

論文

[1055] 1000kgf/cm²級コンクリートに対する引抜試験法の適用

正会員 ○小松勇二郎 (京都大学工学部)

正会員 森田 司郎 (京都大学工学部)

1. はじめに

1000kgf/cm² を越える高強度コンクリートも実用化の視野に入ろうとしているが、このような高強度コンクリートの圧縮強度を、従来のようにコントロールシリンダーの強度で評価することの意味に疑問を生じる。単位セメント量500kg/m³ 以上の高セメント量によって、部材寸法が増すほど水和熱の蓄積が増大し、早期材令に高温度の履歴を受ける。一般的な傾向として、初期の高温履歴は若材令強度の上昇と、長期材令強度の低下を招く。したがって高強度コンクリートほど、構造体コンクリート強度の保証が重要な課題となりそうである。本報告はいわゆるNEWRCプロジェクトで用いられるコンクリートについて、断熱養生に近い養生をうける場合等の強度発現を、標準養生や現場水中養生シリンダー強度の場合と比較検討したものである。さらに、著者等が開発してきた構造体コンクリート強度試験法としての引抜き試験法をこの高強度コンクリートに適用して、その有効性を確認することを目的としている。

2. 実験計画

コンクリートの調査……目標強度800kgf/cm² (以下F800と略記)、1200kgf/cm² (以下F1200と略記)の2種類のコンクリートを用いた。目標スランプは24cmであり、その調査を表-1に記す。細骨材は室木沖海砂(S1)と西島産砕砂(S2)、粗骨材(最大粒径13mm)は西島産碎石である。

試験体と養生条件……図-1に示すように80×80×20cm試験体3体の両側面、上下面を厚さ15cmおよび20cmの発泡スチロールで試験材令まで覆い、両妻面は12mmコンパネ2枚のみとした保温養生(D養生と略記)と、比較のために同

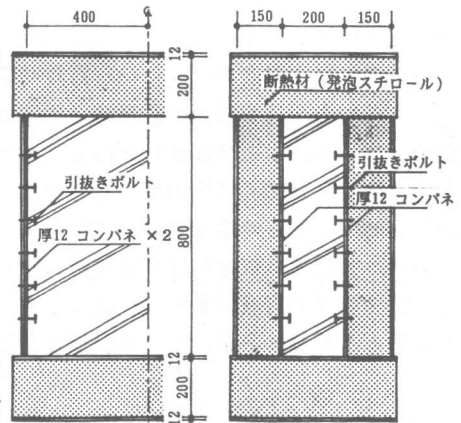


図-1 保温養生試験体断面図

表-1 コンクリート調合表

| 目標強度 kgf/cm ² | W/C (%) | s/a (%) | 単位量 (kg/m ³) | | | | | | | Air (%) |
|-----------------------------|------------------|------------|--------------------------|-----|-----|-----|-----|-------------------|-------------------|------------|
| | | | W | C | S1 | S2 | G | 混和剤 ^{*1} | 混和材 ^{*2} | |
| F 800 | 31 | 41.0 | 175 | 565 | 461 | 199 | 970 | 13.0 | --- | 1.9 |
| F1200 | 20 ^{*3} | 38.0 | 160 | 680 | 376 | 163 | 902 | --- | 120 | 1.9 |

*1 高性能A E減水剤 (SP-9HS)

*2 シリカヒューム等の微粉末水硬性物質を約90%含む
減水性を有する高強度用混和材料 (DST CEMENT)

*3 セメントと混和材の和に対する水比

じ試験体1体を12mmコンパネ2枚重ね型枠を用いて制作し、材令5日で脱型して気中放置する気中養生（K養生と略記）を2種類のコンクリートについて行った。D養生試験体の両表面のコンパネは材令5日で脱型したので、保温養生試験体は厚さ80cmの壁をシュミレートした事になり、マスコンクリートと言ってよい。

試験内容……図-2に両側面、両表面に配置した、引抜き試験用ボルト埋め込み位置とφ10cmコア採取位置を示す。D養生試験体では1W, 4W, 13Wの各材令で1体ずつ試験し、K養生試験体では1W, 4Wについて1/2試験体ずつ試験した。図-3に採用した引抜き試験法のサイズを示す。D養生, K養生とも試験体の 図-4挿入図 に示す10点でコンクリート内部温度を熱電対で測定した。

試験条件記号……試験体・試験条件の記号を次に示す。

8D-28
 ↑ ↑
 調 合-8; F800, 12; F1200
 ↑ ↑
 養 生-D; 保温養生, K; 気中養生
 ↓
 試験材令-(日)

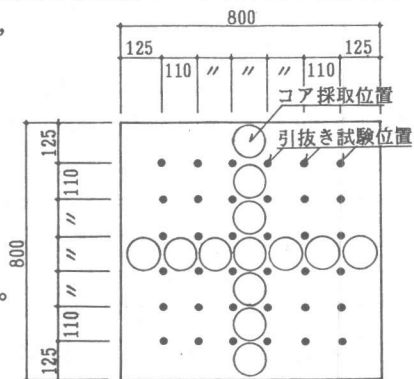


図-2 引抜き試験とコア採取位置

3. 実験結果と考察

コンクリート温度の上昇……打設時25℃のコンクリートの材令1週までの中心温度（測定点1）の経過を図-4に示す。1週ではほぼ外気温と平衡する。最高温度は12Dで86℃、8Dで77℃となり、それぞれ打設後21時間、32時間で到達している。

コア強度と引抜き強度の実験結果……コア強度と引抜き強度の実験結果を表-2に示す。図-5は8D-28と12D-28について引抜き強度のヒストグラ

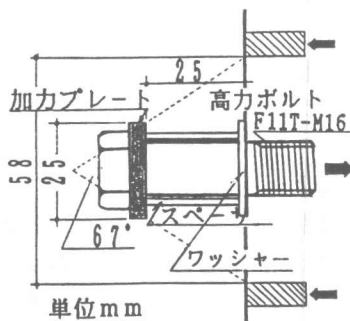


図-3 引抜き試験寸法

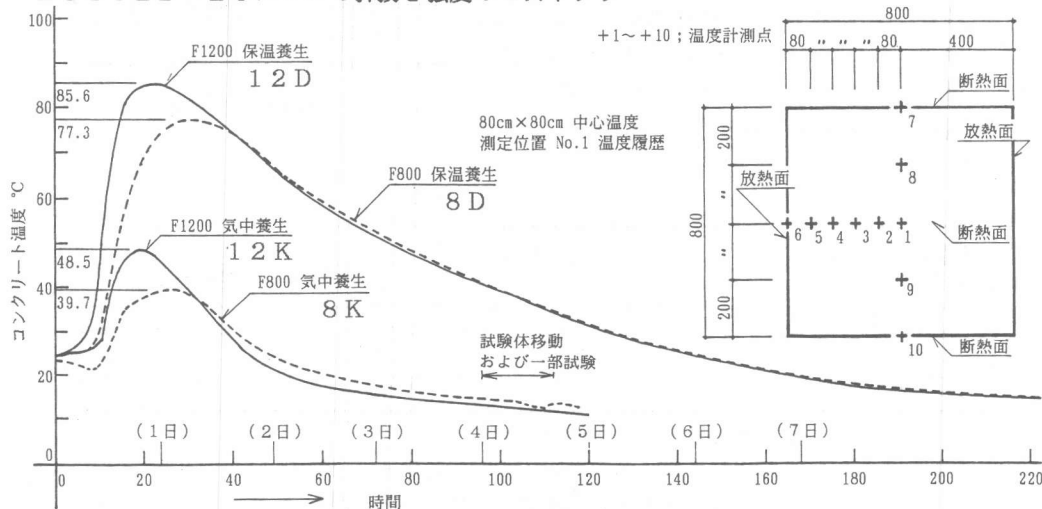


図-4 試験体中心部の温度履歴（測定位置 1）

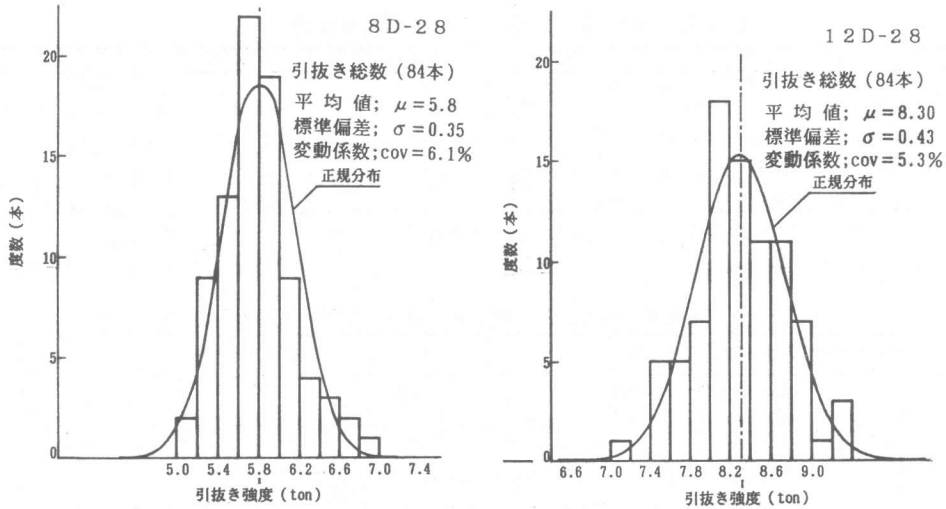


図-5 引抜き強度のヒストグラム

ムを示したもので、ほぼ正規分布を示す。表-2、図-5が示すように、本実験の結果は既往の400kgf/cm²以下のコンクリートについて行った実験結果¹⁾⁴⁾に比べてばらつきが小さくなっている。これらの高強度コンクリートの分離抵抗が大きく、試験体の上下の強度差が生じなかったことが、この一因である。さらに、引抜き強度については、高強度になるほど、ペースト量が多く、ペースト強度と骨材強度の差異が少なくなることも大きな要因となっていると考えられる。

圧縮強度発現特性……表-3に標準養生コントロールシリンダーの試験結果を示す。標準養生シリンダー28日圧縮強度はF800で910kgf/cm²、F1200で1129kgf/cm²となった。この値を基準値として、各種の圧縮強度を無次元化した結果を表-4に示す。表-4の結果は高強度コンクリートの圧縮強度の発現特性について多くの知見を示している。まず、F800、F1200ともに気中養生、保温養生に拘らず、材令1Wで発現したコア強度は、その後材令が進んでも殆ど増大しない。そして、F800の1Wコア強度は標準養生1Wシリ

表-2 引抜き試験とコア試験結果

| 目標強度 | 試験種類 | 特性値 | 気中養生 | | 保温養生 | | |
|--------|--------|----------------------------|------|------|------|------|------|
| | | | 1W | 4W | 1W | 4W | 13W |
| F 800 | 引抜き試験 | データ数 (個) | 41 | 42 | 83 | 84 | 84 |
| | | 平均値 (Ton) | 5.04 | 5.46 | 5.56 | 5.80 | 5.95 |
| | | 標準偏差 (Ton) | 0.41 | 0.35 | 0.45 | 0.35 | 0.40 |
| | | 変動係数 (%) | 8.1 | 6.4 | 8.1 | 6.1 | 6.7 |
| | コア圧縮試験 | データ数 (個) | 6 | 6 | 9 | 9 | 13 |
| | | 平均値(kgf/cm ²) | 710 | 732 | 748 | 723 | 772 |
| | | 標準偏差(kgf/cm ²) | 26.2 | 48.5 | 21.6 | 44.8 | 64.6 |
| | | 変動係数 (%) | 3.7 | 6.6 | 2.9 | 6.2 | 8.4 |
| F 1200 | 引抜き試験 | データ数 (個) | 42 | 42 | 84 | 84 | 84 |
| | | 平均値 (Ton) | 7.41 | 7.85 | 8.50 | 8.30 | 8.5 |
| | | 標準偏差 (Ton) | 0.43 | 0.42 | 0.43 | 0.44 | 0.42 |
| | | 変動係数 (%) | 5.7 | 5.3 | 5.0 | 5.3 | 4.9 |
| | コア圧縮試験 | データ数 (個) | 6 | 5 | 9 | 9 | 13 |
| | | 平均値(kgf/cm ²) | 944 | 1002 | 1083 | 1134 | 1110 |
| | | 標準偏差(kgf/cm ²) | 22.2 | 23.8 | 43.9 | 25.0 | 50.5 |
| | | 変動係数 (%) | 2.4 | 2.4 | 4.1 | 2.2 | 4.5 |

表-3 標準養生シリンダー-圧縮試験結果

| | 1 W | | 2 W | | 4 W | | 8 W | | 13 W | |
|--------|-----|-----|------|-----|------|------|------|------|------|------|
| F 800 | 708 | | 853 | | 933 | | 977 | | 1010 | |
| | 717 | 709 | 810 | 833 | 913 | 910 | 1037 | 996 | 1032 | 1012 |
| | 703 | | 835 | | 884 | | 973 | | 994 | |
| F 1200 | 858 | | 937 | | 1068 | | 1144 | | 1175 | |
| | 850 | 859 | 993 | 985 | 1222 | 1129 | 1250 | 1159 | 1211 | 1195 |
| | 868 | | 1025 | | 1097 | | 1083 | | 1198 | |

*注 この結果を表-4において標準養生シリンダー(1)としている

表-4 標準養生シリンダー強度と他のシリンダー強度との比

| 目標強度 | 養生,供試体 | 材令 | 1W | 2W | 4W | 8W | 13W |
|--------|--------------|-----|------|------|-------------------------------|---------|---------|
| F 800 | 標準養生シリンダー(1) | | 0.78 | 0.92 | [1.00] | 1.09 | 1.11 |
| | 標準養生シリンダー(2) | | 0.81 | 0.91 | 1.00 | 1.04 | --- |
| | 現場水中シリンダー | | 0.70 | 0.87 | 0.93 | 0.96 | 1.07 |
| | 構造実験用シリンダー | (a) | 0.80 | 0.87 | (a)1.04 (b)0.87 (c)0.90 | --- | --- |
| | 気中養生コア | | 0.78 | --- | 0.80 | --- | --- |
| | 保温養生コア | | 0.82 | --- | 0.79 | --- | 0.85 |
| F 1200 | 標準養生シリンダー(1) | | 0.76 | 0.87 | [1.00] | 1.03 | 1.06 |
| | 標準養生シリンダー(2) | | 0.84 | 0.93 | 1.05 | 1.15 | --- |
| | 現場水中シリンダー | | 0.66 | 0.81 | 0.89 | 0.96 | 1.01 |
| | 構造実験用シリンダー | (a) | 0.74 | 0.88 | (a)0.99 (b)1.01 (c)0.94 | (a)1.03 | (c)1.01 |
| | 気中養生コア | | 0.84 | --- | 0.89 | --- | --- |
| | 保温養生コア | | 0.96 | --- | 1.00 | --- | 0.98 |

注) 構造実験用シリンダーとは、同じバッチのコンクリートから制作された構造実験用試験体のコントロールシリンダーを意味し、(a)~(c)は、実験機開別を示す。
(a)(b)は実験室内気中養生、(c)は湿布養生を実施している。

ンダー強度と同等と見なされるのに対して、F1200を保温養生した場合の1Wコア強度は、標準養生4Wシリンダー強度と同等にまで発現する。この結果、材令とともに強度が増進する水中養生(標準養生と現場水中養生)シリンダー強度と比較して、長期材令のコア強度は低い強度を示す。しかし、F1200ではその低下の程度は少ない。この傾向は、他の実験的研究でも報告されている。³⁾

高強度コンクリートの強度発現特性は、混和材料の性質にも影響されるので、特に若材令時の強度については、使用した混和材料による固有の性状として理解する必要があると思われる。

保温養生と気中養生の差の影響は、温度履歴の差と乾燥状態の差の両方の影響が重なった結果であり、両方を分離することは不可能である。しかし、表-4に示したように、同じバッチから製作した構造実験用試験体のコントロールシリンダーの実験結果を参考にすると、高強度コンクリートの場合は、乾湿の影響は少ないと思われるが、そのように結論するには、さらに検討を要しよう。

表-4に記入した標準養生シリンダー(2)の結果は、同一バッチから異なった実験者によって制作・養生・実験された結果であり、表-3に示した標準養生シリンダー(1)との差異の原因は不明である。

引抜き強度の試験体内分布……図-6に12Dおよび8D試験体における引抜き強度の水平方向平均分布(表面から同じ距離にある表裏の縦列についての平均値の水平方向の分布)を示す。

図-4の挿入図に示す中央水平線に沿う温度分布の時間的変化を図-7に示す。

表面（放熱面）と内部の、このような初期温度履歴の差および材令5日以降の乾湿の差は引抜き強度にそれほど大きな影響を与えず、表面と内部の強度差は小さい。

引抜き強度とコア強度の相関 ……同一条件下の試験体全体（K養生の場合は1/2試験体）について実験結果を全数平均し、引抜き強度とコア強度の平均値間の対応をプロットすると図-8を得る。普通強度レベルの場合には、コンクリートの表面乾燥によって引抜き強度が低下することを過去に報告したが²⁾、図-8から判断すれば、高強度コンクリートにおいてはその影響は小さい。図-8より、引抜き強度とコア強度の関係式を、原点を通る直線と仮定して、最小2乗近似すると次式を得る。

$$Fr = 1.30P$$

Fr : コア圧縮強度 (kgf/cm²)

P : 引抜き強度 (ton)

400kgf/cm² 級以下のコンクリートに対する、豊富なデータについて求めた上式の係数は1.10であった¹⁾⁴⁾。引抜き強度とコア強度の関係を、低強度から高強度域まで連続した関係式として表現しようとするならば、例えば引張強度と圧縮強度の関係のように、圧縮強度の平方根に比例するとするよりは、原点を通る直線に近い関係式で表現するほうが明確である。

図-9に示す位置関係にある片面4本の引抜き強度の平均値と、コア強度の関係を図-10に示す。これは試験体中の局所的な強度変動に対して、両強度が図-8と同じ相関を保って、対応するかどうかを見ようとするものである。本実験では試験体内での強度の変動が少ないので、その目的は明確には達成されていないが、図-10より隣接する4本の引抜き強度の平均値から、その位置におけるコア強度を±100kgf/cm²程度の誤差内で推定できることを示している。（推定精度の正確な検討は別の機会に行う。）

4 結論

(1) シリカフェーム入り混和材を用いた圧縮強度1200kgf/cm²級の高強度コンクリートで

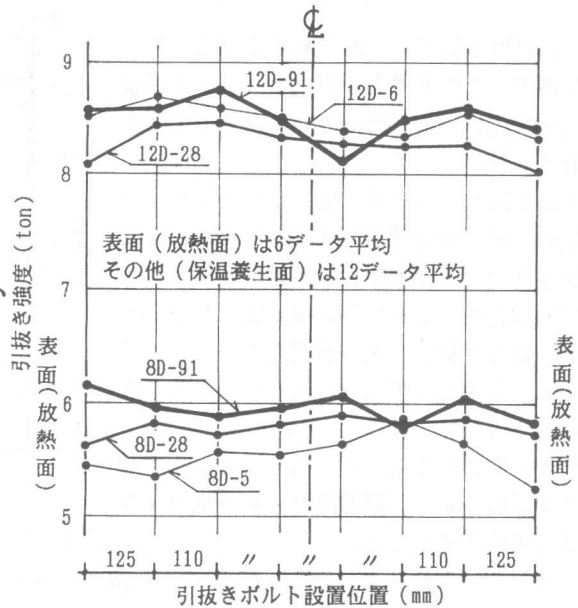


図-6 引抜き強度の水平方向分布

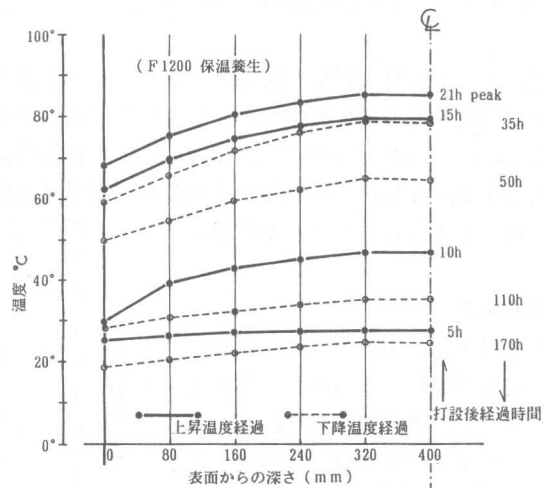


図-7 水平方向コンクリート温度分布

は、保温養生下での水和熱蓄積のために、1週材令で標準養生4週シリンダー圧縮強度を発現し、その後の材令で殆ど一定強度を示した。

(2) 高性能AE減水剤を用いた800kgf/cm²級の高強度コンクリートでは、保温養生下での1週強度は標準養生4週シリンダー強度の80~85%程度に達し、その後の材令で殆ど一定の強度を示した。

(3) 引抜き試験法は、800~1200kgf/cm²級の高強度コンクリートに対しても有効に適用できる。同一条件での引抜き強度のばらつきは普通強度レベルの場合より著しく小さくなった。

(4) 800~1200kgf/cm²の高強度コンクリートの圧縮強度は引抜き強度にほぼ比例するが、その換算係数は400kgf/cm²以下の場合とやや異なる結果となった。

<謝辞> 本研究で用いた高強度コンクリートの調合設計・製造は(株)鴻池組の高強度コンクリート研究会の研究事項として、行われたものであり、同社の多大な技術援助に謝意を表します。また、本研究は平成元年度科研費(試験研究)の一部として行われたことを付記する。

<参考文献>

- 1) 森田司郎, 小松勇二郎, 近藤實: 引抜き試験による現場打ち高強度コンクリートの構造体強度評価、コンクリート工学年次論文報告集. 10-2. 1988, pp.209~214
- 2) 森田司郎, 小松勇二郎, 近藤吾郎: 引抜き試験によるコンクリート推定強度への諸要因の影響—コーン寸法, 乾燥, 粗骨材量の影響—、セメント技術年報. 37. 1983, pp.217~220
- 3) Aitcin, P.-C. and Riad, N.; Curing Temperature and Very High Strength Concrete, Concrete International, Oct. 1988, pp.69~72
- 4) 森田司郎: 引抜き試験法の開発と構造体コンクリートの品質管理システムの提案、昭和62年度文部省科学研究費補助金(試験研究)研究成果報告書、1988年3月

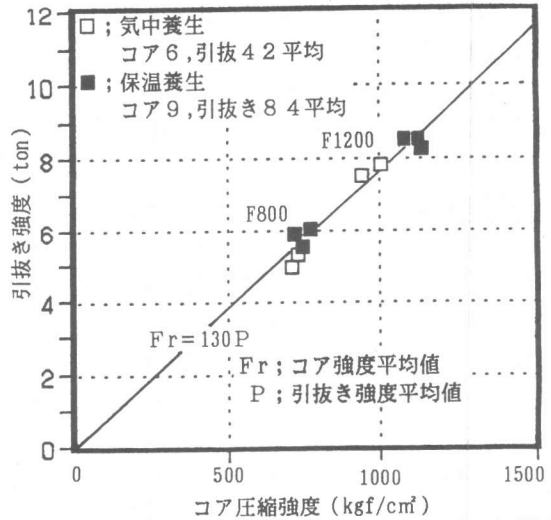


図-8 引抜き強度とコア強度の平均値間の相関

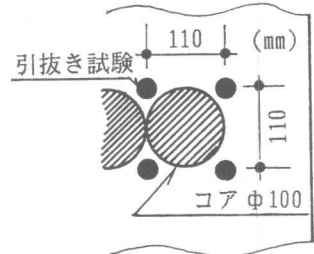


図-9 コアと引抜き試験位置

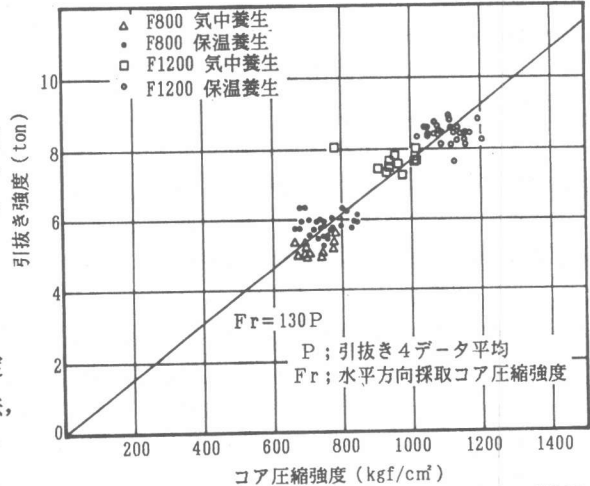


図-10 局所についての引抜き強度とコア強度の関係