

## 論文

## [2193] プレストレスト鋼板・コンクリート合成版の2方向クリープ挙動

新西成男\*1・太田俊昭\*2・日野伸一\*3・河野伸征\*4

## 1. はじめに

近年、既設道路橋における鉄筋コンクリート床版の損傷に伴い、床版死荷重の軽減や現場施工の省力化などの必要性が考慮され、型枠兼用の薄鋼板上にコンクリートを打設、一体化した鋼板・コンクリート合成版の有用性が認識されるようになった。この鋼板・コンクリート合成版は、施工性及び構造上の種々の利点から、橋梁および建築構造物などに広く利用され、また最近では、海洋構造物などへの適用も試みられている。しかし、この種の合成版は、設計上、ひび割れを許容するRC構造であるためコンクリートのひび割れ発生に伴う剛性の低下、鋼板内面の腐食による耐久性の劣化などに問題を残している。一方、構造物の長大化とプレストレス化が進む中、より軽量で高強度、高剛性を有する合成構造部材などの新しい構造材の開発も切望されている。

このような背景をもとに、本研究は、型枠と引張鋼材を兼ねる鋼板をさらに2方向緊張材としても活用することにより、鋼板・コンクリート合成版のプレストレス化を試みるものである。著者らは、先にプレストレスト合成版の製作用2方向緊張装置の概要と、1方向にプレストレスを導入した合成版供試体による実験および解析的研究について報告した[1]。本論文は、2方向にプレストレスが導入された鋼板・コンクリート合成版のクリープ性状を明らかにすることを目的として、2方向プレストレス導入・クリープ試験と1方向クリープ解析法を拡張適用した2方向クリープ解析を行い、それらの結果について検討したものである。

## 2. 合成版の2方向クリープ解析

## 2.1 クリープ解析の概要

本解析に用いたTroostの方法は、他の方法と異なりコンクリートの材令と載荷時材令の関数として表されるリラクセーション係数を導入している点に大きな特徴を有している[2]。Troostの式は一般に、単軸応力を受けるコンクリートのクリープ性状を評価する際に用いられている。Fukrによれば、2方向応力を受けるコンクリートのクリープ性状は、1方向のクリープ性状と実質的に同じであるという実験結果が報告されている[3]。したがって、本研究では、各方向のクリープが独立的に進行するとの仮定を採用して、Troostの方法を2方向クリープ解析に適用する。図-1には、2方向クリープ解析法のフローを示す。本解析は、ステップの初めに、実験値であるクリープ係数、乾燥収縮ひずみおよびコンクリート初期導入応力などのデータとともに予め算定しておいたリラクセーション係数を入力する。次いで、各々の方向においてクリープおよび乾燥収縮によるコンクリートの応力減少量をTroostの式を用いて平面応力状態下で解く。次のステップでは、プレストレス導入時の断面力は時間に対して不変であるという条件の下に、上記の操作を繰り返すという流れになっている。なお、本解析では底鋼板または鉄筋とコンクリートとの

\*1 九州大学大学院 工学研究科土木工学専攻、工修（正会員）

\*2 九州大学教授 工学部建設都市工学科、工博（正会員）

\*3 九州大学助教授 工学部建設都市工学科、工博（正会員）

\*4 九州大学大学院 工学研究科土木工学専攻、（正会員）

結合は完全であると仮定している。

### 2. 2 リラクゼーション係数の算定

リラクゼーション係数の算定法として多用されているD. Schadeの方法 [4] に従うと、係数は次式で与えられる。

$$\rho = -\frac{1}{\sum_{i=1}^n \Delta R_i} - \frac{1}{\phi(t_n, t_0)} \quad (1)$$

$$\text{ここに、} \Delta R_n = \frac{-\phi(t_n, t_0) - \sum_{i=1}^{n-1} \Delta R_i - \frac{1}{6} \sum_{i=1}^{n-1} \left\{ \phi(t_n, t_{i-1}) + 4\phi(t_n, \frac{t_i + t_{i-1}}{2}) + \phi(t_n, t_i) \right\} \Delta R_i}{1 + \frac{1}{6} \left\{ \phi(t_n, t_{n-1}) + 4\phi(t_n, \frac{t_n + t_{n-1}}{2}) \right\}}$$

$\phi(t_n, t_0)$  : 荷重時材令  $t_0$  の時刻  $t_n$  におけるクリープ係数

### 2. 3 2方向クリープによる応力減少量

Trostは、コンクリートのクリープ・乾燥収縮による変動応力下の任意時刻  $t$  における応力-ひずみ関係について次式を与えている。

$$\dot{\epsilon}_{k+s}(t) = \frac{\dot{\sigma}_{k+s}(t)}{E_\phi} + \frac{\sigma_{b0}}{E_\phi} \eta + \epsilon_s(t) \quad (2)$$

ここに、 $E_\phi = E_c / (1 + \rho\phi)$ 、 $\eta = \phi / (1 + \rho\phi)$

$\dot{\epsilon}_{k+s}(t)$  : 時刻  $t$  までのクリープ・乾燥収縮によるひずみ変化量

$\dot{\sigma}_{k+s}(t)$  : 時刻  $t$  までのクリープ・乾燥収縮による応力変化量

$\sigma_{b0}$  : 荷重時におけるコンクリート応力

$\epsilon_s(t)$  : 時刻  $t$  における乾燥収縮ひずみ

$E_c$  : コンクリートの弾性係数

$\rho$  : リラクゼーション係数

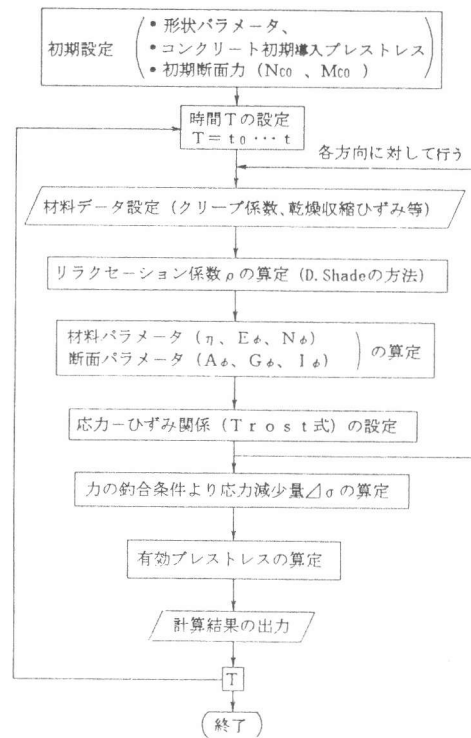


図-1 解析のフローチャート

2. 1における仮定のもとに式(2)を平面応力状態下の応力-ひずみ関係式に拡張すると次式を得る。

$$\{\dot{\sigma}_{k+s}(t)\} = [D_\phi] \{\dot{\epsilon}_{k+s}(t)\} - \eta \{\sigma_{b0}\} - [D_\phi] \{\epsilon_s(t)\} \quad (3)$$

$$\text{ここに、} [D_\phi] = \frac{E_\phi}{1 - \nu_c^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu_c \\ \nu_c & 1 \end{bmatrix}$$

$$\{\dot{\sigma}_{k+s}(t)\} = \begin{Bmatrix} \dot{\sigma}_{(k+s)x}(t) \\ \dot{\sigma}_{(k+s)y}(t) \end{Bmatrix}$$

$$\{\dot{\epsilon}_{k+s}(t)\} = \begin{Bmatrix} \dot{\epsilon}_{(k+s)x}(t) \\ \dot{\epsilon}_{(k+s)y}(t) \end{Bmatrix}$$

$$\{\sigma_{b0}\} = \begin{Bmatrix} \sigma_{b0x} \\ \sigma_{b0y} \end{Bmatrix}$$

$\nu_c$  : コンクリートのポアソン比

$x$  : 主軸方向の座標軸

$y$  : 主軸直角方向の座標軸

鋼材とコンクリートの間の付着が完全であると仮定すると、鋼材の応力変化度 $\{\dot{\sigma}_P\}$ は次式で得られる。

$$\{\dot{\sigma}_P\} = [D_P]\{\dot{\epsilon}_{k+s}\} = n_\phi [D_\phi]\{\dot{\epsilon}_{k+s}\} \quad (4)$$

ここに、 $n_\phi = E_P / E_\phi$

$E_P$  : 鋼材の弾性係数

### 3. 実験の概要

#### 3.1 プレストレス導入試験

本実験に用いた合成版供試体は、図-2に示すように、鋼板(SM490, 2700×1900×6mm)、主軸方向鉄筋(SD345, D25)、主軸直角方向鉄筋(SD295, D13)、スタッド(φ13, h=80mm)、端部アンカープレート(h=60mm, t=6mm, 脚長120mm)で構成されている。供試体は合計2体準備し、内1体には1方向(主軸方向)、1体には2方向(主軸方向および主軸直角方向)のプレストレス導入を行った。プレストレス導入手順は、先ず、鋼板および鉄筋に予め降伏点応力度以下の初期引張応力度を1方向および2方向に与え、コンクリート打設後材令7日目にこの緊張力を解放して、プレストレスを導入した。なお、使用したコンクリートの配合を表-1に示す。コンクリートには、乾燥収縮およびクリープを極力低減するため、市販の界面活性剤(以下、収縮低減剤と称する)を10kg/m<sup>3</sup>の配合で混入した[5]。コンクリートの材令7日および28日における圧縮強度はそれぞれ395kg/cm<sup>2</sup>、455kg/cm<sup>2</sup>である。

プレストレス導入直前・直後の鋼板および鉄筋の応力度を表-2に示す。また、版中

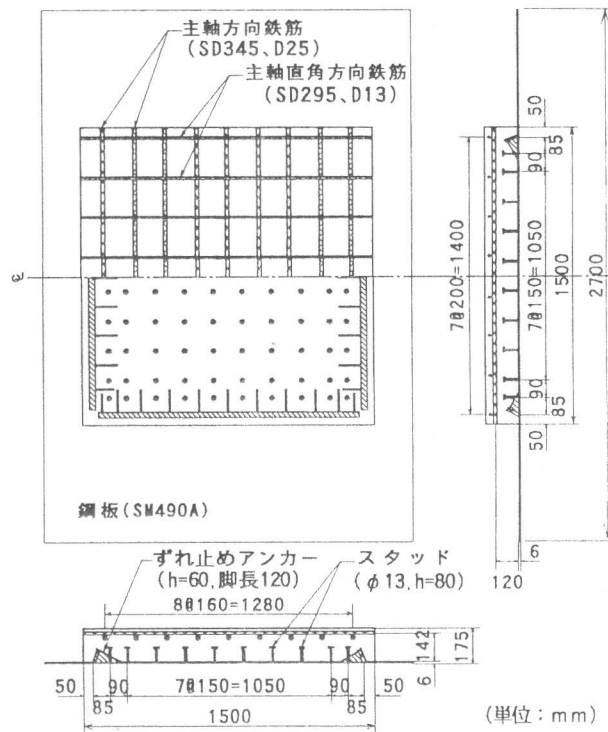


図-2 合成版供試体の断面諸元

表-1 コンクリートの配合

W/C (%)	S/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					
		水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	AE 減水剤	収縮低減剤
46.0	41.4	161	350	732	1088	0.875	10.0

中央下縁におけるコンクリートの導入直後プレストレスの計測値および計算値を表-3に示す。表中、計算値は、鋼板および鉄筋の導入直前の引張応力を合成断面に働く偏心軸力として弾性計算により算出された値である。これより、プレストレス導入直後のコンクリート下縁には、主軸方向では、計測値が計算値より幾分大きな240kg/cm<sup>2</sup>程度のプレストレス、逆に主軸直角方向においては、計算値よりやや低めの50kgf/cm<sup>2</sup>程度のプレストレスがそれぞれ導入されたものと考えられる。

### 3. 2 合成版のクリープ試験

プレストレス導入後、供試体を温度20±2℃、湿度60±10%の恒温恒湿室に移し、コンクリートおよび鋼材の経時的なひずみ変化を計測した。コンクリート中央下縁のひずみは埋め込み型ゲージを設置し、鋼材のひずみは電気抵抗線ひずみゲージを表面に貼付した後、コーティング処理して測定を行った。

### 4. クリープひずみと有効プレストレス

図-3は、各供試体について、プレストレス導入以後のコンクリート中央下縁のひずみの経時変化を示す。解析値は、コンクリートの初期圧縮応力度として表-3に示す応力を用い、Troostの式により推定した値である。なお、クリープ係数および乾燥収縮ひずみの値は、先に著者らが行った同一配合によるコンクリートの乾燥収縮およびクリープ係数試験の計測結果を引用した[5]。したがって、図-3および4において、解析値が必ずしもなめらかな変化を示していないのは、前述の材料データの計測結果を解析にそのまま用いたためによるものである。

図より、1方向、2方向の両供試体ともに、初期導入プレストレスの大きさに相関したクリープ挙動を示していること、プレストレス導入後230日を経過した後もクリープが進行していることなどがわかる。また、この種の実験結果には比較的ばらつきが大きいことを考慮しても、解析値は実験値を定量的にもよく追跡しているといえる。

図-4は、プレストレス導入以後のコンクリート中央下縁のプレストレスの経時変化を示す。ここで、実験値は、鋼板および鉄筋の経時的に変化する実測ひずみより算定したプレストレス量を示している。また、解析値は上記のTroostの式による推定値である。実験結果によれば、プレストレス導入後150日における主軸方向の有効プレストレスは、導入時に対し、1方向供試体で20%、2方向供試体で30%程度減少していると推定される。また、解析値と実験値を比較すれば、解析結果は定性的にはプレストレスの減少傾向をよく追跡できているものの、定量的にはやや過大に評価する傾向がみられる。これについては、有効プレストレスの実験値が当該時刻における鋼材ひずみより算定した値であること、また、実験データが少ないことなどから、今後さらに検討の余地があると考えられる。

表-2 プレストレス導入直前・直後の鋼板および鉄筋の応力度

	供試体の種類	鋼板		鉄筋	
		軸方向	軸直角方向	軸方向	軸直角方向
導入直前 (kgf/cm <sup>2</sup> )	1方向	2519	-280	2654	
	2方向	2390	496	2825	3150
導入直後 (kgf/cm <sup>2</sup> )	1方向	1431 (1365)	-177 (-328)	2347 (2552)	
	2方向	1250 (1025)	252 (-103)	2498 (2710)	3057 (3087)

( ) 内は計算値を示す

表-3 プレストレス導入直後の版中央部のプレストレス

	供試体の種類	計測値		計算値	
		軸方向	軸直角方向	軸方向	軸直角方向
導入 プレストレス <sub>2</sub> (kgf/cm <sup>2</sup> )	1方向	-241	3	-188	0
	2方向	-244	-46	-204	-78

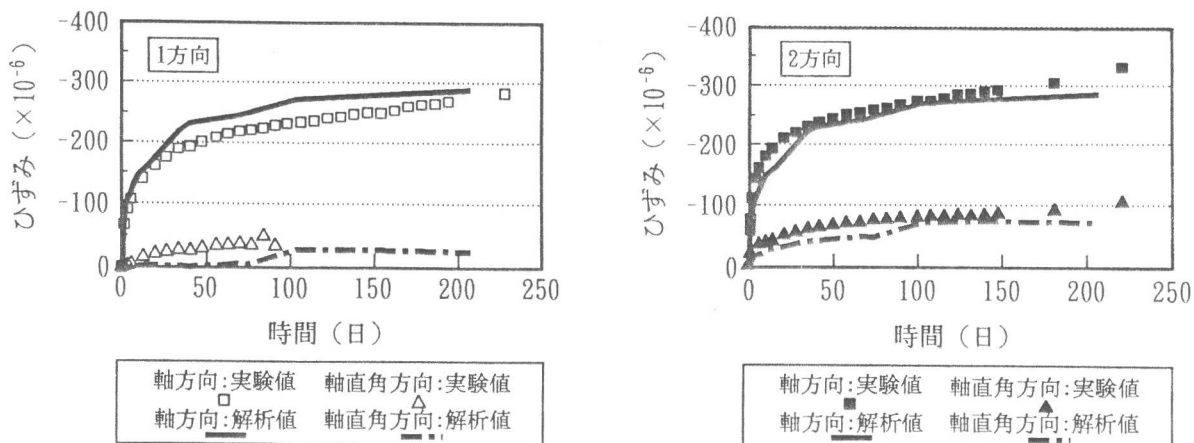


図-3 プレストレス導入後のひずみ経時変化(コンクリート中央部下縁)

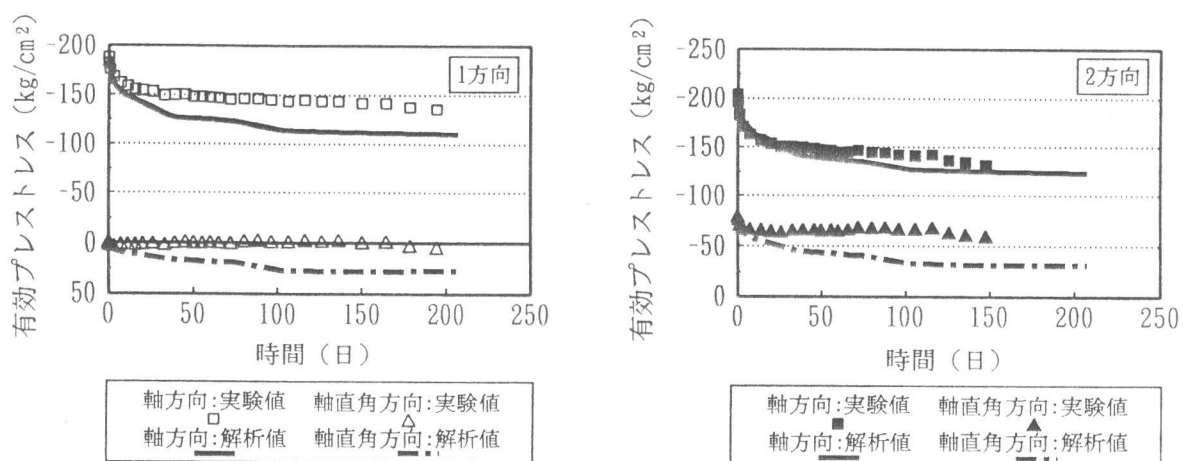


図-4 有効プレストレスの経時変化

以上より、2方向にプレストレスが導入された本合成版のクリープ挙動は、1方向に導入されたそれと顕著な差異のないことが確認された。また、Troostの式によるクリープ解析法は、2方向クリープ挙動を追跡する上で簡易かつ有用な解析手法であることが明らかにされた。

## 5. まとめ

本研究は、型枠と引張材を兼ねる底鋼板とコンクリートを一体化した鋼板・コンクリート合成版に対し、2方向プレストレス導入試験およびクリープ試験を行い、クリープ性状およびプレストレス損失について、実験的、解析的検討を行ったものである。本研究により得られた結果をまとめると次のとおりである。

- (1) 本合成版において、鋼板(SS400)および鉄筋(SD295)の初期引張応力レベルが降伏点応力以下の緊張で、導入直後に主軸方向 $240\text{kgf}/\text{cm}^2$ 、主軸直角方向 $50\text{kgf}/\text{cm}^2$ 程度の2方向プレストレス導入が可能である。
- (2) 2方向にプレストレスが導入された合成版における主軸方向のクリープひずみおよび導入プレストレスの経時変化は、1方向に導入された合成版のそれに比べ、顕著な差異は認められない。
- (3) また、プレストレス導入後150日における有効プレストレスの減少量は、20%(1方向)~30%(2

方向)である。

(4)2方向にプレストレス導入された合成版のクリープ挙動は、各方向のコンクリートのクリープが各々独立的に進行するという仮定に基づき、既往のTroost式による解析法を拡張・適用することによって簡易かつ比較的精度よく追跡できる。

#### 〔謝辞〕

本研究を行うに際し、多大の御協力を得た九州大学工学部建設都市工学科手島義純技官、柴田博之技官、三菱重工業(株)矢野 亨氏(当時九大大学院)、および材料を提供していただいた藤沢薬品工業(株)に対し、感謝の意を表します。また、本研究は、文部省科研費試験研究(B)(代表者:太田俊昭)の援助を受けたことを付記する。

#### 参考文献

- 1)太田、日野ほか：鋼・コンクリート合成版構造のプレストレス化に関する基礎的研究  
(その1:合成はりの導入プレストレス曲げ性状),土木構造・材料論文集、第6号、1991.1
- 2)Troost, H.:Zur Berechnung von Stahlverbundträgern im Gebrauchszustand auf Grund neuerer Erkenntnisse des viskoelastischen Verhaltens des Betons. Der Stahlbau 37 (1968), H. 11, S. 321
- 3)Howard L. Fukr:Creep Tests of Two-Way Prestressed Concrete, Jour. of ACI Vol. 64, No. 6, pp. 288 -294, June 1967
- 4)Schade, D.:Alterungsbeiwerte für das kriechen von Beton nach den Spannbetonrichtlinien, Beton und Stahlbetonbau, H. 5, 1977.
- 5)太田、日野ほか：鋼・コンクリート合成版構造のプレストレス化に関する基礎的研究  
(その2:クリープ・乾燥収縮による合成はりの導入プレストレスの損失)、九州大学工学集報、第63巻、第6号、1990.12