

論文 鋼・コンクリート合成桁接合面の初期せん断応力分布と せん断破壊挙動

徳光 卓^{*1}・出光隆^{*2}・山崎竹博^{*3}・岩本久信^{*4}

要旨：接合面に作用する初期のせん断応力分布状態を種々変化させた鋼・コンクリート合成桁の載荷試験を実施した。初期のせん断応力分布状態により接合面のせん断破壊挙動は異なり、その終局耐力はせん断を受ける接合面全体の平均せん断応力で表されることなどを、実験と考察により確認した。

キーワード：鋼・コンクリート合成桁、せん断プレストレス、水平せん断応力

1. まえがき

近年、施工省力化のためのプレキャスト工法の適用が多方面で進められており、橋梁分野においてもセグメント工法や鋼・コンクリート合成構造や複合構造などの適用が広がりつつある。筆者らは鋼桁とプレキャストコンクリート床版を合成するためのずれ止めとして、高力ボルトの締めつけによる摩擦接合法を開発し[1]、さらに、載荷により生じる合成桁接合面の水平せん断応力と逆向きのせん断応力を事前に導入しておくことによって水平せん断耐力を高める「せん断プレストレス工法」を開発した。これまでに偏心軸圧縮力の導入により合成桁の水平せん断破壊耐力が高められることを実験により確認してきたが[2]、偏心軸圧縮力により等曲げモーメントを受ける部材では、はり理論でせん断応力を算定できないため、理解を妨げる要因となっている。

そこでせん断プレストレスとして事前に導入される水平せん断応力の分布状態が、その後の水平せん断破壊過程に影響を与えるものと考え、鋼・コンクリート合成桁の初期水平せん断応力分布を変えた載荷試験を実施し、その破壊過程の理論的検証を試みた。

2. 鋼・コンクリート合成桁の載荷試験

図-1に供試体の概要を、図-2にストレインゲージおよび変位計の取り付け位置を示す。供試体の種類は3種類で、N供試体は初期水平せん断応力を導入していないもの、A供試体は偏心軸圧縮力による曲げにより初期水平せん断応力を桁端部付近に集中させたもの、B供試体は載荷による曲げによりせん断スパンに平均的な初期水平せん断応力を導入したものである。

A供試体の軸方向力による初期水平せん断応力の導入は以下の手順による。

- ①鋼桁にPC鋼棒を用いてプレストレス300kNを導入する。
- ②鋼桁と床版を30mmの間隔を開けて配置し、空隙に無収縮モルタルを充填する。
- ③高力ボルトを140kNで締め付け、PC鋼棒の緊張力を解き水平せん断応力を導入する。

B供試体の載荷による初期水平せん断応力の導入は以下の手順による。

- ①鋼桁を二点載荷により荷重75kNで曲げ、曲げたまま反力ビームに固定する。
- ②鋼桁と床版を30mmの間隔を開けて配置し、空隙に無収縮モルタルを充填する。

*1 九州工業大学大学院 工学部設計生産工学科 (正会員)

*2 九州工業大学教授 工学部設計生産工学科, 工博 (正会員)

*3 九州工業大学助教授 工学部設計生産工学科, 工博 (正会員)

*4 (株)富士ビー・エス本店技術部開発課課長, 工修

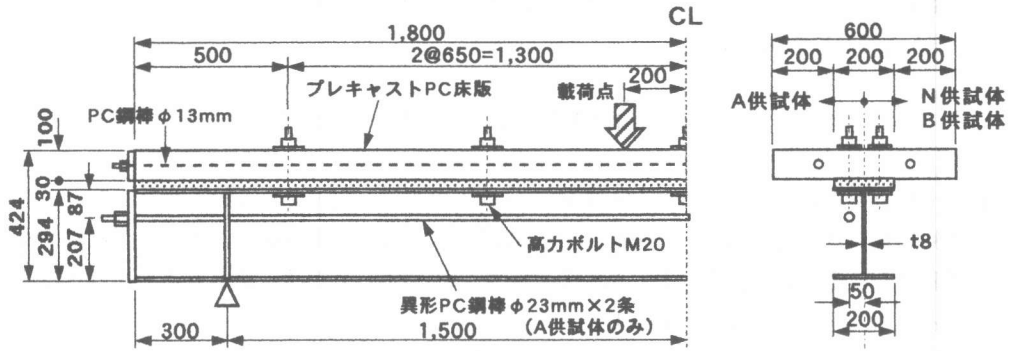


図-1 鋼・コンクリート合成桁供試体

- ③高力ボルトを140kNで締め付け、鋼桁を反力ビームから取り外し、水平せん断応力を導入する。

コンクリート床版には予めポストテンション方式でプレストレスを導入しており、負曲げに伴う引張応力によるひびわれの発生を防止した。無収縮モルタルは速硬・ノンブリージングタイプのものを使用した。

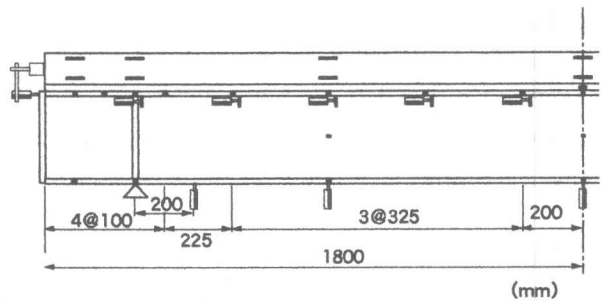


図-2 変位計取付・ひずみゲージ貼付位置

高力ボルトにはモルタルとの付着を防ぐと同時に、せん断ずれに伴うダウエル効果の発生を防止するため、予め厚さ約7mmのウレタンを巻きつけた。また、ボルトの座金は通常の高力ボルト用座金に厚さ9mmの角形座金を重ね、局所的な支圧応力の発生を防いだ。荷重は0kN→100kN→徐荷→200kN→徐荷→明らかなずれを生じる荷重、までの3サイクルで実施した。

3. 荷重試験結果

3. 1 用語の定義

結果説明に先立ち、荷重によって合成桁の接合面が桁端部に及ぶ大きなずれを生じることを終局水平せん断状態と定義する。

また、図-3に示すような合成桁の任意断面の軸方向応力を接合面の上部、下部で各々積分した値を部材軸方向合応力と定義する。

図-3のa断面を任意長さの要素と考えたとき、要素左右の部材軸方向合応力が異なる場合は、その要素左右の部材軸方向合応力の差を求め、これを接合面積で割れば平均せん断応力が求められる。

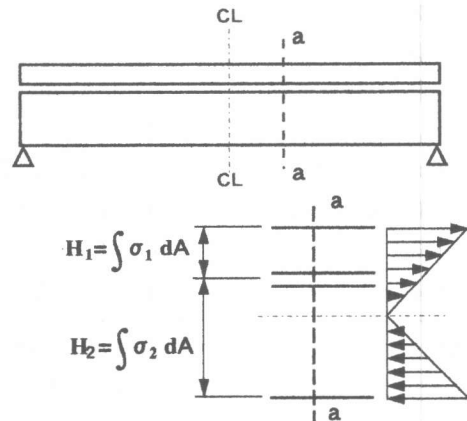


図-3 部材軸方向合応力の定義

3. 2 偏心軸圧縮力による合成桁接合面の水平せん断応力分布

図-4にA供試体せん断プレストレス導入時の鋼桁上フランジ側面のひずみ分布を示す。鋼桁のひずみは桁端部付近で大きく高まり、解放された緊張力はあたかもプレテンション部材定着部のように桁端部付近で鋼桁から床版に伝達されていることがわかる。

図-5にこのひずみから求めた部材軸方向合応力分布を示す。部材軸方向合応力は合成桁を構成する床版と鋼桁の断面ひずみ分布はおおの線形性が保たれ、軸方向のひずみは連続的に変化すると仮定して、ひずみゲージの値から計算したものである。部材軸方向合応力は桁端部から90cm~270cmの間でほぼ一定であり、梁理論から求めた計算値より若干大きめの値となっているが、プレストレスがある定着長をもって伝達されていることがわかる。

図-6に水平せん断応力分布を示す。水平せん断応力は桁端部付近で大きく高まり、支間中央部付近には水平せん断応力を生じていない。水平せん断応力は軸方向合応力の微分値に相当するから、図-6の水平せん断応力を桁端部から支間中央部まで積分した値は支間中央部の部材軸方向合応力に一致する。

3. 3 終局水平せん断荷重

図-7に各供試体支間中央部の荷重とたわみの関係を示す。図中に完全合成桁理論によるたわみの計算値を示したが、いずれの供試体も荷重200kN付近までほぼ完全合成桁として挙動していることがわかる。図

8に荷重と桁端部における各供試体の床版と鋼桁の相対変位の関係を示す。いずれの供試体もある荷重まで相対変位がほぼ線形に増加したのち、荷重に対する変位が著しくなる。この変化点を各供試体の終局水平せん断時の荷重とした。なお、荷重0kNの相対変位がゼロとなっていないのは、繰り返し荷重により残留ずれを生じたためである。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時の荷重はせん断プレストレスを導入していないN供試体の終局水平せん断時の荷重220kNに対し、A供試体が320kN、B供試体が280kNと明らかに大きくなっている。

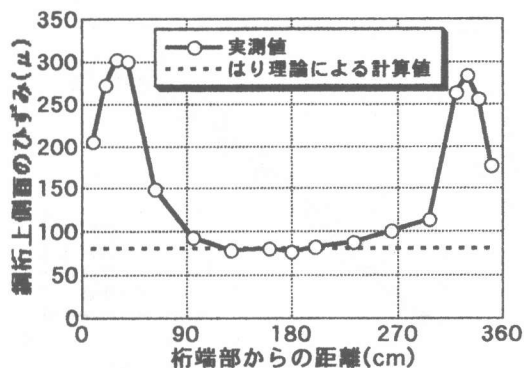


図-4 A供試体せん断プレストレス導入時の鋼桁上フランジ側面ひずみ分布

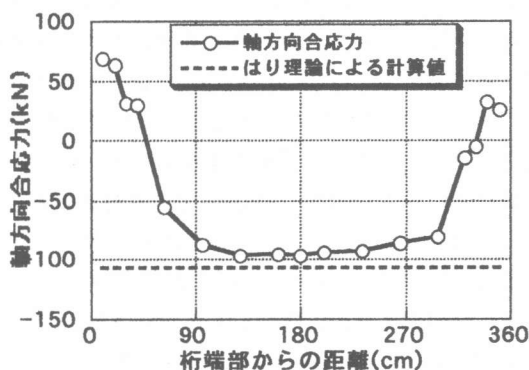


図-5 A供試体せん断プレストレス導入時の部材軸方向合応力分布

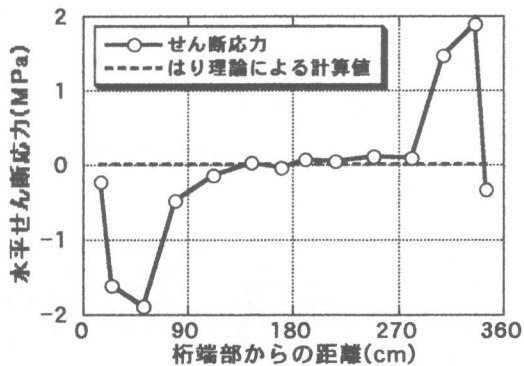


図-6 A供試体せん断プレストレス導入時の水平せん断応力分布

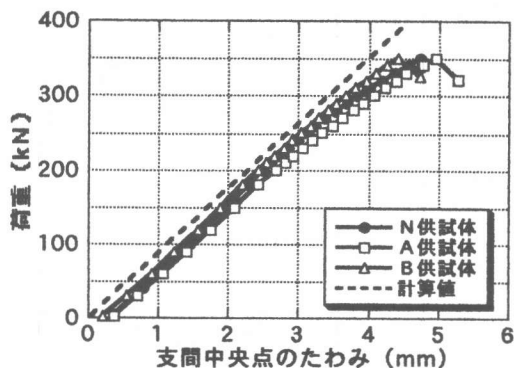


図-7 各供試体の荷重とたわみの関係

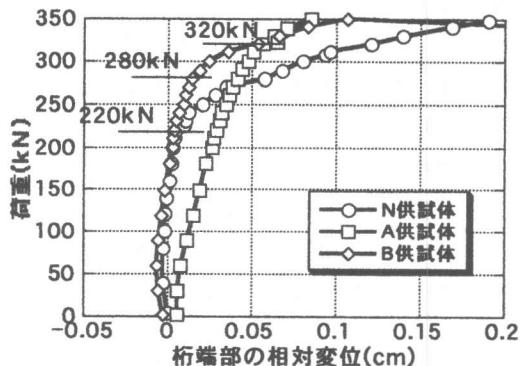
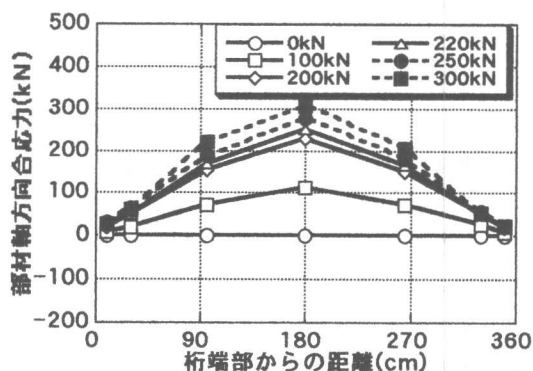


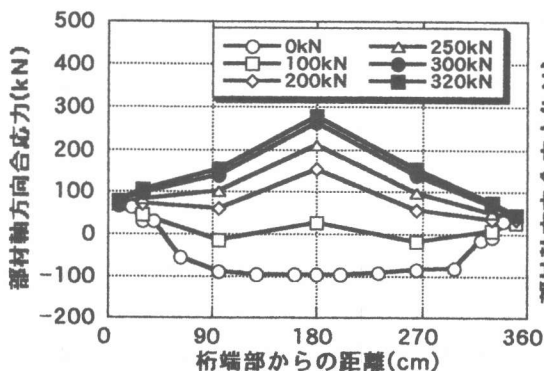
図-8 荷重と桁端部相対変位の関係

3. 4 部材軸方向合応力分布と水平せん断応力分布の変化

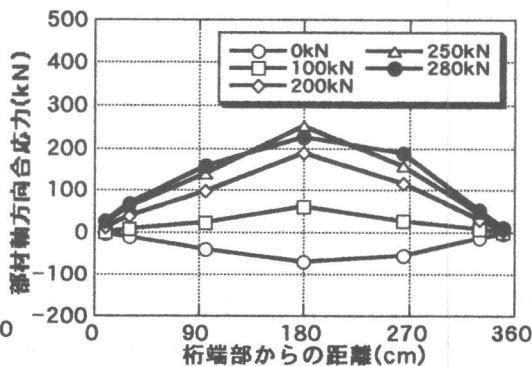
図-9 (a), (b), (c)に各供試体の床版のひずみから求めた荷重に伴う部材軸方向合応力分布の変化を、図-10 (a), (b), (c)にこの部材軸方向合応力から計算した水平せん断応力分布の変化を示す。N供試体の場合、終局水平せん断を生じるまで部材軸方向合応力は荷重増分とほぼ同じ割合で増加したが、終局水平せん断を生じた220kN以降から300kNまでの部材軸方向合応力の増加割合は小さくなり、220kNで桁端部の水平せん断応力の低下が確認された。初期水平せん断応力を導入したA・B供試体の部材軸方向合応力の分布は、250kN付近まで、ほぼ各供試体の初期部材軸方向合応力に図-9 (a)のN供試体の部材軸方向合応力を足し合わせたものに等しくなった。図-10 (b)のA供試体の水平せん断応力は、初期水平せん断応力がゼロとなった桁端部から約130cm・240cm位置で、終局水平せん断以前の荷重である250kN~300kNにおいて、0.9 MPaからほとんど変化しておらず、せん断応力が限界に達したと推察される。



(a) N供試体



(b) A供試体



(c) B供試体

図-9 荷重に伴う各供試体の部材軸方向合応力分布の変化

3. 5 終局水平せん断荷重とすべり面全体の平均せん断応力の関係

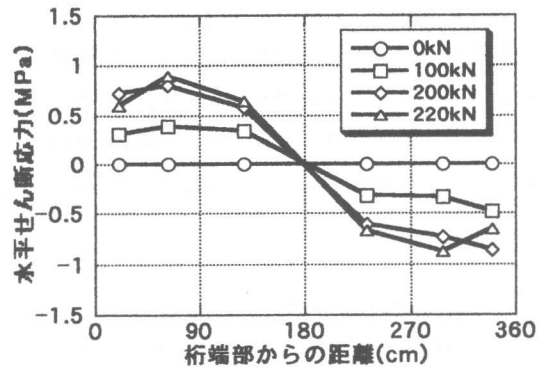
さて、鋼・コンクリート合成桁のせん断ずれを生じる区間全体を一つのせん断面としてとらえたとき、図-9に示した部材軸方向合応力をすべり面全体の接合面積で割れば、平均せん断応力が求められる。表-1に各供試体の終局水平せん断荷重とすべり面全体の平均せん断応力を示す。

荷重によるすべり面全体の各供試体の平均せん断応力は、N供試体、A供試体、B供試体の順に各々0.75、1.10、0.95MPaであった。これをせん断プレストレス導入時の合応力分布から求められるすべり面全体の平均せん断応力各々0、-0.30、-0.20MPa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、いずれの供試体も終局水平せん断時の「すべり面全体の平均せん断応力」は0.75~0.80MPaとほぼ等しくなる結果が得られた。

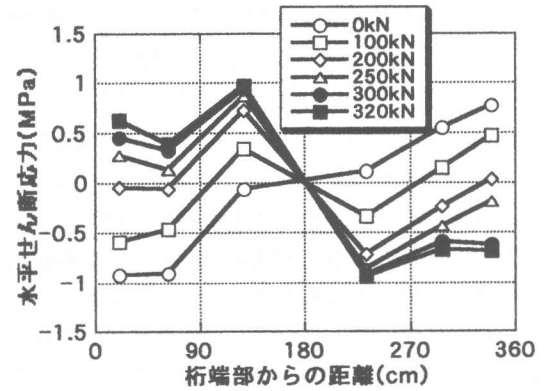
4. 偏心軸圧縮力を受けるはりのせん断応力

本実験から偏心軸圧縮力を受け、等曲げモーメントを生じる合成桁でも、その接合面にせん断プレストレスを与えられることが明らかになった。

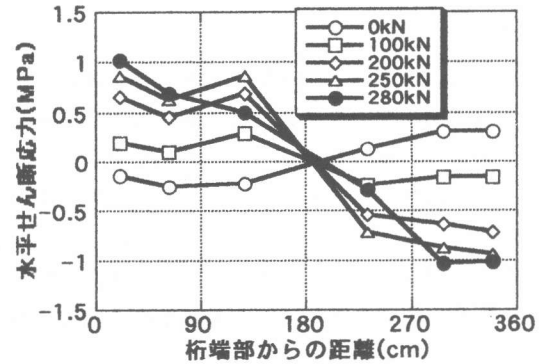
一般に、はり理論ではせん断力は部材軸方向のモーメント変化率(dM/dx)で考えるため、本実験結果は不合理に思われるが、それは十分に長い桁の中央部のみを想定しているためである[3]。



(a) N供試体



(b) A供試体



(c) B供試体

図-10 荷重に伴う各供試体の水平せん断応力分布の変化

表-1 各供試体の終局水平せん断荷重とすべり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供試体	220	0.75	0.00	0.75	-
A供試体	320	1.10	-0.30	0.80	0.05
B供試体	280	0.95	-0.20	0.75	0.00

Saint Venantの原理から明らかなように軸方向力作用点近くでは図-11に示す仮想せん断面に大きなせん断応力が作用し、せん断破壊は仮想面全体のせん断応力の積分値がせん断耐力を超えたときに生じることは明らかである。

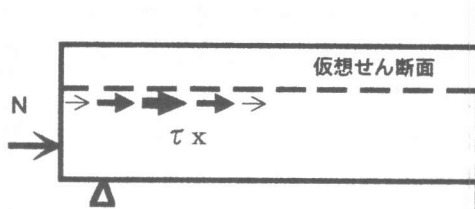


図-11 仮想せん断面に作用するせん断応力

5. せん断破壊条件

合成桁の実験結果から、軸方向単位長さ当たりのせん断応力とすべり面全体のせん断応力について考えてみた。N供試体の終局すべりの発生は面全体の平均せん断応力が0.75MPaの時であった。これは鋼・コンクリート合成桁接合面のせん断耐力にほぼ等しいとみなされる。ここで、図-10(b)A供試体の荷重250~300kNの間で、桁端部から約130cm、約240cm位置の水平せん断応力が約0.9MPaからほとんど変化しなかった理由を考察する。接合面のせん断耐力を0.75MPaと考えれば、0.9MPaという値はせん断耐力を超えていることから、桁端部におけるずれを生じていないにも関わらず、この位置では局部的なずれを生じているものと推察される。一般に、軸方向単位長さ当たりのせん断応力がせん断耐力に達したときを破壊とみなすが、摩擦接合面は徐々にずれを生じながらも当初のせん断耐力と等しい耐力を維持するものと考えられる。

したがって、鋼・コンクリート合成桁の終局水平せん断破壊はすべり面全体のせん断合力が接合面のせん断耐力に達した時点で生じるものと考えられる。

6. まとめ

以上をまとめると、下記のとおりになる。

- ① 偏心軸圧縮力の導入により鋼・コンクリート合成桁端部付近の接合面においてせん断応力が伝達される。したがって、せん断プレストレスの導入は可能である。
- ② 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終局水平せん断荷重は、偏心軸圧縮力、曲げ、いずれの方法で導入した場合でも、これを導入しない供試体の荷重を上回った。
- ③ 鋼・コンクリート合成桁の終局水平せん断破壊はすべり面全体のせん断合力が接合面のせん断耐力に達した時点で生じるものと考えられる。

参考文献

- [1] 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, vol11, NO.1, pp627~pp632, 1989
- [2] 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, pp119~124, 1996
- [3] Elements of strength of materials, S. Timoshenko and Young, D. Van Nostrand Company INC., Princeton, New Jersey.