

プレストレスを導入した合成構造部材の設計法

CALCULATION METHOD OF PRESTRESSED COMPOSITE STRUCTURE CONSISTING OF PRECAST CONCRETE
BLOCKS AND STEEL PIPE PILE

* ** ** *** ****
 栗原 安男 跡部 俊郎 田村 多佳志 能町 純雄 木田 哲量

By Yasuo KURIHARA, Toshiro ATOBE, Takashi TAMURA, Sumio, G. NOMACHI and Tetukazu KIDA

The authors have conducted structural researches on composite prestressed concrete structures, which consist of precast concrete blocks, filled-in concrete and steel pipe piles. Since this composite structure is complicated, evaluation of the behavior of each structural members and clarification of the stress changes of introduced prestress due to the drying shrinkage and creep are important. In this paper, the authors proposed some calculation methods of this composite structure and made sure of such methods by the knowledges of serial tests.

1. はじめに

近年、海洋構造物は施設の沖合化、大型化に伴い施工環境の過酷な大水深、軟弱地盤、高波浪等の条件下での工事が多くなってきている。このような施工条件下では、海上作業を極力少なくすることが重要であり、現場施工の機械化、部材のプレハブ化が進められている。海上工事のプレハブ化工法の一つに、プレキャストコンクリートブロック（以下プレキャストブロックと言う）と鋼管杭を組み合わせる合成構造を作る工法としてPBS工法(Piles and Blocks Structure Method)がある。

この工法は、海中に打設した鋼管杭の外側にあらかじめ陸上で製作したプレキャストブロックを順次積み上げた後、PC鋼棒により縦方向にプレストレスを導入して一体とし、海中にラーメン構造体を構築するものである。本工法は杭突出部の任意の位置にラーメン構造の剛結点を形成できるため、外力により発生する曲げモーメントの分散および変位の低減を図れることに特長がある。本工法では、すべての作業を海上の作業船または作業台から行うことができるので、従来の工法のように潜水士による水中作業を行うことなく、海中にラーメン構造体を構築することができる。また、プレキャスト部材を用いるので、機械化施工の導入が容易であり海上作業の短縮も可能となる。

本工法の柱体はプレキャストブロック、中詰めコンクリートよりなる圧縮部材と外周リブ付き鋼管よりな

*	三井建設株式会社 技術開発本部	(〒101 千代田区岩本町3-10-1)
**	三井建設株式会社 土木本部 土木設計部	(〒101 千代田区岩本町3-10-1)
***	工博 北海道大学名誉教授	(〒275 習志野市泉町1-2-1)
****	工博 日本大学教授 生産工学科 土木工学科	(〒275 習志野市泉町1-2-1)

る引張部材により構成されており、各々にプレストレスが導入されている。従って、柱体の設計を行う場合には、外力作用時における各構成部材の挙動および導入プレストレスの経時変化の把握が重要な問題となる。

本稿は、P B S工法における合成構造柱体の実験結果を整理し、設計法についてとりまとめたものである。

2. 合成構造柱体の応力状態

本合成構造柱体の構造を図-1に示す。本構造では、プレキャストブロック、中詰めコンクリートおよび鋼管の三者が一体となって働くように鋼管杭の外周にリブを付けて中詰めコンクリートとの一体化を図り、さらにプレキャストブロックの内面には、中詰めコンクリートとの付着効果を増すために凹凸をつけた構造となっている。また、プレキャストブロック間には水中硬化型の接着剤を塗布しているため、コンクリートと同程度の引張強度を有している。従って、本合成構造の柱体は、プレキャストブロック、中詰めコンクリートおよび鋼管が一体となって挙動するものと考えられる。

(1) 外力作用下における各構成部材の挙動

本合成構造は、主引張材としての鋼管およびP C鋼棒と主圧縮材としてのプレキャストブロックおよび中詰めコンクリートにより構成されている。

本合成構造の各構成部材の挙動を把握する場合、鋼管とP C鋼棒を鉄筋代替の引張鋼材と考えプレキャストブロックと中詰めコンクリートが一体の圧縮部材として算定可能であると仮定し検討を行う。

コンクリート構造に荷重を载荷していくと、破壊に至るまでに以下のような性状を示す。

- ・第Ⅰ段階：曲げひびわれ発生以前の状態。
- ・第Ⅱ段階：通常の使用状態であり、曲げひびわれが発生している状態。
- ・第Ⅲ段階：最終段階であり、引張鋼材のひずみがその降伏ひずみに達すると始まり、破壊に至る状態。

a) 第Ⅰ段階

曲げによるコンクリートの最大引張応力度がコンクリートの曲げ強度以下の範囲ではひびわれは発生せず、全断面が有効な部材として挙動する。第Ⅰ段階では鋼材の影響は小さく、コンクリートの応力度は式(1)で表すことができる。

$$\sigma_c = \frac{N}{A_g} \pm \frac{M}{I_g} \cdot x \quad (1)$$

ここに、N、M：柱体に作用する軸力、曲げモーメント

A_g、I_g：柱体の全断面積、全断面の断面二次モーメント

$$A_g = A_c + n A_s, \quad I_g = I_c + n I_s$$

n：ヤング係数比 $n = E_s / E_c$

x：コンクリートの圧縮縁から中立軸までの距離

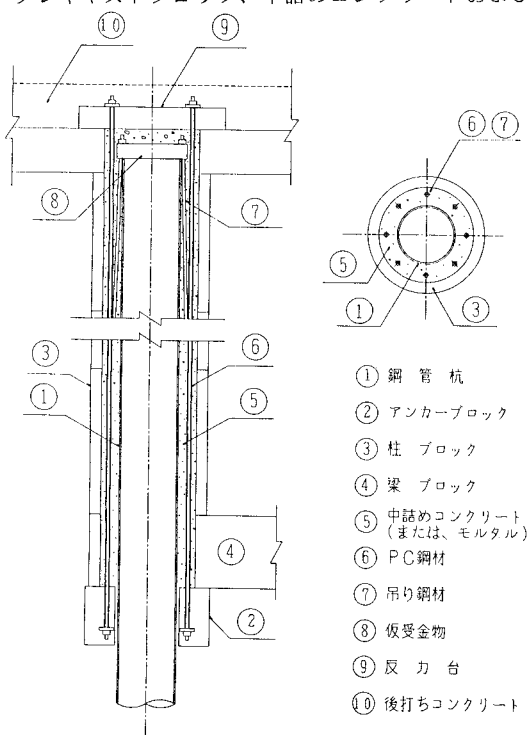


図-1 合成構造柱体の断面図

b) 第Ⅱ段階

コンクリートの引張応力度が曲げ強度を超えると曲げひびわれが発生し、コンクリートは引張力に対してほとんど抵抗しなくなる。その引張力は鋼材に伝えられ、鋼材のひずみは著しく増加する。

本合成構造柱体の各構成部材の受け持つ断面力は、外力と内力の釣り合いより式(2)、(3)で表される。

$$N = (N_{c1} - N_{c2}) + N_s \quad (2)$$

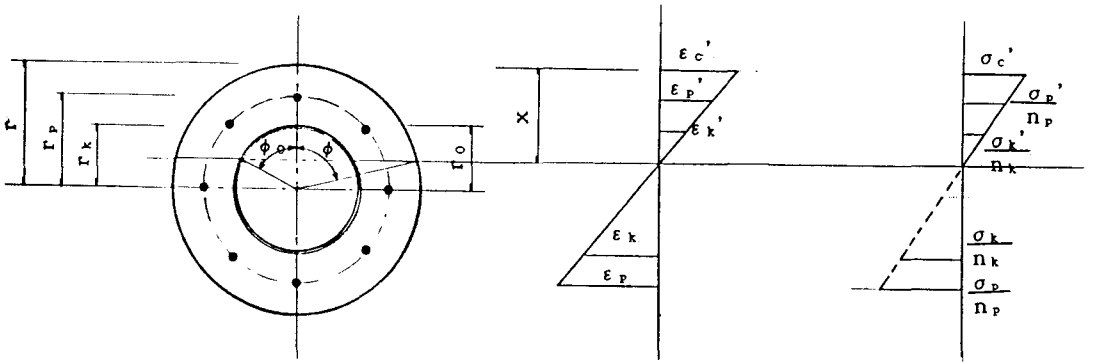
$$M = (M_{c1} - M_{c2}) + M_s \quad (3)$$

ここに、 N_{c1} , M_{c1} : 中実円形断面コンクリートの受け持つ断面力

N_{c2} , M_{c2} : コンクリート中空部の受け持つ断面力

N_s , M_s : 鋼材(鋼管、PC鋼棒)の受け持つ断面力

第Ⅱ段階における各断面力は式(4)～式(9)で表される。



$$N_{c1} = \frac{2r^2\sigma_c'}{1-\cos\phi} \left\{ \frac{\sin^3\phi}{3} - \frac{\cos\phi}{4} (2\phi - \sin 2\phi) \right\} \quad (4)$$

$$N_{c2} = \begin{cases} 0 & (0 < x < r-r_0) \\ \frac{2r_0^2\sigma_c'}{r(1-\cos\phi)} \left\{ \frac{r_0\sin^3\phi_0}{3} - \frac{r\cos\phi}{4} (2\phi_0 - \sin 2\phi_0) \right\} & (r-r_0 \leq x \leq r+r_0) \\ -\frac{\cos\phi}{1-\cos\phi} \pi r_0^2\sigma_c' & (r+r_0 < x < 2r) \end{cases} \quad (5)$$

$$N_s = -\frac{\cos\phi}{1-\cos\phi} \sigma_c' (n_k A_k + n_p A_p) \quad (6)$$

$$M_{c1} = \frac{2r^3\sigma_c'}{1-\cos\phi} \left\{ \frac{1}{8} \left(\phi - \frac{\sin 4\phi}{4} \right) - \frac{\cos\phi \cdot \sin^3\phi}{3} \right\} \quad (7)$$

$$M_{c2} = \begin{cases} 0 & (0 < x < r-r_0) \\ \frac{2r_0^3\sigma_c'}{r(1-\cos\phi)} \left\{ \frac{r_0}{8} \left(\phi_0 - \frac{\sin 4\phi_0}{4} \right) - \frac{r\cos\phi \cdot \sin^3\phi_0}{3} \right\} & (r-r_0 \leq x \leq r+r_0) \\ \frac{\pi r_0^4\sigma_c'}{4r(1-\cos\phi)} & (r+r_0 < x < 2r) \end{cases} \quad (8)$$

$$M_s = \frac{\sigma_c'}{2r(1-\cos\phi)} (n_k \Lambda_k r_k^2 + n_p \Lambda_p r_p^2) \quad (9)$$

ここに、 σ_c' : コンクリート圧縮縁の応力度

r : コンクリートの外半径

r_o : コンクリートの内半径

r_k : 鋼管中心の半径

r_p : PC鋼棒中心の半径

Λ_k : 鋼管の断面積

Λ_p : PC鋼棒の断面積

ϕ : $\cos^{-1} [(r-x)/r]$

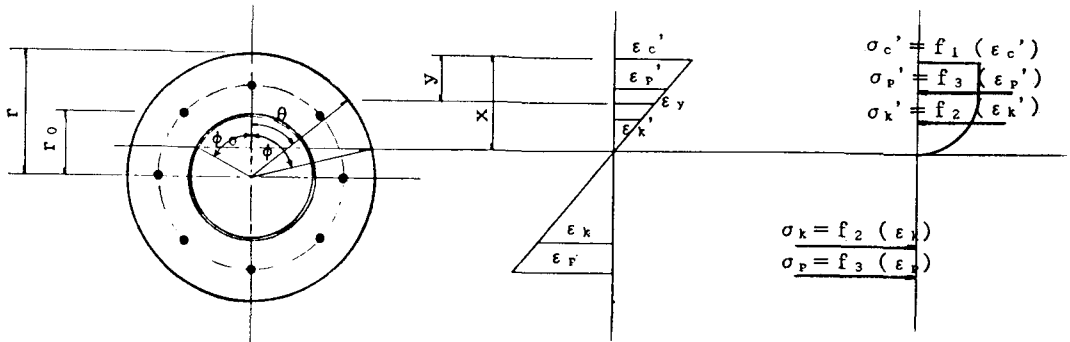
ϕ_o : $\cos^{-1} [(r-x)/r_o]$

x : コンクリート圧縮縁から中立軸までの距離

c) 第三段階

引張鋼材が降伏ひずみに達すると第三段階になり、ひずみと応力の比例関係はなくなる。ただし、この段階においても外力と内力の釣り合い式(2)、(3)は満足している。変形が進むと中立軸はさらに圧縮側に移動し、圧縮力を受けているコンクリート断面積は減少するが、その合力は式(2)を満足しているので一定である。圧縮力の合力の中心が最も圧縮縁に近づいたとき、コンクリートの圧縮縁ひずみが破壊ひずみ ϵ_u' に達し、最大抵抗モーメントとなる。

第三段階において、応力-ひずみ関係を $\sigma_c' = f_1(\epsilon_c')$ 、 $\sigma_k = f_2(\epsilon_k)$ 、 $\sigma_p = f_3(\epsilon_p)$ とすると、各断面力は式(10)～式(15)で表わされる。



$$N_{c1} = 2r^2 \int_0^\phi f_1(\epsilon_y) \sin^2 \theta \, d\theta \quad (10)$$

$$N_{c2} = \begin{cases} 0 & (0 < x < r - r_o) \\ -2r_o^2 \int_0^{\phi_o} f_1(\epsilon_y) \sin^2 \theta \, d\theta & (r - r_o \leq x \leq r + r_o) \\ -2r_o^2 \int_0^\pi f_1(\epsilon_y) \sin^2 \theta \, d\theta & (r + r_o < x < 2r) \end{cases} \quad (11)$$

$$N_s = \frac{\Lambda_k}{\pi} \int_0^\pi f_2(\epsilon_y) \, d\theta + \frac{\Lambda_p}{\pi} \int_0^\pi f_3(\epsilon_y) \, d\theta \quad (12)$$

$$M_{c1} = 2 r^3 \int_0^{\phi} f_1(\varepsilon_y) \sin^2 \theta \cos \theta d\theta \quad (13)$$

$$M_{c2} = \begin{cases} 0 & (0 < x < r - r_0) \\ 2 r_0^3 \int_0^{\phi} f_1(\varepsilon_y) \sin^2 \theta \cos \theta d\theta & (r - r_0 \leq x \leq r + r_0) \\ 2 r_0^3 \int_0^{\pi} f_1(\varepsilon_y) \sin^2 \theta \cos \theta d\theta & (r + r_0 < x < 2r) \end{cases} \quad (14)$$

$$M_s = \frac{A_k r_k}{\pi} \int_0^{\pi} f_2(\varepsilon_y) d\theta + \frac{A_p r_p}{\pi} \int_0^{\pi} f_3(\varepsilon_y) d\theta \quad (15)$$

$$\text{ここに、} \quad \varepsilon_y = \frac{\cos \theta - \cos \phi}{1 - \cos \phi} \varepsilon_c,$$

(2) 合成構造におけるプレストレスの経時変化

a) 合成構造における有効プレストレス

プレストレス力は、一般に式(16)によって算出される。¹⁾

$$P(x) = P_i - [\Delta P_i(x) + \Delta P_t(x)] \quad (16)$$

ここに、 $P(x)$: 考慮している設計断面におけるプレストレス力

P_i : 緊張材端に与えた引張力によるプレストレッシング中のプレストレス力

$\Delta P_i(x)$: プレストレッシング直後に生じるプレストレス力の損失

$\Delta P_t(x)$: プレストレス力の経時損失

式(16)において、 $\Delta P_t(x)$ はプレストレス力の経時損失であり、一般にコンクリートの乾燥収縮およびクリープによる減少量と、PC鋼材の見掛けのリラクセーションによる減少量の和として求められる。

これに対して、鋼材とコンクリートとの合成構造ではコンクリートが鋼材に拘束されて自由にクリープおよび乾燥収縮することが出来ず、クリープひずみおよび乾燥収縮ひずみは鋼材のない場合に比べ小さくなり、コンクリートには引張応力(変化応力度)が生じる。従って、合成構造の有効プレストレスを算定する場合には、式(16)におけるプレストレス力の損失の他に鋼材の拘束により生じる変化応力度を考慮する必要がある。

b) 変化応力度

プレストレストコンクリート構造を含む鋼・コンクリート合成構造の乾燥収縮・クリープ解析に関しては、橋梁における合成桁の発展とともに数多くの解法が提案され実用に供されてきた。本合成構造においては、合成桁の解法のうち、代表的なChichokiによる解法を展開して変化応力度の検討を行う。

Chichokiは、応力度が変化する場合の応力度とひずみの関係を表わす式(17)において、 $t = t$ におけるクリープ係数(Φ_t)およびコンクリートの応力度(σ_t)をそれぞれ式(18)、(19)で表わし、式(17)を直接積分する解法を示している。²⁾

$$\frac{d\varepsilon_t}{dt} = \frac{1}{E_c} \left(\sigma_t \cdot \frac{d\Phi_t}{dt} + \frac{d\sigma_t}{dt} \right) \quad (17)$$

$$\Phi_t = \Phi_{\infty} \cdot (1 - e^{-kt}) \quad (18)$$

$$\sigma_t = \sigma_0 + (\sigma_{\infty} - \sigma_0) \cdot \frac{\Phi_t}{\Phi_{\infty}} = \sigma_0 + \Delta\sigma_{\infty} \cdot (1 - e^{-kt}) \quad (19)$$

式(18)、(19)を式(17)に代入して積分すると、 $t = 0 \sim t$ までに変化したひずみ($\Delta\varepsilon$)は式(20)

として表される。

$$\Delta \varepsilon = \frac{1}{E_c} \left[\sigma_0 \cdot \Phi_t + \Delta \sigma_t \cdot \left(1 + \frac{\Phi_t}{2} \right) \right] \quad (20)$$

従って、 $t = 0$ から $t = t$ までに変化するコンクリートの応力度は式 (21) で表すことができる。

$$\Delta \sigma_t = \frac{2}{2 + \Phi_t} \cdot E_c \cdot \Delta \varepsilon - \frac{2 \Phi_t}{2 + \Phi_t} \cdot \sigma_0 \quad (21)$$

本構造はコンクリートと鋼材（鋼管および P C 鋼棒）により構成されており、 $t = 0$ から $t = t$ までに変化するひずみを $\Delta \varepsilon_c$ とすればコンクリートと鋼材の変化応力度は以下ようになる。

$$\Delta \sigma_{cct} = \frac{2}{2 + \Phi_t} \cdot E_c \cdot \Delta \varepsilon_c - \frac{2 \Phi_t}{2 + \Phi_t} \cdot \sigma_0 \quad (22)$$

$$\Delta \sigma_{st} = E_s \cdot \Delta \varepsilon_c \quad (23)$$

なお、クリープによる変化応力度は内部応力であるので、 $\Delta \varepsilon_c$ によるコンクリートおよび鋼材の変化応力度に対し、 $\int_A \Delta \sigma dA = 0$ の関係が成り立つ。

従って、 $\Delta \varepsilon_c$ は式 (24) で表される。

$$\Delta \varepsilon_c = \frac{1}{E_s \cdot A_s + \frac{2}{2 + \Phi_t} \cdot E_c \cdot A_c} \cdot \frac{2 \Phi_t}{2 + \Phi_t} \cdot \sigma_0 \cdot A_c \quad (24)$$

乾燥収縮においてもクリープと同様に考えると、 $t = 0$ から $t = t$ までに変化したひずみは次のようになる。

$$\Delta \varepsilon_s = \varepsilon_{st} + \frac{\Delta \sigma_{cs}}{E_c} \cdot \left(1 + \frac{\Phi_{st}}{2} \right) \quad (25)$$

$$\varepsilon_{st} = \varepsilon_{s\infty} \cdot (1 - e^{-kt}) \quad (26)$$

また、変化応力度は式 (27) で表される。

$$\Delta \sigma_{cst} = (\Delta \varepsilon_s - \varepsilon_{st}) \cdot \frac{2}{2 + \Phi_{st}} \cdot E_c \quad (27)$$

ここに、

$$\Delta \varepsilon_s = \frac{1}{E_s \cdot A_s + \frac{2}{2 + \Phi_{st}} \cdot E_c \cdot A_c} \cdot \frac{2}{2 + \Phi_{st}} \cdot \varepsilon_{st} \cdot E_c \cdot A_c \quad (28)$$

3. 実験による検証

本合成構造柱体の外力作用時の挙動および導入プレストレスの経時変化を把握する目的で 2 シリーズの実験を行い、その結果をもとに、各構成部材が一体となって挙動すると仮定して導いた理論計算式に対する妥当性の確認を行なった。

(1) 外力作用下における柱体の挙動³⁾

a) 実験の概要

試験体は本構造によるプレキャストブロック構造（P-B）と本構造の挙動を評価する目的の一体打ち構造（P-1）の2体とした。なお、P-Bはブロックを9分割し、実施工と同様の手順で作製した。荷重は試験体中央での一点荷重とし、荷重方法は正負交番荷重による繰り返し加力方式とした。

図-2に試験体の概要を示す。

b）実験結果

①弾性範囲内における荷重位置での変位量

弾性範囲内における荷重と荷重位置での変位の関係を図-3に示す。変位量の計算には、ひびわれ発生までは全断面有効とした断面二次モーメントを使用し、ひびわれ発生後については、土木学会；コンクリート標準示方書（以下、示方書と言う）に準じてひびわれによる剛性低下を考慮した換算断面二次モーメントを使用した。

ひびわれ発生までの荷重と変位量の関係は一定勾配で推移しているが、ひびわれ発生後は剛性が低下していくため荷重の増加とともに勾配は緩やかになっていく。ひびわれ発生までの変位量の測定値は、両試験体とも弾性理論による計算値とよく一致しており、その差はP-1で約1%（0.01mm）、P-Bで約5%（0.04mm）であった。ひびわれ発生後においても換算断面二次モーメントを使用した計算値は測定値とよく一致しており、その差は両試験体とも最大で8%程度（0.2mm）であった。

このことにより、P-1、P-Bとも合成構造として、鋼管とコンクリートが一体となって挙動していることが解る。

②ひびわれ発生後のひずみ分布

図-4にひびわれ発生後における断面の代表的なひずみ分布を示す。各測点におけるひずみ分布は、P-1、P-Bとも同程度であり、PC鋼材と鋼管を有効な引張材として評価した式（4）～式（9）による計算値とよく一致している。このことは、PC鋼棒および鋼管とコンクリートとの付着状況が良好であることを示している。

③終局強度

図-5に荷重・変位の包絡線を示す。図-5からも解るように、P-1、P-Bの荷重と変位の関係に大きな差はみられないが、P-Bの変位量が若干大きくなっている。本試験体における終局強度の計算値は $P_u = 141\text{tf}$ であった。これに対して測定値は、P-1で

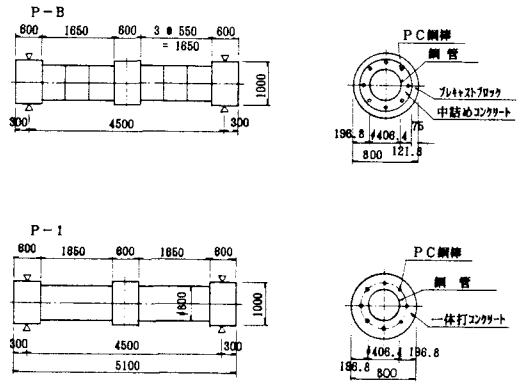


図-2 試験体の概要

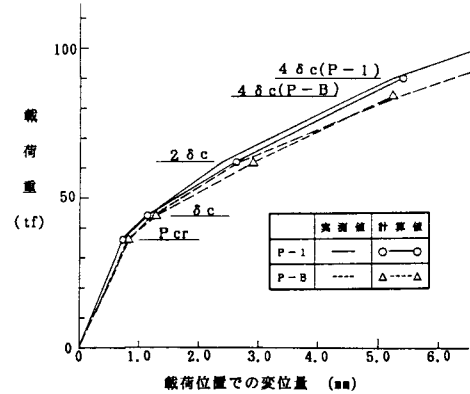


図-3 弾性範囲内における荷重・変位図

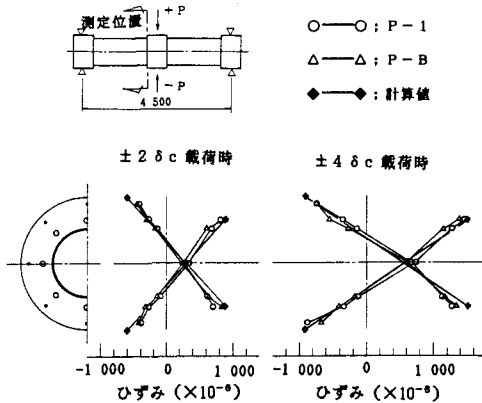


図-4 ひびわれ発生後のひずみ分布

153.2tfであり計算値より9%程度大きな耐力を有していた。P-Bは137.4tfであり、計算値より3%程度小さくなったもののP-C鋼棒および鋼管を有効な引張材として評価した計算結果とほぼ一致した。従って、本構造においては破壊時まで鋼管およびP-C鋼棒とコンクリートの付着が充分に有り、一体となって挙動していることが解る。

④まとめ

本合成構造柱体の加力実験に対する解析結果をまとめると次のようになる。

- ④-1 弾性範囲内における変位量は理論計算値とよく一致しており、柱体のプレキャストブロック、中詰めコンクリートおよび鋼管が一体となって挙動していることが解る。
- ④-2 弾性範囲内のひずみ分布および終局強度は、"2. (1) 外力作用下における各構成部材の挙動"に示したコンクリートおよび鋼管が一体となって挙動すると仮定した計算式とよく一致しており、本提案式により柱体の応力状態を把握できることが確認できた。
- ④-3 ブロック構造は水中硬化型接着剤の使用により接合部が弱点とはならず、一体構造と同等の耐力を有している。

(2) プレストレスの経時変化⁴⁾

a) 実験の概要

試験体は自由乾燥収縮ひずみ、自由クリープひずみ、拘束乾燥収縮ひずみおよび拘束クリープひずみを測定する目的で15体作製した。

また、養生方法(水中、気中)、製作方法(ブロック構造、一体構造)、鋼材比(0、2.1%、4.3%)、およびプレストレスの導入力(0、40Kg_f/cm²、80Kg_f/cm²)等を試験体のパラメータとした。図-6に代表的な試験体の形状を示す。ブロック構造は9分割したプレキャストブロック間にエポキシ樹脂を塗布し一体化した後、中詰めコンクリートを打設した。

プレストレスの導入はブロック構造試験体ではプレキャストブロック打設後61日目、一体構造試験体はコンクリート打設後19日目に行なった。また、水中養生の試験体はプレストレス導入から3日目に浸漬した。

表-1に試験体の作製から加力実験までの経過を示す。

なお、気中養生は屋内で行い、平均気温は約22℃、平均湿度は約60%であった。

b) 実験結果

①試験体の経時変化

試験体に取り付けたひずみゲージの測定結果および測定値を指数関数で表わした実験曲線を図-7～図-10に示

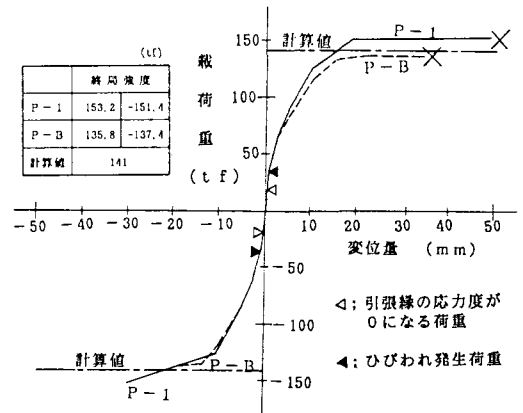


図-5 荷重・変位の包絡線

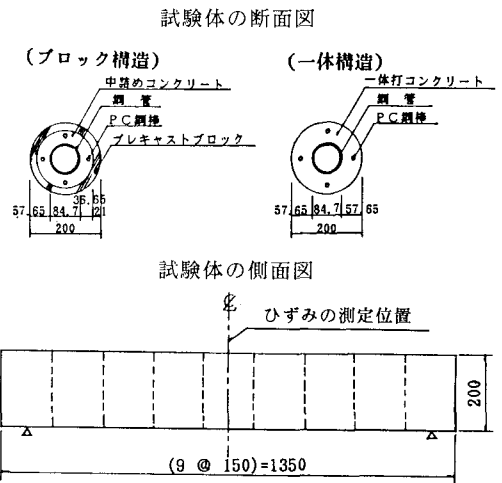


図-6 試験体の形状(単位:mm)

表-1 試験体の経過

0日	・プレキャストブロックコンクリート打設(気中養生)
42日	・中詰めコンクリート打設 ・一体構造コンクリート打設
61日	・プレストレス導入
64日	・水中養生開始(試験体①、④、⑦、⑩) ・クリープおよび乾燥収縮ひずみの測定開始
780日	・試験体の加力実験(残留プレストレス量の確認実験)

す。図-7および図-8において、拘束乾燥収縮ひずみに対する計算値は、式

(28) のうち同式に自由乾燥収縮ひずみ ε_{st} を代入し、測定値との比較を行なって推定したクリープ係数を示す。同様に、図-9および図-10における計算値は式 (24) により推定したクリープ係数を示す。試験体のひずみの測定は約500日間行なったが、ブロック構造の拘束乾燥収縮ひずみについては計器の故障により130日間で計測を終えた。

なお、拘束クリープひずみの測定値は、鋼管を有しプレストレスを与えた試験体のひずみから、鋼管を有しプレストレスを与えていない試験体のひずみを差し引いた値である。

表-2に実験曲線より得られた乾燥収縮ひずみとクリープ係数を示す。表-2のクリープの測定値のうち()内は実験曲線による拘束クリープひずみ (ε_{cc}') と同量の自由クリープひずみが生じたと仮定して求めた見掛けの自由クリープ係数である ($\phi' = \varepsilon_{cc}' \times E_c / \sigma_0$)。

また、比較のために示方書に準じて算定した乾燥収縮ひずみ、クリープ係数を併記する。なお、クリープ係数は遅れ弾性成分を含んだ値である。

自由乾燥収縮ひずみは時間的にバラツキはあるものの比較的よく指数関数で表現することができている。合成構造における乾燥収縮ひずみは鋼材の拘束により自由な収縮を妨げられる。図-7および図-8によると拘束乾燥収縮ひずみは、自由乾燥収縮ひずみの約2/3程度であり鋼材により拘束を受けていることが解る。

合成構造における拘束クリープひずみは、導入プレストレスによる圧縮クリープひずみ、拘束により生じる引張応力の弾性ひずみおよび引張クリープひずみの和で表わされる。従って、従来の圧縮力に対するクリープ係数とは若干異なってくる。測定値の拘束クリープ係数は示方

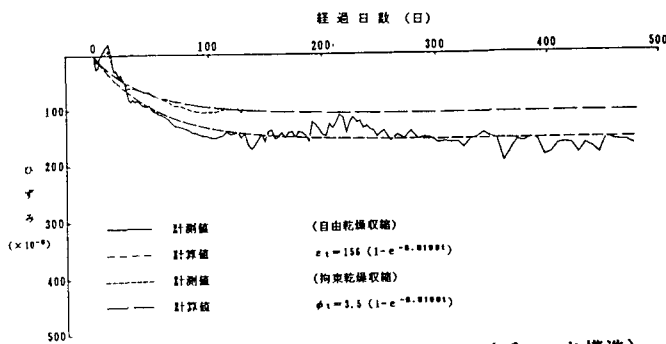


図-7 乾燥収縮ひずみの経時変化 (ブロック構造)

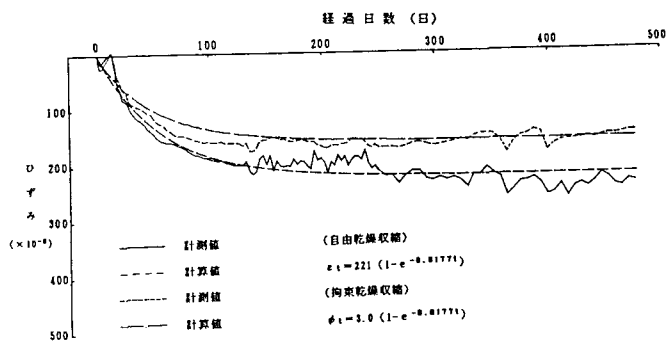


図-8 乾燥収縮ひずみの経時変化 (一体構造)

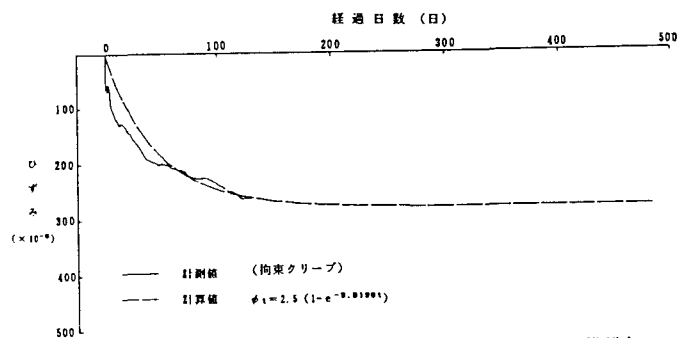


図-9 クリープひずみの経時変化 (ブロック構造)

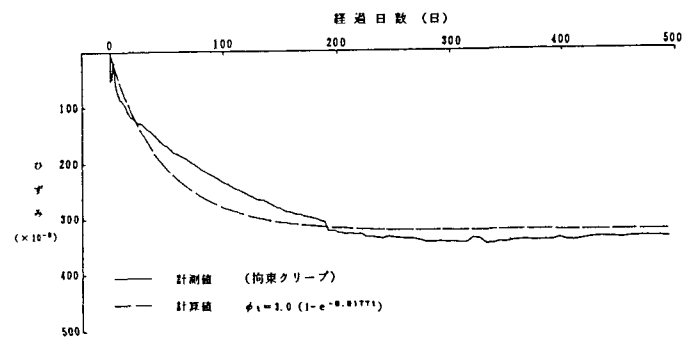


図-10 クリープひずみの経時変化 (一体構造)

書の自由クリープ係数の約1.2倍と大きくなっているが、拘束クリープひずみ量（見掛けの自由クリープ係数 $\Phi=2.11, 1.83$ ）は表－2 乾燥収縮ひずみとクリープ係数示方書の自由クリープひずみ量（クリープ係数 $\Phi=2.42, 2.02$ ）の90％程度であり、若干小さくなっている。合成構造のクリープひずみは鋼材により拘束されるため自由クリープひずみより小さくなる。従って、測定値には鋼材の拘束による影響があらわれているものと考えられる。

②導入プレストレスの応力損失

”①試験体の経時変化”により求めたひずみおよび示方書に準じて求めたクリープ係数、乾燥収縮ひずみを使用して算定した損失応力度と加力実験の結果を表－3に示す。水中養生の試験体については実験データがないため、示方書の値のみを示す。このとき、乾燥収縮ひずみは0（ゼロ）とした。

試験体の加力実験結果は、多少のバラツキはあるものの測定値から求めた残留応力および示方書に定める値を使用した残留応力と比較的よく一致していた。

クリープによる拘束損失応力（ $\Delta\sigma 1$ ）はクリープ係数の大きさの影響を直接受ける。従って、一体構造、ブロック構造とも測定値を使用した損失応力の計算値は、示方書の値を使った場合より大きくなる。

これに対して、乾燥収縮による拘束損失応力（ $\Delta\sigma 2$ ）は自由乾燥収縮ひずみの大きさとともにクリープ係数の大きさにも影響を受ける。従って、乾燥収縮による損失応力を求めるときは、自由乾燥収縮ひずみ量とともにクリープ係数も重要な要素となる。

水中養生の試験体ではクリープ係数が小さく応力損失も少ない。なお、示方書の値を用いた計算値は加力実験結果とよく一致していた。

表－3に示すように、示方書および試験体のひずみの経時変化より求めた乾燥収縮ひずみとクリープ係数を使用した残留応力の計算結果は、加力実験結果と比較的よく一致しており、式（22）および式（27）による計算方法は、本構造の拘束損失応力を計算する上で妥当な方法であると言える。

③まとめ

本合成構造柱体のクリープひずみおよび乾燥収縮ひずみの測定値を使用した残留応力と加力実験結果をまとめると次のようになる。

③－1 本合成構造のクリープおよび乾燥収縮による拘束損失応力は、Chichokiの解法にもとづく計算式により比較的簡単に算定できる。

③－2 水中養生における本合成構造の損失応力を算定する場合、乾燥収縮ひずみを0（ゼロ）として解析して良いと考えられる。

表－2 乾燥収縮ひずみとクリープ係数

		測定値		示方書（ $w=60\%$ ）	
		Φ	ϵ	Φ	ϵ
乾燥収縮	一体構造	3.0	221×10^{-4}	2.42	190×10^{-4}
	ブロック構造	3.5	156×10^{-4}	2.02	150×10^{-4}
クリープ	一体構造	3.0(2.11)	—	2.42	—
	ブロック構造	2.5(1.83)	—	2.02	—

表－3 計算値と加力実験結果の比較（ kgf/cm^2 ）

試験体	導入 応力	損失応力			残留 応力	加力実 験結果	備考			
		$\Delta\sigma 1$	$\Delta\sigma 2$	$\Delta\sigma 3$			構造	養生	As/Ac	リブ
⑩	38.7	(4.2)	(0)	(1.7)	(32.8)	33.5	ブロック	水中	2.1%	無し
⑪	38.8	11.6 (9.4)	5.9 (6.4)	6.2 (5.6)	15.1 (17.4)	17.5	ブロック	気中	2.1%	無し
⑫	40.1	14.3 (11.7)	8.9 (8.0)	7.8 (6.9)	9.1 (13.5)	16.8	一体	気中	2.1%	無し
⑬	39.1	11.7 (9.5)	5.9 (6.4)	6.3 (5.8)	15.2 (17.4)	17.5	ブロック	気中	2.1%	有り
⑭	38.2	14.1 (11.4)	8.1 (9.1)	4.8 (4.5)	11.2 (13.2)	9.6	ブロック	気中	4.3%	無し
⑮	77.4	23.2 (18.8)	5.9 (6.4)	11.5 (10.3)	36.8 (41.9)	37.2	ブロック	気中	2.1%	無し

注）（ ）内は示方書の値による計算値
 $\Delta\sigma 1$ ：クリープによる拘束損失応力（変化応力度）
 $\Delta\sigma 2$ ：乾燥収縮による拘束損失応力（変化応力度）
 $\Delta\sigma 3$ ：P C鋼棒の引張力の減少による損失応力

4. 本合成構造柱体の設計法に対する提案

本合成構造柱体はプレストレスが導入されているので、設計にあたってはまず有効プレストレス量を算定し、その後、作用断面力に対して応力の検討を行う。

(1) 有効プレストレスの算定

有効プレストレスは以下のような手順で算定する。

- a) 緊張端に与えたプレストレス力から摩擦などの影響を考慮して、プレストレッシング直後のプレストレス力を算定する。
- b) 式(22)および式(27)により、鋼材(鋼管およびP C鋼棒)の拘束による変化応力度(拘束損失応力)を算定する。なお、水中養生に関しては乾燥収縮ひずみを0(ゼロ)としてよい。
- c) 式(24)より求めたクリープひずみに対するクリープ係数、式(28)より求めた乾燥収縮ひずみおよびP C鋼棒のリラクセーションに対して、P C鋼棒の引張力の減少による損失応力を求める。
- d) プレストレッシング直後のプレストレスから拘束損失応力およびP C鋼棒の引張力の減少による損失応力を減じて有効プレストレスを求める。

(2) 断面力の検討

プレストレストコンクリート構造物の使用限界状態に対する検討は、部材の機能や使用目的に応じて、次のa)～c)に示す曲げひびわれ限界状態のいずれかを選定する。¹⁾

- a) 引張応力発生限界状態
- b) 曲げひびわれ発生限界状態
- c) 曲げひびわれ幅限界状態

a) およびb)の状態については、第Ⅰ段階として各構成部材の応力状態を把握することができる。ただし、b)の状態では引張応力度が生じるコンクリート部分に引張鋼材量を計算して配置する必要がある。¹⁾

引張鋼材の算出方法としては、コンクリートの全断面を有効としてコンクリートに生じている全引張力に相当する引張鋼材を配置する方法とコンクリートの引張応力を無視して計算する方法がある。本構造は図-1に示すように外周部がプレキャストブロックであるため、コンクリートの引張縁から有効な引張鋼材(P C鋼棒および鋼管)までの距離が大きいので、b)の状態では引張応力度が生じるコンクリート部分に引張鋼材が存在しない可能性が大きい。よって、引張鋼材の算出方法はコンクリートの引張応力を無視した第Ⅱ段階として断面力の検討を行なう。

c)の状態においては既にコンクリートにひびわれが発生しているので、第Ⅱ段階として各構成部材の応力状態を把握することができる。なお、ひびわれ幅については、示方書の式により概略値を推定できることを確認している。³⁾

最大耐力は、第Ⅲ段階においてコンクリートの圧縮ひずみが ϵ_{cu}' に達するときのモーメントとして算定できる。

5. おわりに

本合成構造の柱体は、プレキャストブロック、中詰めコンクリートおよびリブ付き鋼管により構成された断面にP C鋼棒でプレストレスを導入した特殊な構造となっている。鋼材とコンクリートの合成構造では鋼材によりコンクリートのクリープひずみや乾燥収縮ひずみが拘束され引張応力度(変化応力度)が発生する。

実験による検証の結果、鋼管による拘束の影響を式(22)～式(28)で考慮すれば、本合成構造柱体は一般の鉄筋コンクリート構造物と同様に応力状態が把握でき、設計できることが確認された。

参 考 文 献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書，平成3年9月
- 2) 橋 善雄：連続合成桁橋，理工図書，1966
- 3) 栗原安男・跡部俊郎・能町純雄：プレストレスを導入したプレキャストブロックと鋼管との合成構造に関する力学特性の研究，コンクリート工学論文集，Vol.2, No.1, 1991.1
- 4) 栗原安男・跡部俊郎・米倉宏行・能町純雄：プレストレスを導入した合成構造の乾燥収縮・クリープによる応力変化の研究，コンクリート工学論文集，Vol.2, No.2, 1991.7

(1992年9月21日受付)