

論文 一軸拘束を受ける高膨張コンクリートに導入されるケミカルプレストレスの算定方法

呉 承寧^{*1}・佐藤重一^{*2}

要旨: 高レベルのケミカルプレストレスを導入するために、高い膨張性能を有する膨張コンクリートを使用することが考えられる。本研究は、単位膨張材量を60~120kg/m³とした高膨張コンクリートを用い、水中養生終了時に導入されたケミカルプレストレスおよびその算定方法について検討したものである。研究の結果、一軸拘束を受ける高膨張コンクリートに水中養生終了時に導入された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が明らかとなり、その算定方法を提案した。

キーワード: 高膨張コンクリート, ケミカルプレストレス, 一軸拘束, 算定方法

1. はじめに

従来のケミカルプレストレスコンクリートにおいては、単位膨張材量を30~60kg/m³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、導入されるケミカルプレストレスは、拘束鋼材比によって異なるものの、6N/mm²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り、最終的には僅かなプレストレスが残るだけとなる³⁾。

ケミカルプレストレス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、従来より大きなケミカルプレストレスが必要となる。そこで、単位膨張材量を60kg/m³以上とした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可能と考えられる。しかしながら、このような高膨張コンクリートを用いる場合、拘束条件によって導入するケミカルプレストレスおよびその算定方法に関する研究は希少であると言わざるを得ない。

本研究では、単位膨張材量が60, 90および

120kg/m³の膨張コンクリートを一軸拘束し、導入されるケミカルプレストレスを実験的に求め、さらに、単位膨張材量および拘束鋼材比をパラメータとして、水中養生終了時のケミカルプレストレスを算定する方法を検討する。しかし、既往の研究により、最終的に残留されるケミカルプレストレスは環境条件によって異なり、水中養生終了時の約6割である。これについての検討は本研究に含まれていない。

2. 試験概要

2.1 使用材料およびコンクリート配合

表-1に試験用膨張コンクリートの使用材料を、表-2にコンクリートの配合および特性を示す。膨張コンクリートの配合は、単位膨張材量をパラメータとして60, 90および120kg/m³

表-1 膨張コンクリートの使用材料

材料名	種類	物性
セメント	早強ポルトランドセメント	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

*1 オリエンタル建設(株) 技術研究所 主任研究員 工博(正会員)

*2 オリエンタル建設(株) 技術研究所 研究員 工修

表-2 膨張コンクリートの配合および特性

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)						スランブ (cm)	材齢28日 圧縮強度 (N/mm ²)
				水 W	セメント C	膨張材 E	細骨材 S	粗骨材 G	減水剤 S P		
EX60	20	33	45	165	440	60	765	942	3.70	9.5	81.8
EX90	20	33	45	165	410	90	765	942	3.70	10.0	45.0
EX120	20	33	45	165	380	120	765	942	3.70	11.0	27.7

表-3 使用鋼材の機械的性質

鋼材の種類	耐力 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	ヤング係数 (KN/mm ²)
PC鋼棒C種1号 SBPR1080/123	1080	1230	200

の3種類にしたが、プレストレスを耐える強度を得るために、水結合材比を33%にした。表-3に使用鋼材の機械的性質を示す。

2.2 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-1に示すような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、φ11, 17, 23, 29, 32, 36, 40mmのPC鋼棒を使用した。拘束鋼材とコンクリートとの間はシーすによって付着を切り、コンクリートの拘束は両端の端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。

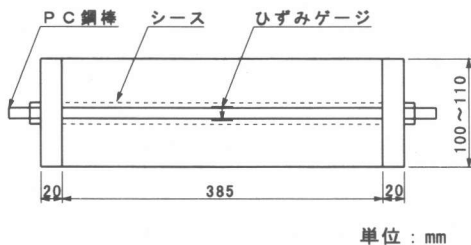


図-1 ケミカルプレストレス試験用供試体

2.3 供試体の養生方法

供試体は、打設から脱型まで、コンクリート温度を20~35℃で管理し、材齢24時間で脱型、材齢14日まで20±2℃の水中養生、その以降、室内で気中養生を行った。

2.4 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。

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

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 ケミカルプレストレスの実測値

ケミカルプレストレスに及ぼす単位膨張材量、拘束鋼材比および材齢の影響を調べるために、測定された膨張コンクリート中の拘束鋼材のひずみ ϵ_s および拘束鋼材比 ρ を用い、式(1)によりケミカルプレストレスを計算した。その結果を図-2に示す。

図-2(a)に示すように、材齢7日において、一軸拘束試験体に導入されたケミカルプレストレスは、単位膨張材量が多いほど、また、拘束鋼材比が多いほど大きい。同図(b)に示すように、材齢14日において、単位膨張材量60および

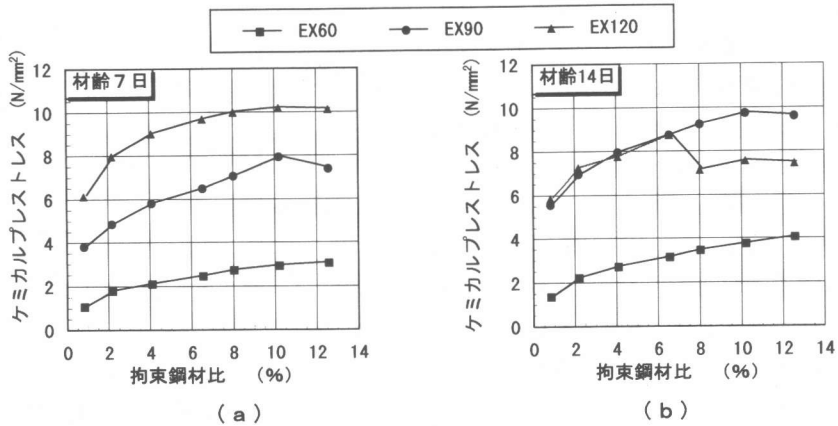


図-2 ケミカルプレストレスと単位膨張材量、拘束鋼材比および材齢との関係

90kg/m³の場合、材齢7日に比べ、ケミカルプレストレスが増加した。一方、単位膨張材量120kg/m³の場合、ケミカルプレストレスが減少し、特に、拘束鋼材比の高い場合、このケミカルプレストレスの減少は著しくなる。このケミカルプレストレスの低減は、膨張コンクリートの過度膨張が原因と見られる。既往の研究により、無拘束の場合、単位膨張材量が100kg/m³を超えると、膨張コンクリートの圧縮強度が著しく低下する¹⁾。これらの結果を考慮し、一軸拘束によるケミカルプレストレスを導入する場合の単位膨張材量の限界が100kg/m³と考えられる。

この図より、拘束鋼材比が6.6.%未満の範囲内であれば、単位膨張材量に関わらず、拘束鋼材比の増加にともない導入された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する。特に、単位膨張材量120kg/m³の膨張コンクリートの場合、材齢14日に導入されたケミカルプレストレスは材齢7日に比べて減少した。

また、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た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僅かであることが分かる。

3.2 ケミカルプレストレスの算定

ケミカルプレストレスを利用するコンクリート部材を設計する時、用いる膨張コンクリートの配合および拘束鋼材比により、導入されるケミカルプレストレスの予測が必要である。このケミカルプレストレスの算定について以下で検討する。

(1) 仕事量に基づく算定式による算定

辻氏の研究³⁾によると、ケミカルプレストレスが仕事量に基づく式(2)により求められる。

$$\sigma_{cp} = \sqrt{2\rho \cdot E_s \cdot U} \quad (2)$$

ここに、 σ_{cp} : 導入されるケミカルプレストレス、 U : 単位体積あたりの膨張エネルギー、 E_s : 拘束鋼材のヤング係数、 ρ : 拘束鋼材比である。単位体積あたりの膨張エネルギー U は、JIS A 6202の参考1のA法に規定されている一軸拘束供試体により膨張率を測定し、式(3)に基づいて計算ができる。

$$U = 1/2 \cdot \rho_r \cdot E_s \cdot \epsilon_s^2 \quad (3)$$

ここに、 ρ_r : 供試体中の拘束鋼材比、 E_s : 拘束鋼材のヤング係数、 ϵ_s : 標準供試体の膨張率である。

この算定式では、同じ膨張コンクリートを用いても、導入されるケミカルプレストレス量は拘束鋼材比の影響を受けることが認められている。また、この式は、一軸拘束の拘束鋼材比が2%程度以下で対称に配筋される場合、適用することができる。図-3に仕事量に基づく算定式により求めた計算値と測定値の比較を示す。同図より、単位膨張材量もしくは拘束鋼材比の大きい場合、この算定式により求めた計算値と実測値との差が極めて大きいことが分かる。

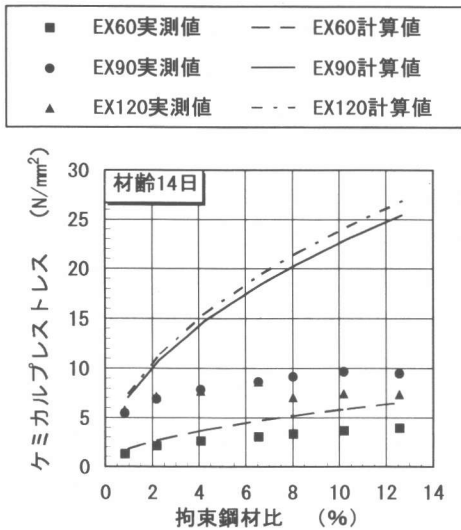


図-3 仕事量に基づく算定式による計算値と実測値との差

(2) 弾性理論に基づく算定式による算定

図-4に弾性理論に基づいたケミカルプレストレス(C.P.と略称)の導入機構を示す。同図より、膨張コンクリートの膨張により拘束鋼材に導入される緊張力 P_s 、膨張コンクリートに対する拘束鋼材の圧縮力 P_c 、およびケミカルプレストレス力 P_{cp} は、それぞれ式(4)、式(5)および式(6)により、求められる。

$$P_s = E_s \cdot \epsilon_s \cdot A_s \quad (4)$$

$$P_c = E_c \cdot \epsilon_c \cdot A_c \quad (5)$$

$$P_{cp} = P_s = P_c \quad (6)$$

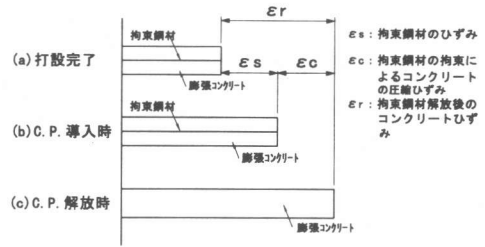


図-4 ケミカルプレストレスの導入機構

ここに、 E_s 、 ϵ_s 、 A_s はそれぞれ拘束鋼材のヤング係数、引張ひずみおよび断面積、 E_c 、 ϵ_c 、 A_c はそれぞれ膨張コンクリートのヤング係数、圧縮ひずみおよび断面積である。 ϵ_r はケミカルプレストレスが解放された膨張コンクリートのひずみ($\epsilon_r = \epsilon_s + \epsilon_c$)である。

膨張コンクリートに導入されるケミカルプレストレス σ_{cp} は、式(7)により算定することができる。

$$\sigma_{cp} = \frac{P_{cp}}{A_c} = \frac{E_s \epsilon_r}{1+n\rho} \cdot \frac{A_s}{A_c} = \frac{\rho}{1+n\rho} E_s \epsilon_r \quad (7)$$

ここに、 ρ は拘束鋼材比(A_s/A_c)、 n は鋼材とコンクリートとのヤング係数比(E_s/E_c)、 ϵ_r はケミカルプレストレスが解放された膨張コンクリートのひずみである。

式(7)において、膨張コンクリートのヤング係数 E_c および拘束解放時の膨張コンクリートひずみ ϵ_r は、材料条件によって変化する未知数である。これらの値を知るために、一軸拘束供試体を解放・再緊張することにより、 E_c および ϵ_r を測定する。求めた E_c 、 ϵ_r を用い、式(7)によりケミカルプレストレス σ_{cp} を計算した。このケミカルプレストレス計算値および同一供試体の拘束鋼材のひずみから求めたケミカルプレストレスの実験値を図-5に示す。同図より、式(7)により求めた計算値は、実測値とほぼ一致している。この結果により、一軸拘束された部材のケミカルプレストレスを計算する場合、弾性理論が有効であると考えられる。

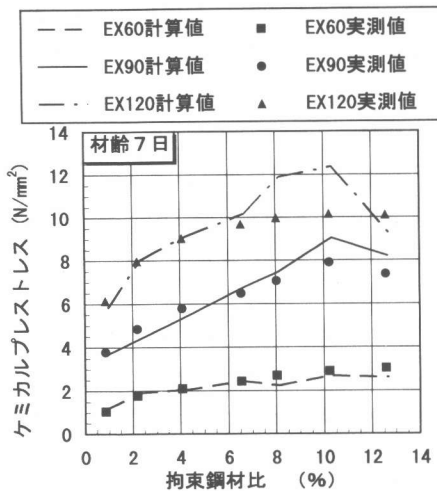


図-5 ケミカルプレストレスの実測値と弾性理論から求めた計算値

(3) ケミカルプレストレスと拘束鋼材比および単位膨張材量との関係図から推定

式(7)によりケミカルプレストレスを計算するためには、実験によって E_c および ϵ_r を測定する必要がある。これらの実験を避けるために、あらかじめケミカルプレストレスと膨張コンクリートの配合および拘束鋼材比との関係図を作成し、この図より、ケミカルプレストレスを推定する方法が考えられる。

拘束鋼材と膨張コンクリートとのすべりが無いことを前提として、図-6(a)に示す膨張コ

ンクリートおよび拘束鋼材のひずみと拘束力の関係モードがある。拘束鋼材に作用する力 P_s は、拘束鋼材の軸剛性 $E_s A_s$ を勾配とする直線となる。この直線を P_{s1} 線ということにする。一方、膨張コンクリート $B1$ に作用する力 P_c は、コンクリートの軸剛性の負の値 $-E_c I_c$ を勾配とする直線となる。この直線を P_{c1} 線ということにする。ケミカルプレストレス力は、直線 P_{s1} と P_{c1} との交点となる。同図にある ϵ_{s1} 、 ρ_1 および ϵ_{c1} は、それぞれ拘束鋼材断面積が A_{s1} の場合の拘束鋼材引張ひずみ、拘束鋼材比および膨張コンクリートの圧縮ひずみである。

拘束鋼材断面積が A_{s2} の場合、拘束鋼材の P_s 線は、拘束鋼材比の変化により勾配が $E_s A_{s2}$ に変化し、 P_{s2} 線になる。一方、同じ配合にもかかわらず、拘束鋼材の拘束力の変化により、膨張コンクリートのヤング係数 E_{c1} は E_{c2} に変わる。よって、コンクリートの P_c 線は、 P_{c2} 線に変化する。その時のケミカルプレストレス力は、 P_{s2} 線と P_{c2} 線との交点となる。

あらかじめ幾つかの拘束鋼材比 ρ_n ($n=1, 2, 3, \dots$) および配合 B_i ($i=1, 2, 3, \dots$) を用いて、拘束鋼材の引張ひずみ ϵ_{sni} を測定し、その結果から鋼材作用力 P_{sni} を算定し、 P_{sni} 、 ϵ_{sni} 、 ρ_n および B_i をプロットして、図-6(b)に示すような相関図が求められる。ケミカルプレストレスコンクリート部材を設計

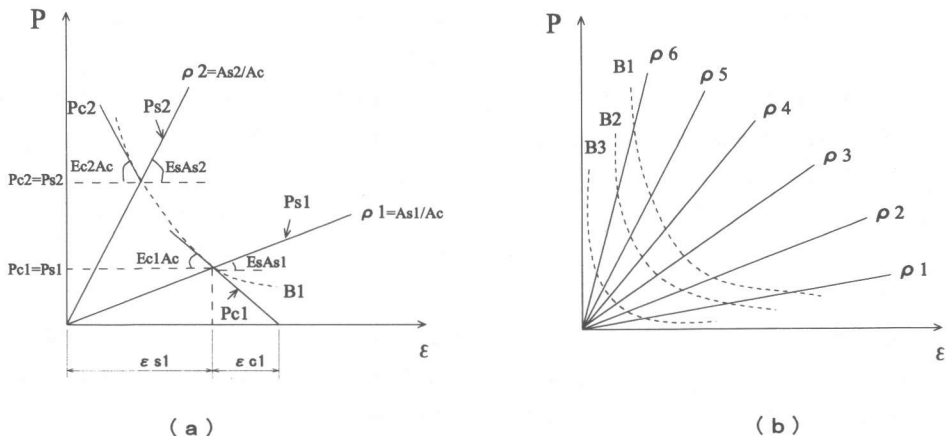


図-6 膨張コンクリートおよび拘束鋼材のひずみと受ける力の関係

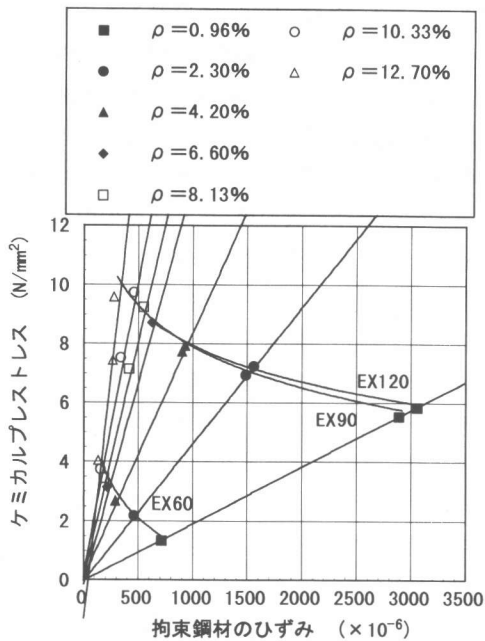


図-7 ケミカルプレストレスと膨張コンクリートの配合および拘束鋼材比との関係

する時、使用するコンクリートの配合および拘束鋼材比を用い、この図から、ケミカルプレストレスの推定ができる。

これを確認するために、本実験に用いた3種類の膨張コンクリート (EX60, EX90およびEX120) と7種類の拘束鋼材比 (0.96, 2.30, 4.20, 6.66, 8.13, 10.33, 12.70%) を組合せた一軸拘束試験体において、測定したケミカルプレストレスおよび拘束鋼材ひずみ ϵ_s を用い、図-7に示すようなケミカルプレストレス σ_{cp} 、拘束鋼材比 ρ 、および配合Bの相関図を制作した。この図は、図-6(b)と同様に、膨張コンクリートに導入されるケミカルプレストレスと拘束鋼材のひずみおよび膨張コンクリートの配合との関係を示すことができる。

しかし、膨張材の種類および養生方法がコンクリートの膨張特性に影響を及ぼすため、このような相関図から部材に導入されるケミカルプレストレスを推定する方法は、相関図を作成するための試験に用いた膨張材種類および養生方

法と同じ種類の膨張材および養生方法で製造された部材に限って適用する。

4. 結論

本研究には、一軸拘束された高膨張コンクリートにおいて、水中養生終了時に導入されるケミカルプレストレスの算定について以下の結論が得られた。

① 高膨張コンクリートに導入されるケミカルプレストレスの算定は、既存の算定式に基づいた計算値と実測値との差が大きく、実用的であるとは考え難い。

② 本試験に用いた膨張コンクリートにおいて、実験で予め求めたコンクリートのヤング係数および拘束解放時のコンクリートひずみを用いて、弾性理論によるケミカルプレストレスを計算する方法の有効性を確認した。

③ 実験の結果により、予めケミカルプレストレス、単位膨張材量および拘束鋼材比の関係図を作成し、この図から、同じ種類の膨張材および養生方法で製造された部材のケミカルプレストレスを簡便に求める方法を提案した。

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. 147～pp. 163，1993
- 3) 阿部邦弘，呉承寧等：高膨張コンクリートを用いたケミカルプレストレスコンクリートに関する研究，九州橋梁・構造工学会，pp. 81～pp. 88，1999
- 4) 呉承寧，佐藤重一：高膨張コンクリートを用いたケミカルPC板に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 20, No. 3，pp. 709～pp. 714，1998
- 5) 辻幸和：ケミカルプレストレスの推定方法について，セメント技術年報，No. 27，pp. 340～pp. 344，1973