

材料界面の摩擦・付着を考慮した合成部材のせん断特性評価

Evaluation of Shear Properties of Composite Members
with Considering Friction and Bond of Material Interface

黒澤明史*
Akifumi KUROSAWA

*構造強度学研究室（指導教員：斉木功 准教授）

材料間界面の摩擦力や付着力を考慮したより高精度の複合構造の終局時の予測を目指すべく、数値解析による合成部材のせん断特性評価を行いたい。しかし、付着は脆性的に破壊するため、局所的に応力ひずみ関係が不連続となって不つり合い力が大きくなり、収束計算が破綻することがある。そこで、本研究では鋼コンクリート合成部材の摩擦・付着を考慮したせん断特性評価にあたり、増分計算過程で付着破壊による大きな不つり合い力が生じた場合、新たな増分計算過程を設定することによる求解を試みた。そして押抜き試験モデルと合成桁モデルに付着を導入して解析を行った。

Key Words: *Finite Element Method, Composite girder, Shear Property, Friction, Bond*

1. はじめに

複合構造は複数の材料の長所を活かして組み合わせることにより合理的な構造としたものであり、例として鋼コンクリート複合構造をとると、2つの材料、つまり鋼コンクリート間で力の伝達が行われる。国内における道路構造物の複合構造では基本的に接合部で壊れることを想定していないが、終局時において、接合部が損傷しないとは限らない。また、非合成として設計された構造が付着により合成作用を呈することが報告されており¹⁾、これらの構造の終局時の挙動を精度よく予測しより安全な設計をしていくためには付着とその破壊も再現する必要があると考える。

しかし、構造の全体解析を行う際にずれ止めをいたるまで詳細にモデル化することは計算の規模から現実的ではない。材料界面のずれ止めのような微細な構造を含むせん断特性については平均物性評価を利用することで計算の効率化を図ることができる。その平均物性評価にあたって界面の付着や摩擦を考慮しようとしたとき、付着破壊は脆性的であるため数値解析が困難である。

本研究では、付着破壊による過大な不つり合い力を段階的に解消することで材料界面の摩擦・付着を考慮した合成部材のせん断特性を評価を行った。

2. 付着破壊の問題点と計算方法の修正

(1) 付着破壊

鋼とコンクリートとの付着は脆性的に破壊する。その付着の強さや摩擦特性などを求めるために、斉木らはトルク型せん断試験²⁾を考案し実験を行っている。このせん断試験では鋼円柱をモルタルに埋め込んで打設し、円筒形の鋼コンクリート界面を製作している。鋼円柱を回転させることで界面にせん断を与えて付着を破壊するも

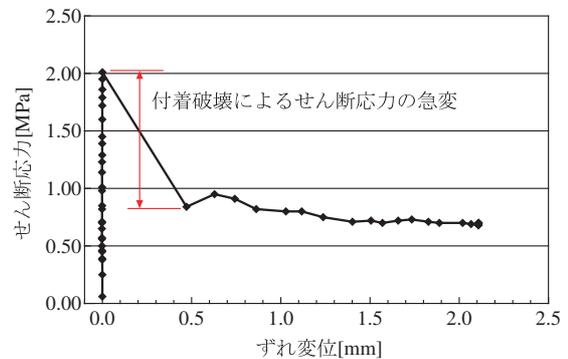


図-1 鋼モルタル界面のせん断応力 - ずれ変位関係の例

のである。この試験方法では界面のせん断方向に界面端部がなく、界面端部で発生してしまう応力集中をなくしてより正確な付着強度を測定できるようになっている。

この試験方法による鋼コンクリート界面のせん断特性の一例としてせん断応力 - ずれ変位関係を図-1に示す。横軸に鋼モルタル界面のずれ変位を、縦軸に界面のせん断応力を示した。実験では、初めにずれ変位がほぼゼロのまません断応力が増加し、ある点に達するとずれ変位が生じると同時にせん断応力が減少した。これは付着が破壊したことによると考えられるが、このときのせん断応力の変化はせん断応力の他の変化と比べて非常に大きく、付着破壊時には構造全体の力が大きく変化することとなる。

脆性的な付着破壊を数値計算で解くことを考える。一般に用いられている Newton-Raphson 法は、関数の連続性と微分可能性に加えて、初期値が解の近傍にあることを前提としている。これに対して前述した付着破壊現象では、付着破壊の前後ではせん断応力が急激に変化して連続性がなく、そのために破壊の瞬間には大きな不つ

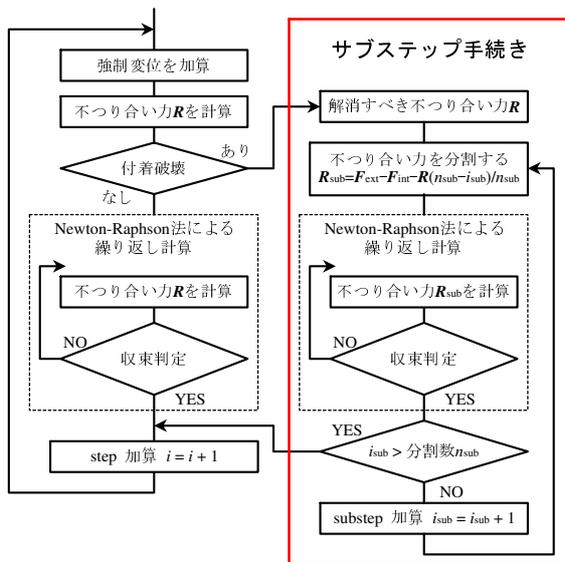


図-2 サブステップ手続きの流れ図

り合い力が生じることとなる。また、解も計算を開始した点から大きく離れてしまうため、したがって Newton-Raphson 法の収束計算が破綻する可能性がある。

(2) 計算方法の修正

Newton-Raphson 法で収束が困難な大きな不釣り合い力が問題となっているので、解消すべき不釣り合い力を小さくすることを考えた。図-2は本研究で提案する計算方法の流れ図である。はじめは通常の Newton-Raphson 法により計算を行う。ある変位ステップでの不釣り合い力 R は外力 F_{ext} と内力 F_{int} の差

$$R = F_{ext} - F_{int}$$

と定義される。ある増分過程において付着が破壊して過大な不釣り合い力 R が生じたときに図の右側の手続きに移り、不釣り合い力 R を n_{sub} 段階にかけてゼロにすることを考えた。そのために、段階 i_{sub} における不釣り合い力を

$$R_{sub} = F_{ext} - F_{int} - \frac{n_{sub} - i_{sub}}{n_{sub}} R$$

と定義することで、1回の収束計算あたりで解消すべき不釣り合い力を小さくする。この分割した各 i_{sub} 段階をサブステップと呼ぶこととする。そしてこの小さな不釣り合い力 R_{sub} を収束させることを n_{sub} 段階にわたって繰り返すことで、付着破壊による大きな不釣り合い力 R を解消する。

計算は変位制御で行い、各ステップでモデルに強制変位を与えるが、サブステップ手続き内では付着破壊の起きた各ステップの中での計算であるため、強制変位の増加はない。また、サブステップ手続き内での収束計算は各ステップでの計算と同様に、Newton-Raphson 法による収束計算を行った。

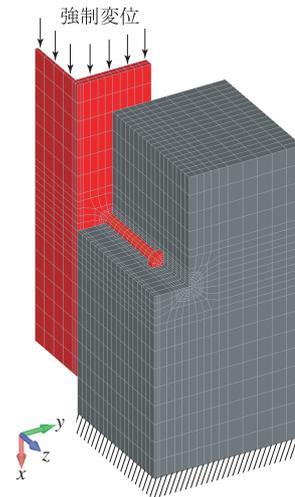


図-3 押抜き試験モデル

材料同士は初期状態から接触しており、界面のずれ変位は構造物に対して非常に小さいため、計算負荷が小さくてアルゴリズムが比較的単純な節点間接触を採用し、接触解析には penalty 法を用いた。また、return mapping 法によって接触力の更新を行った。

3. 解析モデル

(1) 押抜き試験モデル

頭付きスタッドジベルの押抜き試験³⁾を図-3に示す。H200×200×8×12のH形鋼フランジに計4本の頭付きスタッドジベル溶植したもので、対称性により1/4解析モデルとした。コンクリートブロックの下端を固定し、鋼材先端に変位を与えた。

スタッドジベルの寸法は設計指針⁴⁾によりJIS規格の軸径19mm、呼び長さ120mmを使用した。なお、通常はジベルの材質は桁の鋼とは異なるが、本研究では桁と同一の鋼材を用いた。

(2) 合成桁モデル

合成桁モデルを図-4に示す。鋼I桁にコンクリート床版を合成した合成桁で、橋軸方向に周期性を持つ。ウェブ高は1650mmでウェブ厚は9mm、上フランジは幅310×厚16mm、下フランジは幅500×厚25mmである。床版厚は200mmで、床版外側からフランジ端に向かって傾斜1:3で高さ70mmのハンチがついている。

桁の対称性により、ウェブ厚の中央を対称面とする半解析モデルとした。頭付きスタッドジベルを機械的接合としており、そのスタッド間隔は300mmである。モデルは合成桁の一部であり、材料界面に界面端部がないため、橋軸方向のスタッド間中央を周期境界としている。スタッドジベルは押抜き試験モデルと同様である。

(3) 材料パラメータ

鋼のYoung率は200GPa、Poisson比は0.2、降伏応力は圧縮・引張ともに271.4MPaであり、von Misesの

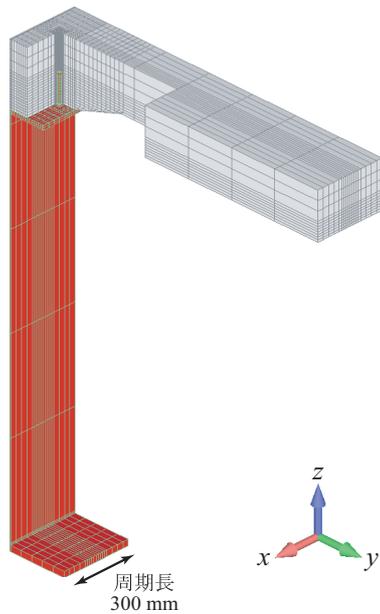


図-4 合成桁モデル

降伏基準を用いて弾完全塑性とした。

コンクリートの Young 率は 34.4 GPa, Poisson 比は 0.2, 降伏応力は圧縮側が 25.3 MPa, 引張側が 5.4 MPa であり, Drucker-Prager の破壊基準を用いた。

また, 鋼コンクリート界面の摩擦係数を 0, 0.2, 0.5, 付着強度を 0, 1, 2, 3 MPa とし, これらのパラメータを組み合わせて解析を行った。

(4) 計測データ

解析にあたり 2 種類のモデルでずれ変位, スタッドのせん断力を, 押抜き試験モデルではさらに押抜きに必要な荷重を計測した。ずれ変位はスタッド中心を通りせん断方向に垂直な面とフランジ上面の外側の端が交わる界面上の二重節点の 2 点のせん断方向相対変位をずれ変位とした。スタッドのせん断力はスタッドを構成する節点に生じるせん断方向の力の総和とした。なお, スタッドと上フランジ上面とが共有する節点も含んでいる。押抜きに必要な荷重は, 強制変位を与えている鋼材端部の節点にかかるせん断方向の力の総和である。

4. 解析結果

(1) 押抜き試験モデル

付着強度 0 MPa の場合と付着強度 1 MPa の場合で得られた荷重-ずれ変位, せん断力-ずれ変位関係を図-5 に示す。摩擦係数は 0 とした。付着強度 0 MPa の場合では, 荷重とせん断力はほぼ一致した。一方, 付着強度 1 MPa の場合, ずれ変位が生じ始めた段階で荷重がせん断力に比べて大きくなり, ずれ変位 = 0.006 mm でピークに達して下降した。その後は付着強度 0 MPa の場合と同様に荷重とせん断力がほぼ一致した。せん断力にはピークがなかった。

スタッド周辺の変形の様子を図-6 に示す。図の右は付

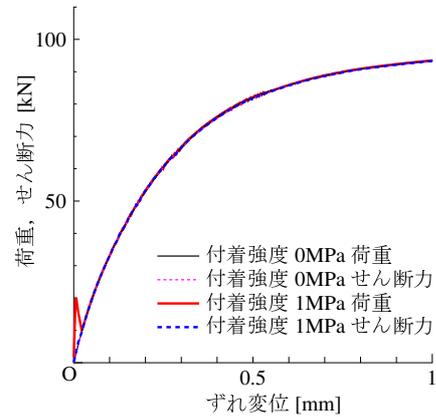


図-5 押抜き試験モデルの荷重-ずれ変位, せん断力-ずれ変位関係

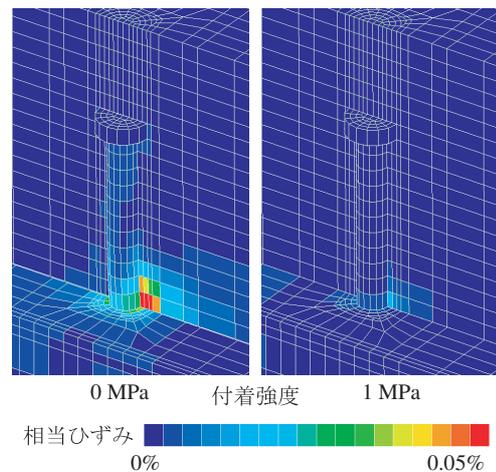


図-6 付着破壊直前のスタッドの変形とひずみ分布 (ずれ変位 = 0.006 mm, 変形倍率 50 倍)

着強度 1 MPa の場合の荷重がピークを超える直前のずれ変位での変形であり, 左はほぼ同じずれ変位の際の付着強度 0 MPa の場合の変形である。コンターは相当ひずみであり, なお, 相当ひずみは比例荷重を考慮して偏差全ひずみの第 2 不変量の $\sqrt{3}$ 倍とした。2 つの図を比べると, 付着強度 0 MPa ではスタッド基部の相当ひずみが大きいことがわかる。これは, 付着強度 0 MPa の場合では鋼コンクリート界面に付着がないため, 界面全体にずれが生じて変形がスタッド基部に集中したためであると考えられる。一方, 付着強度 1 MPa の場合では, 測定点でずれ変位は生じるものの, 付着破壊までは床版-フランジ界面の鋼とコンクリートが一体となって変形するためにスタッド基部への変形の集中がなかったためと考える。

各付着強度において得られた荷重-ずれ変位関係の付着破壊が生じた付近を拡大した部分を図-7 に示す。付着がある場合には付着がない場合に比べて急激に荷重が大きくなり, ある点でピークに達すると下降して付着なしの曲線にほぼ一致した。荷重のピークは付着強度が大きくなるにしたがって大きくなり, 付着強度 1, 2, 3 MPa でそれぞれ 20.0 32.8 44.4 kN となった。そのときのずれ変

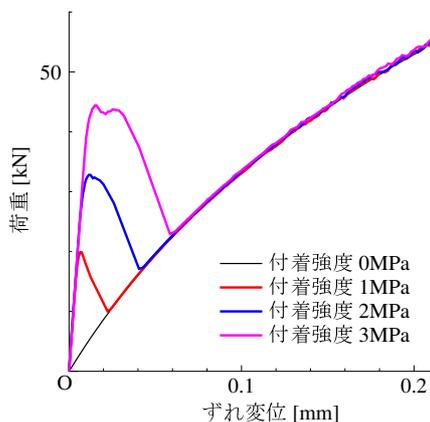


図-7 押抜き試験モデルの荷重-ずれ変位関係 (付着破壊付近)

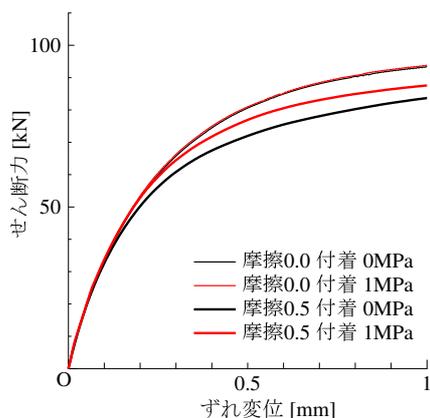


図-8 合成桁モデルのスタッドのせん断力-ずれ変位関係

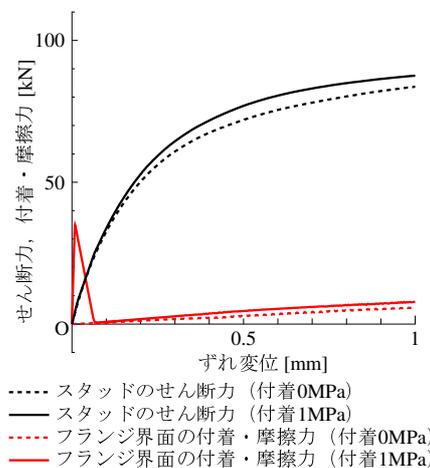


図-9 合成桁モデル ($\mu = 0.5$) のスタッドのせん断力-ずれ変位関係と付着・摩擦

位はそれぞれ 6.4×10^{-3} mm, 12.4×10^{-3} mm, 15.9×10^{-3} mm であった。また、付着強度が大きくなるにつれてピーク付近での荷重の変化が緩やかになった。

(2) 合成桁モデル

合成桁では摩擦係数 0 または 0.5, 付着強度 0 MPa または 1 MPa の 4 種類について解析を行った。合成桁モデルでのスタッドのせん断力-ずれ変位を図-8 に示す。摩

擦係数 0 の場合、ずれ変位に対するせん断力はほぼ一致した。摩擦がある場合には、摩擦力の分だけせん断力が減少したと考えられる。なお、最終サブステップ段階において収束を放棄して次のステップに移ったのは、付着強度 1 MPa の摩擦係数 0 または 0.5 の場合でそれぞれ 1 回のみであった。

また、図-9 は摩擦係数 0.5 の 2 つ付着強度の結果について、付着・摩擦力も同時に表したものである。ここで付着・摩擦力は、上フランジ上面にある節点に作用するせん断方向の力である。付着強度 0 MPa ではずれ始めから摩擦力が漸増していく。一方、付着強度 1 MPa では、ずれ始めでは付着力が摩擦力に比べ大きく変化し、付着が切れると摩擦力が漸増していった。付着力の最大値は 35.0 kN で、そのときのずれ変位は 9.0×10^{-3} mm であった。

5. まとめ

材料界面の摩擦・付着を考慮したスタッドの押抜き試験モデルおよび合成桁モデルの有限要素解析を行った。ただし、付着破壊による過大な不釣り合い力により計算が収束しない可能性があるために、付着が破壊したときにはサブステップ手続きに移行して段階的に不釣り合い力を解消することで収束の解決を試みた。

押抜き試験モデルでは、付着強度を大きくしたときに付着破壊する荷重が大きくなることが観察された。合成桁モデルでは、鋼コンクリート界面で付着が破壊して摩擦力が漸増していくことが観察された。

参考文献

- 1) 山田真幸, サトーンベンボン, 三木千壽, 市川篤司, 入部孝夫: RC 床版と鋼フランジ間の付着とスラブアンカーによるせん断抵抗の評価, 土木学会構造工学論文集, Vol.47A, pp.1161-1168, 2001.
- 2) 斉木功, 菊地浩貴, 山田真幸, 岩熊哲夫: 鋼コンクリート界面の付着強度評価法に関する一提案, 土木学会応用力学論文集, Vol.13, pp.323-329, 2010.
- 3) 頭付きスタッドの押抜き試験方法 (案), JSSC テクニカルレポート, No.35, 日本鋼構造協会, pp.1-24, 1996.
- 4) 複合構造委員会複合構造標準示方書小委員会: 複合構造標準示方書, 土木学会, 2009.
- 5) 山田真幸, 横山薫, 斉木功, 黒澤明史: 防錆処理の異なる鋼コンクリート界面の摩擦によるせん断応力の伝達, 土木学会第 68 回年次学術講演会講演概要集, CS3-18, 2013.
- 6) 黒澤明史, 横山薫, 山田真幸, 斉木功: 実用的な防錆処理が鋼コンクリート界面の付着特性に与える影響に関する基礎的検討, 土木学会第 68 回年次学術講演会講演概要集, CS3-19, 2013.
- 7) 島弘: 頭付きスタッドのせん断力とずれ変位およびスタッド軸方向挙動との関係に及ぼす試験方法の影響, 土木学会論文集 A1, Vol.67, pp.307-319, 2011.

(2015 年 2 月 4 日 提出)