

地震対策の意思決定を支援する 3次元可視化技術 Three-Dimensional Visualization Technology to Support Decision-making in Earthquake Countermeasures

水谷 由香里 Yukari Mizutani
樋口 匡輝 Masaki Higuchi

1. はじめに

近年、地震災害は激甚化・頻発化しており、今年発生した令和6年能登半島地震においても、建物被害や地盤の液状化をはじめとして、広域に渡り甚大な被害がもたらされた。近い将来に発生が予想されている首都直下地震や南海トラフ地震等に向けては、限られたコストの中で効果的に対策を導入することが必要不可欠である。

効果的に対策を導入するための検討にあたっては、関係者間において、想定する計測震度等の地震の揺れの大きさや発災時の被害想定、考えられる対策やその効果等の情報について、適切な共通認識を持つ必要がある。このためのツールとして一般的には、FEM解析等によって得られたデータを基に、代表的な数値やグラフ等の図表が用いられることが多いが、こういった情報を理解するためには、その分野の専門知識が必要となることも多い。

一方近年は、被害想定の説明に3次元モデルを用いた表現や現実の物理空間と仮想空間を融合させるXR(クロスリアリティ)技術等を用いることで直感的に分かりやすく示し、専門知識がなくても共通認識の形成や対策の意思決定に繋げる事例が見られるようになってきた。

本報では、前述のような地震対策に関連した可視化技術について、大林組の保有する代表的な既存技術の概要を紹介するとともに、近年導入した2つの3次元可視化関連技術を紹介する。

2. 地震災害可視化に関する大林組の保有技術

地震時の被害推定やその可視化を対象とした大林組が保有する既存技術について、主なものをTable 1、およびFig. 1、Fig. 2に示す。地震の揺れの大きさや発災時の被害状況、対策効果等の可視化について、2次元のGIS(地理情報システム: Geographic Information System)を用いて地図情報とリスク情報を組み合わせた技術や、構造的な安全性に主眼を置いた技術がある。

しかし、近年は顧客ニーズが多様化、かつ急速に変化している。例えばBCP(事業継続計画: Business Continuity Plan)という観点で、構造物だけでなくその周辺状況や、屋内の状況に対する検討が必要になってきている。このようなニーズの多様化や変化に応じた技術が必要であり、大林組では継続して技術開発に取り組んでいる。この取り組みの中で導入した最新の技術を、次章以降で紹介する。

Table 1 地震災害に関する可視化技術

技術名称	概要
地震被害予測システム Quake Ranger ^{® 1)}	地震発生時の各地の地盤応答を地盤情報と入力地震動から計算し、インフラ施設被害や液状化危険度の予測をGIS上に表示する技術。
積荷・什器類の地震時挙動シミュレーション ²⁾	地震発生時の積荷等の転倒や落下、移動等の地震時挙動を再現するシミュレーション技術。
建物地震被災度即時推定システム ³⁾	耐震建物の基部(1階)および最上階に設置されたセンサ観測記録と、コンピュータによる応答計算結果を組み合わせることで、建物の被災度を地震後数分程度で自動的に推定する技術。
クエイクマッパー Quake Mapper ^{® 4)}	地震発生時の各地の震度分布を震源情報から推定し、建物被害や液状化危険度の予測をGIS上に表示する技術。

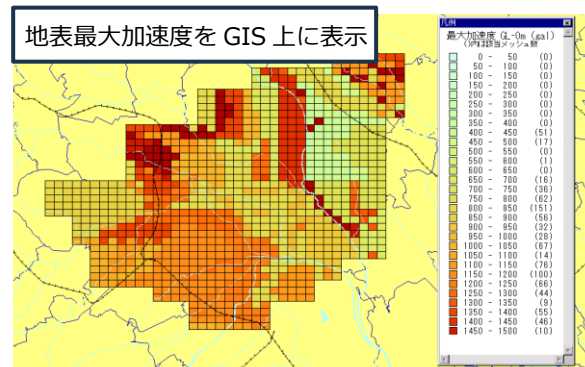


Fig. 1 地震被害予測システム Quake Ranger
Seismic Damage Estimation System “Quake Ranger”

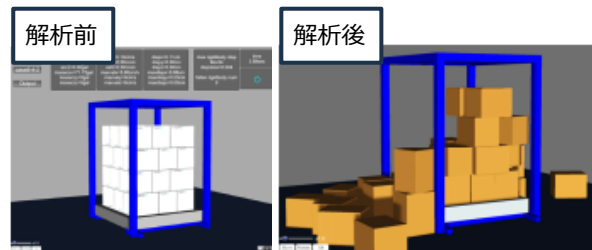


Fig. 2 積荷・什器類の地震時挙動シミュレーション
Physics Simulation of Stacked Cargoes and Furniture due to
Seismic Motion

3. 地震被害予測システム「Quake Ranger® 3D」

3.1 システムの概要

新たに開発した地震被害予測システム「Quake Ranger 3D」(本章では以下、本システム)は、地震時における地盤の応答を計算するとともに、その結果を基に、各種基準・指針等に規定されている簡易液状化判定により液状化危険度を表すFL値やPL値といった指標(以下、液状化危険度)を計算、図化するものである。本システムの流れをFig. 3に示すが、計算の自動化により、検討の効率化が見込まれるのみならず、地盤応答や液状化危険度の計算結果をFig. 4のように3次元で表示することができ、結果をより分かりやすく表示できるようになった。

従来の地震被害予測システム(Fig. 1)では、結果の表示は2次元であり、例えばある建物地下の液状化危険度の分布を確認したいといった場合には、別途深度分布グラフを出力して照らし合わせる必要があった。本システムでは、結果を3次元で表示できるようにしたことにより、地盤内の危険度評価についての認識共有も容易となる。

次節以降に、本システムの主な機能や特徴を示す。なお、本章における例図の作成には、国土地盤情報検索サイト⁵⁾の地盤情報、および強震観測網⁶⁾の地震動データを利用した。

3.2 地盤構造推定と地層構成モデル

本システムは、地盤の地震応答計算や簡易液状化判定を行うが、そのための入力情報として、地盤の構造や特性に関するデータが必要になる。本システムに限らず一般的に、これらはボーリング調査結果を基に設定することになるが、検討対象位置のボーリングデータが取得済みであることはほとんどなく、追加調査や補間等による推定作業が必要となる。例えば、工場敷地全体などの領域で液状化危険度を評価したい場合、検討領域を矩形のメッシュ状に分割して検討することが多い。この際、あるメッシュ内にボーリングデータが1つも存在しない場合は、周辺情報から補間するなどの作業が必要となり、多大な時間を要していた。

このような課題から、本システムの開発においては、当社の既存技術である3次元地盤構造推定システム「ちかなび®」⁷⁾を用いて推定した地盤構造情報を利用し、そのデータを本システムで読み込めるようにした。「ちかなび」により、検討領域にボーリングデータがランダムに位置する場合にも、検討領域全体の地盤構造を合理的なアルゴリズムに基づいて推定し、各メッシュ中心で推定された地層構成モデルを自動設定することが可能である。さらに、この「ちかなび」との連携により、従来技術では難しかった追加ボーリングデータの活用も容易になった。

なお、「ちかなび」の利用は必須ではなく、地層構成モデルのデータ(以下、地層構成データ)をCSVファイル

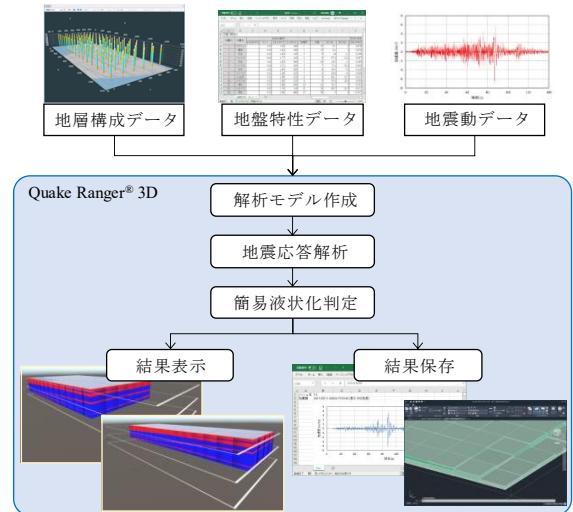


Fig. 3 地震被害予測システムQuake Ranger 3Dの流れ
Flow of “Quake Ranger 3D”

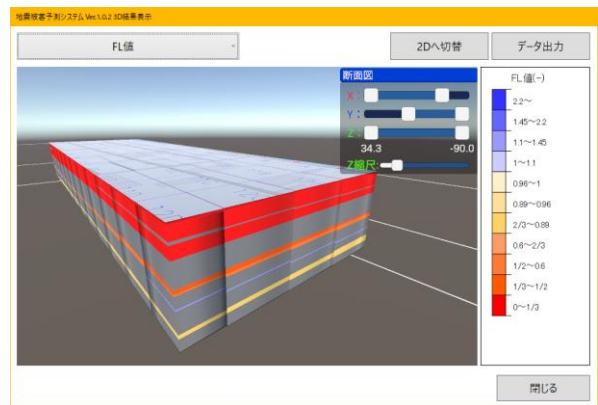


Fig. 4 液状化危険度の3次元表示例
Example of 3 Dimension View Showing Liquefaction Risk

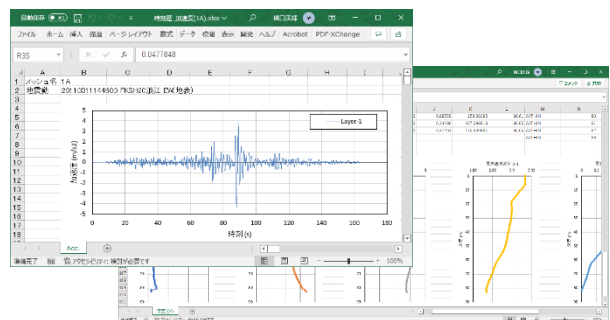


Fig. 5 Excel ファイルの出力例
Example of Output Excel File

で別途用意して本システムで用いることも可能である。

3.3 地震応答解析と簡易液状化判定

地震応答解析は、前節で述べた地層構成データを基に1次元土柱モデルを設定し、任意の入力地震動に対する地震応答解析を行う。土柱モデルは、地層構成データと地盤特性データから自動生成が可能である。その生成ア

ルゴリズムは目的に応じて選択できるような複数種類を内蔵しており、システム画面上で切り換えることができる。

解析コードはSHAKE(1次元重複反射理論に基づく等価線形解析プログラム)を標準として内蔵しているが、別の解析コードへの差し替えなどの将来的な拡張性も重視している。そのため、本システム内部のデータ保持には、ポーリング交換用データと同様のXML形式や、JavaScriptをはじめとしたプログラミング言語で扱いやすいJSON形式を用いている。

簡易液状化判定手法は、道路橋示方書や建築基礎構造設計指針等の代表的な基準に対応している。同基準において規定されている設計震度や加速度を用いてせん断応力比を計算し、液状化危険度を求める方法のほか、せん断応力比として前述の地震応答解析の結果を用いて液状化危険度を求める方法も選択できる。

3.4 計算結果の表示と保存

計算結果は、本システム内で3次元表示が可能であり、視点の回転や移動、断面表示などがマウス操作で可能である。3次元表示のシステムにはゲームエンジンであるUnityを用いたことで動作を軽量化することができ、比較的スペックの低いPCでもストレスなく操作することが可能となった。

3次元表示する結果の内容は、液状化危険度の他にも加速度やせん断応力など多岐に渡り、ドロップダウンリストより切替が可能である。3次元表示した地盤の上面には、任意の画像データを指定して表示することができ、例えば検討領域の地図画像を指定すれば、位置と結果を直感的に理解することができる。

計算結果は、数値データはFig. 5のようなExcelファイルでの保存が可能であり、時刻歴図や深度分布図等のグラフも自動で作成されるため、本システムとは別の分析や資料作成に利用することも容易である。3次元データは、汎用的なCADファイルであるDXF形式での保存が可能であり、関係者間での結果の共有も本システムに依存しない形式で行うことができる。

このように、3次元表示で分かりやすい結果表示ができるとともに、詳細な情報の共有も容易であることから、例えばBCP策定時におけるリスク認識の共有や合意形成のためのツールの1つとして用いることができる。

4. 居室内の地震時挙動再現シミュレーション

4.1 概要

居室内の地震時挙動再現シミュレーション(以下、本シミュレーション)は、想定する居室の床の揺れを用いて、3次元モデルで表現した居室内の什器・備品類の転倒や落下、滑動等の挙動を可視化するものである。

耐震性が高く建物自体に地震による被害が無い場合でも、居室内の什器・備品類の転倒等の被害状況により建物の継続利用が困難な場合がある。この場合、建物に免

震や制震といった建物の揺れを抑える対策の導入により、居室内の什器・備品類による地震被害を小さくすることが可能となる。建物の継続利用性や対策効果はFEM解析等の技術を用いた地震時の建物の挙動の可視化に加えて、居室内の什器・備品類の挙動を可視化することで直感的に分かりやすく示すことが可能となる。

次節以降に、本シミュレーションの主な特徴や適用事例を示す。

4.2 特徴

居室内の什器・備品類の地震時挙動には、転倒や落下、滑動等が挙げられる。正確な挙動の把握には実大振動台実験の実施が必要不可欠だが、実験のみで全ての什器・備品類の挙動の把握はほぼ不可能である。一方近年では、解析技術の発展により、剛体物理解析エンジン等を利用することで居室内に配置された什器・備品類の3次元的地震時挙動の再現が可能となってきている。そこで本シミュレーションでは、上記の挙動再現の解析が可能であり、かつ居室のレイアウトを任意に設定可能なUC-win/Roadおよび地震シミュレータ⁸⁾を用いることとした。

本シミュレーションの構成要素は大きく分けて2つあり、1つ目は居室の3次元モデルの設定である。3次元モデルのレイアウトには、任意の壁や床のテクスチャや什器・備品類を選定することができ、オフィスや住宅等といった多様な居室の設定が可能である。さらに什器・備品類は寸法や重量だけでなく摩擦係数や反発係数等のパラメータの設定により、椅子のキャスターの有無による挙動の違い等を表現することが可能である。構成要素の2つ目は、想定する居室の床の揺れの設定である。什器・備品類の挙動は揺れの大きさといった地震側の要素だけではなく、耐震や免震等の構造形式や階高の違いといった建物側の要素にも依存する。本シミュレーションでは上記の要素を考慮した床の揺れを用いることで、対象建物内の対象位置における什器・備品類における様々な挙動の表現を可能としている。

4.3 適用事例

本節では居室の3次元モデルにオフィスレイアウトを設定し、シミュレーションを実施した結果について紹介する。シミュレーション結果の一例について、シミュレーション実施前後の静止画をFig. 6に示す。Fig. 6左図には1995年兵庫県南部地震の1F・耐震構造相当の床の揺れの発生後の状況を示しており、本棚や観葉植物の転倒、本の落下、PCモニタの転倒といった被害状況が見られた。一方で、Fig. 6右図に示す同地震の1F・免震構造相当の床の揺れの発生後では上記のような被害状況は発生しなかった。本シミュレーションによって、建物の構造形式等の要素を考慮した床の揺れによる居室内の什器・備品類の挙動の違いを再現でき、効果を直感的に分かりやすく示せることが確認できた。このように被害状況だ

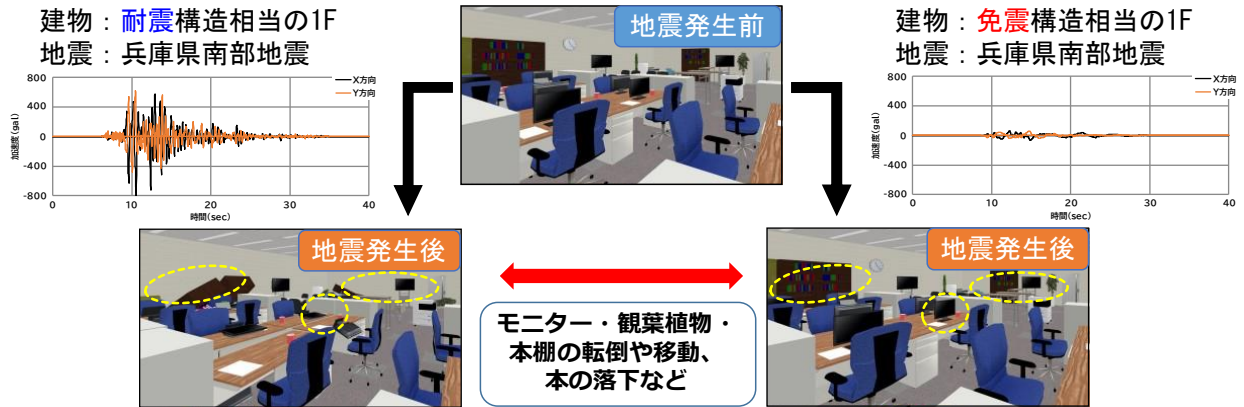


Fig. 6 構造形式の違いを対象とした居室内のシミュレーション結果

Comparing Simulation Results in Seismic Strengthened Building and in Seismic Isolated Building

けでなく対策効果の可視化も可能となれば、地震被害対策の効果的な導入検討ツールの1つとして活用可能と考えられる。

5. おわりに

本報では、地震災害やその被害推定、対策効果の評価を対象に、可視化技術を用いた直感的に分かりやすい表現により、関係者間での認識共有や意思決定を支援する技術を紹介した。特に、個別で紹介した2つの技術では、最近の3次元表示技術を用いた可視化を実装しており、より現実のイメージに近い表現を実現することができた。

3章で紹介した地震被害予測システム「Quake Ranger 3D」は、地盤の情報を基に、任意の入力地震動に対する地盤応答解析結果や液状化危険度を3次元で表示することができる。例えば、地震から守りたい構造物が地下にある場合、液状化危険度の高い地層がその構造物より上にあるのか、下にあるのか、あるいは重なっているのかといった情報は、地震対策を検討する上でとても重要である。しかし、従来の2次元的地表面に投影した情報のみでは、こういった深さ方向の情報を容易には確認できなかった。このような、深さ方向の重要な情報を3次元で分かりやすく表示することで、その情報も含めてBCP策定時における優先度の設定や合意形成に活用できるシステムである。

4章で紹介した居室内の地震時挙動再現シミュレーションは、地震時の居室内の状況を再現できる技術であり、本稿で事例紹介したオフィスレイアウトだけでなく、様々な什器・備品類を配置した居室レイアウトを再現し、想定する居室の床の揺れに対する居室内の状況を再現することができる。この技術により、実際には百人百様である屋内状況に対し、より現実に近い状況を再現し、対策効果を比較できるため、対策選定における合意形成や意思決定をよりスムーズにできる技術である。

今後は、技術の活用場面を広げつつ、その中でニーズの変化もとらえながら、技術に反映させていく予定である。このような技術開発や活用を通して、関係者間での認識共有や、それを基にした議論、合意形成を支援できる技術を提供し、レジリエンスの向上に繋げていく所存である。

参考文献

- 1) 副島紀代, 江尻譲嗣, 大内一: 土木構造物の地震被害予測システムの開発, 大林組技術研究所報, No.67, 2003
- 2) 吉田治, 石川理都子, 三浦耕太, 青山優也: 積荷・什器類を対象とした地震時挙動シミュレーション, 大林組技術研究所報, No.80, 2016
- 3) 諏訪仁, 三浦耕太, 江村勝, 中塚光一, 三好 夏恵: 建物地震被災度即時推定システムの開発, 大林組技術研究所報, No.86, 2022
- 4) 株式会社大林組, “クエイクマッパー Quake Mapper[®]”, 技術紹介, <https://www.obayashi.co.jp/chronicle/database/t1-2-2.html>, (参照 2024-05-20)
- 5) 国土交通省, 他, “Kunijiban”, 国土地盤情報検索サイト, <http://www.kunijiban.pwri.go.jp/>, (参照 2024-07-22)
- 6) 防災科学技術研究所, “K-NET, KiK-net”, 強震観測網, <https://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/>, (参照 2024-07-22)
- 7) 児島理士, 萩原由訓, 渡辺和博, 高橋真一: 3次元地盤構造推定システム「ちかなび[®]」, 大林組技術研究所報, No.86, 2022
- 8) 株式会社フォーラムエイト, “UC-win/Road 地震シミュレータプラグイン・オプション”, 製品情報, <https://www.forum8.co.jp/product/ucwin/road/earthquake.htm>, (参照 2024-05-20)