

審 査 の 結 果 の 要 旨

論 文 提 出 者 氏 名 ウォラカンチャナ カウイン

従来の地震工学や地震防災では、地震による地面の揺れ、すなわち地震動が地震被害の原因として重要視され、これに対する適切な構造物の設計/施工や対策の実現がこの学問分野の主題と考えられてきた。しかし 1999 年に発生したトルコ・コジャエリ地震(M.7.4, 8月17日)や台湾・集集地震(M.7.6, 9月21日)では、数メートルから 10メートルにも及ぶ地盤変状(断層変位)が地表に現れ、これが橋梁やダムなどのインフラストラクチャー、さらに多数の住宅やビルに甚大な被害を及ぼした。本研究では、場合によっては地震動の問題以上に地震被害に大きな影響を与えうる断層変位による地表変状とその影響下でのコンクリート構造物の破壊メカニズムを数値解析的に分析するものである。

従来この種の研究は数が限られているとともに、用いられてきた手法は実験的な手法が主であった。しかし実験では材料の物性値や境界条件の設定などにおいて制約が厳しいことから、多様な条件下での分析は不可能である。一方、数値解析的なアプローチは、実験における制約条件の問題は存在しないが、対象となる断層運動や構造物の破壊挙動が非線形性の高い大変形挙動であることから、今日一般的に用いられている連続体解析法の適用には限界がある。そこで本研究では、微小変形領域から大変形領域までの挙動を解析できる応用要素法(AEM: Applied Element Method)を用いて解析を行った。その際に、従来の AEM では解析の単純化のために四角形要素を用いていた点を改良し、ポロノイ分割要素を用いた AEM 解析(VAEM)の定式化とそれを用いた解析コードを作成し、検討を行った。

上記の目的で実施された本論文は全 7 章から構成される。以下に各章の要約を述べる。

第 1 章では研究全体の目的や背景、既往の研究と本論文の構成を説明している。

第 2 章では、本研究で用いる非線形破壊解析手法である応用要素法(AEM)について、従来型(オリジナル)AEM の概要を説明するとともに、本研究で提案するポロノイ要素分割による応用要素法(VAEM)の定式化について説明している。そして提案した VAEM をまず弾性挙動解析に用いることで、以下のような長所を確認した。

VAEM は従来の矩形要素 AEM では対応の難しかった円形などの形状の解析対象物の解析に簡単に対応できる。剛体要素を用いているものの 3 要素以上を組み合わせた要素の集合体を解析対象とした場合は、全体としてはポアソン比の影響が考慮できる。鉛直・水平方向以外の既存の非連続性を考慮できる。せん断変形が卓越する現象における解析精度は AEM に比べて高い、など。

第 3 章では、提案した VAEM を用いて無筋ならびに鉄筋コンクリートの破壊挙動を解析し、その適用性を確認した。解析の結果から得られたクラックの分布形状は実験結果とよく一致した。また従来型の矩形要素 AEM よりも精度が高いことが示された。VAEM 解析では、斜めに走るクラックの進展が従来の矩形要素 AEM よりも精度高く表現でき、結果として解析対象物の最大耐力は同じ材料モデルを用いた場合にも少し減少することがわかった。

第 4 章では、断層運動の影響を受ける地表地盤(堆積物)の挙動を VAEM 解析し、前章同様に従来の矩形 AEM の結果と比較した。材料強度の小さい地盤モデル(粘着力が低い、内部摩擦力が小さい)の場合に、地表地盤で断層の影響を受

ける範囲が狭くなった。クラックの進展状況は従来型の AEM 以上に実験結果に近くなった。

第 5 章では、1999 年の台湾・集集地震で被害を受け Shih-Kang ダムの破壊挙動の解析を行った。断層のすべり角度や断層の位置、地盤変位の形状、ダムの高さなどを変化させた場合の解析を行った。そして最後に、断層変位を前提にした新しい設計について検討した。解析結果から具体的にわかった主なことがらは以下のとおりである。

Shih-Kang ダムの破壊は、基礎とダムの境界のはく離、ダム躯体の上部からのクラック、せん断クラックと圧縮破壊の順に進んだ。ダムを襲う断層変位が、正断層の場合と逆断層の場合では、正断層の場合の被害が相対的に軽微である。断層変位が作用する位置の違いによってせん断被害のエリアが変化し、ダムの中央部分に変位が作用する(せん断変形するエリアが大きい)ほど、ダムは大きな変位に対抗できる。ダムの基礎に作用する変位形状によってダム躯体の破壊挙動が変化することは、一方断層変位を受けるダムの破壊挙動においては、ダムの高さは大きな差にならない。

第 6 章では、ダム以外の建造物の例として、断層変位を受けるコンクリート橋梁、ビル、地下埋設管の非線形破壊解析を行った。コンクリート橋梁の解析では、前章同様、集集地震で落橋被害を受けた Arifiye 橋の解析を行った。解析結果は実際の被害とよく一致し、桁同士を連結していたことが、断層位置から離れた部分の桁が落橋した理由であることがわかった。建物の基礎部分に断層変位を受ける RC ビルの被災に関して解析を行ったところ、正断層と逆断層では被害に大きな差が出ることがわかった。また地下埋設管の非線形破壊解析では、下盤側の埋設管にせん断破壊が生じ、上盤側には引っ張り破壊が生じることがわかった。

最終章の第 7 章では論文全体をまとめるとともに将来の展望に関して述べている。具体的な主な展望は、3 次元解析コードの作成、解析精度を確認するための実験の実施などである。

以上のように本研究では、従来型の四角形要素を用いる応用要素法(AEM)を改良したボロノイ分割要素を用いた新しい応用要素法(VAEM)を定式化するとともに、解析コードを作成した。そして、従来それほど研究が行われていなかった地下の比較的浅い地震断層の変位が引き起こす地表変状によって生じるコンクリート建造物の破壊メカニズムの解析を行った。本研究で提案した VAEM は実験結果との比較から、従来型の AEM よりもクラックの自然な進展が表現でき、定量的にも解析精度が高いことは判明した。具体的な例として実施した 1999 年の台湾・集集地震で被災した Shih-Kang ダムや Arifiye 橋の破壊現象は、実際の被災形態を良く模擬するものであった。次にこの VAEM を用いて、断層変位を受ける RC ビルや地下埋設管の破壊挙動の解析を行ったが、解析結果は過去の被災メカニズムをうまく説明するとともに、地中の断層変位による地表地盤の大きな変状を受ける建造物の地震対策にヒントを与えるものである。

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。