

## [別紙 2]

### 審査の結果の要旨

論文提出者氏名 エルホーリ サイド アブド エルファッティア  
ELKHOLY Said Abd-Elfattah

2001年9月11日の旅客機を用いた米国ニューヨーク市での同時多発テロ事件では、世界貿易センター(WTC1, WTC2)ビルが崩壊し、多数の人的被害が発生した。また崩壊した建物から発生した大量の瓦礫が周辺の建物に被害を与える現象も起こった。これらのWTCビルのその周辺ビルの崩壊現象は、重要構造物の設計で従来想定されていなかった各種の巨大な災害や事故などによる外力の重要性を再認識させた。WTCの同時多発テロ事件以外にも、このような想定を超える巨大外力によって発生した事故や災害の例を挙げれば、英国で1968年にガス爆発を原因として発生したRonan Pointアパートの崩壊は、進行性破壊現象の追跡とその防止対策の重要性を認識させた最初の事例である。1995年には、米国のオクラホマ市で爆弾を搭載した車両を用いたテロによりAlfred P Murrahビルが被害を受けている。

このような現象に対して適切な対策を講じるためには、大変位・大変形を伴う構造物の崩壊現象のメカニズムの解明が不可欠であるが、これは実験的にも数値解析的にも容易ではない。理由は実験的なアプローチでは、大規模な構造物を対象として、複雑な外力条件の再現し完全崩壊するまでの実験を実施することが困難であること、数値解析的には複雑な破壊現象を安価な電子計算機環境で高精度に追跡する適切な手法がないためである。後者のアプローチでは、有限要素法(FEM)と個別要素法(DEM)を組み合わせた手法や、拡張個別要素法(EDEM)、応用要素法(AEM)などが、崩壊挙動を近似できる手法として提案されているが、これらの中にも大規模な鉄骨構造物の崩壊過程を追跡できる手法はない。

そこで本研究は、以下で説明する9章から構成されている研究論文として、安価な電子計算機環境でも大規模な鉄骨構造物の崩壊過程を高い精度で追跡できる手法を開発することを目指す。

第1章では、研究全体の目的や背景、本研究の構成を説明している。

第2章では、多層のビルを対象とした過去の事故や災害の事例を紹介するとともにメカニズムを解説し、進行性破壊現象にかかわる課題を整理している。また対策を講じる上での数値解析的なアプローチ法の重要性の説明と過去の数値解析的な研究のレビューを行い、それぞれの数値解析手法の特徴をまとめている。

第3章では、現在存在する多くの数値解析法の中から、進行性破壊現象を追跡する上で有利であると思われる応用要素法(AEM)の概要を紹介するとともに、本研究で提案する改良応用要素法(IAEM)について解説している。AEMは非連続体解析法の1つで、連続体から非連続体に移る破壊現象を高精度に解析可能な手法であるが、これを大規模な鉄骨構造物に適用しようとするとき、用いる要素のサイズを小さくし多数の要素を用いない限り、複雑な断面を有する鉄骨部材の挙動を高い精度で解析することは難しい。そこでAEMを基に、解析モデルの自由度を適切に落とすための理論を構築し、改良型のAEM(IAEM)を開発した。IAEMでは、従来は小さな要素の組み合わせとして扱っていた柱や梁などの部材を、その断面形状の力学的特性を取り込んだ1つの要素としてダイレクトにモデル化する手法を用いている。そして提案手法を、まず弾性材料を対象とした静的・動的荷重

条件下での挙動を解析し、その適用性と精度を検証した。

第4章では、前章で弾性材料を対象とした適用性と精度の検証を済ませた IAEM に、材料の非線形性と幾何学的な非線形性を高い精度で導入する手法を解説している。また鉄骨造の破壊解析に必要な終局変形能に基づいた破壊基も提案した。そして提案手法を用いて、鉄骨の梁とフレーム構造を対象とした終局強度と破壊メカニズム特性の解析を行い、実験結果と理論的な結果、さらに他の数値解析手法（RBSM）による結果と比較し、提案手法の適用性と解析精度を確認した。

第5章では、鉄骨のビル建物を対象とした過去の地震被害を紹介するとともに、強震動を受ける多層の鉄骨ビル（鋼製のモーメント伝達フレーム構造物）の挙動解析を行った。この解析では、破壊した部材同士の衝突現象も重要なことから、衝突や再接触現象も追跡可能なモデルを導入した。シミュレーション解析の結果、兵庫県南部地震で見られた各種の崩壊モードによる完全崩壊現象が再現された。

第6章では、鉄骨構造物の解析を行う上で重要な火災を受ける鉄骨部材の材料特性のモデル化について検討している。まず火災時の鉄骨部材を取り巻く周辺温度と時間変化に関する関係のモデル化、周辺温度の変化と鉄骨部材の温度変化の関係のモデル化、鉄骨部材の温度変化に伴う部材の体積変化と材料特性の変化に関するモデル化について整理した。一般にこれらの関係は複雑であることから、国や組織に応じて各機関が鉄骨部材に与える火災の影響を簡便的に考慮するための標準的モデル(基準)を有している。そこで各種の標準的モデル(基準)を用いた解析を行い、これと実験結果を比較し、それぞれの基準の適用性や長所と短所をまとめた。また火災下における鉄骨構造物の挙動に影響を及ぼす各種の要因について議論した。そして火災下の鉄骨部材の挙動を表現する温度変化に基づく非線形材料特性モデルを提案した。

第7章では、前章で提案した熱の影響を考慮した構造解析を試みている。IAEM を始めとして、非連続体解析手法において熱の影響を考慮した破壊解析の例はなく、本研究による解析が世界で初めての解析である。提案手法では、材料の温度変化に伴って剛性や強度が変化する材料的な非線形と幾何学的な影響による非線形性の両者が考慮されている。このモデルを用いた鉄骨構造物の火災時の挙動解析を行い、過去に実施された実験結果や他の数値結果との比較を行い、提案モデルの適用性と精度を検証した。

第8章では、各種の改良を加えた IAEM を用いて、WTC ビルを模擬した鉄骨の高層ビルが火災によって完全崩壊する過程のシミュレーションを行い、その崩壊メカニズムを分析した。解析結果は、飛行機の衝突による延焼で崩壊した WTC ビルの完全崩壊現象を定性的に再現するものになっている。また爆発などの衝撃によって崩壊するビルの動的破壊挙動の再現を目的とした解析も行った。具体的には、爆発の影響を爆発箇所の部材を瞬時に取り払うことで簡便的にモデル化した解析を行い、建物全体の崩壊挙動に与える爆発箇所の影響を検討した。

最終章の第9章では論文全体のまとめと今後の研究の方向性や課題について整理している。

以上のように、本研究ではこれまでは実験的にも数値解析的にも実施が困難であった大規模な鉄骨構造物の完全崩壊に至るまでの複雑な非線形挙動を、安価な電子計算機環境で高精度に追跡する手法（IAEM）の開発に成功している。この手法によって、巨大な地震動や大規模火災、爆発などの外力を受けた大規模構造物の完全崩壊現象が再現でき、そのメカニズムの解明が進むと思われる。本研究の成果は、従来は考慮できていなかった重要構造物に対する想定を超える巨大な外力に対する対策の立案と向上に大きく貢献することが期待されるものである。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。