

論文 合成桁へのせん断プレストレスの導入に関する一考察

松本総史^{*1}・原田哲夫^{*2}・徳光 卓^{*3}・出光 隆^{*4}

要旨: 鋼・コンクリート合成桁の接合面において、将来発生するであろうせん断力とは逆向きのせん断力をプレストレスとしてあらかじめ導入しておく方法としてプレベンディング方式、ポストベンディング方式の二つが考えられる。両者について不完全合成桁理論を用いせん断プレストレスの分布を示すとともに、導入メカニズムを考察した。

キーワード: 鋼・コンクリート合成桁, せん断プレストレス, 不完全合成桁理論

1. まえがき

引張りに弱いコンクリートに予め圧縮力をかけておいて、将来発生するであろう引張力に抵抗できるように見かけ上の引張強度の改善を図ろうとするのが、プレストレストコンクリートの基本原理である。この考え方にしたがって、将来発生するであろうせん断力の方向とは逆方向のせん断力を前もって作用させておけば、見かけ上の作用せん断力を減少できる。例えば斜め配置されたPC鋼材をもつ部材では、緊張力Pの鉛直成分 $P \sin \theta$ に相当するせん断耐力の増加が見込まれる。

さて、高力ボルトによる摩擦接合法を用いた鋼・コンクリート合成桁の載荷試験中に、合成桁の接合面がせん断すべりを生じるまで載荷してから除荷し、さらに再度せん断すべりを生じるまで載荷すると、二度目以降のせん断すべり時の荷重は、前回のせん断すべり時の荷重を上回ることが確認された。この現象は、せん断すべり時にすべりに抵抗するせん断応力が接合面に残留し、その分、すべり荷重を増加させたと考えることができる¹⁾。

この接合面に残留したせん断応力をここではせん断プレストレスと呼ぶことにする。このせん断プレストレストをうまくコントロールでき

れば、従来からのプレストレストコンクリート構造の設計と同様の取り扱いが可能になると思われる。

本論では、上記の摩擦接合された鋼・コンクリート合成桁を対象に、せん断プレストレスの導入メカニズム、せん断プレストレス分布等についての考察を行った。

2. 鋼・コンクリート合成桁におけるせん断プレストレス導入の概要

図-1のように、コンクリート床版と鋼桁を非合成の状態(重ね梁)で荷重を載荷して曲げれば、コンクリート床版下面部分は外側に鋼桁上面部分は内側にずれようとして、接合面では相対すべり変形が生じる。この状態で両者を高力ボルトで合成させた後に荷重を取り除けば、それぞれの変形は元に戻ろうとするが、高力ボルトによる摩擦接合のため、接合面ではすべり変形が元に戻るのに抵抗する水平せん断力が作用することになる。そしてこの水平せん断力は変形が完全に戻らないために残留することになる。この残留水平せん断力を応力として表したものが、せん断プレストレスである。

図-2では、鋼桁に偏心軸圧縮力を作用させ、曲げた状態でコンクリート床版を合成した後に、

^{*1} 長崎大学大学院 工学研究科構造工学専攻 (正会員)

^{*2} 長崎大学教授 工学部構造工学科 工博 (正会員)

^{*3} (株) 富士ピー・エス 技術部開発課 (正会員)

^{*4} 九州工業大学教授 工学部建設社会工学科 工博 (正会員)

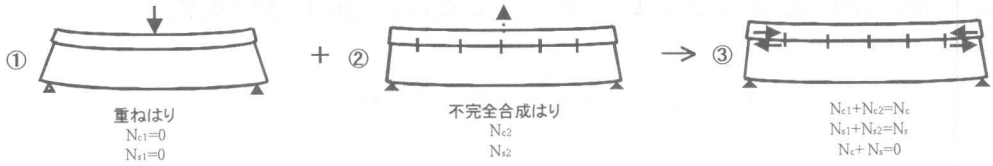


図-1 プレベンディング方式によるせん断プレストレスの導入 (曲げ載荷)

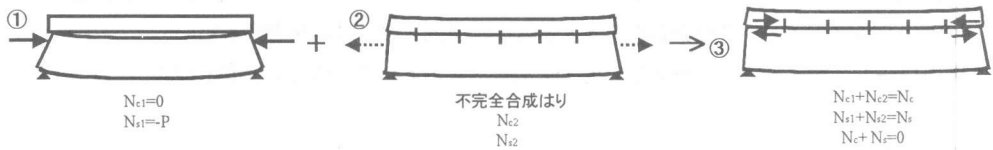


図-2 プレベンディング方式によるせん断プレストレスの導入 (偏心軸圧縮)

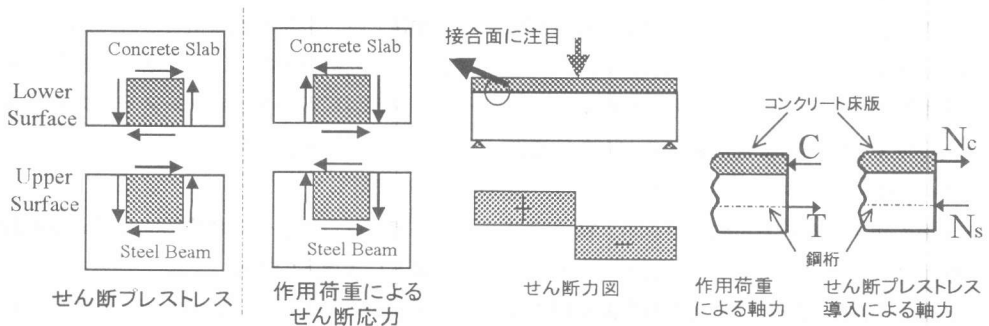


図-3 (a)せん断プレストレスの作用方向

図-3 (b)合成桁における合力の作用方向

偏心軸圧縮力を除荷してせん断プレストレスを上記と同様に導入することができる。上記二つの導入方法は、非合成の状態では荷重を載荷して、合成後に載荷荷重を解放してせん断プレストレスを導入することから、プレベンディング方式と呼ばれている。せん断プレストレスの作用方向は、桁左半分で見れば、図-3(a)のようになり、将来荷重として作用するせん断応力とは逆方向に作用していることがわかる。また、合成桁において、床版と鋼桁の重心位置に作用する軸方向合力の作用方向は、図-3(b)に示す通りせん断プレストレス導入時において、コンクリート床版は引張り力を受けることになる。

通常、プレキャスト床版にはプレストレスの導入がなされるが、上記の点は注意を要する。

3. 不完全合成桁理論による解析

コンクリート床版と鋼桁の接合面は、せん断バネ (せん断バネ定数 k (kN/mm²)) で連結されている不完全合成桁の微分方程式を以下に導く。図-4に示す微小桁要素 dx において²⁾ 一定の水平せん断力 q (kN/mm) が作用した時、接合面におけるずれ δ は、以下の式で与えられる。

$$\delta = \frac{q}{k}$$

k は定数であり、上式を x で微分して

$$\frac{d\delta}{dx} = \frac{dq}{dx} \cdot \frac{1}{k} \quad (1)$$

今、点 x にモーメント M_0 が作用した時、床版と鋼桁の軸力、モーメントをそれぞれ、 N_c 、

M_c, N_s, M_s で表すと、軸力とモーメントの釣り合い条件は

$$\begin{aligned} N &= N_c = N_s \\ M_0 &= M_c + M_s + Nh \end{aligned} \quad (2)$$

変形の適合条件より、

$$h = h_c + h_s, \quad \frac{M_c}{E_c I_c} = \frac{M_s}{E_s I_s} \quad (3)$$

単位長さ当たりの水平せん断力 q は、鋼桁およびコンクリート床版にそれぞれ作用する軸力を微分したものであり、

$$q = \frac{dN}{dx} \quad (4)$$

図-4の変形条件より

$$\frac{M_s}{E_s I_s} h_s - \frac{N_s}{E_s A_s} + \frac{d\delta}{dx} = \frac{N_c}{E_c A_c} - \frac{M_c}{E_c I_c} h_c \quad (5)$$

(1)~(5)より、次の微分方程式が誘導できる。

$$\frac{d^2 N}{dx^2} - \omega^2 N + \Omega M_0 = 0 \quad (6)$$

ただし、

$$\begin{aligned} \omega^2 &= \left(\frac{1}{E_c A_c} + \frac{1}{E_s A_s} + \frac{h^2}{E_c I_c + E_s I_s} \right) k \\ \Omega &= \frac{h}{E_c I_c + E_s I_s} k \end{aligned} \quad (7)$$

4. せん断プレストレス分布

4.1 プレベンディング方式の場合

(1) 偏心軸圧縮によるせん断プレストレス導入

図-2に示すように非合成の状態では鋼桁に偏心軸圧縮をかけた状態①と合成された状態で軸力を解放した状態②を重ね合わせれば、せん断プレストレスが導入された状態となる。ここで、状態②において、式(6)より軸力に関する式は次のようになる。

$$N_{s2} = A \cosh \omega x + B \sinh \omega x + \frac{\Omega}{\omega^2} M_0 + P \frac{nA_s}{A_c + nA_s} \quad (8)$$

式(8)において、 $M_0 = -Ph$ 、境界条件 $N(0) = P$ 、 $N(l) = P$ を考慮することにより次のように A, B が定まる。

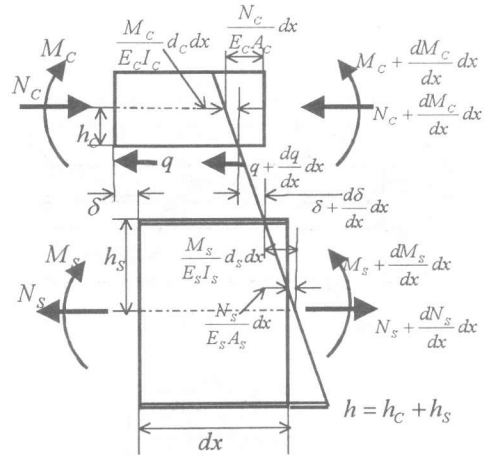


図-4 不完全合成桁の微小要素での変形とつりあい

$$\begin{aligned} A &= P \left(\frac{A_c}{A_c + nA_s} + \frac{\Omega}{\omega^2} h \right) \\ B &= P \left(\frac{A_c}{A_c + nA_s} + \frac{\Omega}{\omega^2} h \right) \left(\frac{1 - \cosh \omega l}{\sinh \omega l} \right) \end{aligned}$$

また、重ね合わせの原理より、次式を満たす。

$$\begin{aligned} N_{c1} + N_{c2} &= N_c, \quad N_{s1} + N_{s2} = N_s \\ N_c + N_s &= 0 \end{aligned} \quad (9)$$

解析に用いた供試体を図-5に示す。

図-6に鋼桁の軸力分布、図-7にせん断プレストレス分布を示す。ここでは、導入軸力は300kNとし、バネ定数 k の値を、1.5(kN/mm²)、15(kN/mm²)、150(kN/mm²)と変化させた場合の結果である。

図-7よりせん断プレストレスは、桁端部付近で作用しているが、それ以外の区間では0となっている。これは、図-6からわかるように桁中央部での軸力分布が一定となるためである。この場合は、あたかもプレテンション方式での付着長に相当する区間において、せん断プレストレスが発生している。

(2) 鉛直荷重によるせん断プレストレスの導入

図-1に示すように非合成の状態では曲げ荷重を載荷した状態①と合成された状態で逆方向の曲げ荷重を載荷した状態②を重ね合わせる

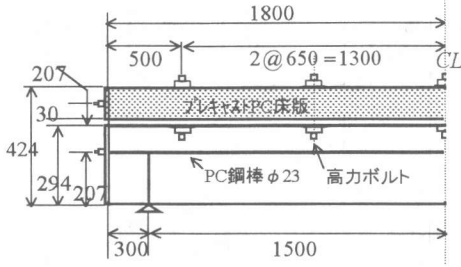


図-5 解析に用いた供試体

とせん断プレストレス導入状態となる。ここでも状態②における軸力に関する式は、次式で与えられる。

$$N_{s2} = C \cosh \omega x + D \sinh \omega x + \frac{\Omega}{\omega^2} M_0 \quad (10)$$

式(10)において、 $M_0 = -1/2Px$ 、境界条件 $N(0) = 0, dN/dx(l/2) = 0$ を考慮することにより次のように C, D が定まる。

$$C = 0, \quad D = \frac{P\Omega}{2\omega^3 \cosh \frac{\omega l}{2}}$$

重ね合わせの原理より、式(9)が成り立つ。

図-8は鋼桁の軸力分布、図-9はせん断プレストレス分布である。導入荷重は75 kN、バネ定数 k の値は、(1)の場合と同じとした。

曲げ荷重によるせん断プレストレスの分布は、せん断力図と同じ形状の分布であるが、将来作用する荷重によるせん断応力の向きとは逆向きのせん断応力が発生している。

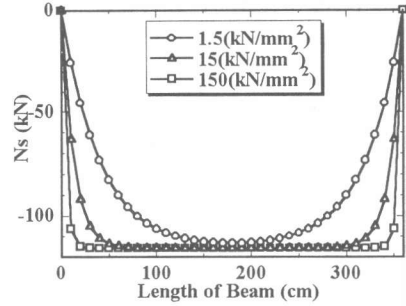


図-6 偏心軸圧縮荷重による鋼桁の軸力分布

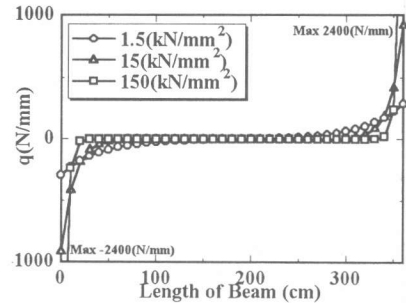


図-7 偏心軸圧縮荷重によるせん断プレストレス分布

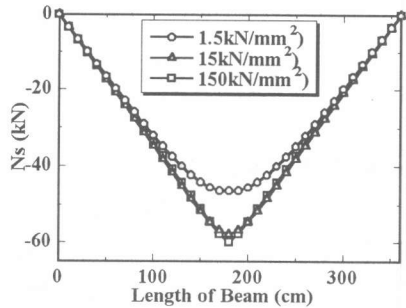


図-8 曲げ荷重による鋼桁の軸力分布

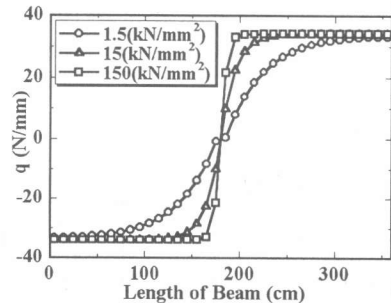


図-9 曲げ荷重によるせん断プレストレス分布

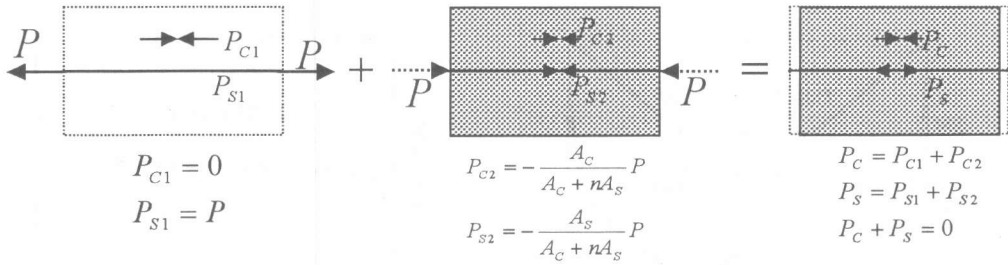


図-10 プレテンション方式によるプレストレス導入

4. 2 弾性変形による初期荷重のロス

通常のプレテンション方式によるプレストレスの導入では、力学的には、重ね合わせの原理より図-10のように説明できる。すなわち、PC 鋼材を緊張した状態とコンクリートと PC 鋼材が合成された状態で圧縮力を作用させた状態とを重ね合わせた状態がプレテンション方式でのプレストレスの導入である。コンクリートの圧縮変形量に等しい PC 鋼材の変形量に相当する緊張力のロスが生じる。これと同様に図-1、図-2に示すプレベンディング方式によるプレストレス導入の際にも弾性変形による初期荷重のロスが生じる。例えば、図-2に示すように偏心軸圧縮力により、せん断プレストレスを導入する場合には、式(10)で示した N_{S2} に相当する軸力のロスが生じる。図-6には、プレストレス導入後の残存軸力を示しているが、導入軸力 300kN に対して 185kN のロス量となる。また、せん断バネ定数 k の値が小さくなるにつれ、桁端部付近においてのロス量は大きくなっていくことがわかる。

4. 3 ポストベンディング方式の場合

摩擦接合後の合成桁に偏心軸圧縮力等を載荷することによって、接合面にせん断プレストレスを導入することから、ポストベンディング方式と呼ばれている。床版打ち換え作業によって、プレキャストコンクリート床版が鋼桁と摩擦接合された合成桁において、外ケーブル工法で偏心軸力を導入する場合を考える。外ケーブル方式で合成桁に軸圧縮力を作用させた場合には、

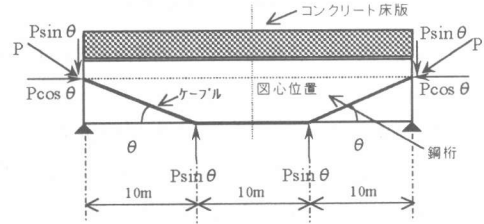


図-11 等価外力を作用させた不完全合成桁

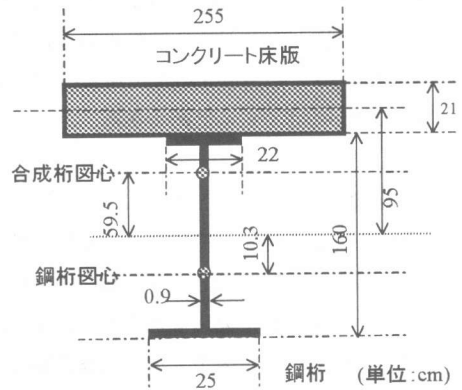


図-12 断面形状

図-11のような等価外力を作用させた不完全合成桁を解析すればよい。ここでの解析例として、図-12に示す断面形状の合成桁を用い³⁾ スパンは 30m とした スパン中央部分では lower フランジを通るものとし、スパン 1/3 部分で、曲げ上げる方式とした。死荷重モーメントによるスパン中央部での鋼桁下縁応力を 0 とする軸力は 1650kN であるが、解析の便宜上導入緊張力は 1500kN とした。図-13 に等価外力の水平成分と鉛直成分による軸力分布、およびそれらの重ね合わせた場合の軸力分布を示す。

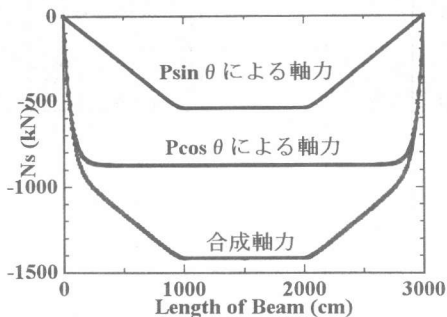


図-13 外ケーブル方式による鋼桁の軸力分布

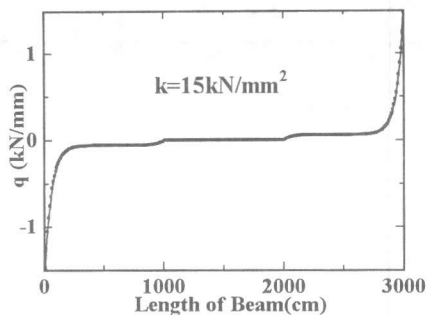


図-14 外ケーブル方式による
せん断プレストレス分布

図-14にはせん断プレストレス分布を示す。鉛直成分 $P \sin \theta$ によるせん断プレストレス量は、水平成分 $P \cos \theta$ による効果と比べるとかなり小さい。これは、水平成分 $P \cos \theta$ による軸力が、桁端部で急激に増加していることに対し、鉛直成分 $P \sin \theta$ による軸力の変化はゆるやかであるので、単位長さ当たりの水平せん断力 q の値が小さくなるためである。

5. 結論

合成桁の接合面に、荷重によって将来発生するせん断応力とは逆向きのせん断応力をせん断プレストレスとして導入できること、また、それは従来からのプレストレスの原理に基づき説明できることを示した。以下に、主な点を列挙する。

- (1) プレベンディング方式でせん断プレストレスを導入する場合、偏心軸圧縮によるせん断プレストレスの分布は、プレテンション方式における付着長部分と同様に、桁端部付近に作用する形状を示し、曲げ荷重によるせん断プレストレスの分布は、せん断力図と同じ形状の分布を示す。
- (2) プレベンディング方式でせん断プレストレスを導入する場合、偏心軸力、曲げ載荷いずれの導入方法でも、プレテンション方式の場合と同様、載荷荷重解放時の弾性変形にともなうせん断プレストレスのロスが生じる。

(3) ポストベンディング方式でのせん断プレストレスの導入は、外ケーブル方式で行える。外ケーブル方式での補強では、せん断プレストレスの効果を考慮できる。

(4) 合成桁接合面へのせん断プレストレスの導入手法やその分布は、プレベンディング方式、ポストベンディング方式ともに、不完全合成桁理論により計算できる。

参考文献

- 1) 徳光卓・出光隆・山崎竹博：せん断プレストレスを利用した鋼・コンクリート合成桁接合面のせん断補強に関する研究，土木学会論文集，No. 592V-39，pp. 63-72
- 2) 橋善雄・足立善雄：不完全合成桁について，土木学会論文集，第112号
- 3) 橋善雄・中井博 著：橋梁工学第3版，共立出版，pp314-337，1991.11