

機関番号：12601
 研究種目：若手研究（B）
 研究期間：2008～2010
 課題番号：20760300
 研究課題名（和文）大規模複雑構造物系の地震時挙動予測手法の高度化
 研究課題名（英文）Seismic Structural Analysis Method for Large-scale Structure
 研究代表者
 市村 強 (Tsuyoshi Ichimura)
 東京大学・地震研究所・准教授
 研究者番号：20333833

研究成果の概要（和文）：

構造物の地震時挙動は断層構造物系（断層の破壊過程，地殻内波動伝播，地表付近での増幅，地盤と構造物の相互作用）に起因する地震動の時空間の分布に影響される．このような地震時挙動を高い精度・分解能で評価するため，階層型解析に基づく新しい解析手法を提案し，小規模問題を用いて数値検証を行った．しかしながら，断層構造物系の三次元モデルを構築し，その挙動を数値シミュレーションするためには膨大な計算資源が必要とされ，階層型解析に基づく新しい解析手法の適用は難しかった．この課題解決のため，計算コストを軽減した有限要素法プログラムを開発し，また，グリーン関数と比較することによりその精度検証を行った．最後にこれらの手法を統合することにより，シナリオ地震時の大規模複雑構造物の地震時挙動を想定し，本手法の有効性を示した．

研究成果の概要（英文）：

Seismic structural response is affected by temporal and spatial variation of strong ground motion, which is caused by fault-structure system: fault mechanism, wave propagation through the crust, the amplification near the ground surface and the soil-structure interaction. In order to estimate such seismic structural response with high resolution and high accuracy, we propose a new analysis method based on multi-scale analyses and numerically verify its validity using small problem. Since the computation cost of construction of 3-D numerical model for large-scale problem including structure and solving the discretized governing equation is extremely huge, we cannot conduct numerical simulation based on fault-structure system with actual setting. Thus, we also develop a new method to resolve these difficulties. The accuracy of our method is verified by the comparison with Green's function solution, and seismic response of large-scale complex structure in given earthquake scenario is estimated based on fault-structure system to present its potential usefulness.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2009年度	900,000	270,000	1,170,000
2010年度	800,000	240,000	1,040,000
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：構造工学・地震工学・維持管理工学

科研費の分科・細目：構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：構造物の地震時挙動・階層型解析・有限要素法・断層・構造物系

1. 研究開始当初の背景

世界有数の地震工学の知見をわが国は有しており、構造物の地震時挙動推定技術も高いレベルにある。一方、構造物の大規模化・複雑化・輻輳化、既存施設の老朽化などによる大地震に対する新たな脆弱性が懸念されており、構造物の地震時挙動推定技術のより一層の高度化が重要と指摘されている。

2. 研究の目的

上記を踏まえ、「大規模・複雑な既存・新設構造物及び構造物群の地震時挙動推定手法の高度化」を本研究の目的とする。具体的には、断層の破壊過程設定（シナリオ）、地殻・地盤の三次元モデル、構造物の三次元モデルを用いて、以下を可能とする数値振動台の基盤技術を開発する。

- ・断層から構造物までの三次元数値解析用モデルを計算機上に構築し、
- ・断層の破壊過程・地殻内の地震波伝播・地表近傍の地震波増幅・複雑な構造物の動的挙動の一連の過程を高い精度で数値解析する

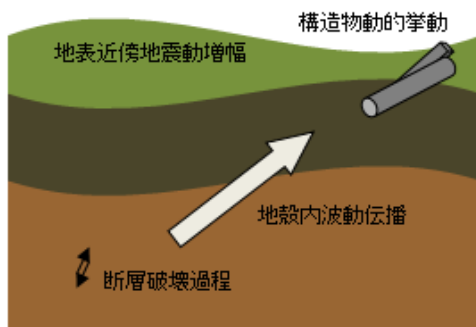


図 1：断層から構造物までを含んだ三次元数値解析モデル。

「断層から構造物までを含んだ三次元数値解析モデルを構築し、三次元数値解析を行う」という着想は以前からあった。しかし、対象領域の大きさは $10^4 \sim 10^5 \text{m}$ オーダー、構造物の分解能は $10^1 \sim 10^1 \text{m}$ オーダーであり、この三次元数値解析を行うには膨大な計算量が必要とされ、地球シミュレータやペタフロップスマシン計算機をもってしても実現が難しいとされる。また、数値解析用三次元モデルの構築も難しい。そのため、国の内外を問わず、二次元解析を用いるなど様々な工夫に基づく近似解析がなされている。しかしながら、大規模・複雑な輻輳した構造物では、地震動の位相差により構造物の各点に入力される地震動の違いが顕著となり、また、複雑な形状をもつため地震時挙動は非常に複雑である。地盤構造、構造物の形式によっては従来の近似解析により十分高い精度で地震時挙動を推定することもできるが、場合によっては、従来法では評価が難しい場合もある。そのため、従来法では想定が難しい深刻な被

害が生じる恐れがある。

一方で、「断層から構造物までを含んだ三次元数値解析モデルを構築し、三次元数値解析を行う」を可能とする条件が整いつつある。近年の地下構造探査による地下構造モデル研究の進展、これを踏まえたシナリオ地震に対する地震動予測研究の進展、大規模構造物の動的解析技術などの近年の地震工学・地震学の新たな知見、ペタフロップスマシンを踏まえた計算機環境の著しい進展、さらに関連する計算工学や応用力学や情報工学などの進展などである。

3. 研究の方法

本研究の目的を達成する上での研究課題は、

- (1) 階層型解析による計算量軽減、
- (2) 階層型解析を実行するための大規模波動場解析手法の開発、
- (3) 地表近傍の地盤-構造物系解析手法の開発、

(1) 階層型解析による計算量軽減
膨大な計算量を軽減するため、特異摂動に基づく階層型解析の考え方を採用し、図 1 を図 2 のように分解して解析する。この際、図 1 による結果と図 2 による結果が十分な精度で一致することが最も重要である。断層から構造物までの小規模三次元モデルを構築し、断層から構造物の一括解析を行う。その結果と階層型解析手法による結果を比較し、本手法の検証を行った。理論的な検討と平行して数値実験を行いながら、適切な分解の条件を検討した。

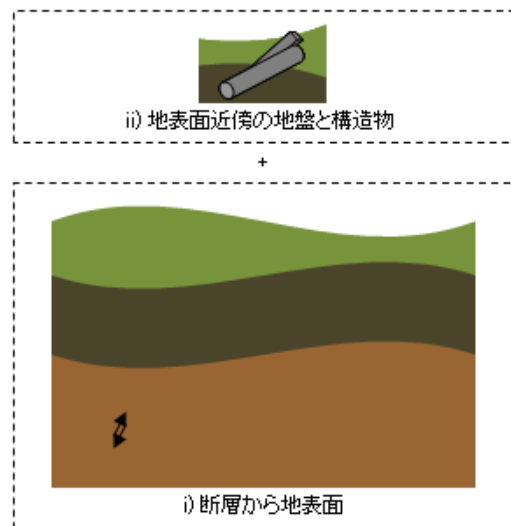


図 2：階層型解析により分解された、断層-構造物系の数値解析モデル。

- (2) 階層型解析を実行するための大規模波動場解析手法の開発

階層型解析により分解された 3 次元数値解析モデル内での波動場を数値解析する手法を開発する。階層型解析により計算量を軽減したものの未だ膨大な計算量が残っている

ため、有限要素法に基づく大規模波動場解析手法を開発する。地表面形状の無視などの幾何形状近似を行うと階層型解析の結果の精度が悪化することが準備研究より分かっている。そのため、幾何形状近似を行わず三次元地盤・地殻構造をモデル化できる手法を開発する。有限要素法で用いる数値解析用モデルを構築するにはどのように要素を生成するかが重要となる。構造格子に基づけば、簡単に要素を生成できるが幾何形状の近似が大きいため、精度が悪化することが懸念される。一方で、非構造要素を生成するには計算コストがかかりすぎる。ここでは、両者をハイブリッドした構造・非構造格子を用いたモデル化手法を開発した。この手法によれば、幾何形状の近似なしに計算コストを抑えることが出来、十分高い精度で波動場の計算ができる。

(3) 地盤-構造物系解析手法の開発
階層型解析により切り離された図 2-ii) に示す「地表面近傍の地盤と構造物」を数値解析する手法を開発する。階層型解析により計算量を軽減したものの未だ膨大な計算量が残っているため、有限要素法に基づく動的解析手法を開発する。地盤-構造物系を有限要素法による離散化を行うと 10^6 要素・ 10^6 節点程度以上の問題となる。これを解くために、element by element 法及び反復解法の一つである前処理共役勾配法を適切に組み合わせることにより必要メモリ量を激減させ、通常の PC 一台のみで解析できるようにしている。また、地盤と構造物のインピーダンスコントラスト比が非常に強いため、反復解法の収束性が悪化し反復数が非常に多く必要とされるという課題が残っていたため、これを解決し、更なる大規模問題も解析可能とした。

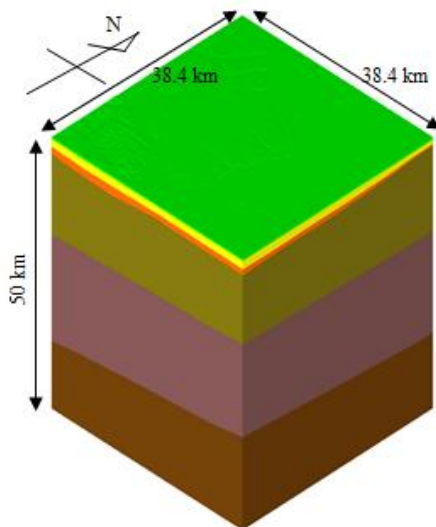


図 3：開発手法により構築した関東地方の地殻構造の三次元数値解析モデル

4. 研究成果

上記により、所与の目的を十分に達成し、現

実的な設定で、断層-構造物系の三次元数値解析モデルを構築し、シナリオ地震時の構造物の挙動想定手法を構築することが出来た。結果の一部を図 4～6 に示す。今後は、より高周波領域への拡張、非線形性の導入などが必要とされる。

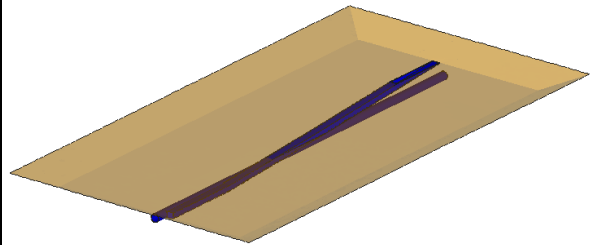


図 5：提案手法の適用性を検討した対象構造物（工学的基盤面と地下高速道路トンネルランプトンネル（全長 700m））

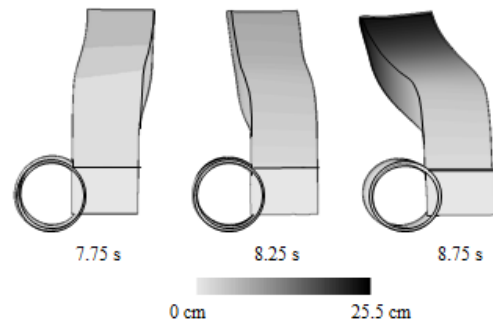


図 6：提案手法により推定されたシナリオ地震時の地下高速道路トンネルの挙動（橋軸方向視点）

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計 6 件）

- 1) 市村強, 山木洋平, 堀宗朗, 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, 応用力学論文集 JSCE, Vol. 11, pp. 641-646, 2008.
- 2) 土橋浩, 市村強, 大保直人, 堀宗朗, 山田岳峰, 複雑な構造を持つ大型トンネルの地震応答に対する大規模三次元数値解析の必要性の検討, 土木学会論文集 A, Vol. 64, No. 3, pp. 639-652, 2008 September, DOI:10.2208/jscej.64.639.
- 3) T. Ichimura, M. Hori, Structural Seismic Response Analysis Based on Multiscale Approach of Computing Fault-Structure System, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, Vol. 38, pp. 439-455, 2009 April, DOI: 10.1002/eqe.861.
- 4) T. Ichimura, M. Hori, J. Bielak, A Hybrid Multiresolution Meshing

- Technique for Finite Element Three-Dimensional Earthquake Ground Motion Modeling in Basins Including Topography, *Geophysical Journal International*, Vol.177, pp1221-1232, 2009 March, DOI: 10.1111/j.1365-246X.2009.04154.x.
- 5) Pher Errol B. Quinay, Satoshi Noguchi, M. L. L. Wijerathne, Tsuyoshi Ichimura, Muneo Hori, An Inversion Scheme to Improve the Accuracy of Earthquake Source Parameters for Predicting Responses in Higher Frequencies, *Journal of Applied Mechanics*, JSCE Vol. 13, 2010.
 - 6) T. Ichimura, M. Hori and M. L. L. Wijerathne, Linear Finite Elements with Orthogonal Discontinuous Basis Functions for Explicit Earthquake Ground Motion Modeling, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 86, pp286-300, 2011 April, DOI: 10.1002/nme.3062.
- [学会発表] (計 29 件)
- 1) H. Dobashi, T. Hatsuku, T. Ichimura, M. Hori, T. Yamada, N. Ohbo, M. Moriguchi, H. Itami, Large-Scale 3D FE Analysis of Seismic Response of an existing Underground Ramp Tunnel Structure of Yamate Tunnel, 14th WCEE World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China, 2008 10.
 - 2) T. Yamada, N. Ohbo, H. Itami, T. Ichimura, M. Hori, Three-dimensional analysis method of seismic resistance of large tunnel structure using large-scale numerical computation of soil-tunnel system, ITA-AITES World Tunnel Congress & 34th General Assembly - Underground Facilities for Better Environment & Safety-, Sep. 19-25, 2008.
 - 3) T. Nagashima and T. Ichimura, Numerical Simulation of the Seismic Response of an Oil Storage Tank Considering Coupling with Ground Motion, "Second International Symposium for "Integrated Predictive Simulation System for Earthquake and Tsunami Disaster", October 21-22, 2008 at University of Tokyo.
 - 4) T. Ichimura and M. Hori, Seismic Structural Response and Strong Ground Motion Simulation based on Multi-scale Analysis, 6th International Conference on Urban Earthquake Engineering, March 3-4, 2009.
 - 5) Pher Errol Quinay, T. Ichimura, M. Hori, Development of a Forward-Inversion Crust Modeling Scheme for Accurate Strong Ground Motion Prediction, th International Conference on Urban Earthquake Engineering & 5th International Conference on Earthquake Engineering, March 3-5, 2010.
 - 6) Pher Errol Quinay, Tsuyoshi Ichimura, Muneo Hori, Seismic Structural Response Analysis Considering Fault-Structure System - Application to Nuclear Power Plant Structures -, Joint International Conference on Supercomputing in Nuclear Applications and Monte Carlo 2010 (SNA + MC2010), Hitotsubashi Memorial Hall, Tokyo, Japan, October 17-20, 2010.
 - 7) Pher Errol B. Quinay, Tsuyoshi Ichimura, Muneo Hori and Toshio Nagashima, Spatial-Temporal Multiscale Approach for Three-dimensional Crust Layer Estimation, 7th ACES International Workshop, Otaru, Hokkaido, October 3-8, 2010.
 - 8) Tsuyoshi ICHIMURA, Toshio NAGASHIMA, Mitsuhiro MATSUURA, Takashi FURUMURA, Hiroshi OKUDA, Eiichi FUKUYAMA, Kengo NAKAJIMA and Chihiro HASHIMOTO, Integrated Predictive Simulation System for Earthquake and Tsunami Disaster (3) Combined Simulation System for Ground Motion/Structure Oscillation, 7th ACES International Workshop, Otaru, Hokkaido, October 3-8, 2010.
 - 9) Pher Errol B. Quinay, Tsuyoshi Ichimura, Muneo Hori, A Physical Modeling Approach for Seismic Response Estimation of Nuclear Power Plant Structures, UP ICE Centennial Conference on Harmonizing Infrastructure with the Environment, Philippines, 11-12 November, 2010.
 - 10) Pher Errol Quinay, Tsuyoshi Ichimura, Muneo Hori, Maddegedara Lalith, Seismic Response Estimation of Structures Considering Fault-structure System, 3rd Asia Conference on Earthquake Engineering, Thailand, 1-3 Dec, 2010.
 - 11) Pher Errol B. Quinay, Tsuyoshi Ichimura, Muneo Hori, M. L. L. Wijerathne, Akemi Nishida, Seismic

- Response Estimation of Nuclear Power Plant Model Based on Fault-structure System, 8th International Conference on Urban Earthquake Engineering, March 7-8, 2011.
- 12) 市村強, 堀宗朗, Pher Errol Quinay, Lalith Maddegadara, 断層-構造物系を考慮した構造物の地震時挙動予測への波動場解析手法の適用と展開, 第60回理論応用力講演会, 2011.
 - 13) 佐々木修平, 市村強, 堀宗朗, Lalith Maddegadara, 不連続直交基底を用いた陽的有限要素波動場解析による超音波探傷に関する研究, 第60回理論応用力講演会, 2011.
 - 14) Pher Errol B. QUINAY, Tsuyoshi ICHIMURA, Muneo HORI and Maddegadara LALITH, THREE-DIMENSIONAL LAYER INTERFACE MODELING USING SPATIAL-TEMPORAL MULTI-RESOLUTION INVERSION AND HYBRID-GRID FEM, The 13th Japan Earthquake Engineering Symposium (2010).
 - 15) Satoshi Noguchi, Pher Errol B. Quinay, Tsuyoshi Ichimura, Muneo Hori, Simultaneous Multi-scale Inversion Method for Estimating Source Location and Crust Structure, 第65回土木学会年次学術講演会, 札幌, 2010.
 - 16) 土橋浩, 寺島善宏, 堀宗朗, 市村強, 大保直人, 沖見芳秀, 山田岳峰, 小原隆志, 大型トンネルを対象とした3次元FEM地震応答解析の有限要素分割に関する基礎検討, 第64回土木学会年次学術講演会, 札幌, 2010.
 - 17) 山田岳峰, 大保直人, 伊丹洋人, 森口敏美, 堀宗朗, 市村強, 土橋浩, センターランプ式トンネル出入口部に設置する剛性低下部の耐震効果, 第64回土木学会年次学術講演会, 札幌, 2010.
 - 18) Pher Errol Quinay, Tsuyoshi Ichimura, Muneo Hori, Development of a Forward-Inversion Modeling Scheme for Constructing Three-dimensional Basin Boundary Shape Using FEM and a Quasi-Newton Method, the 7th annual conference of Japan Association for Earthquake Engineering, 2009.
 - 19) 市村強, 鈴木孝, 堀宗朗, 断層-構造物系を考慮したシナリオ地震時の構造物の動的応答解析, 第63回土木学会年次学術講演会, 福岡, 2009.
 - 20) 野口智史, 市村強, 堀宗朗, マルチグリッド構造/非構造格子を用いた有限要素法による観測地震動の再現とシナリオ地震の強震動予測, 第58回理論応用力学講演会, 2009.
 - 21) 篠竹英介, 遠藤剛, 市村強, 堀宗朗, 地盤構造モデルに対する地震動特性の感度に関する基礎的研究, 第62回土木学会年次学術講演会, 仙台, 2008.
 - 22) 市村強, 山木洋平, 堀宗朗, 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, 第62回土木学会年次学術講演会, 仙台, 2008.
 - 23) 大保直人, 土橋浩, 波津久毅彦, 森口敏美, 山田岳峰, 伊丹洋人, 市村強, 堀宗朗, センターランプ式トンネルの三次元地震時挙動における構造目地の耐震効果(その2), 第62回土木学会年次学術講演会, 仙台, 2008.
 - 24) 波津久毅彦, 土橋浩, 大保直人, 山田岳峰, 伊丹洋人, 森口敏美, 市村強, 堀宗朗, センターランプ式トンネルの三次元地震時挙動における三次元効果について(その2), 第62回土木学会年次学術講演会, 仙台, 2008.
 - 25) 市村強, 山木洋平, 堀宗朗, 階層型解析による断層-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, 第13回計算工学講演会論文集, 2008.
 - 26) 市村強, 篠竹英介, 堀宗朗, 地殻構造のモデル化及び推定精度が構造物の動的応答に及ぼす影響に関する基礎検討, 日本地球惑星科学連合2008年大会, 2008, No. 002267.
 - 27) 山田岳峰, 伊丹洋人, 大保直人, 市村強, 堀宗朗, 遠心振動台実験によるランプトンネルの地震時挙動の検証, 第43回地盤工学研究発表会, 広島, 2008.
 - 28) 大保直人, 山田岳峰, 伊丹洋人, 鈴木孝, 市村強, 堀宗朗, 大規模地下トンネルサイドランプ部の長手方向地震時挙動について, 第43回地盤工学研究発表会, 広島, 2008.
 - 29) 波津久毅彦, 土橋浩, 大保直人, 森口敏美, 山田岳峰, 伊丹洋人, 市村強, 堀宗朗, センターランプ式トンネルを対象とした三次元地震時挙動の評価-様々な入力地震動に対するトンネルの応答評価-, 第43回地盤工学研究発表会, 広島, 2008.
- [その他]
ホームページ等
http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/sensing_and_simulation/
6. 研究組織
 - (1) 研究代表者
市村 強 (Tsuyoshi Ichimura)
研究者番号: 20333833
 - (2) 研究分担者
なし

(3)連携研究者
なし