

(24) 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

九州工業大学大学院 ○徳光 卓
 九州工業大学設計生産工学科 山崎 竹博
 九州工業大学設計生産工学科 出光 隆
 (株)富士ビー・エス 左東 有次

1. まえがき

プレキャストP/C床版工法の鋼橋工事への適用や、鋼コンクリート複合斜張橋などの鋼コンクリート複合構造などにもプレストレストの積極的な利用が進んでいる。筆者らはせん断プレストレス工法の研究を通じて、これまでに偏心軸圧縮力を導入することによって鋼コンクリート合成桁接合面の水平せん断耐力を向上させることが可能であること、さらに、その水平せん断耐力は最大摩擦力とせん断面全体の平均せん断応力度から計算した値に一致することなどを理論および実験から明らかにした。[1]

本論文ではさらにせん断破壊過程を考察し水平せん断破壊のメカニズムを含めた理論的考察を行い、実験値との比較検討を行った。

2. 純粋曲げとプレストレスの差異

TimoshenkoとYoungらはその著書において純粋曲げがせん断耐力に何ら影響を与えないことを述べており[2]、一般的にはプレストレスの場合であっても、桁端部付近における局所的な問題を除いて純粋曲げと同様に取り扱われている。

ここでFiber Stress理論における純粋曲げを再度検証してみる。Fiber Stress理論における梁モデルは図-1のように、均等な剛性を有する多数の糸を同一の力で引っ張ったのち、定着板に定着し、この定着板を傾けることによってFiberに応力を発生させるもので、Fiberの応力はこの定着板の中立軸を回転の中心とする三角形分布の力となる。

ここで、図-2のように定着板を上下に切断し、下の定着板にプレストレスを作用させたときを考える。定着板を切断しない場合の応力分布が図-1に等しいとすれば、上下の定着板の間には、上下各々の定着板に定着されているFiberの応力分布を図-1と等しくするためのせん断力 N' の伝達が必要である。なお、純粋曲げの場合は加力と内力の分布が同一であるため前述の N' の伝達を必要としないのは明らかである。

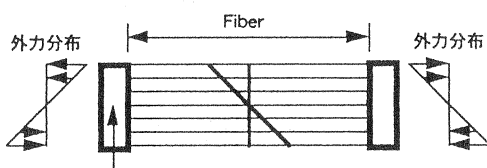


図-1 Fiber Stress理論における純粋曲げ

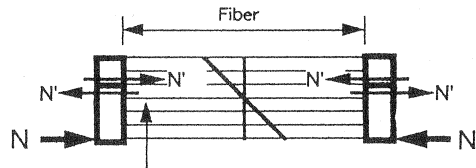


図-2 分割された定着板に生ずるせん断力

3. Fiber定着部に作用するせん断力N'の影響

前述のせん断力N'は一般に桁端部の局部的なせん断問題として図-3のように取り扱われている。この場合のせん断力N'による平均せん断応力は N'/A で表わされる。梁に偏心軸圧縮力が作用した場合でも、図-2のモデルから端部剛体にせん断力N'が作用することは理解できる。しかし、一般の合成桁のように端部の剛体がない状態では図-3のようにせん断応力は梁中央部分でゼロとなるが、梁端部にはせん断応力が分布して作用することになる。すなわち、偏心軸圧縮力による曲げモーメントが作用する部材でも端部ではせん断応力が発生する。これらのせん断応力を利用してせん断プレストレスを導入することも可能である。

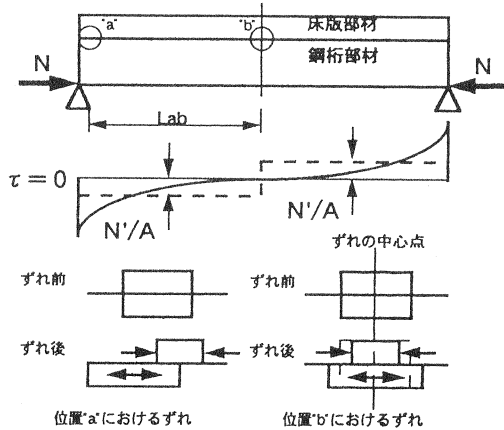


図-3 軸力による接合面のせん断応力分布の概念図

さて、水平せん断によって合成桁接合面に生ずるずれは軸方向ひずみ変化に伴う接合面位置の部材長さ変化として表れるから、図-3の場合、接合面を挟んで上下に隣接する要素は支間中央部"b"において要素両端のずれの方向が逆になり、相対的な変位を伴わない。このように梁の水平せん断破壊では接合面に必ず一点相対的なずれを伴わない点 (以後、ずれの中心点と略す) を有する特徴がある。

この「ずれの中心点」を有するという特徴は桁の水平せん断破壊を考えるうえで極めて重要である。例えば、図-4のように剛体と剛体の間にバネをかけ、全てのバネを引張状態として、端部からずれの中心にかけて引張力を変化させるには、バネを止めつけた剛体に図のベクトルで表したような、左右のバネの張力差に見合う力を作用させる必要がある。この力がせん断応力に相当し、図のように、位置によって力の作用方向は異なる。しかしながら、この力を取り除くとバネはフックの法則にしたがって変形するから、剛体は全てずれの中心方向に変位し、せん断力の作用方向と変位の方向が必ずしも一致しないことになる。

さて、図-3の桁が完全合成桁あるいは非合成桁であった場合に、鋼桁下縁にプレストレスを導入し、さらに荷重を載荷したときの、位置"b"から位置"a"までの長さLabの変化率を図-5に示す。ここで、プレストレス導入・荷重載荷を行う前の長さをLab、長さ変化した後をLab'として変化率は平均ひずみ Lab'/Lab で表す。また、プレストレス導

入時の非合成鋼桁上縁のひずみは引張とし、合成桁の中立軸は接合面より下とする。

合成桁接合面に作用する水平せん断力 τ は荷重に比例するから、合成桁接合面のせん

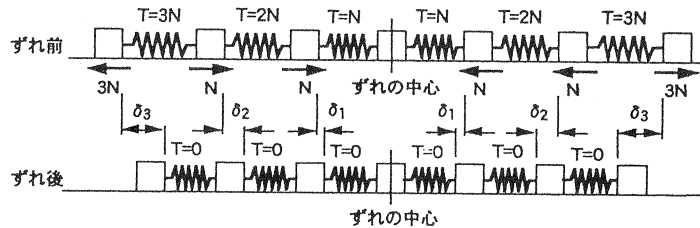


図-4 引張状態にある連続するバネのせん断力とずれの関係

断耐力に応じた荷重で破壊を生じる。水平せん断破壊によって瞬時に接合面のせん断耐力が完全に失われる場合、水平せん断破壊により、接合面は完全合成桁の平均ひずみ $(1-\Delta\varepsilon_c)$ から、非合成桁の平均ひずみ $(1+\Delta\varepsilon_a)$ 、 $(1+\Delta\varepsilon_b)$ に変化する。このとき、位置“a”における接合面のずれ量は $(\Delta\varepsilon_a-\Delta\varepsilon_b)\times Lab$ で表される。

図-6に図-5の各荷重段階において破壊したときの接合面長さ変化率を示す。荷重 P_3 で水平せん断破壊したとき、接合面の長さは図中(3)のように変化し、床版が桁から張り出す形一般的な合成桁の破壊形態となる。ところが、荷重 P_1 で破壊したとき、床版は桁の端部から張り出すのではなく、図中(1)のように逆に引き込まれた形になり、図-4と同様に水平せん断力の作用方向とずれの方向は一致しない。また、荷重 P_2 で破壊したときは水平せん断破壊が生じたにも関わらず、図中(2)のように部材間のずれを生じないことになる。このように、合成桁接合面のずれとは互いに接合された部材の相対変位であり、水平せん断破壊の解析においては破壊時に生じる合成桁を構成する各部材の相対的な運動の方向を考慮する必要がある。

ここで床版部材、桁部材おのおのの軸方向応力 $(H = \int \sigma dA)$ を水平合応力と定義する。合成桁の接合面が切れせん断力の伝達が失われたときの床版部材の水平合応力はゼロに変化するから、ずれの中心から離れたある断面の水平合応力が圧縮のとき、破壊時の床版断面は桁断面に対してずれの中心点から離れる方向に移動し、引張のときはずれの中心点方向に移動することになる。合成桁接合面に作用する水平せん断力は隣接断面間の水平合応力差として表されるから、水平合応力の正負や大きさそのものには無関係である。

せん断スパン全体がずれを生じるまで接合面全体の水平合応力が釣り合いを保つとき、水平せん断力の値に、せん断により断面がずれの中心点に向かってずれるときを負、離れるときを正とした計算上の正負の符号を付与することによってずれの

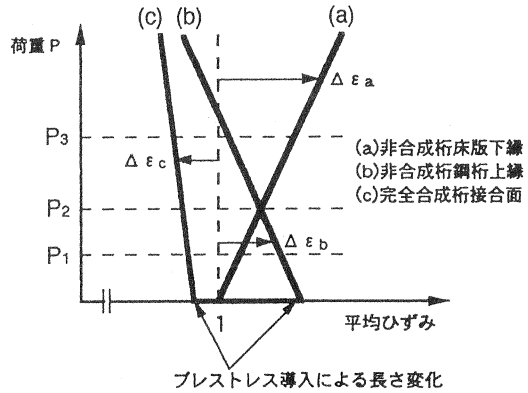
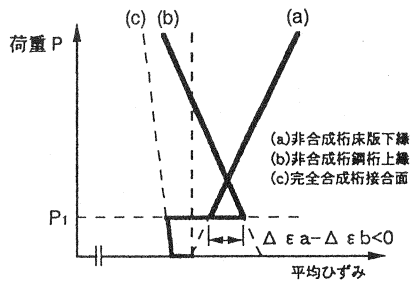
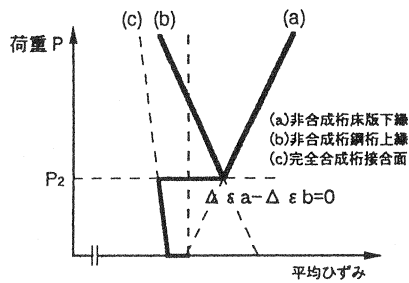


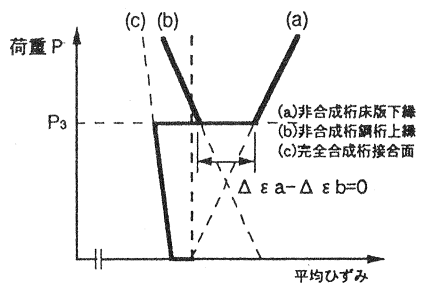
図-5 プレストレス導入非合成桁・合成桁に荷重載荷したときの荷重と接合面長さ変化率の関係



(1) 荷重 P_1 で破壊した時



(2) 荷重 P_2 で破壊した時



(3) 荷重 P_3 で破壊した時

図-6 図-5の各荷重で水平せん断破壊した時の接合面長さ変化率

方向を表現すると、ずれの方向を考慮した二点载荷による合成桁の水平せん断破壊時の限界平均せん断応力は図-7に示すようなせん断スパンのせん断の釣り合いから(1)式で表すことができる。

$$\begin{aligned} \text{つりあい式} \quad \Sigma f_{vbo} &= \tau_{cr} \cdot b \cdot (L_{bo} - x) - \tau_{cr} \cdot b \cdot x \\ H_N + \tau_{cr} \cdot b \cdot x &= 0 \quad \text{より} \\ \tau_{cr} &= \frac{(\Sigma f_{vbo} - 2H_N)}{A_v} \quad \text{--- (1)} \end{aligned}$$

τ_{cr} : 水平せん断破壊時の限界平均せん断応力
 f_{vbo} : ボルト1本あたりのせん断耐力
 H_N : せん断プレストレス力
 A_v : せん断支間の接合面積 ($A_v = L_{bo} \cdot b$)
 L_{bo} : せん断支間長
 b : 鋼桁上フランジ幅

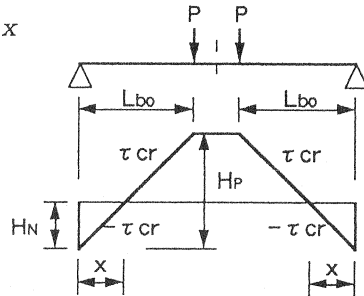


図-7 水平せん断破壊時の限界平均せん断応力分布

ここでせん断プレストレス力とはプレストレスによる合成桁の応力度と非合成桁の応力度の差から計算される水平応力で、2章で述べた定着板に作用するせん断力N'に相当する。

4. 静的载荷試験とその考察

4.1 静的载荷試験の概要

図-8に合成桁供試体の概要を示す。ここでプレベンディング供試体は予め鋼桁にプレストレスを導入し、床版と接合したのちプレストレスを除いたもので、ポストベンディング供試体は床版と鋼桁を接合したのちプレストレス導入を行ったものである。接合面の鋼桁表面は特別な処理を行わない黒皮の状態であり、鋼桁と床版の間に設けた空間に早強性無収縮モルタルを圧入し硬化のち、高力ボルトを締めつけることによって鋼桁と床版を合成した。

高力ボルトによる摩擦接合は高力ボルトの締め付け軸力によってせん断耐力が調整でき、鋼表面が黒皮の場合、せん断ずれを生じたのちもほとんどせん断耐力が低下しない特性を有する。試験に用いたボルトの周囲には無収縮モルタル充填前にウレタンを巻きつけ、水平せん断ずれ時にダウエル効果を生じないように工夫し

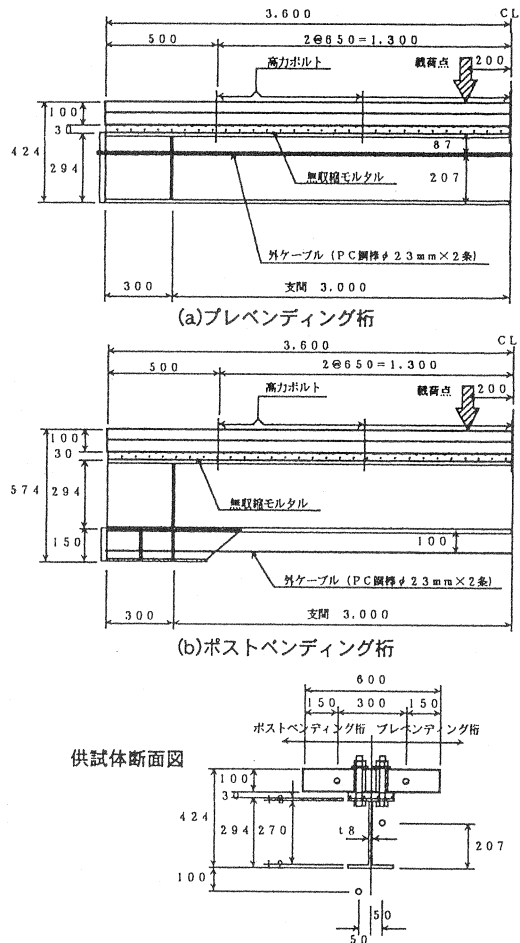


図-8 鋼コンクリート合成桁供試体

た。試験時の高力ボルト締めつけ軸力は一本あたり約11.2tfであった。なお床版には予め軸方向プレストレスを導入しひびわれを防止した。

4. 2 試験結果と考察

試験結果を表-1に示す。表中の計算値はせん断支間の平均接合応力から計算される摩擦係数と載荷直前の有効プレストレスから求めたもの

である。終局荷重の実測値からせん断プレストレスが終局水平せん断耐力を向上させる効果があることがわかる。また、表中に式(1)による計算値と、図-3に示した水平せん断応力 N'/A を増加水平せん断耐力として考慮した計算値を示したが、式(1)の計算結果と実測値がよく整合していることがわかる。

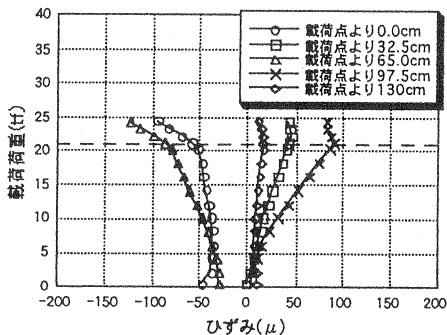
図-9に鋼桁上フランジ側面のひずみ変化を示す。プレストレスを導入していない桁(a)のひずみは約21tfまで荷重に比例して増加し、これを越した時点から逆に減少する傾向を示す。これは接合面がせん断降伏したものと推察される。(b)にプレストレスを導入した桁の場合を示す。プレストレスを導入した桁の場合も同様にひずみは約21tfまで荷重に比例して増加するが、これを越した時点から、測定点によって、ひずみがさらに大きな比率で増加する点と、減少する点に分かれる。

これはプレストレスの導入による水平せん断耐力の向上がせん断面全体の平均せん断応力を低下させることによるもので、接合面本来のせん断耐力を向上させるものではないから、プレストレスの有無とは無関係にせん断面が降伏し、以後、せん断面の水平合応力の釣り合いによって、せん断面全体の平均せん断力が摩擦接合面の摩擦耐力に達するまで耐力が維持されたものと考えられる。

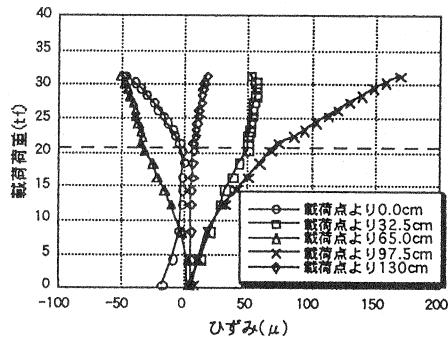
図-10にプレベンディング桁における支間中央部のひずみ分布を、図-11に桁長方向のずれ分布を示す。ひずみは水平せん断破壊以前から接合面付近で乱れており、また、局部的なずれの発生も見られるが、桁端部におけるずれは水平せん断破壊直前までほとんど生じていないことから、ずれはせん断面全体に及ぶ

表-1 静的載荷試験結果と計算値の比較

	プレベンディング桁		ポストベンディング桁	
導入プレストレス力	0	20.5	1.0	28.7
せん断プレストレス力	0	-7.9	-0.5	-13.7
終局荷重実測値(tf)	24.1	-31.7	27.5	43.6
終局時の水平せん断力(kgf/cm ²)	16.9	22.3	17.1	27.1
(1)式による終局水平せん断力計算値(kgf/cm ²)	17.2	23.3	17.6	27.8
図-3の N'/A のみを考慮した計算値(kgf/cm ²)	17.2	20.3	17.4	22.7



(a)プレストレス0 t f



(b)プレストレス20.5 t f

図-9 鋼桁上フランジ側面ひずみ分布

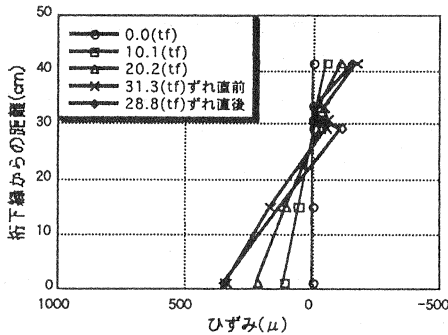


図-10 プレベンディング桁せん断支間中央断面ひずみ分布

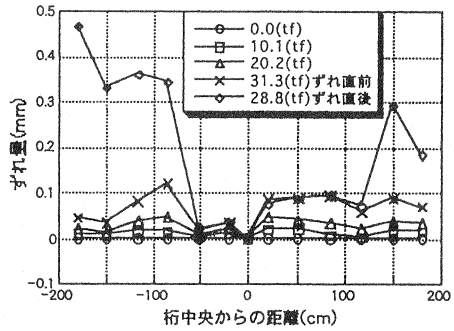
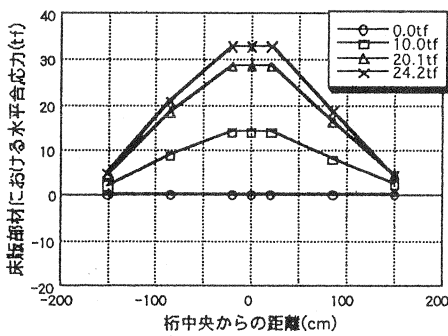
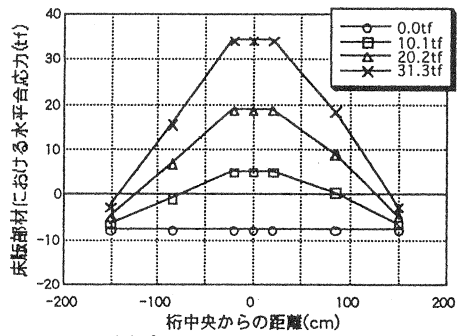


図-11 プレベンディング桁ずれ分布



(a)プレストレス0 tf



(b)プレストレス20.5 tf

図-12 プレベンディング桁の水平応力分布

ものではなかったことがわかる。

図-12にコンクリート床版に貼付したストレインゲージのひずみから求めた水平応力の分布を示す。水平応力の分布はほぼ曲げモーメントの分布形状に近似している。合成桁のずれ止めに摩擦接合を用いた場合、理論的にはせん断力が接合面本来の摩擦耐力に達した時点でずれを生じ始め、プレストレスを導入した桁では桁端部の水平応力がゼロになるまでせん断面降伏時の勾配を維持しながら水平応力が増加し、水平応力分布がプレストレスを導入していない桁と等しくなった時点で破壊するものと推察されるが、本供試体では支間中央付近の水平応力がほぼ等しくなっている。

5. まとめ

- ①純粋曲げとプレストレスは水平せん断に対する作用の点で本質的に異なる。
- ②せん断プレストレスの導入により合成桁の終局水平せん断耐力を向上できる。
- ③せん断プレストレスを導入した合成桁の水平せん断ずれの方向は、ずれ前後のひずみ変化に依存し、せん断力の作用方向と必ずしも一致しないが、水平せん断ずれの方向を考慮した限界平均せん断応力により終局水平せん断耐力が容易に計算でき、実験値と計算値は一致する。

【参考文献】1.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, プレストレストコンクリート技術協会第5回シンポジウム論文集, pp333~pp338. 2.Elements of strength of materials,S.Timoshenko and Young,D.Van Nostrand Company INC. ,Princeton, New Jersey.