

|  |   |    |        |
|--|---|----|--------|
| 京都大学   | 博士 ( 農 学 )  | 氏名 | 坂井 孝太郎 |
| 論文題目   | Seismic Performance Analysis of Fill Dams Using Velocity Based Space-Time Finite Element Method<br>(速度型 Space-Time 有限要素法によるフィルダム耐震性能照査) |    |        |
| (論文内容の要旨)  |   |    |        |
| <p>ダムの地震時安定性の予測は、ダムが貯水を制御する機能を喪失することによる下流域の人命や資産への被害が大きいことから重要である。我が国では、国営造成農業用ダムについて、ダムサイトにおいて発生しうる最大レベルの地震動に対して耐震性能照査が行われており、大地震時においてもダムが貯水機能を失わない程度の変形に抑えられることを解析により確認している。</p> <p>フィルダムについては、堤体材料がひずみの発生に伴う非線形性を有することから、広く用いられてきた方法として等価線形化法による動的解析が用いられる。等価線形化法では、塑性変形を計算することができないため、塑性変形解析により別途、塑性変形量を計算する必要がある。このような従来法は、解析上の設定が単純である利点を持つ一方で、堤体材料の強度を超えるような大地震時には現実と合わない問題がある。本論文では、このようなフィルダムの耐震性能照査における従来法の問題点を解析事例により明確に示す。また、従来法の問題点を解決する有効な方法として、地震応答と塑性変形を一貫して解析することができる弾塑性地震応答解析を提案する。この弾塑性地震応答解析では、速度型Space-Time有限要素法 (v-ST/FEM) を採用し、長時間かつ大振幅である大地震の解析を安定的かつ高精度に実施する解析法を提案する。</p> <p>v-ST/FEMの時間積分法は増分型の構成式を導入するが、支配方程式を増分型としないため地震後の静的なつり合いを正確に計算できる利点を有する。本論文では、線形問題および非線形問題の両方でNewmark-<math>\beta</math>法よりも安定かつ高精度な計算が確認されているv-ST/FEMに、下負荷面モデルを用いた弾塑性構成式を適用したフィルダム弾塑性地震応答解析法を提案し、微小変形の範疇で地震応答と塑性変形に一貫性をもって解析できることを確認した。さらに、同手法によるケーススタディを行い、ダム地点において想定される最大レベルの地震動を観測したフィルダムの地震時挙動を再現し、大地震に対する本手法の適用性を確認した。</p> <p>本論文は全6章で構成され、従来法の問題点を明らかにし、v-ST/FEMによる弾塑性地震応答解析の有効性が確認される。第1章では、研究背景および目的とともに、既往研究のレビューを記述する。第2章ではv-ST/FEMの定式化を示す。第3章では、フィルダムモデルの解析を実施し、従来法の限界を明らかにする。第4、5章では、下負荷面モデルをDrucker-Prager型の構成式に適用した数値計算例を通じて、提案する弾塑性地震応答解析法に用いられる弾塑性構成式の特徴を整理する。また、実際のフィルダムモデルを用い、ダムサイトで観測された地震の加速度記録を入力して地震応答解析を行う。第6章では、研究全体の結論と展望を述べる。本論文に記される研究結果を要約すると、以下のとおりである。</p> <p>第3章で明らかになった従来法の限界として、次の項目が挙げられる。</p> |   |    |        |

1. 土質材料のようにせん断強度を持つ材料では、動的荷重が作用した時にせん断強度よりも大きな応力は伝播しない。そのため、応力の大きさに比例して発生する応答加速度もせん断強度の大きさに応じた上限値を持つ。この応答加速度の挙動は材料の降伏に起因して生じるため、大きな地震動を受けた際に顕著となる。
2. すべり土塊の移動量により塑性変形量を計算する従来法では、既定値を超えた応答加速度を積分することで移動量を算出する。そのため、低強度な材料で構成された堤体は、応答加速度の上限値も小さく塑性変形量を過小評価する。
3. 従来法の問題は、大きな地震動が作用した時に低強度な堤体ほど塑性変形量が小さくなる矛盾を内包しており、その限界は堤体材料のせん断強度を越える地震動に対して塑性変形量を正確に計算できないことにある。この問題を解決するには、堤体材料の降伏時においても応力と塑性ひずみの関係を記述できる弾塑性構成式を導入した地震応答解析が必要不可欠となる。

第2, 4および5章では、v-ST/FEMを用いた弾塑性地震応答解析法を提案し、数値計算例を通じて次のような知見を得た。

1. v-ST/FEMは高精度かつ安定的な時間積分を可能にするだけでなく、Space-Time有限要素法の範疇で、連続な変位を算出する唯一の手法である。時間積分の精度と安定性に加えて、連続な変位を算出するv-ST/FEMは大地震に対する弾塑性地震応答解析に向くことに着目し、それによる弾塑性地震応答解析の定式法を示した。
2. 1次元の弾塑性地震応答解析を通して、入力加速度の増加に伴う応答加速度と塑性変形量の変化を調べた。その結果、材料の降伏により応答加速度が上限に達するものの、塑性変形量は増加を続ける結果を得た。これにより、弾塑性地震応答解析により、上述した従来法の問題を解決できることを示した。
3. 動的な弾塑性応答を記述するには、静的な弾塑性挙動とは異なり、繰返し荷重に対する弾塑性挙動を表現する構成モデルが必要となる。これを実現するため、拡張下負荷面を導入したDrucker-Prager型の弾完全塑性モデルの定式化を実施した。
4. 2011年に発生した東北地方太平洋沖地震を経験した小田ダム（宮城県、ロックフィルダム）を対象とし、上記の弾塑性モデルを組み込んだv-ST/FEMによる弾塑性地震応答解析を実践した。その結果は、解析結果と観測された加速度応答と塑性変形が概ね一致することを示し、v-ST/FEMによる弾塑性地震応答解析の実問題への適用性を実証した。

以上のように、本論文では高精度かつ安定的な時間積分を実現でき、連続な変位を算出するv-ST/FEMを利用した弾塑性地震応答解析を提案した。また、大地震を経験した実ダムへの適用を図ることで、その計算性能を実証した。提案法は微小変形理論に基づくが、大変形に対応する定式化も可能であり、今後は適用対象をさらに拡大することが期待される。

注) 論文内容の要旨と論文審査の結果の要旨は1頁を38字×36行で作成し、合わせて、3,000字を標準とすること。

論文内容の要旨を英語で記入する場合は、400～1,100 wordsで作成し  
審査結果の要旨は日本語500～2,000字程度で作成すること。

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、大きな地震動を受けるフィルダムの地震応答解析を高度化することを目的とし、速度型Space-Time有限要素法 (v-ST/FEM) に繰返し荷重に対応できる弾塑性構成式を導入し、実ダムの地震応答解析を実現した。その中では、既往の地震応答解析の限界と問題点を指摘し、弾塑性解析によりその問題を解決できることを実証した上で、高精度かつ安定的な時間積分を可能にする速度型Space-Time有限要素法を利用した弾塑性地震応答解析を実ダムに適用した。本論文において評価できる研究成果は以下の3点である。

1. フィルダムに対する現行の地震応答解析では、大きな地震動が入力された際、高強度なダム堤体の方が、低強度なそれと比べて大きな残留変形が算出される矛盾が生じる。この原因が、塑性変形に伴って進行する堤体材料の剛性低下が応答加速度を抑制するにも関わらず、現行の残留変形計算は応答加速度の抑制を評価できていない点にあることを明確にした。これにより、弾塑性挙動を記述する地震応答解析がこの問題を解決する有効な方法であることを示した。
2. v-ST/FEMは高精度かつ安定的な時間積分を可能にするだけでなく、Space-Time有限要素法の範疇で、連続な変位を算出する唯一の解析手法である。この点に着目し、v-ST/FEMによる弾塑性地震応答解析に初めて成功した。
3. 繰返し荷重をうける弾塑性材料の応力～ひずみ関係を再現できる弾塑性モデルを導入し、実際に2011年に発生した東北地方太平洋沖地震を経験した小田ダム（宮城県）の地震応答解析を実施した。その結果は、同ダムが経験した地震時挙動を再現することに成功した。

以上のように、本論文の成果はフィルダムに対する耐震性能照査の精度を飛躍的に発展させた。さらに、土のような弾塑性材料について提案した地震応答解析手法は高い新規性を有しており、施設機能工学並びに水利施設の設計、管理・保全の発展に寄与するところが大きい。

よって、本論文は博士（農学）の学位論文として価値あるものと認める。

なお、令和3年2月16日、論文並びにそれに関連した分野にわたり試問した結果、博士（農学）の学位を授与される学力が十分あるものと認めた。

また、本論文は、京都大学学位規程第14条第2項に該当するものと判断し、公表に際しては、当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。

注) 論文内容の要旨、審査の結果の要旨及び学位論文は、本学学術情報リポジトリに掲載し、公表とする。

ただし、特許申請、雑誌掲載等の関係により、要旨を学位授与後即日公表することに支障がある場合は、以下に公表可能とする日付を記入すること。

要旨公開可能日： 年 月 日以降（学位授与日から3ヶ月以内）