



TITLE:

Development of Space-Time Finite Element Method for Seismic Analysis of Hydraulic Structures(Abstract_要旨)

AUTHOR(S):

Vikas, Sharma

CITATION:

Vikas, Sharma. Development of Space-Time Finite Element Method for Seismic Analysis of Hydraulic Structures. 京都大学, 2018, 博士(農学)

ISSUE DATE:

2018-09-25

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.k21374>

RIGHT:

許諾条件により本文は2019-10-30に公開; 学位規則第9条第2項により要約公開

(続紙 1)

京都大学	博士 (農 学)	氏名	Vikas Sharma
論文題目	Development of Space-Time Finite Element Method for Seismic Analysis of Hydraulic Structures (農業水利施設の地震解析に向けたSpace-Time有限要素法の開発)		
(論文内容の要旨)			
<p>農業水利施設の地震時挙動(地震応答)を高精度に予測することは、農業基盤を支える施設の維持管理に必要な不可欠であるとともに、当該分野のみならず土木工学や機械工学などの関連分野において求められる技術でもある。本論文では、通常の有限要素法の離散化を時間方向にも適用したSpace-Time有限要素法(ST/FEM)を利用することにより、構造物の動的応答を従来法よりも高精度に解くことのできる数値計算手法を提案した。固体の動的問題に従来のST/FEMを適用する際の主な問題点は、未知数の増加にあった。例えば、波動方程式のように変位に関する微分方程式が2階の時間微分項を含む場合、空間方向に有限要素法を用い、時間方向に差分法を適用する通常の方法と比較して、既往のST/FEMでは解くべき未知数が数倍に増える。この点が応用上の障壁となり、高精度かつ発展性のある手法にも関わらず、固体の動的解析においてST/FEMは普及してこなかった。</p> <p>本論文で提案する手法は、速度のみを未知数とすることで、固体の動的解析における未知数の増加を半分に抑え計算を容易にした「速度型ST/FEM」である。本論文は、速度型ST/FEMの特徴と応用性に関する全7章で構成される。第1章では、研究背景と目的とともに、既往研究についてのレビューを記述する。第2章では、本論文が新規に提案する速度型ST/FEMの詳細を示し、基本的な数値計算例を通して、同手法がもたらす計算結果の特徴を整理する。第3章では、実用的な観点から必要になる境界条件を導入し、第4～6章にわたって農業水利施設の地震応答に対して、線形問題および非線形問題を解析する。第7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、以下のようなものである。</p> <p>提案手法の特徴として、第2章では 1) 提案法が時間方向に対して、最も簡単な線形要素を利用した場合であっても3次精度を有し、無条件安定な時間積分法となること、2) 提案法は物体の振動問題に対して、既往の時間積分法の中で非数値分散がきわめて小さい手法であること、3) 衝撃波問題に対して、提案法は非常に高い安定性を有する。通常よく利用される時間積分法であるNewmark-β法やHHT-α法では、激しい数値振動により解析が不可能な問題に対しても同手法の適用は可能であることを挙げた。</p> <p>このように提案法は長期振動問題や衝撃波など、幅広い固体の動的問題に適用可能な高精度かつ安定な手法である。同手法の唯一の欠点は物体振動の高周波領域においても数値分散が小さい点にある。これは、高周波領域の振動に対しても精度ある計算が可能であるが、高周波領域において比較的小さな時間ステップが必要とされることを意味する。</p> <p>さらに提案手法の応用性として、第4章～第6章では次を挙げた。すなわち、第4章では実際問題へ適用性を調べるため、地盤を含むコンクリートダム地震応答を提案法により計算した。この問題は、地盤とコンクリートを線形弾性体と仮定した線形応答問題であり、その中では地震応答解析に必要な不可欠な境界条件である粘性境界、自由地盤境界などの各種境界条件にも提案法は対応可能であることと、その定式化が示された。一般的に用いられるNewmark-β法を時間積分に用いた計算結果との比較を行った結果、提案法はそれとほとんど同一の結果を得ることが可能であった。</p>			

さらに、第5章では地盤とコンクリートダムに加え、貯水の影響も考慮した地震応答解析を実行した。ダム背面の貯水は、ダム本体の安定性に大きく関わる。貯水の地震応答は、粘性を考慮しない圧力波の波動方程式によって記述され、その方程式は水圧に対して2階の時間微分項を有する。このため、同方程式について提案法を適用し、貯水の動的応答解析について既往の研究および理論解との比較から、その精度を確かめた。地盤・コンクリートダム・貯水のすべての地震応答を提案法によって連成した数値解析では、逆行列計算の未知数を減らすため、地盤、コンクリートダム、貯水の離散化方程式を別々に解きながら、反復によって連成を実現するBlock Iterative Algorithmを実装し、結果として地盤・コンクリート・貯水の相互作用を精度良く計算した。

第6章では、コンクリートダムの応力～ひずみ関係に亀裂進展モデルを組み込んだ地盤・コンクリートダム・貯水の地震応答解析を行った。農業用コンクリートダムの地震時の亀裂発生は、耐震照査の上で最も懸念される事象の一つである。この解析の特徴は、上述の二つの応用例とは異なり、解かれる方程式が非線形になる点にある。用いた構成モデルは共軸回転クラックモデルであり、亀裂発生後の軟化に加えて、亀裂の再開鎖による剛性の回復を記述できる。具体的には、1967年に起きた地震によって、亀裂を含む大きな損傷を受けたKoynaダムの事例解析を実施した。その中では、非線形な応力～ひずみ関係を評価する時間方向の積分点の違いが計算結果に与える影響を議論した。その結果、積分点の違いが計算結果に与える影響は小さいことを示し、非線形な応力～ひずみ関係を有する問題においても精度良く計算を実行できることを示した。なお、亀裂の再開鎖時には急激な剛性の増加により、慎重に時間ステップ間隔を調整する必要があった。これは、提案法が高周波成分の応答に対して減衰が小さいことに起因すると考えられた。

以上のように、本論文では、固体の動的応答を高精度で安定的に解くために速度型ST/FEMを提案し、手法自体の特徴を精査するとともに、その適用性をコンクリートダムの地震応答問題を通じて検証した。提案法は、解かれる未知数の増加を抑えることに成功し、時間方向において高精度かつ無条件安定な時間積分法であることから、長期振動問題や衝撃波など、幅広い固体の動的応答問題に適用できる。地盤・コンクリートダム・貯水の地震応答解析は、線形・非線形問題を問わず、精度ある安定計算が実用上の連成問題においても可能であることを示した。提案法は、固体の動的解析の精度と安定性を高めるとともに、未知数の増加を抑えたことで適用性に優れる。本法は移動メッシュも扱うことが可能であることから、幾何学的非線形性も直接的に扱うことができる。今後、さらに幅広い固体解析問題に適用され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)

本論文では、動的な固体解析を高精度かつ安定的に行う数値計算手法として、速度型Space-Time有限要素法を提案し、コンクリートダム地震応答解析に対する適用性を実証した。地震時の農業水利施設の安定性に対する関心が高まる中、本論文は構造物の耐震性能を精度よく評価できる手法を提案し、その中では固体解析の発展と農業水利施設の安全性評価に寄与する研究成果がまとめられ、評価できる点は次のようである。

1. 提案法は、時間方向にも有限要素法を適用することで時間積分の精度を高める方法の一つであるが、従来問題であった未知数の増加を最小限に抑えることに成功した。広く利用される時間積分法は通常2次精度であるが、提案法は時間方向に3次以上の精度を有し、無条件安定であることが示された。
2. Newmark- β 法やHHT- α 法は、広く利用される時間積分法であるが、衝撃波の伝播を解く場合に数値振動を引き起こす。提案法では、衝撃波の伝播においても数値振動は発生せず、広範な問題への適用が可能である。
3. 提案法では、時間方向にも有限要素が設けられることから、与えられる境界条件にも時間領域での積分を必要とする。コンクリートダムのような実際の水利構造物の地震応答を解析するにあたり、粘性境界条件などの各種境界条件の与え方、貯水の動的応答とのカップリング手法が整備され、提案法を実問題への応用が可能なレベルに発展させた。
4. 地盤・コンクリートダム・貯水の連成地震応答解析が線形及び非線形問題において行われ、提案法の精度と適用可能性を実証した。

以上のように、本論文では固体の動的解析に有利となる速度型Space-Time有限要素法を開発し、手法の特徴を精査するとともに、実務に対する有用性を農業水利施設の地震応答問題を通じて検証した。提案法は、固体解析において高い新規性を示す学術的意義に加え、従来法に比して高精度かつ安定な地震応答解析を実現でき、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、平成30年8月9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）