

断層-構造物系を考慮した大規模複雑構造物の地震時挙動想定に関する基礎研究

東京工業大学 正員 ○市村強
東京工業大学 学生会員 山木洋平
東京大学地震研究所 正員 堀宗朗

1. はじめに

重要構造物の地震時挙動を高精度かつ高分解能に予測することは防災の観点から重要と考えられる。構造物の地震時挙動には、断層の破壊過程、地殻内の波動伝播過程、地表近傍の地震波増幅過程、地盤と構造物の相互作用が大きな影響を与えるとされている。これらの影響を考慮し、高精度かつ高分解能に構造物の地震時挙動を予測するひとつの方法として、断層から構造物までを含む断層-構造物系の三次元数値解析モデルを構築し、一連の過程を一括して数値解析することが考えられる。しかし、10 [Hz] までの周波数成分の精度を保証するように離散化した場合、数値解析モデルの自由度は $10^{14\sim 15}$ ものオーダーとなる。さらに、地盤や構造物の非線形性や構造物の破壊過程までを考慮するとさらに計算量が膨大となり、その実現は難しいとされている。

一方、地震動解析及び構造解析の進歩は目覚しく、これらの成果を適切に組み合わせ、上記の実現を目指すことが考えられる。地震動解析及び構造解析を適切に組み合わせ断層-構造物系解析と等価とするには、如何に適切に断層-構造物系解析を地震動解析及び構造解析に分解するかが鍵となる。著者らは断層-構造物系解析と同様の問題である地震動解析に階層型解析を適用し、このような分解が可能か基礎検討を行い、良好な結果を得ている¹⁾。本論文では、階層型解析により地震動解析及び構造解析を組み合わせ、断層-構造物系を考慮した大規模複雑構造物の地震時挙動想定のための基礎検討を行う。

2. 解析手法

断層-構造物系を対象とし、以下を支配方程式として考える。

$$d_i(c_{ijkl}(\mathbf{x})d_l u_k(\mathbf{x}, t)) - \rho(\mathbf{x})\ddot{u}_j(\mathbf{x}, t) = 0. \quad (1)$$

ここで、 c_{ijkl} , u_j , ρ , $(\cdot)$, d_i , $\mathbf{x}$, t は各々、弾性テンソル, j 方向変位, 密度, 時間微分, j 方向の偏微分, 空間座標, 時刻を表す。本論文ではこの問題を一括し

て解く解析を直接解析と呼ぶ。次に、地盤構造と地殻構造の比程度の ϵ を用いて、 x_i に対して、緩やかに変化する座標 $X_i = \epsilon x_i$ を導入し、特異摂動を用いて、 $u_i(\mathbf{x}) \approx u_i^{(0)}(\mathbf{X}) + \epsilon u_i^{(1)}(\mathbf{X}, \mathbf{x}) + \dots$ と展開し、整理すると式 (1) は以下のように分解することができる。

$$\begin{cases} D_i(\bar{c}_{ijkl}(\mathbf{X})D_l u_k^{(0)}(\mathbf{X}, t)) + \bar{\rho}(\mathbf{X})\ddot{u}_j^{(0)}(\mathbf{X}, t) = 0, & (2a) \\ d_i(c_{ijkl}(\mathbf{x})(d_k u_l^{(1)}(\mathbf{X}, \mathbf{x}, t) + D_k u_k^{(0)}(\mathbf{X}, t)) \\ + \rho(\mathbf{x})(\epsilon \ddot{u}_j^{(1)}(\mathbf{X}, \mathbf{x}, t) + \ddot{u}_j^{(0)}(\mathbf{X}, t)) = 0. & (2b) \end{cases}$$

ここで、 $\bar{c}_{ijkl}$, $\bar{\rho}$ の定式化の詳細は¹⁾参照のこと。本手法の具体的な手順を以下に示す。

1. $\bar{c}_{ijkl}$, $\bar{\rho}$ を求め、式 (2a) を用いて断層から地表までの波動場 $u_i^{(0)}$ を求める (地震動解析に相当)。
2. 式 (2b) を用いて構造物近傍の解析領域において $u_i^{(1)}$ を求める (構造解析に相当)。
3. 近似解 $u_i \approx u_i^{(0)} + \epsilon u_i^{(1)}$ を求める。

断層-構造物系をこのように分解することで、地震動解析及び構造解析を適切に組み合わせ、断層-構造物系を考慮した大規模複雑構造物の地震時挙動解析が可能となると期待される。

3. 数値検証

本手法の精度を検証するため、直接解析の結果 (u_i) と本手法の結果 ($u_i^{(0)} + \epsilon u_i^{(1)}$) を比較する。但し、直接解析による断層-構造物系の解析は難しいため、理学基盤以浅のみを対象としたモデルとする。図-1-a) に解析対象モデルを示す。モデルは bedrock, basement, soil の三層からなり、領域中央には、図-1-b) に示す RC 製の大規模立坑がある。立坑の上面側には厚さ 22 m の soil がある。物性を表-1 に示す。ここで、 V_p , V_s , ρ , h は縦波速度, 横波速度, 密度, 減衰定数である。中心周波数 1 Hz, 中心時間 2 sec, 20.48 sec 間のリッカー波を領域下面から平面波として一様に入力した。解析対象領域の側面及び底面に半無限吸収境界を適用し半無限性を表現している。階層型解析に基づき図-2 に示すモデルを構築した。

Key Words: seismic response, fault-structure system, multi-scale analysis, large-scale problem

〒152-0033 東京都目黒区大岡山 2-12-1

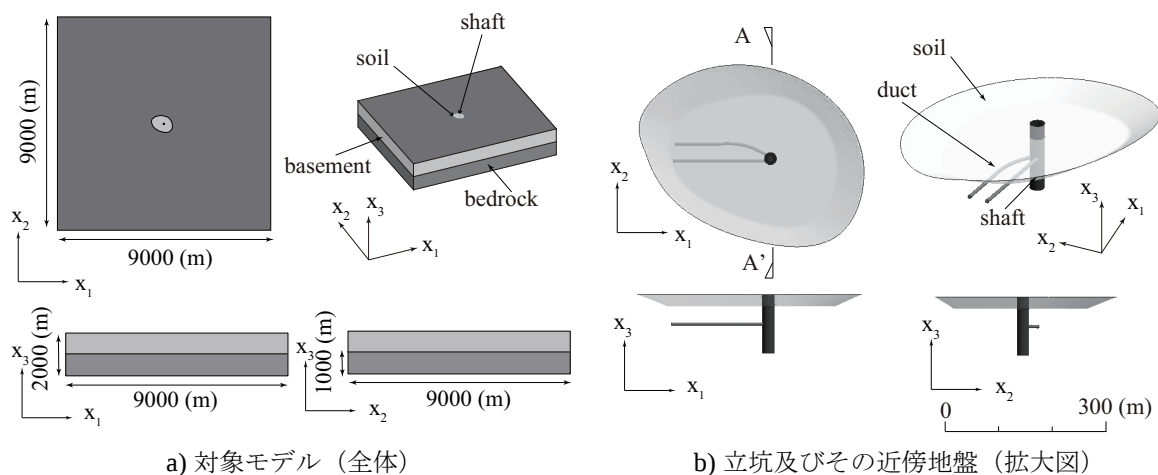


図-1 数値検証用モデル

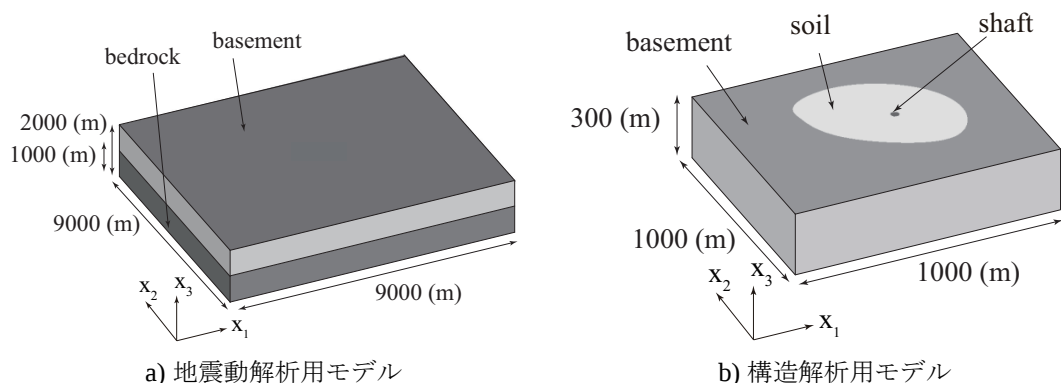


図-2 本手法用の各モデル.

表-1 材料物性

	V_p [m/s]	V_s [m/s]	ρ [tf/m ³]	h
soil	300	100	1.7	0.15
basement	1260	600	1.8	0.04
bedrock	2950	1700	2.0	0.005
RC	3373	2127	2.5	0.005

直接解析, 本手法ともに, 空間方向の離散化に有限要素法を, 時間方向の離散化にニューマークの β 法を適用し離散化する. 計算対象周波数を $0 \sim 2$ [Hz] とし, 一波長当たり 15 要素以上を用いて要素を生成した. また, 計算時間刻みを 0.01 [sec] とした. 立坑上に設定した観測点上の波形を図-3 に示す. 地表面に近づくにつれて応答が大きくなっている. 特に, soil 層中で 1 [Hz] 付近の応答が大きくなっており, 複雑な応答を示している. また, 図-3 に示すように, 直接解析と本手法の結果は良く一致しており, 本手法の有効性が示されている.

4. まとめ

本論文では, 地震動解析及び構造解析を階層型解析により適切に組み合わせ, 断層-構造物系を考慮した大規模複雑構造物の地震時挙動解析を行う手法を提案した. 数値実験により直接解析と本手法の結果

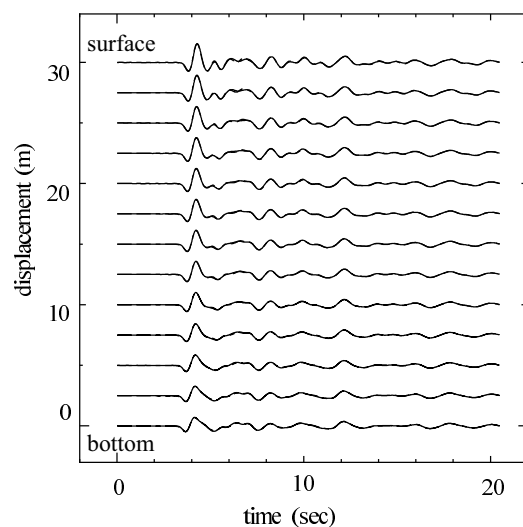


図-3 直接解析による結果(実線)と本手法による結果(破線)の比較: 立坑底面から地表面へ向けて立坑上に 10 m 間隔で設けた観測点上の x_2 方向の応答波形.

を比較し, その結果が良く一致することを示した. 今後は, 南海地震などのシナリオ地震を対象とし, 大規模複雑構造物の地震時挙動解析を行う予定である.

参考文献

- 1) Ichimura T., Hori M. and Kuwamoto H. : Earthquake Motion Simulation with Multi-scale Finite Element Analysis on a Hybrid Grid, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 97, No. 4, pp. 1133-1143, 2007.