

鋼 コンクリート複合構造に用いられるずれ止めの数値的性能評価

Numerical evaluation of performance of shear connectors for steel and concrete hybrid structures

田中 光*
Akira TANAKA

*構造強度学研究室（研究指導教員：斉木功 准教授）

For the best performance of hybrid structures, it is inevitable to combine members made of different materials. Japanese design codes of steel and concrete hybrid structures require mechanical shear connectors to combine the members so that cross sectional forces are transmitted through the connectors. Therefore, it is important to predict accurately the mechanical characteristics of shear connectors. In this context, introducing interface and material nonlinearities, we develop a finite element model which can evaluate the performance of shear connectors.

Key Words : *steel-concrete hybrid structure, headed stud shear connectors, finite element analysis*

1. まえがき

複合構造は、異なる材料を組み合わせることで優れた性能を引き出す構造であり、土木分野では鋼とコンクリートからなる複合構造が一般的である。このような複合構造がその力学特性を十分に発揮するためには、異なる部材が一体として働くことが必須の条件となる。現行の設計指針では、鋼コンクリート複合構造の接合には機械的ずれ止めを用いることを標準としており¹⁾、部材に作用する軸力、せん断力、曲げモーメント等の力は接合部のずれ止めを介して伝達される。したがって、構造物の設計において、ずれ止めの耐力や剛性などの性能を明らかにしておくことは重要である。

現在最も多く用いられている手法は押し抜き試験によりずれ止めのせん断耐力を測定する方法である。しかし、実構造物中のずれ止めは 3 次元的な応力状態にあり、押し抜き試験で再現することが難しい場合も多い。このような場合に、最近では数値解析が行われることが多くなってきている。そこで本研究では、材料界面の付着や摩擦、材料自体の非線形性を考慮し、スタッドの力学特性を数値的に評価できる三次元有限要素モデルを構築する。

2. 解析手法

(1) 接触解析

本研究では、部材同士の界面で生じるはく離やずれを考慮するために接触解析を行う。複合構造における異種材料界面はあらかじめ接触していることが前提であり、また界面におけるずれの相対変位は構造物の大きさに比較して非常に小さい。よって本研究における接触解析では計算負荷が小さくアルゴリズムも比較的単純な節点間

接触を採用した。

接触解析における定式化にはペナルティ法を用いた。これにより、界面に生じる内力は部材間を結ぶ剛なばねにより伝達される。ばねは接線方向と法線方向にそれぞれ独立して考え、界面の付着・すべりを表現するために接線方向のばねは弾塑性とし、降伏条件を

$$\phi = |f_t| - f_f - \sigma_b A \quad (1)$$

とした。ここで、 f_t は接線方向の接触力、 f_f は摩擦力、 σ_b は接線方向の付着応力、 A は接触面積である。摩擦については古典的な Coulomb 摩擦

$$f_f = \mu \langle -f_n \rangle \quad (2)$$

を適用した。ここに、 f_n は法線方向の接触力、 μ は摩擦係数、 $\langle \rangle$ は ramp 関数である。

(2) 材料モデル

鋼とコンクリートは弾塑性材料としてモデル化する。鋼材の降伏基準には von Mises の降伏基準を用い、降伏点までは弾性、降伏後は完全塑性とした。コンクリートの破壊基準には側圧を考慮できるように以下のような Drucker-Prager の破壊基準を用いている。

$$f(\sigma, \bar{\epsilon}^p) = \sqrt{J_2} + \alpha I_1 - k(\bar{\epsilon}^p) \quad (3)$$

ここで J_2 は偏差応力の第二不変量、 I_1 は応力の第一不変量、 $\bar{\epsilon}^p$ は相当塑性ひずみ、 α と k は材料パラメータで、Mohr-Coulomb の粘着力 c 、内部摩擦角 ϕ と関連付けることができる。流れ則は

$$\dot{\epsilon}^p = \gamma \frac{\partial f}{\partial \sigma} \quad (4)$$

とし、関連流れ則を仮定する。ここで、 γ は整合パラメータである。

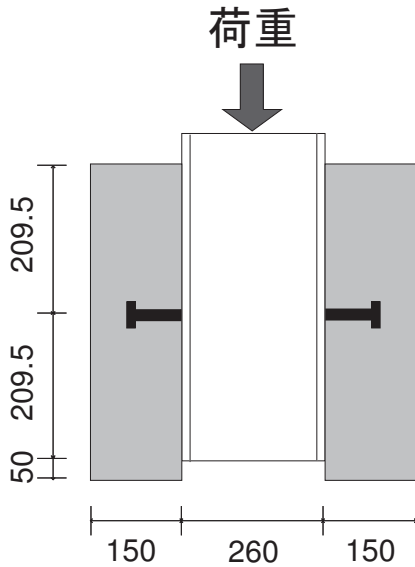


図-1 押し抜き試験体(単位: mm)

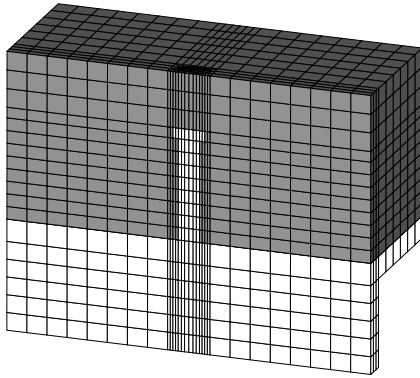


図-2 有限要素モデル

弾塑性計算における応力の積分アルゴリズムには Return-Mapping 法を用いた。Drucker-Prager の降伏関数を例に説明する。弾性試行状態を次のように定義する。

$$s_{n+1}^{\text{trial}} = s_n + 2G\Delta e_{n+1} \quad (5)$$

$$(\sigma_0)_{n+1}^{\text{trial}} = (\sigma_0)_n + K\text{tr}(\Delta \epsilon_{n+1}) \quad (6)$$

$$f_{n+1}^{\text{trial}} = \sqrt{(J_2)_{n+1}^{\text{trial}} + \alpha(I_1)_{n+1}^{\text{trial}}} - k \quad (7)$$

ここで、 s は偏差応力、 e は偏差ひずみ、 σ_0 は平均応力、 G と K はせん断弾性係数と体積弾性係数である。もし、 $f_{n+1}^{\text{trial}} < 0$ なら、弾性ステップとなり試行状態は正解となる。したがって、 $\Delta\gamma = 0$ である。 $f_{n+1}^{\text{trial}} > 0$ の場合には、塑性ステップであり、 $\Delta\gamma > 0$ 、 $f_{n+1} = 0$ とならなければならない。この条件から、整合パラメータ $\Delta\gamma$ を決定するためのスカラー方程式

$$f_{n+1}(\Delta\gamma) = \sqrt{J_2 + \alpha I_1} - k(\Delta\gamma) = 0 \quad (8)$$

が得られる。 $k(\Delta\gamma)$ の形に応じて解析的、あるいは数値的に解くことで $\Delta\gamma$ を求めることができる。

3. 押し抜き試験との比較

本研究で採用したモデルの妥当性を検証するために、Lam and El-Lobody が行った押し抜き試験²⁾の結果と比較する。

(1) 解析モデルと結果

解析対象となる押し抜き試験体の形状を図-1に示す。コンクリート床板には長さ 619mm、幅 469mm、厚さ 150mm を用い、鋼桁は高さ 260mm、フランジ幅 254mm、フランジ厚 14mm、ウェブ厚 10mm である。頭付きスタッドは直径 19mm、高さ 100mm のものが片側 1 本ずつ計 2 本、フランジに溶接されている。材料定数はスタッドの降伏応力が 470.8N/mm^2 、鋼桁の降伏応力が 275N/mm^2 である。ヤング率とポアソン比は両方とも同じ値を用い、200GPa、0.3 である。コンクリートは圧縮強度が 20N/mm^2 と 50N/mm^2 の 2 種類のものを用いている。

有限要素モデルを図-2に示す。要素はすべて 8 節点双 1 次の 6 面体要素を用い、要素数 3624、節点数 4911 に分割した。スタッドとコンクリート床板界面、コンクリート床板と鋼桁の界面の節点は二重にし、接触節点ペアとしている。荷重は実験と同様にウェブの端部に強制変位を 4mm を 400 ステップに分けて荷重した。

実験と解析における荷重ずれ変位関係を図-3、4に示す。ずれ変位はスタッド位置での鋼フランジとコンクリート床板裏側の節点の相対変位をとっている。実験で荷重が最大となるずれ変位は 4mm なので、そのときの解析値と実験値を比較してみると、コンクリート強度が 20N/mm^2 と 50N/mm^2 の両方の場合で解析結果と実験結果は一致している。

(2) 破壊モード

図-5、6に $\sqrt{J_2}$ ひずみ分布と変形を示す。ここでは、変形が見やすいように実際の変形の 3 倍で表示している。コンクリート強度が 20N/mm^2 のときには、スタッド根元付近のコンクリートが大きく変形しており、スタッド頭と接触しているコンクリート部分が局部的に変形している。一方、スタッドは全体的に傾いているが、局所的な変形は見られない。したがって、この場合にはスタッドはコンクリートの支圧破壊により耐荷力を失うと考えられる。

コンクリート強度が 50N/mm^2 では、コンクリートは一部に大きな変形が見られるが、大部分は健全なままである。反対にスタッドは根元に局所的なせん断変形が起こっている。この場合、スタッドは最下端のせん断破壊により破壊に至ると考えられる。

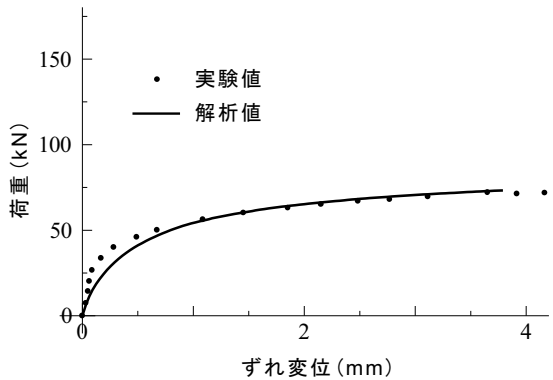


図-3 荷重ずれ変位関係(コンクリート圧縮強度 20MPa)

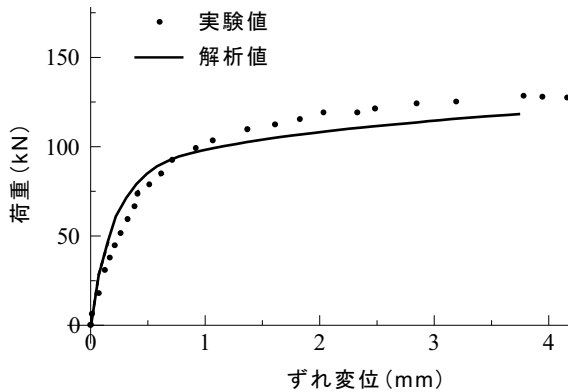


図-4 荷重ずれ変位関係(コンクリート圧縮強度 50MPa)

(3) 付着と摩擦の影響

付着および摩擦がスタッドのせん断耐力と荷重ずれ変位関係にどのように影響するかを検討する。付着力は $1\text{N}/\text{mm}^2$ 、摩擦は支圧力に比例する Coulomb 摩擦とし、摩擦係数を 0.5 とした。付着および摩擦すべりは界面の接触節点間に弾塑性ばねを入れることにより表現し、その降伏関数は式 (1) である。したがって、ばねが降伏するまでは界面でのずれを許容せず、ばねが降伏すると付着が 0 になり、その後は摩擦のみが働くものとしている。

図-7 に界面の付着および摩擦がある場合とない場合の荷重ずれ変位関係を示す。付着および摩擦がある場合を見て見ると、ばねが降伏するまでは弾性なので初期剛性はかなり大きくなっている。そして、ばねが降伏すると付着力が 0 になり、周辺のばねが負担する力が大きくなるため、ばねの降伏が連鎖的に生じ、界面の大部分で付着が切れた状態となる。このとき、付着および摩擦のないモデルよりも荷重が大きくなっているのは、摩擦の影響によるものと考えられる。押し抜き試験では載荷方向と鋼桁-コンクリート床板間の支圧力の方向は直交するので、支圧力の変動は小さいと考えられる。したがって、摩擦力は一定となり、その分だけ荷重が大きくなる。

中島ら³⁾が行った平鋼とコンクリートブロックを用いた押し抜きせん断試験の結果によると、鋼とコンクリート間のせん断力は、ずれ変位が 0.1mm 以下の小さい範囲で最大値に達し、ずれ変位が数 mm となる間に徐々に

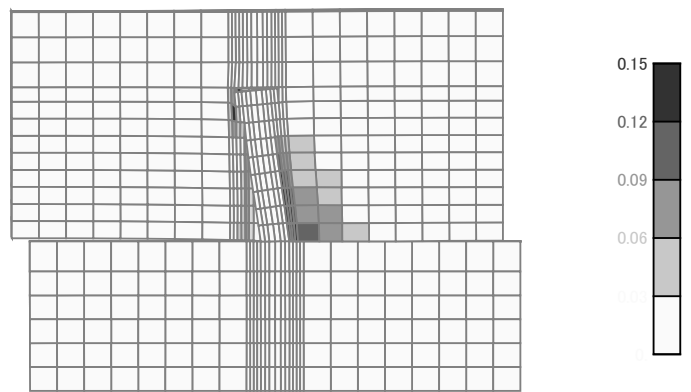


図-5 コンクリート圧縮強度 20MPa

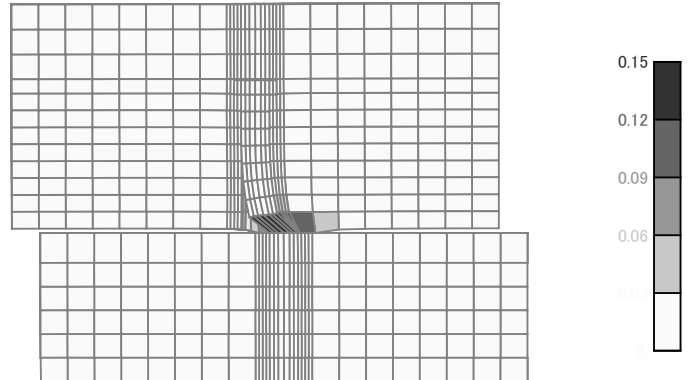


図-6 コンクリート圧縮強度 50MPa

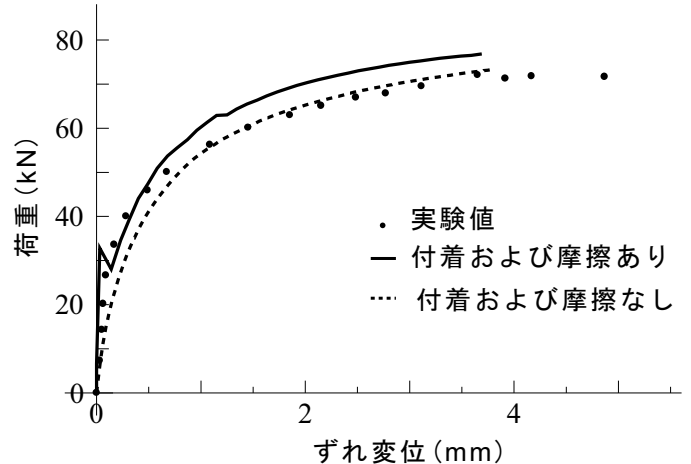


図-7 付着および摩擦の影響

減少し、最終的には Coulomb 摩擦力に漸近することが報告されている。せん断力の最大値と Coulomb 摩擦力の差を付着力とするならば、本研究で用いたモデルは付着力を正しく表現しているとはいえない。界面における付着や摩擦のモデル化に関してはさらなる検討が必要だと思われる。

4. 合成桁中のスタッドの挙動

押し抜きせん断試験と実構造物中のスタッドの挙動の違いをみるために、鋼桁とコンクリート床板からなる合

成桁中のスタッドの挙動を解析した。断面寸法は図-8のとおりである。スタッドは直径13mm、高さ70mmのものを橋軸方向には100mm間隔で8本配置し、橋軸直角方向には60mm間隔で2本配置した。また、コンクリートの材料特性は、圧縮強度が 25N/mm^2 、弾性係数が 30.9kN/mm^2 であり、鋼材の材料特性はフランジの降伏応力が 321.0N/mm^2 、弾性係数が 205.8kN/mm^2 、ウェブの降伏応力が 298.0N/mm^2 である。

境界条件は、スパン中央に集中荷重を作用させた状態を想定し、一方の端は鉛直方向に固定し、もう一方の端は水平方向に拘束し、さらに鉛直下向きに強制変位を与えた。

(1) 降伏状態

図-9に載荷荷重200kNのときのスタッド、鋼桁、コンクリート床板の降伏状態を示した。図中の黒色はその要素が降伏していることを表している。この図より、スタッドは軸部にかかるせん断力と曲げにより降伏している。また、スタッド周辺のコンクリートはスタッド前面の圧縮側のみでなく、スタッド周辺にまで広がっている。これはスタッド1本の押し抜き試験から得られるコンクリートの支圧破壊モードとは異なっている。

(2) せん断力ずれ変位関係

図-10にスタッドのせん断力とずれ変位の関係を示した。グラフには8本のスタッドのうち、左側の支点に一番近いスタッド(S1)、中央のスタッド(S4)、右側の載荷点に一番近いスタッド(S8)の荷重ずれ変位関係を載せた。S8スタッドが最も荷重が小さいのは、図-9を見て分かるように、周辺のコンクリートの降伏により、スタッドに対する拘束力が小さくなったためだと思われる。また、S1スタッドはS4スタッドに比べてずれ変位が0.8mmのときに15%ほどせん断力が大きくなっている。

5. まとめ

本研究では、ずれ止めの力学特性を評価できる三次元有限要素モデルを提案した。このモデルは複合構造の界面における部材の接触や、鋼およびコンクリートの材料非線形性を考慮している。そして、このモデルを用いて押し抜き試験の解析を行った結果、本研究で提案したモデルは実験結果をよく再現していることが検証できた。また、合成桁を対象とした解析を行い、実構造物中のスタッドと押し抜きせん断試験から得られるスタッドの挙動の違いを定性的に評価することができた。

参考文献

- 1) (社)土木学会：複合構造物の性能照査指針(案)，構造工学シリーズ11，(社)土木学会，2002。

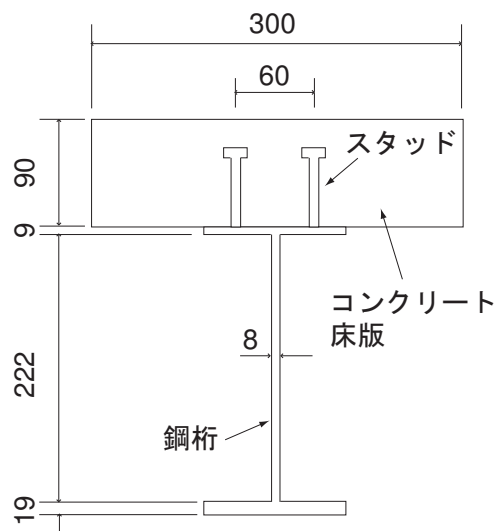


図-8 合成桁の断面図

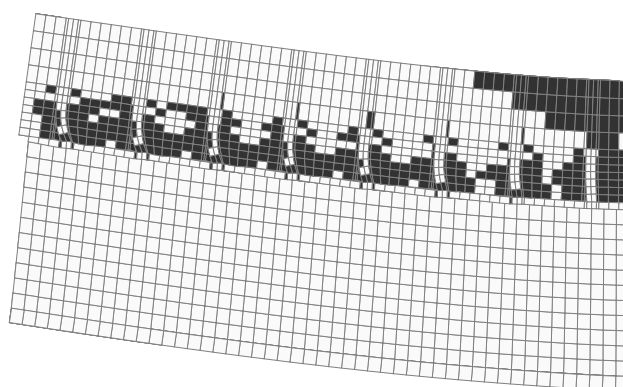


図-9 荷重200kNのときの降伏状態

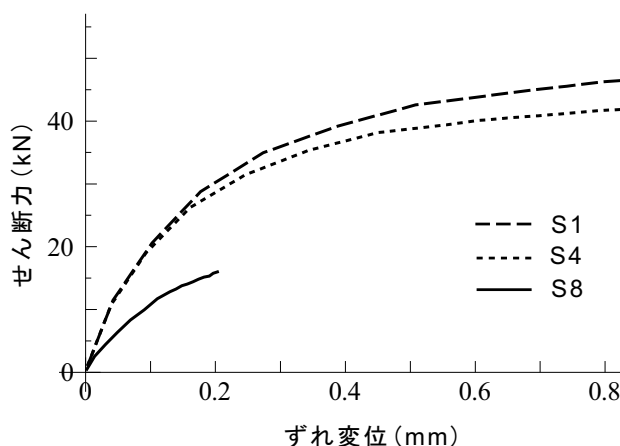


図-10 荷重200kNのときの降伏状態

- 2) Lam, D. and El-Lobody, E.: Behavior of headed stud shear connectors in composite beam, *ASCE J. Struct. Engrg.*, Vol.131, pp.96-107, 2005.
- 3) 中島章典, 西村美也子, 斉木 功, 大江浩一 : 鋼・コンクリート接触面の支圧摩擦性状に及ぼす支圧負荷方法の影響, *鋼構造論文集*, Vol.12, No.45, pp.185-192, 2005.

(2009年2月5日提出)