

災害レジリエンスに寄与する地震動・振動解析技術の高度化

杉山 充樹 新田 祐平
(原子力本部)

藤森 健史

Enhancement of Seismic and Vibration Analysis Technologies Contributing to Disaster Resilience

Mitsuki Sugiyama Yuhei Nitta

Takeshi Fujimori

Abstract

This report introduces the recent advancements in fundamental technologies, focusing on the evaluation of design ground motions and dynamic interaction assessments between buildings and the ground (soil–structure interaction, SSI). For design ground motion evaluation, the study analyzed the 2024 Noto Peninsula earthquake, examined the seismic characteristics, and conducted simulations. Analysis of seismic observation records showed that ground motions near the fault matched or exceeded those of previous events with a Japanese seismic intensity of 7, and long-period ground motions were amplified and extended in the Kanto Plain. Enhanced analysis techniques for SSI assessment improve efficiency and maintain accuracy in complex and large-scale analysis models. These techniques also enable a more detailed local modeling of ground and foundation structures.

概要

基盤技術領域における研究開発の近年の成果として、入力地震動評価と建物と地盤の動的相互作用評価の高度化について解説した。入力地震動評価の高度化では、令和6年能登半島地震を対象とした地震動特性評価と地震動シミュレーションを取り上げた。地震観測記録の分析により、震源断層近傍で過去の震度7相当地点と同等以上の地震動が観測されたこと、関東平野で長周期地震動が増幅し、継続時間が伸張したことを確認した。また、シミュレーションにより地震波の伝播方向の時間変化を再現した。建物と地盤の動的相互作用評価の高度化では、従来の方法では演算時間が膨大となり、実務設計に用いるのが難しい複雑で大規模な解析モデルについて、精度を維持したまま計算効率を向上できる解析技術、および地盤と基礎構造の局所をより精密にモデル化した高精度な解析技術を紹介した。

1. はじめに

いかなる災害が発生しても被害を最小限とし、迅速に復旧できる強さとしなやかさを備えた国土・地域・社会を構築すべく防災・減災等に資する国土強靱化（ナショナル・レジリエンス）に関わる基本法¹⁾が2013年に施行された。この法律の前文の冒頭では、東日本大震災の教訓と南海トラフ地震や首都直下地震の発生に関する懸念が示されたうえで、「ここに、強くしなやかな国民生活の実現を図る国土強靱化の取組を推進するために、この法律を制定する。」とある。これを端緒とし、その2年後の2015年に第3回国連防災世界会議²⁾が、東日本大震災の被災地である宮城県仙台市で開催され、その成果として、国際的防災指針「仙台防災枠組2015-2030」³⁾が採択された。この中で、「災害レジリエンス」について、災害に対するコミュニティや社会が、その基本構造や機

能の維持・回復を通じて、災害の影響を適時かつ効果的に防護・吸収し、しなやかに回復する能力⁴⁾とされている。その後、2020年に内閣官房より示された「防災・減災、国土強靱化のための5か年加速化対策」⁵⁾の中で、災害レジリエンスのために、重点的に取り組むべき課題の第一として、激甚化する風水害や切迫する大規模地震等への対策が挙げられた。このような背景の中、大林組においては、中期経営計画2022の事業戦略の一つとして「災害に強い社会 防災・減災・復興への取組み」を掲げ、激甚化する災害への対応にも積極的に取り組んでいる。研究開発の場では、基盤技術領域に関して、地震動・振動解析分野において、切迫する大規模地震に関わる災害レジリエンスに寄与する技術の高度化を進めている。本報告では、それらについて、入力地震動評価の高度化、建物と地盤の動的相互作用（以下、動的相互作用と記す）評価の高度化の順に解説する。

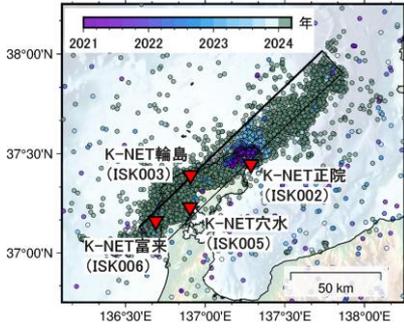


Fig. 1 震央分布図
Epicenter Distribution Map

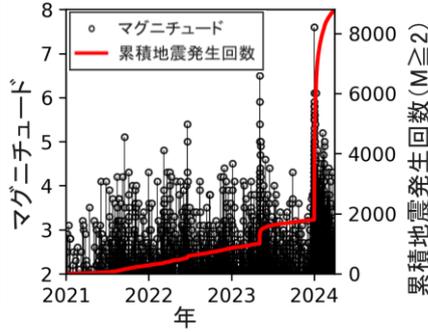


Fig. 2 M-T 図と累積地震発生回数
M-T Diagram and Cumulative Number of Earthquakes

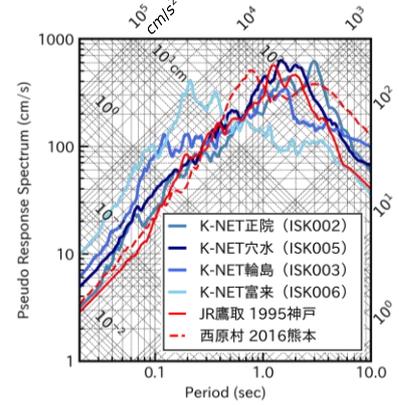


Fig. 3 擬似速度応答スペクトル
(水平 2 次元, h=5%)
Pseudo Velocity Response Spectrum
(Horizontal 2D, h=5%)

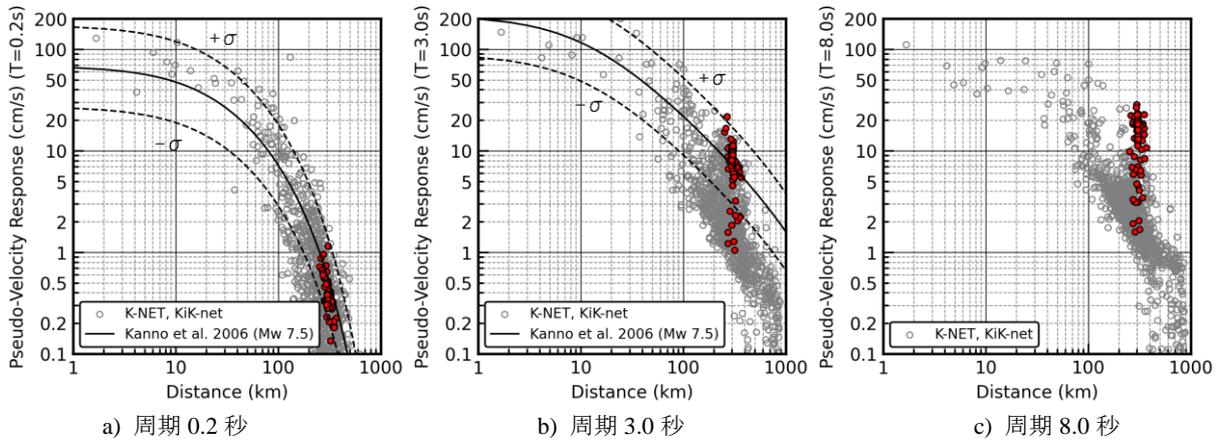


Fig. 4 擬似速度応答値の距離減衰特性 (水平 2 次元, h=5%)
Distance Attenuation Characteristics of Pseudo Velocity Response Values (Horizontal 2D, h=5%)

2. 入力地震動評価の高度化

大林組が設計、施工する物件は多岐にわたり、耐震設計において、広い周期帯域 (周期 0.1~10 秒程度) で信頼性の高い地震動予測が求められる。大林組ではこれまでに、地震観測記録の分析による地震動特性評価や地震動観測記録のシミュレーション⁹⁾により、地震動予測精度を向上させてきた。ここでは、令和 6 年能登半島地震における地震観測記録の分析と 3 次元有限差分法による地震動シミュレーションを紹介する。

2.1 令和 6 年能登半島地震の概要

2024 年 1 月 1 日、令和 6 年能登半島地震が発生した。この地震では、石川県輪島市および志賀町で震度 7 を記録し、能登半島全域で震度 5 弱以上の揺れが観測された。長周期地震動階級は石川県能登で階級 4、関東平野や濃尾平野、大阪平野の観測点で階級 2 が観測された。Fig. 1 に、2021 年 1 月から 2024 年 3 月に発生したマグニチュード 2 以上の地震の震央分布⁷⁾を示す。発生時期で色分けし、本震以後に発生した地震を緑色とした。余震分布は本震の断層面と対応し、その範囲は北東から南西方向に

かけて 150km 以上にわたる。Fig. 2 には、地震の発生時期とマグニチュードの関係図 (M-T 図) と累積地震発生回数を示す。気象庁⁷⁾が指摘するように、石川県能登地方では、今回の地震の発生前から地震活動が活発になっていた。地震発生数は 2020 年 12 月から増加し、2021 年 7 月頃からさらに増加した。2023 年 5 月 5 日にはマグニチュード 6.5 の地震が発生し、地震活動はさらに活発になっていた。

2.2 地震観測記録分析

震源近傍の地震動強さの把握と、地震波の伝播特性に着目した分析を行った。分析には防災科学技術研究所の地震観測網 (K-NET, KiK-net⁹⁾および MeSO-net¹⁰⁾の記録を用いた。

2.2.1 震源近傍の地震動強さ Fig. 3 に、今回特に大きな地震動を記録した震源近傍の強震記録の擬似速度応答スペクトル (減衰 5%) を、近年の被害地震の代表的な強震記録と比較して示す。強震記録の観測点位置は Fig. 1 に示した。K-NET 正院や K-NET 穴水では、過去の震度 7 相当地点 (兵庫県南部地震の JR 鷹取や 2016 年熊本地震の西原村) と同等、もしくはそれ以上の応答を記

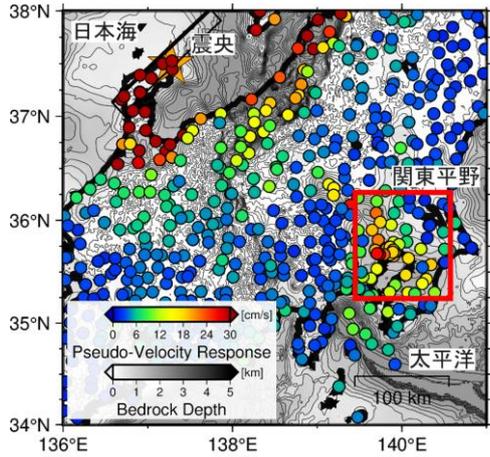


Fig. 5 擬似速度応答値の分布
(周期 8 秒, h=5%)

Distribution of Pseudo Velocity Response Values
(Period 8 Seconds, h=5%)

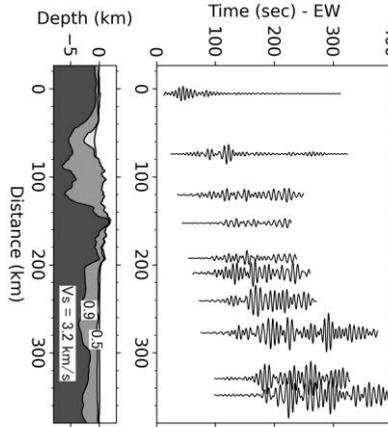


Fig. 6 速度波形のペーストアップ
(周期 6-10 秒)
Paste-up of Velocity Waveforms
(Period 6-10 Seconds)

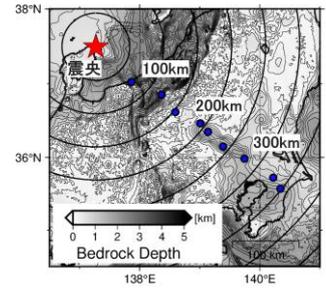


Fig. 7 観測点位置
(震央-関東平野)
Observation Point Locations
(Epicenter - Kanto Plain)

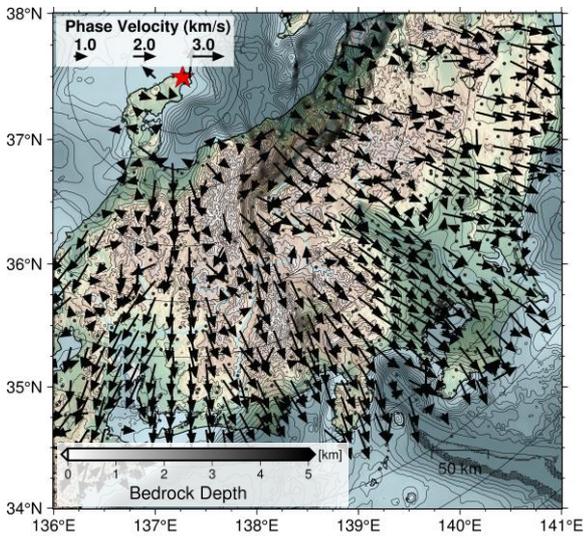


Fig. 8 センブランス解析結果 (周期 10-20 秒)
Semblance Analysis Results (Period 10-20 Seconds)

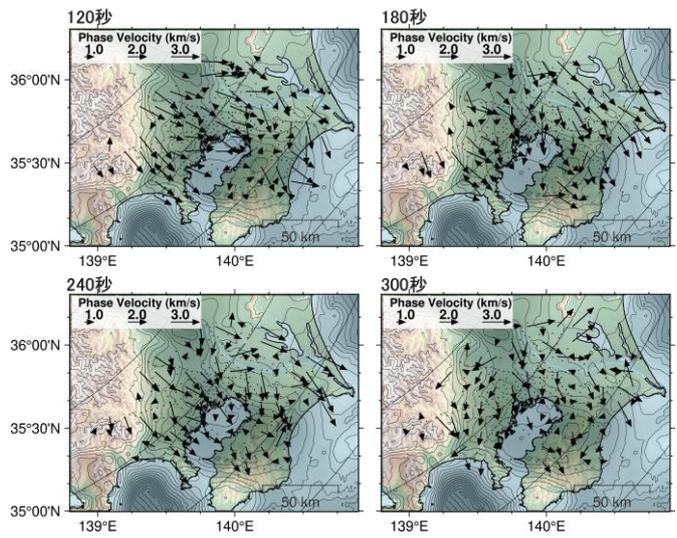


Fig. 9 センブランス解析結果 (周期 6-10 秒)
Semblance Analysis Results (Period 6-10 Seconds)

録した。これらの観測点では周期 1~2 秒付近が卓越し、木造家屋の甚大な被害との相関が示唆される。K-NET 輪島は市街地東端の岩盤に位置しており、市街地では表層地盤増幅の影響でより大きな応答となったと推測される。震度 7 を観測した K-NET 富来では、周期 1 秒以下が卓越し、最大加速度は $2,828\text{cm/s}^2$ を記録した。

2.2.2 周期帯別の距離減衰と地震動強さ分布 震源からの距離による地震動強さの低減具合を把握するために、震源距離と地震動強さの関係（距離減衰）を過去の地震観測記録の回帰式（距離減衰式）と比較した。地震動強さには擬似速度応答値を使用した。Fig. 4 に、周期帯別の擬似速度応答値の距離減衰を Kanno et al. (2006)¹¹⁾ による距離減衰式と比較して示す。実線が距離減衰式、点線が距離減衰式の標準偏差である。Kanno et al. (2006) の距離減衰式は加速度応答を基に導出されているため、擬似速度応答に変換した。また、Fig. 5 中の赤枠に囲まれた観測点を赤丸でプロットした。なお、Kanno et al. (2006)

の距離減衰式は周期 8 秒では定義されていないため、Fig. 4c には観測記録の距離減衰のみを示す。周期 0.2 秒では、距離減衰特性は距離減衰式と類似した傾向を示す。周期 3 秒では、断層最短距離 100km 以内において、多くの観測点の応答が距離減衰式の $\pm\sigma$ の範囲に収まるが、100km 以上においては、距離減衰式の値を下回る記録が多い。周期 8 秒では、関東平野内の応答が、同程度の距離に位置する平野外の観測点と比較して顕著に大きい。なお、関東平野の地震基盤深さを 1.8km、地震基盤以浅のせん断波速度を 900m/s と仮定すると、1/4 波長則（1 波長の 4 分の 1 が表層厚さに等しくなる周期が卓越する法則）により、地盤の 1 次固有周期は 8 秒と概算できる。Fig. 5 には、周期 8 秒の擬似速度応答値の分布を、長周期地震動予測地図の作成に用いられた地下構造モデル¹¹⁾の地震基盤深さと合わせて示す。震源に近い能登半島の応答が大きい。

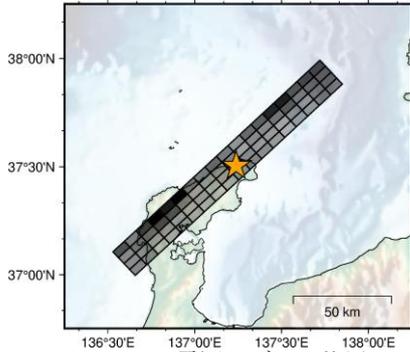


Fig. 10 震源モデルの位置

Location of the Seismic Source Model

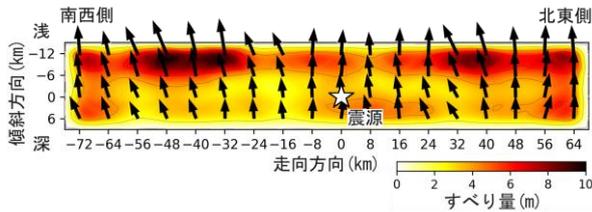


Fig. 11 震源モデルの最終すべり量分布

Final Slip Distribution of the Seismic Source Model

2.2.3 関東平野に伝わる長周期地震動 直線状に選んだ観測点の速度波形から、関東平野に伝わる長周期地震動の伝播特性を分析した。Fig. 6 に、震源から関東平野に至る測線上の K-NET 観測点の記録について、周期 6~10 秒でフィルター処理した速度波形のペーストアップ図と測線直下の地盤の速度構造を比較して示す。縦軸は震央距離とし、速度波形には震央距離の平方根を乗じて、波面の広がりによる振幅低減（幾何減衰）の影響を補正した。ここでは、地震波の主な成分が震央距離の平方根に反比例して減衰する表面波であると仮定した。Fig. 7 には、分析に使用した観測点の位置を示す。背景を地震基盤深さとし、震央を中心とする円を 50km 間隔で描写した。関東平野北西端に位置する群馬県（震央からの距離約 200km）から地震動が増幅し、継続時間が伸長する様子が確認できる。

センブルランス解析を用いて、地震波の伝播特性を分析した。周期 10~20 秒の上下動成分速度波形を使用し、解析対象時刻はペーストアップ図から読み取った表面波到達時刻とした。Fig. 8 に、センブルランス解析結果を示す。推定された伝播方向と位相速度を矢印の向きと大きさで表した。全体的に、地震波は同心円状に伝播しているが、伝播方向に変化が見られる地域がある。特に、関東平野では、到来方向が震央方向より西側に偏っており、平野西側からの地震波の伝播が示唆される。また、関東平野や新潟平野の位相速度は他地域に比べて小さい。

関東平野内の地震波の伝播特性を分析するために、首都圏に高密度に配置されている MeSO-net の観測記録を使用した。解析には周期 6~10 秒の伝播方向直交成分の波形を用いた。対象時刻は、気象庁の発震時刻から 120 秒、180 秒、240 秒、300 秒の 4 ケースとした。Fig. 9 に、

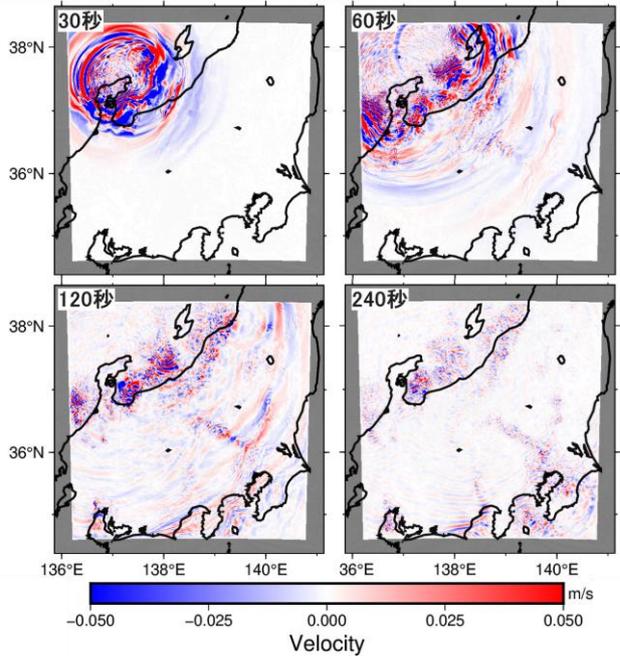


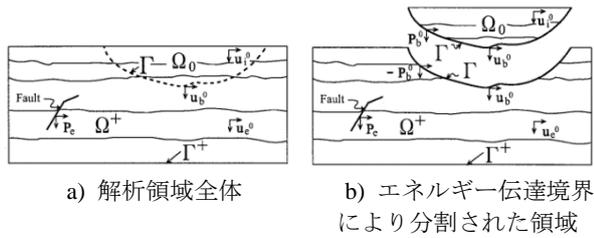
Fig. 12 東西方向の速度スナップショット
Velocity Snapshots of the East-West Component

センブルランス解析結果を示す。発震時刻から 120 秒時点では、関東平野の西北西から東南東方向に地震波が伝播している。これは、平野の北側を伝わる表面波よりも、平野西側の硬質地盤を伝わる表面波の伝播速度が速いためである。180 秒時点では、伝播方向がやや南方向に変化している。これは、平野北側を伝わる伝播速度の遅い表面波が都心部に到来したためと考えられる。240 秒時点では、伝播方向の分布がばらつき始め、300 秒時点では、ばらつきがさらに顕著になる。これは、堆積盆地で地震波がトラップされ、滞留する様子を反映している。よって、関東平野における地震動継続時間の伸張は、複数経路から伝わる伝播速度の異なる地震波が、時間差を伴って到来し、平野内で滞留した結果と考えられる。

2.3 地震波伝播シミュレーション

有限差分法による地震波伝播シミュレーションを実施し、長周期地震動の伝播特性を分析した。

2.3.1 解析方法 解析には OpenSWPC¹³⁾を使用し、地下構造モデルには全国一次地下構造モデル¹⁴⁾を採用した。差分格子間隔は 200m とし、周期 3 秒以上を対象とした。震源のモデル化手法は地震本部(2016)¹⁵⁾の長周期地震動評価手法に倣い、震源のすべり量分布は防災科学技術研究所の震源インバージョン解析¹⁶⁾を参考に設定した。Fig. 10 に、解析に使用した震源モデルの位置を示す。図中には断層の破壊開始地点を星印で表し、すべり量の大小を色の濃淡で表した。断層面の大きさは走向方向に 144km、傾斜方向に 24km、傾斜角は 46 度で南東下がりである。Fig. 11 には、断層面上の最終すべり量分布を示す。図中矢印は断層上盤のすべり方向である。Fig. 10 と同様に、断層の破壊開始地点を星印で表した。



a) 解析領域全体 b) エネルギー伝達境界により分割された領域

Fig. 13 領域縮小法のコンセプト¹⁸⁾
Concept of the Domain Reduction Method

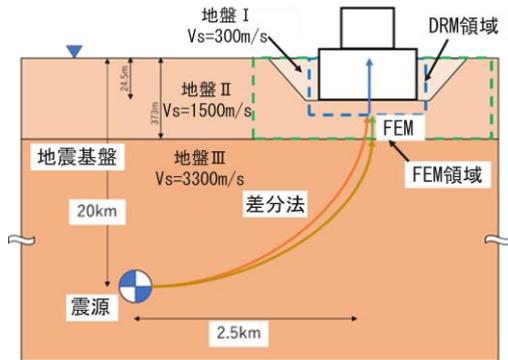
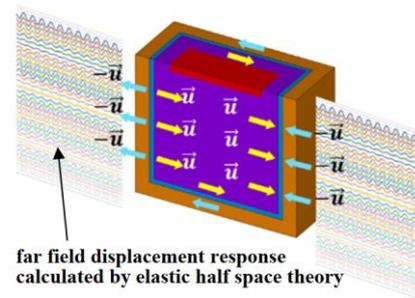


Fig. 14 領域縮小法を用いた地震応答解析
Seismic Response Analysis Using the Domain Reduction Method



far field displacement response calculated by elastic half space theory

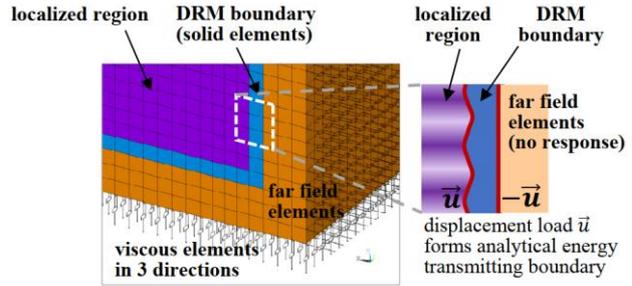


Fig. 15 構築した DRM モデルの概要¹⁹⁾
Overview of Constructed DRM Model

破壊開始点の北東側および南西側の浅部において顕著なすべりが確認できる。南西側の大きなすべり域は、4m程度の隆起が確認された地域と対応する。すべりの方向はおおむね深部から浅部に向かっており、逆断層型の地震である。

2.3.2 解析結果 Fig. 12に東西方向の速度成分について波動伝播のスナップショットを示す。破壊開始から30秒後には、震源から北東、南西方向において、大きなすべり域に対応する波面が確認できる。60秒後には、新潟平野や金沢平野に地震波が到達している。120秒後には、都心部に地震波が到達し、群馬県や栃木県で振幅が大きくなる。地震基盤の深い関東平野や新潟平野では、240秒後においても揺れが継続している。また、地震波伝播の動画から、関東平野に到来する地震波は平野到達時には平野の西側から伝わり、時間の経過とともに到来方向を変え、次第に北側から伝播することを確認した。地震波の到来方向は震源を中心とする同心円状にはならず、地下構造モデルに起因する伝播方向の変化が観察された。

ここで示した解析は試行的に行ったものであり、解析結果と観測記録の比較では、観測点によって地震動波形の振幅や位相に差異があることを確認している。解析に用いた震源モデルや地下構造モデルには改善の余地があり、地震動予測精度の向上には、より精緻な解析モデルが求められる。

3. 動的相互作用評価の高度化

近年、既往の設計基準を越える地震動が数多く観測され、耐震設計に用いられる入力地震動の大きさも増大す

る傾向にある。このような地震動に対する建物の耐震設計には、多くの課題が残されているが、動的相互作用を考慮することで、入力損失による応答低減や振動の地下逸散による減衰効果¹⁷⁾を期待する局面も増える状況にある。建物が軟らかい地盤や不整形な地盤の上に建っている場合、あるいは地下階の有無や基礎形式によっては、建物の揺れが地盤の影響を受け、その建物の揺れによって地盤の揺れにも変化が生じる傾向が強まる。そのために、建物部分のみならず周辺地盤との相互関係も考慮して、地震時の建物の揺れを評価することが必要となる。これが動的相互作用である。一方で、動的相互作用の評価は、地盤という不確定性を多く含んだ自然物と建物の相互関係に由来するため、それを厳密にモデル化しようとすると極めて複雑で大規模なモデルとなり、実用上差し障りのある状況がしばしば発生する。ここでは、はじめに、3.1において、このような状況に対処するために構築された大規模で厳密なモデルのままに計算効率を向上できる新しい解析技術¹⁸⁾⁻²³⁾を紹介する。

一方で、解析結果を実現現象により近づけるためには、地震動評価においては一般的に成層構造として扱われる地盤の傾斜や動的解析においては線材として扱われることが普遍的な杭体のボリューム等を地震応答解析において精密にモデル化する必要が生じることがある。3.2では、3.1のような大規模モデルに相對して、地盤と基礎構造の局所を精密にモデル化し、計算精度を向上させた解析技術を紹介する²⁴⁾。

3.1 領域縮小法

領域縮小法 (Domain Reduction Method, 以下, DRM と

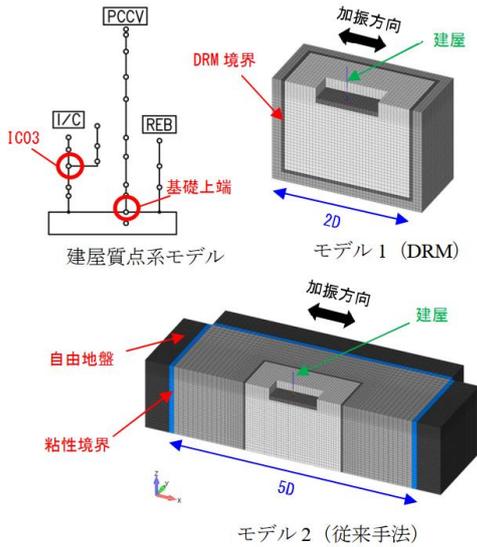


Fig. 16 解析モデルの概要²¹⁾
Overview of Analysis Models

記す)は、建物とそれが建つ広域な地盤を精密にモデル化したうえで、そのようなモデルの解析に必要な多大な演算時間を大幅に短縮できる解析方法である。DRMのコンセプトを Fig. 13 に示す。この手法の特長は、建物周辺から遠方に広がる地盤の適当な位置に解析的なエネルギー伝達境界を設け、その境界より外側の遠方地盤の影響を別途計算しながらも、その境界における連続条件を維持できることである。Fig. 14 のように遠方地盤の応答変位の算出に、三次元差分法(以下、差分法と記す)や有限要素法(Finite Element Method, 以下、FEM と記す)を適用することで、震源断層、震源断層と地震基盤間の地盤、地震基盤より表層の地盤、建物周辺の不整形・不均質な地盤、基礎構造、及び建物を一元的にモデル化できる。

3.1.1 解析方法 Fig. 15 に汎用 FEM 解析コードで構築した DRM モデルの概要を示す。遠方地盤と建物周囲の地盤との連続条件は、あらかじめ計算した DRM 境界位置での遠方地盤の応答変位を逆向きに建物周辺地盤の境界面に入力することにより維持する。遠方地盤の応答変位の算出は SHAK²⁵⁾や 2 次元地盤 FEM、差分法等の弾性解析を想定するが、その後の DRM モデルでの解析では、基礎浮上りや建物あるいは地盤の弾塑性等の非線形性を考慮することが可能である。

3.1.2 解析結果 原子力施設の許認可解析等で用いる、解析領域を建屋幅の 5 倍程度確保し、自由地盤と粘性境界で接続する従来の解析モデル(以下、従来手法と記す)と比較することで、DRM の解析精度の確認及び解析時間の比較を行う。両モデルの概要を Fig. 16 に示す。基礎周辺地盤は $V_s=1,500\text{m/s}$ の一様な硬質岩盤とし、建物は基礎幅 $100\text{m}\times 70\text{m}$ 、埋込深さを 24.5m に設定した PWR(加圧水型原子炉, Pressurized Water Reactor)型標準プラントとする。

Fig. 17 に建屋の応答比較を、Table 1 に解析時間の比較

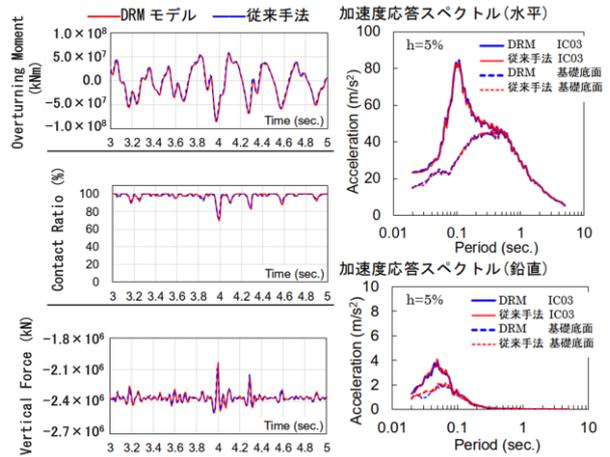


Fig. 17 地震応答解析結果 建屋応答比較²¹⁾
(左上段: 転倒モーメント, 左中段: 接地率, 左下段: 鉛直軸力, 右段: 応答スペクトル)

Seismic Response Analysis Results - Comparison of Building Responses

(Top Left: Overturning Moment, Middle Left: Contact Ratio, Bottom Left: Vertical Axial Force, Right: Response Spectrum)

Table 1 解析時間の比較
Comparison of Analysis Times

手法	節点数	要素数	解析時間 (日)
DRM	55, 323	56, 262	3.2
従来手法	102, 410	98, 156	6.2

を示す。これらより、DRM は解析負荷を抑えながら、粘性境界と自由地盤を用いる従来手法と同等の精度を有し、建物の地震応答解析に用いることが有効であることが示された。

3.2 傾斜支持層杭基礎建物の地震応答解析法

杭支持層が傾斜していると同じ建物でも場所により異なる地盤増幅特性や杭剛性の影響で、基礎の両端の応答に差異が生じ、その影響で基礎にねじれの地震応答等が発生することがある。また、短い杭に水平力が集中するため、杭支持層が概ね水平な地盤に比べて、より精密な配慮が必要となる。具体的には、ねじれや直交方向の振動の発生を鑑み、各杭をモデル化できる 3 次元解析方法を用いることが望ましく、個々の杭体の体積や非線形性を適切に考慮することも肝要である。以下、これらを考慮した地震応答解析法について解説する。

3.2.1 解析方法

解析モデルは 3DFEM である。上部構造と基礎スラブはソリッド要素でモデル化している。杭は曲げモーメント-曲率曲線を考慮できる梁要素と杭径に合わせた円筒を模擬した要素を組み合わせることでモデル化している。地盤はソリッド要素とし、地盤材料試験に応じた深さ方向の拘束圧依存性と非線形性を考慮している。一例として、遠心力場での振動台実験結果をシミュレーションするための解析モデルを Fig. 18 に示す。遠心力場での振動台実験は、6 階建ての集合住宅を模擬した上部建物・基礎スラブ・PHC 杭(800φ, L=4~13m, 8 本)・

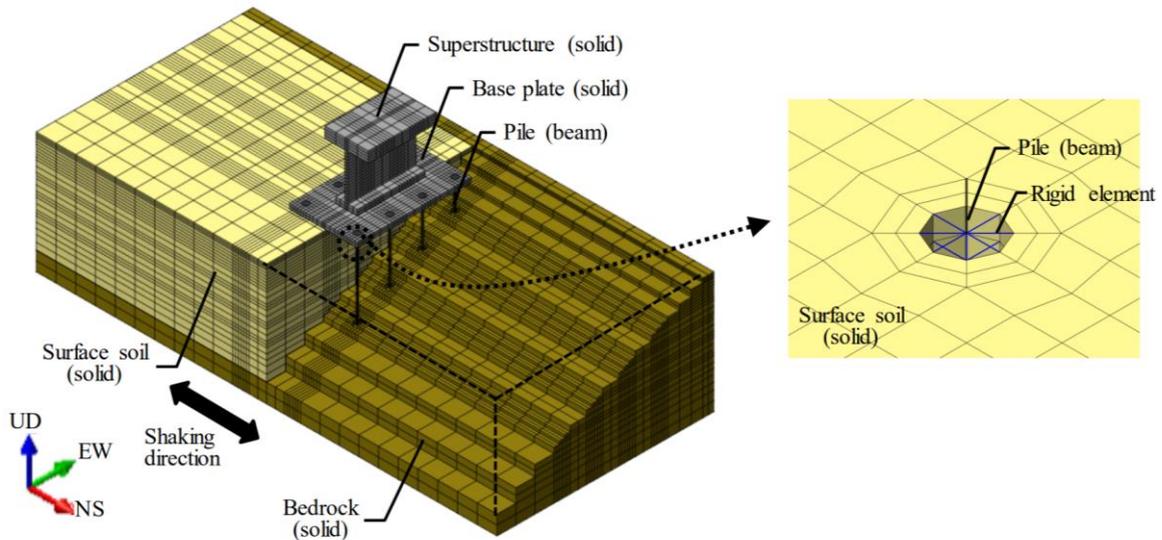


Fig. 18 傾斜支持層杭基礎建物の解析モデル²⁴⁾
Analysis Model of Pile Foundation Building on Inclined Bedrock

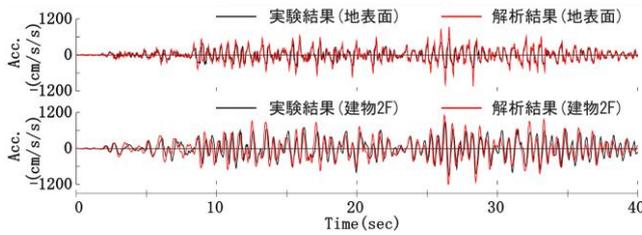


Fig. 19 解析結果と実験結果の加速度波形の比較
(上段：長杭位置地表面，下段：建物2F)

Comparison of Acceleration Waveforms between Analysis Results and Experimental Results (Top: Ground Surface at Long Pile Position, Bottom: 2nd Floor of Building)

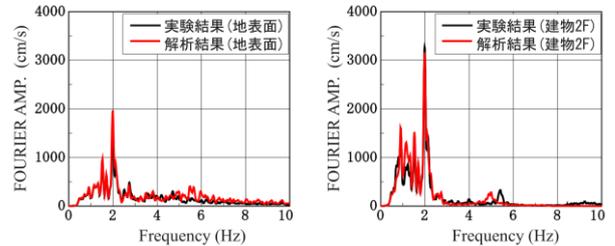


Fig. 20 解析結果と実験結果の
フーリエスペクトルの比較

(左図：長杭位置地表面，右図：建物2F)
Comparison of Fourier Spectrum between Analysis Results and Experimental Results (Left: Ground Surface at Long Pile Position, Right: 2nd Floor of Building)

地盤($V_s=210\text{m/s}$, $\rho=1.60\text{t/m}^3$)・杭支持層($V_s=545\text{m/s}$, $\rho_t=1.80\text{t/m}^3$, 傾斜角 $=27^\circ$)で構成されたモデルに関するもので、50Gの遠心場で実施することで、50倍の大きさの実物と同等の応力状態を再現できている。

3.2.2 解析結果 Fig. 18の解析モデルによる地震応答解析結果のうち、応答加速度波形の比較を Fig. 19に、フーリエスペクトルの比較を Fig. 20に示す。それぞれ、黒線が実験結果、赤線が解析結果である。それらの対応は良く、解析の妥当性を確認できる。なお、ねじれの挙動については文献²⁴⁾を参照されたい。また、ここでの入力地震動は、建設省告示で定められた工学的基盤上で極めてまれに発生する地震動(ランダム位相)である。

4. まとめ

災害レジリエンスに寄与する地震動・振動解析技術の高度化との題目で、基盤技術領域における研究開発の近年の成果として、入力地震動評価と動的相互作用評価の高度化について解説した。

入力地震動評価の高度化においては、令和6年能登半島地震における地震観測記録の分析と3次元有限差分法

による地震動シミュレーションを紹介した。観測記録の分析により、震源断層近傍で過去の震度7相当地点と同等以上の地震動が観測されたこと、関東平野で地震動が増幅し継続時間が伸長したことを確認した。また、シミュレーションにより、地震波の伝播方向の時間変化を再現した。

動的相互作用評価の高度化においては、従来の方法では、演算時間が膨大となり、実務設計に用いるのが難しい複雑で大規模な解析モデルについて、精度を維持したまま計算効率を向上できる解析技術、および地盤と基礎構造の局所をより精密にモデル化した高精度な解析技術を紹介した。

被害地震のたびたびの発生と今後の大地震リスクを踏まえると、災害レジリエンスに寄与する技術のより一層の高度化は必須であり、さらなる卓越した技術の蓄積とイノベーションが今後とも目指すところである。

謝辞

防災科学技術研究所のK-NET, KiK-net およびMeSO-netの強震観測記録を使用しました。一部の図の作

成には、GMT (Generic Mapping Tools) を用いました。記して感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 内閣官房, “強くしなやかな国民生活の実現を図るための防災・減災等に資する国土強靱化基本法”, https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/kokudo_kyoujinka/hour_ei.html, (参照 2024-5-21)
- 2) 内閣府, “第3回国連防災世界会議”, <https://www.bousai.go.jp/kokusai/kaigi03/index.html>, (参照 2024-5-21)
- 3) 外務省, “仙台防災枠組 2015-2030”, <https://www.mofa.go.jp/mofaj/files/000071589.pdf>, (参照 2024-6-25)
- 4) United Nations International Strategy for Disaster Reduction (UNISDR), “2009 UNISDR Terminology on Disaster Risk Reduction”, <https://www.undrr.org/publication/2009-unisdr-terminology-disaster-risk-reduction>, (参照 2024-6-25)
- 5) 内閣官房, “防災・減災, 国土強靱化のための5か年加速化対策”, https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/kokudo_kyoujinka/5ka_nenkasokuka/index.html, (参照 2024-5-21)
- 6) 田中・野畑: M9クラス巨大地震の強震動評価, 大林組技術研究所所報, No.76, 2012.12
- 7) 気象庁, “一元化処理 震源リスト”, <https://www.hinet.bosai.go.jp/REGS/JMA/jmalist.php?LANG=ja>, (参照 2024-5-21)
- 8) 気象庁, “地震・火山月報(防災編)特集「令和6年能登半島地震」”, https://www.data.jma.go.jp/kanazawa/data/news/202401tokushuu_1.pdf, (参照 2024-5-21)
- 9) 防災科学技術研究所: 防災科研 K-NET, KiK-net, <https://doi.org/10.17598/NIED.0004>, (参照 2024-5-21)
- 10) 防災科学技術研究所: 防災科研 MeSO-net, <https://doi.org/10.17598/NIED.0023>, (参照 2024-5-21)
- 11) Kanno, T., et al.: A new attenuation relation for strong ground motion in Japan based on recorded data, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.96, No.3, pp.879-897, 2006.6
- 12) 地震調査研究推進本部地震調査委員会, “「長周期地震動予測地図」2012年度試作版”, https://www.jishin.go.jp/evaluation/seismic_hazard_map/lpshm/12_choshuki_dat/, (参照 2024-5-21)
- 13) Maeda, T., Takemura, S. and Furumura, T.: OpenSWPC: an open-source integrated parallel simulation code for modeling seismic wave propagation in 3D heterogeneous viscoelastic media, *Earth Planets and Space*, Vol.69, 2017.7
- 14) Koketsu, K et al.: Japan integrated velocity structure model version 1, *Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering*, Lisbon, Portugal, 2012.9
- 15) 地震本部, “長周期地震動評価 2016年試作版地震本部”, https://www.jishin.go.jp/evaluation/seismic_hazard_map/lpshm/16_choshuki/, (参照 2024-5-21)
- 16) 防災科学技術研究所, “強震波形記録を用いた令和6年(2024年)能登半島地震(1月1日16時10分, M7.6)の震源インバージョン解析”, https://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/topics/noto_20240101/inversion_v1/inv_index.html, (参照 2024-5-21)
- 17) 藤森健史: 実務における動的相互作用の現状, 地盤工学会誌, pp.26-29, 2023.10
- 18) J. Bielak et al.: Domain reduction method for three-dimensional earthquake modeling in localized regions Part I: Theory, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.93, No.2, pp.817-840, 2003.4
- 19) Y. Nitta et al.: A feasibility study on domain reduction method for non-linear seismic response analysis of soil-structure interaction system, SMiRT-25, Division III, Charlotte, North Carolina, USA, 2019.8
- 20) H. Matsushita et al.: Analytical study on building / ground nonlinear behaviors during earthquakes by Domain Reduction Method, SMiRT-26, Division V, Berlin/Potsdam, Germany, 2022.7
- 21) 佐々木, 他: 領域縮小法による建屋/地盤の地震時非線形挙動に対する解析的検討 その7 領域縮小法と従来手法との比較, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2024.8
- 22) K. Sasaki et al.: SSI analysis of NPP by domain reduction method part I inhomogeneous ground, 18th World Conference on Earthquake Engineering, GE06, Milan, Italy, 2024.7
- 23) Y. Nitta et al.: SSI analysis of NPP by domain reduction method part II embedding shape and soil property, 18th World Conference on Earthquake Engineering, GE06, Milan, Italy, 2024.7
- 24) M. Shoji et al.: Seismic response evaluation of pile-foundation structure supported by inclined bedrock based on centrifuge model test, 17th World Conference on Earthquake Engineering, Sendai, Japan, 2020.9
- 25) Schnabel, F. B. et al.: SHAKE A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered site, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, Report No. EERC 72-12, 1972.12