

(21) プレせん断合成桁の応力解析

宮崎大学大学院博士前期課程

○道下 誠司

宮崎大学工学部土木環境工学科

今井 富士夫

(株)富士ピー・エス 本店技術部

正会員 徳光 卓

宮崎大学工学部土木環境工学科

正会員 中澤 隆雄

1. まえがき

プレキャストコンクリート床版と鋼桁から成る合成桁の架設が多く採用されるようになってきた。この種の合成桁では床版と鋼桁との間のせん断ずれを抑制することが重要な問題となる。著者らの1人が考案したせん断プレストレスを導入した合成桁は、プレストレスによって生じる接合面せん断応力が荷重によるせん断応力を相殺する作用があること、床版と鋼桁は高力ボルトにより摩擦接合されているのでせん断ずれ強度を広く分布できることなど、床版と鋼桁との一体性を終局時まで維持することのできる合理的な合成桁であることが、耐荷力試験などにより、実験的に検証されている¹⁾。

本研究はこのようなプレせん断合成桁の応力挙動を理論的に解明しようとするもので、ここでは、その基礎的研究として、解析手法の選定と線形解析によって得られた応力挙動について報告する。

2. 解析に使用された合成桁

解析に使用された合成桁を示すと図-1のようになる。この合成桁は徳光らが先に耐荷力試験に使用した供試体¹⁾で、実験でのせん断プレストレスを導入するまでの施工過程は以下のようになる。

- ①鋼桁の図心軸より上に設置されたP C鋼棒に30.6tfの緊張力を与えて、プレストレス力を導入する。
- ②鋼桁上面にプレキャストコンクリート床版を設置し、鋼桁との間に無収縮モルタルを注入する。
- ③モルタル硬化後に、高力ボルトに1本あたり14.3tfの軸力を導入し、鋼桁と床版の摩擦接合を図る。
- ④鋼桁と床版を一体化させた後に、先に導入したP C鋼棒によるプレストレスを除去する。

この過程を経ることにより、荷重に抵抗するプレせん断応力が鋼桁とモルタル間に発生する。荷重は2点集中荷重として、中央点から20cm離れた箇所に乗荷した。ただし、高力ボルトの導入軸力はモルタルのクリープやボルトのリラクゼーションなどにより、荷重載荷時には軸力は12.2tfと低減していた。

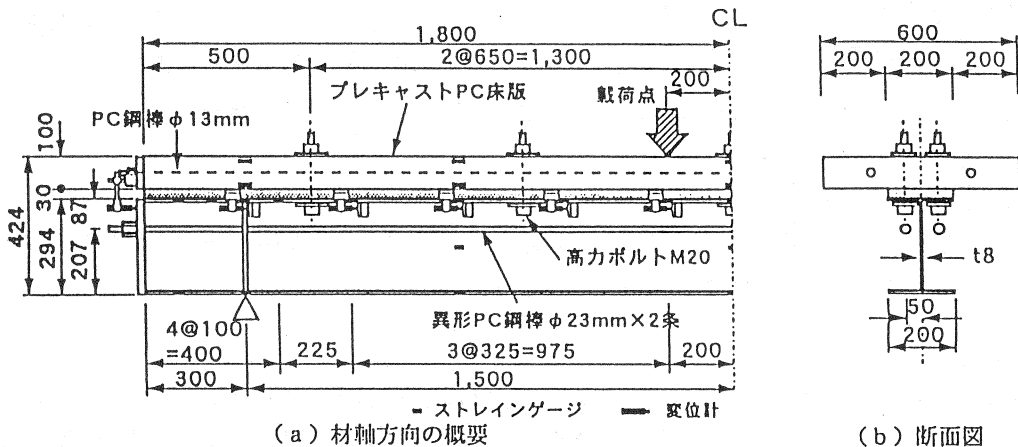


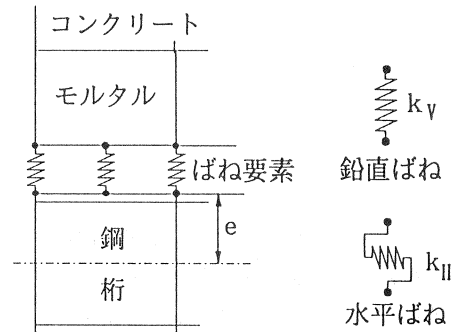
図-1 解析に用いた合成桁 (供試体)

3. 解析手法

ここでは2次元解析を行う。コンクリートとモルタルについては、1節点の自由度が水平変位と鉛直変位の2つとなる8節点アイソパラメトリック板要素⁴⁾を使用し、鋼桁とモルタル間にはせん断ずれが解明できるように、図-2(b)に示すような鉛直ばねと水平ばねから成るばね要素を挿入した。鋼桁については、図-3に示す2つの要素モデルを考えた。すなわち、1つは鋼桁を3節点のせん断変形も考慮したアイソパラメトリックはり要素⁴⁾で、1節点の自由度は水平変位、鉛直変位および回転角の3自由度となる。以後、BMPLA要素と称す。

他の1つは腹板はコンクリートなどと同様な8節点板要素とするが、フランジ部は3節点の軸力のみ(1自由度/節点)が作用する棒要素とした。以後、AXPLA要素と称す。

以下にこれらの要素の詳細について説明する。



(a) 鋼桁とモルタル間のばね要素 (b) ばね要素

図-2 鋼桁とモルタル間の結合

(1) BMPLA要素

図-3(a)から明らかなように、BMPLA要素では鋼桁のはり要素の軸線とばね要素の設置面となる鋼桁上面との間には距離eの偏心があり、その自由度も異なるものとなる。そこで、鋼桁上面とはり要素のそれぞれの変位を偏心eを用いて、適合条件を示すと以下ようになる。

$$\begin{Bmatrix} u_f \\ v_f \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -e \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_b \\ v_b \\ \theta_b \end{Bmatrix} \quad (1)$$

あるいは、 $u_f = \lambda u_b$ (1)

ばね要素の剛性方程式は次式で表される。

$$\begin{Bmatrix} f_f \\ f_m \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k & -k \\ -k & k \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_f \\ u_m \end{Bmatrix} \quad (2)$$

ここに、 $f_i = \{N_i \ Q_i\}^T$ と $u_i = \{u_i \ v_i\}^T$ は

それぞれ節点力ならびに変位ベクトルであり、

$$k = \begin{bmatrix} k_H & 0 \\ 0 & k_V \end{bmatrix} \text{ はばね剛性マトリックスである。}$$

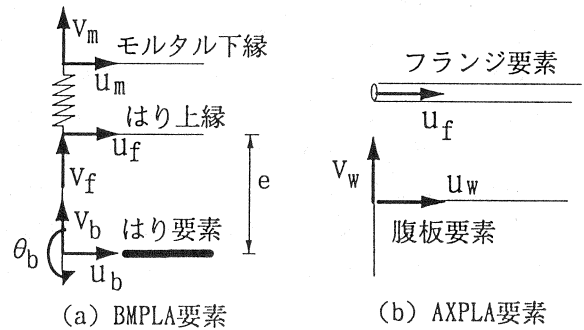
式(1)と(2)から、はり要素の偏心を考慮したばねの剛性マトリックスが誘導できる。

$$\begin{Bmatrix} f_b \\ f_m \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda^T k \lambda & -\lambda^T k \\ -k \lambda & k \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_b \\ u_m \end{Bmatrix} \quad (3)$$

ここに、 $f_b = \{N_b \ Q_b \ M_b\}^T$ および $f_m = \{N_m \ Q_m\}^T$ は各々はり要素とモルタル要素の節点力ベクトルで、変位ベクトルは節点力ベクトルに対応するものとなる。

(2) AXPLA要素

鋼桁をBMPLA要素のように1本のはり要素とすると、鋼桁の局部的な変位が表現できない。そこで、AXPLA要素は図-3(b)に示すように、鋼桁のフランジを軸力のみが作用する3節点棒要素とし、腹板を通常の8節点板要素で表現した。フランジは他の構造要素に比べて、高さ(板厚)が低いので、これを平面要素とすると、要素の(高さ/幅)比を1/2以下とするには膨大な要素分割が必要となる。また、フランジを1軸



(a) BMPLA要素 (b) AXPLA要素

図-3 解析要素の自由度

棒要素で表現することは、H桁のせん断力と曲げモーメントの断面力とそれによる桁の応力分布の特性を考えれば、力学的には十分に説明ができる力学モデルと云えよう。

4. 解析結果および考察

本解析では上記の2つの手法を用いて、図-1に示す供試体の解析を行った。使用した各要素の材料特性は表-1に示すとおりである。モルタルと鋼桁の間に設けたばね定数は、合成桁が一体性を保つことのできる値とし、ここでは水平、鉛直ばねのいずれも $1.0 \times 10^6 \text{ kgf/cm}$ とした。

表-1 材料特性

| | 弾性係数 (kgf/cm ²) | ポアソン比 |
|--------|-----------------------------|-------|
| コンクリート | 3.54×10^5 | 0.167 |
| モルタル | 2.59×10^5 | 0.167 |
| 鋼 桁 | 2.1×10^6 | 0.3 |

解析でのせん断プレストレスは、合成以前の鋼桁にP C鋼棒により導入された軸圧縮荷重と等価な軸引張荷重を合成桁の腹板の同様な位置に与えることで処理しており、また、解析では構造および荷重ともに対称であることから、対称性を利用して桁半分を解析対象とし、要素の分割は次のようにした。すなわち、材軸方向には36分割、高さ方向には、コンクリートは2分割、モルタルは1分割、AXPLA要素での鋼桁腹板は5分割した。よって、以下の解析結果で桁の長手方向を論ずる場合には合成桁の左半分を図示している。

(1)せん断プレストレスによる挙動

図-4と図-5はそれぞれ、せん断プレストレス導入時の接合面の2方向のばね力から換算したせん断応力と垂直応力を示したものである。ばね力からの換算応力はばね力をばねが負担している面積で除したものである。図-4の実験によるせん断応力は桁の左右のものを図示しており、右側のせん断応力の符号は反転している。

せん断応力は梁全体に等曲げが作用しているにも関わらず、解析では70cmから、実験では100cmから端部に向けてせん断応力が生じている。これは通常のはり理論では生じないもので、載荷点や荷重集中点の応力集中による現象である²⁾。実験と解析結果を比較すると、実験値では100cmから50cmまでせん断応力は上昇し、50cmでピークとなって、端部へ向けて減少する傾向にある。一方、鋼桁をはり要素としたBMPLA要素では70cmから端部へ向けてせん断応力は上昇しつつ、ピークはみられないが、AXPLA要素は70cmより15cmまで上昇し、これより端部へと減少している。実験とAXPLA要素のせん

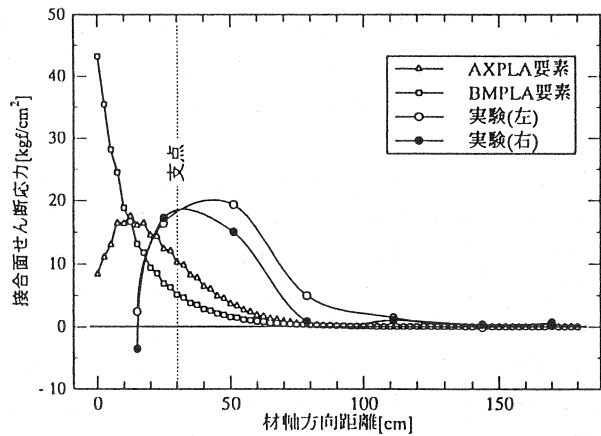


図-4 せん断プレストレス導入時の接合面せん断応力

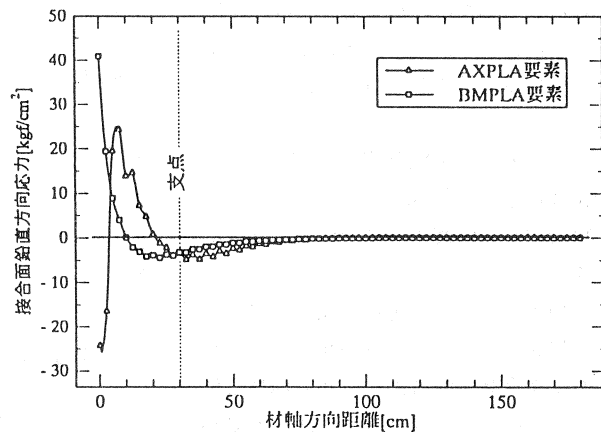


図-5 せん断プレストレス導入時の接合面鉛直方向応力

断応力は定性的には符合したものとなっている。

2つの解析の差異はP C鋼棒による軸力の載荷点である自由端の変位を示した図-6から明らかになる。AXPLA要素では腹板を細かな板要素に分割しているため、鋼桁腹板の荷重集中点に大きな変位が生じているが、BMPLA要素では鋼桁をはり要素としたため、鋼桁部は平面を維持したものとなっており、荷重集中点の変形挙動を忠実に解明できていないことになる。

次にAXPLA要素と実験との差異は次のように推測される。鉛直方向応力(図-5)が端部近傍から20cmの区間で引張応力となっている。これと後述する高力ボルトの締め付け効果を併せ検討すると、実際にはこの区間では鋼桁と床版が離れることになり、一体性は失われているものと考えられ、このため、実験と解析でのせん断応力ピーク点のずれとなって表れたものと思われる。

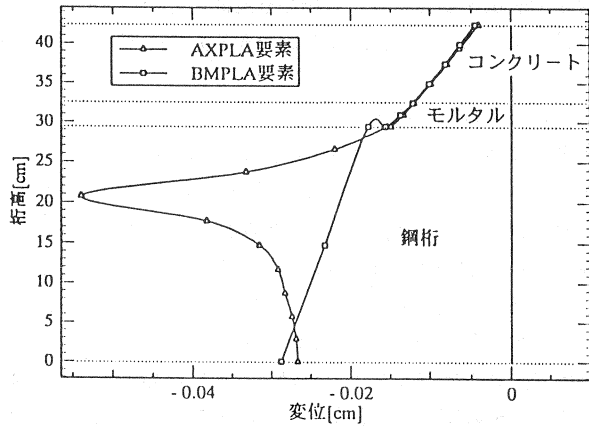


図-6 せん断プレストレス導入時の自由端の変形

(2)高力ボルトの締め付けによる接合面の応力

本実験では鋼桁にプレストレスを導入した後に、床版と鋼桁を一体化させるために、図-1に示すように高力ボルトで両者を締め付けている。高力ボルトは1断面に2本設置され、試験時の1本あたりのボルト軸力は12.2tfとなっていた。よって、解析での締め付け力は12.2tfとした。

高力ボルトの締め付け影響をAXPLA要素を用いて解析を行った結果が図-7である。図には高力ボルト締め付け後の接合面の鉛直方向応力とその応力による接合面のせん断強度を示している。ここでの鉛直方向応力は圧縮を正として取り扱っている。ここで定義したせん断強度は、解析に使用している合成桁の試験を行うに当たり、床版と鋼桁のすべり強度を確認するために行われた二面せん断試験の結果から得られたものを採用しており、以下のようなになる³⁾。

$$\tau_c = \mu \sigma$$

ここに、 τ_c はせん断強度、 σ は支圧応力である。また、 μ は摩擦係数で次式となる。

$$\mu = 1.75 - 65.03 \times \log(\sigma / \sigma_u) \quad (5)$$

ここに、 σ_u は圧縮強度で、 (σ / σ_u) の値は百分率となっている。

解析結果の鉛直方向応力が支圧応力に相当する。

高力ボルトの締め付けにより、締め付け位置に鉛直方向応力の高い集中がみられ、これに伴うせん断強度の分布も同様な傾向となっている。せん断強度に対する締め付け影響は締め付け位置から両側に20cm程度で、ボルト間の中間部や支点から自由端側

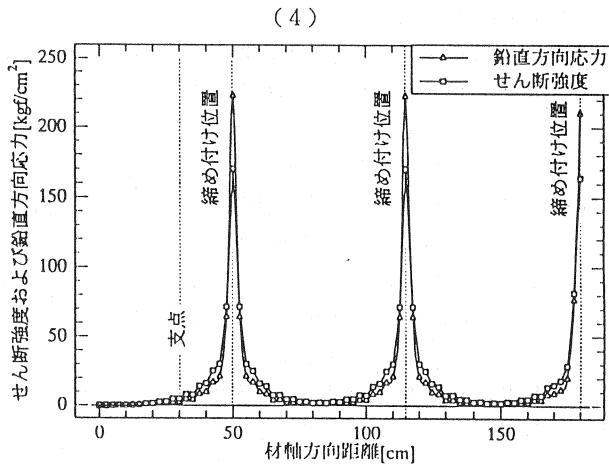


図-7 高力ボルト締め付け時の接合面の鉛直方向応力とせん断強度

へはせん断強度はほとんどないものとなっており、せん断強度を10~20kgf/cm²として、合成桁の全域にわたって広く分散させるには、高力ボルトの間隔は、この供試体では現在の1/2とする必要があることになる。しかしながら、本解析では1節点に締め付け力を集中して負荷させているが、実験では図-1に示すように支圧板を介して高力ボルトの締め付けを行っている。締め付け力を支圧板に分散させて負荷した場合には鉛直方向応力の平坦な広がりが見込まれることから、締め付け力による鉛直方向応力分布に関しては、さらに詳細な解析・検討が必要と思われる。

(3)集中荷重による接合面の応力

ここでは2点対称集中荷重による接合面の応力分布について考察する。ここでの荷重は片側10.2tfとした。図-8と図-9はそれぞれ、せん断応力と鉛直方向応力を示したものである。鉛直方向応力についてみると、載荷点近傍ならびに支点近傍には床版を押しつける鉛直方向応力が発生するが、70cm~120cmの間ではその応力はほとんど生じていない。また、自由端近傍では引張の鉛直方向応力となっており、この区間では床版と鋼桁は荷重によっても離れる傾向にある。また、これまでの解析結果とは逆に、BMPLA要素に支点で大きな応力集中がみられ、AXPLA要素では緩やかな変動となっている。

せん断応力は、50cmから150cmの間まではほぼ一定の分布となっており、その値ははり理論のものとはほぼ一致しているが、自由端から50cm以下では徐々に低減していく傾向にある。集中荷重に対するせん断応力の結果には2つの解析手法の差異はあまりみられないようである。また、支点近傍のせん断応力はせん断プレストレスによるせん断応力とは逆の符号となっており、このことにより、支点近傍では荷重によるせん断応力はせん断プレストレスによって、相殺されることが判る。

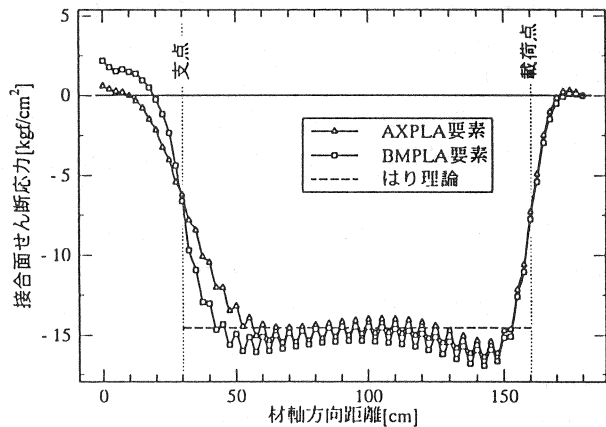


図-8 集中荷重による接合面せん断応力

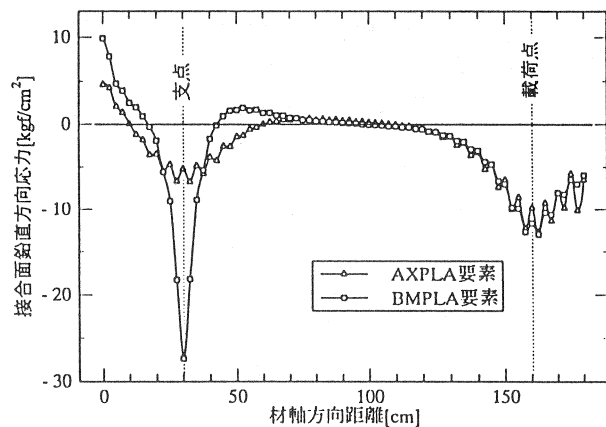


図-9 集中荷重による接合面鉛直方向応力

(4)せん断プレストレスとボルト支圧による効果

これまでの結果からせん断プレストレスとボルト支圧がプレキャストコンクリート床版と鋼桁から成る合成桁の一体性に与える影響について考察する。せん断プレストレスは荷重による支点近傍のせん断応力を相殺することができるので、ずれが最大となる支点近傍の床版と鋼桁間のずれ抑制に大きな効果を有することが判明した。また、せん断プレストレスによってはせん断ずれ抑制が期待できない合成桁の中間部においては、ボルト支圧によるせん断強度の増加により、せん断ずれ耐力の向上が図れることも明らかとなった。し

かしながら、本解析の結果のみから判断すると、ずれ耐力に必要なせん断強度を合成桁の中間部に均等に与えるためには、高力ボルトの配置を現在の2倍にすることが必要となる。

5. まとめ

ここでの報告はせん断プレストレスが導入されたプレキャストコンクリート床版と鋼桁から成る合成桁の応力特性を理論的に解明することを目的に、その基礎的な段階の研究として線形的な解析を行った。解析法として、鋼桁をはり要素として偏心結合を考えたBMPLA要素と、鋼桁をフランジと腹板に分離し、フランジには軸変形のみを考えた棒要素を、腹板には通常のアイソパラメトリック板要素とするAXPLA要素の2つを考え、その適用性についても検討した。ここで得られた結果を要約すると、以下のようになる。

- (1) 本解析では通常のはり理論では生じない局部変形に伴う応力の検討が必要であり、解析法には局部変形を忠実に解析できるものが要求される。2つの解析法ではAXPLA要素がこの要求を満たすものとなる。
- (2) せん断プレストレスと高力ボルトによる支圧力は合成桁の一体性を維持するために有効に機能している。
- (3) 高力ボルトの支圧影響に関しては、支圧板の効果などを厳密に考慮した解析を行う必要がある。

ここでの解析はすべて線形解析によるもので、このような合成桁の接合面の破壊挙動を解明するには至っていない。耐荷力特性を詳細に明らかにするためには、AXPLA要素を採用するとともに、接合面のばね特性や高力ボルトの支圧影響を今後検討していく必要がある。

【参考論文】

- 1)徳光卓、出光隆、山崎竹博、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、第2号、pp. 1395-1400、1997
- 2)S. P. Timoshenko and J. N. Goodier：Theory of Elasticity, pp. 35-64, 1970
- 3)立石健二・出光隆・山崎竹博・徳光卓：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、pp. 886-887、1996
- 4)E. Hinton and D. R. J. Owen (川井忠彦監訳)：有限要素プログラミング、丸善、1981