

# 解析雑誌

Vol.42 2017.1

## Topics

【イベント出展】

- 自然災害の事前、直後、被災後に活かすシミュレーションとデータ分析技術

## Technical Reports

- 粘性ダンパーによる鉄骨造大型工場の制震補強設計
- 大規模台風時の高潮災害の防災対策への検討（その1：第二室戸台風の再現解析）
- 大規模台風時の高潮災害の防災対策への検討（その2：シミュレーションのタイムラインへの活用例）
- 3次元有限要素解析を用いたすべり安定性評価における基礎的検討
- 材端剛塑性ばねモデルと適合するRC部材のファイバーモデル化に関する検討
- 噴石衝突時におけるコンクリート版破壊シミュレーションに用いるパラメータの影響

*Journal of Analytical Engineering*

## エンジニアリング分野におけるデータ活用

エンジニアリング営業2部担当役員  
秋元 正博

明けましておめでとうございます。本号の主要なトピックとして、震災対策技術をまとめて紹介しております。詳細な紹介はご覧になって頂ければと存じますが、ここでは震災対策技術などのエンジニアリング分野におけるデータ活用について、個人的な見解を述べてみたいと思います。

センサー技術等の高度化、震災ビッグデータなる取組で、災害時にどんな現象が起こっているのかが、詳細に分かりつつある。それらの効果・効用は魅力的で、社会的な意義や期待も大きい。そのような流れの中、様々なデータプラットフォームが出来つつあるが、それらが効果的に運用されているという話はあまり聞かない。

事実、国際データマイニング会議（MoDAT）では、Webページにメタデータを羅列するだけでは異業種のデータのシナジーからイノベーションが誕生するようなことはなかなか起きないと問題意識を共有するに至っている。問題は、どのようにすればデータ価値の発見・創造に結びつくようなコミュニケーションを生じさせるかであるとの認識から、データ市場デザインワークショップが開催され、データ間の関係性の可視化、コミュニケーション、データ共有に至る人々の動機づけなど多視点から議論が展開されている。

要は、豊富なデータがあれば何でもできるというビッグデータあるいはAI礼賛思考には限界があり、人間の目的意識（これは人間の欲求や嗜好などが関係しているのだと考える）に沿ったデータ活用を進めていくことが重要なのではないかと思う。

目的志向でデータを使いこなすという観点では、本誌の内容であるシミュレーション技術の活用が考えられる。漠然とデータを活用できそうと考えていても事は始まらず、遠回りのようでも、ひとつひとつデータの関係性などを論理的に考え、組み立てていくことが近道だったりする。その一連の思考の仮説検証をパワフルに駆動させるツールがシミュレータと考えることが出来る。

これまで、我々がサービス提供してきた様々な自然現象を対象とした数値解析サービスは、対象となる問題を要素に細分化して基本方程式を作り、これを再構築し、与えられた境界条件のもとで問題を解くというサービスであった。これらのサービスは、目的関数を明瞭かつ少数に設定することが可能であった為に成立していたと言える。

しかし、世の中の問題はより複合的・システム的に捉える必要性が増しており、かつトランスサイエンス問題（科学に問うことは出来るが科学が答えることが出来ない問題）としてみる必要性が増していると考える。本号 Topic 1 では、そのような観点をも含んだマルチエージェントシミュレーションの紹介もなされているが、震災対策を人や社会までも含んだシミュレーションを行うことにより、より良い社会システムのあり方を考えるような動きも更に強化していきたい。

私たち構造計画研究所は、最新かつ多様なエンジニアリング技術を活用することで、今後も震災対策や防災に対する貢献を進めて参る所存です。変わらぬご指導、ご鞭撻のほど、どうぞ宜しくお願い致します。

# 解析雑誌 Vol.42 2017.1

- 
- 巻頭言** 『エンジニアリング分野におけるデータ活用』 02  
エンジニアリング営業2部担当役員 秋元 正博
- 

## Topic 1

- 自然災害の事前、直後、被災後に活かすシミュレーションとデータ分析技術 04
- 

## Technical Report

- 粘性ダンパーによる鉄骨造大型工場の制震補強設計 10  
梁川 幸盛、新美 仁氏、井戸田 秀樹氏
  - 大規模台風時の高潮災害の防災対策への検討（その1：第二室戸台風の再現解析） 14  
安重 晃、落合 努、荏本 孝久氏
  - 大規模台風時の高潮災害の防災対策への検討（その2：シミュレーションのタイム ラインへの活用例） 16  
落合 努、安重 晃、荏本 孝久氏
  - 3次元有限要素解析を用いたすべり安定性評価における基礎的検討 18  
岡村 航、三橋 祐太、渡辺 高志、内山 不二男
  - 材端剛塑性ばねモデルと適合するRC部材のファイバーモデル化に関する検討 22  
鈴木 壮、梁川 幸盛、宇佐美 祐人、木村 まどか
  - 噴石衝突時におけるコンクリート版破壊シミュレーションに用いるパラメータの影響 24  
正月 俊行、佐々木 寿氏、成毛 志乃氏、梁川 幸盛、渡辺 高志
- 

## Editor's Note

- From Editors 27

Journal of Analytical Engineering

## 自然災害の事前、直後、被災後に活かすシミュレーションとデータ分析技術

想定外の自然災害が大きな被害を招くことは、過去の被災経験から深く認識されてきました。しかし最近も、震度7クラスが三日間に二回発生した熊本地震や、同じく熊本・大分、あるいは東北で発生した「今までに経験したことがない豪雨」、さらには強風により一気に延焼範囲が拡大した新潟の火災など、いくつかの新たな想定外に見舞われ、大きな被害を受けることとなってしまいました。

災害の事前想定は難しい課題ですが、過去の被災現象の分析や数値解析などを活用した予測に基づいた対策を積み重ねることで、「想定内」の枠を広げることは可能です。また想定外かどうかに関わらず、災害発生直後に迅速で正確な現状把握と意思決定を行う仕組みが有効に働けば、被害を最小限に留めることに繋がります。

ここでは、それらを支援するために、我々が自然災害の事前、直後、被災後に、数値解析やシミュレーション、データの分析やICT関連技術をご提供してきた事例をご紹介します。

### (1) 災害の事前想定

地震の発生予測には未だ確立された手法がありませんが、着目地域に発生する可能性がある地震動の評価については、用途に応じて提案、実用化されている手法がいくつかあります。当該サイトの地震環境や想定地震シナリオから基盤のターゲットスペクトルを設定する設計用の入力地震動作成手法や、震源断層から伝播経路、表層地盤までモデル化し、理論的、統計的、経験的手法などを用いる地震動シミュレーションなどです（図1）。

また想定海洋地震に伴う津波の発生・伝播と、沿岸地域への浸水、河川遡上などをシミュレートする技術も実用的に用いられています（図2）。

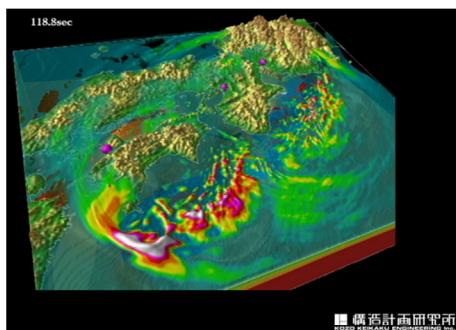


図 1 三次元地盤モデルを用いた南海トラフ  
を想定した地震動シミュレーション

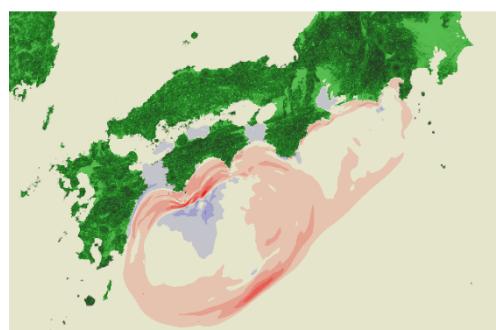


図 2 南海トラフ津波シミュレーション

近年は、地球温暖化の影響で日本列島を襲う台風の規模が高まっており、さらには火山の噴火も相次いだことなどから、地震以外の、高潮（図3）、強風、土砂崩れ、土石流、河川氾濫、火山噴火（図4）などの現象を数値解析で事前想定するケースも出ています。

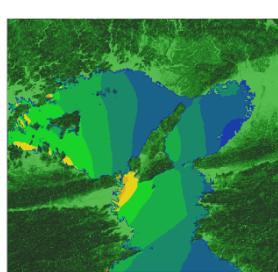


図 3 台風による高潮のシミュレーション解析

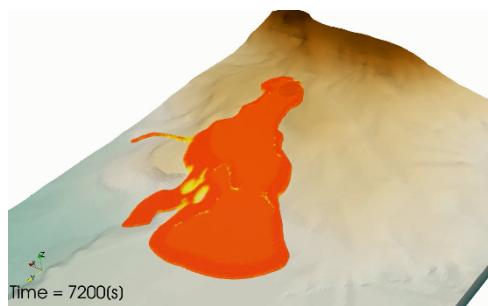
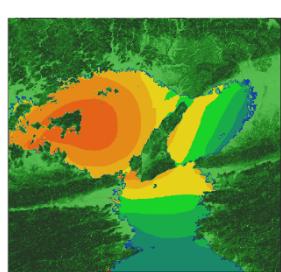


図 4 粒子法による三原山の噴火に伴う溶岩  
解析シミュレーション

これらの自然災害現象が構造物に荷重として作用した場合に、構造物がいかに挙動し損傷を受けるかについては、従来から行われてきた地震応答解析（図5）のほか、津波波力（図6）、竜巻他の強風、漂流物や噴石、落石の激突（図7）、爆風などを動的荷重として作用させる構造解析的検証も行われています。

構造物軀体のみならず、建物内に収容されている家具の地震時挙動（図8）や、サーバーコンピュータラックなどのファシリティの耐震性能を、数値解析を用いて検証した事例もあります。

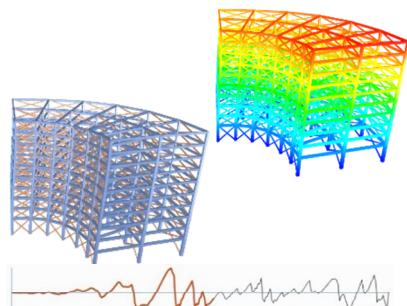


図5 建築の地震応答解析

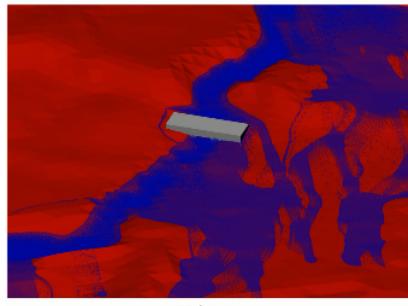


図6 橋梁に作用する津波作用力評価シミュレーション

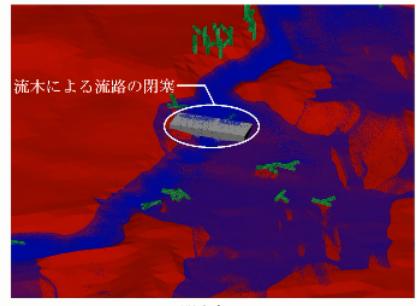


図7 粒子法による地形を考慮した土石流の解析シミュレーション

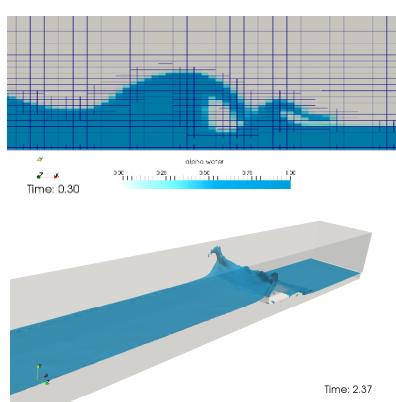


図6 橋梁に作用する津波作用力評価シミュレーション



図8 超高層建物上階のオフィスにおける地震時の家具の挙動評価  
(東京工業大学翠川研究室との共同研究)

構造物や収容物のようなハードばかりでなく、想定災害時に避難する人や車の挙動もシミュレーションを用いて検討されています（図9、図10）。これには津波や河川氾濫などの災害現象シミュレーションと構造解析のほか、マルチエージェントシミュレーション（状況の変化や相互影響によって変化する、不確実性の高い人の判断や行動を模擬する）技術を併用しています。評価結果は、避難計画など地域の災害時施策や防災施設の設置検討、住民の防災学習などに活用されています。

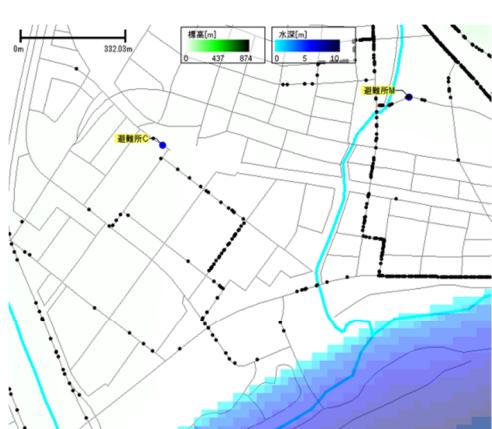


図9 想定津波の避難シミュレーション

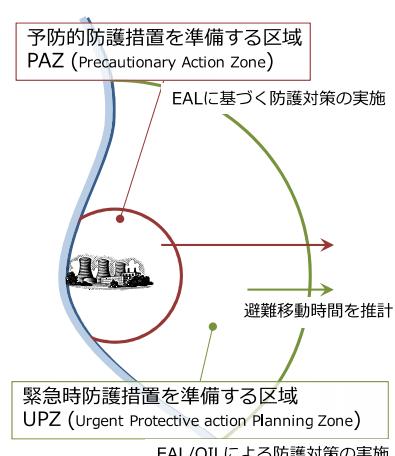


図10 避難時間推定(ETE)に用いられる避難シミュレーション

## (2) 災害発生直後の被害推計と遠隔地コミュニケーション

災害時に人的・財的な被害を最小限に抑えるためには、災害の発生直後の迅速かつ適切な意思決定が重要です。これを実現するため管理対象の地域や施設群の地震発生直後の情報（震源、震度分布、地震計記録などの公開情報のほか、独自計測している施設のセンサー情報など）を緊急収集し、短時間の内に被害推計を行って可視化するシステム（図 11）の整備を支援しています。

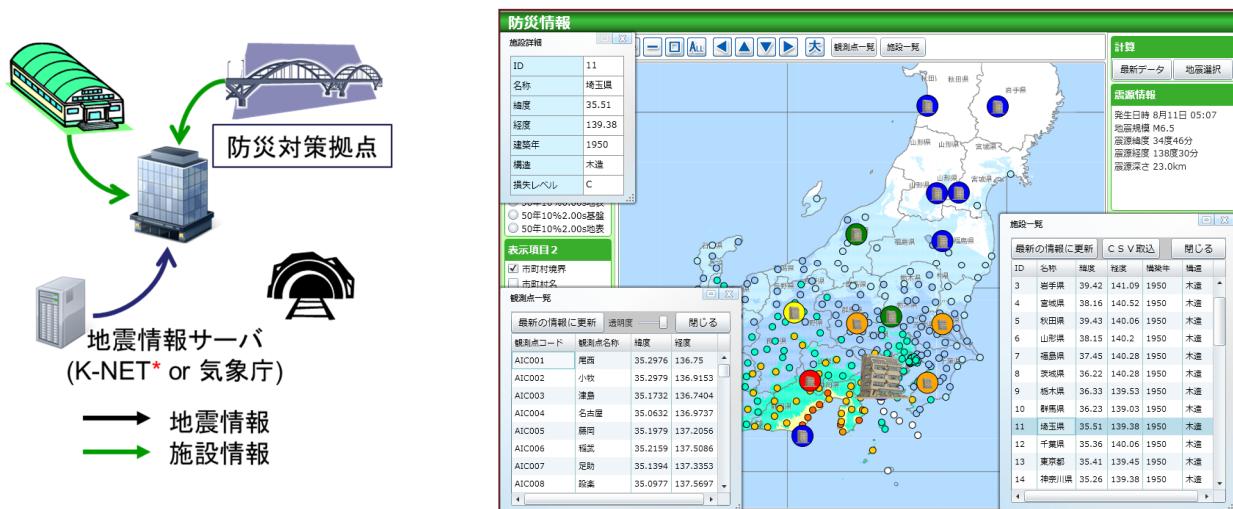


図 11 緊急収集情報と意志決定に必要なシミュレーション技術とシステム

また緊急意思決定によって救援や復旧現場に作業員が赴いた後は、対策本部と現場の情報コミュニケーションも重要となります。臨場感を持って現場の状況を共有するために、通信技術と様々な端末デバイスを組み込んだ遠隔地コミュニケーションシステム（図 12）の構築も支援しています。

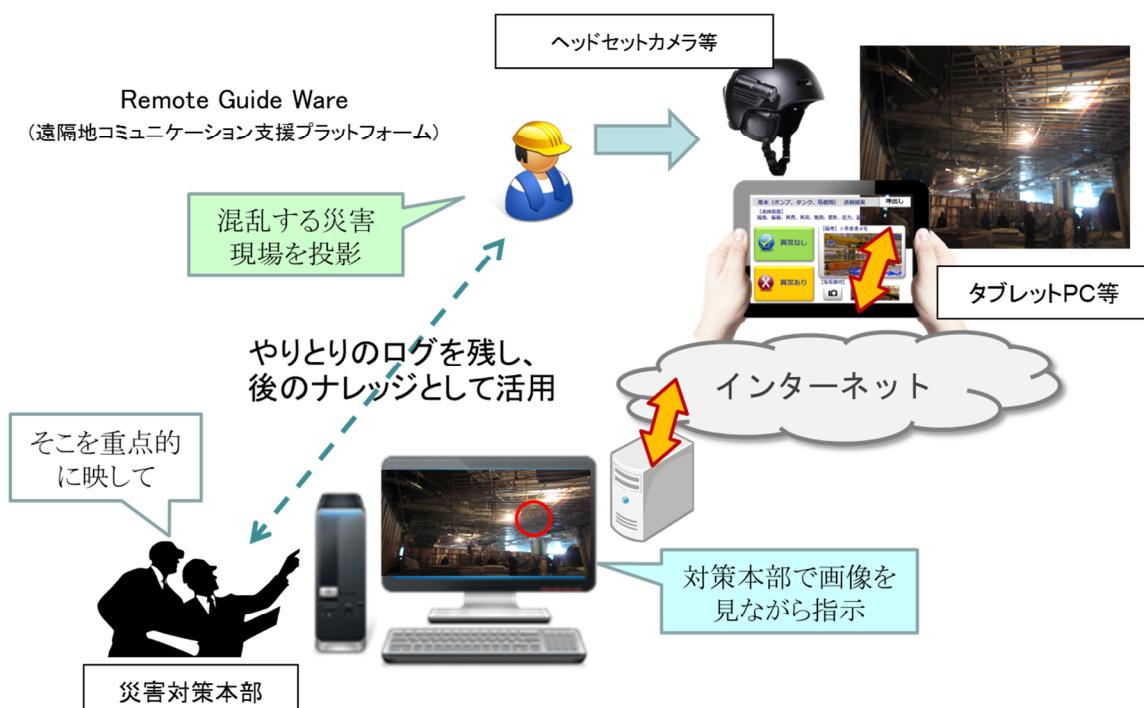


図 12 災害発生直後の現場と対策本部の遠隔地コミュニケーションシステム

### (3) 被災調査後の現象再現

災害現象自体が想定外であった場合、あるいは被災調査の結果、説明し難い不可解な構造物の損傷が見られた場合は、可能な限り被災状況に関する情報を集め、それらを基に数値解析等を用いて現象の再現を試みる損傷メカニズム検証も行われています(図13、図14)。実際に経験したことを事後には全て「想定内」とし、同じ被害を再び発生させないために必要なことです。

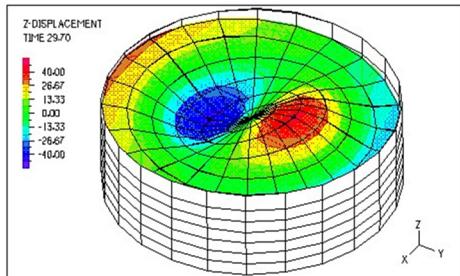


図 13 スロッシング現象の再現解析

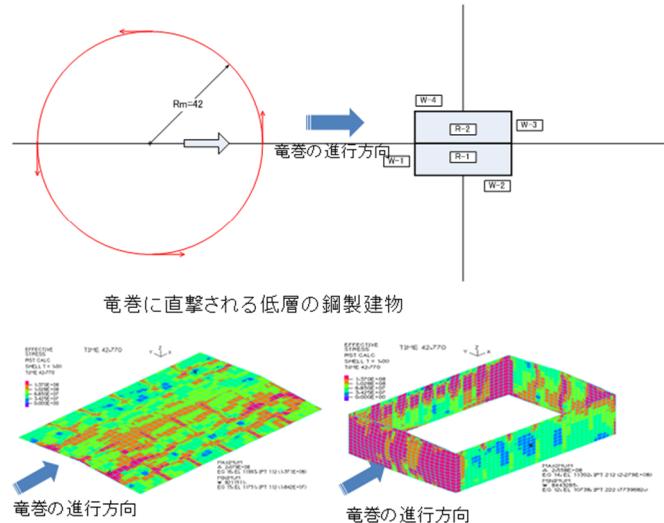


図 14 竜巻による被害の再現解析

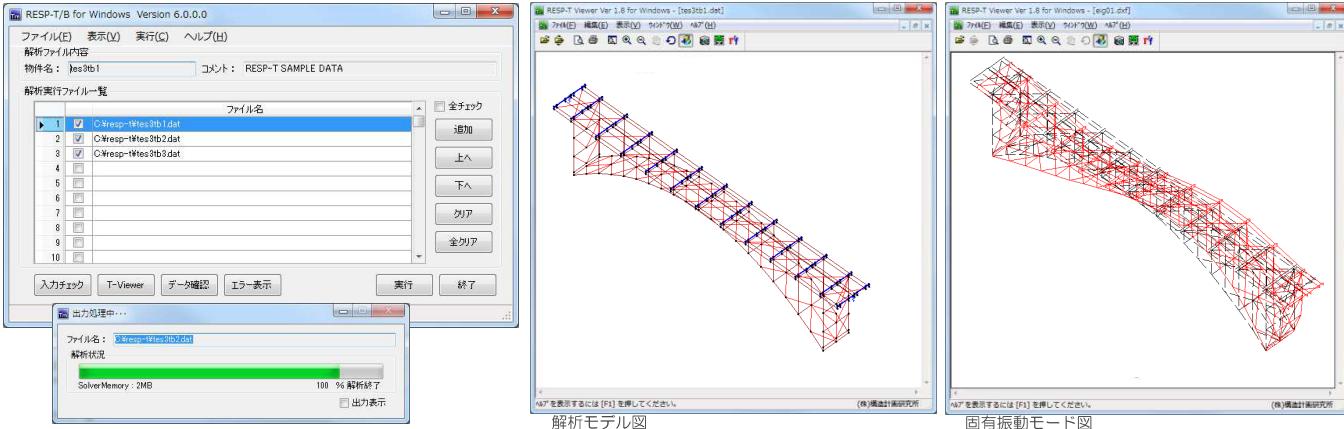
来る 2017 年 2 月 2 日(木)～3 日(金)開催の震災対策技術展(パシフィコ横浜)に出展いたします。そこで、ここまでに紹介しましたシミュレーションやデータ分析技術について、ブースで展示するほか、セミナーも企画しております。皆様のご来場を心よりお待ちしております。

#### ■イベント開催のご案内

#### 第21回「震災対策技術展」横浜

|             |                                      |
|-------------|--------------------------------------|
| 会期          | 2017年2月2日(木)～3日(金)                   |
| 会場          | パシフィコ横浜                              |
| 主催          | 「震災対策技術展」横浜 事務局／エグジビション テクノロジーズ 株式会社 |
| 出展者<br>セミナー | 自然災害の事前、直後、被災後に活かすシミュレーションとデータ分析技術   |

あらゆる土木・建築構造物に対応する3次元静的・動的複合非線形解析プログラムです。  
公的研究機関、大学、建設会社、設計コンサルタント等多数の導入実績と豊富な使用実績に裏付けられた信頼性を有し、  
充実したサポート体制による高い信頼度を持った製品です。



- **相関モデル(M-N、M-M、M-M-N)** 時々刻々と変化する軸力に対して、対応する曲げ耐力を計算し、剛性変更の制御をすることが可能
- **幾何学的非線形対応** 修正ラグランジュ定式化による幾何学的非線形を考慮可能
- **様々な復元力モデルに対応** 硬化則型を始め、さまざまな復元力を使用することが可能
- **粘性減衰力モデル** 質量比例型、剛性比例型(部材別指定可)、Rayleigh型(部材別指定可)、モード別、ひずみエネルギー比例型が考慮可能

## 適用事例

道路橋、鉄道橋、地中構造物、上下水道施設、河川構造物、港湾施設、電力施設  
プラント構造物、高層建築物、免震・制振構造物、鉄塔

## 解析機能

初期応力状態作成、静的解析<sup>(1)</sup>(荷重増分法、変位増分法、弧長増分法、  
強制変位法)、固有値解析、動的解析(モード合成法、直接積分)、座屈固有値解析  
\*<sup>(1)</sup>荷重増分と強制変位の同時作用が可

## 要素

トラス要素<sup>(1)(2)</sup>、ピーム要素<sup>(1)(2)</sup>、材軸直交分割要素<sup>(1)(2)</sup>、バネ要素<sup>(2)</sup>、  
剛域付き4点支持バネ要素<sup>(2)</sup>、剛域付き2点支持バネ要素<sup>(2)</sup>、MSS要素<sup>(2)</sup>、  
平面ひずみ要素<sup>(1)(2)</sup>、平面応力要素<sup>(1)(2)</sup>、板要素、減衰要素<sup>(2)</sup>、  
剛域付き4点支持減衰要素<sup>(2)</sup>、剛域付き2点支持減衰要素<sup>(2)</sup>、Maxwell要素<sup>(2)</sup>  
\*<sup>(1)</sup>幾何学的非線形考慮可 \*<sup>(2)</sup>材料非線形考慮可

## 復元力特性

逆行型、武田型、スリップ型、JR総研RC型<sup>(1)</sup>、JR総研SRC型<sup>(1)</sup>、辻モデル、  
岡本型、D-Tri(電共研案)型、武藤型、標準型、深田型、原点指向型、  
最大点指向型、標準型テトラリニア<sup>(1)</sup>、原点指向型テトラリニア<sup>(1)</sup>、  
最大点指向型テトラリニア<sup>(1)</sup>

\*<sup>(1)</sup>最終勾配考慮可

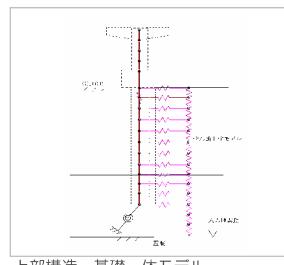
## 特殊復元力特性

D-Tri型、ひび割れ域剛性低減型、バイリニアスリップ型、D-Tri(電共研案)型、  
3次関数逆行型、歪み依存型バイリニア型、高減衰積層ゴム修正バイリニア型、  
Ramberg-Osgood(hardening考慮)型、(株)ブリジストン船入り積層ゴム型、  
東洋ゴム(株)HDR型修正バイリニア型、新日鐵(株)鋼棒ダンパー関数近似型、  
新日鐵(株)鋼棒ダンパーバイリニア型、5社共通仕様新LRB型、  
新日鐵U型ダンパー(関数定義式)型、ゴム支承トリリニア、  
オイレス工業(株)BMRダンパー型

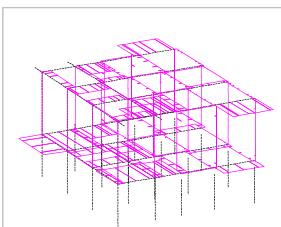
## 復元力特性(減衰)

変位依存マルチリニア逆行型、変位依存3次関数逆行型、制震壁(オイレス)型、  
速度依存バイリニア逆行型、速度依存トリリニア逆行型

◆ 解析コンサルティングも行っております。



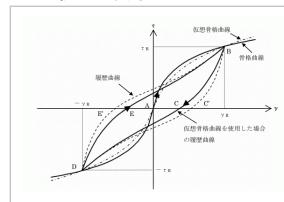
上部構造—基礎—一体モデル  
(動的相互作用考慮)



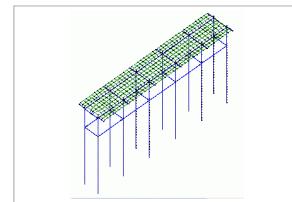
不整形ラーメン高架橋解析モデル  
(ねじりモーメント図)

## 機能追加予定

- GHE-S履歴モデル
- 板曲げ要素



GHE-Sモデル



板曲げ要素

## 製品

- RESP-T/B for Windows (大変形対応版)
- RESP-T/A for Windows (弾塑性対応版)
- RESP-T/E for Windows (機能限定版)
- RESP-T/S for Windows (静的解析限定版)

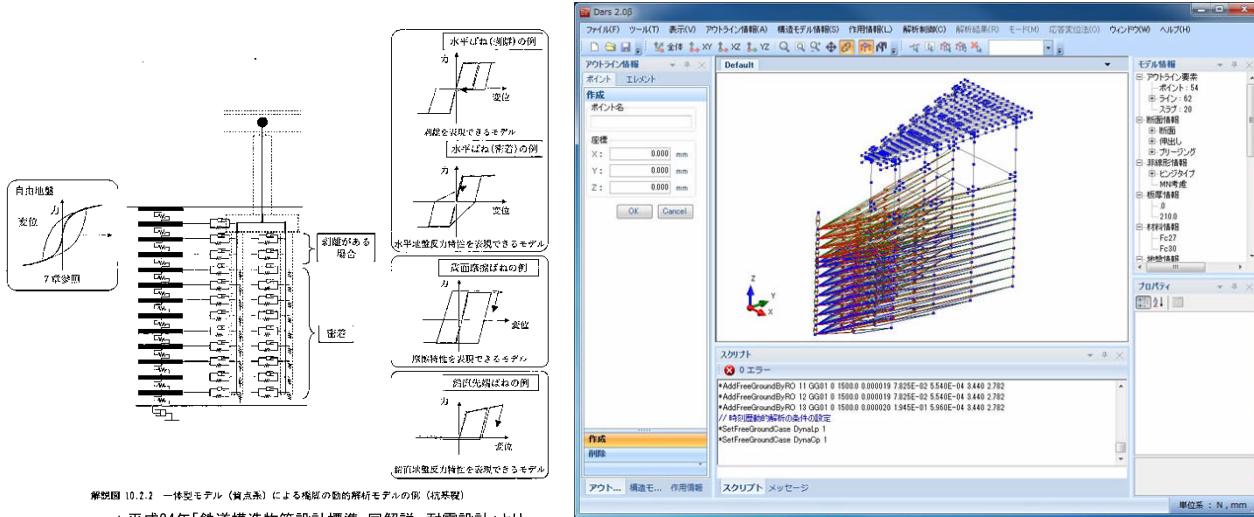
## 動作環境

- 対応OS  
Windows XP / Vista / 7 / 8 (64bitOS対応)
- 必要メモリ、ディスク  
メモリ256MB以上、空きディスク容量1GB以上

鉄道構造物等の3次元耐震性能照査プログラム「DARS」が、平成24年「鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計」（以下、耐震標準）、平成24年「鉄道構造物等設計標準・同解説 基礎構造物」に対応しました。 主な変更・追加内容は、以下となっております。

## ■ 一体型モデルによる動的解析

自由地盤と構造物を一体として扱うことで地盤と構造物の相互作用を自動的に考慮できるモデルであり、動的解析法を用いる場合は、耐震標準では地盤と構造物の相互作用を適切に評価する必要があるため一体型モデルを用いるのが良いとされている。DARSでは、質点系モデルでの一体型モデルによる動的解析が可能です。



解説図 10.2.2 一体型モデル（質点系）による地盤の動的解析モデルの例（根基盤）

\* 平成24年「鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計」より

## ■ 土の非線形モデル

Ramberg-Osgood (ROモデル) に対応しています。

## ■ 減衰

以下の減衰が使用可能です。

- 部材別剛性比例減衰
- レーリー減衰

## ■ RC部材の断面算定

RC部材の断面算定プログラムを変更しました。これによりVepp-RC と同等な断面照査を実施します。

## ■ 非線形応答スペクトル法に用いる降伏震度の変更

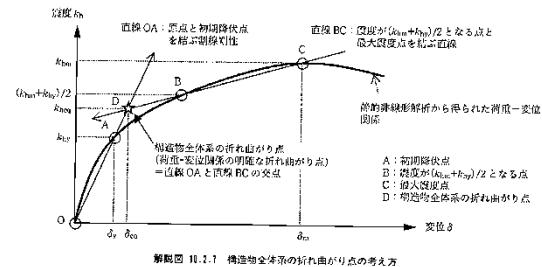
「構造物全体系の折れ曲がり点」に対応する震度Kheqを用います。

## ■ 地盤ばねの変更

平成24年「鉄道構造物等設計標準・同解説 基礎構造物」の杭基礎のトリリニア型の地盤バネへ対応しました。

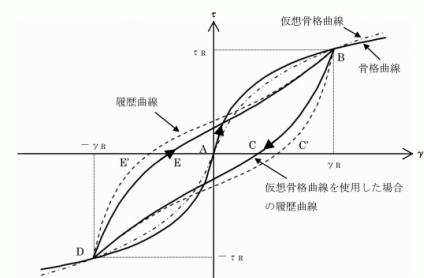
## ■ 今後の予定

- 土の非線形モデルGHE-Sへの対応
- 平成28年「鉄道構造物等設計標準・同解説 鋼とコンクリートの複合構造物」対応



解説図 10.2.7 構造物全体系の折れ曲がり点の考え方

\* 平成24年「鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計」より



GHE-Sモデル（今後予定）

<http://www.kke.co.jp/dars/>

DARSは、(公財)鉄道総合技術研究所と(株)構造計画研究所との共同開発によるプログラムです。



## 粘性ダンパーによる鉄骨造大型工場の制震補強設計

正会員 ○梁川 幸盛<sup>\*1</sup> 同 新美 仁<sup>\*2</sup>  
同 井戸田 秀樹<sup>\*3</sup>

制震補強  
座屈  
既存不適格建物  
接合部破断

鉄骨造工場建築

## はじめに

現在、高度成長期に建設された大規模工場に対して耐震診断が行われておらず、耐震改修が必要となっている。しかし、次に挙げる問題から耐震改修は活発には進んでいない。  
 ①耐震改修工事を行うためには工場を停止する必要があり莫大な損失が生じる。  
 ②その莫大なコストの根拠となる必要  $I_s$  値<sup>1)</sup>（構造耐震指標）の根拠が明確でない。  
 ③耐震改修の手法が静的な耐力向上に絞られて動的な検討が不十分である。  
 ④各機関が提案する推定地震に対する損傷の程度が予測できない。

本稿では、図 1～2・表 1 に示す車両製造工場に振動解析による制震補強を適用し、これらの問題を解決した例を紹介する。

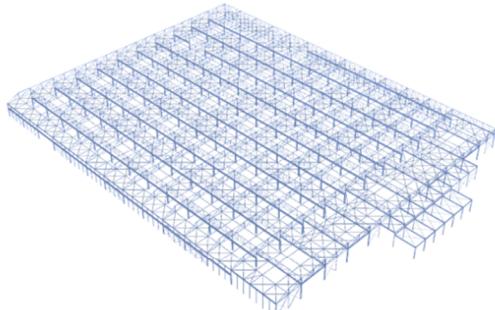


図 1 立体解析モデルのパース図

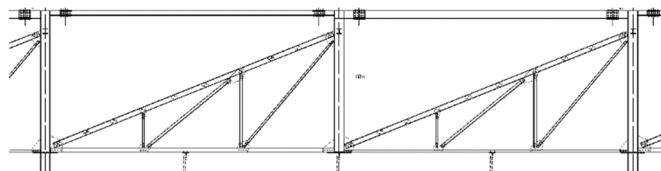


図 2 ノコギリ屋根部トラス梁形状詳細

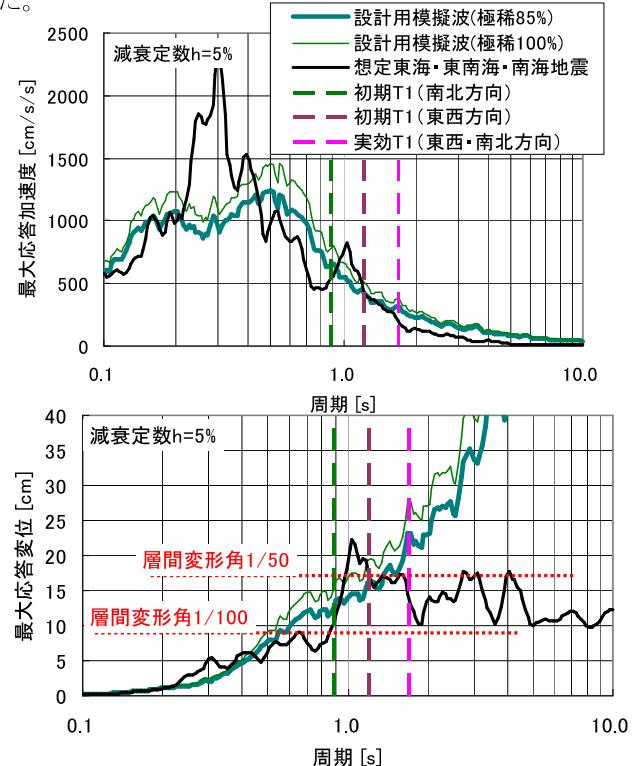
表 1 工場の概要

|          |  |
|----------|--|
| 階数       | 地上 1 階、地下・塔屋無し                                   |
| 延面積      | 約 33,600m <sup>2</sup>                           |
| 平面形状     | 長辺: 13 スパン 約 200m、短辺: 12 スパン 約 160m              |
| 軒高・高さ    | 軒高: GL=8.2m、建物高さ: 11.5m                          |
| 設計年      | 1969 年(旧耐震設計法)                                   |
| 柱        | H 形鋼ロール材を用いた組立断面                                 |
| 梁        | L 形鋼を用いたトラス梁                                     |
| 屋根       | ノコギリ形状、スレート拭き                                    |
| 基礎       | 独立基礎、鋼管杭、露出柱脚                                    |
| 地震荷重     | 最新設備荷重を反映した単位荷重: 1.84 [kN/m <sup>2</sup> ]       |
| 診断結果     | 構造性能指標( $I_s$ 値)の最小値: 0.17、平均値: 0.30             |
| 固有周期 [s] | 無補強時 長辺: 1.21、短辺: 0.89<br>極稀等価 長辺: 1.78、短辺: 1.70 |

## 推定地震波に関する建物応答予測

本建物のリスク評価に対して、影響の最も大きい推定地震として、三連動波（想定東海・東南海・南海地震：今後 30 年間の発生確率 10%以上、敷地と断層の距離は約 45km）が予想されている<sup>2)</sup>。推定地震波（解放工学的基盤波）および設計用地震波（極稀地震に対する告示波<sup>3)</sup>、乱数位相）を本敷地の地盤調査に基づいて基礎下端レベルに引き上げた地震波の最大応答スペクトルを図 3 に示す。図中に立体振動解析モデル（補強前）から求まった各方向 1 次固有周期を示した。

図 3 によれば、耐震補強によって短周期化する場合に、地震波の卓越周期帯に近づき、大きな損傷を受けることが予想できる。仮に在来工法による耐震補強を行っても、500(cm/s<sup>2</sup>)を超える応答加速度に対して弾性範囲に抑える補強は難しいため、補強を行っても損傷による長周期化が生じ、結果的に大きな応答変位が生じ、P—Δ 効果によって倒壊することが予想される。このため、本工場にとって短周期化につながる在来工法の補強は不利と判断した。

図 3 最大応答スペクトル  
(T 1 : 1 次固有周期、実効 : 極稀地震時の等価周期)

Seismic reinforcement design of Steel large factory due to the viscous damper.

Yukimori YANAGAWA<sup>1)</sup>, Hitoshi NIIMI<sup>2)</sup>,  
And Hideki IDOTA<sup>3)</sup>

## 終局変形の推定と設計クライテリアの設定

本建物の終局状態を調べるために、トラス接合部破断を考慮した段階的耐力喪失型<sup>4)</sup>の荷重漸増解析を行った。座屈は動的解析モデルと同様の復元力特性<sup>5)</sup>を与えた。解析方法の概念を図4に示し、解析結果を図5に示す。

大半の架構の第1折点は露出柱脚のアンカーボルトまたはBPの面外降伏によって生じている。長辺方向は層間変形角1/70を超えた時点で大半の架構のトラス接合部が破断し、15%程度耐力低下した後、層間変形角1/50辺りまでP-△効果の負勾配に抵抗できる。短辺方向は、14通りの既存ブレースが早期に接合部破断を生じるが、それ以外の架構は層間変形角1/40辺りまでP-△効果の負勾配に抵抗できるだけの剛性を維持できる。

一方、設計用入力地震動の大きさについて、前述の三連動波に加えて地震の再現期間を500年→300年として85%に低減（ワイブル分布を仮定）した告示波（震度6弱相当）を設定した。設計クライテリアとして、弾性限界と終局変形角の中間を復旧可能な層間変形角を設定し、

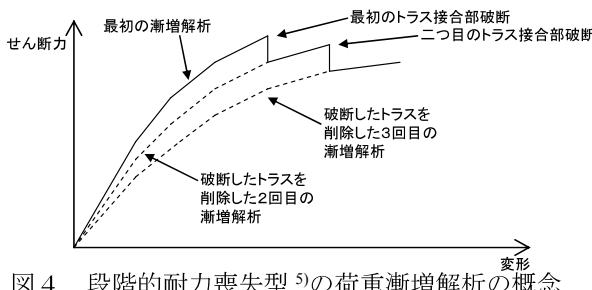


図4 段階的耐力喪失型<sup>5)</sup>の荷重漸増解析の概念

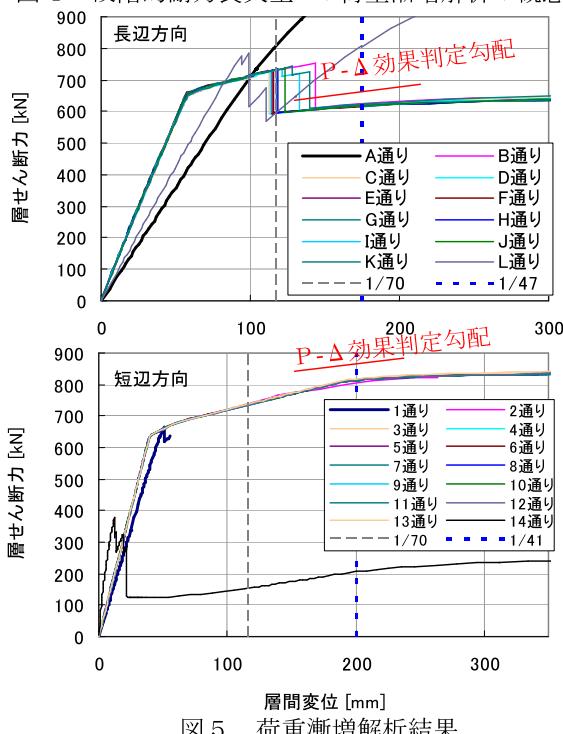


図5 荷重漸増解析結果

\*1：構造計画研究所

\*2：豊田自動織機

\*3：名古屋工業大学 大学院社会工学専攻 教授・工博

告示波原波に対しては倒壊しない変形角として、終局層間変形角以下を確認する。また、トラスの座屈時の許容圧縮ひずみは、文献<sup>6)</sup>を参考にして1%と設定した。

## 制震補強の概要

図6に示すように工場の外側に鉄骨造バットレス架構を新設し、工場とバットレス架構（鋼管杭支持）を制震ダンパー<sup>7)</sup>（減衰コマ RDT 500kN タイプ）で接続した。制震バットレス架構は、工場の各構面の両側（一部片側）に設置した。

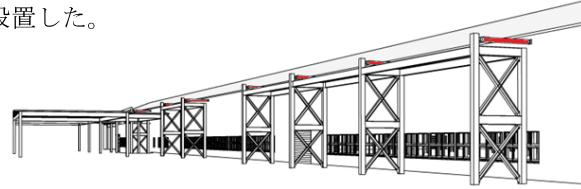


図6 工場外側に設置した制震バットレス  
制震補強時の最大応答の推定

制震バットレスを追加した立体モデルにより地震応答解析を行った結果、低減告示波および三連動波の応答は各クライテリア（層間変形角1/70以内）とすることができた。トラスの接合部破断については、トラス軸力が破断耐力を超えた次ステップにて、それまで保持していた軸力を解放し剛性をゼロにすることで評価した。

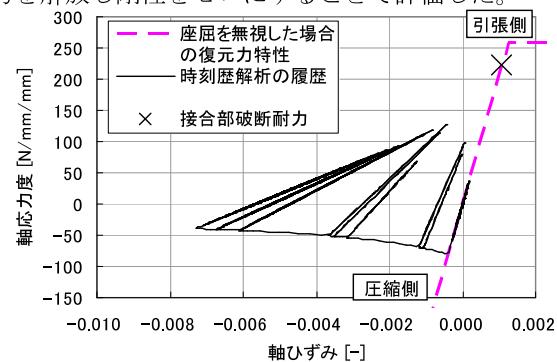


図7 座屈するトラスの軸ひずみ—軸応力度履歴

## まとめ

- ①振動特性を評価し、生産稼働・コスト・耐震性能の点で優れた対策方法により補強設計することができた。
- ②鉄骨筋違の座屈や接合部破断を補強設計で考慮することができ、精度の高い解析評価を行うことができた。
- 補強設計のための入力地震動の大きさについては、現行法規との連続性の観点から今後の研究が必要である。

**参考文献：**1) 国土交通省告示第184号「建築物の耐震診断及び耐震改修の促進を図るための基本的な方針」平成18年1月26日。 2) 内閣府中央防災会議 地震防災マップ作成 平成17年3月。 3) 国土交通省「建築物の構造関係基準解説書」2015年版、第8.1節「超高層建築物棟の構造計算」。4) 日本建築学会「鉄筋コンクリート構造運営委員会」「既存中層鉄筋コンクリート造建物の等価線形化法を用いた耐震性能評価法」、2014年度大会P.D資料。5) 柴田・若林ほか「鉄骨筋違の履歴特性の定式化 その1～2」日本建築学会論文報告集 第316号、1982年6月。6) 日本建築学会「鋼構造物の座屈に関する諸問題 2013」、繰り返し軸力を受け座屈するブレースの破断評価、p.6. 7) 新垣・黒田・有馬・井上・馬場「ボールネジを用いた制震装置の開発」日本建築学会技術報告集(8), 239-244, 1999年6月。

\*1 KOZO KEIKAKU ENGINEERING Inc.

\*2 TOYOTA INDUSTRIES CORPORATION

\*3 Nagoya Inst.of Tech. Dept.of Architecture and Civil Engineering, Prof., Dr. Eng.

# BCP・災害対策は 根拠のしっかりした 被害想定ができるかどうか で決まります。

どの程度の  
被害に  
なるのか  
知りたい。

建物補強など  
計画は立てた  
が妥当性が  
分からぬ。

対策の  
必要性を  
理解してもらう  
のがひと苦労。

BCPは作成  
したが、  
あいまいで  
少々不安。

Is 値（耐震指標）では分  
からない、具体的な被害  
量を把握できます。

「想定災害規模」と「許容  
できる被害」「対策コスト」  
のバランスが大切です。

関係者の合意形成には定  
量的な結果と被災イメー  
ジの共有が必要です。

「この土地、この建物だか  
らこう対応する」といった  
論理的な対策が必要です。

構造解析／地震／地盤のエキスパート『構造計画研究所』

## 災害リスク評価 コンサルティングサービス

いま、製造業において“本当に使える”BCP（事業継続計画）の策定・  
実施が求められています。しかし、根拠のはっきりしないBCPをもとに  
した投資計画を前にして悩まれているのが実情ではないでしょうか？  
私たちは、長年地震や災害の研究に携わってきたノウハウを活かし、  
BCP策定や補強計画の前提となる「災害リスク評価」をご提供します。

# 津波シミュレータ **TSUNAMI-K**

## 津波波高・遡上計算プログラム

津波による浸水や被害を  
事前に予測することができます

地震発生頻度の高い日本は、周囲を海洋に囲まれており、津波発生の確率も高い状況にあります。東北地方太平洋沖地震では津波による甚大な被害が発生しました。今後発生すると予想される、東海、東南海、南海地震でも津波の発生が予想されており、海岸付近での防災対策が必要です。

(株)構造計画研究所では、従来から蓄積してきました建築計画・構造設計や流体問題の解析技術を基に、津波シミュレータ「TSUNAMI-K」を使った津波解析コンサルティングサービスを実施しております。

### TSUNAMI-K 3の特徴



#### 特徴

#### 1 簡単操作

簡易な操作で  
津波シミュレーション  
が可能です。

#### 特徴

#### 2 編集自由

建物や地形の詳細な  
データの追加・修正などの  
編集が可能です。

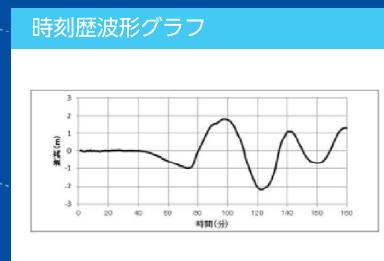
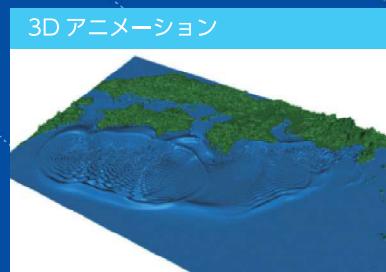
#### 特徴

#### 3 出力多彩

アニメーション等の  
多彩な結果出力に  
対応可能です。

### 2D・3Dアニメーション表示だから解析結果が一目瞭然

今まで津波・遡上解析を行う場合は、専門的な知識を要求される3つのプログラムを実行する事が必要でした。TSUNAMI-Kは地形・建物の作成、波源の設定、津波・遡上計算、結果の表示を1つのプログラムで、誰でも簡単に実行できます。津波・遡上計算機能は最新の知見を導入しており、高度な解析機能を有します。また、最大波高などの分布図や、時刻ごとの水位・流速等の表示や出力、アニメーション作成機能を持っています。様々な範囲での津波・遡上評価にご利用下さい。



## 大規模台風時の高潮災害の防災対策への検討

(その 1 : 第二室戸台風の再現解析)

|         |           |
|---------|-----------|
| 構造計画研究所 | 正会員 ○安重 晃 |
| 構造計画研究所 | 正会員 落合 努  |
| 神奈川大学   | 正会員 菅本 孝久 |

### 1. はじめに

近年の地球温暖化等の影響により、台風の大規模化や平均海水位の上昇が懸念されている。一方で我が国の都市部は沿岸の低平地に多く分布し、今後これらの都市に対する高潮災害のリスク増大が予想される。

東日本大震災以降、世の中の意識変化などにより地震や津波などさまざまな災害に対する取組は進んでいる。しかし、各種ハザードマップの整備状況によると、他の災害に比べ高潮ハザードマップの整備率は極端に低く、発生頻度に対して高潮災害への取組はやや遅れ気味である。その様な状況に対し、農林水産省等から『高潮浸水想定区域図作成の手引き（平成 27 年 7 月）』<sup>1)</sup>（以下、手引きと呼ぶ）が公表され、技術的観点からは統一的な手法が示された。そこで、その 1 では手引きの手法を組込んだソフトウェアを開発し、基本的な動作確認を行うとともに、第二室戸台風を用いた再現解析による精度検証結果をまとめた。

### 2. 高潮シミュレーションコードの開発

#### 2.1 計算方法

高潮シミュレーションは、概ね手引きに記載の方法に従っているが計算手法の概要を以下に示す。

高潮シミュレーションは、一般的な津波シミュレーションと同様に広い海域を対象とした現象である。海洋の水の鉛直方向の運動が微小であり静水圧力分布の仮定を導入し、水深方向に平均化した運動を仮定すれば 2 次元平面問題となり、非線形長波方程式として記述できる。

手引きでは、気圧（吸い上げ）と風場（吹き寄せ）の効果以外に、波浪やうねり等による効果が考慮されているが、ここでは概略検討として気圧と風場による効果のみを考慮している。

#### 2.2 台風モデル

高潮現象の駆動力となる台風モデルは、台風中心からの気圧変化を関数で仮定する Myer 式を用いた。この式から計算される台風周辺の気圧勾配と遠心力、コリオリ力の釣合いで、台風によって発生する風速が計算される。さらに、台風の移動速度効果を合成すれば、台風周辺の速度分布が計算される。図 2 に台風が北に進んだ場合の風速ベクトルと速度分布例を示す。台風の進行方向右側に強風域が発生している状況が表現されている。

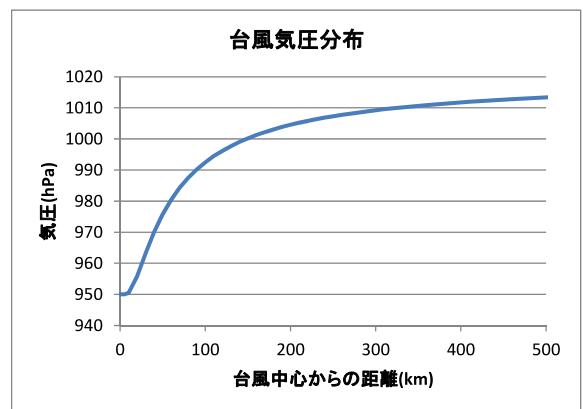


図 1. 台風中心からの気圧分布例

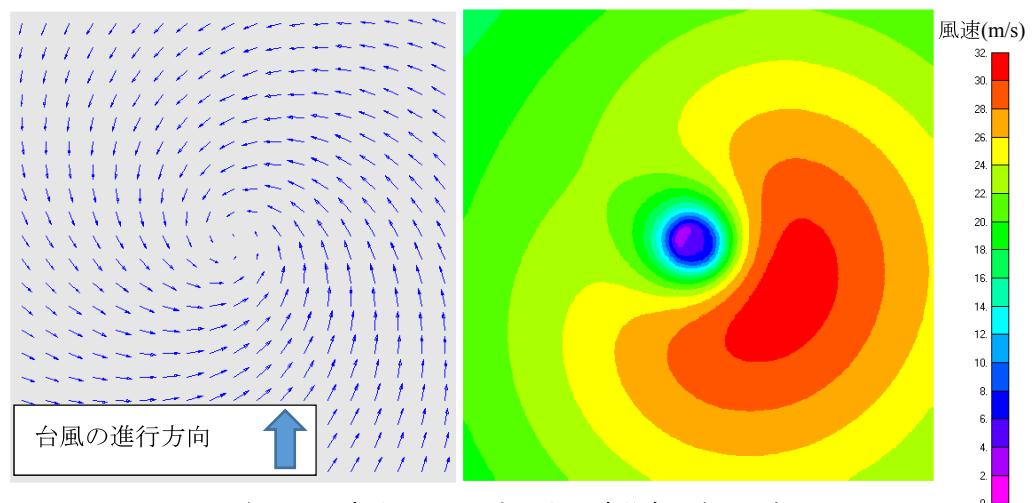


図 2. 台風の風速ベクトル（左）と風速分布（右）の例

### 3. 第二室戸台風の再現解析

#### 3.1 使用データ

高潮シミュレーションの妥当性確認のため、1961年 の第二室戸台風の再現解析を試みた。第二室戸台風は1961年9月6日に発生、9月20日に消滅とされている<sup>2)</sup>。この期間から日本列島を通過する、9月15日21時から9月16日21時までの24時間の再現解析を行った。台風の移動速度は気象庁による気圧・経路位置情報、中心気圧は台風上陸時の値からそれぞれ設定した。解析条件の一覧を表1に示す。今回は大まかな精度検証を目的としたため、元となる地形データは、陸域は50mメッシュ、海域は500mメッシュとやや粗いものを用いている。

再現解析から得られた6時間毎の波高分布を図3に示す。図より設定した経路にて台風が移動していることを確認した。

表1 解析条件一覧

| 項目          | 設定値                                 |
|-------------|-------------------------------------|
| 中心気圧 (hPa)  | 940                                 |
| 最大風速半径 (km) | 75                                  |
| 移動速度        | 気象庁による3時間毎のデータより位置と時刻で設定            |
| メッシュサイズ     | 1350m, 450m, 150m<br>(多重格子で沿岸部を細分化) |

#### 3.2 最高潮位とその到達時間の比較

気象庁<sup>3)</sup>による第二室戸台風の潮位偏差は大阪で2.6m、和歌山で2.2m、また近畿地方への台風上陸は9/16の13時過ぎとされている。解析結果から得られた大阪と和歌山付近の水位の時刻歴波形を図4に示す。図より、水位でやや差異が認められるものの、到達時間も含め概ね再現されていることが確認できる。

#### 4. まとめ

災害リスク増大が懸念される高潮災害への対応を行うため、高潮シミュレーションコードを開発し、第二室戸台風の再現解析によりその妥当性の確認を行った。今後は、現在未考慮である波浪等の影響を加味できるよう機能追加を行うとともに、詳細な地形や海岸構造物を考慮した解析、その他の台風での精度検証や防災への利活用の検討を行う予定である。

#### 参考文献

- 農林水産省・国土交通省：高潮浸水想定区域図作成の手引き、平成27年
- 国立情報学研究所：デジタル台風 台風画像と台風情報、  
<http://agora.ex.nii.ac.jp/digital-typhoon/>
- 気象庁：災害をもたらした気象事例 第二室戸台風、  
<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/report/1961/19610915/19610915.html>

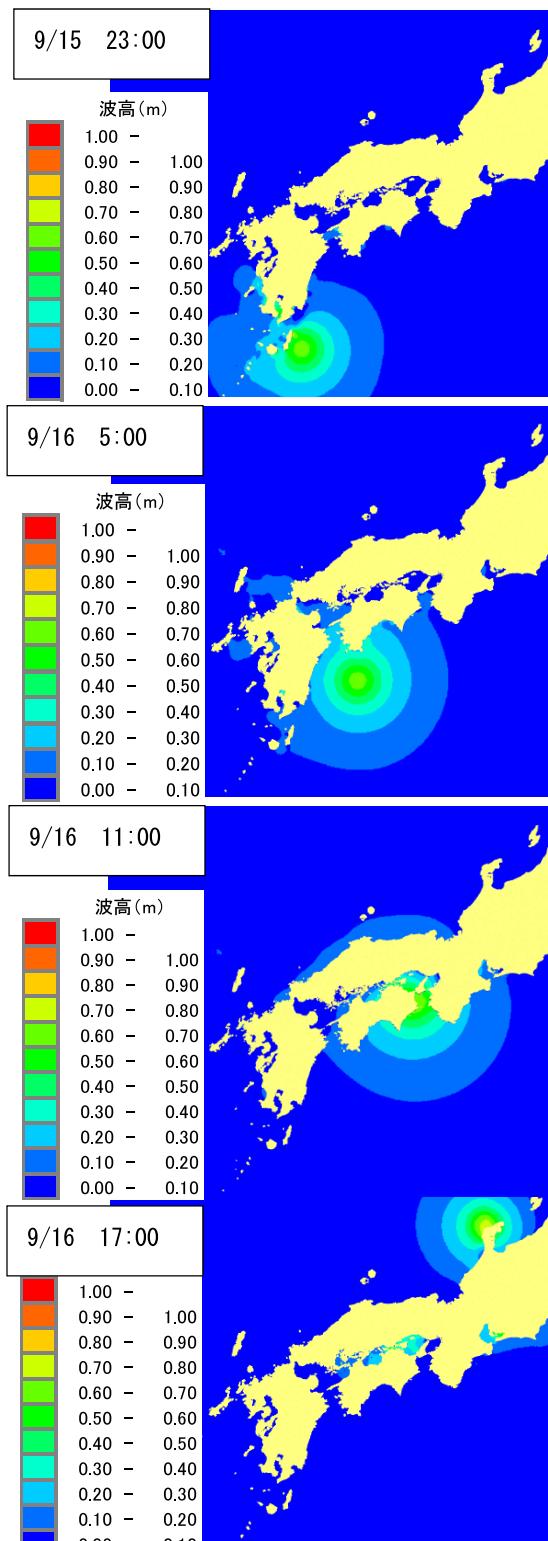


図3. 第二室戸台風の水位分布図

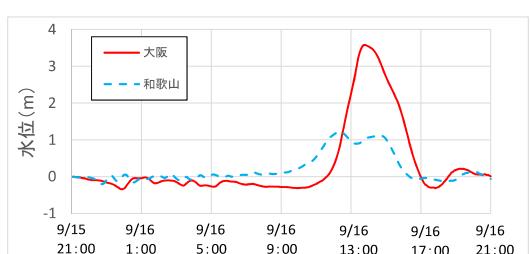


図4. 第二室戸台風の水位時刻歴

## 大規模台風時の高潮災害の防災対策への検討

(その 2 : シミュレーションのタイムラインへの活用例)

|         |            |
|---------|------------|
| 構造計画研究所 | 正会員 ○ 落合 努 |
| 構造計画研究所 | 正会員 安重 晃   |
| 神奈川大学   | 正会員 菅本 孝久  |

### 1. はじめに

近年の地球温暖化等の影響により、台風の大規模化や平均海水位の上昇が懸念されている。一方で我が国の都市部の多くは沿岸の低平地に位置し、今後高潮災害のリスク増大が予想される。

東日本大震災以降、世の中の意識変化などにより地震や津波などさまざまな災害に対する取組は進んでいる。しかし、各種ハザードマップの整備状況によると、他の災害に比べ高潮ハザードマップの整備率は極端に低く、その発生頻度に対する高潮災害への取組はやや遅れ気味である。その様な状況の中、農林水産省等から『高潮浸水想定区域図作成の手引き（平成 27 年 7 月）』が公表され、技術的観点からは統一的な手法が示された。そこで、その 2 では伊勢湾台風の再現解析を行うとともに、その結果を用いて、高潮災害の防災対策として有効であるタイムラインに対して、シミュレーション結果を活用した場合の事例をまとめた。

### 2. 伊勢湾台風の再現解析

#### 2.1 使用データ

近年の高潮灾害で被害が甚大であった、1959 年伊勢湾台風の再現解析を試みた。伊勢湾台風は 1959 年 9 月 21 日 12 時に発生、9 月 27 日 12 時消滅とされている<sup>1)</sup>。この期間から日本列島を通過する、9 月 26 日 15 時から 9 月 27 日 3 時までの 12 時間の再現解析を行った。台風の移動速度は気象庁による気圧・経路位置情報、中心気圧は台風上陸時の値からそれぞれ設定した。

#### 2.2 最高潮位とその到達時間の比較

中央防災会議<sup>2)</sup>による伊勢湾台風による潮位記録とその時刻を図 1、図 2 に示す。最高潮位は湾口付近では 2m 弱であるが、湾奥では 3.5m に達する。また、湾内の三重県側では最高潮位到達時刻は 20 時程度であるが、湾奥で 21 時以降、渥美湾奥で 22 時 30 分程度となっている。

シミュレーション結果から得られた潮位の時刻歴変動を図 3 に示す。シミュレーションより得られた水位と到達時刻は、伊勢湾の三重県側の A 地点で 2m、20 時、伊勢湾奥の B 地点で 4m、22 時、渥美湾奥の C 地点で 4m、23 時となった。水位や最高潮位の到達時刻は実際の記録と概ね一致している。

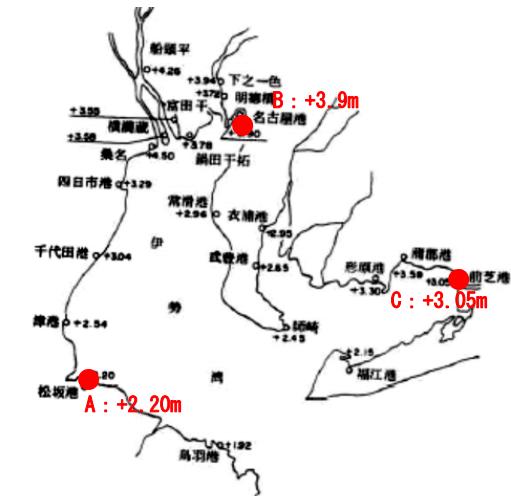


図 1. 伊勢湾台風の最高潮位分布

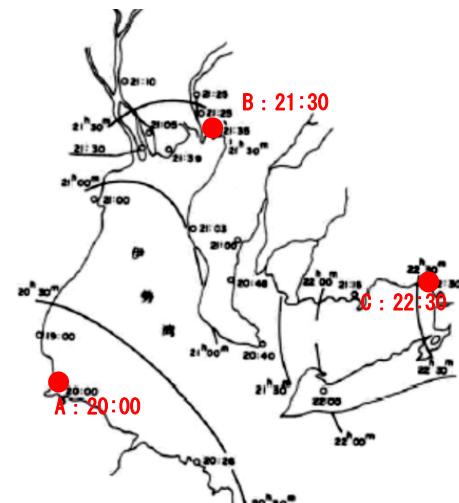


図 2. 伊勢湾台風の最高潮位起時時刻

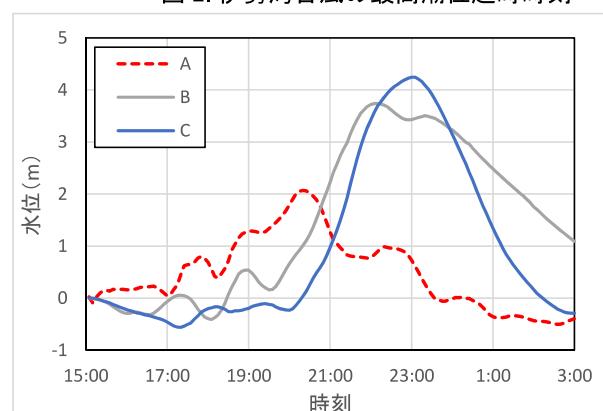


図 3. シミュレーションによる潮位の時刻歴変動

キーワード 高潮シミュレーション、台風、第二室戸台風、再現解析

### 3. タイムライン

#### 3.1 タイムラインの概要<sup>3)</sup>

タイムラインは、「いつ」、「誰が」、「何をするか」を、あらかじめ時系列で整理した防災行動計画である。2012年に米国で発生したハリケーン・サンディで大きな被害軽減効果が認められた。

一方で大型台風による高潮等の大規模水災害は、地震、津波、ゲリラ豪雨等と異なり、事前にある程度予測が可能な災害である。よって、タイムラインを用いて関係機関が互いに協力して被害の発生を前提とした対応策を事前に整備し、実行することは非常に有効な手段である。

#### 3.2 シミュレーションを活用したタイムライン

高潮シミュレーションより三重県松坂（A）と名古屋市沿岸部（B）について、タイムラインの中で重要なポイントである、「上陸（潮位が急上昇する時間）」、住民の「避難開始」と「避難完了」の時間設定を試みた。ここでは避難完了時間は上陸（潮位が急上昇）する1時間前とした。また、避難に必要な時間は、避難準備時間を1時間、避難時間を徒歩避難（速度1m/s）で沿岸部の浸水域中央付近から浸水域外までの直線距離で概算した（図4の浸水深分布より概算）。この仮定だと避難に必要な時間は、Aで2時間、Bで5時間と浸水域が広いBの方がAより3時間ほど長くなる。

再現解析結果や既往の検討内容<sup>4)</sup>を参考にタイムラインの作成を試みた（表1）。表から、Bで潮位が急激に上がる時刻を基準時刻（0h、再現解析では20時）とした場合、シミュレーション結果よりA地点で潮位が上がるのが-3h（17時）となる。それぞれ仮定条件より避難開始時間を逆算するとA地点、B地点ともに-6h（14時）となる。実務で利用するためには更なる検討が必要であるが、シミュレーション結果を活用したタイムラインにより対象地点の特性を考慮した評価ができた。

### 4. まとめ

災害リスクの増大が懸念されている高潮災害への対応を行うため、高潮シミュレーション結果を用いたタイムラインの検討を試みた。災害時に時系列での対応をまとめるタイムラインに対して、災害の時系列での変化を推定できるシミュレーションは有用であると思われる。今回は避難に必要な時間は大雑把な仮定条件の元で行っているが、現在は避難する人々の行動などを考慮したシミュレーションも可能であり、より細かな条件を考慮した検討も進めていきたい。また、気象庁による台風予報精度は年々向上しており、24時間前予報を活用したシミュレーションによる、直前の被害予測も可能である。本来タイムラインは、実際に利用する方々との話し合いにより作成を進めるべきものであり、今後はそのような視点での取り組みも進めていきたい。

#### 参考文献

- 1) 国立情報学研究所：デジタル台風　台風画像と台風情報、<http://www.digital-typhoon.org/>
- 2) 中央防災会議：災害教訓の継承に関する専門調査会報告書　1959伊勢湾台風、平成20年3月
- 3) 國土交通省：タイムラインホームページ、<http://www.mlit.go.jp/river/bousai/timeline/index.html>
- 4) 東海ネーデルランド高潮・洪水地域協議会：危機管理行動計画、[http://www.cbr.mlit.go.jp/kawatomizu/tokai\\_nederland/](http://www.cbr.mlit.go.jp/kawatomizu/tokai_nederland/)

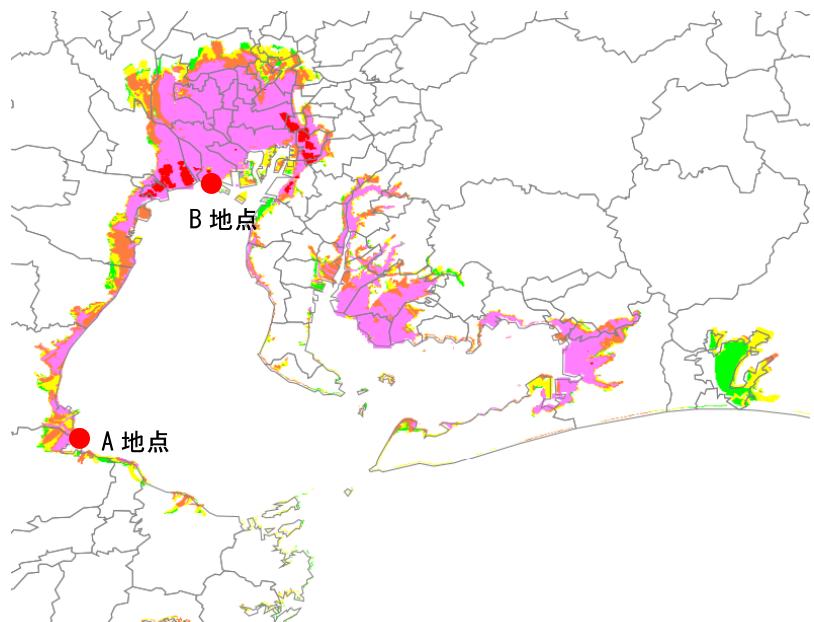


図4. シミュレーションによる浸水深分布

表1. タイムライン例

| 再現解析での時刻 | 時間 | A    | B    |
|----------|----|------|------|
| 12:00    | -8 |      |      |
| 13:00    | -7 |      |      |
| 14:00    | -6 | 避難開始 | 避難開始 |
| 15:00    | -5 |      |      |
| 16:00    | -4 | 避難完了 |      |
| 17:00    | -3 | 上陸   |      |
| 18:00    | -2 |      |      |
| 19:00    | -1 |      | 避難完了 |
| 20:00    | 0  |      | 上陸   |
| 21:00    | 1  |      |      |
| 22:00    | 3  |      |      |

Aより避難時間が3h長い

※台風上陸と住民の避難開始、完了のみに着目

### 3 次元有限要素解析を用いたすべり安定性評価における基礎的検討

(株) 構造計画研究所

|           |            |
|-----------|------------|
| 正会員 ○岡村 航 | 正会員 三橋 祐太  |
| 正会員 渡辺 高志 | 正会員 内山 不二男 |

#### 1. 目的

原子力発電所などに代表される安全上重要な施設・設備の基礎地盤や周辺斜面の安定解析においては、長年 2 次元解析による検討が行われてきた。同一な形状が連続する斜面など、2 次元による検討が合理的である対象も多い一方、建屋の影響を受ける基礎地盤や複雑な形状を有する斜面においては 3 次元効果が無視できないものと考えられる。そこで本研究では、3 次元斜面の FEM モデルに対して静的震度による解析を実施し、得られた応力場を用いてすべり面およびすべり方向を任意に決めた場合の安全率の算定を行い、3 次元によるすべり安全率の検討を実施した。3 次元すべり安全率の算出には POST-S/3D (構造計画研究所) を用いた。

#### 2. 3 次元のすべり安全率の計算方法

2 次元モデルにおいてはすべり面が線として表現されるため、すべり方向などを定めることは容易である一方、3 次元モデルを用いた場合はすべり方向の設定に任意性を有する。本研究では、すべり方向を固定し、以下の方法で 3 次元のすべり安全率を計算した。

コーチーの式より要素  $i$  の仮想切断面に働く作用力  $\mathbf{f}_i$  は次式で計算できる。

$$\mathbf{f}_i = \sigma_i \mathbf{n}_i a_i \quad (1)$$

ここで、 $\sigma_i$  は応力テンソル、 $\mathbf{n}_i$  は切断面の単位ベクトル、 $a_i$  は微小面積である。

仮想切断面で区切られた外側領域が剛体的に滑動すると考えると、各時間断面において不平衡力が生じている。ここで、作用力  $\mathbf{f}_i$  は垂直抗力  $\mathbf{f}_i^n$  と滑動力  $\mathbf{f}_i^t$  に分解できる。

$$\mathbf{f}_i^n = (\mathbf{f}_i \cdot \mathbf{n}_i) \mathbf{n}_i \quad (2)$$

$$\mathbf{f}_i^t = \mathbf{f}_i - \mathbf{f}_i^n \quad (3)$$

滑動力の向きを考慮した場合、任意時間断面におけるすべり安全率  $S.F.$  は次式から計算できる。

$$S.F. = \frac{\sum |\mathbf{f}_i^n| \cdot \tan \phi_i + C_i \cdot a_i}{\sum \mathbf{f}_i^t \cdot \mathbf{s}_i} \quad (4)$$

ここで、 $C_i$  は要素  $i$  の粘着力、 $\phi_i$  は内部摩擦角、 $\mathbf{s}_i$  はすべり方向を表すベクトルである。

#### 3. 2 次元のすべり安全率との比較

図 1 に示す 2 次元的な斜面モデルおよびすべり面形状についてすべり安全率を算定し、2 次元のすべり安全率と比較する。解析モデルは一様地盤とし、自重解析を実施する。2 次元モデル、3 次元モデルのすべり安全率は両方とも 1.036 となり、一致する結果となった。以上より、すべり安全率の計算方法および計算プログラムの妥当性が示された。

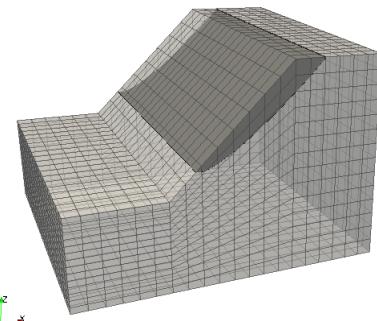


図 1 2 次元的な斜面モデルとすべり面形状

#### 4. すべり面形状を変更した場合のすべり安全率

すべり面形状を変更することですべり安全率がどの程度変化するかを検討するため、図 2 に示すようにすべり面形状の幅を徐々に広げてすべり安全率を算定する。

図 3 にすべり面形状の幅に対するすべり安全率の変化を示す。すべり安全率は幅が広げる程小さくなり、2 次元のすべり安全率に漸近することが分かる。

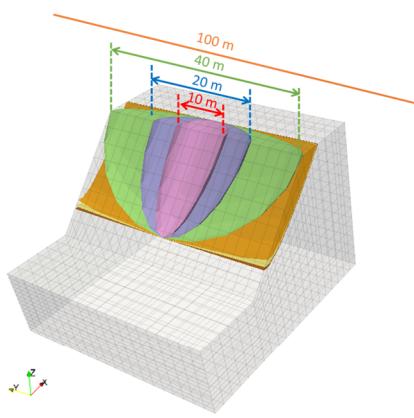


図 2 すべり面形状

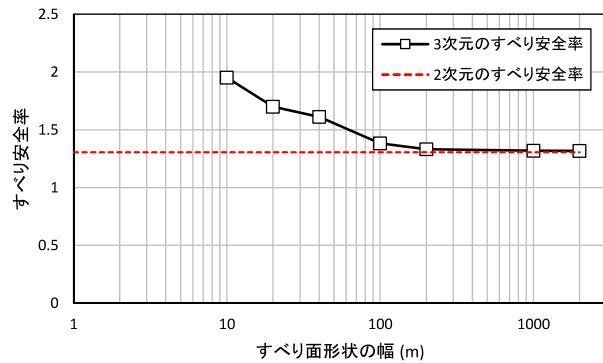


図 3 すべり面形状に対するすべり安全率の変化

## 5. 凸型・凹型の斜面モデルの安全率の算定

2 次元的な斜面以外の斜面モデルを用いた場合にすべり安全率がどのように変化するかを検討するため、図 4 および図 5 に示す凸型および凹型の 3 次元斜面モデルを用いてすべり安全率を算定した。応力場は、自重および静的震度 ( $K_H=0.30$ ,  $K_V=0.15$ ) を付与した静的解析によるものを用いた。

すべり面は橢円体を仮定し、橢円体の中心、半径 (3 成分)、回転角のパラメータにより表現する。各パラメータの取る範囲を仮定し、総当たりで複数の橢円体に対して安全率を計算した。今回の計算では橢円体の法尻直交方向の中心は斜面の中央位置に固定した。求まった複数の安全率の最小値をモデルの最小すべり安全率とした。本検討では各モデルで約 3 万種類のすべり面による安全率計算を実施している。ただし、設定したすべり面の中には地表面をかすめるように通る面積の小さいすべり面も含まれる。これらのすべり面等は寄与が小さいとして除外して最小値を算出した。すべり方向は法尻方向とした。

計算により得られた凸型モデルの最小すべり安全率は 0.91、凹型モデルの最小すべり安全率は 0.98 となった。最小すべり安全率となったすべり面を図 4 および図 5 に重ね描いて示す。凹型モデルにおいては斜面の両端が地盤によって拘束されているため、変形が小さくなることから安全率が大きめに評価されるものと考えられる。

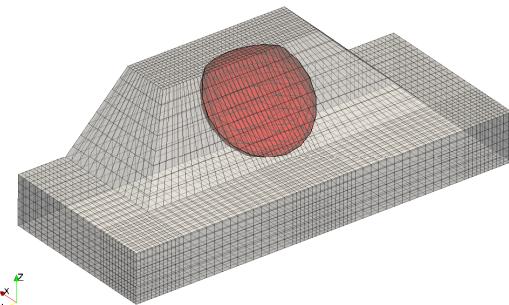


図 4 3 次元斜面モデル (凸型)

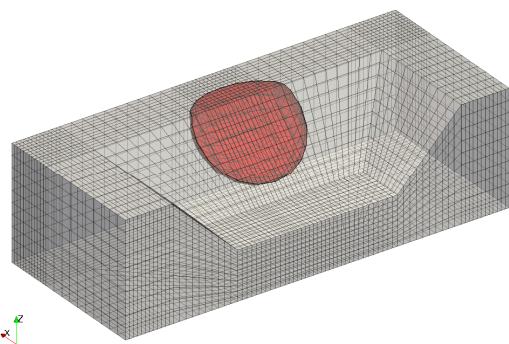


図 5 3 次元斜面モデル (凹型)

## 6.まとめ

3 次元斜面の FEM モデルに対して静的解析を実施し、すべり面およびすべり方向を任意に決めた場合の安全率の算定を行った。2 次元的な斜面のモデルによるすべり安全率は 2 次元解析の結果と一致し、計算の妥当性が検証できた。さらに斜面の 3 次元形状を考慮した解析モデルですべり安全率を計算し、結果に差が出ることが確認できた。3 次元で斜面およびすべり面形状をモデル化することで、より現実に即した斜面安定性評価が可能になると期待できる。今後は橢円体以外の形状を持つすべり面、実問題や動的解析への適用などを行っていきたい。

## 参考文献

金戸俊道ら：3 次元性を考慮した斜面の安定解析について、電力土木, No.296, 16-21, 2001.

# 3次元すべり安全率算定プログラム

# POST-S/3D

POST-S/3Dは、3次元有限要素法による解析ソフトウェアのポストプロセッサとして、すべり安全率を算定し、すべり検討結果のファイル出力を行うことができます。

## 【機能】

### 1) 3次元のすべり安全率算定

3次元FEM解析結果 (\*.vtk)と三角形パッチで構成される任意形状のすべり面データ (\*.obj, \*.stl) を入力とし、すべり面が通る要素応力を抽出し、すべり安全率を算定します。

### 2) 支援ツールによる橿円体すべり面の作成

支援ツールを用いることで比較的容易に三角形パッチで構成される橿円体のすべり面データを作成できます。

### 3) すべり検討結果のVTKファイル書式での出力

解析結果をVTKファイル書式※で出力します。

オープンソースソフトウェア (ParaView)などを用いて図化が可能です。

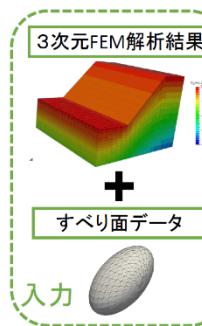
- ◆ すべり安全率の時刻歴データ
- ◆ すべり面上の応力
- ◆ すべり面上の滑動力、抵抗力、局所安全係数

※VTKファイル書式とは・・・

VTKはVisualization Toolkitの略であり、3次元CG、画像処理、可視化のためのオープンソフトライブラリです。VTKファイル書式はこのライブラリを基盤とするソフトウェアのファイル形式であり、Paraviewをはじめ、複数の可視化ソフトウェアがサポートしています。

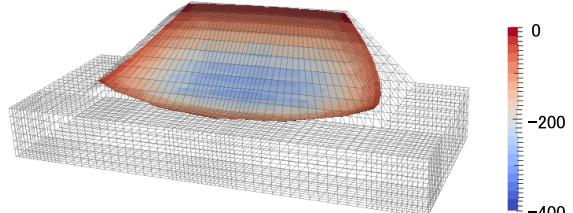
### 3次元の安全率算定の流れ

- ① 3次元FEMの応答解析結果とすべり面データを準備する。
- ② ①を用いて、すべり面が通る要素を算定する。
- ③ ②より、すべり面上に作用する滑動力と抵抗力を算定する。
- ④ ③用いて、滑動力と抵抗力の比より**すべり安全率**を算定する。

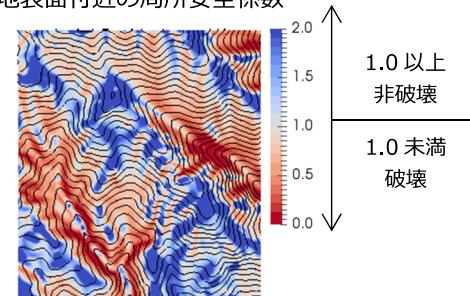


### 出力結果例

#### ・すべり面上の応力 ( $\sigma_{zz}$ )



#### ・地表面付近の局所安全係数



## 【動作環境】

OS : 64 bit 版 Windows 7, Windows 8, Windows 8.1, Windows 10

CPU : 上記 OS が正常に動作する CPU

メモリ : 4 GB 以上を推奨

■ WindowsはMicrosoft Corporationの登録商標です。

■ 本資料中の図化にはオープンソースソフトウェアのParaViewを用いています。



# 汎用の非線形有限要素法解析プログラム

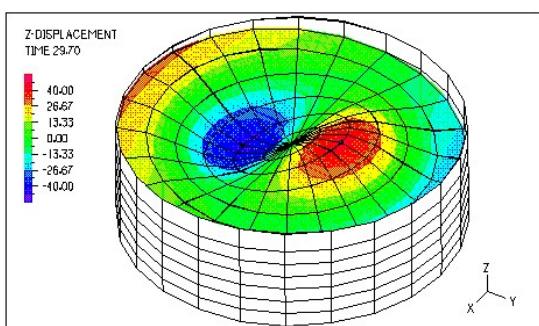
# ADINA

## 特徴

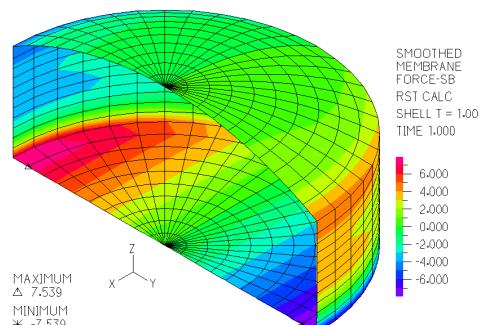
ADINA は、マサチューセッツ工科大学の研究成果を反映し ADINA R&D 社が開発した代表的な汎用の構造・熱伝導・熱流動解析プログラムです。非定常・非線形挙動を高精度な計算機能で解くことが可能です。弊社ではプログラム販売の他、解析コンサルティング・サービスもご提供しております。

## 構造物－流体連成問題

貯蔵液体タンクのスロッシング解析



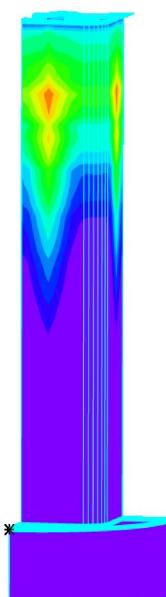
液面波形分布



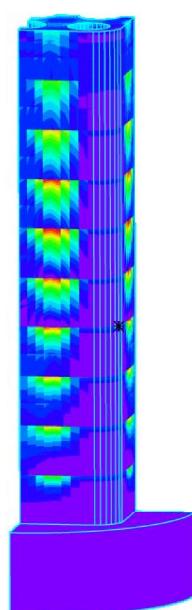
タンク壁面：断面力分布

## 非定常温度計算－熱応力問題

施工手順を考慮したRC橋脚の水和熱による、ひび割れ発生の予測



温度分布



引張応力度分布

## ■スロッシング解析のポイント

- 構造と流体の相互作用解析
- タンクはシェル要素、流体は流体要素
- 地震入力による動的応答解析
- スロッシング波高やタンク応力の算定
- 浮き屋根の有無による差異の検討

## ■水和熱によるひび割れ発生予測解析のポイント

- コンクリート打設サイクルの段階施工解析
- 水和熱量の時間変化を考慮
- 3次元非定常温度計算による温度予測
- 型枠の脱却を反映した熱伝達境界の設定
- 打設コンクリートのヤング係数の時間依存性

## 紹介セミナー・お試し版プログラム・教育訓練

ADINA プログラムや解析事例を紹介するセミナーをご用意しております。お試し版 CD とプログラム使用法の教育訓練もご提供致します。また一般的な有限要素法解析についてのセミナーや教育も貴社のご事情に応じた内容で行います。お気軽にご相談下さい。

## 材端剛塑性ばねモデルと適合する RC 部材のファイバーモデル化に関する検討

正会員○鈴木 壮\*1  
同 梁川幸盛\*1  
同 宇佐美祐人\*1  
同 木村まどか\*1

ファイバーモデル 材端剛塑性ばね マルチスプリング  
RC 造 降伏時剛性低下率

## 1. はじめに

建築構造設計分野において鉄筋コンクリート柱梁部材は一般的に線材としてモデル化される。また、弾性解析において柱梁部材は Timoshenko 梁としてモデル化されることが一般的であるが、曲げに関する弾塑性特性を考慮する場合にはいくつか方法が存在する。代表的なモデル化とその特徴を表 1 に示す。材端剛塑性ばねモデルは計算負荷が小さいことから一般的によく用いられてきたが、以下の点で課題がある。

1. ひび割れ後の剛性低下を決める際に降伏時軸力を仮定しないと  $\alpha_y$  が決定できない。
2. 一軸が基本となるため二軸曲げの影響を考慮することが難しい。
3. 動的解析など繰り返し載荷が生じる場合の除荷剛性の設定や軸力が大きく変動した場合の履歴追跡の根拠づけが難しい。

上記の問題を解決する手法として MS モデルとファイバーモデルがある。MS モデルとファイバーモデルは断面を分割するという点で似た考え方によるが、最終的に回転ばねとして評価されるか梁要素として評価されるかの違いがある。文献<sup>1)</sup>でも材端剛塑性ばね、MS モデルにおいては解析モデル上のばね設定が部材の曲げモーメント分布に依存してしまうため、想定と異なるモーメント分布が生じた場合にはモデル化自体不適切な可能性があると指摘している。また、MS モデルとファイバーモデル共通の課題として、材端剛塑性ばねモデルで一般的に用いられる降伏時剛性低下率  $\alpha_y$  を表現することが難しいという点が挙げられる。 $\alpha_y$  は実験結果から回帰された式であり鉄筋の付着すべりなどの影響が含まれており、これらの影響も適切に考慮する必要がある。しかしながら、付着すべりという現象は平面保持仮定が成立していないため、平面保持仮定を前提としている MS モデルおよびファイバーモデルでは直接的に表現することが難しい。

本稿ではファイバーモデルを例にとり、降伏時剛性低下率  $\alpha_y$  を表現するためのモデル化について検討を行うことを目的とした。解析には(株)構造計画研究所の「3 次元フレーム汎用解析プログラム RESP-F3T」を用いた。

## 2. 対象モデル概要

解析対象モデル概要を図 1 に、断面諸元を表 2 に示す。境界条件は部材に逆対称モーメントが生じるように両端は回転固定とした。載荷条件は節点 2 の位置に鉛直力を荷重漸増解析として作用させることとした。モデルは材長 3m、6m の 2 つのモデルについて検討を行った。

## 3. 材端剛塑性ばねモデルとファイバーモデル比較

解析モデルは M-θ 非線形特性を定義した材端剛塑性ばねモデル（以下、M-θ）とファイバーモデルによる比較を行った。M-θ 骨格曲線を表 2 に、Fiber 梁要素モデル、分割断面および分割断面の骨格曲線をそれぞれ図 3、4、5 に示す。なお、Fiber の塑性化領域における非線形特性は端部応力で評価し、塑性化領域内で曲率一定として一律に剛性低下させることとしている。塑性化長さ  $L_p$  については道路橋示方書<sup>2)</sup>を参考に以下の式で算出した。

$$L_p = 0.2h - 0.1D \quad (0.1D \leq L_p \leq 0.5D)$$

h: 材長 D: 断面せい

結果として今回のモデルでは上限値である  $L_p=0.5D$  としている。また、Fiber については鉄筋部分を Bi-linear として降伏点のみ考慮したモデル（以下、Fiber）とひび割れを考慮して Tri-linear として考慮したモデル（以下、Fiber-Tri）を検討した。Tri-linear の設定においては下記の仮定を行った。

- ・第 1 折点  $\sigma_c$  は曲げ降伏モーメント  $M_y$ 、曲げひび割れモーメント  $M_c$  および軸方向降伏応力度  $\sigma_y$  から  $\sigma_c = \sigma_y \times (M_c/M_y)$  として算出した。
  - ・降伏時軸歪みは以下により算出した。（図 6 参照）
- 1) 降伏時回転角  $\theta_y$  から弾性変形分の回転角  $\theta_e$  を差し引いた塑性回転角  $\theta_p$  を算出する。
  - 2) 塑性化領域長さ  $L_p$  において  $\theta_p$  の回転が生じるときの端部曲率  $\phi_p$  ( $= \theta_p/L_p$ ) を算出する。
  - 3) 曲げ降伏時の中立軸から引張鉄筋までの距離を  $7/8d$  と仮定し、 $\epsilon_y = \phi_p \times 7/8d$  として降伏時歪みを算出する。
  - 4) 第 1 折点歪み  $\epsilon_c = \sigma_c/E$  で算出し、原点と第 1 折点 ( $\epsilon_c, \sigma_c$ )、第 2 折点 ( $\epsilon_y, \sigma_y$ ) を結ぶ折線により骨格曲線を定義する。算出された応力-歪関係を図 7 に示す。

解析結果比較として曲げモーメント-変位関係を図8に示す。M-θとFiberではひび割れ後の挙動に顕著に差が生じているが、M-θとFiber-Triを比較すると3m、6mモデルいずれもおおむね近い履歴特性を描いていることが確認できた。

表1 梁要素曲げ弾塑性評価手法

|          | 骨格曲線                     | モーメント分布の仮定 | 二軸曲げ         | 動的解析         |
|----------|--------------------------|------------|--------------|--------------|
| 材端剛塑性ばね  | Bi-linear, Tri-linear    | 必要         | △<br>(工夫が必要) | △<br>(工夫が必要) |
| MSモデル    | Poly-linear<br>(断面分割に依存) | 必要         | ○            | ○            |
| Fiberモデル | Poly-linear<br>(断面分割に依存) | 不要         | ○            | ○            |



図1 解析対象モデル

|         |        |       |
|---------|--------|-------|
|         | 鉄筋     | SD345 |
| 600×800 | コンクリート | Fc21  |
| 5-D25   | dt     | 75 mm |
| -       |        |       |
| 5-D25   |        |       |

図2 部材断面諸元

| 表2 材端剛塑性ばねモデルのM-θ関係 |          |
|---------------------|----------|
| 3m-Model            | 6m-Model |
| $M_c (kN\cdot m)$   | 193      |
| $M_y (kN\cdot m)$   | 628      |
| $\alpha_y$          | 0.160    |
|                     | 0.228    |

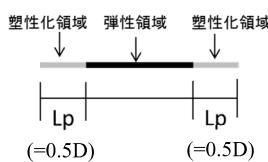


図3 Fiber梁要素モデル

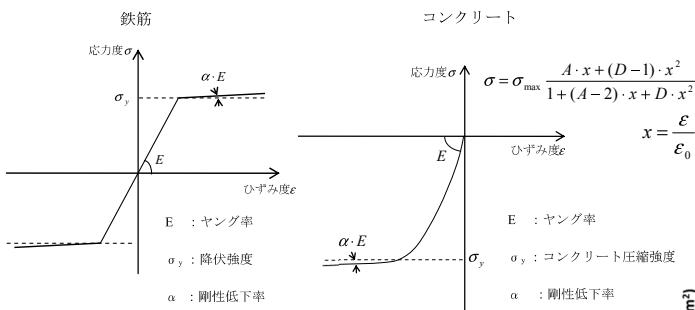


図5 ファイバー分割断面の骨格曲線

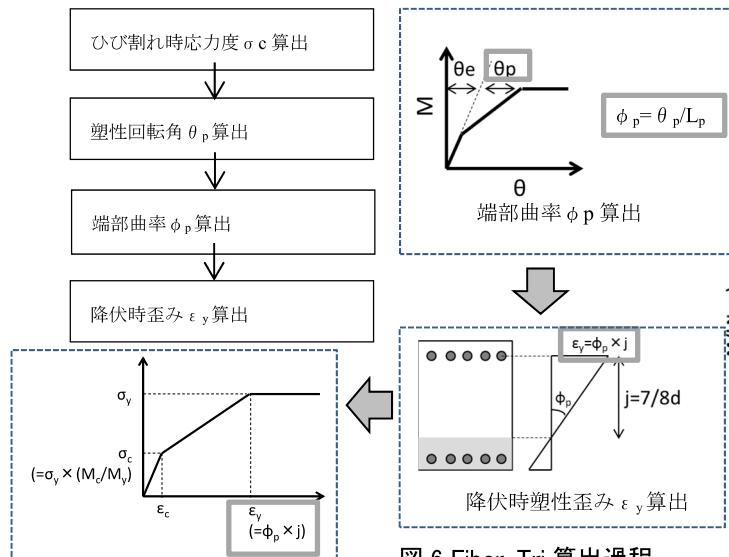


図6 Fiber-Tri算出過程

#### 4. まとめ

本検討により得られた知見を以下に示す。

- 材端剛塑性ばねモデルによる骨格曲線と適合するファイバーモデルを検討した。
- 検討した条件下においては、材端剛塑性ばねモデルによる変形性状とよく一致することが確認できた。

#### 5. 課題

今後は以下の課題について調査していく必要がある。

- 適切な塑性化領域設定方法の検証
- 多様な断面・配筋状況における検証
- 軸力変動が生じた際の性状の検証
- モーメント分布が逆対称曲げ以外の場合の検証
- 動的な履歴特性に対する検証

参考文献

1) 鉄筋コンクリート構造シンポジウム（その2）「RC基礎部材と上部構造部材における性能評価の現状と将来」 日本建築学会 構造委員会 鉄筋コンクリート構造運営委員会 鉄筋コンクリート部材性能小委員会

2) 「道路橋示方書V耐震設計編」 公益社団法人 日本道路協会

3) 建築省総合技術開発プロジェクト：鉄筋コンクリート造の軽量化・超高層技術の開発、平成4年度 NewRC 研究開発概要報告書、国土開発技術センター、1993.3

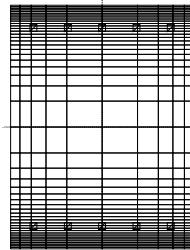


図4 Fiber分割断面

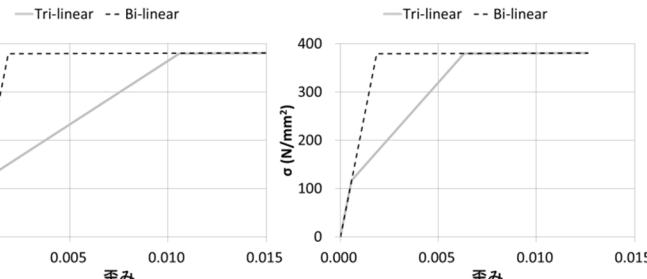


図7 塑性化領域の応力度-歪関係(左:3mモデル、右:6mモデル)

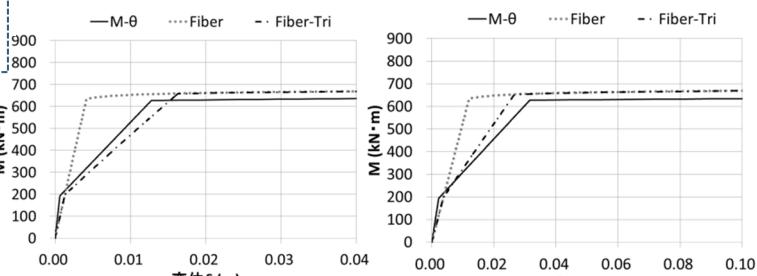


図8 モーメント-変位関係(左:3mモデル、右:6mモデル)

## 噴石衝突におけるコンクリート版破壊シミュレーションに用いるパラメータの影響

正会員 ○正月 俊行<sup>\*1</sup> 非会員 佐々木 寿<sup>\*2</sup> 非会員 成毛 志乃<sup>\*2</sup>  
 正会員 梁川 幸盛<sup>\*1</sup> 非会員 渡辺 高志<sup>\*1</sup>

噴石 コンクリート 裏面剥離  
 粒子法 破壊シミュレーション

### 1. はじめに

2014 年に発生した御嶽山の噴火では、主に噴石の落下により多数の死者が発生した。内閣府はこのような噴石に対する退避壕等の充実に向けた手引きを作成している<sup>1)</sup>。その手引きの中で、簡易な退避壕として鉄筋コンクリート造のボックスカルバートが噴石に対してどのくらいの耐力を有しているかシミュレーションを用いて検討がなされている。計算手法には二次元の粒子法が用いられているが、計算結果の妥当性を確保するために様々なパラメータの調整が行われている。現状では、適切な計算パラメータの調整方法に関する一定の考え方はないものの、それぞれのパラメータが計算結果に与える影響度を検討しておくことは有意義と考えられる。

そこで、本研究では噴石が高速でコンクリート版に衝突する際の破壊シミュレーションの精度向上に向けて、パラメータの設定が計算結果に与える影響について検討する。

### 2. 計算手法と検討方法

計算には、文献<sup>1)</sup>と同様にコンクリート版や噴石の変形と破壊を考慮可能な二次元の粒子法(SPH 法)と個別要素法(DEM)の連成解析を用いる。コンクリートが破壊する前の連続体としての挙動を粒子法で計算し、破壊してばらばらになった後の挙動は個別要素法で計算する。

文献<sup>1)</sup>を参考に設定した計算モデルの概要を図 1 に示す。版厚 22cm のコンクリート版に、直径 30cm の噴石（質量 34.2kg）が速度 80m/s で衝突する場合を想定する。

表 1 に計算条件の一覧を示す。コンクリート強度には、ひずみ速度効果を考慮して割り増した値を用いる。表中の「二次元補正倍率」は、二次元の解析では奥行方向に衝突エネルギーが拡散せず、コンクリートが過剰に破壊する傾向があるため、便宜上コンクリート強度に倍率をかけることで、コンクリートが破壊しすぎないように調整するためのパラメータである。コンクリートの構成則としては、図 2 に示す非線形の Drucker-Prager の構成則<sup>2)</sup>を用い、コンクリートの引張強度の 1/3 を負圧限界としている。また、表中の「SPH 限界ひずみ」は、粒子法と個別要素法を切り替える閾値のひずみで、SPH 限界ひずみ以上のひずみが発生した粒子は、連続体としての挙動を

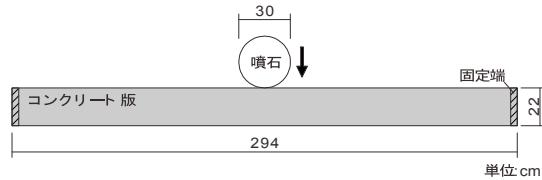


図 1 計算モデル概要

表 1 計算条件一覧（基本ケース）

|            |   |
|------------|---|
| ▶ 噴石       | 直径 : 30cm<br>質量 : 34.2kg (密度 : 2421kg/m <sup>3</sup> )<br>衝突速度 : 80m/s<br>噴石の変形と破壊を考慮する。密度以外の物性と破壊条件はコンクリート版と同じと仮定。   |
| ▶ コンクリート版  | 寸法 : 幅 294cm × 厚 22cm<br>鉄筋は考慮しない<br>端部固定   |
| ▶ コンクリート物性 | ヤング係数 : $2.55 \times 10^{10}$ N/m <sup>2</sup><br>ボアソン比 : 0.15<br>密度 : 2320kg/m <sup>3</sup><br>圧縮強度 : 84.8N/mm <sup>2</sup><br>(動的倍率 1.8 倍 × 二次元補正倍率 2 倍<br>倍率考慮前 : 24N/mm <sup>2</sup> )<br>引張強度 20.3N/mm <sup>2</sup><br>(動的倍率 4.1 倍 × 二次元補正倍率 2 倍<br>倍率考慮前 : 2.5N/mm <sup>2</sup> ) |
| ▶ 構成則      | 非線形 Drucker-Prager(負圧限界 : 引張強度の 1/3)<br>その他<br>粒子径 : 15mm<br>重力加速度 : 考慮しない<br>SPH 限界ひずみ : 0.2   |

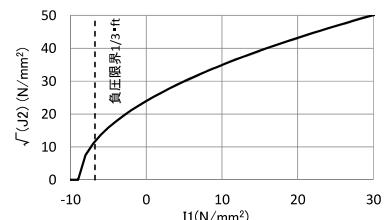


図 2 コンクリートの構成則（基本ケース）

失い、別々の物体として扱われる。

本検討では、表 1 に示した計算条件を基本ケースとして、明確な設定根拠がない二次元補正倍率と SPH 限界ひ

ずみの値を変化させ、計算結果がどのように変化するか検討を行う。検討ケースの一覧を表2に示す。

表2 検討ケース一覧

| 二次元補正倍率   | SPH限界ひずみ          |
|-----------|-------------------|
| 1倍        | 0.1               |
| 2倍(基本ケース) | ×                 |
| 3倍        | 0.2(基本ケース)<br>0.3 |

### 3. 検討結果

図3が二次元補正倍率とSPH限界ひずみを変化させた場合の計算結果を比較した図である。コンクリートの破壊状況を色で示しており、圧縮降伏をした箇所を灰色、引張破壊をした箇所を赤色、どちらもしていない箇所を青色で示している。各ケースの上段の図は裏面剥離による破壊がほぼ終了した5ms後の状態で、下段の図は全体モードの曲げ変形が進んだ後の30ms後の状態を示している。噴石がコンクリート版から離れているのは、噴石が跳ね返ったことを表している。

裏面剥離による破壊がほぼ終了した時点で比較すると、二次元補正倍率が小さいほどコンクリート版上側の引張破壊の領域が広くなってしまい、二次元補正倍率1倍のケースでは版の上半分のほとんどが引張破壊の領域となってしまっており、コンクリートが過剰に破壊していることが分かる。一方、二次元補正倍率2倍以上のケースでは版中央

に健全な領域が残る結果となった。版中央下側の裏面剥離の領域については、計算パラメータによらず近い分布形状となった。SPH限界ひずみの影響については、裏面剥離による破壊がほぼ終了した時点では大きな違いは見られなかった。

全体モードの変形が進んだ後の時点で比較すると、二次元補正倍率1倍では版の曲げ変形が進み、折れ曲がっていることが分かる。また、折れ曲がりの角度はSPH限界ひずみが小さいほど大きい結果となった。

### 4. まとめ

本研究では、噴石が高速でコンクリート版に衝突する際の破壊シミュレーションの精度向上に向けて、パラメータの設定が計算結果に与える影響について検討した。その結果、衝突直後の引張破壊の領域の大きさに対しては二次元補正倍率が大きく影響し、全体モードの曲げ変形による破壊に対しては、二次元補正倍率だけでなくSPH限界ひずみの影響も大きい結果となった。

### 謝辞

本研究のシミュレーション実施にあたり、内閣府「活火山における退避壕の整備等に関する検討WG」メンバーの皆様、および、防衛大学校 別府万寿博教授に貴重なご意見をいただきました。ここに記して謝意を示します。

### 参考文献

- 内閣府：活火山における退避壕の充実に向けた手引き 平成27年12月, <http://www.bousai.go.jp/kazan/shiryo/index.html>.
- 別府・他：剛飛翔体の高速衝突を受けるコンクリート板の局部破壊発生メカニズムに関する数値解析的検討、土木学会 構造工学論文集, 2007.

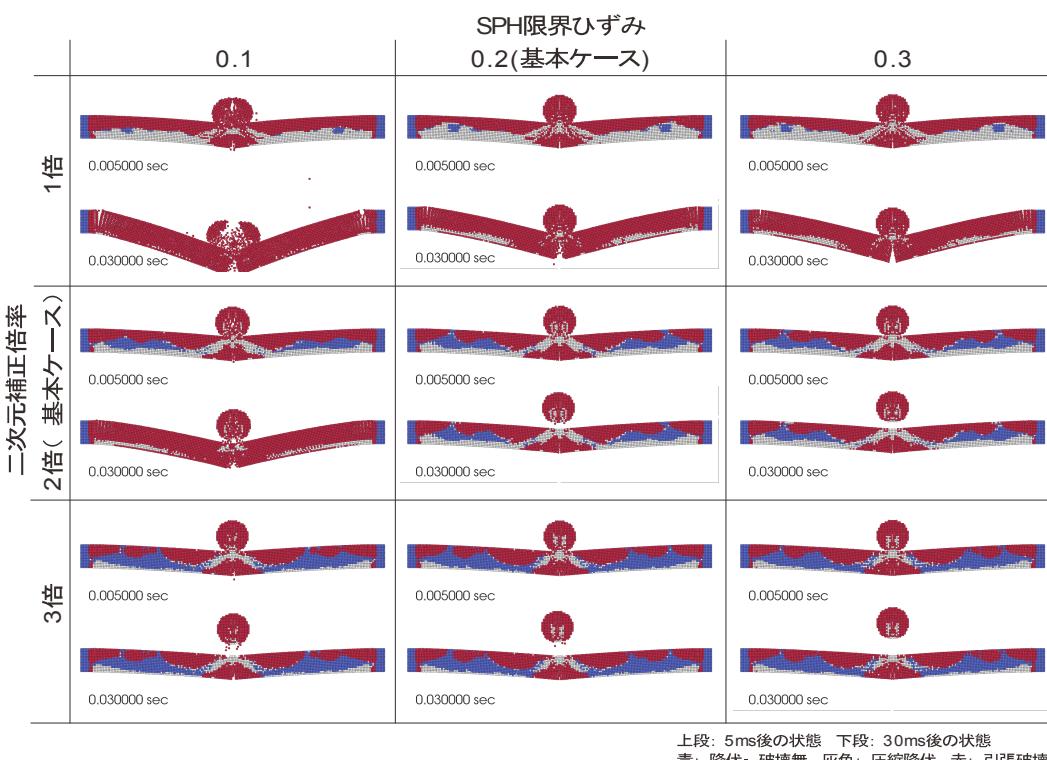


図3 二次元補正倍率とSPH限界ひずみを変化させた場合の計算結果比較

\*1 構造計画研究所

\*2 アジア航測株式会社

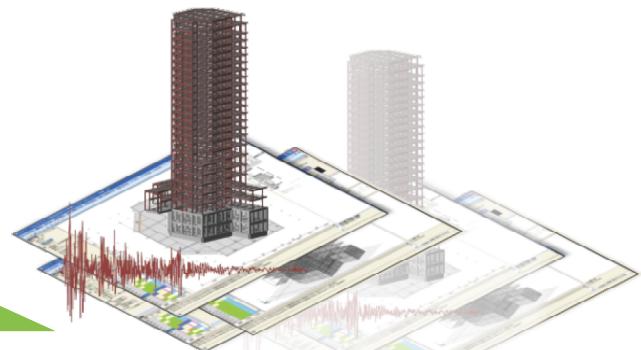
\*1 Kozo Keikaku Engineering Inc.

\*2 Asia Air Survey Co., Ltd.

時刻歴応答解析による設計を支援する  
統合構造計算プログラム

# RESP-D

RESP-D は Ver.3 へ。



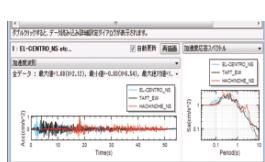
## 操作性向上で、設計をよりスムーズに。

### ・2次元作図機能



- 1クリックでフォント・モーメント倍率調整
- 応力の表示・非表示も切り替え可能
- ブックマーク機能で結果に素早くアクセス

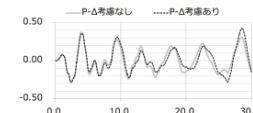
### ・入力波形のプレビュー機能



- 複数の波形重ね書きにも対応
- 応答スペクトルのデジタル値取得

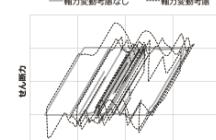
## 計算機能の強化で、より精緻な解析も。

### ・柱・壁・支承材のP-Δ効果考慮



■塔形状比の極めて大きな超高層建物  
■杭頭免震・柱頭免震構造

### ・すべり支承の軸力変動考慮



■水平上下同時入力による軸力変動

## 『RESP-Dならできる50のこと』公開中

- RESP 50のこと
- ・シアリング型オイルダンパーを配置したい  
で検索
  - ・水平上下同時加振で免震支承材の引き抜きを検討したい

## 3次元任意形状フレーム構造解析ソフトウェア

# STAN/3D

New! たわみ・振動数検定

New! 横座屈による許容曲げ応力度の低減考慮

New! 各種係数の考慮（変形増大・寸法効果・システム・含水率）

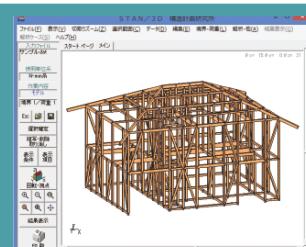
UP! 燃え代・断面欠損をより詳細に考慮した断面検定

## Ver. 11.6 断面算定オプション「木造用機能」向上！

<適用規準類>

- ・木造軸組工法住宅の許容応力度設計(2008年版)
- ・木質構造設計規準(2002年版)

※接合部等の検定は対象外



## 簡易振動解析ツール

# Quick-RESP

## SS3 CSVファイルの 材端ばね・床プレースの変換に対応しました

こんなお悩みをスピーディーに解決します。

- ・施主説明用に地震時建物挙動アニメーションを作成したい
- ・確認検査機関から立体振動解析による妥当性確認を  
求められて困っている

(株)構造計画研究所  
STAN/3D  
RESP-F3T

ユニオンシステム(株)  
Super Build/SS3 CSV

その他の構造データ

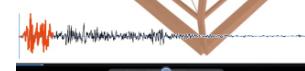
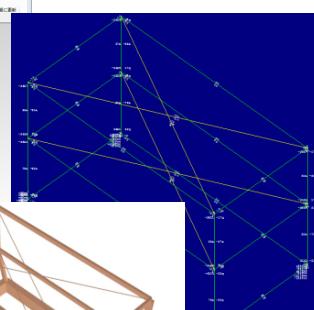
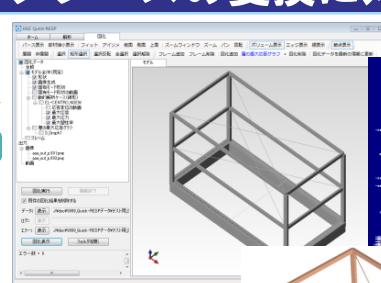
(株)構造計画研究所  
Quick-RESP



- 【入力】  
地震波の指定など  
最低限のデータのみ追加  
【出力】  
・固有モード図  
・最大応答値図  
・最大応力図  
・最大塑性率図  
・応答アニメーション など

※Quick-RESPは(株)構造計画研究所の開発商品です。  
他社様へのお問い合わせはご遠慮ください。

※変換元データにより出力制限があります。



## Kaiseki Portal

「解析ポータル」サイトでは、災害、環境、維持管理、建築、土木の各分野での解析に関する様々な情報やコンサルティングサービス、構造解析、設計用入力地震動作成システム、地震リスク評価、災害時対策、地盤と構造物の動的相互作用、熱・流体解析に関するソフトウェアについてご紹介しています。

本誌のバックナンバー(PDF形式)をダウンロードいただけます。ぜひお立ち寄りください。

<http://www.kke.co.jp/kaiseki/>

## From Editors

日本語を勉強している私にとって、中国出身であることは、とても「好都合」です。まずは、漢字の意味がほとんど一緒ですし、字と意味が異なる場合でも、相当する言葉を探しやすいからです。

ここで、一つの例を挙げます。

私は大学生時代で「ゲーム理論」という科目を履修したことがあります。この学問は、社会の個体の行動関係性から国同士の付き合い方まで、数値で可視化する面白くて難しい学問でした。ゲーム理論は囲碁や将棋のような勝負ごとと同じようにルール、対戦するプレイヤー、戦略などの条件が不可欠です。それゆえだと思いますが、中国語では「ゲーム理論」のことを「博奕論」という三文字の組合せで表現しています。（「漢字源」によりますと、「弈（えき）」という字は「碁石や将棋のこまを並べて勝負する」という意味です。）「ゲーム理論」の「ゲーム」は、囲碁や将棋のような対戦ゲームだということを理解するだけで、頭の中にある中国語と日本語の変換ができます。

ただ不思議なことに、「都合」という言葉は、相当する中国語を見つけることが出来ませんでした。

代替案も考えてみました。ここで、「都合」という言葉の漢字二文字の意味をゲーム理論的に考えると、複数のプレイヤー全て（都）にとって、各自の利益が最大限に等しい（合）状態、つまり最適解の状態が「都合」となります。幸い「最適解」という言葉は、中国語でも同じです。

しかし、「最適解」は「都合」にとって不都合な場合もあります。例えば、「今晚のご都合はいかがですか？」と尋ねることは、相手と自分の今晚の最適解を見つけようとしていることに当たるわけですが、「ご都合」を「最適解」と言い換えると、変な感じになりますね。

結論として、中国語で「都合」に都合の良い言葉は見つかりませんでした。

エンジニアリング営業2部 焦 凝



本誌掲載記事ならびに弊社の商品・サービスに関するお問い合わせは下記までお願ひいたします。

**kaiseki@kke.co.jp**

(株)構造計画研究所 エンジニアリング営業 1, 2 部

〒164-0011 東京都中野区中央 4-5-3

TEL (03) 5342-1136

(株)構造計画研究所 大阪支社

〒541-0047 大阪市中央区淡路町 3-6-3 御堂筋 MTR ビル 5F

TEL (06) 6226-1231

(株)構造計画研究所 名古屋支社

〒460-0008 愛知県名古屋市中区栄 1-3-3 アムナットビル朝日会館 11F

TEL (052) 222-8461

(株)構造計画研究所 福岡支社

〒812-0012 福岡県福岡市博多区博多駅中央街 8 番 1 号 JRJP 博多ビル 8F

TEL (050) 5305-1380

## 解析雑誌 Journal of Analytical Engineering Vol.42 2017.1

発行日 平成 29 年 1 月吉日

編集・発行 株式会社構造計画研究所 エンジニアリング営業 1, 2 部  
〒164-0011 東京都中野区中央 4-5-3

お問い合わせ 電話 (03) 5342-1136 FAX (03) 5342-1236  
[kaiseki@kke.co.jp](mailto:kaiseki@kke.co.jp)