

審査の結果の要旨

氏名 孫 方涛

本論文は、大型並列計算機を利用することを前提として、鉄筋コンクリート（RC）トンネル接合部材の構造応答に対する数値シミュレーションを試みたものである。複数の主トンネルと地上に向かうランプトンネルを接合する RC トンネル接合部は、構造形式・形状が複雑であるため、地震時等の挙動の予測が難しい。実験の代替となる数値シミュレーション手法の開発が重要課題であり、本論文は、ソリッド要素を使った 1,000 万超自由度の解析モデルに対し、コンクリート特有の弾塑性構成則と破壊解析機能を有した非線形有限要素法を適用することで、数値シミュレーションの実行可能性を探った。

審査は、本論文の要諦である、有限要素法に実装されたコンクリートの弾塑性構成則の取り扱いと亀裂を発生・進展させる破壊解析に関して行われた。コンクリートの弾塑性構成則としては既往の構成則が利用されたが、大規模有限要素法のプログラムに実装するために工夫された点が説明された。これは見通しの良い形に構成則を再定式化するものである。また、歪の増加に伴って応力が最大値を向かえ、その後低下するというコンクリートに固有の弾塑性構成則の特性の扱いは決して容易ではない。実際、弾塑性構成則から導出される弾塑性テンソルが対称性と正定値性を失うため、共役勾配法に基づく有限要素法のソルバを使うことができない。さらに繰り返し計算によって構成則を解く際に、数値解が収束せず発散するという不安定性がある。本論文でもこの点が説明され、対称性・正定値性の喪失と繰り返し計算の収束を確保するための、新しいアルゴリズムが説明された。これは、コンクリートの弾塑性テンソルの代わりに、対称・正定値の弾性テンソルを使うアルゴリズムである。実際に例題を使って、共役勾配法に基づくソルバが利用できること、収束性が改善されたことが示された。

コンクリートに亀裂を発生・進展させる破壊解析では、コンクリートの材料強度を使った破壊基準が用いられていることが説明された。破壊基準は、圧縮・引張り・せん断に対応したものである。引張り破壊のみを考慮した既往の解析と異なり、圧縮・せん断による亀裂の発生・進展を加えることがコンクリートの数値シミュレーションにとって重要であることが説明された。なお、本来の破壊基準は応力を使って記述されるが、本論文では、数値計算の効率を上げるため、応力に相当する歪を使ったことが説明された。

コンクリートの破壊解析を基とした、RC 部材の破壊解析も説明された。RC 部材とは、コンクリートに補強のための鉄筋を入れた鉄筋コンクリートの部材である。鉄筋とコンクリートの剛性の差によって応力の分担が異なる他、コンクリートの亀裂発生・進展によって応力の分布が変化することになる。RC 部材の応力の空間分布とその変化は、鉄筋の歪の計測によって観測されることが多い。数値シミュレーションでも、歪の空間分布とその変化が計算され、実験結果と比較された。空間分布と変化が定性的に良好に再現されていることが確認された。

RC 部材の数値シミュレーションでは、実験結果との定量的な比較を行うには至らなかったが、これは、繰り返し計算が収束しない場合があるため、RC 部材の数値シミュレーションで実験を完全に再現できなかったことが原因である。コンクリートの弾塑性構成則の実装に関して取り扱いの工夫はされたものの、この点も審議された。歪の増加によって応力が低下するという弾塑性構成則を使う場合、有限要素法の数値解析において、一つの要素の塑性変形が進むと、変形がその要素に集中することは既知の事実である。要素寸法に制限を与える等のさまざまな工夫が提案されており、本論文でも対応が図られたが、完全な解決には至らなかった。この理由として、本論文のコンクリートの取り扱いに限界があることが議論された。骨材とモルタルから構成されている実際のコンクリートは、モルタル部分が破壊しても健全な骨材によって破壊が進行しないという特性がある。本論文では、モルタルと骨材の複合材料としてのコンクリートを扱っているため、骨材によるモルタルの破壊や塑性変

形の抑制は無視せざるを得ない。この限界を打ち破るため、例えばコンクリートの 50% を骨材に対応する（亀裂の発生・進展を許さない）非破壊要素とすることが議論された。これは将来の課題である。

本論文が対象とした、RC トンネル接合部材の数値シミュレーションに関しては、解析手法の検証に使われた数値実験の結果を踏まえ、合理的な数値シミュレーションであることが確認された。RC トンネルの接合部材として簡略なモデルと詳細なモデルの二つが使われたが、どちらも実験結果と整合する結果が得られている。本論文で実行された大規模数値計算を使う数値シミュレーションの手法が、複雑な構造・形状を持つ RC 接合部材の解析に有効となる可能性を示したことが了解された。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。