

# 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

徳光卓<sup>1</sup>・山崎竹博<sup>2</sup>・出光隆<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 九州工業大学大学院 工学部設計生産工学科(〒804-0015 北九州市戸畑区仙水町1-1)

<sup>2</sup>正会員 工博 九州工業大学助教授 工学部建設社会工学科(〒804-0015 北九州市戸畑区仙水町1-1)

<sup>3</sup>正会員 博士(工) 九州工業大学教授 工学部建設社会工学科(〒804-0015 北九州市戸畑区仙水町1-1)

鋼・コンクリート合成桁の断面耐力の向上には接合面のせん断耐力を確保し、床版と鋼桁が一体として機能することが重要である。筆者らはこのせん断耐力の向上に関する工法として、荷重により生じる水平せん断ずれと逆向きのせん断ずれを生じさせるような水平せん断応力を予め導入する「せん断プレストレス工法」を考案し、実際に数種の導入工法で製作した合成桁について、耐荷性状などの実験的研究を行った。その結果、これらの導入工法によって合成桁の水平せん断補強が可能となること、接合面全体のせん断破壊はせん断面全体の平均せん断応力がせん断強度に達したとき生じることなどを明らかにした。

**Key Words:** steel-concrete composite beam, pre-shearing stress, shear stress, horizontal shear gap

## 1. 研究の目的

現場作業の省力化や安全性向上、コンクリートの品質向上、工期短縮などの目的でプレキャストコンクリート床版を用いた鋼橋の新設工事や、既設損傷床版の取替工事などが行われている<sup>1)・2)</sup>。このような鋼とコンクリートの複合構造物では両者の一体化が重要であり、特にせん断力に抵抗するずれ止めの施工に工夫を要する。プレキャストコンクリート床版の製造にあたってはずれ止めを配置するための切欠きを設ける必要があり、極力ずれ止めの個数を減らすことが望ましい。特に桁端部付近ではせん断応力が大きく、切り欠き部に断面欠損を補うための補強が必要となるなどのプレキャスト床版特有の問題点も生じる<sup>3)</sup>。

プレキャスト床版用のずれ止めとしては、頭付きスタッド、円筒型金物<sup>4)</sup>などのジベル工法、高力ボルトによる摩擦接合法<sup>5)</sup>など多くの工法がある。そのうち断面欠損が最も少ない工法は高力ボルトによる方法である。

筆者らは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効率的な合成方法について実験的検討を行ってきた<sup>6)・9)</sup>。この実験において、合成桁に接合面がせん断すべりを生じるまで載荷し、除荷したのち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に比べて大きくなることが確認された。接合面の摩擦力

が一度限界に達しても、ボルトの締め付け力が維持されるために、せん断すべりを生じた以降も摩擦力は維持される。この現象は、せん断すべりが戻ろうとするときに生じた応力が、新たな荷重載荷に伴うせん断応力に抵抗する逆向きのせん断応力として、除荷後も残留したために生じたことが判明した。

筆者らは「荷重により生じる接合面のせん断応力と逆向きに、前もって導入されたせん断応力」を「せん断プレストレス」と名付け、せん断プレストレスを鋼・コンクリート合成桁に事前に導入することにより、接合面のせん断耐力の向上が可能と考えた。従来のはずれ止めの開発思想が「せん断力の分担による耐力の向上」に主眼が置かれているのに対し、本工法の思想は「前もって逆向きのせん断応力を貯える」ことによって、荷重によるせん断応力を相殺させ、ずれ止めが持つせん断耐力を有効に利用するところに主眼がある。

本論文はせん断プレストレスを用いた鋼・コンクリート合成桁接合面のせん断補強工法と、そのせん断補強効果について述べたものである。

## 2. せん断プレストレスの概念と導入方法

### (1)せん断プレストレスの概念

はりに作用するせん断力 $Q$ は、一般に、はり理論では図-1に示すようにモーメントの変化率  $dM/dx$  で表さ

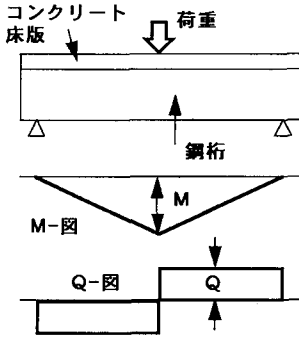
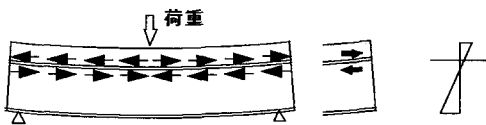


図-1 一点荷重された完全合成桁の曲げモーメントとせん断力



合成桁の挙動 接合面に生じるせん断力 ひずみ分布

図-2 荷重載荷に伴う接合面のせん断力の作用方向

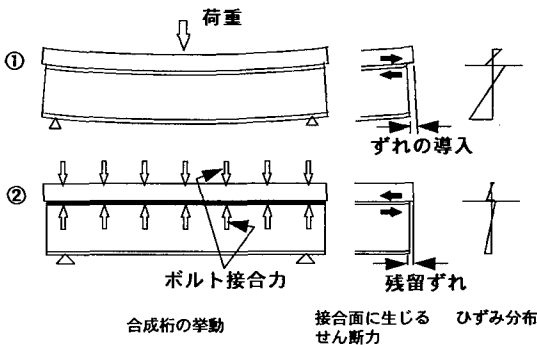


図-3 荷重載荷により予めずれを生じさせ、荷重を取り除いた合成桁の状態

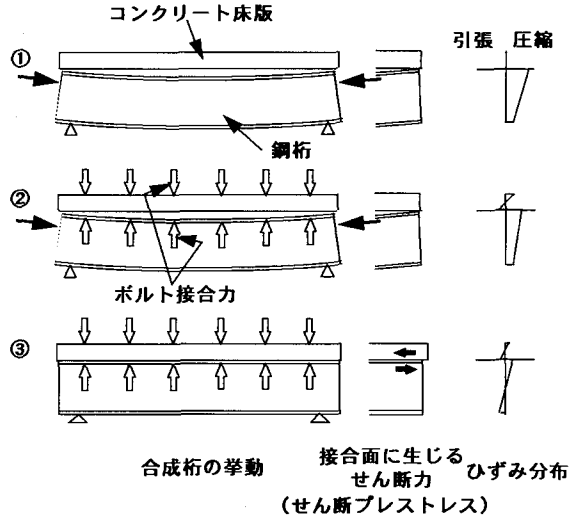


図-4 偏心軸圧縮力によるせん断プレストレスの導入方法(プレベンディング方式)

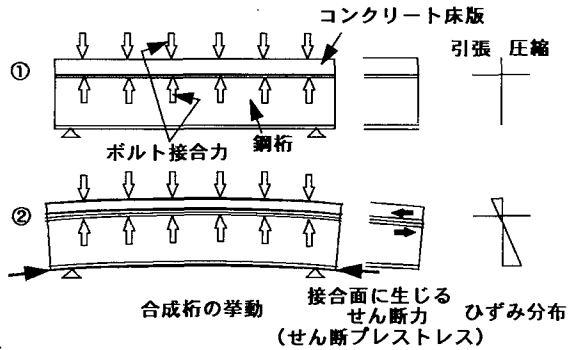


図-5 偏心軸圧縮力によるせん断プレストレスの導入方法(ポストベンディング方式)

れ、鉛直方向のせん断応力と同時に部材軸方向にも共役なせん断応力を生じさせる。鋼・コンクリート合成桁の接合面もこの共役なせん断応力が作用し、正の曲げに対して、図-2に示すように床版は外側に、鋼桁は内側にずれようとする。接合面のせん断応力がせん断強度を超えたとき、床版の端部は鋼桁の端部から張り出すようなずれを生じ、接合面は水平せん断破壊する。せん断プレストレスとは、このずれと逆向きのずれを生じさせる応力を予め接合面に生じさせたものである。

最も簡単なせん断プレストレスの導入方法として、図-3に示すような、床版と鋼桁を非合成の状態を下向きに曲げ、曲げを保持したまま合成したあと、荷重を取り除く方法がある。この場合、接合によりずれの戻りを拘

束することによって、荷重を上向きに作用させた場合と同様なせん断応力が接合面に残存することになる。したがって、載荷による鋼・コンクリート合成桁の水平せん断破壊は予め導入されたせん断応力分だけ遅れることになる。

## (2)せん断プレストレス導入工法の分類

鋼・コンクリート合成桁接合面へのせん断プレストレス導入方法をずれの形態から大別すると、「床版と鋼桁の合成前に予め接合面のずれを与えておき、ずれが戻ろうとする作用により生じる接合面のせん断応力を利用する方法」と「床版と鋼桁の合成後に軸方向力などの外力を作用させて、接合面に荷重作用時と逆方向のせん断応

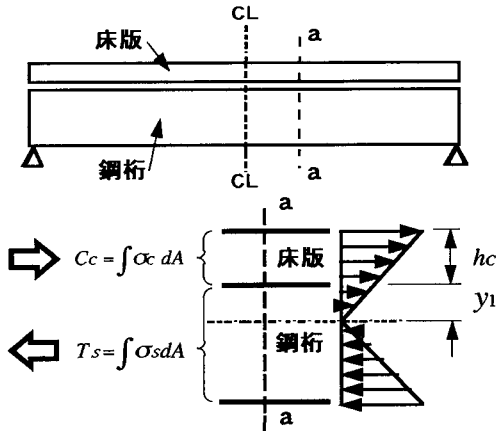


図-6 部材軸方向合応力の概念

力を発生させる方法」の2通りがある。接合面の合成作業前後に導入することから、以後、前者をプレベンディング方式、後者をポストベンディング方式と呼ぶことにする。また、ずれを与えるための外力の作用方向から大別すると、鉛直方向の荷重を利用した「曲げによる方法」と、軸力を利用した「偏心軸圧縮力による方法」とに分けられる。

これらの方法を組み合わせることによって、図-3に示した方法以外にも、さまざまなせん断プレストレスの導入方法が考えられる。代表的な工法例を以下に示す。

#### a) 偏心軸圧縮力による方法(プレベンディング方式)

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手順を図-4に示す。まず、合成前の鋼桁にP C鋼材などにより上方偏心の軸力を導入して鋼桁上縁に圧縮ひずみを与え、床版とのずれを生じさせる。次に、鋼桁と床版とを合成したのち軸力を解放する。偏心軸圧縮力の解放により鋼桁のひずみは戻ろうとするが、床版との合成によってずれが拘束されているので、接合面にせん断応力が貯えられることになる。

#### b) 偏心軸圧縮力による方法(ポストベンディング方式)

ポストベンディング方式によるせん断プレストレスの導入手順を図-5に示す。本工法は接合面を合成後、鋼桁下方にP C鋼材などを用いて偏心軸力を導入するもので、工法そのものは通常のプレストレス導入工法と何ら変わらない。ただし本工法で正のせん断応力に対して有効なせん断プレストレスを得るためには、軸力の導入によって鋼桁上縁が伸び、その伸びを床版が拘束するように偏心量とすることが必要である。なお、P C鋼材は曲げ上げを行ってもよい。この場合は定着部および偏向部に作用する緊張力の水平成分が軸力として、鉛直成分が鉛直方向の力として作用することになる。

### 3. せん断プレストレスによるせん断補強効果

#### (1) 用語

説明を進めるにあたって、図-6に示す合成桁の床版に作用する軸方向応力の和  $C_c$  を「床版軸方向合応力」と表現する。また、鋼桁に作用する軸方向合応力の和  $T_s$  を「鋼桁軸方向合応力」と表現する。

床版軸方向合応力は式(1)で表される。完全合成桁において、ひずみが弾性範囲内にあるときは、合成桁の床版軸方向合応力は軸力と曲げモーメントの関数として式(2)のように表される。

$$C_c = \int_{y_1}^{y_1+hc} \alpha_c dA \quad (1)$$

$$= \int_{y_1}^{y_1+hc} (\sigma_N + \sigma_M) dA$$

$$= \int_{y_1}^{y_1+hc} \frac{N}{A} dA + \int_{y_1}^{y_1+hc} \frac{M \cdot y}{I} dA$$

$$= \frac{N \cdot A_c}{A} + \frac{M \cdot G_c}{I} \quad (2)$$

ただし、 $C_c$ :床版軸方向合応力(圧縮を正とする)

$\alpha_c$ :床版の軸方向応力

$\sigma_N$ :軸力による応力

$\sigma_M$ :モーメントによる応力

$N$ :軸方向力

$M$ :曲げモーメント

$A$ :合成桁の断面積

$I$ :合成桁の断面二次モーメント

$A_c$ :床版の断面積

$G_c$ :床版の断面一次モーメント

#### (2) ずれ止めのせん断耐力の有効利用方法

図-7に頭付きスタッドに作用する荷重と頭部水平変位の関係の概念図を示す。ずれ止めに作用するせん断力と変形の関係を考えるとき、一般に正方向のみを表すが、このようなずれ止めでは左右いずれの方向からの荷重に対しても同じ耐荷性状を示す。ずれ止めの降伏荷重を  $F_y$  とする。通常、合成桁のずれ止めのせん断抵抗は  $F=0 \sim F_y$  の範囲だけを利用するが、せん断プレストレスを導入することにより  $F=-F_y \sim F_y$  の範囲のせん断抵抗を利用すれば、見かけ上、せん断耐力が最大で2倍になったに等しい補強効果が得られる。

また、一般にずれが発生するとずれ止めの降伏や、それに伴う周囲のコンクリートの局部破壊によってせん断剛性が低下するため、大きなずれ(0.075mm程度)が発生した点を破壊と考えている(図-7に示す点  $F_u$ )<sup>9)</sup>。

一方、高力ボルト接合をずれ止めに用いた場合、大きなずれを生じて周囲のコンクリートを破壊することはなく、すべり後も変形が許す限り再使用が可能である。

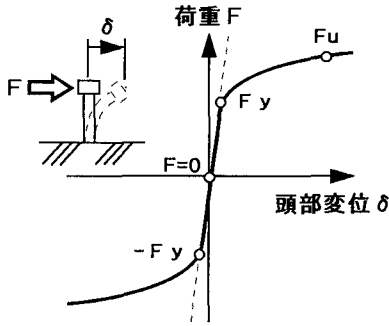


図-7 ずれ止めに作用する荷重と頭部水平変位の関係の概念図

### (3) 終局水平せん断時のせん断応力の計算

はり理論では、完全合成桁接合面のせん断応力  $\tau$  は式(3)のようなせん断力  $Q$  の関数として表される。

$$\tau = \frac{Q \cdot Gc}{I \cdot b} \quad (3)$$

ただし、 $\tau$ : 接合面のせん断応力

$Q$ : せん断力  
 $b$ : 接合面の幅

これに対し非合成桁では、床版と鋼桁は各々単独の部材として挙動するため、接合面のせん断応力は生じない。すなわち完全合成された桁の接合面から上に位置するコンクリート床版の圧縮合力  $C_{0x}$  は図-8に示す床版の水平方向の釣合いから、式(4)のように表される。

$$C_{0x} = \int_0^x \tau \cdot b \, dx \quad (4)$$

ただし、 $C_{0x}$ : 接合面のせん断伝達に伴う床版軸方向合応力

一方、接合面が不完全合成の場合、ずれと共にせん断応力の一部が消失する。断面  $x$  に残留するせん断プレストレスによる合応力  $C_{px}$  は、式(5)のように、すべてで消失したせん断応力による合応力損失分  $C_{bx}$  を  $C_{0x}$  から差し

$$C_{px} = C_{0x} - C_{bx} \quad (5)$$

引くことによって求められる。

$C_{px}$  の算出にはすべり量に対する損失せん断応力の定量化が必要となる。この値の理論的な算出は困難であるが、実験で得られた床版あるいは鋼桁のひずみを用いると概算は可能となる。

桁の断面力や応力の算出には一般にはり理論が使用されるが、はり理論では偏心軸圧縮力による曲げを純粋曲げに理想化して取り扱うが、偏心軸圧縮力によって桁端部の一点に応力が集中した状態から、純粋曲げの応力状態に移行する区間を考える必要がある。後述の図-13

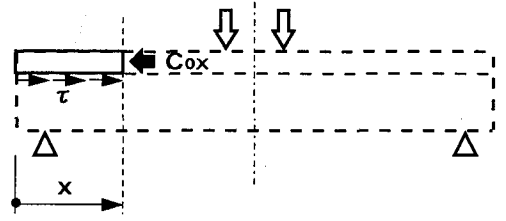


図-8 床版軸方向合応力と接合面せん断応力の釣合

に示すように、偏心軸圧縮力を桁に載荷した場合、接合面のせん断応力は純粋曲げ荷重にも関わらず、載荷点(桁端部)近傍にはせん断応力が生じている。この事象は高さを考慮した有限要素法による平面モデル解析などにより計算できる。このような偏心軸圧縮力を与えた後に、鉛直集中荷重を載荷すると、桁中央部の接合面からせん断強度に到達し、徐々にずれ面を桁端部に拡大しながら終局せん断に達する。終局時は接合面全体の平均せん断応力がせん断強度に達したときと考えられる。そこで、以下に水平せん断破壊時の平均せん断応力の算定式を定義する。

図-8に示すように、せん断面のせん断応力は床版(あるいは鋼桁)軸方向合応力と釣り合っているものとすると、水平せん断破壊時のせん断面全体の平均せん断応力と軸方向合応力の関係は式(6)で表される。

$$\tau_m = \frac{\int_0^l C_{px} \, dx}{A_v \cdot a} \quad (6)$$

ただし、 $\tau_m$ : 水平せん断破壊時のせん断面全体での平均せん断応力

$A_v$ : せん断面の面積

$a$ : せん断区間の長さ

式(6)におけるせん断面とは、水平せん断破壊時にずれを生じている接合面を指す。すなわち、図-8におけるせん断面は載荷点から桁端部に至る接合面となる。

## 4. せん断プレストレスを導入した鋼・コンクリート合成桁の載荷試験

### (1) 鋼・コンクリート合成桁供試体

鋼・コンクリート合成桁供試体の形状を図-9に示す。鋼桁の材質はSS400であり、表面は塗装などの処理を行わず、油脂などが付着しないよう注意しながら黒皮のまま使用した。プレキャスト床版は設計基準強度50MPaの工場製品であり、PC鋼棒を用いてポストテンション方式で部材軸方向にプレストレスを導入し、グラウトを施した。プレストレス導入によるコンクリート応力は4MPaである。床版と鋼桁の間は、型枠を設置したのち、床版に設けた充填孔より、超早強性無収縮モル

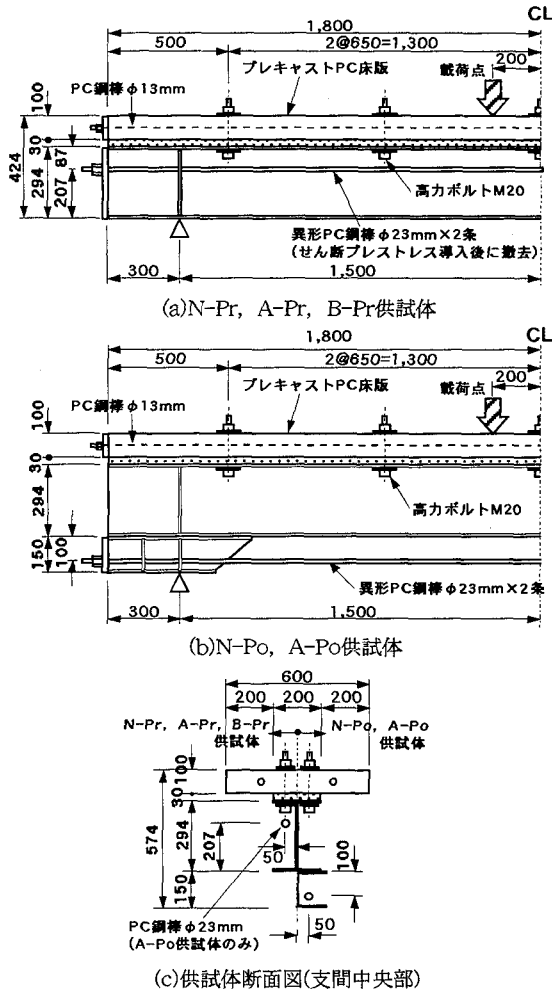


図-9 鋼・コンクリート合成桁供試体の形状

タルを水頭差約1mをかけて充填した。無収縮モルタルの28日圧縮強度は45MPaであった。

ずれ止めには高力ボルトによる摩擦接合法を用いた。ボルトの本数はせん断面の挙動が確認でき、かつ、曲げ破壊に先行して確実にずれ破壊が生じるよう、せん断支間片側当たり4本とした。高力ボルトの軸力は頭部に埋め込んだボルトゲージのひずみにより管理した。高力ボルトには無収縮モルタルとボルトの付着を防止すると同時に、ずれに伴うダウエル効果の発生を防止する目的で予め厚さ約7mmのウレタンを巻きつけた。ボルトは無収縮モルタル打設前に挿入し、無収縮モルタルの充填・硬化ののち軸力140kNで締め付けた。モルタルのクリープ・レラクセーションなどによりボルト軸力は約15%低下し、載荷試験時の軸力は約120kNであった。

図-10に高力ボルトにより摩擦接合した二面せん断

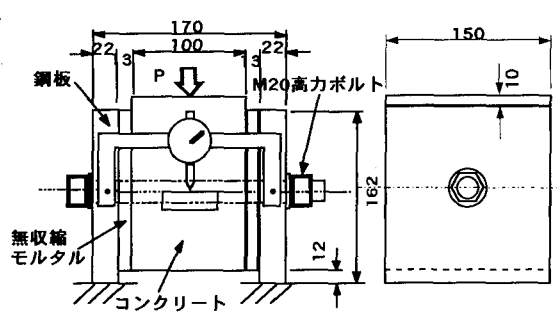


図-10 高力ボルトにより摩擦接合した二面せん断供試体の形状

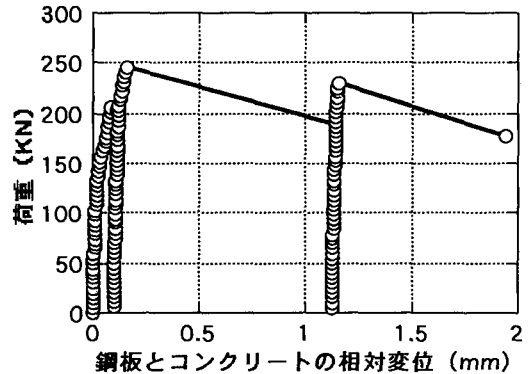


図-11 静的二面せん断試験時の荷重と鋼板～コンクリート間の相対変位の関係

供試体の形状を示す。鋼板の表面処理状態、およびウレタンの厚さは合成桁供試体と同一であり、ボルトの軸力は試験直前の桁の接合力120kNに調整してある。載荷は油圧ジャッキを用いて変位制御により行った。

図-11に二面せん断試験における3サイクルの載荷に対する荷重とせん断面の相対変位の関係の一例を示す。2サイクル目の載荷では、約245kNのとき瞬時に1mm近いずれを生じ、荷重が約20%程度減少した。3サイクル目では約230kNですべりを生じ、2サイクル目と同じ割合で荷重低下した。このように、高力ボルトによる摩擦接合法は一度すべりを生じても再度繰返し使用できる点に特徴を有する<sup>9)</sup>。

## (2)せん断プレストレスの導入

各供試体のせん断プレストレス導入条件を表-1に示す。供試体名のNはノンプレストレス、Aは偏心軸圧縮力、Bは曲げによるせん断プレストレスの導入を意味する。また、Prはプレベンディング方式、Poはポストベンディング方式を表す。

A-Pr供試体、N-Po供試体、A-Po供試体は2章(2)

表-1 せん断プレストレス導入条件

供試体名	せん断プレストレス		導入軸力 (kN)	導入曲げ荷重 (kN)	導入した床版軸方向合応力の計算値(kN)	
	導入方式	導入工法			支間中央部	桁端部
N-Pr	-	-	0	0	0	0
A-Pr	フレベンディング方式	偏心軸圧縮力	300	0	-118	-118
B-Pr	フレベンディング方式	曲げ	0	75	-139	0
N-Po	ポストベンディング方式	偏心軸圧縮力	10	0	-5	-5
A-Po	ポストベンディング方式	偏心軸圧縮力	287	0	-137	-137

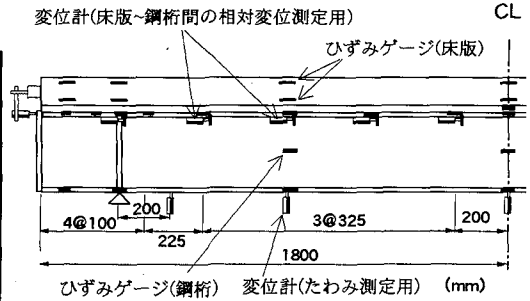


図-12 変位計取付・ひずみゲージ貼付位置

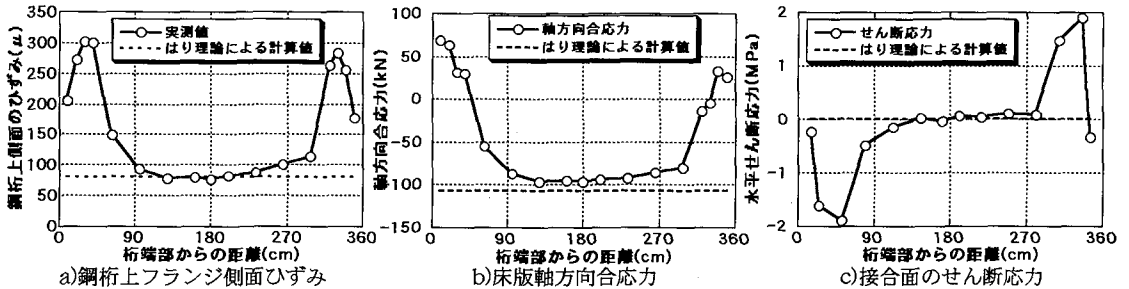


図-13 A-Pr供試体せん断プレストレス導入時の鋼桁上フランジひずみ・床版軸方向合応力・せん断応力の分布状態

に示した方法により、総ネジ異形PC鋼棒φ23mm×2本を用いてせん断プレストレスを導入した。B-Pr供試体は曲げ荷重を載荷したまま、M20ボルト4本により、鋼桁を反力ビーム(H鋼400×400)に固定し、床版と鋼桁を合成したのち、反力ビームに固定したボルトを緩め、せん断プレストレスを導入した。なお、N-Po供試体の導入軸力10kNは、A-Po供試体と曲げ剛性を合わせるために行ったもので、せん断プレストレスの導入を目的としたものではない。

### (3) 荷重試験方法

支間3mの合成桁の支間中央部から20cmの位置に2点集中荷重を載荷した。

N-Pr供試体、A-Pr供試体、B-Pr供試体の変位およびひずみの測定位置を図-12に示す。

荷重は3サイクルとし、①使用限界内、②使用限界程度、③終局状態を想定し、下記手順により実施した。

- ①0kN→100kN→除荷
- ②0kN→200kN→除荷
- ③0kN→明らかなせん断すべりを生じるまで

## 5. 試験結果および考察

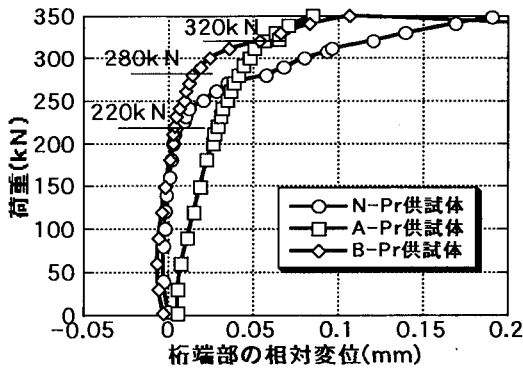
### (1) 軸力によるせん断プレストレス導入時の軸方向合応力とせん断応力の分布

A-Pr供試体のせん断プレストレス導入時の鋼桁上フランジ側面の実測ひずみ、および、それより算出される床版軸方向合応力・接合面のせん断応力の各分布状態を図-13に示す。

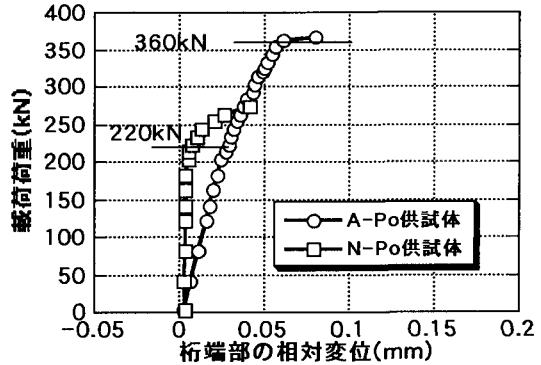
支間中央部付近の各値ははり理論による計算値とほぼ等しくなっており、計算通りのプレストレスが導入されていることがわかる。このときの荷重状態は純曲げであり、はり理論では床版軸方向合応力とせん断応力は桁全長にわたって一定となる。ところが、いずれの結果も支間中央部付近(90~270cm)では純曲げの状態となっているが、桁端部付近ではその分布が大きく変化していることが読み取れる。これは3章(3)で述べたように、桁端部から90cm、270cmから桁端部の区間が応力集中状態から純粋曲げの応力状態に変化する区間となっていることを示すものである。

### (2) せん断プレストレス導入による終局水平せん断破壊荷重の変化

図-14に各供試体の桁端部における床版~鋼桁間の相対変位を示す。荷重載荷に伴う相対変位は各供試体と

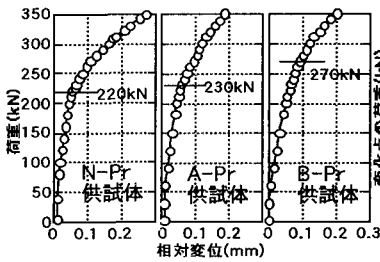


a) N-Pr供試体, A-Pr供試体, B-Pr供試体

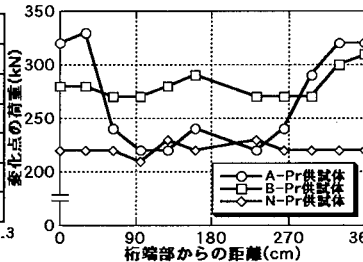


b) N-Po供試体, A-Po供試体

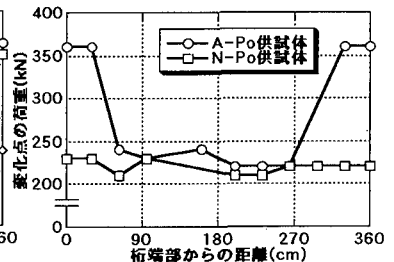
図-14 各供試体の載荷荷重と桁端部相対変位の関係



a) 桁端部から90cm位置の荷重と相対変位の関係



b) プレベンディング桁の相対変位変化点分布



c) ポストベンディング桁の相対変位変化点分布

図-15 載荷による接合面の相対変位変化点荷重の分布

もほぼ線形に増加したのち、ある荷重以後は荷重増分に対する変位が急激に増加する傾向を示す。高力ボルトを用いた摩擦接合の場合、図-11に示したように、接合面のせん断応力がせん断強度に達した時点で大きなずれを生じる。この荷重は桁端部が大きなずれを生じ始めた荷重であり、載荷状態を考慮すれば、接合面のずれは載荷点から桁端部に及ぶと考えられる。そこで、桁端部のずれが急激に増加し始めた状態において、接合面は終局水平せん断状態に達したとみなし、支間中央に対して左右いずれかの桁端部が終局に達したときの荷重を終局水平せん断荷重とした。

せん断プレストレスを導入した供試体の終局水平せん断破壊荷重はこれを導入していない供試体に比べて大きく、せん断プレストレスによる終局水平せん断補強効果が確認できる。

### (3) 接合面の相対変位の変化

図-15に載荷による接合面の相対変位変化点荷重の分布を示す。

N-Pr供試体、A-Pr供試体、B-Pr供試体の桁端部から90cm位置における荷重と床版・鋼桁間の相対変位の関係を図中a)に示す。荷重載荷に伴う相対変位は桁端部

の場合と同様に、初めはほぼ線形に増加し、ある荷重以降、荷重増分に対する変位が増加する傾向を示す。この変化点は測定位置で接合面のせん断応力がせん断強度に達し、ずれを生じ始めた荷重と考えられる。

各供試体の各測点におけるこの相対変位変化点荷重を求め、測点位置との関係を図中b)、c)に示す。図中、ずれが明瞭に表れなかった点は、いずれも鉛直荷重載荷点近傍であり、応力集中による摩擦耐力の向上によってずれが拘束されたものと推測される。

曲げによりせん断プレストレスを導入したB-Pr供試体ではN-Pr供試体に比べて相対変位変化点の荷重が全体的に向上しており、載荷荷重に対するせん断ずれの開始が接合面全体で遅れたことがわかる。

偏心軸圧縮力によりせん断プレストレスを導入したA-Pr供試体、A-Po供試体の相対変位変化点の荷重は桁端部付近が大きくなっているのに対し、桁端部から90~270cmの区間ではせん断プレストレスを導入していないN-Pr供試体、N-Po供試体とほぼ等しくなっている。これは任意断面間のせん断応力がせん断強度に到達したとき、その区間の接合面にずれが生じることを示し、同時に、局部的なずれの発生が直ちに接合面全体の破壊を引き起こさないことを示している。

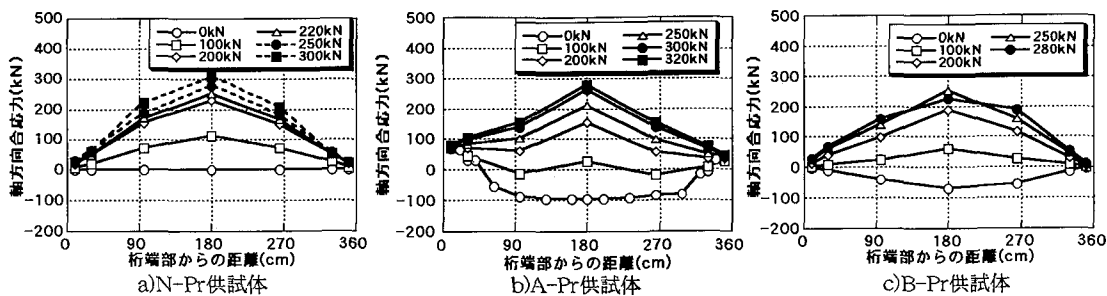


図-16 N-Pr供試体・A-Pr供試体・B-Pr供試体の床版軸方向合応力分布の変化

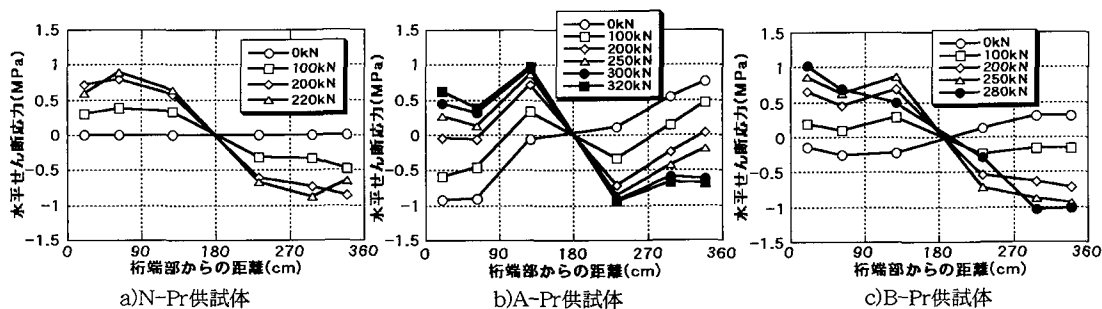


図-17 N-Pr供試体・A-Pr供試体・B-Pr供試体の接合面せん断応力分布の変化

#### (4)床版軸方向合応力と接合面のせん断応力の変化

図-16にN-Pr供試体、A-Pr供試体、B-Pr供試体 載荷時の床版ひずみから求めた床版軸方向合応力分布を示す。 図中、荷重0kNにおけるせん断プレストレス導入供試体の床版軸方向合応力は、A-Pr供試体が鋼桁ひずみから求めた値、B-Pr供試体は床版ひずみから求めた値を記している。 図-17に図-16の床版軸方向合応力分布から求めた接合面のせん断応力分布を示す。 なお、せん断応力は床版ひずみ測定点間の平均せん断応力であり、A-Pr供試体の0kNにおけるせん断応力は、床版のせん断応力算定位置に合わせるため、図-13(b)の床版軸方向合応力分布から、床版ひずみ測定点間の合応力差を求め、これを床版ひずみ測定点間の接合面積で割って求めた平均せん断応力である。

A-Pr供試体の桁端部から130cm・230cm付近のせん断応力は、荷重250kNで約0.8MPaに達した以降、ほとんど増加していない。これは局所的な接合面のずれによるものと推察される。これに対して、桁端部付近のせん断応力は終局水平せん断荷重まで増加し、せん断応力が約0.7MPa前後となった時点で終局を迎えている。

B-Pr供試体の荷重載荷に伴う各荷重毎のせん断応力は、終局に至る以前まで、導入された初期せん断応力にN-Pr供試体のせん断応力を足し合わせた値に近似している。また、終局水平せん断状態となる直前のせん断支間内のせん断応力はN-Pr供試体とほぼ等しく、導入さ

れた初期せん断応力だけ荷重載荷に伴うせん断応力が減殺されたことがわかる。

終局水平せん断荷重における、せん断プレストレスによる初期せん断応力と載荷によるせん断応力を足し合わせたせん断応力は、いずれの供試体もおおよそ0.7~1.0 MPa程度となっている。

#### (5)水平せん断破壊時のせん断面全体の平均せん断応力

表-2にN-Pr供試体、A-Pr供試体、B-Pr供試体の水平せん断破壊時のせん断面全体の平均せん断応力を示す。これは図-16の各測点での部材軸方向合応力を桁端部から載荷点まで積分し、式(6)に代入して求めたものである。

荷重による水平せん断破壊時のせん断面全体の平均せん断応力は、N-Pr供試体、A-Pr供試体、B-Pr供試体の順に各々0.75、1.10、0.95MPaである。これにせん断プレストレス導入時の床版軸方向合応力分布から求められるせん断面全体の平均せん断応力各々0、-0.30、-0.20 MPaを足し合わせると、終局水平せん断時の荷重が異なるにも関わらず、終局水平せん断時のせん断面全体の平均せん断応力はいずれの供試体も0.75~0.80 MPaとほぼ等しくなった。

#### (6)終局水平せん断荷重の実測値と計算値の比較

偏心軸圧縮力によりせん断プレストレスを導入した合



表-2 プレベンディング方式によりせん断プレストレスを導入した各供試体の実測ひずみから求めた水平せん断破壊時のせん断面全体の平均せん断応力

	終局水平せん断時の荷重(kN)	荷重によるせん断面全体の平均せん断応力(MPa)	せん断プレストレス導入時のせん断面全体の平均せん断応力(MPa)	足し合わせた平均せん断応力(MPa)	N供試体との平均せん断応力差(MPa)
N-Pr供試体	220	0.75	0.00	0.75	-
A-Pr供試体	320	1.10	-0.30	0.80	0.05
B-Pr供試体	280	0.95	-0.20	0.75	0.00

表-3 終局水平せん断荷重の実測値とはり理論から求めた近似解の比較

	①終局水平せん断荷重実測値(kN)	②荷重P=220kN時の荷重によるCcの計算値(kN)		③せん断プレストレスによるCpsの計算値(kN)		④終局水平せん断時の $\tau_m$ の計算値(kN)	⑤④から求めた終局水平せん断荷重(kN)	⑥実測値と計算値の比(⑤/①)
		載荷点	支点上	載荷点	支点上			
N-Pr供試体	220	408	0	-	0	0.638	220	-
A-Pr供試体	320	408	0	-118	-118	1.006	347.4	1.09
B-Pr供試体	280	408	0	-139	0	0.855	295.0	1.05
N-Po供試体	220	348	0	-5	-5	0.559	220	-
A-Po供試体	360	348	0	-137	-137	0.972	383.0	1.06

成桁の床版軸方向合応力分布をはり理論によって算出した場合、床版軸方向合応力分布の計算値は図-13(b)に示すように、桁端部付近で実測値と大きく異なるが、支間中央部付近では実測値とほぼ一致する。床版軸方向合応力が接合面のせん断応力の積分値になることを考慮したとき(式(4)参照)、はり理論における偏心軸圧縮力を導入した合成桁の接合面のせん断力は全て桁端部断面で伝達することになる。床版軸方向合応力分布の実測値とはり理論による計算値が大きく異なるのは桁端部に限られるから、床版軸方向合応力をせん断区間長で積分した値の計算値と真値の差は、桁長が長くなるほど小さくなる。

このように考えれば、はり理論に基づき床版軸方向合応力を式(2)から求め、式(6)に代入することにより水平せん断破壊時のせん断面全体での平均せん断応力の近似解が求められ、これから終局水平せん断荷重の近似解が計算できる。

理論計算により終局水平せん断荷重を計算するには、接合面のせん断強度を知る必要がある。せん断プレストレスを導入していないN-Pr供試体、およびせん断プレストレスをほとんど導入していないN-Po供試体の終局水平せん断荷重から求めた水平せん断応力は、接合面のせん断強度に相当するとみなされる。

計算値と実測値の比較を表-3に示す。なお、ポストベンディング桁の荷重220kNによる床版軸方向合応力Ccの値は、A-Po供試体と剛性を等しくするために導入したN-Po供試体の緊張力10kNの影響を差し引いている。A-Pr供試体、B-Pr供試体、A-Po供試体の終局水平せん断荷重の計算値は、各々347kN、295kN、383kNと求められた。計算荷重に対する実測荷重の比(計

算値/実測値)は各々1.09、1.05、1.06となり、計算値と実測値は近い値となっている。

## 6. 結論

本研究では、鋼・コンクリート合成桁接合面のせん断補強工法として、荷重によるせん断応力と逆向きのせん断応力を導入することにより、ずれ止めのせん断耐力を有効に活用することを目的としたせん断プレストレス工法を開発し、その基礎的な理論とともに、実験によりその性状を確認した。本研究の範囲内で得られた結論は以下のとおりである。

- ①鋼・コンクリート合成桁へのせん断プレストレス導入により、鋼・コンクリート合成桁の終局水平せん断破壊荷重を高めることができる。
- ②せん断プレストレスは接合面にあらかじめずれを与える方法、または外力によって接合面に載荷時と逆のせん断応力を発生させる方法で導入することができる。
- ③桁端部に偏心軸圧縮力を作用させてせん断プレストレスを与えた場合の接合面のせん断応力は桁端部付近に集中して貯えられ、支間中央部付近の接合面のせん断応力はほぼゼロとなる。
- ④荷重載荷による鋼・コンクリート合成桁接合面の局部的なずれ開始荷重の分布は、せん断プレストレスの導入方法によって異なる。曲げによってせん断プレストレスを導入した場合、全体的にずれ開始荷重が大きくなるのに対し、偏心軸圧縮力によってせん断プレストレスを導入した場合、支間中央部付近のずれ開始荷重はせん断プレストレスを導入していない桁と変わりなく、桁端部付近のずれ開始荷重が大

きくなる。

- ⑤せん断プレストレス導入による初期せん断応力と載荷によるせん断応力を足し合わせた水平せん断破壊時のせん断面全体のせん断応力は、せん断プレストレス導入の有無・導入方法に関わらずほぼ一定の値となる。
- ⑥偏心軸圧縮力によりせん断プレストレスを導入した場合の終局水平せん断破壊荷重の実測値は、はり理論により求めた床版軸方向合応力を用いた近似解に近い値となった。

本実験におけるせん断プレストレス導入工程には特に問題はみられなかったことから、今後、さらに実橋における施工の研究を行うことにより、本研究で提案したせん断プレストレスによる鋼・コンクリート合成桁接合面のせん断補強工法は実用化可能と考えられる。

#### 参考文献

- 1) たとえば、寺田光太郎、曾田信雄、伊藤正人、真鍋英規：チャンネル形状プレキャストPC床版の鋼橋への適用，第4回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，pp.171~176，1994。
- 2) たとえば、加藤敏士、中原秀文、吉田光秀：プレキャストPC床版を用いた松浜橋床版打ち替え工事，第6回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，pp.187~190，1996。
- 3) 菅野昇孝：大きな断面欠損を有するプレキャスト床版の曲

- げ性状，第44回年次学術講演会講演概要集，V，pp.36~37，1989。
- 4) 久野公徳，中村修，松下博通：締結式ボックスジベルのせん断耐力に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集第15巻2号，pp.1061~1066，1993。
- 5) 山崎竹博，出光隆，宮川邦彦，金成珠：鋼・コンクリート間の摩擦力をずれ止めに応用した合成桁に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集第11巻1号，pp.627~632，1989。
- 6) Viest,I.M.:Investigation of stud shear for composite concrete and steel T-Beams, *Journal of American Concrete Institute*, pp.857~891, April 1956.
- 7) 曾田範宗:摩擦の話，岩波新書(青版)791，1971。
- 8) Timoshenko,S.and Young:*Elements of strength of materials*, D.Van Nostrand Company INC., Princeton, New Jersey.
- 9) 徳光卓，山崎竹博，出光隆，左東有次：プレストレスが鋼コンクリート合成桁の水平せん断耐力に及ぼす影響，第6回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，pp.119~124，1996。
- 10) 日本道路協会:道路橋示方書・同解説，I共通編/II鋼橋編/IIIコンクリート橋編，1996。
- 11) 土木学会関西支部：プレキャスト床版合成桁橋の設計と施工，1987。
- 12) P P C S協会：P P C S工法設計施工基準(案)，1987。
- 13) 中井博：プレキャスト床版合成桁橋の設計・施工，森北出版(株)，1988。

(1997.4.25 受付)

## REINFORCING METHOD FOR SHEARING FORCE AT THE JOINT OF STEEL-CONCRETE COMPOSITE BEAM WITH PRE-SHEARING STRESS

Suguru TOKUMITSU, Takehiro YAMASAKI and Takashi IDEMITSU

To increase the ultimate shearing force of the joint such as steel-concrete composite beam, the unity of the jointed surface of both members must be ensured. The authors invented Shear prestress method to realize this performance of joint. This method has a characteristic to introduce a pre-shearing stress along the joint for the reverse direction of the shearing stress by loading. From the experiments on composite beams with some different types of pre-shearing stress, the increment of ultimate shearing stress was verified as expected. Shear prestressing method was found to be effective. Furthermore, critical condition of shear failure of the joint was made clear to break out at the loading level that mean values of shearing stress distribution along the connection reach at the shearing strength of the joint.