

## 複合構造の有限要素接触解析における界面のモデル化に関する一考察

A Consideration on Modeling of Interface for Finite Element Contact Analysis of Hybrid Structures

荒木 真隆\*

Masataka ARAKI

\*構造強度学研究室(指導教員: 齊木 功 准教授)

現在、鋼・コンクリート複合構造の結合部の照査法は確立されておらず、有限要素解析による照査への期待が高まっているが、ずれ止めや異種材料界面の付着・摩擦のモデル化が課題となっている。そこで本研究では界面に働く付着・摩擦力を考慮した手法に、過去の実験から得られたずれ止めの巨視的な数値モデルを組み込んだ有限要素接触解析を行い、ずれ止めや界面の付着・摩擦のモデル化が結果に及ぼす影響について検討する。

**Key Words** : hybrid structure, bonding, friction, shear connectors, finite element contact analysis

## 1. まえがき

複合構造において重要な異種材料の一体化は、化学的な付着作用、物理的な摩擦作用およびずれ止め等により確保される機械的作用によって界面で力が伝達されることによりなされる。設計において付着・摩擦作用を解析的に考慮することが困難なため、複合構造の結合部の照査には課題が残されている。そのため有限要素解析による照査への期待が高まっており、そこで用いるずれ止めや鋼・コンクリート界面の付着・摩擦の力学特性の解明とそれに基づく力学モデルの構築が必要となってきた。そこで本研究では鋼・コンクリート界面に働く付着・摩擦力を考慮した手法に、過去の実験から得られたずれ止めの巨視的な数値モデルを組み込んだ有限要素接触解析を行い、ずれ止めや界面の付着・摩擦のモデル化が結果に及ぼす影響について検討する。

## 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、 $\sigma_b$  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、 $\mu$  は摩擦係数、 $\langle \rangle$  は ramp 関数である。

また、スタッドは接線方向と法線方向にそれぞれ独立なばね要素によりモデル化する。鉛直方向ばねは弾性ばね、水平方向ばねは Ollgaard et al.<sup>1)</sup>によって提案されたせん断力  $V$  とすべり  $\delta$  の関係式

$$V = V_u \left(1 - e^{-\alpha \frac{\delta}{\phi}}\right)^{\frac{2}{3}} \quad (3)$$

を硬化曲線とする弾塑性ばねとした。ここに、 $V_u$  はスタッドのせん断耐力であり、 $\phi$  はスタッドの直径である。 $\alpha$  はせん断力・すべり関係式における無次元の係数であり条件によって異なる。この  $\alpha$  の値が大きければそのスタッドは剛性が高いことを示す。

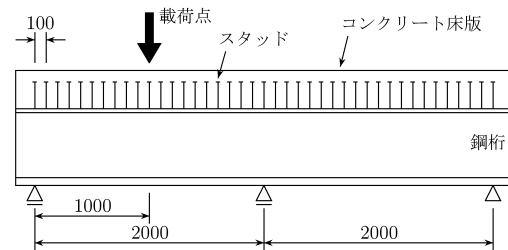


図-1-a 側面図(単位: mm)

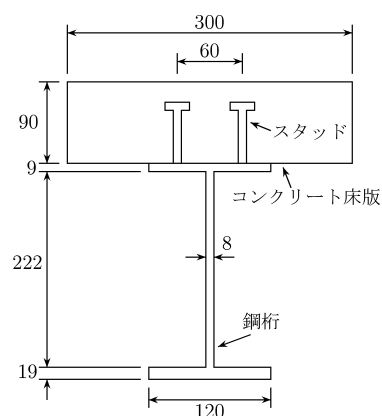


図-1-b 断面図(単位: mm)

図-1 試験体

### 3. 連続合成桁の荷重試験における界面のモデル化の影響

図-1 に示す中島ら<sup>2)</sup>が行った実験の連続合成桁試験体を解析対象とし、界面のモデル化が解析結果に及ぼす影響を考察する。

#### (1) 付着力の影響

鋼とコンクリートの付着力を 0.0, 0.2, 0.8, 2.0MPa としたときの、荷重 50kN におけるコンクリート床版裏側と鋼桁上フランジとのずれ変位を図-2 に示す。左側スパンでは付着力が小さいモデルほど鋼・コンクリート界面の多くの節点で剥離が生じ、付着力ゼロのモデルのずれ変位に近くなっている。右側スパンでは付着力のあるどのモデルでも剥離が生じていないため、ずれ変位は付着力ゼロのモデル以外ではほとんどゼロとなっている。次に、左側スパンで剥離が発生し始める荷重(剥離が開始する荷重)および最終的にほとんどの節点で剥離が生じる荷重(剥離が終了する荷重)と、付着力との関係を図-3 に示す。実験では剥離が開始する荷重は 200kN よりも前、終了する荷重は後であったと考えられ、図-3 から推定される付着力は 3.0MPa 以上ということになる。これは赤松ら<sup>3)</sup>の研究報告の 5 倍以上となる。また、この 200kN は実験で鋼桁が降伏する荷重の 50% にあたり、設計において安全率を考慮した際には、付着力を考慮する必要がある場合も存在すると考えられる。

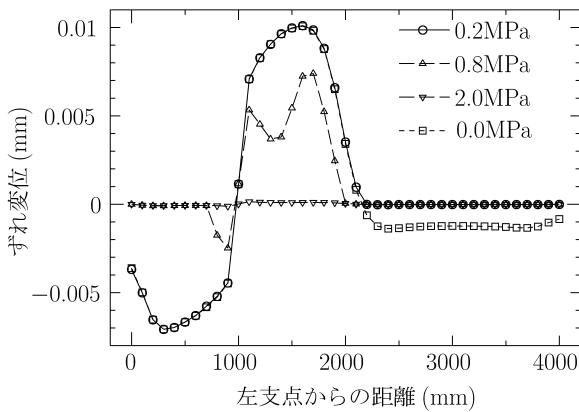


図-2 荷重 50kN でのずれ変位

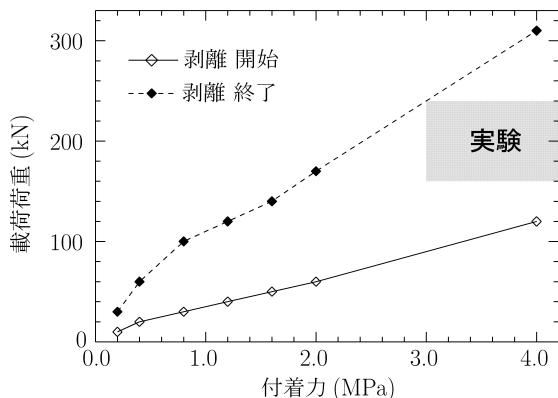


図-3 左側スパンでの剥離の開始・終了の荷重

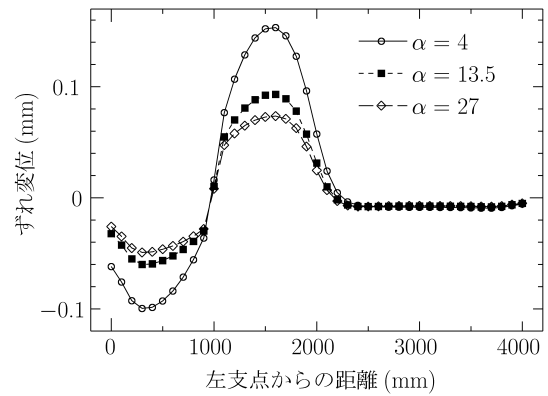


図-4 荷重 300kN でのずれ変位

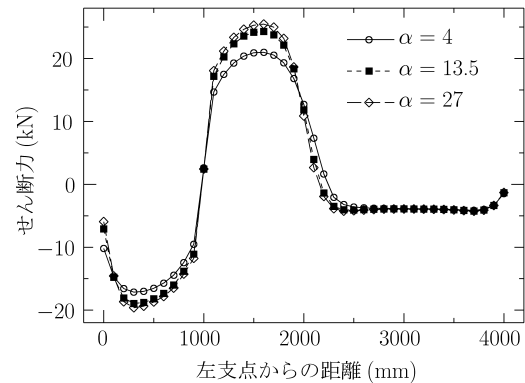


図-5 荷重 300kN でのスタッドに作用するせん断力

#### (2) スタッドの剛性を表す係数 $\alpha$ の影響

スタッドの剛性を表す係数  $\alpha$  を 4, 13.5, 27 としたときの荷重 300kN でのずれ変位を図-4 に示す。 $\alpha$  の値が大きくなれば、スタッドの剛性が高くなるため、ずれ変位が小さくなっている。 $\alpha = 27$  のモデルの最大ずれ変位は、4 のモデルと比較して 50% 以上小さくなっている。また  $\alpha$  を 4, 13.5, 27 としたときの荷重 300kN でのスタッドに作用するせん断力を図-5 に示す。 $\alpha$  の値が大きくなれば、桁はより完全合成に近づくため、スタッドに作用するせん断力が大きくなっている。 $\alpha = 27$  のモデルの最大せん断力は 4 のモデルと比較して 20% 以上大きくなっている。

#### 参考文献

- 1) Ollgaard, J.G., Slutter, R.G. and Fisher, J.W.: Shear strength of stud connectors in lightweight and normal-weight concrete, *AISC Engineering Journal*, pp.55-64, 1971.
- 2) 中島章典, 浅井貴幸, 斉木 功: 連続合成桁の弾塑性挙動についての実験と数値解析の比較, *鋼構造論文集*, Vol.10, No.40, pp.77-82, 2003.
- 3) 赤松篤, 斉木功, 山田真幸, 岩熊哲夫: 鋼・コンクリート界面のせん断特性に関する実験的検討, 第 31 回東北支部技術研究発表会講演概要集, 2006.

(2008年2月12日提出)