

(65) 外ケーブルにより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

水平せん断耐力とその性状

九州工業大学大学院	正会員	○徳光 卓
九州工業大学 設計生産工学科	正会員	出光 隆
九州工業大学 設計生産工学科	正会員	山崎 竹博
(株)富士ピー・エス 本店技術部	正会員	村上 忠彦

1. はじめに

現在、施工の省力化や工期短縮、安全施工、耐久性の向上などを目的として、鋼橋床版にプレキャストPC床版を用いる施工事例が増加しているが、現行の設計・施工基準を用いた場合、現場打ち床版に比べてコスト高になるなどの問題点も指摘されている。

中井らの研究¹⁾によれば、橋軸直角方向、橋軸方向双方にプレストレスを導入したプレキャスト床版の疲労耐力は通常の荷重よりも高いレベルにあり、疲労破壊は生じないと言われていること、また、非合成桁で主桁間隔を広くとった場合には桁高が高くなることなどから、鋼・PC床版合成桁を用いて経済性・美観性の向上を図るのも一つの方策である。しかし、合成桁の主桁本数を減らした場合には、床版と鋼桁界面の水平せん断力が大きくなるため止め装置の数が増加し、床版の断面欠損も大きくなることから、プレキャスト床版の使用には工夫が必要になる。

筆者らは床版と鋼桁界面の荷重による水平せん断力と逆向きの水平力を予め導入して、水平せん断力に抵抗させる「せん断プレストレス工法」を考案し、研究開発を行ってきた。本報告では、従来の曲げに対するプレストレスがせん断プレストレスに及ぼす影響を考慮して解析する方法を試み、曲げに対するプレストレスと同様な方法によってもせん断プレストレスが導入可能であることを、実験と解析によって確認した。

2. プレストレスが水平せん断耐力に及ぼす効果

梁に働く曲げモーメントMとせん断力Qには $dM/dx = Q$ の関係があり、Qが作用する区間にはQ方向及びこれと直角方向に共役なせん断応力 τ が作用する。このせん断応力は一般に図-1のような荷重による曲げモーメントMを受ける梁の微小区間の断面図を用いて説明される²⁾。図-1(b)に示されるとおり、距離dxを隔てた2断面と、中立軸に並行に距離dyを隔てた2層が切り取る要素の鉛直面にせん断力 τ が働くとき、これと釣りあうべき水平せん断応力として τ' が計算される。

さて、この梁を合成梁と考え、中立軸からの距離 y_1 より上の部材を部材a、下の部材を部材bとしたと

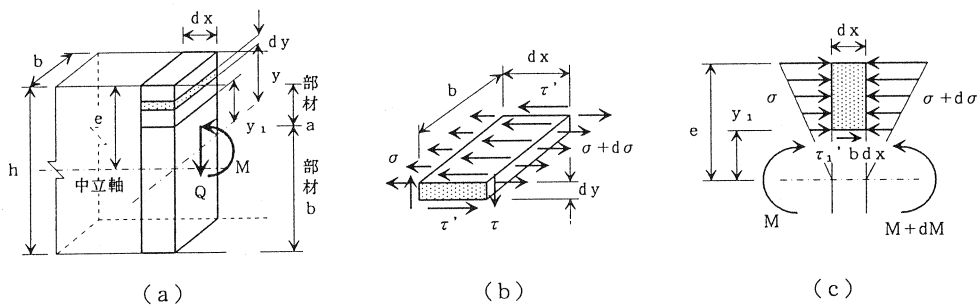


図-1 荷重による水平せん断力の発生原因

き、距離 dx だけ離れた断面の間にモーメント差 dM があれば、図-1(c)のように中立軸から y だけ離れた層では $d\sigma$ の応力差、すなわち水平力の差を生ずることになるから(1)式が成り立つ。また $y = y_1 \sim e$ 間の釣り合いが要素下面の水平せん断力 $\tau_1' \cdot b dx$ によって釣りあうことから、一般的な水平せん断の式(2)が導かれる。この式は隣接する断面間の水平力差がない、偏心軸圧縮力による等モーメントを受ける梁には水平せん断力が生じないことを示している。

$$d\sigma = \frac{dM}{I} y \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\tau_1' = \frac{Q}{I b} Ga \quad \dots\dots\dots (2)$$

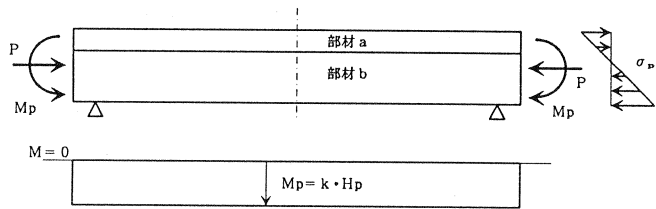
ただし、 Ga : 断面一次モーメント = $\int_{y_1}^e y dA$

図-2に部材 a、b の二種の部材からなる合成梁に (a) 下方偏心プレストレスを導入した場合、(b) 支間中央付近に荷重を二点载荷した場合のモーメント分布を示す。前述のとおり、断面内に生じた軸方向の応力の合力はすなわち水平力であるから、(a) の状態ではモーメントの分布形状は水平力の分布状態と一致していると言える。しかしながら、部材 a、b での応力度の合力(水平力)はそれぞれ逆向きのベクトルとなることは明らかである。

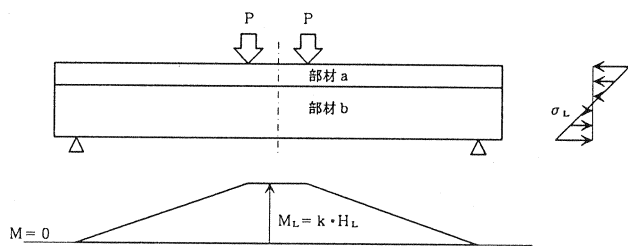
したがって、部材 a、b 間の接合力が弱い場合には隣接断面がない梁端部よりずれが生じ、接合力が梁の全長にわたって一定であれば、瞬時にずれが梁全体へ及ぶことになり、図-3の様なずれ性状を生じる。これは有限な長さを有する実際の梁においては、いわゆるはり理論による水平せん断力だけでなく、平面問題としての水平力の釣り合いも考慮する必要があることを示している。

(梁が無限な長さ、または端部が剛結されている場合は除く)

次に、一般的な問題として図-2(b)のような合成梁に荷重を载荷したときの水平せん断力について考える。図-4にプレストレスを導入した合成桁に载荷した場合の部材 a の水平力分布を示す。部材 a、b 接合面に作用する水平力は、部材が圧縮応力を生じているときには伸びの方向に、引っ張り応力を生じているときには縮みの方向に作用する。図ではこれを $H = 0$ の線に向かうベクトルとして表している。



(a) プレストレスによるモーメント



(b) 荷重载荷によるモーメント

図-2 合成部材の応力度とモーメント分布状態

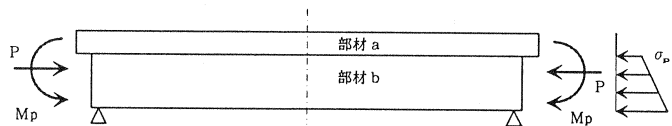


図-3 接合力が弱い合成桁の等モーメント条件下でのずれ破壊

図-4 (a) は荷重による支間中央付近の水平力がプレストレスによる水平力に達していない状態である。このとき、せん断スパンにおいては隣接断面間のモーメント差が生じるから、水平せん断力が生じることになる。ここで着目すべきは合成応力度が負であるときはまた水平力も負に働き、 $H = 0$ に向かう水平力によって生ずる水平せん断力の向きは、荷重のみによる場合と逆に支間中央側に向かって働くことである。

図-4 (b) の状態では、支間中央近傍で圧縮力が卓越し梁端部方向に向かう水平せん断力を生ずるが、支点付近では引っ張り応力が残存しているから、この支間中央方向に向かう水平せん断力も同時に作用することになる。

プレストレスを導入していない状態での接合面の単位面積あたりせん断強度を f_{vbo} とすれば、プレストレスを導入したときの終局水平せん断力 τ は図-4 (b) から導かれるつりあい式 (3) により (5) 式のように求められる。

$$H_{vbo} = \tau \cdot b (L_v - x) - \tau \cdot b \cdot x \quad \text{----- (3)}$$

(3) 式に $H_p + \tau \cdot b \cdot x = 0$ を代入すると

$$H_{vbo} = (L_v + 2 H_p / \tau \cdot b) \tau \cdot b = L_v \cdot \tau \cdot b + 2 H_p \quad \text{----- (4)}$$

(4) 式を変形すると

$$\tau = (H_{vbo} - 2 H_p) / (L_v \cdot b) \quad \text{----- (5)}$$

ただし、 H_{vbo} : プレストレスを導入していない合成桁の水平せん断耐力和 = $f_{vbo} \cdot b \cdot L_{bo}$ (kgf)

L_{bo} : せん断耐力面の長さ (載荷点～桁端部までの距離) (cm)

τ : 終局水平せん断力 (kgf/cm²)

L_v : せん断支間 (cm)

b : 部材幅 (cm)

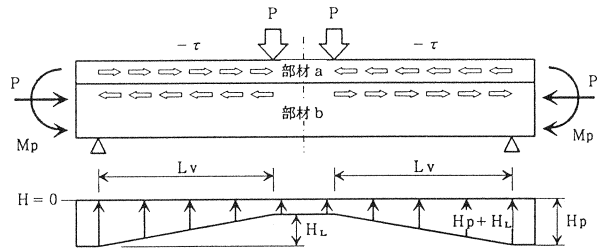
x : 負のせん断力が作用する長さ (図-4 b 参照) (cm)

ここで、 H_p は合成部材にプレストレスを導入したときの発生応力度と、これが非合成部材となったときの応力度との差から求まる部材 a の水平抵抗軸力量 (単位 kgf) であり、以後、これを水平せん断力に抵抗するプレストレス力の意味で「せん断プレストレス力」と定義する。

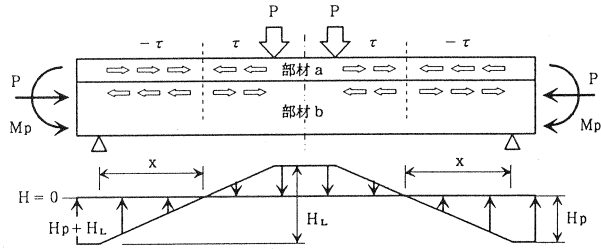
ここではせん断力の観点から検討したが、ひずみエネルギーから計算を行なっても同様の結果が得られる。

3. 実験の概要

図-5 に供試体の概要を示す。プレストレスは鋼桁の下縁より下側10cmの位置に異形 P C 鋼棒 $\phi 23$ mm を用いて床版と鋼桁の接合後に導入する。導入力は供試体 NO. 1、NO. 2 で各々 30tf、2tf である。鋼桁と床版の隙間は30mm として早強性無収縮モルタルを片押しで水頭差により圧入し、硬化ののち高力ボルト F10T $\phi 20$ mm により摩擦接合した。締付け軸力は 5 tf、目標残存軸力を 3.5tf として、せん断プレストレスの影響が明ら

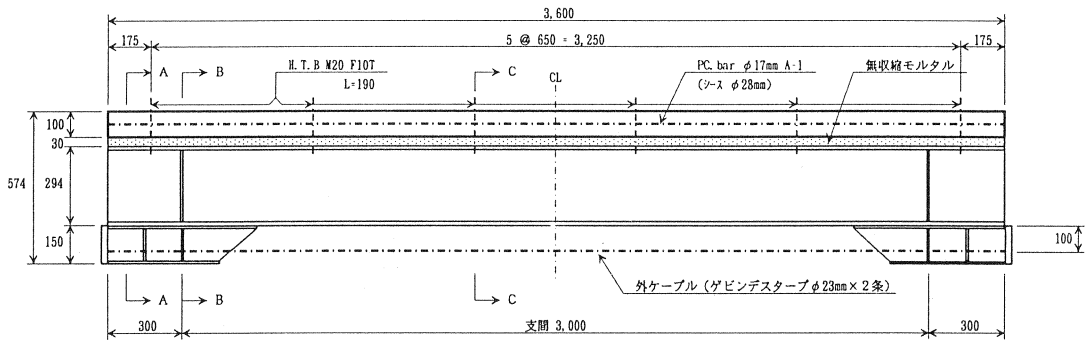


(a) デコンプレッションモーメント以前の状態

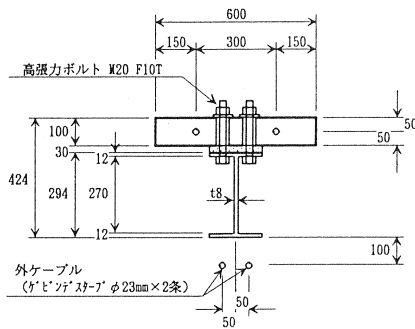


(b) デコンプレッションモーメント以後の状態

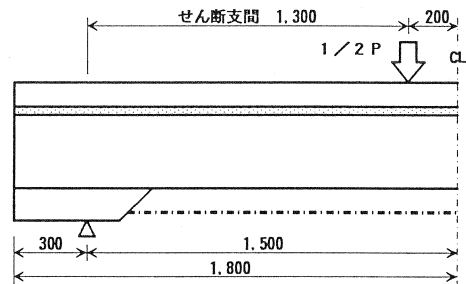
図-4 部材 a における水平力の分布状態



(a) 側面図



(b) 支間中央部断面図



(c) 荷重位置図

図-5 供試体の概要

かになるよう、通常の締付力 15tf に比べて小さな値とした。荷重は支間中央部から左右200mmの位置に二点集中で静的荷重した。供試体の断面および外ケーブルにはストレインゲージを貼付してひずみを測定し、変位計により桁のたわみおよび床版と鋼桁間のずれを測定した。

4. 実験の結果と考察

実験に先立ち鋼板と無収縮モルタル接合部の二面せん断試験を実施した。図-6に鋼板表面をショットブラスト処理した場合のせん断力～軸力の関係を示す。せん断面は 10cm×10cmである。この図から読み取れる接合力Nとせん断耐力 f vk の関係は(6)式で表される。

$$f vk = 0.61N + 29.2 \quad (6)$$

f vk : せん断耐力(kgf/cm²)、N : 接合力(kgf/cm²)

合成桁供試体の実測平均接合力は6.8kgf/cm²であり、(6)式より f vk = 33.3kgf/cm²と求まる。表-1に合成桁供試体の荷重試験結果を示す。終局はいずれも合成桁界面の水平せん断破壊である。

供試体 NO.2のプレストレス 2tf を考慮すれば、(4)式からプレストレスを導入しない状態での接合面せん断耐力 f vbo = 15.3tgf/cm²が求まる。実測値は二面せん断試験の結果から得られた計算値に比べて約1/2程度の耐力となっているが、これまでの実験結果³⁾では通常の軸力を導入した場合、比較的良好な整合性が得られていることから、実験の接合力程度では(6)式の粘着力に比べて摩擦項が小さくなり過ぎ、後述するような、ずれが進行しながら破壊する場合、粘着力が切れたあと、動摩擦耐力が期待できないほど小さ

くなるためと推定される。

供試体 NO. 2から推定したプレストレスを導入しない状態での接合面せん断耐力 $f_{vbo} = 15.3 \text{ kgf/cm}^2$ を用いて、(5)式により終局水平せん断力を計算すると $\tau = 30.0 \text{ kgf/cm}^2$ 、最大せん断すべり荷重 $P = 47.4 \text{ tf}$ が求まり、実験値とよく整合する。

図-7に供試体 NO. 1の載荷荷重変化に伴うせん断支間中央部断面のひずみ変化を示す。載荷の初期はひずみの線形性が保たれており、完全合成桁として挙動しているが、載荷途中から接合面ひずみが不連続となっており、不完全合成桁の挙動を示していることから、終局水平せん断破壊以前にこの断面のずれが生じたと推察される。

図-8に供試体の床版下縁と鋼桁上縁部の相対ずれ変位分布を示す。この相対変位は各々の部材に取り付けた金具間の変位を測定したものであり、たわみ角の影響は計算により除いている。

図-8(b)は載荷点の左側のみがずれを生じているが、これは載荷荷重の偏りなどに起因するものと推定される。

いずれの供試体においても、供試体が終局水平せん断ずれを生じる以前から、載荷点を起点とするずれが桁端部に向かって伝播しており、ずれが桁端部に及んだ時点で終局となったことがわかる。

終局水平せん断ずれを生じる以前のずれ性状に着目し、荷重15tfにおける水平力と水平せん断力の変化を示したものが図-9である。図-4(b)で考察したとおり、載荷点付近の水平せん断力は桁端部方向に作用し、支点付近の水平せん断力は支間中央方向に作用している。図-8のずれ先端位置は図-9のせん断力の向きが逆転する位置に近似しており、せん断プレストレスを導入した合成桁は、内部水平せん断力の方向によって、水平せん断ずれが左右されるものと考えられる。しかしながら、せん断プレストレスが無くても、あるいはずれ止め装置にダウエルを使用しても、載荷点からずれが桁端方向に伝播しながら破壊する現象が生ずることをこれまでの研究において確認しており、ずれの解析には載荷点における局部応力の影響や水平力の作用機構など、さらに検討が必要と思われる。

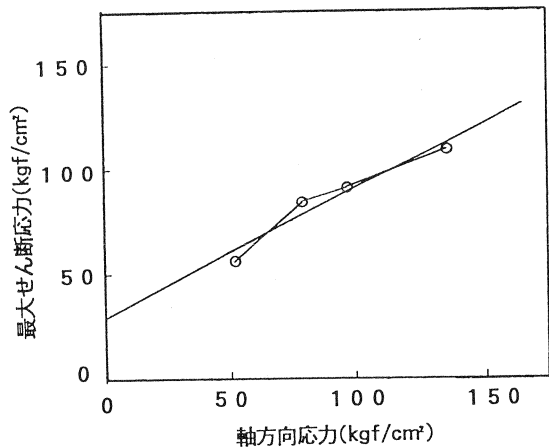


図-6 二面せん断試験結果

表-1 合成桁の載荷試験結果

	NO. 1	NO. 2
導入プレストレス力(kgf)	30,000	2,000
せん断プレストレス力(kgf)	-14,516	-968
水平せん断すべり荷重(tf)	47	31
最大荷重時の荷重による載荷点直下水平力(kgf)	77,230	50,939
最大荷重時の荷重によるせん断力(kgf/cm²)	29.7	19.6

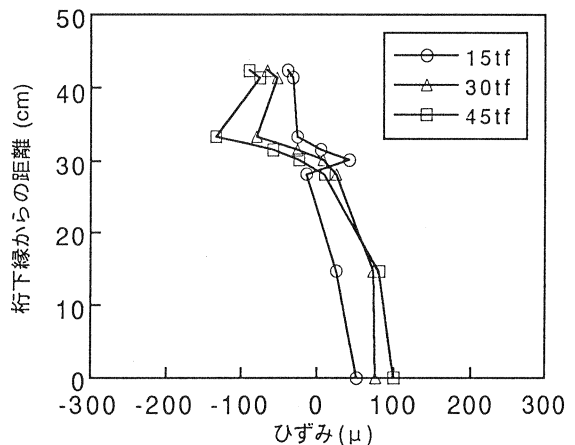


図-7 載荷荷重によるせん断支間中央部のひずみ変化 (供試体NO. 1)

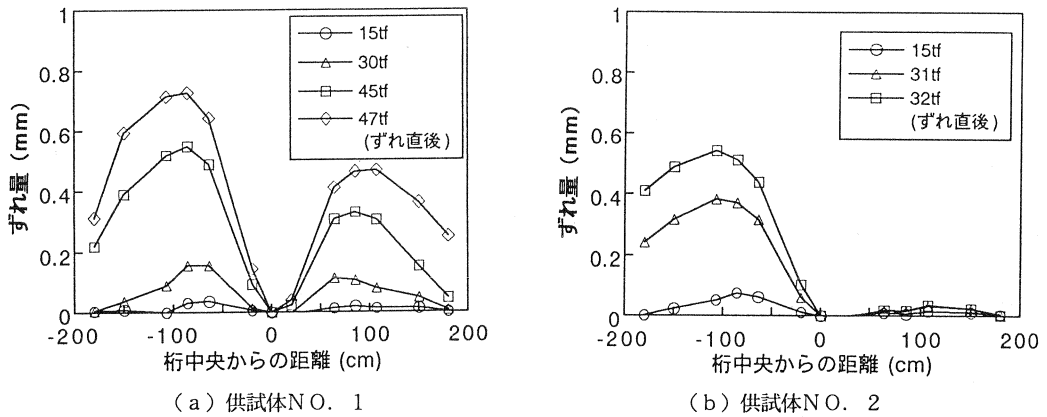


図-8 供試体の床版下縁と鋼桁上縁部の相対ずれ変位分布

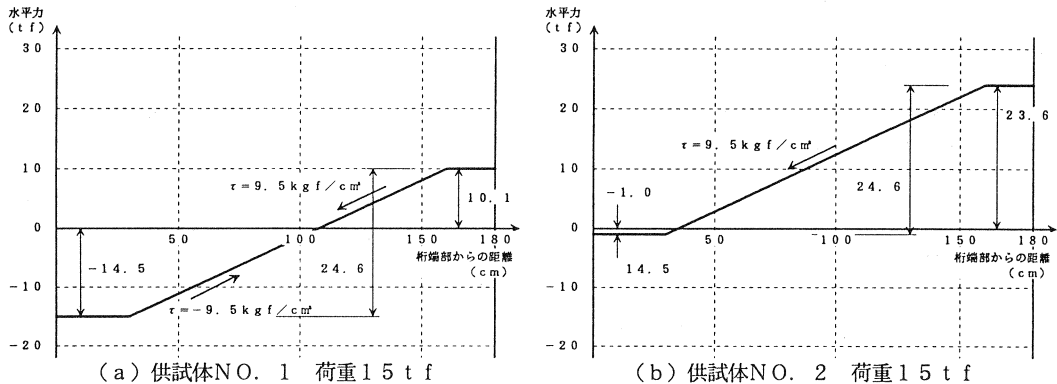


図-9 終局ずれ以前の荷重における水平力と水平せん断力の変化

5. まとめ

- (1) 鋼コンクリート合成桁の水平せん断耐力はせん断プレストレス導入により向上させることができる。
- (2) 床版と鋼桁を摩擦接合する場合、桁としての水平せん断耐力は摩擦係数や摩擦力の分布など、摩擦特性の影響を受けると推定される。
- (3) せん断プレストレスを導入したときの終局水平せん断耐力実測値は、せん断プレストレス力と、水平力の向きを考慮した(5)式の計算結果と整合する。
- (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ずれ分布は、水平力と水平せん断力の分布形状に近似する。

本論文のせん断破壊現象に水平力そのものを考慮する方法は、様々なプレストレストコンクリート部材のせん断破壊現象の解明にも応用が可能と思われる。なお、合成構造にプレストレスを導入する場合、水平せん断耐力を向上させる方向にせん断プレストレスを導入することが必要であり、構造形式や導入方法による水平せん断耐力の向きに、特に留意する必要がある。

【参考文献】

- 1) プレキャスト床版合成桁橋の設計・施工、中井 博、森北出版(株)
- 2) Elements of strength of materials, S. Timoshenko and D. H. Young, D. Van Nostrand company, Inc., Princeton, New Jersey
- 3) せん断プレストレスを導入した鋼・コンクリート合成構造に関する研究、出光 隆、平成3・4・5年度試験研究(B)(1)研究成果報告書、課題研究番号 03555108、平成6年5月