

(17) 一軸拘束を受ける高膨張コンクリートの特性および導入ケミカルプレストレス

オリエンタル建設(株) 技術研究所 正会員 ○呉 承寧
同 上 正会員 佐藤 重一

1. はじめに

従来のケミカルプレストレス用膨張コンクリートにおいては、単位膨張材量を $30 \sim 60\text{kg/m}^3$ とするのが一般的である[1]。このような膨張コンクリートを一軸拘束した場合、導入されたケミカルプレストレスは、拘束鋼材比によって異なるが、 6N/mm^2 以下であることが報告されている[2]。このケミカルプレストレスは、膨張コンクリートの収縮およびクリープにより材齢の増加とともに小さくなる。

ケミカルプレストレストコンクリートを構造部材としてより広い範囲で利用するためには、従来のケミカルプレストレスより大きなケミカルプレストレスが必要となる。このため、単位膨張材量が 60kg/m^3 を超える高い膨張性能を有する膨張コンクリートに十分な拘束を行うことによって高レベルのプレストレスを導入することが考えられる。しかし、このような高い膨張性能を有する膨張コンクリートに関する研究は少なく、コンクリートの力学特性および導入されるプレストレスと単位膨張材量および拘束鋼材比との関係は不明である。

本研究は、単位膨張材量を $60, 90, 120\text{kg/m}^3$ の膨張コンクリートに対して一軸拘束を行う場合の圧縮強度、引張強度、曲げ強度、ヤング係数、収縮およびクリープなどの力学特性を調べ、さらに、導入されるケミカルプレストレスと単位膨張材量および拘束鋼材比との関係を実験的に求めたものである。

2. 試験概要

2.1 使用材料

本実験においては、高い膨張性能を有する石灰系膨張材を使用し、セメントは、石灰系膨張材を使用する場合にも膨張率が高くなる早強セメントを使用した。

また、混和剤には、ポリカルボン酸系の高性能 AE 減水剤を使用した。

表-1 にコンクリートの使用材料、物性を示す。

表-1 コンクリートの使用材料、物性

材料名	種 類	物 性
セメント	早強材 1150T セメント	比重=3.14
膨張材	石灰系膨張材	比重=3.15
細骨材	砕砂	F. M. =2.69, 比重=2.61
粗骨材	2005号砕石	F. M. =6.71, 比重=2.63
混和剤	高性能AE減水剤	比重=1.05

2.2 膨張コンクリートの配合

単位膨張材量は $60, 90, 120\text{kg/m}^3$ の3種類としたが、水結合材(セメント+膨張材)比(33%)および単位水量(165kg/m^3)は同一とした。

表-2 に膨張コンクリートの示方配合を示す。

コンクリートの配合記号は、単位膨張材量により区別され、単位膨張材量がそれぞれ $60, 90, 120\text{kg/m}^3$ の配合記号を EX60, EX90 および EX120 とした。

表-2 膨張コンクリートの配合

配合記号	粗骨材の最大寸法 (mm)	水結合材比 W/(C+E) (%)	細骨材率 s/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)					
				水 W	セメント C	膨張材 E	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 SP
EX60	20	33	45	165	440	60	765	942	3.70
EX90	20	33	45	165	410	90	765	942	3.70
EX120	20	33	45	165	380	120	765	942	3.70

2.3 試験用供試体

(1) コンクリートの強度試験用供試体

膨張コンクリートの圧縮強度、割裂引張強度、および曲げ強度試験に用いた供試体は、拘束鋼材比を 3.24%とした拘束治具により一軸拘束しながら養生を行い、所定材齢に達した後、拘束治具を解放し2時間以内で各種の試験を行った。一軸拘束を行った圧縮強度試験体の一例を図-1(a)に示す。

なお、一軸拘束を受けた膨張コンクリートの圧縮強度と比較するために、図-1(b)に示す鋼管を用いてテストピースを製作し、膨張コンクリートの拘束圧縮強度を測定した。

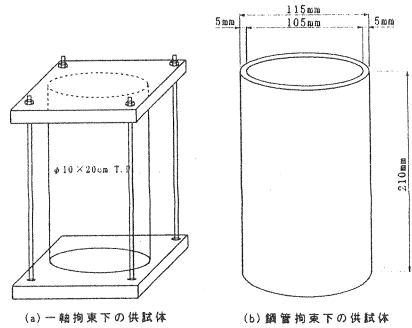


図-1 圧縮強度試験用供試体の拘束

(2) ケミカルプレストレス試験用供試体

導入されるケミカルプレストレスに及ぼす拘束鋼材比の影響を確認するため、図-2に示す拘束鋼材比を変化させた角柱状の一軸拘束供試体を製作した。拘束鋼材として、 $\phi 11, 17, 23, 29, 32, 36, 40\text{mm}$ のPC鋼棒をそれぞれ断面中央に配置した。拘束鋼材とコンクリートとの間はシースによって付着を切り、コンクリートの拘束は両端の鋼板のみによって行うものとした。いずれの供試体も拘束鋼材のひずみはPC鋼棒の表面に貼付したひずみゲージにより測定を行った。

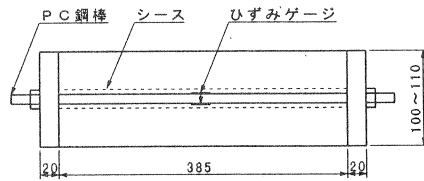


図-2 一軸拘束試験用供試体

また、一軸拘束される膨張コンクリートのクリープ特性を

調べるために、図-2に示す供試体と同じ形状の供試体（断面 $150\text{mm} \times 150\text{mm}$ 、長さ 300mm ）を $\phi 32\text{mm}$ の鋼棒で拘束し、埋込ゲージによりコンクリートのひずみを測定した。

2.4 供試体の養生方法

供試体の養生方法は、打設から脱型まで、コンクリート温度を $20 \sim 35^\circ\text{C}$ で管理し、材齢 24 時間で脱型、その後、材齢 14 日まで $20 \pm 2^\circ\text{C}$ の水中養生を行った。また、コンクリートの強度試験用供試体は、引き続き材齢 28 日まで、温度 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 、湿度 $60 \pm 5\%$ の室内で気中養生を行った。

2.5 一軸拘束供試体のヤング係数の測定

膨張コンクリートのヤング係数を測定するために、図-2に示す一軸拘束供試体を別途製作した。載荷は、図-3に示すように、緊張ジャッキにより、テンションロッドを緊張することにより行い、供試体の拘束鋼材のひずみ、コンクリートのひずみを測定して、コンクリートのヤング係数を算出した。

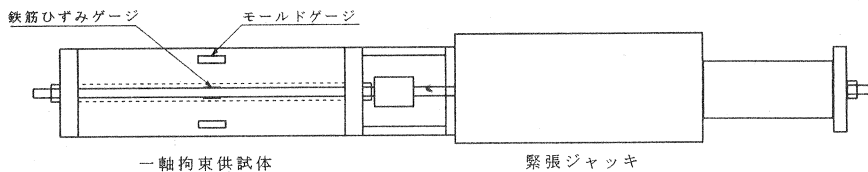


図-3 一軸拘束供試体のコンクリートのヤング係数の測定方法

2.6 ケミカルプレストレスの算定

一軸拘束供試体に導入されるケミカルプレストレスは式(1)により算定する。

$$\sigma_{cp} = \frac{P_s}{A_c} = \frac{E_s \times \varepsilon_s \times A_s}{A_c} = \rho \times E_s \times \varepsilon_s \quad (1)$$

ここに、 σ_{cp} はケミカルプレストレス(N/mm²)、 P_s は膨張コンクリートの膨張を拘束することによって生じる鋼材緊張力(N)、 E_s は拘束鋼材のヤング係数(N/mm²)、 ε_s は鋼材のひずみ、 A_s は拘束鋼材断面積(mm²)、 A_c はコンクリート純断面積(mm²)、 ρ は拘束鋼材比($\rho = A_s/A_c$)である。

3. 実験結果と考察

3.1 圧縮強度と単位膨張材量との関係

既往の研究結果より、無拘束で養生された膨張コンクリートの圧縮強度は膨張率がある程度大きくなると低下するが、単位膨張材量が 30kg/m³ 程度であれば、通常のコンクリートとほぼ同じであると考えられている[2]。しかし、単位膨張材量が 30kg/m³ 以上でも、ケミカルプレストレスコンクリートとして用いる膨張コンクリートは、鋼材により拘束されるため、圧縮強度の低下が抑制される。図-4は、図-1(b)に示す鋼管で拘束養生された膨張コンクリートの圧縮強度と材齢の関係を示すが、単位膨張材量が 60、90、120kg/m³ でも、圧縮強度の大きな低下は見られなく、材齢 28 日においては 70N/mm² 以上となっている。

一方、同じ配合の膨張コンクリートに対して、図-1(a)に示す一軸拘束状態で養生する場合、それらの圧縮強度発現は図-5に示すように、単位膨張材量が 60kg/m³ では、材齢と共に強度が増加する。しかし、単位膨張材量が 90、120kg/m³ では、材齢 14 日までの水中養生期間において一旦低下した強度は気中養生することによって材齢と共に増加の傾向を示し、水中養生前の強度まで回復する。しかし、材齢 28 日における圧縮強度は単位膨張材量 60kg/m³ の場合の圧縮強度のそれぞれ約 1/2、1/3 程度であった。

これらの結果より、一軸拘束の場合、単位膨張材量 90、120 kg/m³ の膨張コンクリートの強度低下は、コンクリートの過度膨張によりコンクリートの組織がポーラスとなることと関係があると思われる。

図-6は、拘束鋼材比 3.24%で一軸拘束された各膨張コンクリートの膨張ひずみの経時変化を示す。この図より、単位膨張材量 60kg/m³ の場合の膨張ひずみは、材齢とともに徐々に増加しているが、材齢 14 日までに 400 × 10⁻⁶ 程度にしか達しなかった。一方、単位膨張材量 90、120kg/m³ の膨張コンクリートの膨張ひずみは、それぞれ材齢 7 日および材齢 3 日においてすでに 700 × 10⁻⁶ を越えている。既往の研究によると、膨張コンクリートの膨張ひずみが 700 × 10⁻⁶ を越えた場合、圧縮強度の低下が著しいと報告されて

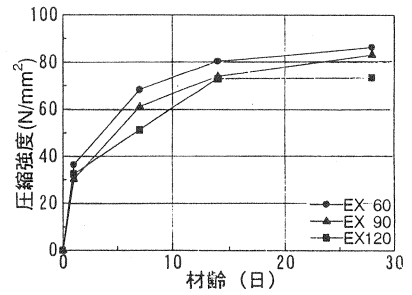


図-4 鋼管拘束された膨張コンクリートの圧縮強度と材齢の関係

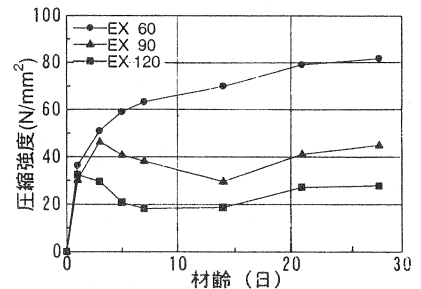


図-5 一軸拘束された膨張コンクリートの圧縮強度と材齢の関係

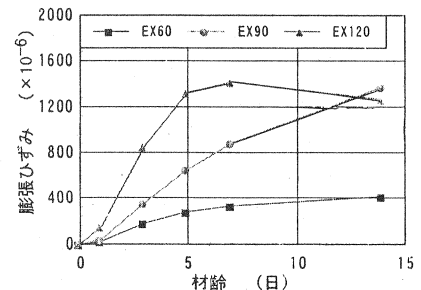


図-6 一軸拘束された膨張コンクリートの膨張ひずみ

いる[2]。したがって、単位膨張材量 90, 120kg/m³ の膨張コンクリートの強度低下はコンクリートの過度膨張による現象であるものと考えられる。

3.2 コンクリートのヤング係数と単位膨張材量との関係

図-7に一軸拘束供試体を緊張することにより得られた膨張コンクリートのヤング係数を示す。一軸拘束された膨張コンクリートのヤング係数は、圧縮強度の場合と同様に単位膨張材量が多いほど低いが、拘束鋼材比の影響は見られなかった。

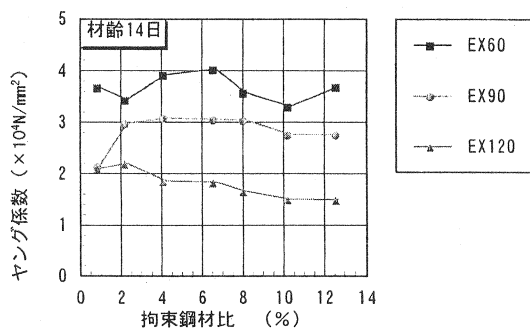


図-7 一軸拘束された膨張コンクリートのヤング係数

3.3 膨張コンクリートの引張強度および曲げ強度

一軸拘束された膨張コンクリートの引張強度は、割裂試験により測定した。その結果、膨張コンクリートの引張強度は図-8に示すように、単位膨張材量によって異なり、単位膨張材量が 60kg/m³ の膨張コンクリートの引張強度は、材齢 3日までの間に大きく増加したものの、その後の強度の増加はわずかであった。それに対して、単位膨張材量が 90kg/m³ の膨張コンクリートの引張強度は、圧縮強度の場合と同様に、材齢 14日までの水中養生期間に低下の傾向を示し、気中養生としてからある程度の回復が見られたが、材齢 28日においては、単位膨張材量 60kg/m³ の場合に比較して約 1/2であった。これはコンクリートの過度膨張と関係があると考えられる。

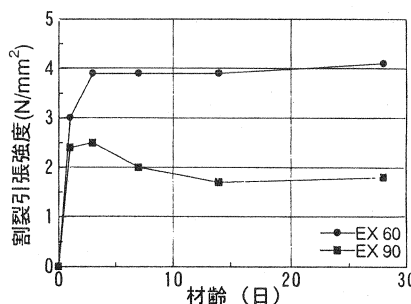


図-8 一軸拘束された膨張コンクリートの割裂引張強度

一軸拘束された膨張コンクリートの曲げ強度を図-9に示す。この図から、膨張コンクリートの曲げ強度は圧縮強度および引張強度の場合と同様に単位膨張材量によって異なることがわかった。単位膨張材量を 60kg/m³ 用いた膨張コンクリートでは、曲げ強度が材齢とともに増大し、主に材齢 14日までの水中養生の間に発現している。単位膨張材量 90kg/m³ の膨張コンクリートでは材齢 3日までは曲げ強度が増大したが、水中養生期間中にコンクリートの過度膨張により、曲げ強度が低下した。この低下した曲げ強度は、気中養生としてからある程度回復したが、単位膨張材量 60kg/m³ の膨張コンクリートに比べ、材齢 28日における曲げ強度は約 4割しかなかった。

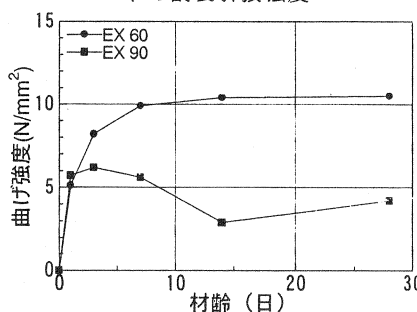


図-9 一軸拘束された膨張コンクリートの曲げ強度

図-10は膨張コンクリートの圧縮強度と曲げ強度および引張強度と圧縮強度との相関関係を示す。図より、膨張コンクリートは、単位膨張材量に関係なく、曲げ強度または引張強度が圧縮強度と直線関係があることが明らかとなった。特に、曲げ強度は圧縮強度と良好な相関関係があることを確認された。同図より、一軸拘束された膨張コンクリートの曲げ強度と圧縮強度および引張強度と圧縮強度の相関関係式を求めると、それぞれ

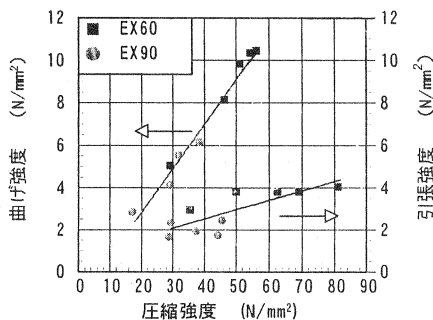


図-10 曲げ強度、引張強度と圧縮強度との相関関係

式 (2) および式 (3) となる。

$$f_b = 0.21f'_c - 1.35 \quad (2)$$

$$f_t = 0.05f'_c + 0.73 \quad (3)$$

ここに、 f_b は膨張コンクリートの曲げ強度、 f_c は膨張コンクリートの圧縮強度、 f_t は膨張コンクリートの引張強度である。

3.4 膨張ひずみと拘束鋼材比との関係

一軸拘束された膨張コンクリートの膨張ひずみは、図-11に示すように、単位膨張材量および拘束鋼材比によって異なる。単位膨張材量が多いほど、拘束鋼材比が小さいほど、膨張コンクリートの膨張ひずみが大きい。例えば、拘束鋼材比が0.96%の場合、単位膨張材量 60kg/m^3 の膨張コンクリートの膨張ひずみは 600×10^{-6} であり、単位膨張材量 $90, 120\text{kg/m}^3$ の膨張コンクリートの膨張ひずみはそれぞれ 2000×10^{-6} 、 3200×10^{-6} である。もし膨張コンクリートの膨張ひずみが 700×10^{-6} を越えた時に、過度膨張により強度が著しく低下するとすれば、単位膨張材量 $60, 90, 120\text{kg/m}^3$ の膨張コンクリートに対して、過度膨張の生じない最低拘束鋼材比を求めると、それぞれ 0.9% 、 4.0% 、 6.5% となることがわかった。

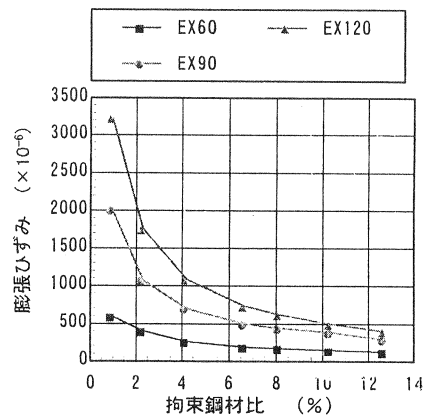


図-11 一軸拘束された膨張コンクリートの膨張ひずみ

3.5 クリープひずみ

一軸拘束された膨張コンクリートの長期変形は主に膨張材による膨張、セメント水和による自己収縮、乾燥による乾燥収縮および導入されるケミカルプレストレスによるクリープによって構成されると考えられる。しかしながら、一軸拘束された膨張コンクリートの長期変形量から、各要因による変形量を完全に分離することは極めて困難である。そのため、本試験では、膨張、収縮およびクリープを分離せず、単位応力あたりのクリープひずみによって一軸拘束下で養生された膨張コンクリートの収縮およびクリープ特性について検討した。図-12に単位膨張材量 90kg/m^3 の膨張コンクリートと同じ水セメント比の普通のコンクリートについて、載荷後の経過時間と単位応力あたりのクリープひずみの関係を示す。同図より、膨張コンクリートは、普通のコンクリートに比べて単位応力あたりのクリープひずみは初期材齢において小さく、長期材齢において大きいことがわかる。したがって、膨張コンクリートの有効ケミカルプレストレスを計算する際、単位応力あたりのクリープひずみが普通コンクリートに比べて大きいことを考慮する必要があるものと考えられる。

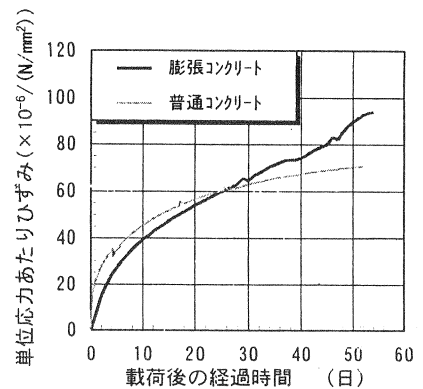


図-12 膨張コンクリートの単位応力あたりのクリープひずみ

3.6 導入プレストレスと拘束鋼材比との関係

図-13に一軸拘束供試体に導入されたケミカルプレストレスの最大値と拘束鋼材比との関係を示す。この最大プレストレスは、単位膨張材量 60, 90kg/m³ の膨張コンクリートにおいては材齢 14 日の値で、単位膨張材量 120kg/m³ の膨張コンクリートにおいては材齢 7 日の値である。この図より、拘束鋼材比の増加にともない導入されるケミカルプレストレスは増加する。拘束鋼材比が 2.3%未満の範囲では単位膨張材量に関わらず導入されるケミカルプレストレスは増加するが、さらに拘束鋼材比を増加させても導入されるケミカルプレストレスの増加率は減少し、特に、単位膨張材量 90, 120kg/m³ の膨張コンクリートの場合、導入されるケミカルプレストレスは収束する傾向が見られる。

また、同図より、一軸拘束供試体に導入される最大ケミカルプレストレスと単位膨張材量の関係は、各拘束鋼材比において、単位膨張材量を 60kg/m³ から 90kg/m³ に増加させることにより導入されるケミカルプレストレスの増加は著しいが、単位膨張材量を 90kg/m³ から 120kg/m³ に増加させても、導入されるケミカルプレストレスの増加はわずかであることがわかる。

なお、拘束鋼材により拘束された一軸拘束試験体に導入された最大ケミカルプレストレスは、実測値を回帰することにより、単位膨張材量によって、それぞれ式(4)、式(5)および(6)のように拘束鋼材比の関数として表すことができる。最大ケミカルプレストレスは、単位膨張材量および拘束鋼材比を用いて、計算することができる。

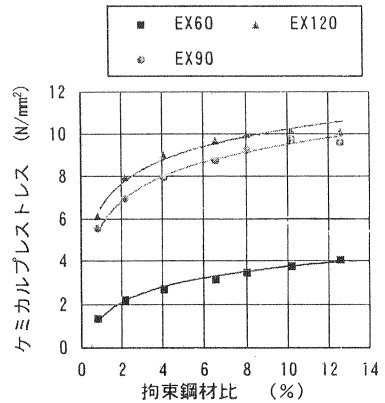


図-13 ケミカルプレストレスと単位膨張材量、拘束鋼材比との関係

$$\text{単位膨張材量 } 60\text{kg/m}^3 : \sigma_{cp} = 1.02 \ln(\rho) + 1.38 \quad (4)$$

$$\text{単位膨張材量 } 90\text{kg/m}^3 : \sigma_{cp} = 1.68 \ln(\rho) + 5.65 \quad (5)$$

$$\text{単位膨張材量 } 120\text{kg/m}^3 : \sigma_{cp} = 1.60 \ln(\rho) + 6.54 \quad (6)$$

ここに、 σ_{cp} : ケミカルプレストレス(N/mm²)、 ρ : 拘束鋼材比(%)である。

4. おわりに

本研究において、一軸拘束された膨張コンクリートについて以下の結論が得られた。

- ① 膨張コンクリートの強度は単位膨張材量および拘束条件の影響を大きく受け、単位膨張材量が多いほど、また拘束力が弱いほど、強度が低い。
- ② 単位膨張材量 60, 90, 120kg/m³ の膨張コンクリートに対して、強度の低下が発生しない最低拘束鋼材比は、それぞれ 0.9%, 4.0%, 6.5%である。
- ③ 膨張コンクリートの曲げ強度または引張強度は圧縮強度と直線相関関係がある。
- ④ 普通のコンクリートに比べ、膨張コンクリートのクリープひずみは比較的大きい。
- ⑤ 導入されるケミカルプレストレスは単位膨張材量および拘束鋼材比が多いほど大きいが、拘束鋼材比の増加と共に収束する傾向にある。

参考文献

- 1)土木学会：コンクリート標準示方書，平成8年版，pp.200～pp.208，1996
- 2)土木学会：膨張コンクリート設計施工指針，pp.99～pp.97，1993