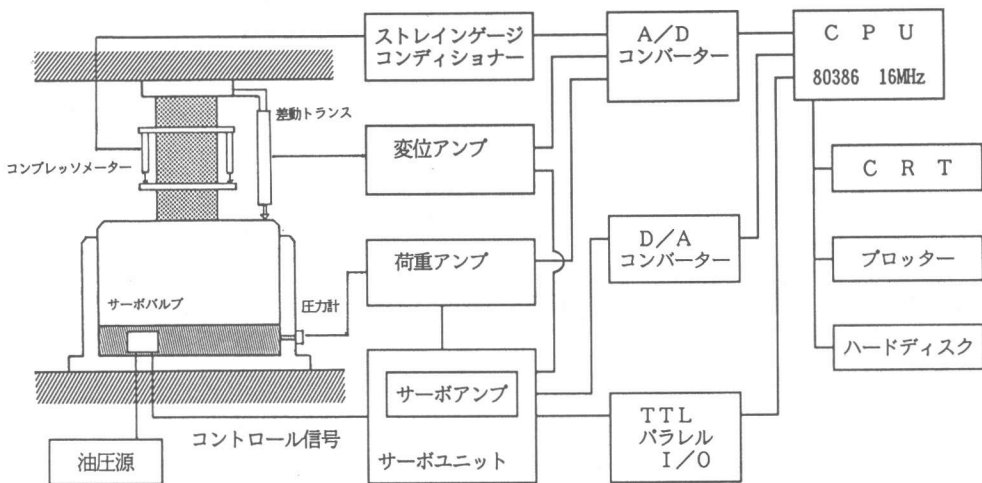


図7. 計測制御系統図

5. 応力歪曲線と破壊モード

図8に剛性試験機による試験結果を示す。歪速度を $10\mu/\text{sec}$ で一定に保って試験を実施しているが、試験機の剛性が桁違いに大きいため、特殊なシリンダーの制御⁴⁾を行なわないでも安定した測定が可能である。

図8によれば、たしかに高強度になるほど脆性的な傾向は強まるようであるが、 $1000\text{kg}/\text{cm}^2$ 級のコンクリートでも、応力のピークを過ぎててもかなりの強度を有していることが確認できる。

試験の過程で $1000\text{kg}/\text{cm}^2$ 級の高強度コンクリートの場合、通常のコンクリートとは全く異なる破壊モードを示すことが明らかとなった。荷重がピークに近づくにつれ、供試体の表面には図10に示すようなポップアウト状の剥離が生じてくる。高強度になるほど圧縮強度に対する引張強度の値が相対的に小さくなり、円周方向に発生する引張応力に耐えられず剥離が生じるものと推定される。

このような局所的な破壊を伴いながら応力は増加していくわけであるが、大きな剥離が生じた場合には応力は一時的に低下し、供試体全体にわたって応力が再配分された後再び上昇していくような例も見られた。

ピーク以後は大きな剥離が頻繁に発生し、このような応力の低下、再配分が何度も繰り返されるため、曲線には必然的に凹凸が多くなる。このような剥離の発生は多分に偶発的なため、ピーク以後の曲線の形状には再現性が見られない場合が多い。いずれにせよ、こうした現象は $1000\text{kg}/\text{cm}^2$ 級のコンクリートに特徴的なものである。

供試体の歪の測定は、 $\phi 10\text{cm}$ 供試体の場合、図9に示すような検長区間 100mm のコンプレッソメーターを

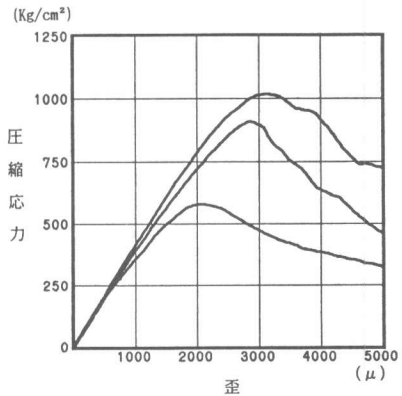


図8. 応力歪曲線測定例

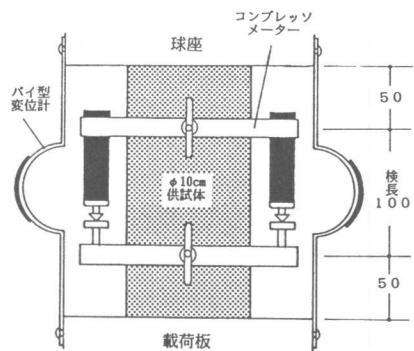


図9. 供試体歪測定例

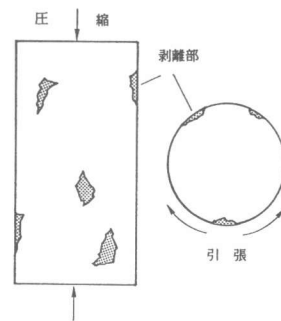


図10. 破壊モード

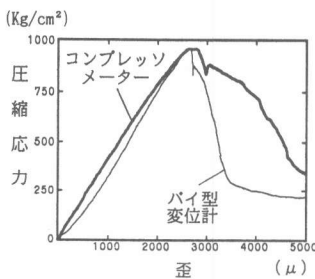


図11. コンプレッソメーターの検長区間で破壊した場合

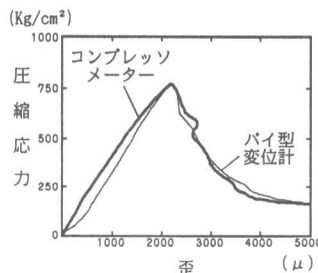


図12. 供試体全体が一樣に破壊した場合

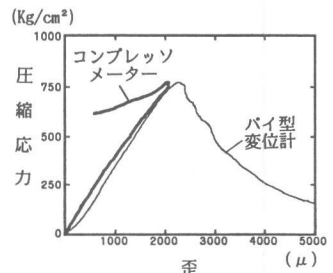


図13. コンプレッソメーターがはずれた場合

使用している。コンプレッソメーターは供試体に上下各々3点でネジ締めにより支持される構造であるが、この支持位置で前述の剥離現象が生じるとコンプレッソメーターは供試体からはずれてしまい、測定不能となる。こうした現象はかなりの確率で発生するため高強度コンクリートのアフターピークの挙動を追跡するにはコンプレッソメーターは不向きと結論せざるをえない。そこで、図9に示すような方法で載荷板間の変位から供試体の全長に渡る平均的な歪を求めた結果を図11~13に示す。この場合はコンプレッソメーターのようにはずれることがないので最後まで確実に測定可能であるが、検長区間に破壊が集中した場合には、供試体のじん性を過小評価する危険性がある。これは検長区間の長いコンプレッソメーターを使用した場合⁴⁾にも言えることである。

6. 強度発現性状

図14~16に強度試験結果を示す。ほぼ $W/C+S$ に一意的に依存しているが、図5と見比べると空気量が強度にかなりの影響を与えることが分かる。 $W/C+S$ の小さい配合では、若材令においては強度発現は大きいが、以後は頭打ちの感があり、材令56日においては $W/C+S$ が20%と22%の配合ではほとんど差異が見られない。

図17に材令28日における弾性係数を示す。圧縮強度とほぼ同じ傾向が見られる。なお、ポアソン比は0.18~0.22の間に分布していた。

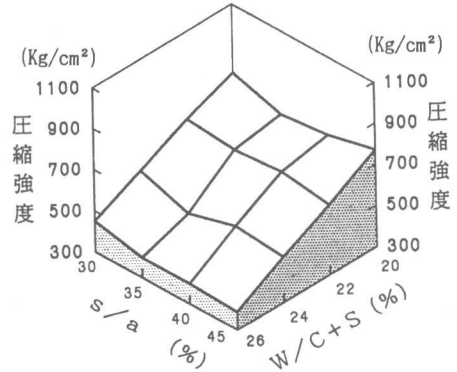


図14. 材令7日圧縮強度

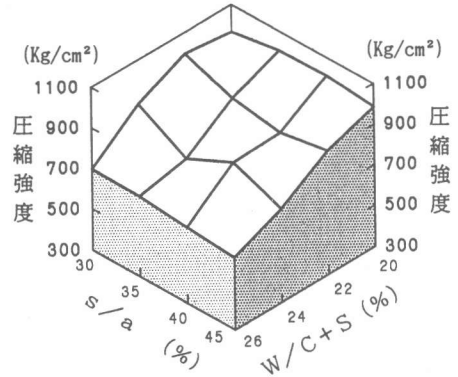


図15. 材令28日圧縮強度

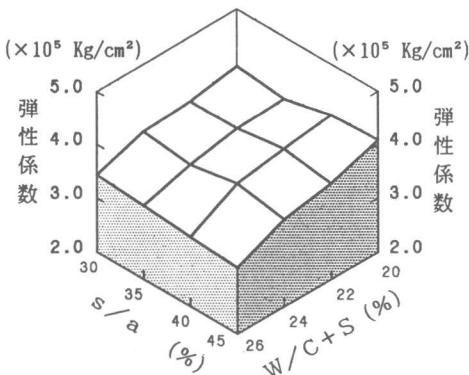


図17. 材令28日弾性係数

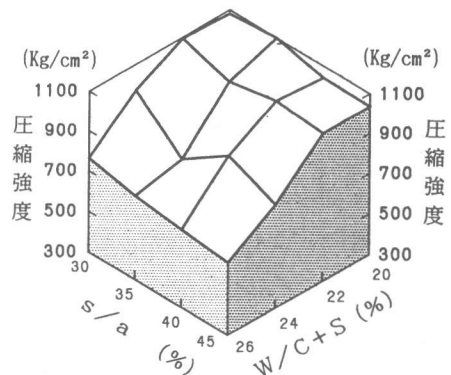


図16. 材令56日圧縮強度

7. 水和発熱特性

単位セメント量が $450\text{kg}/\text{m}^3$ のレデーミクストコンクリート(350-19-20)と $W/C+S=24\%$, $s/a=40\%$ の配合に対して、図18~19に示すような方法で、硬化時の温度上昇を比較した。図20より、断熱材の効果で、断面内の温度勾配はほとんど生じていない。また図21をみると、高性能減水剤が過剰添加されているため、高強度コンクリートでは水和反応がかなり遅延されていることが分かる。また単位結合材量がほぼ等しいにもかかわらず高強度の方が温度上昇は 10°C ほど小さい。これはセメントが未水和のまま残されているためと考えられる。なお無応力計により線膨張係数を測定したところ両者ともほぼ等しく $10.5\mu/\text{C}$ 程度であった。

6. まとめ

- 1) 単位結合材量を $450\text{kg}/\text{m}^3$ 程度に抑えても適度の流動性と空気量を有する $1000\text{kg}/\text{cm}^2$ 級の高強度コンクリートが製造可能である。
- 2) 剛性試験機により、 $\sigma_{28}=1000\text{kg}/\text{cm}^2$ 級の高強度コンクリートに対しても下降域を含む応力-歪曲線が測定可能となった。
- 3) 高強度コンクリートは、一般に考えられているほど脆性的ではない。
- 4) 下降域の挙動を正確に追跡するには、コンプレッソメーターは最適とはいえない。
- 5) 圧縮強度が $1000\text{kg}/\text{cm}^2$ 級の高強度コンクリートは通常とは異なる破壊モードを有する。
- 6) シリカフェームを添加した高強度コンクリートは、単位結合材量に等しいセメント量の通常のコンクリートより水和発熱は少ない。

末筆ながら、剛性試験機の製作に協力いただいた(株)森エンジニアリングの中田米蔵氏に深甚の謝意を表する次第です。

【参考文献】

- 1) Theodor A. Bürge : 14000psi in 24hours .Concrete International, Vol.1.5.No.9, pp.36~41,Sept.1983
- 2) Strong New Concrete Muscles into Market,ENR,p.21, March 19,1987
- 3) 長滝重義, 米倉亜州夫 : シリカフェームとコンクリート, コンクリート工学, Vol. 23, No. 5, pp. 5~15, May 1985
- 4) 小柳, 六郷, 大野 : コンクリート供試体の下降域を含む荷重-変位曲線の自動計測システム, 土木学会論文集, No. 354, pp119~126, 1985

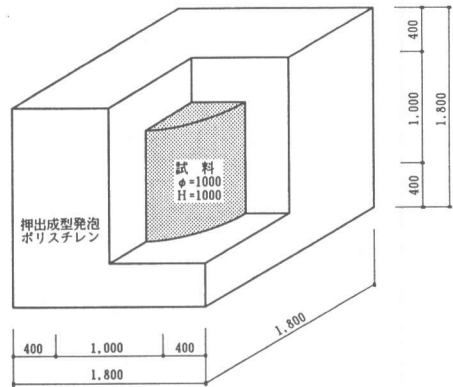


図18. 断熱温度上昇測定状況

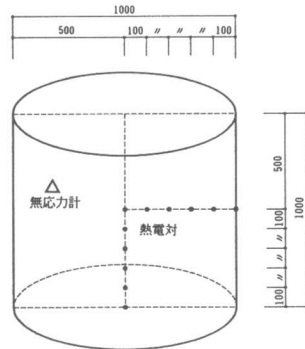


図19. センサー設置位置

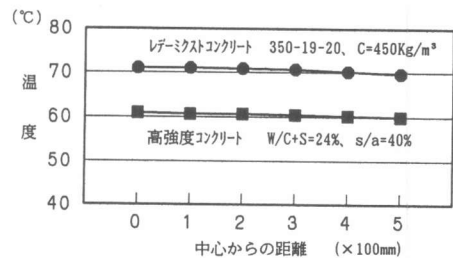


図20. 断面内水平温度分布

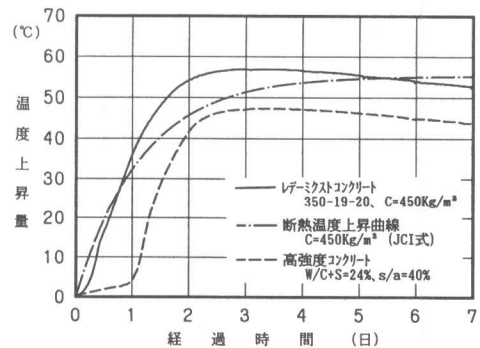


図21. 中心部温度履歴