

## せん断プレストレス合成桁の接合面摩擦係数とせん断補強効果

宮崎大学大学院博士前期過程 ○阿南 忍  
 宮崎大学工学部土木環境工学科 正員 今井 富士夫  
 (株) 富士ピー・エス 本部技術部 正員 徳光 卓  
 宮崎大学工学部土木環境工学科 正員 中澤 隆雄

### 1. まえがき

近年、コンクリート床版と鋼桁から成る合成桁は少主桁化に伴ってPC床版が採用されるようになってきた。本報告で対象とする合成桁はプレキャストPC床版と鋼桁間のずれ防止に従来から使用されているジベルではなく、高力ボルトによる摩擦接合を採用したものであり、荷重による両者の接合面に発生するせん断応力を低減させる「せん断プレストレス」をも導入したものである。

山崎や徳光らはせん断プレストレス合成桁の実験的検討を行い、摩擦接合とせん断プレストレスの導入により、PC床版と鋼桁の接合面のすべりを抑制できることを明らかにしてきた<sup>1) - 2)</sup>。著者らはこのような合成桁の非弾性挙動を解明するために、中島らが提案した剛体ばねモデル<sup>3)</sup>を採用し、接合面のずれ問題で重要な因子となる摩擦係数は徳光らが行った摩擦接合された鋼板とコンクリートの二面せん断試験から得られた摩擦係数式<sup>4) - 6)</sup>を直接使用してきたが、ずれ性状やずれ耐荷力を十分に表現できていないことが明らかとなった<sup>6)</sup>。

本論文では、まず山崎らが行った二面せん断試験<sup>5)</sup>の供試体をモデルに有限要素法にて解析を行い、支圧応力下での接合面の摩擦係数についての検討を行い、次いで、せん断プレストレス合成桁を中島らが提案した剛体ばねモデルで解析することにより、より適切な接合面の摩擦係数式について考察をするとともに、せん断プレストレスの有効性についても検討した。

### 2. 二面せん断試験

#### 2.1 解析モデルと解析概要

山崎らが行った二面せん断試験<sup>4)</sup>の概要を図-1に示す。実験は右端の油圧ジャッキにより供試体に一定軸力を導入した後に、上側ジャッキにより2つのコンクリートの中央に設置された鋼板を押し抜くものである。対象とするせん断プレストレス合成桁にはプレキャストPC床版が使用されているため、鋼桁との間にモルタルが注入されている。そこで、二面せん断試験でも同様な条件となるように、鋼板とコンクリートの間に薄いモルタル層を配置している。

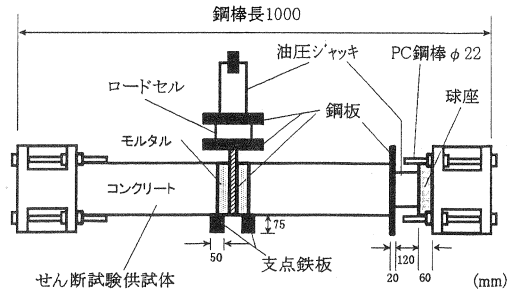


図-1 二面せん断試験の概要

解析では鋼やモルタルならびにコンクリートは8節

点アイソパラメトリック要素を用い、接合面は厚さの無い分布ばねを採用した。分布ばねのばね係数は圧着条件を十分に満足するように軸方向ばねは  $1.0 \times 10^8$  (N/mm<sup>2</sup>)/mm とし、せん断方向ばねは  $1.0 \times 10^6$  (N/mm<sup>2</sup>)/mm とした。

実験では水平軸力を接合面面積で除した平均支圧応力に換算した  $4.9 \sim 15.0$  N/mm<sup>2</sup> の5種類の入力支圧応力を作用させた。この実験から得られた接合面の支圧応力とせん断応力強度の関係は以下ようになった。

$$\tau_u = \mu \sigma \dots\dots\dots (1)$$

$$\mu = 1.76 - 0.678 \log(\sigma / \sigma_u) \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 $\tau_u$ はせん断強度、 $\sigma$ は支圧応力、 $\mu$ は摩擦係数、 $\sigma_u$ は圧縮強度であり、支圧応力レベルである( $\sigma/\sigma_u$ )は百分率である。摩擦係数は二面せん断試験結果の回帰曲線から得られたものであり、図-2に示す。

### 2.2 接合面の摩擦係数に関する解析結果

一般に式(2)の摩擦係数は一定値として設計されている。図-3は入力支圧応力のうち、4.9N/mm<sup>2</sup>と15.0N/mm<sup>2</sup>について、実験と解析結果を比較したもので、摩擦係数は式(2)で示すものに加えて、一定摩擦係数 $\mu=0.6$ と $0.9$ <sup>7)</sup>の2つについても解析を行った。ここで、入力せん断応力とは鋼板の押し抜き荷重Pを断面積で除したものである。

入力支圧応力が低い場合には $\mu=0.6$ に、入力支圧応力が高い場合では $\mu=0.9$ に、実験で得られたずれ耐力と大きな差異が見られる。このことから、支圧応力が存在するときの摩擦係数は一定としては不十分なものと云えよう。これに対して、式(2)の摩擦係数式を用いた場合は実験とよく一致する結果となった。よって、以下では式(2)の支圧応力に依存する摩擦係数を用いて解析を行った。

5種類の入力支圧応力について解析を行い、そのときに得られた摩擦係数を整理してみると、図-4のような結果が得られた。図から明らかなように、入力支圧応力が低い4.9N/mm<sup>2</sup>のときに摩擦係数が1.0を越えるものがみられ、支圧応力が大きくなるにつれて摩擦係数が小さくなる。そこで、摩擦係数が1.0を越える場合には、 $\mu=1.0$ とする $\mu \leq 1.0$ の条件を導入した摩擦係数の補正を考えた。

図-5は入力支圧応力4.9N/mm<sup>2</sup>と7.5N/mm<sup>2</sup>について、摩擦係数の補正の有無と実験の比較したものである。入力支圧応力7.5N/mm<sup>2</sup>の場合には $\mu$ はほぼ1.0以下にあるので、ずれ変位に多少の差異は生じるものの、ずれ耐力には補正の有無の影響は生じていない。入力支圧応力4.9N/mm<sup>2</sup>の場合には、終局時近傍のずれ変位や耐力の両面から摩擦係数の補正は必要であると考えられる。

以上のことから支圧応力下での摩擦係数は二面せん断試験から得られた式(2)を用い、条件として $\mu \leq 1.0$ の摩擦係数の補正を行う必要がある。

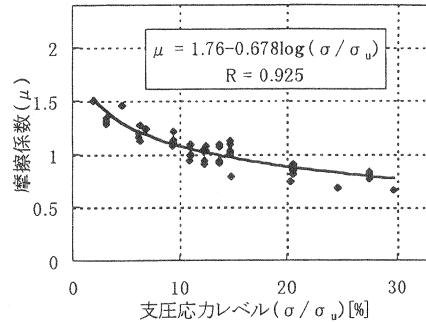


図-2 摩擦係数—支圧応力レベル関係

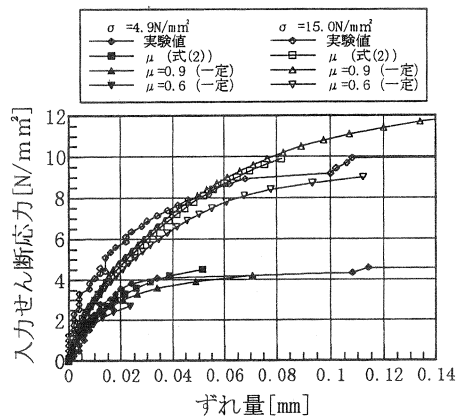


図-3 摩擦係数の比較

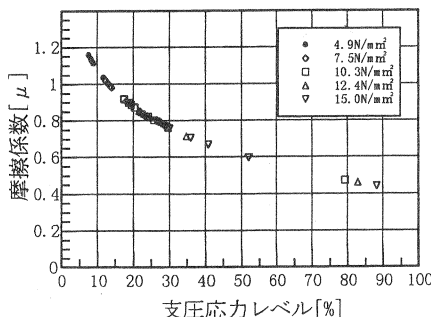


図-4 摩擦係数—支圧応力レベル関係

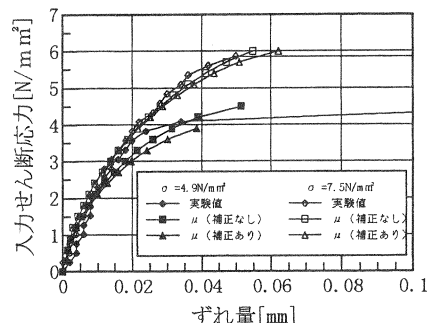


図-5 摩擦係数の補正

### 3. せん断プレストレス合成桁

#### 3.1 せん断プレストレストの導入方法<sup>1)</sup>

せん断プレストレス合成桁については文献<sup>1)</sup>にも述べられているが、ここでも改めて、図-6でせん断プレストレストの導入方法を紹介する。

- (a) 鋼桁の中立軸から上部に設置された PC 鋼棒あるいは PC 鋼線に緊張力を与え、鋼桁に偏心軸圧縮力を導入する。この初期曲げはプレビームで採用されるような鉛直荷重などでもよい。
- (b) 下側に曲げ変形した鋼桁上面にプレキャスト PC 床版を配置し、鋼桁と PC 床版との空間に無収縮モルタルを注入する。
- (c) モルタル硬化後に高力ボルト (図中の矢印) により、鋼桁と床版を摩擦接合する。
- (d) 一体化した後に軸圧縮力を解放することにより、供用後の荷重とは逆向きのせん断応力が床版と鋼桁の接合面に発生する。

このせん断応力を「せん断プレストレス」と呼ぶ。

#### 3.2 解析モデル

実験で使用した合成桁は図-7に示すもので<sup>1)</sup>、鋼桁の腹板に設置した PC 鋼棒を緊張することにより鋼桁を曲げ、前述の手順でせん断プレストレストを導入した。ここで、高力ボルトは最小限の本数として桁全体に5列配置し、1本当たりの 143kN の軸力を導入している。

解析モデルはコンクリート床板ならびに床板と鋼桁とを結ぶモルタルは 2 分割し、鋼桁はフランジと 6 分割した腹板の計 8 分割を用いた。実験で使用した合成桁は構造および荷重ともに対称であるため半解析を行い、剛体要素としての分割要素は、合成桁の層方向に関して材料ごとに 3 分割、材軸方向に関して 7 3 分割とした。

#### 3.3 接合面摩擦係数

本解析では接合面の摩擦係数は二面せん断試験から得られた式(2)を使用した<sup>6)</sup>。図-8は後述する2点対称集中荷重に対する解析結果から得られた摩擦係数 $\mu$ を整理したものである。図-8に示すように支圧応力レベルが低いところでは摩擦係数が 1.0 以上となっている。そこで、二面せん断試験の解析と同様に $\mu > 1.0$  の場合には $\mu = 1.0$  とした摩擦係数の補正の有無について解析し、実験との比較検討を行った。

#### 3.4 2点集中荷重の解析結果および考察

##### (1) 荷重とずれ量

図-9は桁中央から 20cm 離れた位置に2点集中荷重を受けるせん断プレストレストを導入した合成桁の荷重に対する桁端部の接合面ずれ量の変化を示したものである。実験結果から明らかなように 340kN で急激なすべりが生じるが、一度除荷した後に再度荷重すると、およそ 400kN までほぼ線形的な挙動になっている

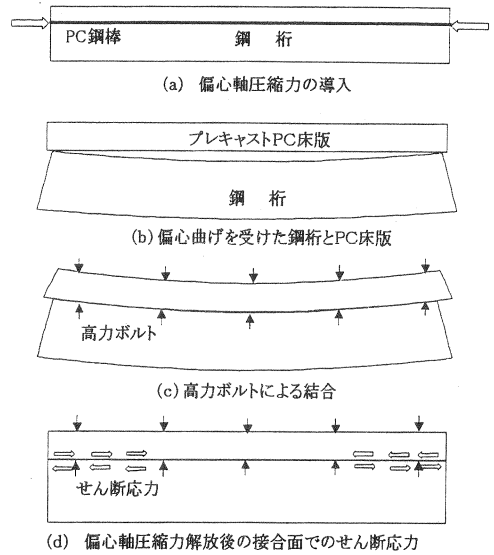


図-6 せん断プレストレストの導入過程

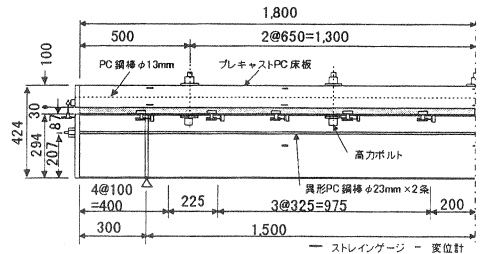


図-7 合成桁供試体

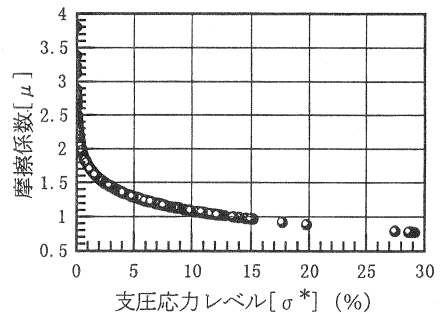


図-8 摩擦係数と支圧応力レベル

ることが判る。これは摩擦接合されていることによるもので、初期荷重で接合面が摩擦限界に達したときに生じたずれが、除荷をすると残留ずれがせん断プレストレス力に変化するためである。

解析と実験との比較では、式(2)の摩擦係数をそのまま用いた補正無し場合には摩擦限界ならびにずれ耐力ともに実験値を大きく上回るものとなっている。これに対して、 $\mu \leq 1.0$  と摩擦係数の補正した場合には実験値とほぼ一致した結果となった。このことから、二面せん断試験の解析と同様に摩擦係数の補正( $\mu \leq 1.0$ )は妥当な考え方であるといえよう。よって、これ以降に示す解析結果は摩擦係数を $\mu \leq 1.0$  と補正したものを採用するものとする。

(2) せん断プレストレス導入

図-10はせん断プレストレス導入時の接合面せん断応力分布を示したものである。実験値は鋼桁フランジの材軸方向ひずみから距離平均換算した粗いものとなっていることから、解析結果もそれに準じて換算した。図からピークや分布に若干の差異が見られるものの解析値と実験値は良く符合している。また、せん断プレストレスによるせん断応力は支点から30cm付近(桁端部から60cm付近)でピークが見られることから、鉛直荷重に対する合成桁の接合面せん断応力を合理的に相殺していることが判る。

(3) せん断プレストレスの効果

せん断プレストレスの効果を明確にするために、せん断プレストレスを導入しない場合についても解析を行い、両者を比較する。図-11は2点集中荷重した場合の荷重に対する桁端部のずれ量を示したものである。図中、「prestress」はせん断プレストレスを導入したもので、「nonpre」はPC床版と鋼桁の結合には高力ボルトによる摩擦接合を採用するが、せん断プレストレスは導入していないものである。図より明らかなように、ずれ量が急激に増大する荷重がせん断プレストレスを導入することにより、弾性限界が100kN程度向上している。終局耐力はせん断プレストレスを導入すると幾分低下するが、これは鋼桁やPC床版のせん断プレストレスの導入による初期応力が起因するものである。

(4) たわみ

図-12は荷重と中央点たわみの関係を示したものである。せん断プレストレスを導入しない場合にはPC床版と鋼桁との間のずれが顕著となり(図-11参照)、荷重300kNよりたわみの増加が大きくなる。せん断プレストレスを導入した場合は終局近傍までほぼ一体性は維持されており、せん

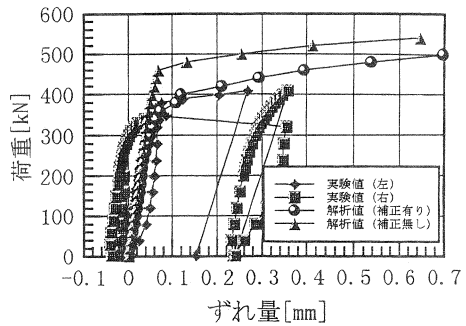


図-9 接合面ずれ量

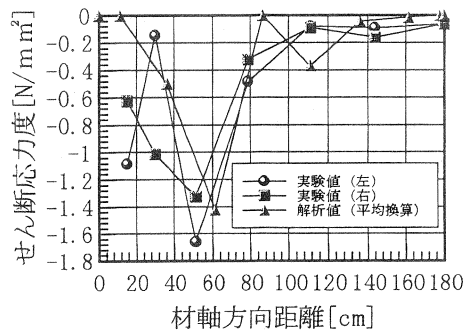


図-10 せん断プレストレスによるせん断応力分布

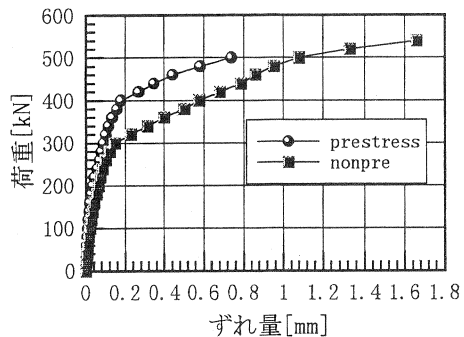


図-11 せん断プレストレスの効果

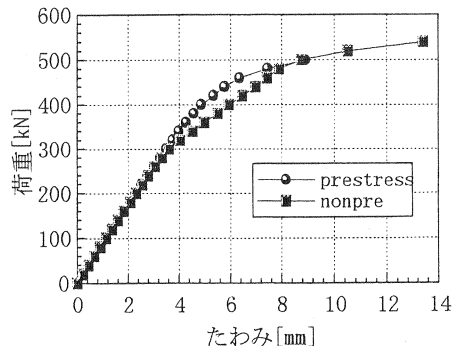


図-12 荷重-たわみ曲線

断プレストレスの優位性が見られる。

(5) 崩壊過程

図-13 は供試体の高力ボルトによる摩擦接合から終局までの状態変化を示したものである。(a)高力ボルトを締め付けたとき、節 3.5 で後述するように、ボルト支圧領域が狭いためにボルト間には鋼桁と床版間に肌離れが生じた。(b)これにせん断プレストレスを導入すると、充填モルタルの一部にひび割れが発生している。その後、(c) 2点対称集中荷重を負荷すると、荷重により支点近傍の肌離れ区間は減少するが、せん断ばねの塑性化が進行し、接合面の塑性化ならびに鋼桁の引張塑性によって終局に至っている。

3.5 等分布荷重の解析結果および考察

これまでの解析では、高力ボルトは桁全体で5列(幅員方向には2本)配置したものであった。図-14は5列の高力ボルトの締め付けによる支圧応力と式(1)から得られた支圧応力に対するせん断強度の分布を桁半分について示したものである。図から明らかのように、高力ボルト1本あたりの支圧応力の発生領域は25cm程度と狭く、中間部には全くせん断強度は存在しえない状態にある。そこで、高力ボルトの配置を22.5cm間隔にして17列を配置し、実橋に近い状態にするために支点を桁端部に移し、対象荷重も等分布荷重として解析を行った。図は割愛しているが、このときの支圧応力は最小値が4N/mm<sup>2</sup>で、桁全域にわたって生じており、桁全域にせん断強度が発生している状態となった。

図-15は高力ボルトを17列とし、等分布荷重による接合面せん断応力分布の推移を示したものである。図中、「prestress時」はせん断プレストレス導入時のものである。せん断プレストレス導入時はせん断プレストレス効果が見られ、桁端部で高い値となっている。等分布荷重の増加に伴い、端部のせん断応力のみが増大し、中間部にはほとんどせん断応力が発生しないようなものとなっている。

図-16はせん断プレストレスの有無における等分布荷重に対する桁端部のずれ量を示したものである。このときにはせん断プレストレスの導入の有無に関わらず、大きなずれを生じていない。高力ボルトの本数を増したことにより摩擦接合の有効面積が増加したために、ずれ抑制が飛躍的に向上し、弾性的な挙動で終局に至っている。

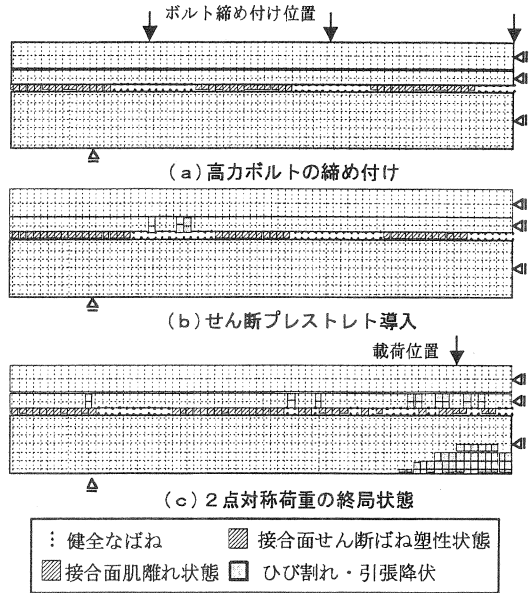


図-13 破壊過程

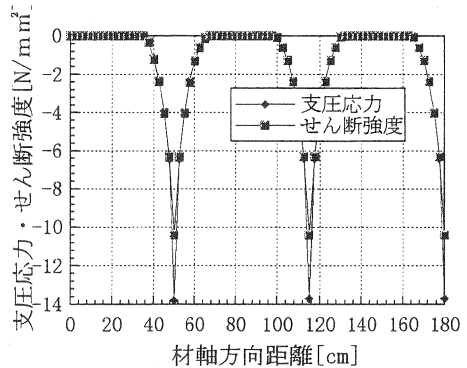


図-14 5列の高力ボルト

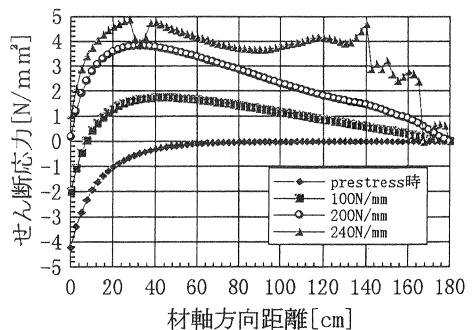


図-15 接合面のせん断応力

図-17はせん断プレストレスの有無における荷重と中央点たわみの関係を示したものである。図からも明らかなように、ずれ抑制と同様にせん断プレストレスの抑制効果はあまり顕著ではない。

図-18は終局状態の塑性状態を示したものである。高力ボルトの本数を増加させたことにより支圧応力は桁全域にわたって生じるため、終局までばねはほぼ健全な状態を保っており、鋼桁の引張塑性化によって終局状態となっていることが判る。

#### 4. あとがき

本研究で得られた結果を要約すると以下のようになる。

- (1) 摩擦係数は二面せん断試験から得られた式を用いるが、摩擦係数には  $\mu \leq 1.0$  の条件が必要となる。
- (2) せん断プレストレスは接合面ずれ抑制に効果的である。
- (3) 高力ボルトの本数を多くすれば、十分にずれを抑制できる。

今後の検討ととして、せん断プレストレスを有効に機能できる適切な高力ボルトの配置法がある。

#### 【謝辞】

本研究の遂行にあたり、有益な実験データやご助言をいただいた九州工業大学の出光先生ならびに山崎先生に感謝の意を表します。また、数値計算の一部を修士論文の研究として行った現在(株)オリエンタルコンサルタツの工藤徹朗氏に謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 徳光卓 他3名：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、第2号、pp.1395-1400、1997
- 2) 徳光卓 他2名：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、土木学会論文集、No.592/V-39、pp.63-72、1998.5
- 3) 中島章典 他3名：ずれ止めの非線形挙動を考慮した不完全合成桁の断塑性解析、土木学会論文集、No.537/I-35、pp97-106、1996.4
- 4) 山崎竹博 他2名：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、平成3~5年度科学研究費補助金試験研究(B)(1)研究成果、pp.18-31、1994.5
- 5) 立石健二 他3名：載荷面の不整合が二面せん断試験に及ぼす影響、土木学会西部支部研究発表会講演概要集、pp.886-887、1996.3
- 6) 今井富士夫 他3名：せん断プレストレス合成桁の非線形ずれ解析、構造工学論文集、Vol.45.A1489-1496、1999
- 7) 山崎竹博 他2名：せん断プレストレス導入鋼・コンクリート合成桁接合面の処理方法とせん断耐力、コンクリート工学年次論文報告集、第14巻、第2号、pp.779-784、1992

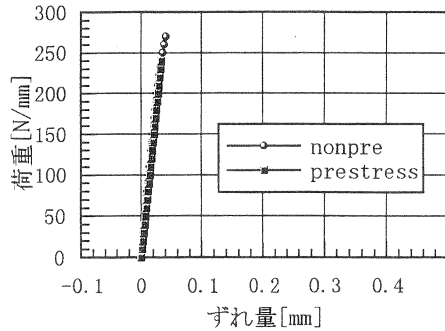


図-16 高力ボルトによるずれ抑制

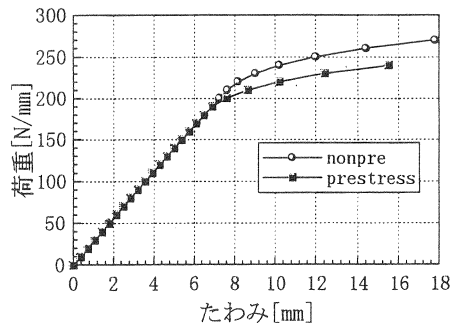


図-17 荷重-たわみ曲

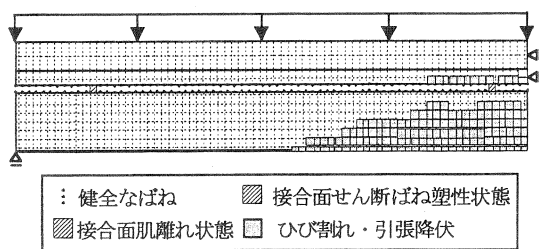


図-18 破壊過程