

複合構造の有限要素接触解析における 付着・摩擦則のモデル化に関する一考察

東北大学大学院工学研究科 ○学生員 田中 光
東北大学大学院工学研究科 正員 齊木 功
東北大学大学院工学研究科 正員 岩熊 哲夫

1. まえがき

近年、様々な構造物に鋼・コンクリート複合構造が用いられている。鋼とコンクリートの界面には付着が存在し、複合構造全体の挙動に大きな影響を与える。したがって、複合構造の合理的な設計には付着を考慮する必要があるが、界面の力学特性については不明な点が多い。中島ら¹⁾は突起のない通常の平鋼とコンクリートの界面に着目し、取り扱いの容易な小型の押し抜きせん断試験を開発し、粘着力、摩擦力に及ぼす影響を調べた。その結果、鋼とコンクリート間のせん断力は、ずれ変位が小さい範囲で最大値に達し、その後徐々に減少し、最終的には支圧力に比例するいわゆる Coulomb 摩擦力に漸近することが明らかにされた。また、小川ら²⁾は Coulomb 摩擦および完全弾塑性の付着モデルを用いた接触解析手法を提案し、実験結果との比較を行った。しかし、完全弾塑性の付着モデルではすべりが急激に起こるため実態を反映していないなどの問題点があった。以上を踏まえ、本研究では分子動力学などで用いられる分子間ポテンシャル関数を付着・摩擦モデルに導入し、鋼とコンクリート界面の付着特性を精度良く再現できる有限要素接触解析手法の開発を試みた。

2. 解析手法

接触問題の定式化には、ペナルティ法を採用した。これにより、物体間に生じる接触力は節点間を結ぶ剛なばねにより表される。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は弾塑性のばねとし、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

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

せん断力

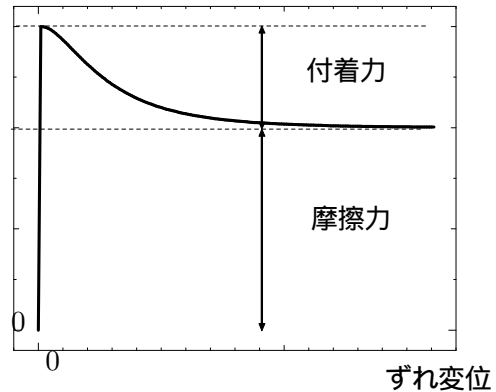


図-1 せん断力-ずれ変位関係

を適用した。ここで、 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。付着力については粒子間ポテンシャルをあらわす Lennard-Jones ポテンシャル関数を適用し、

$$\sigma_b = 10\sigma_{b_0} \left\{ \left(\frac{B}{z} \right)^7 - 2 \left(\frac{B}{z} \right)^{13} \right\}, \quad z = \alpha + C(B) \quad (3)$$

と定義した。ここで、 σ_{b_0} と B は材料パラメータであり、それぞれ初期付着応力、基準ずれ量をあらわしている。また、 C は B の関数であり、 α はずれ量の総和を表している。以上より、付着・摩擦モデルのせん断力-ずれ変位関係は図-1 のようになり、 σ_{b_0} が大きくなるほど最大荷重が大きくなり、 B が大きくなるほど荷重は緩やかに減少する。

3. 押し抜き試験

(1) 解析方法

本研究で提案した付着・摩擦モデルについて検討するために、押し抜き試験³⁾の解析を行った。この押し抜き試験の解析では図-2 のような試験体を対象とした。この押し抜き試験体はコンクリート下面に反力板を取り付けた試験体、B タイプは両端に鋼板を設け、反力板付近での応力集中を避けて、せん断応力が界面に一様に分布するように工夫した試験体である。解析モデルは、平面応力 4 辺形要素を適用した。材料は弾性とし、鋼板と

Key Words: steel-concrete hybrid structure, bonding, friction, slip

〒 980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06 東北大学大学院工学研究科土木工学専攻 構造強度学研究室

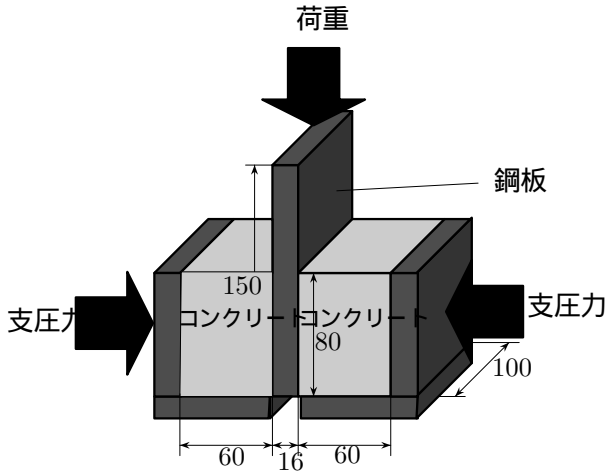


図-2-a 試験体 A タイプ

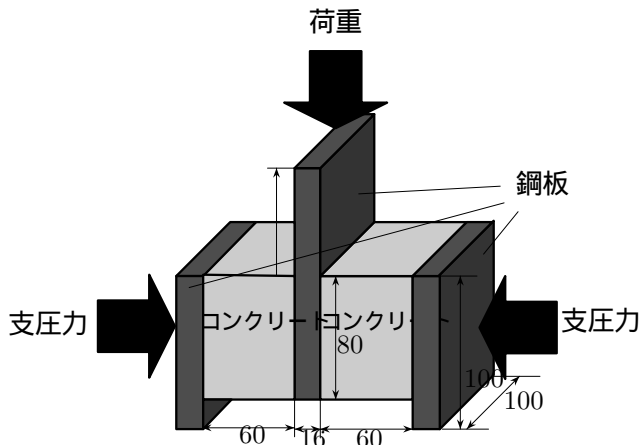


図-2-b 試験体 B タイプ

図-2 押し抜き要素試験体 (mm)

コンクリートの Young 率および Poisson 比をそれぞれ $3.06 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$, 0.3, $3.34 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$, 0.167 とした。また、付着モデルのパラメータは、初期付着応力 σ_{b0} を 0.2 N/mm^2 , B を 2.0 とし、摩擦係数は 0.35 とした。

解析では、支圧力を両側面の節点に与えた後、鋼板上部の節点に強制変位を与えることで要素試験を再現した。また、B タイプの押し抜き試験では、B タイプの押し抜き試験では、载荷により鋼板の両端が支点となり、試験体に曲げ応力が作用することを考慮し、界面中央より 16mm 下に支圧力を作用させた。

(2) 解析結果

両タイプのせん断応力分布を図-3 に示す。解析の結果から、A タイプでは界面下端にせん断応力が集中していることが分かる。この結果、付着は界面の下の方からすべりが発生し、上に向かって進行していった。それに対し、B タイプでは界面の端で応力集中が見られず、A タイプの試験体に比べ、より一様なせん断応力分布が実現できている。したがって、付着が界面全体でほぼ同時にすべり始めるため、正確な付着応力を算定す

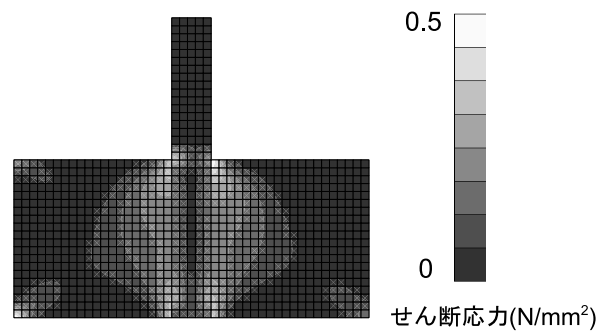


図-3-a A タイプ

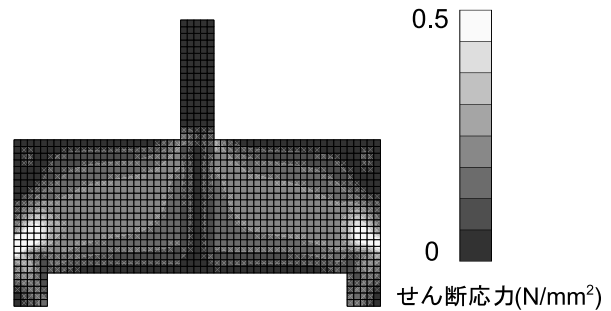


図-3-b B タイプ

図-3 試験体内部のせん断応力分布

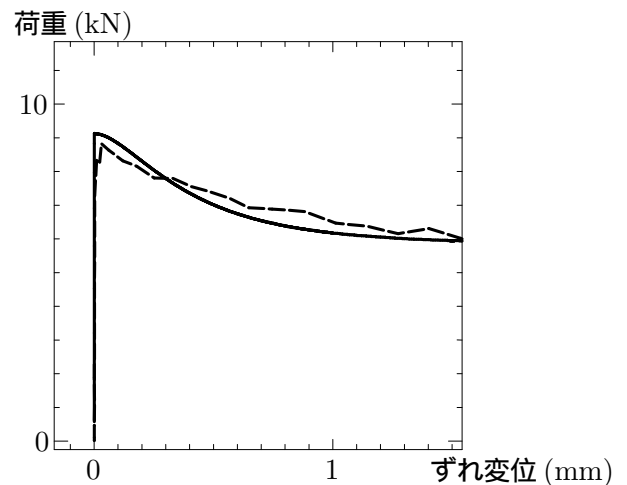


図-4 実験結果と解析結果の比較 (荷重 - ずれ変位関係)

ることができると思われる。次に、A タイプの試験における界面中央の節点での、ずれ変位と荷重の関係を図-4 に示す。実線が解析値、破線が実験値を示している。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 小川大介, 斉木 功, 中島章典 : 複合構造の解析に適した簡便な接触解析手法の基礎的検討, 第 31 回関東支部技術発表会講演概要集, 2004.
- 3) 戸塚 祐, 斉木 功, 山田真幸, 岩熊哲夫 : 鋼・コンクリート界面の付着・摩擦特性のための要素試験, 平成 18 年度土木学会東北支部技術研究発表会講演概要集, 2007.