付着を考慮した有限要素接触解析に関する一考察

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,異なる材料 間で力の伝達が行われる.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,終局時の検討におい て,接合部が損傷していないとは必ずしもいえないだろ う.また,非合成構造が付着により合成構造のように挙 動することがあることがわかっており¹⁾,これらの構造 の崩壊を精度よく予測し設計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,複合構造全体の解析を行う際にその全てを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.材料界面の微細な構造を含む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が,付着破壊は脆性的であるため数値解析が困難である.そこで,本研究では複合構造のせん断特性評価にあたり,付着破壊が生じた場合の求解を試みた.

2. 付着破壊現象と計算方法の修正

(1) 付着破壊

複合構造の例としては鋼コンクリート複合構造がある が、鋼とコンクリートとの付着は脆性的に破壊する.そ の付着の強さを求めるために、山田らはトルク型せん断 試験²⁾を考案し実験を行っている.このせん断試験は鋼 円柱をモルタルに埋め込んで打設することで鋼コンク リート界面を再現し、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のである.この試験方 法は、界面端部で発生してしまう応力集中をなくすこと により正確な付着強度測定を目指している.

この試験方法の結果の例として図-1を示す. 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,初めにずれ変位がないまません断 応力が増加していき,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 変化は他の部分と比べて非常に大きく,付着破壊時には 力のつり合いが大きく変化することとなる.





図-1 鋼モルタル界面のせん断応力 - ずれ変位関係の例



図-2 サブステップ手続きの流れ

(2) 計算方法の修正

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(以下, N-R 法)を用いて数値計算を行うためには, 関数の連続性と 微分可能性, さらに初期値が解の近傍にあることが前提 となる. N-R 法で付着破壊を計算すると, 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, 微 分も不可能で, 目指すべき解も初期値から大きく離れて しまうため, 収束計算が破綻する可能性がある.

N-R 法で収束が困難な大きな不つり合い力が問題となっているので,解消すべき不つり合い力を小さくすることを考えた.図-2 は本研究で検討した計算方法の流れ図である.はじめは通常の N-R 法により計算を行



う. ある変位ステップでの不つり合い力 Rを外力 F_{ext} と内力 F_{int} の差をもって $R = F_{ext} - F_{int}$ と定義す る. 付着が破壊して過大な不つり合い力 R が生じたと きに図の右側の手続きに移り,不つり合い力を n_{sub} 段 階に分割して段階 i_{sub} における不つり合い力を $R_{sub} =$ $F_{ext} - F_{int} - R^{n_{sub}-i_{sub}}$ と定義することで,解消すべ き不つり合い力を小さくする. この分割した n_{sub} 段階 をサブステップと呼ぶこととする. 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,N-R 法による収束計算を行った.

3. 押抜き試験モデルの解析結果

解析した押抜き試験モデルを図-3に示す.材料モデルについては、鋼材には von Mises の降伏基準を用い て弾完全塑性とし、コンクリートには Drucker-Prager の破壊基準を用いた.コンクリートブロックを固定し、 鋼材先端に変位を与えた.鋼コンクリート界面に摩擦は なく、界面の付着強度は 0 MPa または 1 MPa とした.

得られた荷重-ずれ変位, せん断力-ずれ変位関係を 図-4に示す.ここで荷重は鋼材に載荷される力, せん 断力はスタッド-コンクリート界面に生じるせん断方向 の接触力の総和, ずれ変位はスタッド位置での鋼とコ ンクリート表面との相対変位である.付着強度0MPa 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1MPa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0MPa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.



図-4 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−5 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)

スタッド周辺の変形の様子を図-5に示す. 図は荷 重がピークを超える直前のずれ変位での変形であり, コンターは相当ひずみ¹である. 2つの図を比べると, 0 MPa ではスタット基部の相当ひずみが大きいことが わかる. これは, 0 MPa の場合では鋼コンクリート界 面に付着がないため,界面にずれが生じて変形がスタッ ト基部に集中したが, 1 MPa の場合では,付着破壊ま では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.

参考文献

- 山田真幸,サトーンペンポン,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) 山田真幸, 斉木功, 岩熊哲夫:鋼コンクリート界面の付着 強度評価のためのトルク型せん断試験に関する基礎的検 討, 土木学会構造工学論文集, Vol.59A, pp37-46, 2013.

1 比例載荷を考慮し、偏差全ひずみ第2不変量の√3倍とした.