

(18) 鋼板・コンクリート合成版の2方向プレストレス化に伴う
導入プレストレスとクリープ特性の解明

A STUDY ON INITIAL PRESTRESS AND CREEP BEHAVIOR OF TWO-WAY
PRESTRESSED STEEL PLATE-CONCRETE COMPOSITE SLAB

太田俊昭* 日野伸一** 河野伸征*** 新西成男**** 近藤 誠*****

By Toshiaki OHTA, Shin-ichi HINO, Nobuyuki KOUNO, Nario SHIN-NISHI, Makoto KONDOU

A steel plate-concrete composite slab system is widely used for the deck slab in bridges and structures, because it has various advantages of structural performance. However, the existing composite slab has some severe problems such as reduction of durability and stiffness, which are caused by cracking in concrete.

The authors have developed a new prestressing technique for the steel plate-concrete composite slab by pretensioning bottom plate used as tensile reinforcement and forms. This study, firstly, presents an outline of two-way tensioning equipment for steel plate and bars. Then, it describes the result of two-way prestressing test for composite slabs, comparing with the numerical results by the finite element analysis based on incomplete interaction between steel and concrete. Finally, the creep behavior of the two-way prestressed composite slab is made clear by the creep test as well as numerical analysis.

1. まえがき

鋼板・コンクリート合成版構造はRC構造と比較して耐力やじん性等の力学特性に優れており、版厚の低減や死荷重の軽減が可能となる。また、コンクリートにひび割れが発生しても、鋼板の存在により水密性や気密性が確保できる構造となっている。さらにこの合成版構造はプレキャスト化に適しており、現場施工と効率良く組み合わせることにより、施工の省力化に寄与できるなどの利点を有している。

このような利点から、鋼板・コンクリート合成版構造は近年橋梁のみに限らず様々な構造物、特に水密性が要求される海洋・港湾構造物等に適用されるようになってきた。その代表的な適用例を図-1、2に示す。これらのうち、ハイブリッドケーソン¹⁾は海水

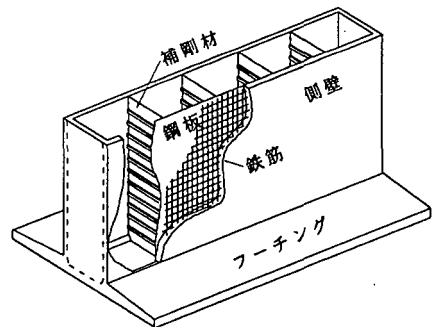


図-1 ハイブリッドケーソン概念図¹⁾

*	工博	九州大学教授	建設都市工学科	**	工博	九州大学助教授	建設都市工学科
***	工修	九州大学大学院	土木工学専攻	****	工博	宮崎大学助手	土木工学科
*****		九州大学大学院	土木工学専攻				

と接する外側にコンクリート、内側に鋼板を配した構造となっている。鋼板を内側に配するのは鋼板の腐食を防ぐのがその主な理由であるが、波力等の外力が作用した際に鋼板が引張応力に抵抗するという点でも有利である。これに対し図-2の沈埋トンネル²⁾ではコンクリートを鋼板ではさんだサンドイッチ構造が採用されている。この種の構造は、特に耐衝撃性、止水性などに優れているが、外鋼板の防食に対する配慮が必要で、特に、飛沫域などの腐食環境の厳しい所に用いられる場合には電気防食や犠牲金を確保するなどの対策が不可欠である。以上のように、既存の合成版構造は設計上のコンセプトとして基本的にRC構造として取り扱われており、鋼板あるいはコンクリートのひび割れ発生後の腐食・劣化等の耐久性についてはなお問題が残されている。

そこで、本研究では、この種の合成版構造のプレストレス化に着目し、合成版とPC構造の両特性を活用したプレストレスト合成版構造の開発を目的とする。面材である既存の溶接構造用鋼板を緊張材として用いるため、通常のPC鋼材と比較して2方向へのプレストレス導入が可能であるとともに、じん性に富んだ高強度、高剛性のプレキャスト構造部材としての力学特性を有することが期待される。

しかし、本構造の開発にあたって、①導入プレストレスの評価、②クリープ・乾燥収縮によるプレストレスの減少量の評価、および③プレキャスト部材の接合法等の解決すべき問題がある。本報ではプレキャスト部材レベルの基礎研究として、①および②の究明を主眼として行った模型合成版による実験的および解析的研究の結果について述べる。

2. 鋼板・鋼棒2方向緊張装置によるプレストレス導入

2.1 プレストレス導入実験

著者らは、プレストレスト合成版の製作用に、箱形鋼フレームに2方向、合計17基の油圧ジャッキを搭載した鋼板・鋼棒2方向緊張装置³⁾を開発した。本装置の最大緊張能力は、主軸方向で鋼板300tf、鋼棒120tf、主軸直角方向で鋼板150tf、鋼棒35tfである。

本緊張装置を用いて製作した合成版供試体の断面諸元を図-3に示す。主軸方向のみにプレストレスを導入した1方向供試体を3体、主軸および主軸直角

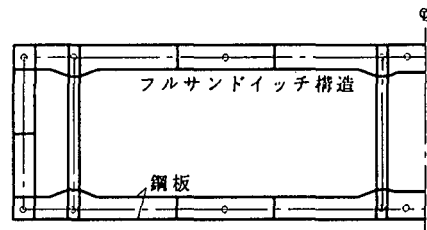


図-2 沈埋トンネル概念図²⁾

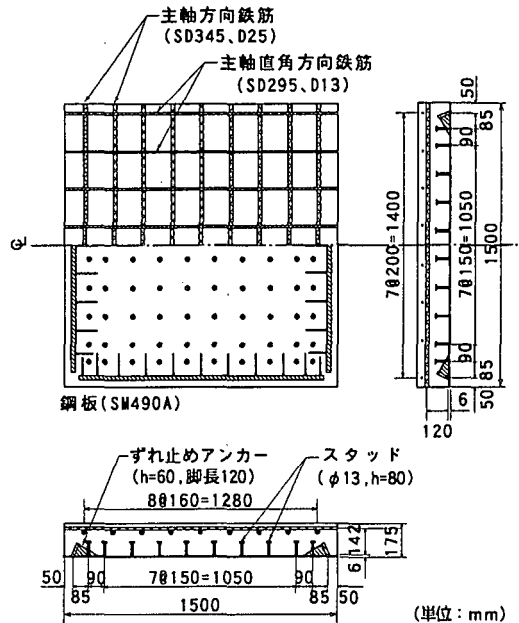


図-3 合成版供試体諸元

方向にプレストレスを導入した2方向供試体を3体の計6体製作した。

実験の手順は次のとおりである。

- ①鋼板・鋼棒緊張装置を用いて鋼板と鉄筋を所定の初期引張応力まで緊張する。
- ②コンクリート（早強ポルトランドセメント使用）を打設し、材令7日までそのまゝの状態で養生する。
- ③鋼板、鉄筋に作用している緊張力を解放し、コンクリートにプレストレスを導入する。
- ④供試体を温度 $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ 、湿度 $60 \pm 10\%$ の恒温恒湿室に設置し、クリープの計測を行う。

ひずみの測定は、コンクリート内部に設置した埋め込みゲージおよびコンクリート上縁に貼付した電気

抵抗線ひずみゲージを用いて行った。

本実験に使用したコンクリートの配合を表-1に示す。コンクリートの乾燥収縮を低減する目的から界面活性剤を主成分とする収縮低減剤をセメント重量比にして約2%混入した。著者らの実験結果⁴⁾から、本実験と同量の混入率で、乾燥収縮を約25%低減できることが確認されている。

2. 2 プレストレス導入量解析法

剛なずれ止めを配置した合成版あるいは柔なずれ止めを配置した合成版の中央部では、鋼板とコンクリートの完全合成を仮定した2次元弾性問題として平易に導入プレストレスを算定できる。しかし、本構造のように柔なずれ止め（スタッド）を配置した合成版の非中央部では接合面の不完全合成（ずれ）を考慮して導入プレストレスを推定する必要がある。そこで、ここでは以下の仮定に基づく有限要素解析を行った。

- ①コンクリートおよび鋼板は、均質等方性弾性材料の3次元アイソパラメトリック要素に分割する。
- ②スタッドおよびずれ止めアンカーの接合面のずれ特性を2方向ばねからなるボンドリンク要素で表現する。ここで、解析において用いたスタッドおよびアンカーのせん断方向のばね定数は、既往の研究⁵⁾によりそれぞれ $k_s = 1 \times 10^5 \text{ kgf/cm}$ 、 $k_a = 2 \times 10^5 \text{ kgf/cm}$ とした。

表-1 コンクリート配合

W/C (%)	S/a (%)	単位量 (kg/m ³)					
		水	AE 減水剤	収縮 低減剤	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G
37.0	36.3	173	1.17	10.0	468	591	1088

表-2 鋼材の初期緊張応力

	鋼板		鉄筋	
	主軸方向	軸直角方向	主軸方向	軸直角方向
1 方向	2125	-312	2597	
2 方向	2297	614	2451	

(単位: kgf/cm²)

2. 3 実験および解析結果

実験により得られた鋼材の初期緊張応力を表-2に示す。また、前述の解析法を用いて得られたコンクリートの導入プレストレス分布を図-4に示す。これより、版中央部において主軸方向に1方向供試体で147kgf/cm²、2方向供試体で175kgf/cm²、また、2方向供試体では主軸直角方向に51kgf/cm²のプレストレスが導入されたことがわかる。また、図に示すようにどのケースも供試体端部に近づくにつれて鋼板とコンクリートのずれによる応力の損失が見られる。実験値と解析値を比較すると、実験値とずれを考慮した有限要素解析の結果は一部で20%程度の誤差が生じたのを除けば、全般によく一致している。

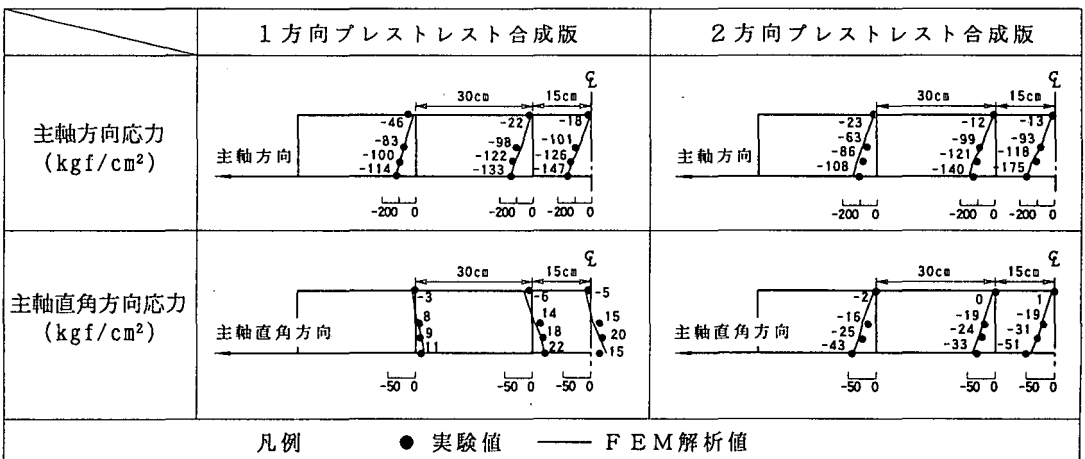


図-4 コンクリートの導入プレストレス分布

3. プレストレスト合成版の2方向クリープ特性⁶⁾

3. 1 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 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 、湿度 $60 \pm 10\%$ の恒温恒湿室に設置し、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。コンクリート中央部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。

3. 2 2方向クリープ解析法

解析のモデル化は現行の道路橋示方書に採用されている総断面力法により行った。また、クリープ、乾燥収縮の影響を評価する応力-ひずみ関係式として以下に示すTroostの方法⁷⁾、Dischingerの方法⁸⁾およびRüschの方法⁹⁾の3法を用いた。

Troostの方法

$$\varepsilon_{x..}(t) = \frac{\sigma_{bo}}{E_b} \phi(t) + \frac{\sigma_{x..}(t)}{E_b} \{1 + \rho \phi(t) + \varepsilon_s(t)\}$$

Dischingerの方法

$$\varepsilon_{x..}(t) = \frac{\sigma_{bo}}{E_b} \phi(t) + \frac{\sigma_{x..}(t)}{E_b} \left\{ 1 + \frac{1}{2} \phi(t) + \varepsilon_s(t) \right\}$$

Rüschの方法

$$\varepsilon_{x..}(t) = \frac{\sigma_{bo}}{E_b} \{ \phi_s + \phi_l(t) \} + \frac{\sigma_{x..}(t)}{E_b} \left\{ 1 + \phi_s + \frac{1}{2} \phi_l(t) + \varepsilon_s(t) \right\}$$

これらの式は一般に、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。しかし、Fukr¹⁰⁾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。したがって、本解析では各方向のクリープが独立に進行するとの仮定を採用した。本クリープ解析法のフローを図-5に示す。

上式のうちのTroost式中のリラクセーション係数 ρ はD.Shade¹¹⁾の方法により算定した。また、遅れ弾性ひずみに対する基本クリープ係数 ϕ_b は0.4とした。

ここで、各クリープ解析法の相関関係を確かめるため、簡単なモデルを用いて比較を行った。対象とした解析モデルの断面諸元を図-6に示す。また、鋼

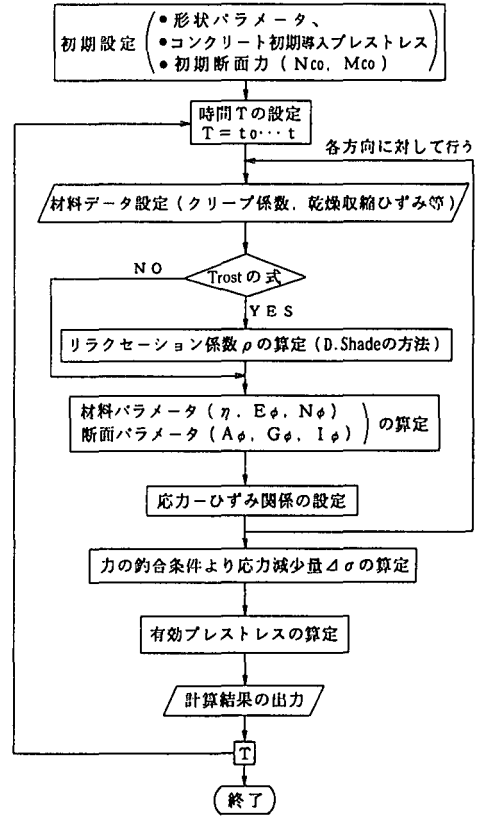


図-5 クリープ解析のフロー

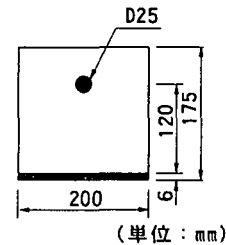


図-6 供試体断面諸元

表-3 初期導入応力

鋼板	鉄筋	コンクリート	
		上縁	下縁
800	1100	10	-120

(単位: kgf/cm^2)

材およびコンクリートの初期導入応力は表-3に示すとおりとした ($n=6$)。解析により得られた有効プレストレスの経時変化を図-7に示す。これより、Dischinger法がクリープによる応力減少を過大評価

していることがわかる。これは、Dischinger法において遅れ弾性ひずみによる回復クリープが考慮されていないためである。また、Rüsch法では遅れ弾性ひずみが瞬時に発生すると仮定しているため初期材令においては他の方法に比べ損失応力を過大評価しているが、長期材令においてはTroost法によるそれとほぼ一致していることがわかる。

3. 3 実験および解析結果

図-8に各供試体におけるコンクリート中央部下縁ひずみの経時変化を示す。図中の解析値に用いたクリープ係数、乾燥収縮ひずみ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¹²⁾を引用して用いた。図より、実験値、解析値ともにプレストレス導入後材令約300日程度でクリープ、乾燥収縮はほぼ収束していることがわかる。実験値と解析値を比較すると、2方向の主軸直角方向において多少解析値が大きめの値を示している。しかし、主軸方向においては1方向、2方向ともにプレストレス導入後材令約1年で実験値と解析値の誤差はTroost式で最大5%であり、

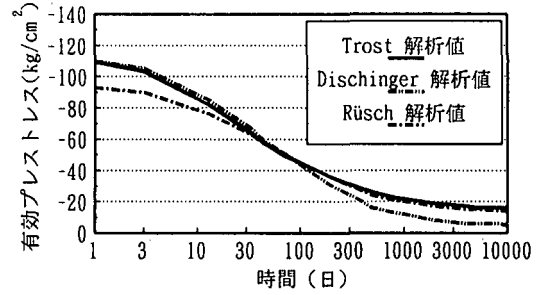


図-7 有効プレストレスの経時変化

実験値と解析値はよく一致しているといえる。

図-9にプレストレス導入以後の有効プレストレスの経時変化を示す。ここで、図中の実験値はコンクリート上下縁における実測ひずみを用いて算定した計算値である。図より、プレストレス導入後材令約1年において有効プレストレスの減少量は1方向、2方向ともに実験値で約30%、TroostおよびRüschの方法で約30%、Dischingerの方法で約35%であり、実験値と解析値はよく一致しているといえる。

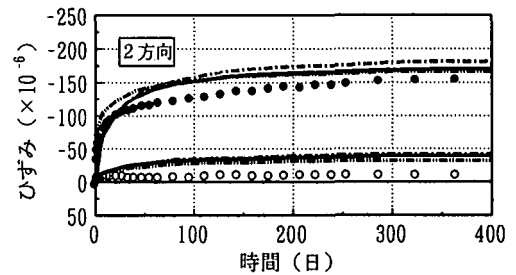
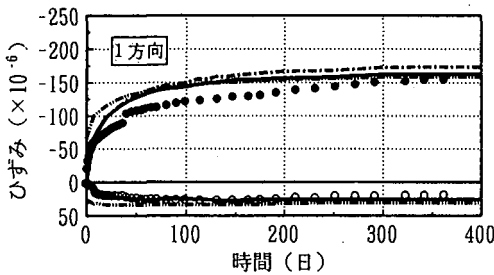


図-8 コンクリート中央部下縁ひずみの経時変化

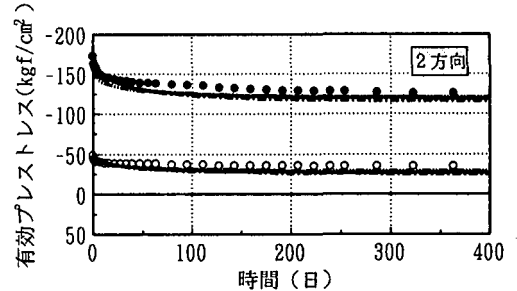
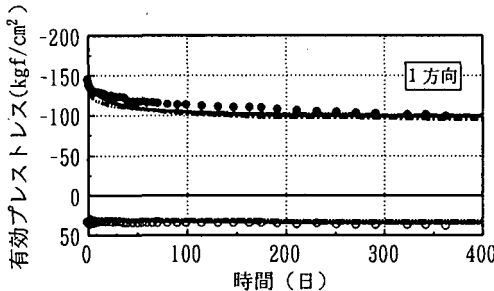
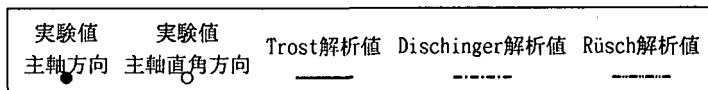


図-9 有効プレストレスの経時変化



以上より、2方向にプレストレスが導入された合成版のクリープ挙動は1方向に導入された合成版のそれと比べ、顕著な差異はみられなかった。よって、本構造の2方向クリープ挙動を追跡する上でFukrの説に基づく本解析法は妥当なものといえる。

4. まとめ

本研究は、型枠と引張材を兼ねる底鋼板を予め直接緊張することにより、鋼板・コンクリート合成版のプレストレス化を図ることを目的として、2方向プレストレス導入実験およびクリープ試験を行い、プレストレス導入量およびクリープ性状について実験的・解析的検討を行ったものである。以上より得られた結果をまとめると次のとおりである。

(1) 本合成版において主軸方向に鋼板約2100~2300 kgf/cm²、鉄筋約2500~2600kgf/cm²、主軸直角方向に鋼板約600kgf/cm²、鉄筋約2000kgf/cm²の各応力レベルのプレテンションによって、主軸方向に約150~175kgf/cm²、主軸直角方向に約50kgf/cm²のプレストレス導入が可能である。

(2) 鋼板とコンクリートのずれ特性を2方向ばねからなるボンドリンク要素で表現した有限要素解析により、本合成版のプレストレス導入直後のコンクリートの応力分布を全域にわたりよく評価できる。

(3) 2方向にプレストレスを導入した合成版のクリープ性状は、1方向にプレストレスを導入した合成版のそれと類似の傾向を示す。

(4) 収縮低減剤を混入したコンクリートを用いた本合成版のプレストレス導入後約1年におけるクリープ、乾燥収縮による導入プレストレスの減少量は1方向、2方向ともに約30%であった。

(5) 2方向にプレストレスを導入した合成版のクリープ挙動は各方向にクリープが独立的に進行すると仮定に基づき、既往のクリープ解析法を拡張・適用することにより比較的精度よく追跡できる。

以上のように、本合成版のプレストレス化の実証とプレキャスト部材レベルの基本的力学特性についてほぼ明らかにされたものと考えられる。しかし、本構造のような鋼板の直接緊張方式については実用化の面で困難な問題も多く、これに変わる合成版のプレストレス導入法や、プレキャスト合成版相互の接合法等についても今後検討の必要がある。

最後に、本研究に際して、平成5~7年度文部省科

学研究費試験研究(B) (代表者 太田俊昭) の補助を得た。また、実験に関連して、オリエンタル建設、住友建設、東京鉄骨橋梁製作所、ピーエス、富士ピーエス、横河工事、藤沢薬品工業の各社のご協力を得た。ここに記して、深甚なる謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) 田中・植村：ハイブリッド構造のケーソン等港湾構造物への適用，第2回合成構造の活用に関するシンポジウム講演論文集，土木学会，1989.9.
- 2) 横田 弘：海洋構造物における複合構造，プレストレストコンクリート，Vol. 37, No. 2, 1995.3
- 3) 太田・日野ら：鋼板・コンクリート合成版の新しいプレストレス導入法に関する基礎的研究，構造工学論文集，Vol. 39A, 1993.3.
- 4) 太田・日野ら：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版の導入プレストレスの損失），九大工学集報，第63巻，第6号，1990.12
- 5) 佐々木・小松：不完全合成桁橋の合理的設計，橋梁と基礎，Vol. 20, No. 5, 1986.5.
- 6) 新西・太田ら：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，コンクリート工学論文報告集，Vol. 16, No. 2, 1994
- 7) Trost, H. : Zur Berechnung von Stahlverbundträgern im Gebrauchszustand auf Grund neuerer Erkenntnisse des viskoelastischen Verhaltens des Betons. Der Stahlbau, 37, H. 11, 1968.
- 8) Zerna, W. : Zur Berechnung des Einflusses von Kriechen und Schwinden beim Beton, Konstruktiver Ingenieurbau Berichte, H. 7, Vulkan-Verlag, 1975.
- 9) H. Rüsch, D. Jungwirth : Stahlbeton-Spannbeton, Band 2, Werner Verlag, 1976.
- 10) Howrd L. Fukr : Creep Tests of Two-way Prestressed Concrete Jour. of ACI Vol. 64, No. 6, June 1967.
- 11) D. Schade (若狭忠雄訳) : プレストレストコンクリート指針によるコンクリートのクリープに対する変化係数について，プレストレスとコンクリート，Vol. 21, No. 5, 1979
- 12) 河野伸征：プレストレスト鋼板・コンクリート合成版の2方向クリープ特性に関する研究，九州大学大学院修士論文，1995.3