

(22) 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効果の算定法

九州工業大学大学院○徳光 卓
九州工業大学工学部 山崎 竹博
九州工業大学工学部 出光 隆
宮崎大学工学部 今井富士夫

1. まえがき

プレキャスト床版鋼・コンクリート合成桁などの合成構造において、接合面のせん断破壊が曲げに先行するとき、一般には、頭付きスタッドなどのずれ止めを太径にする、あるいは、ずれ止めの個数を増やすなどせん断耐力を高めるための措置がとられる。

これに対して、筆者らはずれ止めのせん断耐力を向上させるのではなく、荷重載荷に伴いずれ止めに作用するせん断力を、予め導入した負のせん断力によって相殺させ、接合面全体としてのせん断破壊耐力を高める「せん断プレストレス工法」を開発した。本論文では、接合面に予め導入する負のせん断応力が合成桁の水平せん断破壊耐力に及ぼす影響を定量的に評価し、これまでに実施した合成桁の静的載荷試験結果と照合することによって、補強効果の算定方法を検証した。

2. せん断プレストレスによるせん断補強効果の概念

図-1に、ずれ止めとして高力ボルトによる摩擦接合を用いた場合、頭付きスタッドを用いた場合の鋼・コンクリートの二面せん断試験によるずれ止め一本あたりせん断力とずれの関係を示す。

スタッドの場合、せん断耐力とはせん断力に対する変位が急激に増加し始める点、すなわちスタッドの曲げ降伏点(変位0.075mm付近)を言い、実際の耐荷力は、ずれが増加しながらも、スタッドが破断するか、スタッドの周囲のコンクリートが破壊されるまで増加する。高力ボルトによる摩擦接合の場合は、徐々に変位が増加しながら、最大せん断力に到達したときに大きなずれを生じる。

一般に、ずれ止めに作用するせん断力とずれの関係を考えるとき、図-1に示したような正方向のみを考えるが、ずれ止めに作用するせん断力の正負とは力の方向であることを考慮すると、このようなずれ止めでは正負両方向に同一のせん断耐力を有することは明らかである。図-2は摩擦接合二面せん断供試体における正負両方向のせん断力とずれの関係を示したものである。

図-2の供試体において、供試体は約100kN弱のせん断力で破壊することになる。供試体の初期せん断応力が-50kNのとき、供試体を破壊させるには、これに約150kNのせん断力を作用させ、せん断力を約100kNとすることが必要である。このように初期せん断応力をせん断プレストレスとして与えて、ずれ止めの正負のせん断耐力を利用すれば、最大でせん断耐力が2倍となったに等しい補強効果が得られる。

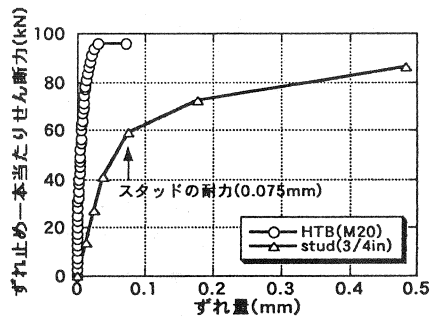


図-1 高力ボルトとスタッドのせん断力とずれの関係の一例

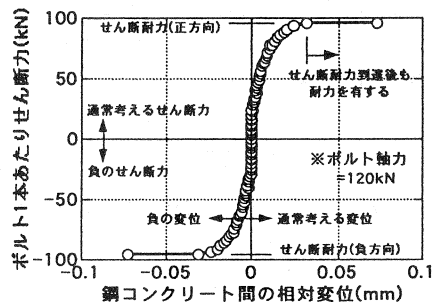


図-2 せん断力の正負を考慮したときの高力ボルトのせん断力とずれの関係

3. せん断プレストレスによる補強効果の算定法

3. 1 床版軸方向合応力と接合面のせん断応力の関係

図-3に示すような鋼・コンクリート合成桁において、a-a断面に図のような応力が生じているとき、床版の断面応力の積分値を床版軸方向合応力、鋼桁の軸方向応力の積分値を鋼桁軸方向合応力と表現する。

断面の力の釣合いから、床版軸方向合応力と鋼桁軸方向合応力には式(1)のような関係が成り立つ。

$$C_c = -T_s \quad (1)$$

ただし、 C_c :床版軸方向合応力
 T_s :鋼桁軸方向合応力

また、完全合成桁において、ひずみが弾性範囲内にあるとき、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係として、式(2)、式(3)のように表される。

$$\begin{aligned} C_c &= \int_{y_1}^{y_1+hc} \sigma_c dA \quad (2) \\ &= \int_{y_1}^{y_1+hc} (\sigma_N + \sigma_M) dA \\ &= \int_{y_1}^{y_1+hc} \frac{N}{A} dA + \int_{y_1}^{y_1+hc} \frac{M \cdot y}{I} dA \\ &= \frac{N \cdot A_c}{A} + \frac{M \cdot G_c}{I} \quad (3) \end{aligned}$$

ただし、 σ_c :床版の軸方向応力
 σ_N :軸力による応力
 σ_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

式(4)にはり理論による完全合成桁の接合面のせん断応力算定式を示す。式(4)は式(3)の微分形となっており、式(3)の軸方向力Nは式(4)の計算結果に影響を与えない。このようなことから、一般には接合面のせん断応力を考える場合、軸力導入の影響は無視されている。

$$\tau = \frac{Q \cdot G_c}{I \cdot b} \quad (4)$$

ただし、 τ :完全合成桁接合面のせん断応力
 Q :せん断力
 b :接合面の幅

図-4にi)完全合成桁の鋼桁に軸方向力を作用させた場合、ii)重ね梁の鋼桁に軸方向力を作用させた場合の断面応力分布を

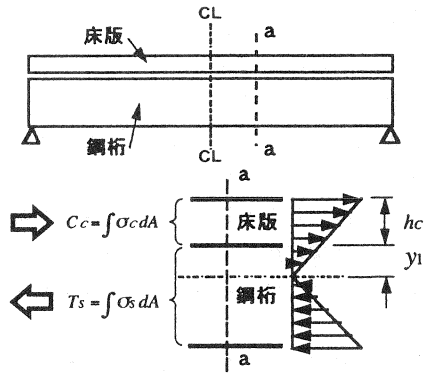
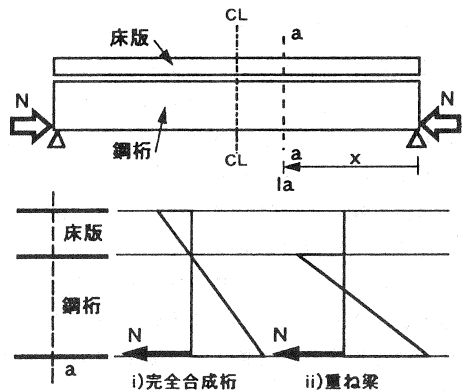


図-3 合成桁の床版軸方向合応力と鋼桁軸方向合応力



$$\begin{aligned} C_c' &= \int \alpha' dA \\ T_s' &= \int \alpha' dA \end{aligned}$$

iii) = i) - ii)
 ずれ止めのせん断伝達に伴う応力

図-4 軸方向力作用時の合成桁・重ね梁の応力分布とずれ止めにより伝達された応力の分布

示す。重ね梁のとき、床版には鋼桁に加えられた軸方向力に伴う応力は発生しない。これは接合面のせん断伝達が無いことに起因するものである。逆に言えば、合成桁の鋼桁に軸方向力を作用させ、床版に応力が生じるには接合面のせん断伝達がなければならない。図-4のiii)にi)とii)の断面応力差を示す。これはずれ止めのせん断伝達に伴う応力であり、合成桁の水平せん断ずれが支間中央側から桁端部に向かって生じることを考慮すれば、iii)の応力から求められた a-a 断面の床版軸方向合応力 Cc' は、a-a 断面から桁端部断面に至る接合面ですれ止めにより伝達されたせん断応力の積分値に等しく、式(5)で表される。

$$Cc' = \int_0^a \tau \cdot b \, dx \quad (5)$$

ただし、 Cc' :接合面のせん断伝達に伴う床版軸方向合応力

図-4の場合、重ね梁の床版には応力を生じていないので、接合面のせん断伝達に伴う床版軸方向合応力と合成桁の床版軸方向合応力は等しくなる。実際の合成桁においては、後述の図-8に示した実験結果のように、接合面のせん断応力はある伝達長をもって伝達されるため、偏心軸圧縮力の導入に伴う接合面のせん断応力は桁端部付近に集中する。

3. 2 合成桁接合面のせん断破壊条件

図-2のような特性をもつずれ止めを配した合成桁のずれ止めのせん断力変化を図-5に概念図として示す。図中、 Q_0, Q_1, Q_2, Q_3 は各々、荷重前、荷重 $P_1, P_2, P_3 (P_3 > P_2 > P_1)$ においてずれ止めに作用するせん断力を表し、せん断プレストレス導入に伴う各ずれ止めの初期せん断力は図のように各々異なるものとする。

荷重 P_1 を載荷したとき、最も支間中央部寄りのずれ止め①のせん断力はせん断耐力に到達するが、他のずれ止め②・③はせん断耐力に到達していない。従って、合成桁は荷重 P_1 で接合面全体がせん断破壊することはない。さらに荷重 P_2 を載荷したとき、ずれ止め①に続いてずれ止め②もせん断耐力に到達する。このとき、ずれ止め①はせん断力に対するずれが大きくなるものの、せん断耐力相当のせん断力を分担し続ける。荷重 P_3 を載荷したとき、ずれ止め③のせん断力がせん断耐力に到達し、全てのずれ止めのせん断力がせん断耐力に到達したとき、初めて合成桁は接合面全体のすべりを生じる。

したがって、合成桁の接合面全体がせん断ずれを生じるのは、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。平均せん断応力の算定式を式(6)に示す。

$$\tau_m = \frac{\int_0^a Cc \, dx}{Av \cdot a} \quad (6)$$

ただし、 τ_m :接合面全体の平均せん断応力

Av :せん断面の面積

a :せん断面の長さ

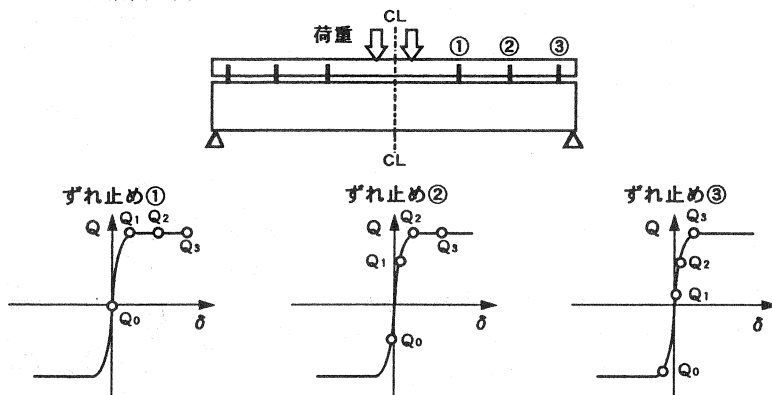


図-5 せん断プレストレスを導入した鋼・コンクリート合成桁のずれ止めのせん断力変化の概念図

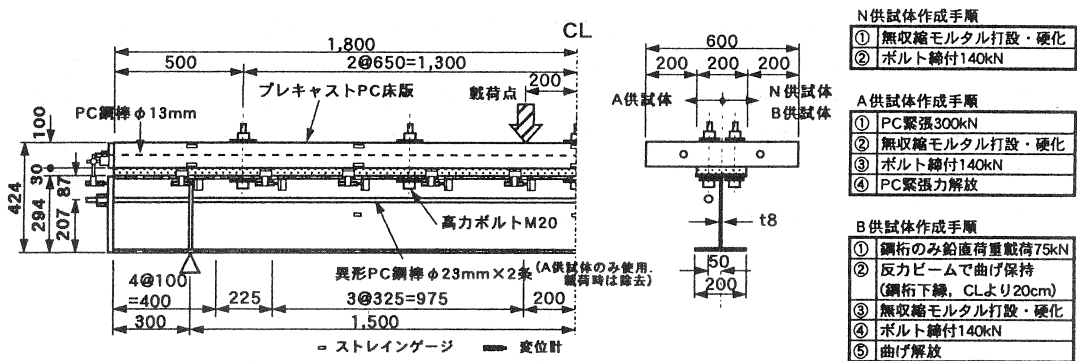


図-6 鋼・コンクリート合成桁供試体とせん断プレストレス導入方法の概要

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結果

図-6に実験に使用した鋼・コンクリート合成桁供試体とそのせん断プレストレス導入方法の概要を示す。床版と鋼桁の合成方法には高力ボルトによる摩擦接合法を用いた。供試体はせん断プレストレスを導入していないN供試体と、偏心軸圧縮力によりせん断プレストレスを導入したA供試体、曲げによりせん断プレストレスを導入したB供試体の3体である。せん断プレストレス導入時・載荷試験時は図に示すような位置に取りつけたストレインゲージ・変位計により、ひずみ・たわみ・床版と鋼桁の相対変位を測定した。

4.1 偏心軸圧縮力によるせん断プレストレス導入時の床版軸方向応力と接合面のせん断応力

せん断プレストレス導入時の鋼桁ひずみから求めた床版軸方向合応力分布を図-7に示す。桁端部から90cm~270cmの区間での床版軸方向合応力はほぼ一定で、純曲げの状態となっている。桁端部寄りの0~90cm, 270~360cmでは床版軸方向合応力が徐々に変化し、丁度プレテンションPC部材の定着長区間のような応力変化を示している。

図-8に図-7の床版軸方向合応力測定断面間の合応力差から求めた接合面のせん断応力を示す。せん断応力は桁端部付近に集中している。計算上のせん断応力がゼロとなる梁理論と実測値は傾向が大きく異なっており、偏心軸圧縮力によるせん断応力分布は梁理論では計算できないことがわかる。

これに対しB供試体では、後述の図-11(c)の荷重0kNで示すように、左右せん断スパンに約0.2MPa~0.3MPaのほぼ均等な初期せん断応力が導入されている。

4.2 せん断プレストレスによる水平せん断補強効果

図-9に載荷荷重と供試体桁端部における床版と鋼桁の相対変位の関係を示す。各供試体とも高力ボルトの配置や締付け力は等しく、接合面のせん断強度は同一である。桁端部が

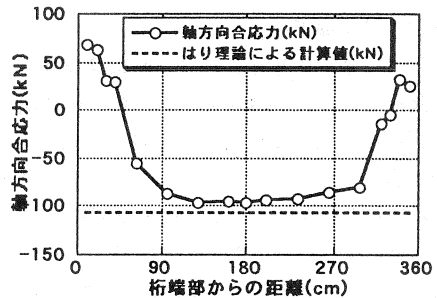


図-7 A供試体のせん断プレストレス導入時の床版軸方向合応力分布

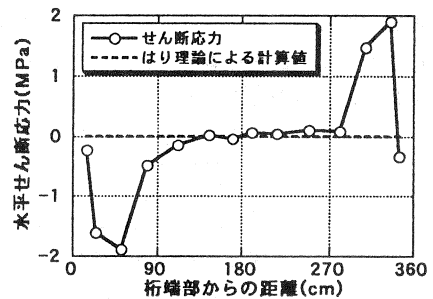


図-8 A供試体のせん断プレストレス導入時の接合面せん断応力分布

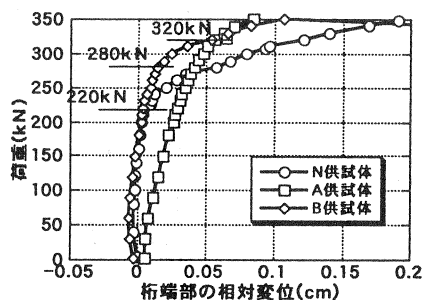


図-9 各供試体の桁端部における床版と鋼桁の相対変位

大きなずれを生じ始めた荷重(以後、ずれ荷重と略す)はN供試体に比べてA供試体・B供試体が明らかに大きく、補強効果が認められる。

各変位測定点における図-9に示したような相対変位の変化から、各測定点のずれ荷重を求め、測定点との関係として表したのが図-10である。

N供試体では各測定点とも220kN~230kNでほぼ同時にずれ始めている。鉛直荷重による曲げでせん断プレストレスを導入したB供試体では、各測定点とも270~290kNでほぼ同時にずれを生じ始め、全体的にずれの発生が遅れている。桁端部付近に初期のせん断応力が集中したA供試体では、桁端部付近のずれ荷重は大きく高まっているものの、初期せん断応力が導入されていない支間中央部付近はN供試体とほぼ等しい荷重でずれを生じている。

4.3 載荷に伴うせん断応力の変化

図-11の(a)~(c)に各供試体のせん断応力分布の変化を示す。なお、A供試体の荷重0kNにおけるせん断応力分布は図-8を基に静的載荷試験時の床版ひずみ測定点に合わせて求めた平均せん断応力を表示している。

(a)のN供試体の各測定点でのせん断応力は荷重200kNまで載荷100kN毎に0.3MPa~0.4MPa程度の増分となっている。

(b)に示したA供試体では各測定点とも荷重200kNまでN供試体と同様な増分となっているが、荷重200kN以降320kNまで、桁端部から約130cm、230cmの測定点でのせん断応力の増加は約0.2MPaとわずくであり、桁端部近傍の340cm付近では逆に増分が約0.7MPaと増えている。

(c)に示したB供試体では、N供試体と初期せん断応力が異なるものの、せん断応力の増分はN供試体とほぼ等しくなっている。4.2を含め、これらの傾向は3.2で示した破壊過程の考察と一致する。

4.4 せん断破壊時の接合面全体の平均せん断応力

表-1に各供試体のひずみから式(6)により求めたせん断面全体の平均せん断応力の実測値を示す。せん断破壊時の荷重が異なるため、荷重による接合面全体の平均せん断応力は供試体によって異なる。これに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を足し合わせると、接合面全体の平均せん断応力はいずれの供試体も0.75MPa~0.80MPaとなり、3.2の考察と一致する。

したがって、合成桁接合面の局部的なせん断破壊を検討する場合は、任意断面間の合応力差から求めた平均せん断応力から、接合面全体でのせん断破壊を検討する場合はせん断面全体の平均せん断応力から補強効果の算定が可能と考えられる。

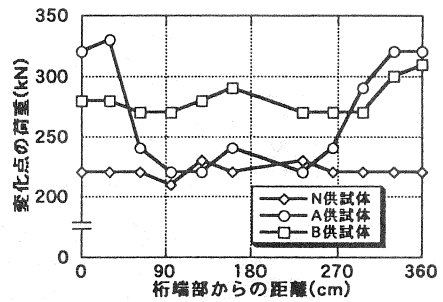
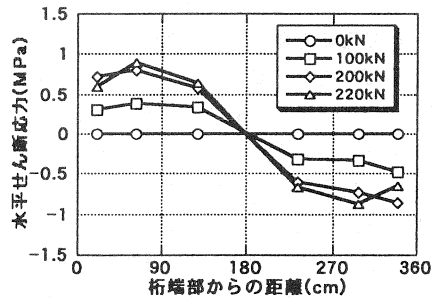
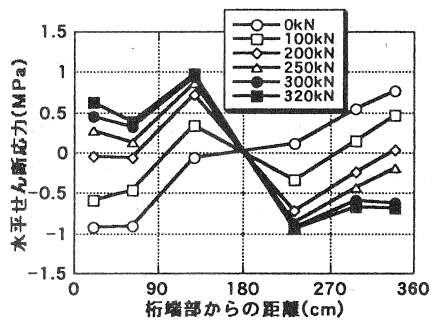


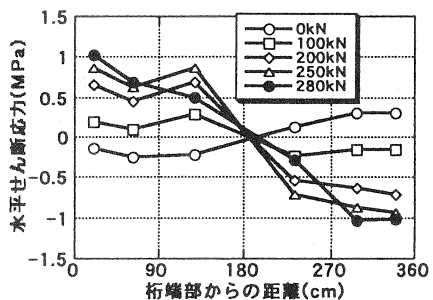
図-10 各供試体の相対変位測定点とせん断ずれ荷重の関係



(a) N供試体のせん断応力分布変化



(b) A供試体のせん断応力分布変化



(c) B供試体のせん断応力分布変化

図-11 各供試体の静的載荷に伴うせん断応力分布の変化

表-1 接合面全体のせん断応力の実験値

	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

表-2 梁理論による近似計算から求めた接合面全体のせん断破壊荷重の計算値

	①接合面せん断破壊荷重実測値(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Ccの計算値(kN)		④せん断破壊荷重時の τ_m の計算値(kN)	⑤④から求めたせん断破壊荷重(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供試体	220	408	0	-	0	0.638	220	-
A供試体	320	408	0	-118	-118	1.006	347.4	1.09
B供試体	280	408	0	-139	0	0.855	295.0	1.05

5. はり理論を用いたせん断プレストレスによる接合面のせん断補強効果の算定方法

本論文で述べたせん断プレストレス導入供試体のうち、B供試体のせん断応力分布は梁理論で求められるが、前に述べたようにA供試体のせん断応力分布を梁理論で求めることは不可能である。

一般的な合成桁であれば、偏心軸圧縮力の導入に伴うせん断応力は、図-8で示したように桁端部付近に集中し、桁端部付近以外の接合面はほとんどせん断応力を生じないと考えられる。式(5)で示したように、鋼桁から床版に伝達したせん断応力の積分値は床版軸方向合応力に等しいから、この応力分布を局所的な問題とみなし、全てのせん断力が桁端部断面で伝達すると考えれば、桁の断面応力分布は梁理論による計算値に等しくなる。梁理論に基づいて式(3)から床版軸方向合応力を求め、これを式(6)に代入することによって接合面全体のせん断応力の近似解が求められ、この値から荷重を逆算することにより、せん断破壊荷重が計算できる。

表-2にこの計算結果を示す。せん断プレストレスによる床版軸方向合応力から求めた接合面全体の平均せん断応力と荷重220kNのN供試体の接合面全体の平均せん断応力を足し合わせた値が④である、この値から載荷荷重を逆算したせん断破壊荷重は、A供試体・B供試体で各々、347.4kN、295.0kNとなり、実測値との比は各々、1.09、1.05となった。両者とも実験値に比べて若干大きめの値となっているが、近似解としては割合に良い精度が得られている。

6. 結 論

本論文で得られた結果から得られた主な結論をまとめると以下のとおりである。

- ①本論文で示した、偏心軸圧縮による方法、曲げによる方法、いずれの方法によっても合成桁接合面のせん断補強は可能である。
- ②偏心軸圧縮力によって導入されたせん断応力は桁端部付近に集中して貯えられる。
- ③合成桁接合面の局所的なせん断破壊荷重は断面間の合応力差から求めたせん断応力から、接合面全体のせん断破壊荷重は接合面全体の平均せん断応力から、算定が可能と考えられる。
- ④偏心軸圧縮による方法、曲げによる方法、いずれの場合でも、梁理論に基づく床版軸方向合応力の計算値から求めた接合面全体の平均せん断応力からの逆算により、接合面全体のせん断破壊荷重の近似解が求められる。

【 参考文献 】

1)Viest I.M.:Investigation of stud for composite concrete and steel T-Beams,Journal of American Concrete Institute,pp.857~891,April 1956
 2)徳光卓, 山崎竹博, 出光隆, 岩本久信: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, コンクリート工学年次論文報告集第19巻2号, 1997.6