

研究紹介リーフレット



名古屋大学
地震工学・防災グループ

目次

「防災普及啓発」

防災啓発教材 … No.1

「地域防災力評価と防災力向上」

地域の地震危険度と地域対応力の分析 … No.2

- GoogleEarthやGISツールによる各種施設の耐震化状況と地震危険度の関係の分析や見える化
- 地震後の復興シナリオ作成に向けた中高層ビルの解体に関する分析
- 全国に分布する免震建物の現状分析

歴史資料・地域情報の蓄積による地震危険度の説明性向上 … No.3

- 名古屋市のバス停名分布と地盤の関係
- 名所江戸百景描画地点の地形・景観変化と常時微動計測に基づく地盤震動特性の説明工場
- 関東地震の被害からみる現代都市の脆弱性の分析
- 各種古地図、古文書等、歴史資料の収集

地域防災のためのシステム開発と実践活動 … No.4

- 安震システムの構築
- 愛知県防災学習システム
- 防災フェスタの開催
- あいち耐震まちづくり青少年啓発事業
- 災害シナリオ体験アプリescape

最新のコンピュータ技術を駆使したソフト開発 … No.5

- バーチャル地震動体験システム:動くハザードマップ
- 携帯端末を用いたユビキタス的防災啓発
- 震源断層の破壊から地震動の伝播までがわかるQuakeViewer
- FLASHによる建物震動挙動の見える化

「地盤や建物の振動実験・観測」

多様な建物での強震観測、微動計測、振動実験の蓄積 その1 … No.6

- 名古屋大学東山キャンパスにおける強震観測・微動計測
- 名古屋大学鶴舞キャンパスでの強震観測
- 耐震改修前後での強震観測・微動計測
- 小学校建物・地盤の微動測定
- 近代建築物・伝統木造建築の耐震計測

多様な建物での強震観測、微動計測、振動実験の蓄積 その2 … No.7

- E-ディフェンス実験による地震時の建物応答と家具挙動
- 免震戸建住宅の振動台実験
- テレビ塔の微動計測・人力加振実験
- 超高層建物と地盤の共振現象

高層建物のライフタイムモニタリングと地震対策の促進 … No.8

- 新築高層建物の建設時の振動・軸力計算
- 初期超高層建物の解体時の振動・軸力計算
- E-ディフェンス実験に基づく損傷評価
- 高層建物の地震被災シナリオ作成とBiCURIIによる床応答体験

建物観測の新たな展開 … No.9

- 建物の建設時常時微動計測
- 超高密度観測・強制振動実験
- 免震建物の多項目・高密度観測・地盤改良効果測定
- 一般観測協力者との連会:「Pネット」の展開

発電所建物(火力・原子力)の高密度観測と相互作用解析 …… No.10

- 火力発電所の振動特性分析や強震時の応答評価
- 原子力発電所で得られた大加速度記録の要因分析

「地盤と建物の応答予測」

地盤・建物系の動的相互作用 …… No.11

- 根入れ基礎に対するインピーダンス、及び基礎入力動の簡易評価法
- 基礎形状の不整形性や基礎形式の混用がねじれ基礎入力動に与える影響
- 東北地方太平洋沖地震における動的相互作用を考慮した建物応答評価

建物応答解析と被害予測 …… No.12

- 建物耐力や滑り・浮上り等の非線形動的相互作用を考慮した建物実被害説明が可能な地震応答解析手法に関する研究
- 高機能社会における都市部に立地する一般中高層建物などの耐震性能評価

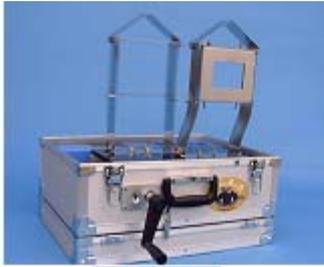
地域の地盤データ、地震動予測、強震観測、微動観測 …… No.13

- 深部地盤モデルの構築
- 表層地盤モデルの構築
- 新しい手法を用いた高解像度強震動予測
- 強震記録による地殻変動の算定、モーメントマグニチュードの即時推定

防災啓発教材（手回しぶるるからBiCURIまで）

振動実験教材「ぶるる」は、社会とともに育ち、人の協働の輪を広げ、安心なまちを作っていきます。地震の怖さ、耐震の大切さをわかりやすくインパクトを持って伝え、気づきを与えます。楽しく、作り、揺すり、壊し、リアルに体感して、耐震化のエッセンスが学べます。

(<http://www.sharaku.nuac.nagoya-u.ac.jp/labofT/bururu/>)



手回しぶるる

液状化ぶるる

家具ぶるる

成層地盤

電動化



起振機ぶるる

津波ぶるる

ストローハウス

電動ぶるる

大型化



台車ぶるる

スマートMAGICぶるる

多連振り子

地盤ぶるる

倒壊型



再現



体感教材



パラパラ

ピノキオぶるる

紙製ぶるる



大変位

木造倒壊ぶるる

お寺ぶるる



綱引きぶるる



長周期振動台

室内模型

制御

Z軸化

小型化

ルンルンぶるる

BiCURIぶるる

NoteShaker



地域の地震危険度と地震災害対応力の分析

我が国は、戦後、高機能で豊かな社会を構築してきましたが、逆に地震や水害などの自然災害に対して、非常に脆弱な社会を作り上げてしまったとも言えます。発生が危惧されている海溝型の巨大地震、首都直下地震、あるいは内陸活断層の地震による災害に強いまち・強い社会を構築していくためには、国民一人ひとりが、地震災害を我が事と捉え、減災行動をとるよう促すような方法論の検討が不可欠です。そこで、当研究グループでは、地域の地震危険度や地震災害時の地域対応力を分析し、一般国民一人ひとりに減災対策の必要性を分かりやすく説明するための研究を行っています。

●Google EarthやGISツールによる各種施設の耐震化状況と地震危険度の関係の分析や見える化

自治体が所有する建築施設や一般木造住宅の耐震化状況について、データを整理しデータベース化を行うとともに、Google EarthやGISツールを用いて、各種のハザードマップと重ね合わせて表示する方法について検討しています。これらのツールは、国民一人ひとりの啓発となることはもちろんのこと、耐震化推進のための戦略立案などにも活用ができます。図1は、東海4県の平成22年1月時点における1万世帯当りの累計耐震改修実施棟数と今後30年以内に震度6弱以上の揺れに見舞われる確率(地震調査研究推進本部(<http://www.jishin.go.jp/main/index.html>))との関係を示しています。テキストの情報もこのように地図表示し、ハザード情報と比較することで、現状を視覚的に理解することができます。この図から、県全体で揺れの確率が最も高い静岡県で耐震改修が最も進んでいることがわかります。

●地震後の復興シナリオ作成に向けた中高層ビルの解体に関する分析

今後30年の間に東海地震、東南海地震は確実に発生すると推定されており、これらが発生した場合には栄～名駅エリアの古い中高層ビルは多数、相当の損傷を被るものと予想されます。これらのビルはその時点で既に街区に対し存在そのものが危険であり、震災後できる限り早く解体撤去されることが望まれます。

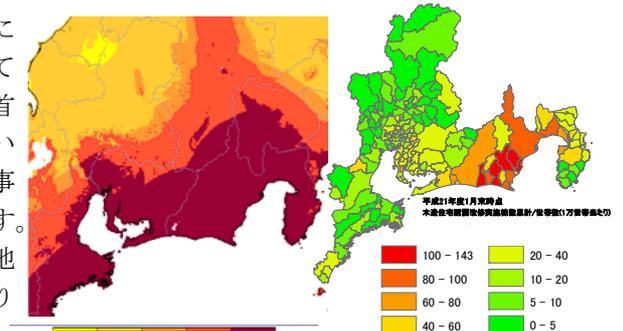
そこで、復興シナリオを作成していく上での一情報を提供するという立場から、平時において建て替えを前提として解体された名駅地区の中高層ビルの解体データを分析しています。図2は、名古屋市のある解体された中高層ビルの就労人員の推移を示しています。

●全国に分布する免震建物の現状分析

阪神・淡路大震災以降、免震建物は一般木造住宅も含め、その数は飛躍的に増加しました。しかし、今、その当時は十分に配慮がなされていなかった長周期地震動が大きな問題となっています。このような背景において、これまでに、建築された免震建物の数や建設場所、あるいはそれらの設計条件、等を整理・把握しておくことが、東海地震、東南海・南海地震等の長周期地震動に対する安全性を確認する上で非常に重要となります。図3は、これまでに評定を受けた免震建物数や設計クリアランス分布を長周期マップ(内閣府(<http://www.bousai.go.jp/>))と合わせて示しています。

参考文献:

- 池田政人、倉田和己、福和伸夫、護雅史、飛田潤: 地震災害対応に関する個人の意識と実際の地域対応力の差からみた防災体制の問題点、日本建築学会学術講演梗概集、pp. 241-242、2009. 8
- 福和伸夫、倉田和己、飛田潤、護雅史: 減災行動誘導のための地震ハザード・リスク情報の説明力向上に関する研究(その1) GoogleEarthを用いたハザード・リスク情報の相互運用、日本建築学会学術講演梗概集、pp. 209-210、2009. 8
- 曾我裕、福和伸夫、護雅史、飛田潤: 大地震後の中高層建物の解体に関する一考察 日本建築学会学術講演梗概集、pp. 981-982、2011. 8



(a) 今後30年で震度6弱の可能性 (b) 1万世帯当りの累計耐震改修実施棟数(H22年1月時点)

図1 耐震改修率とハザードマップとの比較

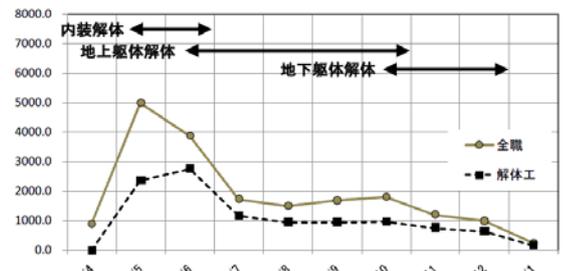
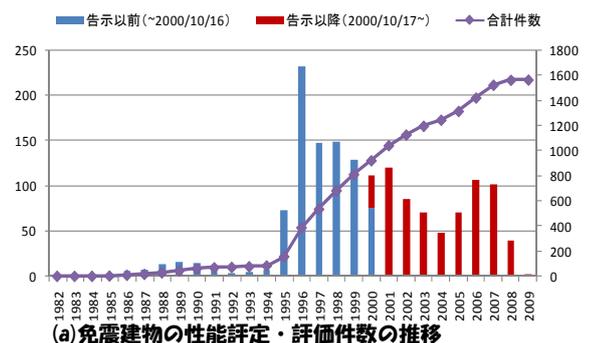
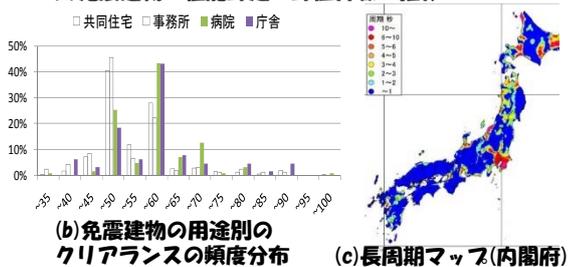


図2 解体工事における就労人員の推移(人日)



(a) 免震建物の性能評定・評価件数の推移



(b) 免震建物の用途別のクリアランスの頻度分布 (c) 長周期マップ(内閣府)

図3 全国の免震建物の件数や設計条件等の分析



歴史資料・地域情報の蓄積による地震危険度の説明性向上

東海地震・東南海地震はいつ発生してもおかしくない状況にあります。私たちの祖先も大地震で繰り返し被害を受けてきました。しかし、現代社会は、昔に比べて人口も飛躍的に増大し、住宅地が、台地上から低地へ、あるいは、切り盛りされた丘陵地、埋立地へと拡張されていったことから、災害に対する脆弱性が増し、被害も遙かに甚大になる可能性が非常に高くなっています。発生が危惧されている巨大地震に対して災害に強いまち・強い社会を構築するためには、国民一人ひとりが、地震災害を我が事と捉え、防災行動へと促す方法論の検討が不可欠です。

そこで、当研究グループでは、現代社会の災害脆弱性や地域の地震危険度を一般国民一人ひとりに分かりやすく説明するための研究をとして、地名と地盤の関係や浮世絵と地盤特性の関係、あるいは各種古地図、古文書の収集・分析などを行っています。

●名古屋市のバス停名分布と地盤の関係

地盤や地形の特徴は地名として残されている場合が多く、また、バス停は高密度に存在し、昔からの地名が残されている場合が多く見られます。ここでは、種々の文献を参考に、地名に関する漢字の意味を独自に解釈し、それらの地名と地盤の対応関係を用いて、名古屋市を対象にバス停名と地盤の関係を調べてみました(図1)。

●名所江戸百景描画地点の地形・景観変化と常時微動観測に基づく地盤震動特性の説明性向上

図2は、江戸時代と現在の変化を地図や浮世絵と写真で比較し、さらに地質図や微動計測結果と合わせることで、現在の東京都心部の脆弱性が浮き彫りになっています。

●関東地震の被害からみる現代都市の脆弱性の分析

図3は、1923年関東地震の推定震度分布と1、2階建のRC建物被害分布や現在の東証一部上場企業分布などを示しています。この図から、現代都市の脆弱性が見えてきます。

●各種古地図、古文書等、歴史資料の収集

現代社会の脆弱性を示したり、過去の地震災害から教訓を得るために、東海地方に関係のある古地図、古文書等、歴史資料を収集しています(写真1)。



写真1 各種古地図、古文書等、歴史資料の収集

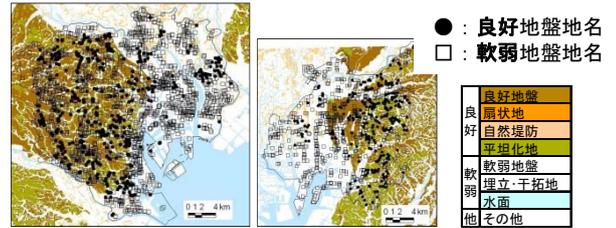


図1 東京都心部と名古屋市のバス停名分布と地盤

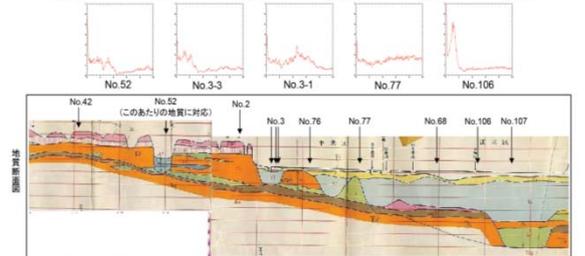
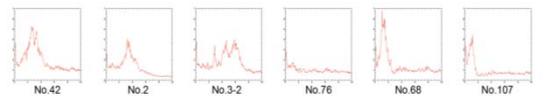
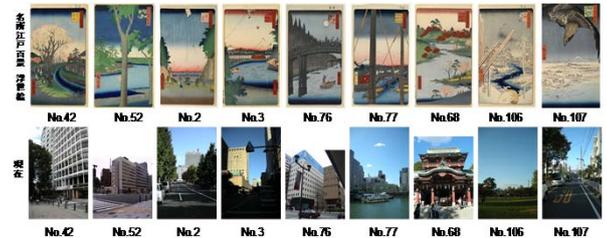


図2 江戸から東京への都市の変化と地盤の関係



図3 関東地震被害からみる現在の都市の脆弱性の分析

参考文献:
 河合真梨子, 福和伸夫, 護雅史, 飛田潤: 地震ハザードの説明力向上のための地名活用に関する研究—地形に由来する分類方法の提案と活用可能性の検討—, 日本建築学会構造系論文集, No. 636, pp. 409-416, 2009. 2
 林章二, 牧原慎一郎, 倉田和己, 福和伸夫, 飛田潤: 1923年関東地震の被害支援用ウェブGISの開発, 日本建築学会技術報告集, 第16巻, 第32号, pp. 97-100, 2010. 2
 林章二, 牧原慎一郎, 福和伸夫, 飛田潤: 建物被害調査資料に基づく1923年関東地震における鉄筋コンクリート造建物の被害に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, No. 648, pp. 251-260, 2010. 2

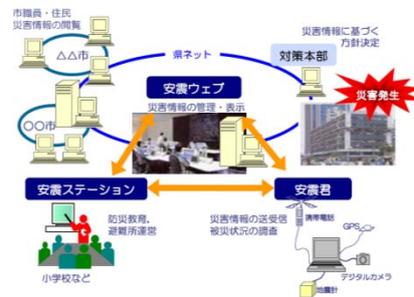


地域防災のためのシステム開発と実践活動

耐震化推進や地域防災力向上のためにはそれを実行する人の力が不可欠ですが、それらの活動を支える啓発のためのシステムや教材も非常に重要です。そこで、我々は、WebGISをプラットフォームとしながら様々なサブシステムや実際の教材などを連携させ、住民が地震対策の必要性に「気づき」「学び」「実践」することができる一連の仕組みを構築しています。合わせて、減災に向けた啓発活動を行っています。

●安震システムの構築

このシステムは、災害の独自性をふまえた情報の整理にむけ、ウェブGISベース、多様な立場による情報共有、様々なセンサーやカメラ映像などの統合、地域防災拠点やワークショップ支援機能など、その後の防災・災害情報システムの研究につながるアイデアを含んだシステムです(図1)。



●愛知県防災学習システム

このシステムは、文部科学省の公募事業「防災研究成果普及事業」の中で、県及び名古屋大学、名古屋市が連携実施した研究成果「地域防災力向上システム」を活用して整備したものです。このシステムでは、住民ひとりひとりがインターネット上で簡単に大地震の際の自宅の模擬映像をみたり、地域の防災情報等を得たりすることができます(図2)。

図1 安震システムの全体構成
(http://www.sharaku.nuac.nagoya-u.ac.jp/laboall/reports/2007_saigai/saigai-distr/kaken-saigai-all.pdf)

図2 愛知県防災学習システム
(<http://www.quake-learning.pref.aichi.jp/>)

●防災フェスタの開催

「防災フェスタ」は、2007年3月、市民・大学・企業・行政の協働によりスタートし、名古屋大学を会場として開催されました。2008年は港区と緑区、2009年は岡崎市、安城市、2010年は久屋大通り、2011年はテレビ塔周辺で開催されました(図3)。



図3 防災フェスタのちらしと当日の様子
(<http://www.sharaku.nuac.nagoya-u.ac.jp/event/bousaifesta/index.html>)

●あいち耐震まちづくり青少年啓発事業

愛知県では、小・中学生を中心とした青少年を対象に、地震から命を守るための「家の耐震化」、「家具の転倒防止」を主眼においた「耐震まちづくり」啓発活動を新たに提案し、これまでにその枠組みづくりや教材作り等の準備、試行を行っています。当研究グループも、本事業に参画しました(図4)。



図4 あいち耐震まちづくり青少年啓発事業(テキストの抜粋と授業の様子)
(<http://www.sharaku.nuac.nagoya-u.ac.jp/event/aic.html>)

●災害シナリオ体験アプリ: escape

このシステムは、震災に遭う前に震災のことを「学び、感じ、考えて」いただくためのツールで、大震災に遭遇したある家族の物語を絵本のように見ることができます。物語の途中ではその場面にあった解説もあり、地震に備えるためのエッセンスが詰まっています。

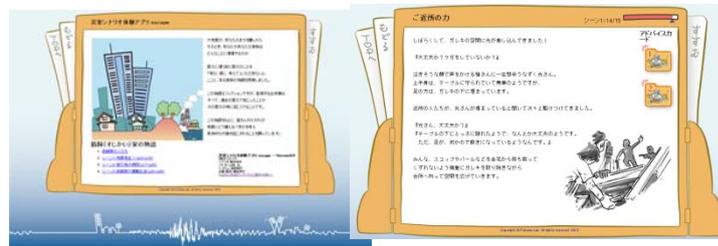


図5 災害システム体験アプリescape「筋飼(すじかい)家の物語」
(<http://www.sharaku.nuac.nagoya-u.ac.jp/escape/>)

参考文献:

- 福和伸夫、坂上寛之、花井勉、高橋広人、飛田潤、鈴木康弘: 耐震化を促進するための地域防災力向上シミュレータ、日本地震工学会論文集 第7巻、第4号、pp. 5-22、2007. 7
- 「双方向災害対応ネットワークによる災害情報インテグレーション」研究成果報告書 (文部科学省科学研究費補助金) (2007. 12. 10)
- 倉田和己、福和伸夫、飛田潤: 効果的な防災意識啓発を支援するためのWebGIS開発、地域安全学会論文集、No. 10、pp. 293-300、2008. 11
- 福和伸夫、倉田和己、飛田潤、護雅史: 減災行動誘導のための地震ハザード・リスク情報の説明力向上に関する研究 (その1) GoogleEarthを用いたハザード・リスク情報の相互運用、日本建築学会学術講演概集、pp. 209-210、2009. 8



最新のコンピュータ技術を駆使したソフト開発

耐震化率90%を目指した地震防災戦略が策定されたにも関わらず、耐震化の進捗は芳しくありません。その最大の原因は、多くの住民が、地震災害を「わがこと」ととらえていないことにあると考えられます。住民が地震の揺れを「わがこと」と感じられ、いつでもどこでも使える新たなツールが必要です。

また、地震観測システムの充実により、地盤や建物の詳細な揺れを分析したり、将来の地震動予測を行う技術が進展してきました。その一方で、情報量が増えたことにより、波形やスペクトルだけでは、挙動を正確に理解することが難しくなっているという現状もあります。そこで、当研究グループでは、このような問題を解決するべく、最新のコンピュータ技術を駆使したソフト開発を、民間企業と協力して行っています。

●バーチャル地震動体験システム：動くハザードマップ

このシステムは、室内外の写真やビデオを、プロジェクターで壁面や床面に「原寸大」で拡大投影し、ゆれの変位記録（観測、実験あるいは解析結果）に合わせて前後・左右・上下に動かすことにより、地震体感装置を手軽な機材で実現しています（図1）。



図1 動くハザードマップ

●携帯端末を用いたユビキタスの防災啓発

本システムは、将来の大地震に備えて、国民一人一人に、家の耐震化、家具固定などの防災啓発活動をいつでもどこでも簡単にできたり、災害時の効率的な情報収集ができるシステムを最新の携帯端末の用いて実現しようとするものです（図2）。



図2 携帯端末を用いたユビキタスの防災啓発

●震源断層の破壊から地震動の伝播までがわかるQuakeViewer

本システムは、震源モデルや伝播特性の重要性をビジュアルに示し、構造設計者の強震動への理解を促すことを目的とした、地震波形表示アプリケーションです（図3）。

●FLASHIによる建物振動挙動の見える化

市販ソフトの「FLASH」を用いて、実際の建物の揺れをアニメーションとして再現できるツールを開発しました。これにより、複雑な挙動も一目で理解できます。各観測点の波形はフーリエスペクトル、伝達関数なども表示できます（図4）。

参考文献：

- 倉田和己、福和伸夫、飛田潤、護雅史：減災行動誘導のための地震ハザード・リスク情報の説明力向上に関する研究（その2）自宅の揺れを体感できるバーチャル振動台システムの開発、日本建築学会学術講演梗概集、pp. 211-212、2009. 8
 護雅史、福和伸夫、飛田潤、倉田和己：最新のモバイル機器を用いたユビキタス的地震防災啓発と災害情報収集システムの可能性、日本建築学会学術講演梗概集、pp. 205-206、2009. 8
 廣野衣美、牧原慎一郎、福和伸夫、飛田潤、護雅史、小島宏章：多点多成分振動観測記録の効果的な分析を支援する動画アプリケーションの開発、日本建築学会学術報告集、第28号、pp. 423-428、2008. 10

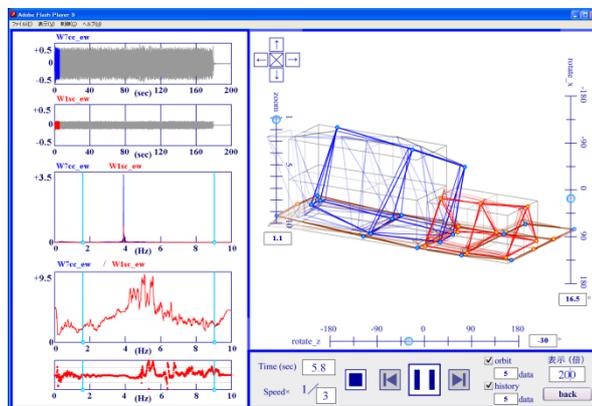


図4 FLASHIによる建物振動挙動の見える化

鶴ヶ野翔平、高橋広人、福和伸夫、護雅史：南海トラフでの地震の運動による強震動特性の差異の分析と強震動分析ツールの開発、日本建築学会学術講演梗概集、pp.95-96、2009.8

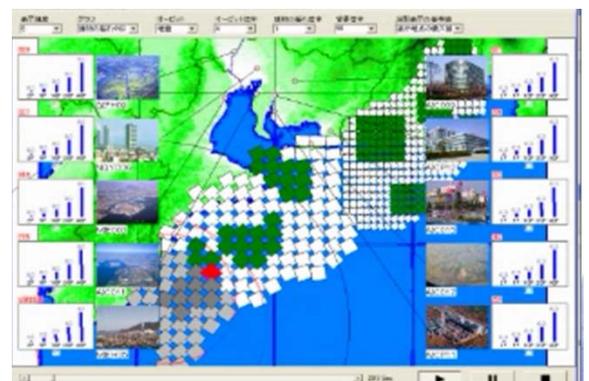


図3 震源断層の破壊から地震動の伝播までがわかるQuakeViewer



多様な建物での強震観測、微動計測、振動実験の蓄積

- その1 -

建物の耐震性能を適切に評価するためには、実際の振動挙動が模擬できるように適切に解析モデルを作る必要があります。しかし、実在する建物の振動挙動には未だ解明できていない部分が多いため、常に実測記録と比較しながら検討することが必要不可欠です。そこで我々は、鉄筋コンクリート造建物、免震建物、近代建築物、伝統木造建物など様々な建物を対象として強震観測、振動計測、振動実験を行ってきています。ここで得られた記録は、個々の建物として詳細に振動特性などを分析するだけでなく、データベース化して建物群と扱うことで、マクロ的な観点から耐震性能を評価することにも活用しています。

●名古屋大学東山キャンパスにおける強震観測・微動計測

中低層建物は都市域にも多く存在していますが、その振動性状や本当の実力は良く分かっていません。そこで、名古屋大学東山キャンパスでは、図1に示すように、中低層建物の鉄筋コンクリート造建物を中心に、9棟の建物で強震観測を行うと共に、多数の建物で常時微動計測を行い、建物の振動性状について詳細な分析を実施しています。



図1 東山キャンパスでの強震観測

●名古屋大学鶴舞キャンパスでの強震観測

名古屋大学鶴舞キャンパスは、地域医療の中核施設として高い安全性が望まれるため、2棟の建物に免震構造が採用されています。そこで、図2に示すように、免震建物を含む4棟の建物を対象として強震観測を行っています。観測は、建物の耐震性能評価のみでなく、地震時の健全性評価にもつながっています。



図3 耐震改修前後での強震観測・微動計測

●耐震改修前後での強震観測・微動計測

図3に紹介するように、名古屋大学キャンパス内では多くの建物で耐震補強が、また県内の公共建物では免震レトロフィット工事が行われています。これらの工事前後に振動計測を行うことにより、耐震改修による振動特性の変化を把握すると共に、地震時の健全性評価につながっています。

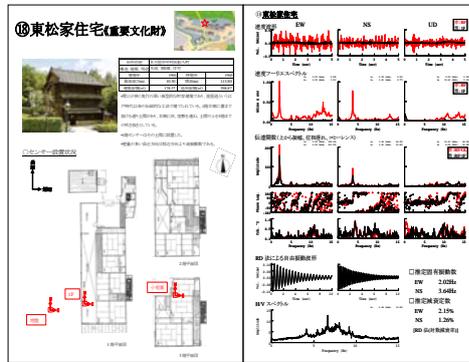


図5 近代建築物の微動計測
(博物館明治村の振動計測リーフレット:
<http://www.sharaku.nuac.nagoya-u.ac.jp/meijimura/>)

●小学校建物・地盤の微動計測

災害時には、重要な避難所となる名古屋市内の小学校について、建物や地盤の微動計測を実施し、地盤データについては、リーフレット(図4)や卓越周期マップ(<http://www.sharaku.nuac.nagoyau.ac.jp/laboFT/jiban/jiban.html>)として公開しています。現在、小学校建物の耐震改修が進められており、改修後の微動計測を実施することにより、その効果を確認することが可能です。

図4 小学校の地盤の微動計測例(名古屋
市地盤計測結果一覧(速報版)
<http://www.sharaku.nuac.nagoya-u.ac.jp/laboFT/jiban/Html/Index.html>)

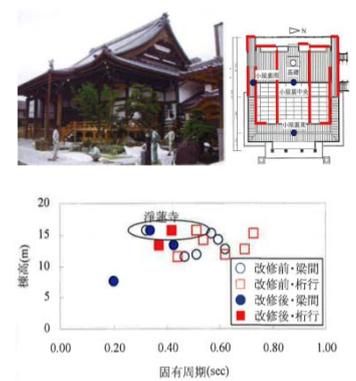


図6 伝統木造建物の微動計測

●近代建築物・伝統木造建物の振動計測

近代建築物の保存に向け微動計測を行い、耐震改修のためのデータベースを構築しました(図5)。伝統木造建物に対しては、耐震改修工事前後に微動計測や振動実験を行い、改修効果を評価しています(図6)。

参考文献:

小島宏章, 福和伸夫, 飛田潤: 強震観測・常時微動計測に基づく中低層建物の入力損失効果に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第587号, pp. 77-84, 2005. 1
榎原啓太, 福和伸夫, 飛田潤, 小島宏章: 観測された動特性を説明可能な振動解析モデルの構築, 日本建築学会技術報告集, 第25号, pp. 65-68, 2007. 6
藤井智規, 福和伸夫, 千賀英樹, 飛田潤, 吉田明義: 常時微動計測による博物館明治村の近代建築物の振動性状データベース構築, 日本建築学会技術報告集, 第25号, pp. 59-64, 2007. 6
藤井智規, 魚津忠弘, 福和伸夫, 飛田潤: 2007年能登半島地震による總持寺の被害と地盤探査・建物振動計測, 日本建築学会技術報告集, 第28号, pp. 443-446, 2008. 10



多様な建物での強震観測、微動計測、振動実験の蓄積

- その2 -

●E-ディフェンス実験による地震時の建物応答と家具挙動

東北地方太平洋沖地震でも長周期の継続時間の長い揺れにより、首都圏などの高層ビルで内装や家具の転倒が報告されました。東海・東南海・南海地震でも長周期地震動となることが予想され、高層ビルにおいて室内の安全性を確保することが重要になります。

E-ディフェンスにおける実大震動台実験の結果を基に、地震時の建物・床応答と室内家具挙動を分析しました。

図1に実験の試験体外観とモデル概要、図2に実験での家具の被害概要を示します。

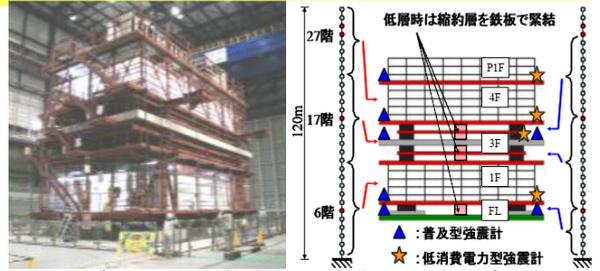


図1 E-ディフェンス実験の試験体外観とモデル概要

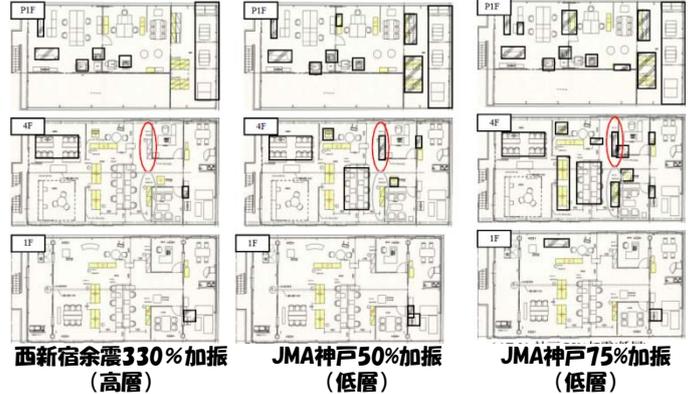


図2 実験での被害概要

●免震戸建住宅の振動台実験

東北地方太平洋沖地震では、ある地域で免震戸建住宅が想定以上に地盤と共振し、免震装置の許容変位を超える現象が確認されました。戸建住宅は敷地に余裕がなく、クリアランスも限られています。そのため、免震戸建住宅の変位制御は重要な課題となっています。

そこで、免震の変位制御方法について、実大免震住宅の振動台実験により、検討を行っています。図3は実験を行った変位依存型の変位制御装置です。

●テレビ塔の微動計測・人力加振実験

名古屋市テレビ塔は2011年7月に地上デジタル放送への完全移行に伴い電波塔としての役割をおえしました。テレビ塔は内藤多仲による設計で、1954年に日本で初めてのテレビ放送電波送信用集約電波塔として竣工しました。2005年には登録有形文化財としても指定され、電波塔としての機能を失っても保存されることが望まれています。そこで、テレビ塔の微動計測や振動実験より、固有振動数、減衰定数、振動モードなど振動特性の把握を行いました。(図4)

●超高層建物と地盤の共振現象

東北地方太平洋沖地震では、震源から約600km離れた大阪平野に位置する咲洲庁舎52Fにおいて最大片振幅130mの揺れが観測され、内装やエレベーターなどに被害が生じました。これは、建物と地盤が共振したためと考えられます。今後、発生する東南海・南海地震においては、震源から近いこともあり更に大きな被害を受ける可能性があります。そこで、過去の共振記録を分析し、地盤の震動特性と建物の動的振動特性の把握を試みました。その結果、推定した固有周期と減衰は設計値と比較してずれがあることが分かりました。(図5) モデルから共振現象を予測することは非常に難しいため、観測記録を積み重ね、詳細に分析していくことが求められています。

参考文献：
豊部立、飛田潤、福和伸夫、西澤崇雄：振動実験・強震観測に基づく名古屋テレビ塔の振動特性、構造工学論文集、Vol. 58B (2012. 3)



図3 変位依存型変位制御装置

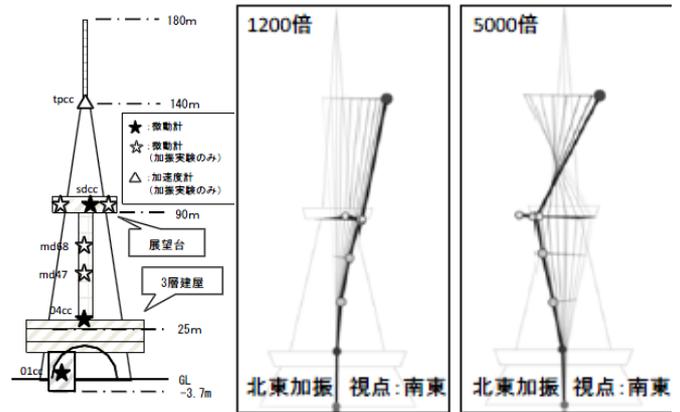


図4 テレビ塔建物形状・観測点と加振時立体振動挙動

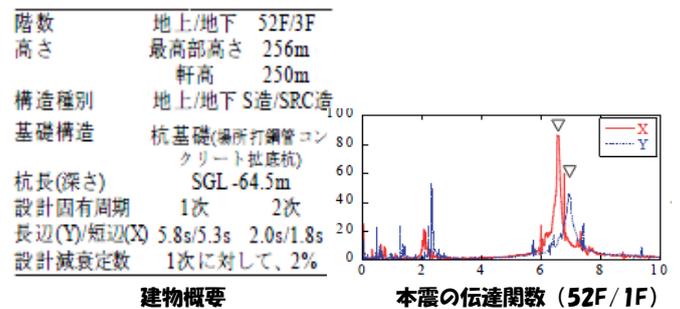


図5 咲洲庁舎の建物概要と東北地方太平洋沖地震の本震時の伝達関数

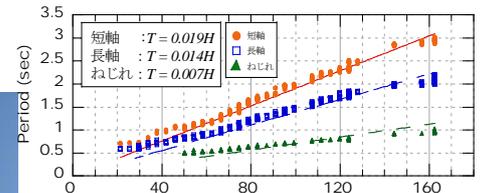


高層建物のライフタイムモニタリングと地震対策の促進

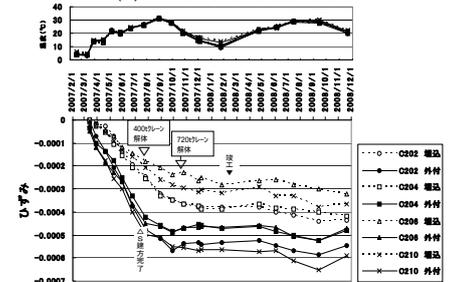
近い将来に巨大地震の発生が危惧されており、都市域は長周期成分を多く含んだ極めて継続時間の長い揺れに襲われると予測されています。このような背景から、構造物の長期にわたる劣化や地震による損傷など構造性能の変化を的確に把握する技術が求められています。そこで研究グループでは、高層建物の完成後のみならず、建設時から連続して観測を行う一方で、高層建物の解体工事に伴う振動特性の変化や、E-ディフェンス実験を通じて終局時の振動特性の把握や損傷評価を試みています。また、制震補強や室内対策の促進に向け、被害予測を行うとともに、被災シナリオ作成やBiCURIによる高層建物の床応答体感を行っています。

●新築高層建物の建設時の振動・軸力計測

実構造物の応力状態を実証的に解明するために、静的及び動的歪みが計測可能な光ファイバセンサを柱に設置すると共に、強震計を設置して建設時から継続的に計測を行っています。得られたデータを用いて、実建物と設計との相違の分析に基づく建物性能・構造システム・施工品質の評価及び、被災後の損傷程度の推定などへの活用に向けた研究を進めています(図1)。



(a) 固有周期と高さの関係

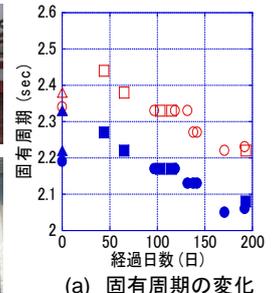


(b) 柱の軸歪みの変化

図1 建設工事の進行に伴う振動特性・軸歪みの変化

●初期超高層建物の解体時の振動・軸力計測

1970年代に建設された初期の超高層建物は長周期地震動に対する安全性の確認が極めて重要な課題となっています。そこで解体中の建物を対象として振動性状と軸力の変化を継続的に計測し、実建物の振動性状や応力状態を明らかにしようとしています。現在までに内装材の有無による固有周期の変化が捉えられています(図2)。

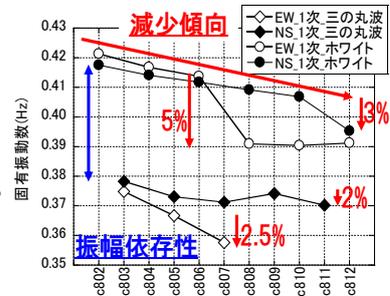


(a) 固有周期の変化

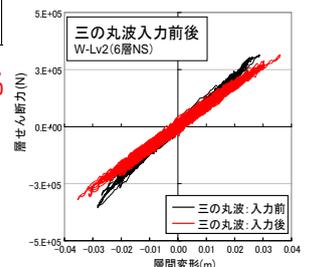
図2 解体工事の進行に伴う振動特性の変化

●E-ディフェンス実験に基づく損傷評価

高層建物の終局時の挙動を把握するために、Eディフェンス実験において強震観測と軸力観測を行いました。そして、各階に設置した強震計のデータを用いた履歴曲線から、損傷を評価する手法を開発しました。また、柱に設置した光ファイバセンサにより、軸変形と曲げ変形が分離可能なこと、動的軸変形から損傷を評価できる可能性があることがわかりました(図3)。



(a) 損傷に伴う固有振動数の変化



(b) 履歴曲線の変化に基づく損傷評価

●高層建物の地震被災シナリオ作成とBiCURIによる床応答体感

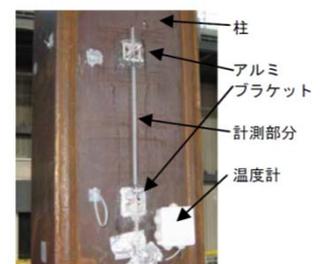
高層建物の歴史は浅く、現存する高層建物の多くは、これまで巨大地震を経験していません。従って、近い将来の発生が危惧されている東海・東南海地震や南海地震等でどのような被害を受けるのか、良く分かっていません。当研究グループは、制震補強や室内対策の促進に向け、被害予測を行うとともに、被災シナリオの作成や、BiCURIによる高層建物の床応答体感(図4)を行っています。



図4 BiCURIによる床応答体感



図3 E-ディフェンスでの超高層建物実験



(c) 光ファイバセンサーの設置

参考文献:

- 飛田潤, 福和伸夫, 松井政樹, 小島宏章: 建設時の継続的な振動観測に基づく高層建物の振動特性, 日本建築学会構造系論文集, 第625号, pp. 391-398, 2008. 3
- 飛田潤, 福和伸夫, 西澤崇雄: 光ファイバセンサーによる鋼構造試験体構築時の柱軸変形の計測, 構造工学論文集, Vol. 55B, pp. 577-582, 2009. 3
- 西澤崇雄, 大野富男, 飛田潤, 福和伸夫: 光ファイバセンサーによる高層建物建設時の柱軸力変化の計測, 日本建築学会技術報告集, 第31号, pp. 751-756, 2009. 10
- 平田悠貴, 飛田潤, 福和伸夫: 加速度計の記録に基づく高層建物の層間変形と損傷の評価, 日本建築学会東海支部研究報告集, pp. 225-228, 2010. 2



建物観測の新たな展開

建物の振動実測はこれまで数多く行われてきましたが、建物と地盤との動的相互作用の影響、立体振動挙動、建物下の土の挙動など十分には分かっていないことが多々あります。また、地震発生時の建物被害状況などを迅速に精度良く推定するためには、きめ細かい地震観測情報が必要となります。そこで当研究室では、新たな視点・手法を用いて建物観測を行うと共に、リプレースされた地震計の再利用も含め、建物や地盤観測点を出来るだけ増やすための試みを行っています。

●建物の建設時常時微動計測

建物観測は、竣工後から行われることが大多数ですが、建設時から継続的に観測することで、1棟の観測から複数の建物を観測することと等しいほど有用なデータを得ることができます。図1は、隣接建物建設時の観測から既存建物の固有振動数が変化することを捉えた例です。

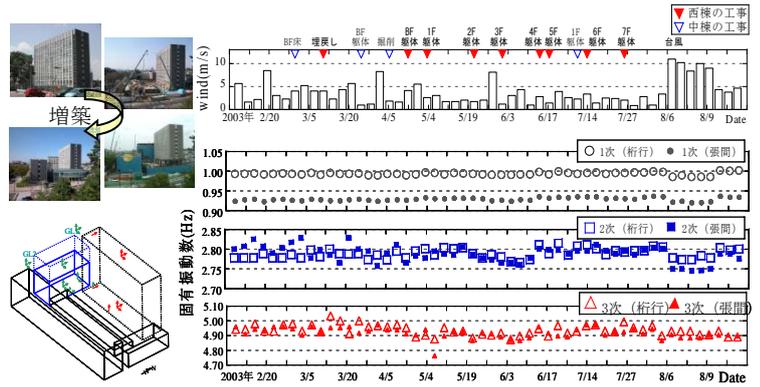


図1 建物の建設時常時微動計測

●超高密度観測・強制起振実験

建物の立体振動挙動を捉えるために、建物とその周辺地盤に高密度にセンサーを配置して強制起振実験を行いました。図2の実験からは単純な形状をした建物でもねじれやロッキングの挙動が場所によって異なること、図3の実験からは隣接建物間相互作用で2棟の建物がお辞儀して振動していることを明らかにしました。

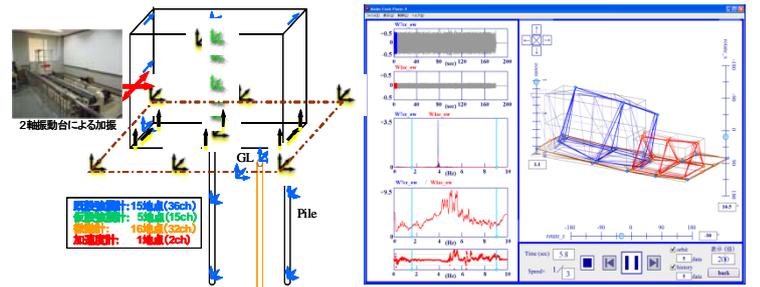


図2 超高密度観測・強制起振実験

図3 隣接建物の1階を強制起振実験した際の振動アニメーション画像

●免震建物の多項目・高密度観測、地盤改良効果測定

図4左上に示す場所でPS検層と浅層レーリー波探査を行いました。その結果、地盤改良した部分のせん断波速度が約400m/s程度に向上していることが確認できました。また、従来の強震観測は主に加速度計のみを使用していましたが、ここでは図5に示すように加速度・土圧・柱梁歪み・免震層鉛直変位・間隙水圧を観測しています。これまでに静的な土圧は降水量と相関があることが分かってきました。

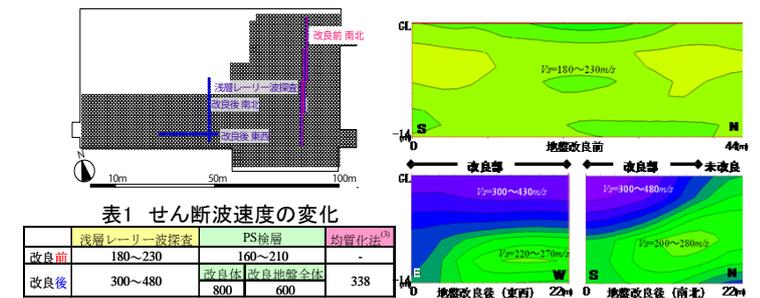


図4 地盤改良効果の測定

●一般観測協力者との連携：「Pネット」の展開

強震観測の事例は未だ十分ではありません。そこで、一般の方の協力を得て強震観測を普及させるために、高校の理科教諭と協力して地震計を学校建物に設置し、通常のメンテナンスやデータ収集をしています。同時に、地震計やデータを理科・社会科・防災などの教育に活用できるソフトウェアを提供し、教育と一体となった新たな強震観測を展開しています(図6)。

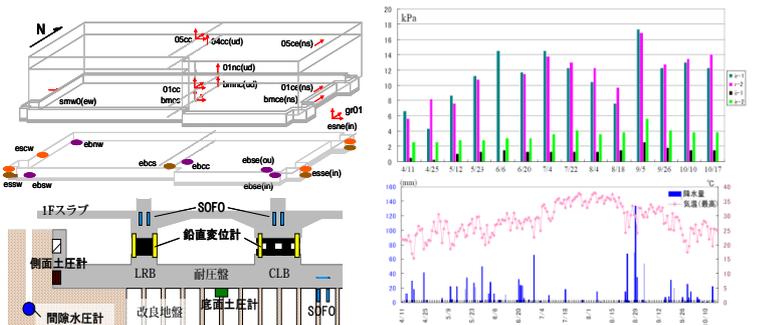


図5 免震建物の高密度強震・土圧・柱梁歪み・免震層鉛直変位・間隙水圧の観測

参考文献：

- 「戦略的強震観測及び地震被害分析に基づく中低層建物の地震時挙動及び耐震性能の解明」研究成果報告書(文部科学省科学研究費補助金)(2005.05.09) 廣野衣美、牧原慎一郎、福和伸夫、飛田潤、護雅史、小島宏章：多点多成分振動観測記録の効果的な分析を支援する動画アプリケーションの開発、日本建築学会技術報告集、第28号、pp.423-428、2008.10
- 後藤圭佑、護雅史、飛田潤、福和伸夫：平面的不整形な改良地盤に支持された免震病院建物の振動特性に関する研究、日本建築学会東海支部研究報告集、pp.233-236、2010.2

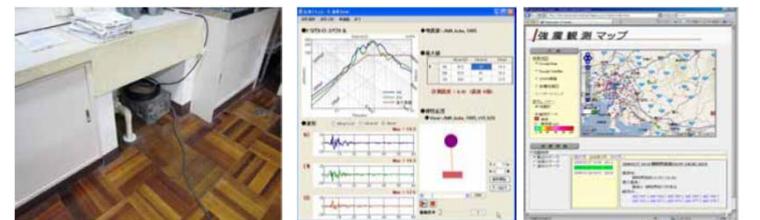


図6 一般観測協力者との連携による強震観測体制「Pネット」の展開

飛田潤、福和伸夫：旧型強震計の活用と一般観測協力者との連携による強震観測体制「Pネット」の展開、日本地震工学会、2008.11



発電所建物(火力・原子力)の高密度観測と相互作用解析

近い将来に発生が危惧されている東海・東南海地震では、火力発電所が立地する埋立地で、震度6弱の揺れ予想され、液状化の危険もあります。また、東海地震の震源域付近には、原子力発電所があり、2009年8月11日の駿河湾の地震では、非常に大きな地震動が観測されています。これらの発電所が被災し、その機能を停止してしまうと、我々の生活や災害復旧・復興にも大きく影響します。

そこで、当研究グループでは、大地震時でも発電所の健全性を維持するための研究を行っています。

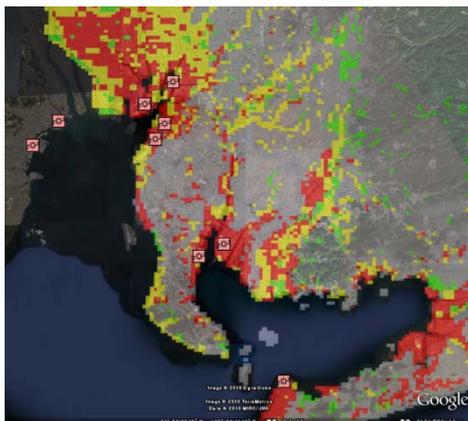


図1 Google Earthによる火力発電所の分布と想定東海・東南海地震における液状化危険度分布

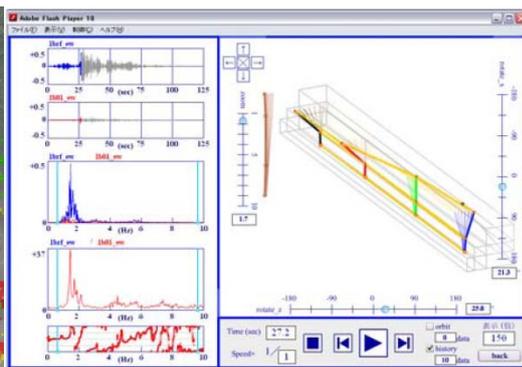


図2 FLASHによる火力発電所の揺れの再現

●火力発電所の振動特性分析や強震時の応答評価

図1は、Google Earthを用いて、火力発電所の位置(赤丸)に、想定東海・東南海地震の液状化危険度分布を重ね描いています。これから、揺れや液状化危険度が大きくなると推定されている沿岸周辺に発電所が立地していることがわかります。図2は、「FLASH」を用いた自主開発の立体振動分析システムにより、火力発電所で実施されている地震観測記録を用いて、実際の建物の揺れをアニメーションとして再現しています。また、容積法によるサブストラクチャー法に大規模群杭の集約法を新たに組み込んだ解析方法を用いて、杭基礎を有する発電所建物の大地震時の挙動を精度よく推定するためのモデル化手法についても検討しています(図3)。

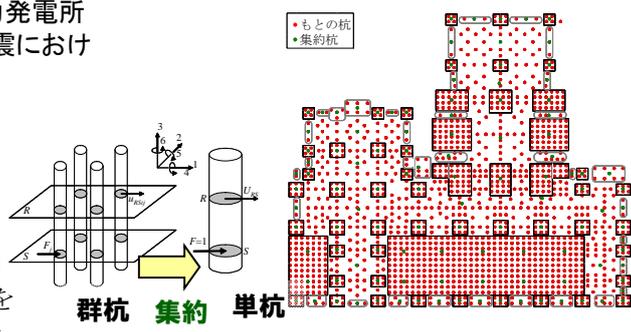


図3 大規模群杭基礎の評価

●原子力発電所で得られた大加速度記録の要因分析

図4は、原子力発電所で観測された複数の地震記録を用いた分析結果で、上が震源位置、下が自由地盤記録のオービットを示しています。これから、本震(2009年8月11日駿河湾の地震)と余震(1)で5号機側が3号機に比べて大きく揺れていることがわかります。また、図5は、図2と同様にFLASHによる原子力発電所や自由地盤の揺れの再現したものです。このアニメーションから、実際に生じている現象を視覚的に理解できます。

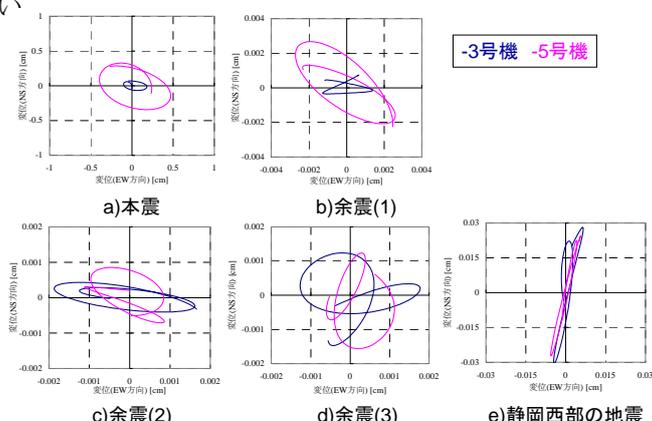
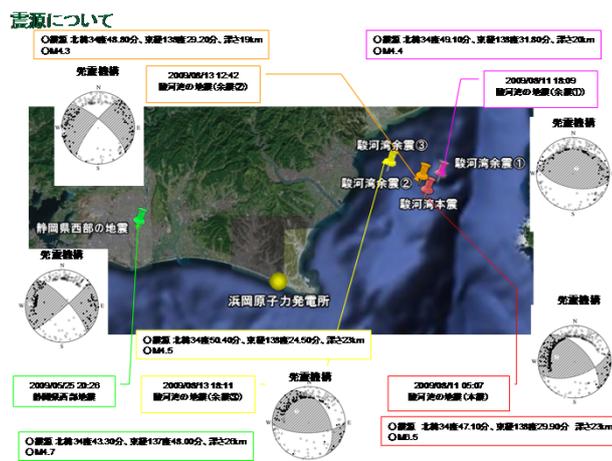


図4 原子力発電所で観測された複数の地震記録を用いた分析(上:震源位置、下:オービット)

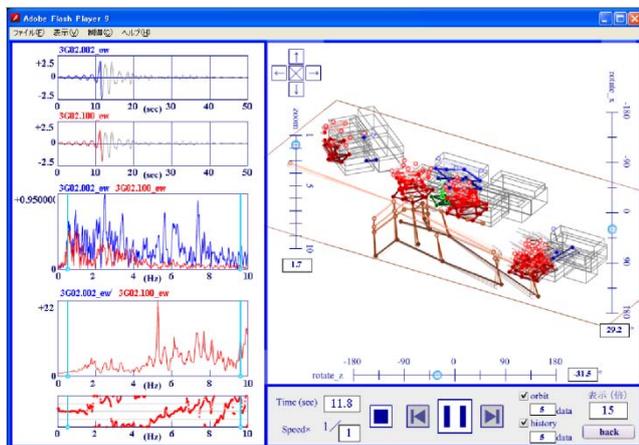


図5 FLASHによる原子力発電所や自由地盤の揺れの再現

参考文献:
文学章、福和伸夫、小島宏章、酒井理恵子: 大規模群杭の効率的な動的相互作用解析法、日本建築学会構造系論文集、第607号、pp. 109-116、2006. 9

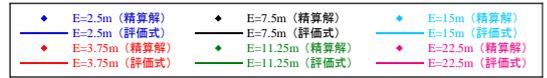


地盤-建物系の動的相互作用

建物は地盤に支持されて立っています。地震時には、揺れは地盤を介して建物に入力されるとともに、建物の揺れは、それを支持する周辺地盤を揺らすことで逸散していきます。これらの現象は、地盤と建物の動的相互作用効果と呼ばれています。動的相互作用効果に関する研究は、古くから行われていますが、研究グループでは、これまで検討が十分になされてこなかったねじれ入力動や根入れ基礎に対する基礎入力動の簡易評価法について検討しています。

●根入れ基礎に対するインピーダンス、及び基礎入力動の簡易評価法

2000年に導入された限界耐力計算では、動的相互作用効果を簡易に評価する方法が提案され、一般建物の設計にも利用可能となりましたが、水平動の入力損失効果のみを考慮し、回転入力の励起は考慮されていません。また、根入れを有する基礎のインピーダンスについても、簡便な評価法がありません。そこで、根入れ基礎のインピーダンスや基礎入力動に関する簡易評価法を提案し、その妥当性を検討しました。図1は、地表面基礎のインピーダンスを用いた評価式と精算法との比較結果です。また、図2は、最小二乗法による近似解、図3は、地表面基礎のインピーダンスを用いて重み付け平均（表面積で積分）して推定した基礎入力動の精算法との比較結果ですが、いずれもよく一致しています。



		$1/3 \leq E/b < 1$	$1 \leq E/b \leq 3$
K_{HH}	α	実部: 1, 虚部: 0.8	$-0.12 \times (E/b) + 0.12$
	β	実部: 0, 虚部: 0.8	0.65
K_{VV}	α	実部: 0.5, 虚部: 1.6	0
	β	実部・虚部: 0	0
K_{RR}	α, β	実部: $-0.18 \times (E/b)^2 + 0.62 \times (E/b) + 0.93$, 虚部: $0.2 \times (E/b) + 0.8$	

$$K_{HH} = K_{HH}^b + \alpha K_{HH}^b + \beta K_{VV}^b \quad (1)$$

$$K_{VV} = K_{VV}^b + \alpha K_{HH}^b + \beta K_{VV}^b \quad (2)$$

$$K_{RR} = K_{RR}^b + \alpha K_{HH}^b b^2 + \beta K_{VV}^b (E/2)^2 \quad (3)$$

●基礎形状の不整形性や基礎形式の混用がねじれ基礎入力動に与える影響

図4は、ねじれ基礎入力動に影響を与える基礎形状、杭径の組み合わせ等をまとめています。径の異なる杭の併用、あるいは一部に根入れがある基礎は、ねじれ入力動が励起されやすく、逆に、L字型の基礎や長さの異なる杭の併用では、ねじれ入力動があまり励起されなことがわかりました。このようなねじれ入力動は、免震建物において、建物端部の変位を増大させ、想定したクリアランスを上回る可能性があるため注意が必要です。

●東北地方太平洋沖地震における動的相互作用を考慮した建物応答評価

東北地方太平洋沖地震では、揺れの大きさに比べて建物の大きな被害は多くは報告されませんでした。この理由として評価していない余力や建物と地盤の相互作用が考えられます。そこで、東海地方での大地震建物被害を想定し、東海地方で標準的な事務所、工場、商業施設を対象に東北地方太平洋沖地震の観測波を用いて、弾性・弾塑性解析と動的相互作用を考慮したスウェイ・ロッキングモデルについて検討しています。(図5)

図1 根入れ基礎のインピーダンスの簡易評価法

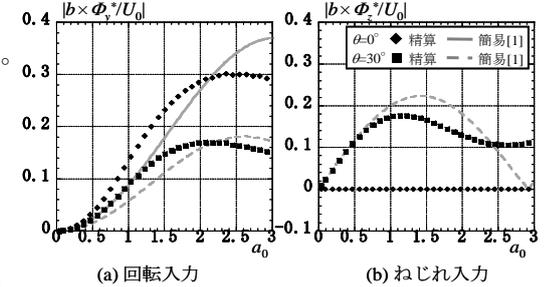


図2 根入れ基礎の入射角による基礎入力動の比較

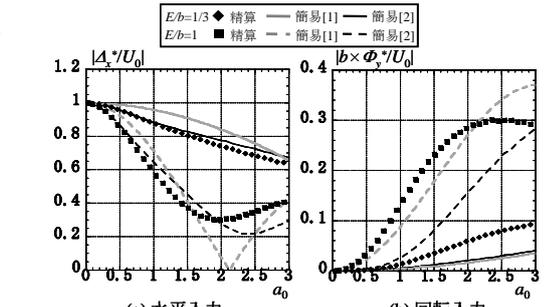


図3 根入れ基礎の埋込み深さによる基礎入力動の比較
 (1)事務所3階モデル (2)事務所8階モデル
 (3)事務所14階モデル (4)工場施設モデル (5)商業施設モデル

参考文献:

護雅史, 福和伸夫, 酒井理恵子. 文学章: 根入れを有する直接基礎における側面と底面の動的相互作用特性とそれらの重合による地盤ばねの実用的評価法の検討, 日本建築学会構造系論文集, 第626号, pp. 535-542, 2008. 4
 岩城梨佳, 福和伸夫, 護雅史: 杭基礎建物の振動性状に影響する諸要因についての解析的検討—杭の断面性能、基礎のねじれ振動について—, 日本建築学会東海支部研究報告集, pp. 193-196, 2009. 2
 彦坂智基, 岩城梨佳, 福和伸夫, 護雅史: 基礎形状の不整形性や基礎形式の混用が基礎入力動に与える影響 (その1) 三角形の基礎と一部に根入れのある基礎について, 日本建築学会学術講演梗概集, pp. 373-374, 2009. 8

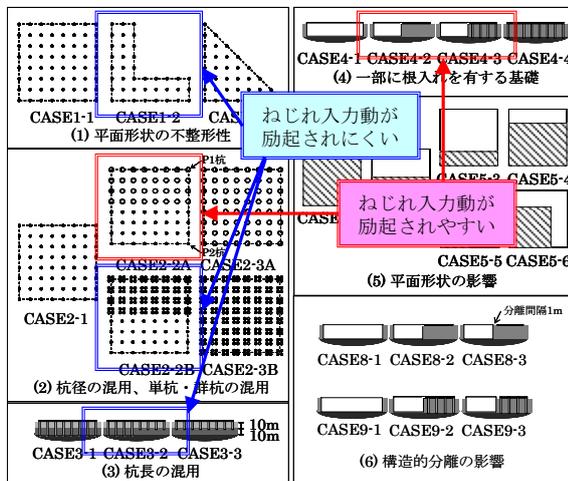


図4 基礎形状の不整形性や基礎形式の混用がねじれ基礎入力動に与える影響

(1)	50<	50<	6.2	13.5	50<	19.4	50<	50<	50<	43.1	36.3	38.9
(2)	50<	7.3	49.8	2.3	18.5	5.5	13.2	13.0	0.7	24.1	17.7	11.0
(3)	27.8	0.8	10.2	1.4	22.3	6.0	17.8	0.0	7.0	8.3	2.8	2.6
(4)	50<	50<	20.9	10.0	50<	50<	50<	50<	50<	50<	50<	50<
(5)	50<	7.7	50<	3.0	29.1	12.0	32.7	5.2	0.0	20.8	6.4	17.6

図5 各建物長辺モデルで最大値を持つ階の累積組成変形倍率



建物応答解析と被害予測

建物の真の性能設計を実現するためには、建物に入力する地震動とともに、建物の構造的なモデル化をより精度の良いものにする必要があります。近年の被害地震では、壁量の不足した木造建築物において、倒壊や大きな残留変形を残す被害が見られましたが、RC造やS造（体育館を除く）の建物には大きな被害が見られませんでした。これらの原因として、建物の保有する余力や、高密度な地震観測網、地震計の高精度化、あるいは地盤の非線形化や建物への基礎入力動といった地盤と建物の動的相互作用効果等が挙げられています。十分な結論に至っていないのが現状です。

そこで、当研究グループでは、近い将来に発生が危惧されている東海・東南海地震に対する精度のよい建物被害予測を行うための、地震応答解析法について検討し、本手法を用いた被害予測を実施して、事前対策の啓発に有効利用したいと考えています。

●建物耐力や滑り・浮上り等の非線形動的相互作用を考慮した建物実被害説明が可能な地震応答解析手法に関する研究

図1は、集合住宅に対する建物周期やIs値を用いた地震応答解析における骨格曲線の設定方法です。本検討では、集合住宅に特有の袖壁、腰壁を適切に評価しています。図2は、検討対象建物の例と、滑りや浮き上がりを考慮する場合の地盤ばね（水平ばねと回転ばね）のモデル化について示しています。このような解析を通じて、近年、話題となっている大加速度、小被害の要因の一端が明らかになる可能性があります。

●高機能社会における都市部に立地する一般中高層建物などの耐震性能評価

東海・東南海地震からこの地域を守るためには、まず、現存する建物の耐震安全性を再度確認していく必要があります。本研究は、いわゆる許容応力度設計法に従い設計された、一般中高層建物・生産施設・商業施設などの巨大地震に対する耐震安全性について、上部建物、表層地盤の非線形性や、地盤との動的相互作用効果を考慮した地震応答解析を実施しています。図2は、高さ60mの一般的な鉄骨造建物を想定した場合の地震応答解析結果を示しています。低層部で最大層間変形角が1/80、塑性率は2~3程度となっており、建物に大きな損傷を与えている可能性はありますが、倒壊するほどの応答には至らないことが予測されます。

参考文献：

- 白瀬陽一、竹生修治、平松悠、福和伸夫、宮腰淳一：耐震診断結果に基づく低層鉄筋コンクリート造学校建物の地震被害率の予測に関する研究、日本建築学会構造系論文集、第607号、pp. 63-71、2006. 9
- 榎原啓太、福和伸夫、飛田潤、小島宏章：観測された動特性を説明可能な振動解析モデルの構築、日本建築学会技術報告集、第25号、pp. 65-68、2007. 6
- 杉本浩一、護雅史、福和伸夫：低層RC造事務所建物の実被害に影響を与える諸要因に関する研究 非線形動的相互作用効果が建物応答に与える影響、日本建築学会東海支部研究報告集、pp. 217-220、2009. 2

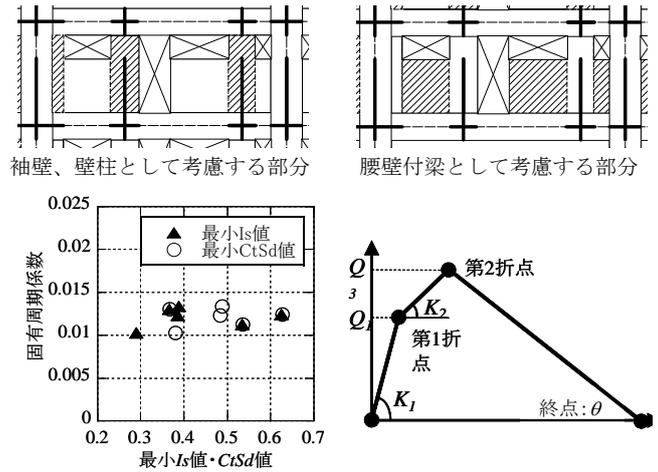


図1 学校・集合住宅に対する実被害が説明可能な地震応答解析モデル

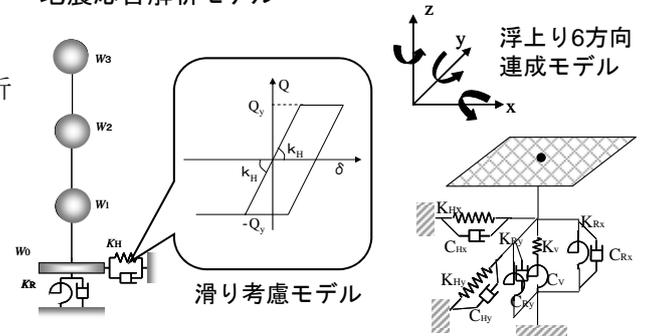


図2 滑りや浮き上がり等の非線形動的相互作用を考慮した大地震時の建物応答解析手法に関する研究

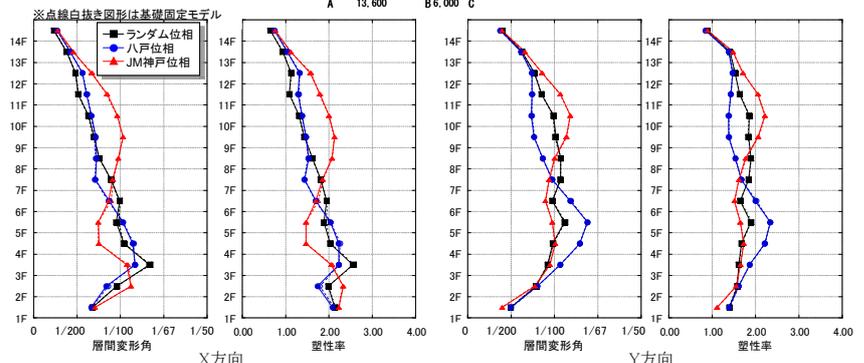
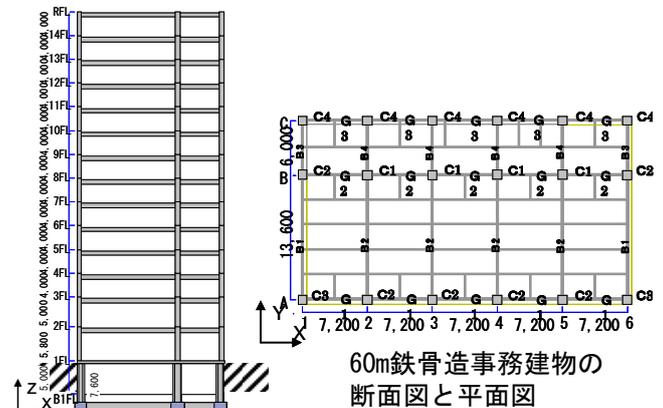


図3 高機能社会における都市部に立地する一般中高層建物の耐震性能評価



地域の地盤データ、地震動予測、強震観測、微動観測

地震時の揺れを適切に予測するためには、深部地盤から表層地盤に至るまでのデータを蓄積・整理し、適切にモデル化する事が重要です。また、多数の点で良好な地震記録が得られていることも必要です。そこで本研究グループでは、濃尾平野の深部地盤から表層地盤に至る精密な地盤モデルを構築すると共に、地震観測記録を統合管理するシステムを開発しました。また、ここで得られたデータを有効に活用する新たな強震動予測手法を開発しました。

●深部地盤モデルの構築

図1は、濃尾平野の深部地盤モデルです。濃尾平野では反射法・屈折法探査、微動アレイ探査が行われると共に、既往の大深度ボーリング、爆破探査、重力異常などの資料がデータベース化されています。研究グループでは、これらに加え、常時微動記録・地震記録から算出したH/Vスペクトルなども合わせて深部地盤のモデルを構築しました。

●強震記録による地殻変動の算定、モーメントマグニチュード即時推定

強震計で記録された加速度波形の積分によって各地の永久変位を算出することができます。そこで、東北地方太平洋沖地震における強震記録から地震時地殻変動の分布を算定し、また永久変位が地震モーメントを反映することを利用して、モーメントマグニチュードを推定しています。この方法は、強震動そのものによる推定ではマグニチュードが飽和してしまうような大地震に対しても有効で、地震速報・津波警報の高度化に資することができます。

理論的には、永久変位の大きさ u は地震モーメント M_0 に比例し、震源距離 r の2乗に反比例するため、図2右図において傾き-2の直線を引き、切片からモーメントマグニチュードを計算すると、 $M_w = 8.9$ が得られました。(図2)

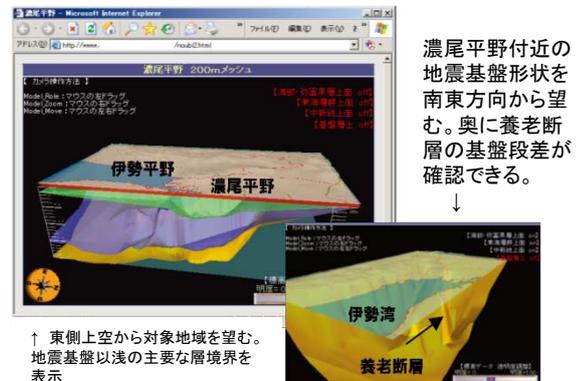


図1 濃尾平野の深部地盤モデル

●新しい手法を用いた高解像度強震動予測

図3に示すように、上述した地盤モデルを駆使した擬似経験的グリーン関数法という新しい予測手法を用いて、想定東南海地震に対する名古屋市内のきめ細かい揺れを推定しています。

●表層地盤モデルの構築

地表面の揺れを精度よく予測するためには、表層地盤のデータの蓄積が非常に重要です。研究グループでは、名古屋市が有する約4万本に至るボーリング記録をデータベース化すると共に、常時微動記録や地震記録から算出したH/Vスペクトルを用いて、詳細な表層地盤モデルを構築しました。図4は、上述のデータを用いて作成した名古屋市内全域のN値分布を示しています。

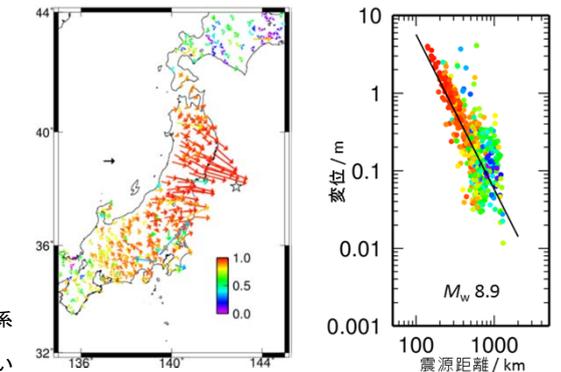


図2 東北地方太平洋沖地震におけるKik-netの記録より算出した永久変位と各観測点の永久変位量を震源からの距離に対してプロットした図

参考文献：

- 「濃尾地震における震裂波動線生成の解明」研究成果報告書 (文部科学省科学研究費補助金) (2003. 06. 17)
- 高橋広人、福和伸夫：地震動予測のための表層地盤のモデル化手法の提案と検証、日本建築学会構造系論文集、No. 599、pp. 51-59、2006. 1
- 高橋広人、福和伸夫、林宏一、飛田潤：地盤モデルに基づく2地点間の伝達関数と地震観測記録を用いた任意地点における地震動の推定、日本建築学会構造系論文集、第609号、pp. 81~88、2006. 11
- 強震記録による東北地方太平洋沖地震に伴う地殻変動の算定とモーメントマグニチュード即時推定の可能性、日本地震学会講演予稿集、p. 132、2011

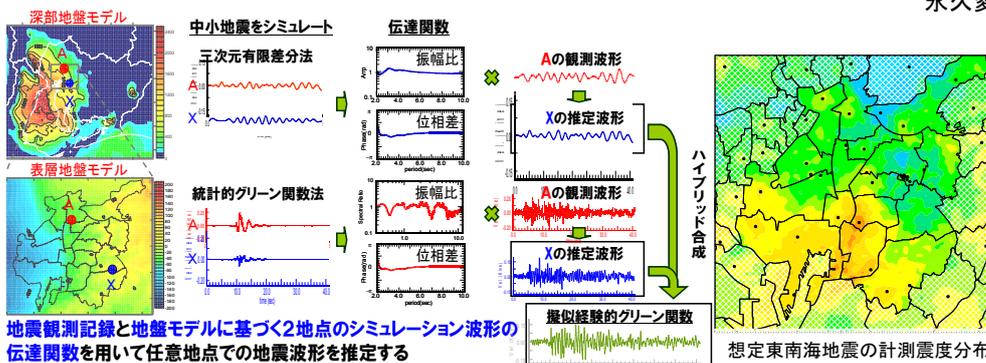


図3 擬似経験的グリーン関数法の開発と高解像度強震動予測

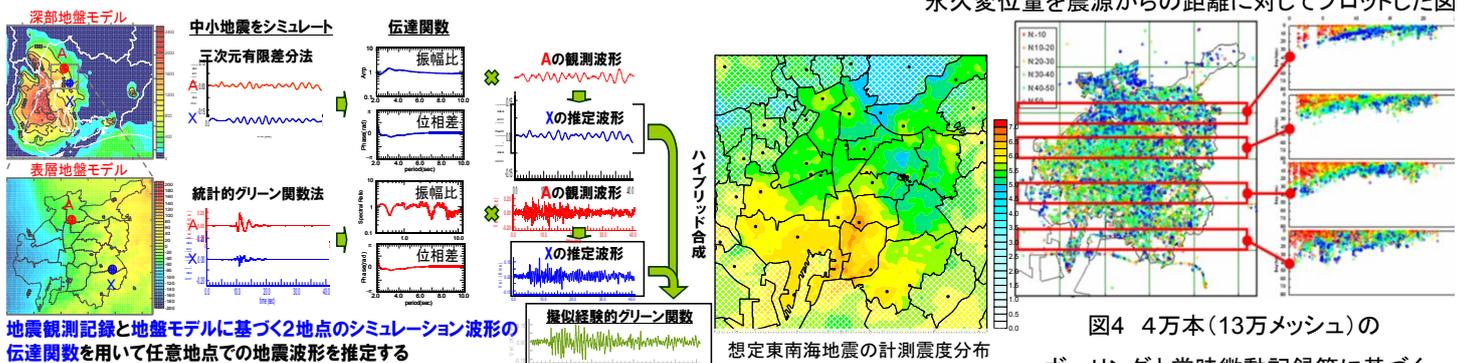


図4 4万本(13万メッシュ)のボーリングと常時微動記録等に基づく表層地盤構造のモデル化





名古屋大学大学院環境学研究科都市環境学専攻
地震工学・防災グループ（福和・飛田・護研究室）
Earthquake Engineering and Disaster Mitigation Research Group,
Nagoya University

〒464-8601 名古屋市千種区不老町
<http://www.sharaku.nuac.nagoya-u.ac.jp/>