

大地震に対するコンクリートダムの高精度安定性解析を実現

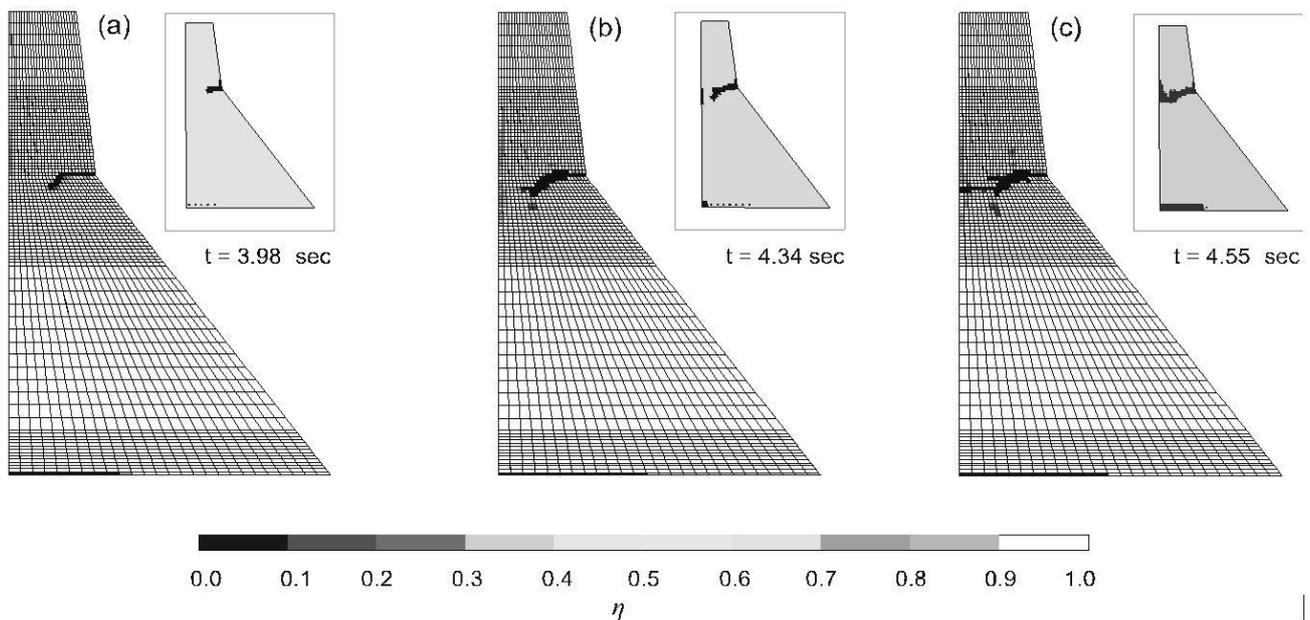
概要

京都大学大学院農学研究科 Vikas Sharma 研究員（研究当時、現：インド工科大学ボンベイ校研究員）、藤澤和謙 同准教授、村上章 同教授らの研究グループは、農業用ダムなど水利施設の大地震に対する複雑な挙動を正確に予測するため、独自に「速度型 Space-Time 有限要素法」を開発し、コンクリートダムのクラック（亀裂）進展解析を実現しました。

本研究で提案した「速度型 Space-Time 有限要素法」は、これまでは不可能であった時間方向の計算精度調節を可能にするだけでなく、幅広い形の応力～ひずみ関係に対応する画期的かつ実用的な計算スキームを提供します。本研究では、その適用例として、1967 年の地震によってインドのコイナダムで発生した水平亀裂を再現することに成功しました。これにより、本提案手法のコンクリートダムのクラック進展解析への適用性が実証されました。

現在、大地震に対する社会基盤／農業水利施設（ダムやため池など）の強靱化が求められています。本成果は、それら施設の安全性評価に直結する実用的な成果として注目されています。

本研究成果は、2020 年 1 月 6 日に国際学術誌「Soil Dynamics and Earthquake Engineering」にオンライン掲載されました。



コイナダムの堤体湾曲部から発達するクラックの様子（ η の値によって引張強度の低下を示す）

1. 背景

国土強靱化の背景のもと、農林水産省では全国の農業用ダム安全性評価を行っています。評価するにあたっては、大地震に対する施設の複雑な挙動を正確に予測する必要があり、そのための手法が求められていました。

2. 研究手法・成果

本研究グループは、構造物の動的応答を高精度かつ安定的に解析できる数値解析手法として、空間・時間両方向とも有限要素を利用する「速度型 Space-Time 有限要素法」(Velocity-based Space-Time Finite Element Method、「v-ST/FEM」)を新規に提案し、各種の例題を通して、その優れた計算特性を実証してきました。従来法と比較して、高精度な時間積分を実現し、積分パラメータを必要としない無条件安定な数値解析手法を提案しています。(平成 30 年度地盤工学会賞論文賞を 2019 年 6 月 7 日に受賞)

これまで、Space-Time 有限要素法の固体動力学への適用は、未知数の増加が問題となっていたため限られていました。具体的には、時間方向に有限要素を利用することと、変位と速度の両方を未知数にする必要があるため、空間方向に有限要素法、時間方向に差分法を用いる通常の解析手法と比較すると、未知数の数は最低でも 4 倍になっていました。

提案手法は、波動の伝搬を記述する方程式に対して Space-Time 有限要素法を適用するものであり、幅広い応力～ひずみ関係に対応するため、拡張性に富むものです。本研究では、実際の応用として、コイナ(Koyna)ダムを対象として計算の再現性を示しました(図 1、2)。同ダムはインドのマハーラーシュトラ(Maharashtra)州に位置し、堤高 103 m を有する重力式コンクリートダムです。1967 年にボンベイ(Bombay)の南南東約 200 km の地点を震源とするマグニチュード 6~7.5 (Richter scale) の地震が発生したことにより、堤体の高さ 2/3 程度の位置において、縦断方向に大きな水平亀裂が確認され、漏水が生じました。本研究はこの水平亀裂を正確に再現し、提案手法による数値計算の精度と安定性に加え、実際のダムの応答を効率的に計算できる実用性を示しました。

3. 波及効果、今後の予定

提案手法は新規性と拡張性に富むだけでなく、高精度かつ安定的な動的応答解析を実現し、土木工学のみならず建築学、機械工学など関連分野への波及効果も期待できます。また、本技術は、農林水産省の事業である全国農業用ダム安全性評価及び技術検討に利用が見込まれています。

4. 研究プロジェクトについて

本研究は、科研費・基盤研究(A)「豪雨/地震災害リスク予測・評価による農業水利施設(群)の動的マネジメント」(代表:村上章)の支援を受けて行われました。

<用語解説>

Space-Time 有限要素法:

空間方向だけでなく時間方向にも形状関数によって離散化を行う有限要素法。有限要素法とは、微分方程式の数値解法の一つであり、例えば、複雑な構造物の外力による変形を計算するため、構造物を単純な形状の領域(=要素)に分割し(離散化)、各要素の変形を足し合わせることで構造物全体の変形を求める手法です。従来の Space-Time 有限要素法は、時間方向に安定かつ高精度な計算が可能であるものの、それを固体解析に適用する場合には未知数の増加が問題となっていました。そこで本研究グループは、固体解析のための変形速度のみを変数とする「速度型 Space-Time 有限要素法」を開発し、下記論文に発表しました。この論文により、平成 30 年度地盤工学会賞論文賞を 2019 年 6 月 7 日に受賞しました。

論文： V. Sharma, K. Fujisawa and A. Murakami: Velocity based time-discontinuous Galerkin space-time finite element method for elastodynamics, Soils and Foundations, Vol.58, No.2, pp.491-510, 2018.

DOI : <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2018.02.015>

差分法：

計算領域を格子分割し、隣接する格子点における変数の値の差をとることで、対象とする変数の微分を計算する数値解析手法。

時間積分：

一般に現象を記述する偏微分方程式は、時間及び空間に関する微分を含みます。時間積分とは、時間に関する微分を含む項を、時間について（数值的に）積分することを意味し、これにより対象となる現象の時間変化が計算されます。時間積分法の中には、数值的な積分に関わる定数（=積分パラメータ）が必要なものもあります。

動的応答解析：

地震動のように時間的に変化する（=動的な）外力が構造物に作用するとき、その外力の作用によって構造物も動的に変形し、その形状が変化します。この変形挙動を構造物の「応答」と呼び、それを数値シミュレーションのように解析することを「動的応答解析」と言います。

<研究者のコメント>

実際の応用に耐えるような研究成果を発信できたことを嬉しく思います。

<論文タイトルと著者>

タイトル：Space-time FEM with block-iterative algorithm for nonlinear dynamic fracture analysis of concrete gravity dam（コンクリートダムの非線形動的破壊解析のための Block-iterative アルゴリズムを組み込んだ Space-Time 有限要素法）

著 者：Vikas Sharma, Kazunori Fujisawa, Akira Murakami

掲 載 誌：Soil Dynamics and Earthquake Engineering

DOI : <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2019.105995>

<参考図>

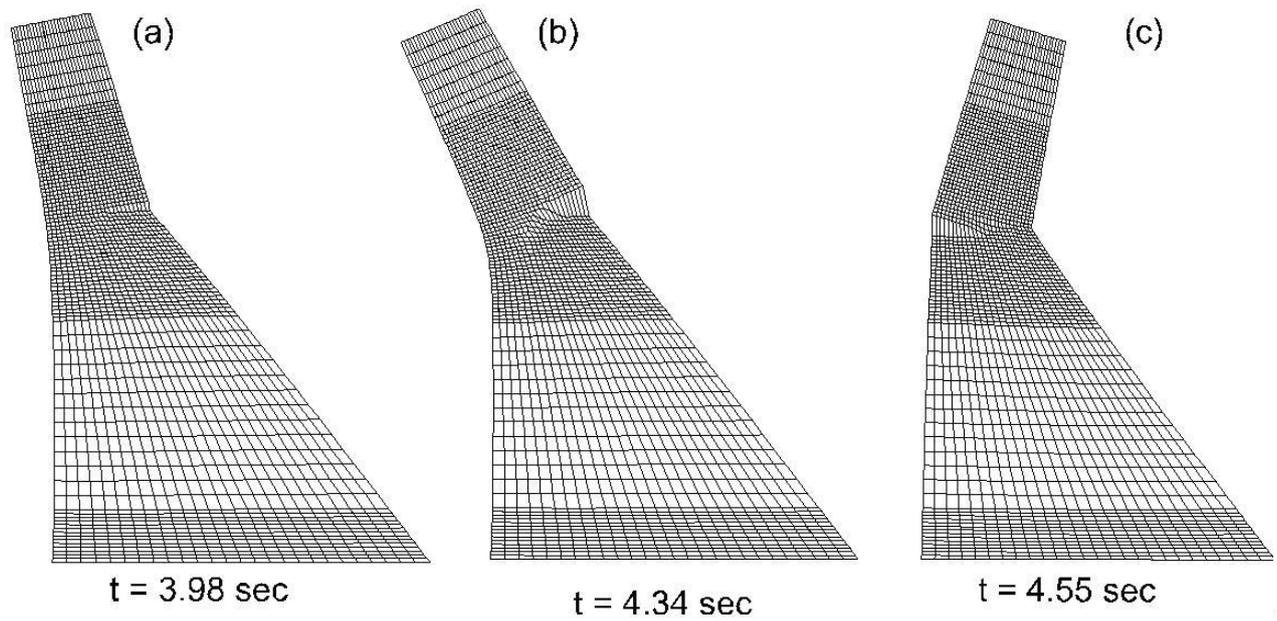


図1. コイナ (Koyna) ダム (インド) の揺れの様子 (変形を拡大して表示)

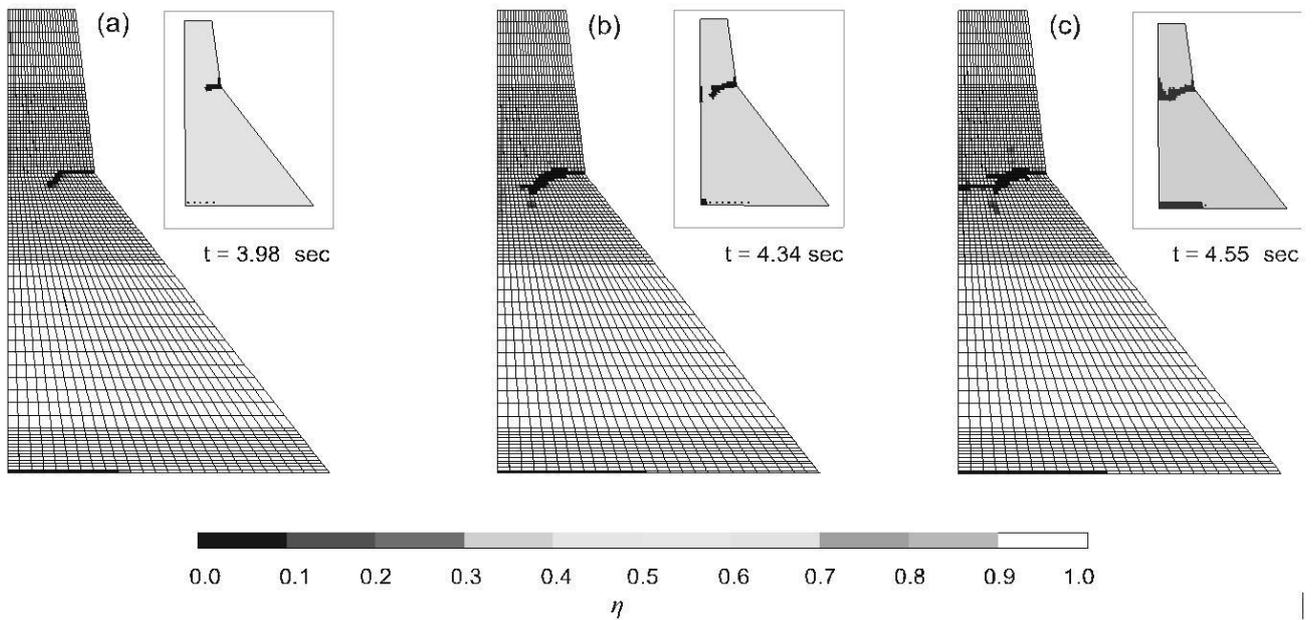


図2. 堤体湾曲部から発達するクラックの様子 (・の値によって引張強度の低下を示す)