

## 速度型 Space-Time 有限要素法を用いたロックフィルダムの地震応答解析 Seismic response analysis of a rockfill dam by velocity-based Space-Time FEM

○笹川秀徒\*・坂井孝太郎\*\*・藤澤和謙\*・村上 章\*

SASAKAWA Shuto・SAKAI Kotaro・FUJISAWA Kazunori・MURAKAMI Akira

### 1. はじめに

わが国ではレベル2地震動の発生に備え、国土強靱化の背景のもと、農業用ダムの安全性評価が行われている。その際の入力地震波は長時間のものが多く、これまで以上に解析に時間を要することが予想される。この問題を解決する手段として、大きな時間ステップでも無条件安定かつ高精度な計算手法である速度型 Space-Time 有限要素法 (v-ST/FEM) の適用が考えられる。v-ST/FEM は幅広い構成関係に適用が可能であるが、現在では線形弾性体を対象にして精度と安定性が示されている (Sharma et al, 2018)。非線形問題における計算特性は現在のところ不明であり、本論では Soft spring 問題を通して、v-ST/FEM の時間積分性能と Newmark- $\beta$  法を比較する。その後、実際問題への適用を意識し、ロックフィルダムの地震応答解析を行う。

### 2. Soft spring 問題と v-ST/FEM

Soft spring 問題はバネ定数が変形に伴って減少するバネにつながれた物体の運動を対象とし、以下の運動方程式が代表例となる。

$$\ddot{u} = f(t), \quad f(t) = u^3 - u, \quad u(0) = u_0, \quad \frac{du(0)}{dt} = v_0 \quad (1)$$

ここに、 $u(t)$ : 原点からの変位 (未知数)、 $f(t)$ : 外力、 $u_0$ : 変位の初期値、 $v_0$ : 速度の初期値である。

図1に変位速度関係の理論解を示す。初期条件が包絡線の外部の点である場合は、包絡線に沿うように変位と速度が発散する。一方、初期条件が包絡線の内部の点

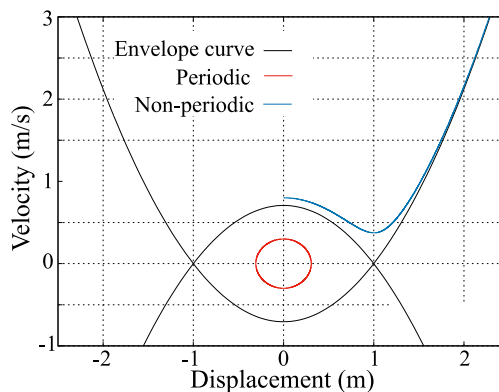


図1 変位速度関係 (理論解)

Fig. 1. Displacement-velocity curve

とおりに周期的な運動を記述する。式(1)は時間方向のみの微分方程式となるが、これに対して v-ST/FEM を適用すると、以下の弱形式を得る。

$$\delta v(t_n) \{v(t_n)^+ - v(t_n)^-\} + \int_{t_n}^{t_{n+1}} \delta v \frac{dv}{dt} dt - \int_{t_n}^{t_{n+1}} \delta v f dt = 0 \quad (2)$$

#### 2.1 非周期領域における解析結果

v-ST/FEM と Newmark- $\beta$  法によって式(1)を変位  $u$  について解き、 $0 < t < 3.5$  (単位は秒) の間の理論解との誤差を図2に示す。前者は時間ステップを大きくとった場合も安定した値を得たが、後者は時間ステ

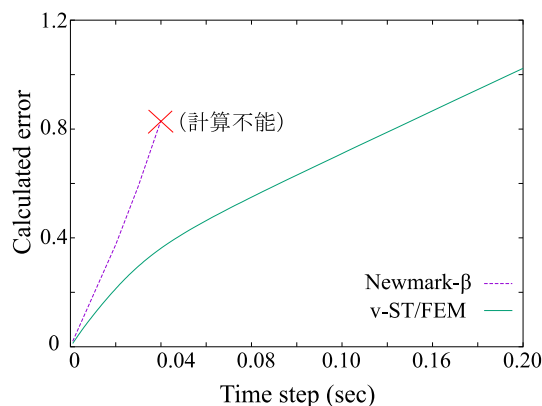


図2 非周期的部分における計算誤差

Fig. 2 Numerical error in non-periodic region

\* 京都大学大学院農学研究科 Graduate School of Agriculture, Kyoto University

\*\* NTC コンサルタンツ株式会社 NTC CONSULTANTS Co., LTD キーワード: 土構造物の地震時挙動

ップが 0.05 (s)以上では計算が破綻した。また、前者の方が常に小さな誤差となった。

## 2.2 周期領域における解析結果

時間ステップを大きくすると誤差も大きくなり、図 3 のように計算値は包絡線の外に出て発散する。計算値が包絡線の外に出るまでの波長数で両者を比較したところ、v-ST/FEM により計算できた波長数の方が大きくなった。v-ST/FEM による時間積分は、Soft spring 問題においても安定かつ高精度であることが確認できる。

## 3. ロックフィルダムの地震応答解析

図 4 に入力地震波、図 5 にダムゾーンニングと有限要素メッシュを示す。また、表 1 には各ゾーンの物性値をまとめる ( $\alpha$ ,  $c_k$  はそれぞれ内部摩擦角、粘着力から決まる材料パラメータ)。地震応答解析は v-ST/FEM にモールクーロン型の弾完全塑性モデルを導入して行った。図 6 はダム天端において計算された加速度応答を示す。弾塑性モデルを導入した非線形な地震応答解析が v-ST/FEM によって首尾よく行えることを確認した。

表 1 各ゾーンの物性値

ゾーン 区分	密度 ( $t/m^3$ )		弾塑性定数	
	湿潤	飽和	$\alpha$	$c_k$ (kPa)
①, ⑤	1.93	1.96	0.31	135.1
②, ⑥	2.27	2.35	0.34	120.9
③, ⑦	1.89	1.94	0.33	111.0
④, ⑧	2.13	2.25	0.36	169.9
基盤	1.76	-	-	-

## 4. まとめ

本論では Soft spring 問題を通して、非線形解析における v-ST/FEM の精度を確認した後、弾塑性構成則を導入したロックフィルダムの地震応答解析を実施した。v-ST/FEM は非線形な構成関係についても、時間方向に安定的かつ高精度な解析が可能であり、実際のロックフィルダムへの適用性も十分有することが確認できた。

参考文献 1) Sharma, V., Fujisawa, K. and Murakami, A. (2018) Velocity-based time discontinuous Galerkin space-time finite element method for elastodynamics, *Soils and Foundations*, Vol.58, pp. 491-510.

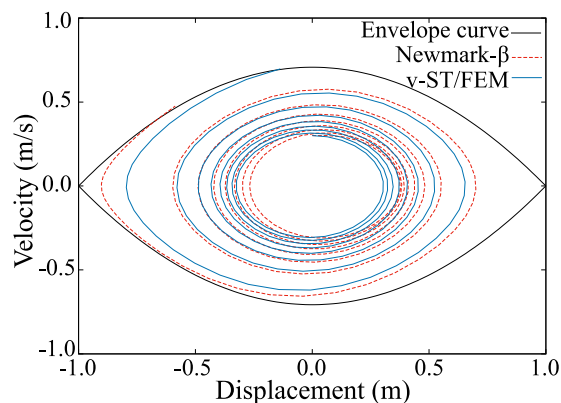


図 3 周期的部分の変位速度関係

Fig. 3 Displacement-velocity curve in periodic region

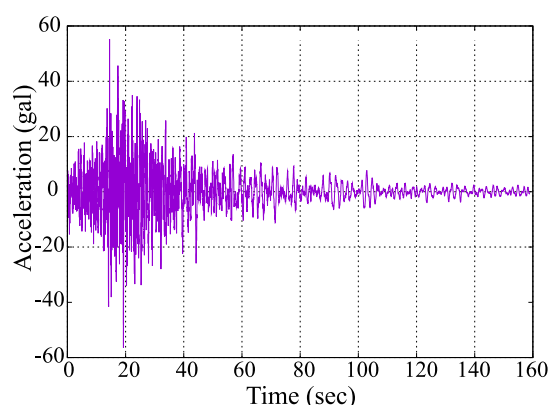


図 4 入力地震波

Fig. 4. Input seismic acceleration

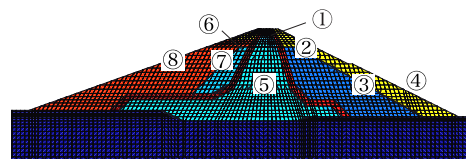


図 5 ダムのゾーンニングと FEM メッシュ

Fig. 5 Zoning and FEM mesh of dam

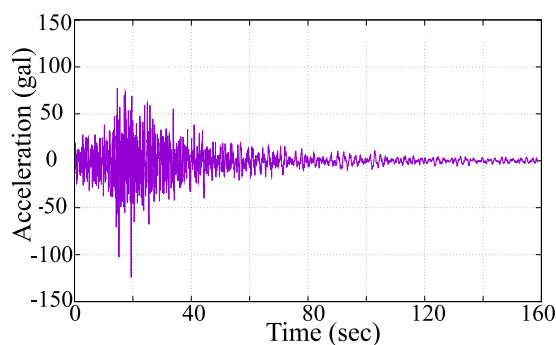


図 6 ダム天端における加速度応答

Fig. 6. Acceleration at dam crest