

階層型解析による断層-構造物系を考慮した 構造物の地震時挙動予測手法

On Analysis Method employing Multiscale Analysis
for Seismic Structural Response based on Fault-Structure System

市村強*・山木洋平**・堀宗朗***

Tsuyoshi ICHIMURA, Yohei YAMAKI and Mueno HORI

*正会員 博工 東京工業大学大学院准教授 理工学研究科土木工学専攻 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

**正会員 修工 東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

***正会員 Ph.D 東京大学教授 地震研究所 (〒113-0032 東京都文京区 1-1-1)

Structural safety for earthquake waves emitted by a nearby fault is a major concern in Japan. For high accurate estimation on seismic structural response, it might be desired to estimate its seismic response by analyzing a *fault-structure system*: a full three-dimensional model in which a source fault and a target structure are modeled so that fault processes, wave propagation and amplification processes, and resulting dynamic responses of the structure can be computed numerically. To analyze this fault-structure system, this paper presents a proposal of an efficient approach based on multiscale analysis and examination of the validity of the proposed approach. Discussions are presented to describe the usefulness and applicability of the proposed approach to estimate the seismic structural response.

Key Words : seismic structural response, fault-structure system, multiscale analysis

1. はじめに

原子力発電所、石油備蓄基地、長大橋などの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方法のひとつとして、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(図-1)を構築し、一連の過程の数値解析を行うことが考えられる。しかし、対象となる領域が $10^4 \sim 5 \times 10^4 \sim 10^4 \sim 5$ (m) であり、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、分解能が $10^{-1} \sim 1$ (m) となるため、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。計算機環境の進歩に伴い、断層から地表面までを対象とした地震動解析(例えば^{1),2)})及び構造物近傍を対象とした構造物解析(例えば^{3),4)})において、大規模問題が解析されているが、断層-構造物系を対象とした解析は未だ難しい。

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、計算量の軽減を図り、その有効性を示している⁵⁾。本論文では、階層型解析により断層-構造物系解析の計算量の軽減を図り、断層-構

造物系を考慮した構造物の地震時挙動解析のための検討を行い、その適用例を示す。

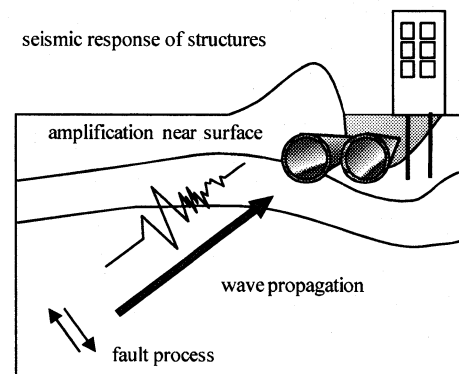


図-1 断層-構造物系モデル。

2. 解析手法

本節では、著者らが提案している階層型解析の定式化の概略を示す(詳細は⁵⁾参照)。まず、図-1に示す断層-構造物系を対象として動的解析を行うとする。簡単のため、解析対象を線形弾性体であると仮定し、以下を支配方程式として考える。

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

ここで、 c_{ijkl} , u_j , ρ , $(\cdot)$, d_i , 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直接解析を直接解析と呼ぶ。次に、地盤構造と地殻構造の不均質性の比程度の ϵ を用いて、 x_i に対して緩やか

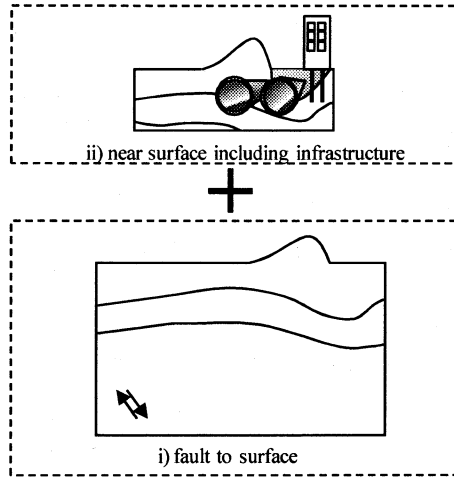


図-2 階層型解析により分解された断層-構造物系モデル。

に変化する座標 $X_i = \epsilon x_i$ を導入し、特異摂動により、 $u_i(\mathbf{x}) \approx u_i^{(0)}(\mathbf{X}) + \epsilon u_i^{(1)}(\mathbf{X}, \mathbf{x}) + \dots$ 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、 $\bar{\rho}$ は $\mathbf{X}$ まわりの小領域 $\Omega_{\mathbf{X}}$ での ρ の平均、また、

$$\bar{c}_{ijkl}(\mathbf{X}) = \langle c_{ijpq}(\mathbf{x})(d_q \chi_{pkl}(\mathbf{X}, \mathbf{x}) + I_{pqkl}) \rangle. \quad (3)$$

$\langle (\cdot) \rangle$ は $(\cdot)$ の $\Omega_{\mathbf{X}}$ 上での体積平均、 I_{ijkl} は 4 次の対称テンソルである。 χ_{ijk} は一様ひずみ境界条件及び一様応力境界条件とした以下の式の解として与えられる。

$$d_i(c_{ijkl}(\mathbf{x})(d_l \chi_{kpq}^{(1)}(\mathbf{X}, \mathbf{x}) + I_{klpq})) = 0. \quad (4)$$

一様ひずみ境界条件と一様応力境界条件から求められる $\bar{c}_{ijkl}$ を各々 $\bar{c}_{ijkl}^E$ と $\bar{c}_{ijkl}^\Sigma$ とする。この時、 $\bar{c}_{ijkl}^E$ と $\bar{c}_{ijkl}^\Sigma$ を用いて各々得られる近似解 $u_i^{(0)} + \epsilon u_i^{(1)}$ は u_i を挟み込むと期待される⁵⁾。

階層型解析の具体的な手順を以下に示す。

1. $\bar{c}_{ijkl}^{E, \Sigma}$ を求め、式 (2a) を用いて図-2-i) に示す断層から地表までの波動場 $u_i^{(0)}$ を求める。これをマクロ解析と呼ぶこととする。
2. 式 (2b) を用いて図-2-ii) に示す構造物近傍の解析領域において $u_i^{(1)}$ を求める。これをミクロ解析と呼ぶこととする。
3. 構造物近傍の近似解 $u_i \approx u_i^{(0)} + \epsilon u_i^{(1)}$ を求める。

図-1 を図-2 のようにに分けることにより、計算量を抑えつつ、断層-構造物系を考慮した構造物の地震時挙動解析が可能となると期待される。

3. 数値実験

3.1 数値検証

本提案手法の精度を検証するため、三次元地震応答解析を行い、直接解析の結果 (u_i) と本提案手法の結

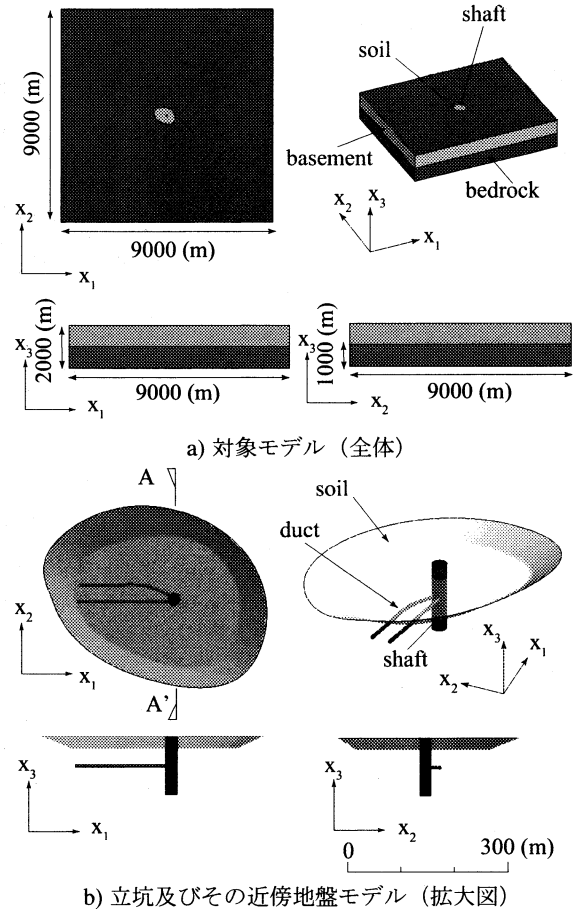


図-3 数値検証用モデル

表-1 数値検証用モデルの材料物性

	$V_p(\text{m/s})$	$V_s(\text{m/s})$	$\rho(\text{tf/m}^3)$	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

果 ($u_i^{(0)} + \epsilon u_i^{(1)}$) を比較する。但し、断層-構造物系の直接解析は難しいため、理学基盤で浅のみを対象とした $9000 \times 9000 \times 2000$ (m) の領域を対象とし、断層からの地震波を平面波として入射する。図-3-a) に解析対象モデルを示す。モデルはおおよそ各 1000 (m) の厚さの bedrock, basement の二層からなる。また、中央部には、複雑な形状を持つ soil 層がある。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。領域中央には、図-3-b) に示す実際に施工された立坑を参考に構築した半径 22.4 (m)、高さ 99 (m) の RC 製の大規模立坑モデルがある。立坑の上面側は厚さ 22 (m) の soil 層にあり、下面側は basement 層内にある。立坑は、剛性の異なる basement 層から soil 層へ貫いて構築されており、複雑な地震時挙動を示すと懸念される。立坑側面には、半径 5.2 (m) 長さ 170 (m) の緩やかに曲率を持つ二本の地下トンネルが設置されている。簡単のため、以下、全ての挙動は線形と仮定する。物性を表-1 に示す。ここで、 V_p, V_s, ρ, h は縦波速

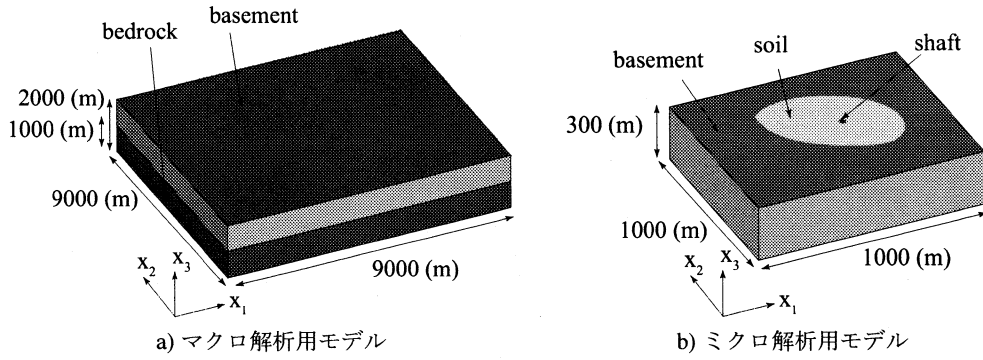


図-4 階層型解析用の各モデル.

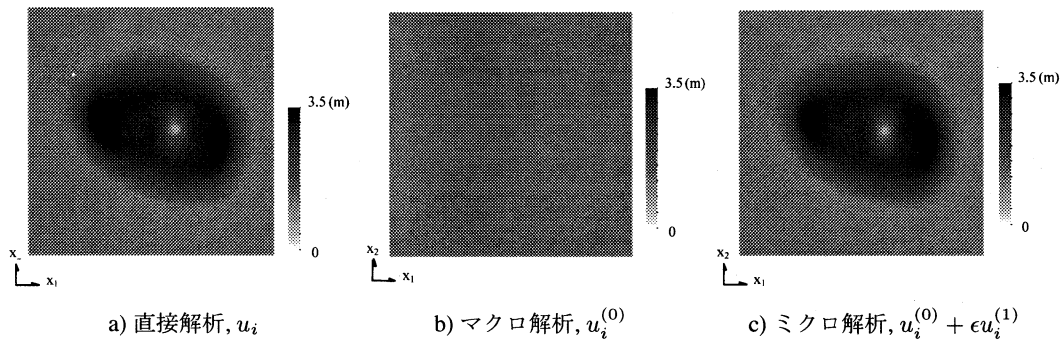


図-5 地表面における地震動の最大変位分布.

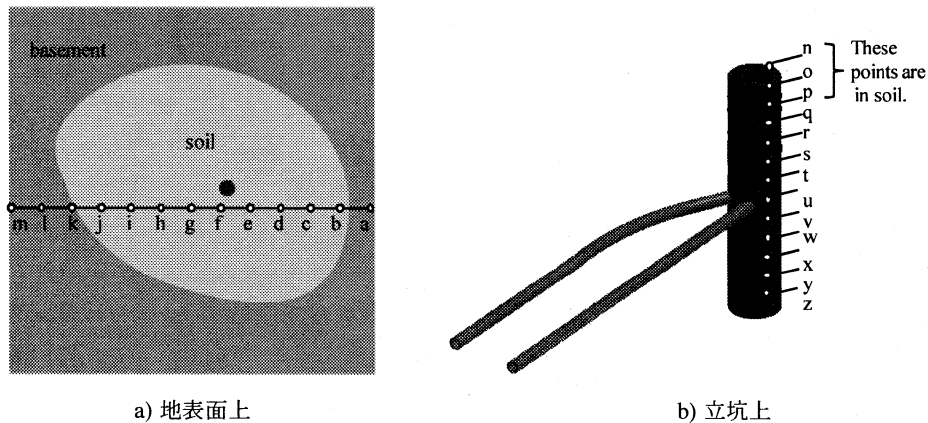


図-6 観測点の位置.

度, 横波速度, 密度, 減衰定数である. 断層からの波を模擬するため, 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 x_2 方向に平面波として一様に入力した. なお, リッカー波はこのような試験的な地震応答計算の際に標準的に用いられる波である.

次に階層型解析について説明する. 階層型解析に基づき図-4 に示すマクロ解析用モデルとミクロ解析用モデルを構築した. マクロ解析モデルの大きさは元のモデルの大きさと同じであるが, 式 (2a) で用いる $\bar{c}_{ijkl}^{E,\Sigma}$ を求める必要がある. ミクロ解析領域を十分大きく取った場合, 構造物及び表層を c_{ijkl} から取り除いた $\hat{c}_{ijkl}$ と $\bar{c}_{ijkl}^{E,\Sigma}$ の差が十分小さくなることが式 (3)(4) から期待される. このモデルでは $\bar{c}_{ijkl}^{E,\Sigma}$ と $\hat{c}_{ijkl}$ の差が十分小さいので, $\bar{c}_{ijkl}^{E,\Sigma}$ の代わりに $\hat{c}_{ijkl}$ を用いてマクロ解析を

行った. ミクロ解析モデルは, 構造物・地表面近傍の $1000 \times 1000 \times 300$ (m) の領域とした.

構造物の複雑な幾何形状のモデル化が必要であり, また, 時間積分に陽解法を用いるとクーラン条件が非常に厳しくなる. そのため, 空間方向の離散化には有限要素法, 時間積分にはニューマークのベータ法 ($\delta = 1/2$, $\beta = 1/4$) を適用する. 式 (1), (2a) 及び (2b) を上記設定で離散化すると, いずれも

$$\begin{aligned} & \left(\mathbf{K} + \frac{2}{\delta t} \mathbf{C} + \frac{4}{\delta t^2} \mathbf{M} \right) \mathbf{u}^{n+1} \\ &= \left(\frac{2}{\delta t} \mathbf{C} + \frac{4}{\delta t^2} \mathbf{M} \right) \mathbf{u}^n + \left(\mathbf{C} + \frac{4}{\delta t} \mathbf{M} \right) \mathbf{v}^n + \mathbf{M} \mathbf{a}^n, \end{aligned}$$

となる. ここで, $\mathbf{K}$, $\mathbf{M}$, $\mathbf{C}$, $\mathbf{u}$, $\mathbf{v}$, $\mathbf{a}$, δt , 右肩の添え字 n は, 全体剛性マトリクス, 集中質量マトリクス, 減衰マトリクス, 変位ベクトル, 速度ベクトル, 加速

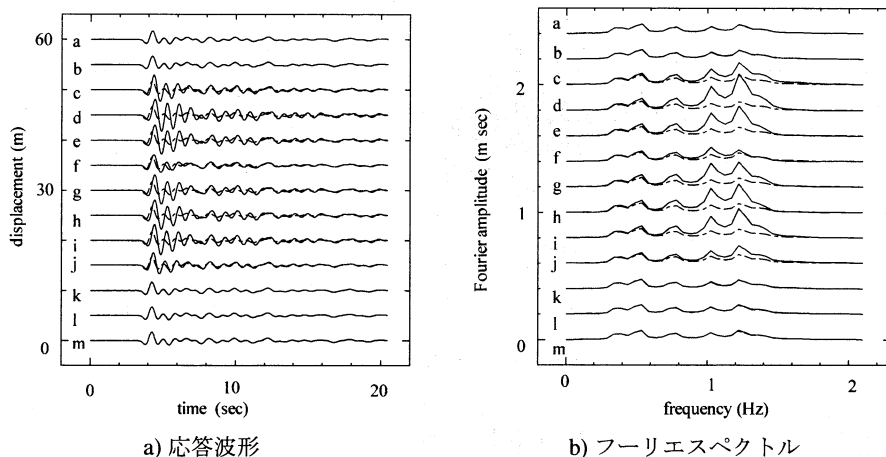


図-7 観測点 a-m における x_2 成分の結果の比較：マクロ解析, $u_i^{(0)}$, (破線) と直接解析, u_i , (実線)。

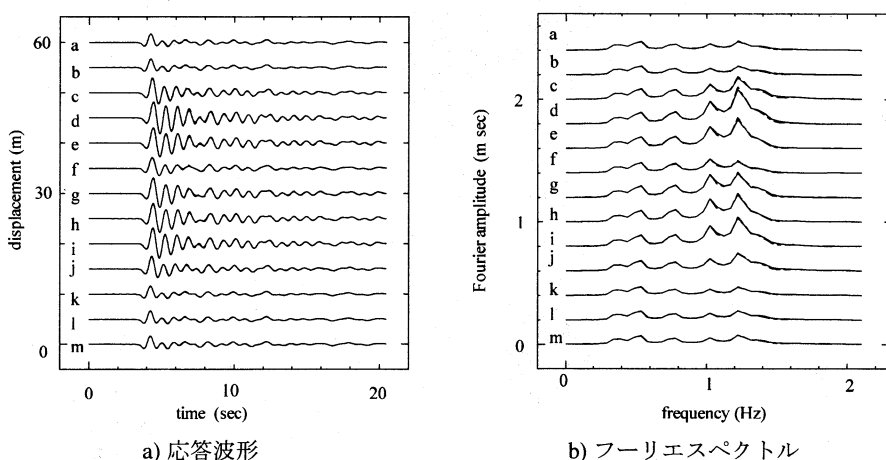


図-8 観測点 a-m における x_2 成分の結果の比較：ミクロ解析, $u_i^{(0)} + \epsilon u_i^{(1)}$, (破線) と直接解析, u_i , (実線)。

度ベクトル, 時間刻み幅, 時間ステップ数を表す。なお, $C = \alpha M + \beta K$ とし, 表-1 に示す減衰定数を解析対象周波数帯で精度良く表せる様, 最小二乗法により要素毎に α, β を求めた。なお, 解析対象周波数帯は 0 ~ 2 (Hz) とし, 1 波長を 15 要素以上で分割するように要素を生成した。この結果, 生成された要素は 0.5 ~ 40 (m) 程度の大きさとなった。以下の計算結果では, 台形バンドパスフィルタにより解析対象周波数帯以外の周波数成分を取り除いている。また, $\delta t = 0.01$ (sec) とした。計算コストを削減する為に, 波動場数値解析には前処理付共役勾配法と構造・非構造格子を組み合わせた Element-By-Element 有限要素法⁵⁾を用いた。なお, 対角項の逆数からなる前処理行列を適用した。

まず, 地表面における地震動分布について考察する。soil 層近傍の地表面での最大変位分布を図-5 に示す; a) は直接解析の結果, b) と c) はマクロ解析とミクロ解析の結果である。直接解析の結果から, soil 層において地震動が大きく増幅されていることが分かる。マクロ解析では, この増幅は全くあらわれていないが, ミクロ解析ではマクロ解析の結果が適切に補正され直接解析と同様の結果が得られていることが分かる。次に,

より詳細に地震動を考察するため, 地表面上に 12 の観測点を設置し, その波形及びフーリエスペクトルを比較した; a-m で表されるこれらの観測点は, 等間隔に soil 層を横切るように設置されている (図-6-a) 参照)。これらの観測点上の波形とそのフーリエスペクトルを図-7 及び図-8 に示し, 直接解析, マクロ解析, ミクロ解析の結果を比較する; 実線は直接解析, 破線はマクロ解析及びミクロ解析を示している。ミクロ解析は直接解析と同様の波形及びそのフーリエスペクトルを 12 の観測点で再現していることが分かる。マクロ解析と直接解析の結果は, 0.5Hz 以下の長周期成分ではよく一致しているものの, それ以上の短周期成分では差が大きくなっている。これは, マクロ解析では短周期成分に寄与する微細な構造が取り除かれていることによる。一方, ミクロ解析において, 微細な構造の影響が適切に付与されており直接解析の結果とよく一致していることが分かる。特に, 図-5-a) と同様に直接解析は, soil 層内の観測点 j-c で大きく増幅されているが, このような局所的な増幅についてもミクロ解析は精度良く解析出来ることが分かる。

次に, 立坑の地震時挙動について考察する。対象構

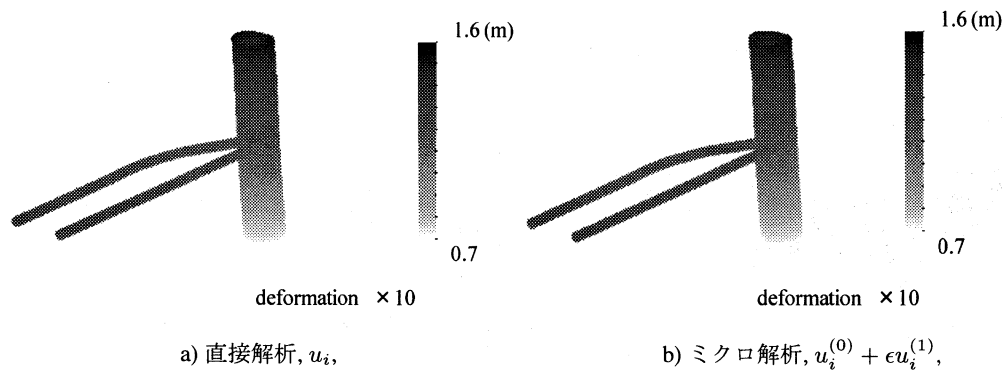


図-9 立坑の最大変形とその変形量の分布.

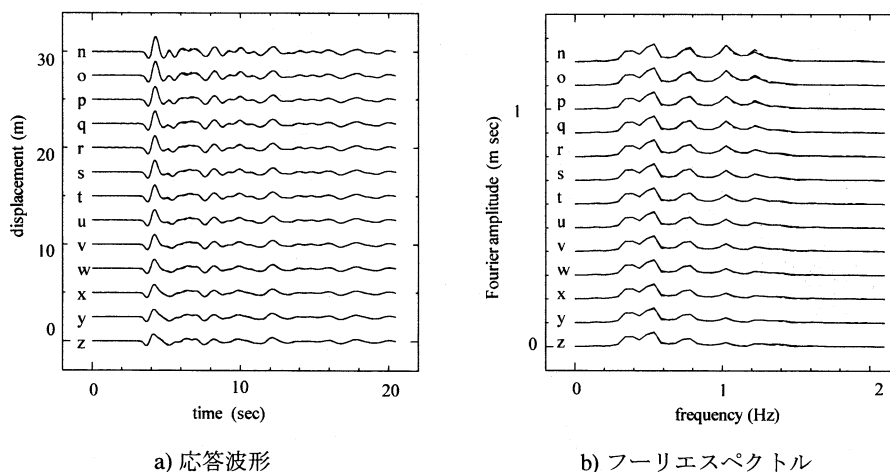


図-10 観測点 n-z における x_2 成分の結果の比較：ミクロ解析, $u_i^{(0)} + \epsilon u_i^{(1)}$, (破線) と直接解析, u_i , (実線)。

造物である立坑は basement 層から soil 層までを貫いており、これらの層境を中心として複雑な挙動を示すことが懸念される。図-9に、最大変形を最大変位量のコンターと共に示す；a) は直接解析の結果、b) は階層型解析の結果を示している。ここで示されているように、soil 層内にある立坑は、地盤と構造物の相互作用により大きな変形を示していることが分かる。また、soil 層と basement 層の層境における明瞭な挙動の変化も階層型解析により良好に解析されていることが分かる。次に、図-6-b) に示す立坑上に等間隔に設定された n-z の 12 観測点上での波形及びフーリエスペクトルから立坑の挙動を考察する。図-10に、観測点上の波形とそのフーリエスペクトルを示す。basement 層内の観測点 q-z ではほぼ同様の挙動をしているが、soil 層内の観測点 n-p において 1~1.4 (Hz) の周波数成分が大きく増幅されていることが分かる。これは basement 層と soil 層のインピーダンスコントラスト比が高いためであり、当該周波数成分の地震動が大きく増幅され、これらの層の境で立坑の挙動は大きく変化している。このように構造物の応答が地表面近傍で大きく変化しているにも関わらず本提案手法は直接解析の結果と同様の結果を得ることが出来ていることが分かる。

階層型解析で必要とされる計算量 (式 (2a) 及び式 (2b) の計算量) は、直接解析で必要とされる計算量 (式 (1)

の計算量) に比べ、一般に十分少ないと期待される。以上から、計算量を軽減しながらも階層型解析は直接解析による地震動解析や構造物応答解析の結果を良好に再現可能である事が分かる。

3.2 適用例

提案手法により、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。対象構造物は、図-11a) に示す 4 層からなる地盤中の地下高速道路の本線及び本線と地上を繋ぐサイドラプトンネルである (図-11b)c)。サイドラプトンネルの周辺には数値検証例の立坑周辺と同様に柔らかい soil 層がある。各物性を表-2 に示す。想定地震として、strike, dip, rake が各々 $0, \pi/2, 0$ 、モーメントが 5×10^{17} (Nm)、ライズタイム 0.5 (sec) の一次の震源関数を持つダブルカップルによる点震源を考える (震源位置は図-12a) 参照)。前節と同様に、直接解析と同じ大きさの領域で $\hat{c}_{ijkl}$ なるマクロ解析用モデルを構築した。また、ミクロ解析領域は、構造物近傍の $x_1 \times x_2 \times x_3 = 5984 \times 1792 \times 208$ (m) とした。解析対象周波数帯を 0~2 (Hz) とし、前述の数値検証と同様に離散化を行い (要素サイズ 0.5 (m) ~), 時間刻みを 0.004 (sec) として 65.536 秒間の動的応答を数値解析した。震源から放射された波は、マクロ解析ではほぼ一様に伝播するが、ミクロ解析の適切

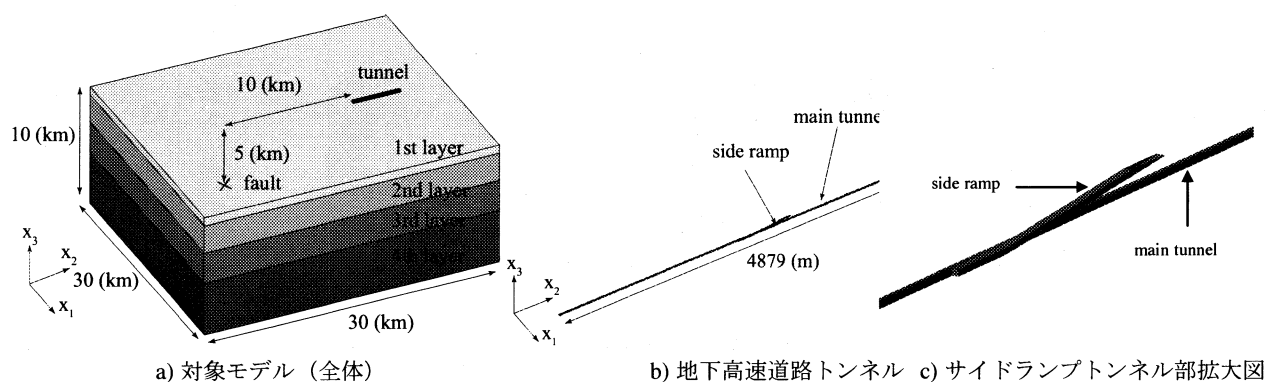


図-11 大規模地下高速道路トンネルを対象とした断層-構造物系の三次元数値解析モデル。

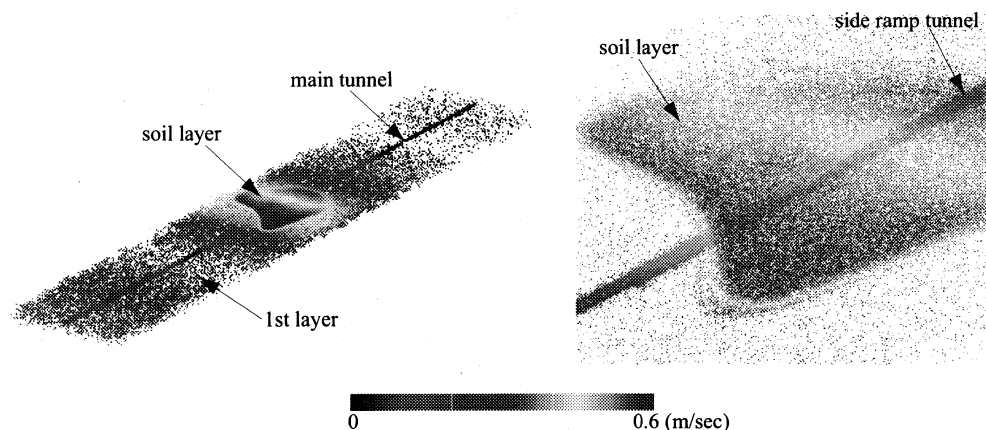


図-12 断層破壊開始後 6.8 秒後の構造物近傍の速度ベクトル分布とそのコンター図：左図ミクロ解析領域（全体），右図サイドランプトンネルと soil 層近傍（拡大図）。

表-2 適用例モデルの材料物性。

	V_p (m/s)	V_s (m/s)	ρ (tf/m ³)	h
soil	300	100	1.7	0.06
1st layer	1800	500	2.0	0.03
2st layer	2560	1000	2.2	0.02
3st layer	3200	1700	2.3	0.001
4st layer	5800	3360	2.7	0.001
RC	3373	2127	2.5	0.001

な補正により soil 層の三次元形状を踏まえ複雑に増幅されていることが分かる（図-12）。また、この複雑な増幅は前述の立坑のような複雑な構造物応答をもたらす。このように本提案手法を用いることで、断層-構造物系の三次元数値解析モデルの数値解析を行い、想定地震に対する複雑な構造物の挙動予測が可能となると期待される。

4. まとめ

本論文では、階層型解析による断層-構造物系を考慮した構造物の地震時挙動予測手法を提案した。大規模立坑モデルを用いた数値実験により直接解析と階層型解析の結果を比較し、その結果が良好に一致することを示した。更に、想定地震に対する大規模地下高速道路トンネルの地震時挙動解析を行い、本提案手法の有効性を示した。今回の解析では点震源を用いたが、拡がりを持った断層モデルの本手法への組み込みも可能

であり（例えば、境界要素法の組み込み、点震源の重ね合わせなど）、大規模シナリオ地震も取り扱うことができる。今後は、南海地震などの大規模シナリオ地震を対象とした重要構造物の地震時挙動解析への適用が期待される。

参考文献

- 1) Furumura, T. Large-scale parallel simulation of seismic wave propagation and strong ground motions for past and future earthquakes in Japan. *Journal of the Earth Simulator*, Vol.3, pp.29-38, 2005.
- 2) Ma, S., Liu, P. Modeling of the perfectly matched layer absorbing boundaries and intrinsic attenuation in explicit finite-element methods. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.96, pp.1779-1794, 2006.
- 3) Oginio, M., Shioya, R., Kawai, H., Yoshimura, S. Seismic Response Analysis of Nuclear Pressure Vessel Model with ADVENTURE System on the Earth Simulator. *Journal of the Earth Simulator*, Vol.2, pp.41-54, 2005.
- 4) Dobashi, H., Ochiai, E., Ichimura, T., Yamaki, Y., Hori, M., Yamada, T., Ohbo, N., Moriguchi, M. 3D FE Analysis for Seismic Response of Complicated Large-Scale Ramp Tunnel Structure. *ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering* 2007.
- 5) Ichimura, T., Hori, M., Kuwamoto, H. Earthquake Motion Simulation with Multiscale Finite Element Analysis on a Hybrid Grid. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.97, pp.1133-1143, 2007.

(2008 年 4 月 14 日 受付)