

解析雑誌

Vol.37 2015.1

Topics

【イベント出展報告】

- KKE vision 2014
～ともに気づく未来、ともに築く社会～
- ものづくり NEXT ↑ 2014 メンテナンステクノロジー
～インフラ維持管理と防災対策に貢献する ICT ソリューション～
- RESP&STAN セミナー2014
～最新免制震装置の特徴と設計時の留意点～

Technical Reports

- 固定屋根式タンクのスロッシング問題を対象とした SPH-FEM 連成解析
- A Damage Detection Technique by Distributed Strain Measurements using Long-gage Fibre Bragg Grating Sensors

Journal of Analytical Engineering

2015 年のはじめに

(株)構造計画研究所
エンジニアリング営業部長
中村 仁

2015 年が始まりました。本年も宜しくお願い致します。

今年は過去のいろいろな出来事から数えて節目の年に当るようです。国家的なプロジェクトや出来事を中心に少しさかのぼってみますと、

- ・ 愛知万博開催、中部国際空港開港から 10 年
- ・ 阪神・淡路大震災から 20 年
- ・ つくば国際科学技術博覧会開催から 30 年
- ・ 日韓国交正常化から 50 年
- ・ 太平洋戦争終戦から 70 年 の年に当たります。

読者の皆様にとって、今なお考えさせられるのは、やはり「阪神・淡路大震災」でしょうか。当時まだ名古屋で学生をしていた私は、震災の当日、偶然にも大阪方面に出かける予定になっていました。朝のニュースで地震が発生したことはわかっていましたが、詳しい状況が分からず、名古屋駅のホームで新幹線が不通になっていることを知り、ようやくただ事ではないと悟ったのを覚えています。

当時の恩師の言葉で強く印象に残っているのが、防災を考える上での基本は、「わが事」ということ。そして、専門家は「率先市民でもあれ」という教えです。あれから 20 年、ご存知のように神戸市は 2008 年にユネスコからデザイン都市に認定されるなど、力強く震災を乗り越え、更なる発展を目指した取り組みも数多いと聞きます。

振り返ってみて、私自身はどうだったか。先の恩師の教えを実行してきたか。

- ・ ご自宅の家具は固定できていますか？
- ・ 防災グッズや備蓄品、いざというときの準備はできていますか？

残念ながら私は失格です。

今年は未年。羊は「平和」「安泰」の象徴とされています。2015 年が「平穏」であることを祈りつつ、いま一度恩師の教えをかみ締め、身近な「出来ること」を実行していこう、と年のはじめに考えた次第です。

さて、2000 年に創刊されました本誌も今年 15 年を迎えることが出来ました。今後も皆様に有益な情報・最新の技術開発などを発信し続けて行きたいと考えておりますので、引き続きご活用いただけたら幸いです。

解析雑誌 Vol.37 2015.1

巻頭言 『2015 年のはじめに』 エンジニアリング営業部 部長 中村 仁	02
---------------------------------------	----

Topic 1

● 「KKE Vision 2014 ～ともに気づく未来、ともに築く社会。～」開催報告	04
---	----

Topic 2

● ものづくり NEXT ↑ 2014 ～インフラ維持管理と防災対策に貢献する ICT ソリューション～ 出展報告	06
● 防災産業展 in 仙台 (2015/3/15～17 開催) 出展のご案内	

Topic 3

● RESP&STAN セミナー2014 ～最新免制震装置の特徴と設計時の留意点～ 開催報告	08
---	----

Technical Report 1

● 固定屋根式タンクのスロッシング問題を対象とした SPH-FEM 連成解析 渡辺 高志、登柳 正夫、嶋村 洋介、榎谷 浩	14
--	----

Technical Report 2

● A Damage Detection Technique by Distributed Strain Measurements using Long-gage Fibre Bragg Grating Sensors Kejian YANG, Ryo YONAO, Kazumi YAMAMOTO	24
---	----

Editor's Note

● From Editors	35
----------------	----

「KKE Vision 2014 ～ともに気づく未来、ともに築く社会。～」 開催報告

プライベートイベント「KKE Vision 2014 ～ともに気づく未来、ともに築く社会。～」を10月30日（木）、虎の門ヒルズフォーラムにて開催いたしました。

本イベントは構造計画研究所の企業理念である「大学、研究機関と実業界をブリッジする総合エンジニアリング企業」の精神のもと、大学、研究機関とビジネスパートナーとの間に立ち、工学知を共有する“場”のご提供を目的として毎年開催してまいりました。

今年も、時流に合わせた様々なテーマに沿って、各分野の専門家の方々にご講演いただきました。基調講演では、東京大学特任教授の横山禎徳氏にご登壇いただきました。

■ 開催概要

- ・ 日時：2014 年 10 月 30 日（木）
- ・ 会場：虎の門ヒルズフォーラム
- ・ 主催：株式会社構造計画研究所



■ プログラム

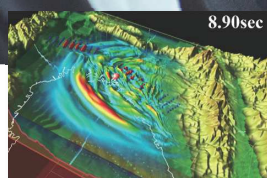
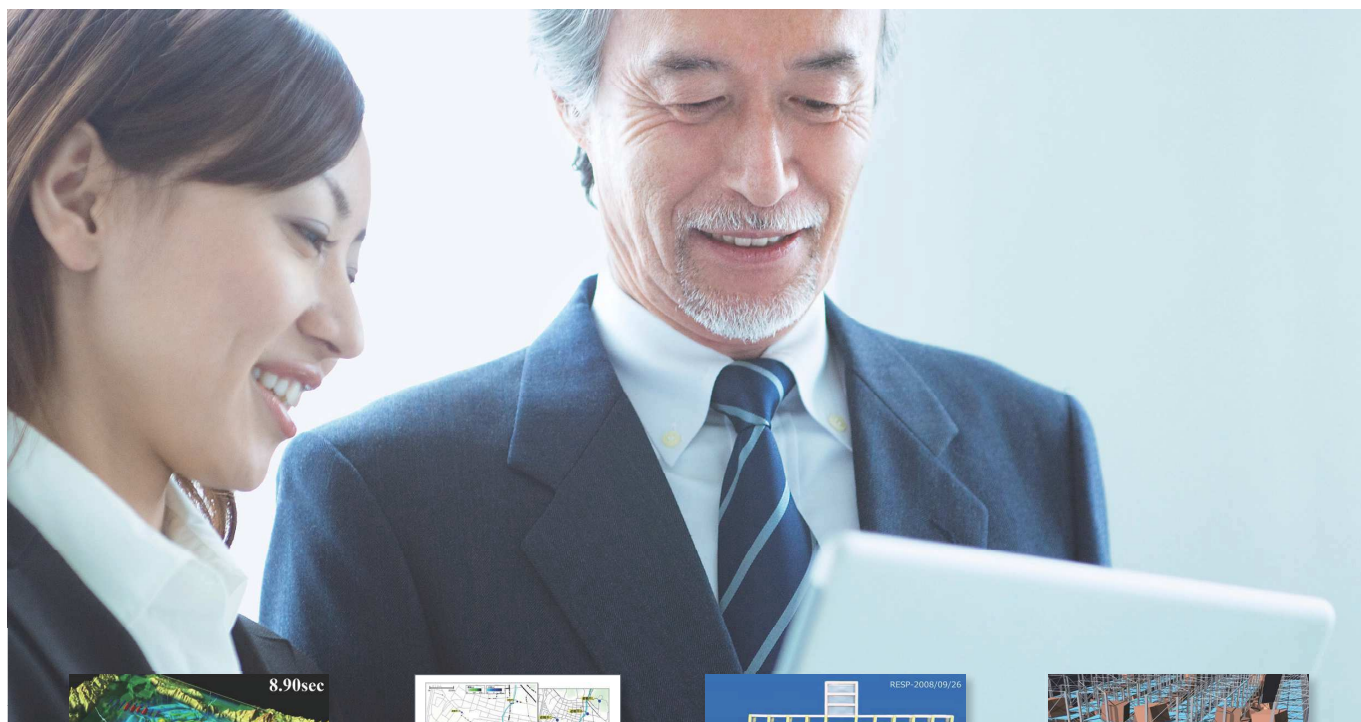
【基調講演】		
「産業振興」発想から「社会システム・デザイン」発想へ		東京大学 特任教授 横山 禎徳 氏
【講演内容】		
● ITSによる交通の革新と未来創造	特定非営利活動法人 ITS Japan 専務理事	天野 肇 氏
● 道路インフラの資産マネジメントにおけるデータの取得と活用	中日本高速道路株式会社東京支社 環境・技術管理部 環境・技術チーム 担当リーダー	山本 浩司 氏
● イノベーションを生む米国スタートアップコミュニティの実際	Colorado Technology Association CEO	Erik Mitisek 氏
● 人・モノ・クルマの位置情報ビッグデータを防災に活かす	株式会社ゼンリンデータコム ネットサービス本部 営業戦略室 マネージャー	足立 龍太郎 氏
● 炭素繊維複合材料(CFRP)とその適用事例のご紹介	帝人株式会社 高機能繊維事業本部 生産・研究開発部門 ソリューション開発部部長 兼 大阪研究センター長	内川 哲茂 氏
	東邦テナックス株式会社 炭素繊維・複合材料事業本部営業部門 インダストリービジネスグループグループ長	須山 洋一 氏
● 再生医療におけるコトづくり	大阪大学大学院 工学研究科 生命先端工学専攻 教授	紀ノ岡 正博 氏

KKE Vision 2014 公式WEBサイト → <http://kkevision.kke.co.jp/kv2014/>

これからは、災害対策のために

『シミュレーション』を 使いこなす時代です。

いま、BCP・防災計画における“合意形成ツール”としてご依頼いただくケースが増えています。



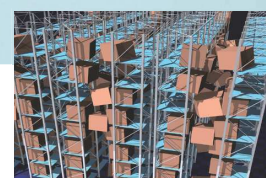
地震動シミュレーション



津波避難シミュレーション



地震対策の評価シミュレーション



自動倉庫 荷物の落下シミュレーション

把握できる、対策できる、説明できる。

発災時の被害量を知ることが災害対策の第一歩です。シミュレーションをおこなうことにより、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。

建物の被害はどの程度？

Is値では分からない被害を把握

効果的な対策をたてるためには、シミュレーションは必須です。また、一度たてた対策の妥当性を調べるためにもご利用いただけ、無駄なコストも抑えられます。

BCP策定のため

対策の妥当性が分かる

シミュレーションをおこなうことで、被害が定量的に分かります。具体的かつ説得力あるデータを得られるので、関係者との合意形成にお役立ていただけます。

ステークホルダーへの説明

地域住民への説明

ものづくりNEXT↑2014 出展報告

防災産業展 in 仙台 (2015/3/15~17 開催) 出展のご案内

構造計画研究所では、これまでに建築、土木分野において蓄積してきた構造力学的視点に立ったシミュレーション技術やデータ分析技術、最適化手法や統計学的手法といったデータマイニング技術を、様々な業界の方に広く紹介し、交流を促進することを目的に、展示会への出展を積極的に行っています。

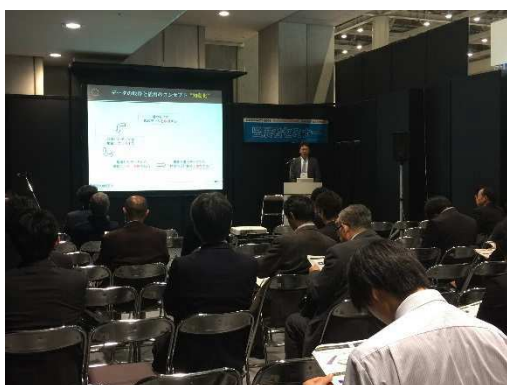
■出展内容

- 保全・維持管理ソリューション
 - 設備管理データ解析コンサルティング
「データマイニング技術」による異常検知・変状予測
 - FBGやカメラセンサなどによる「センシング技術（実測データ）」と「構造解析技術」を活用した構造ヘルスモニタリング
構造同定問題、環境振動問題、疲労劣化問題、損傷劣化問題への適用
 - 目視検査/目視判断の自動化ソリューション
- 災害対策ソリューション
 - 大規模地震による、強震動、長周期地震動、津波、地盤液状化問題への解析技術の適用
 - プラント・工場・設備の耐震対策のための解析技術の適用
 - BCP（事業継続計画）策定のための災害リスク評価コンサルティング
 - 防災計画策定・検証のための避難シミュレーション

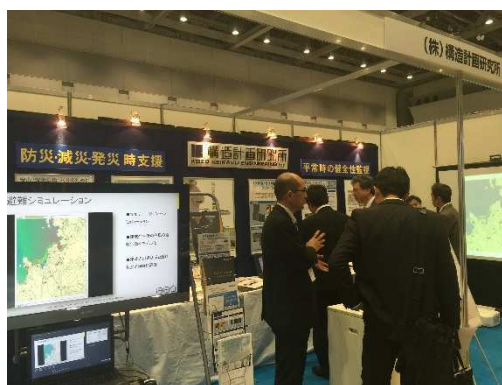
■出展のご報告

ものづくりNEXT↑2014 インフラ検査・維持管理展

会 期	2014年11月12日（水）～14日（金）
会 場	東京ビッグサイト（東京国際展示場）
主 催	一般社団法人日本能率協会
セミナー	インフラ維持管理と防災対策に貢献するICTソリューション エンジニアリング営業部 スtockマネジメント室室長 為廣尚起



ものづくりNEXT↑2014 セミナー風景



ものづくりNEXT↑2014 展示ブース風景

■開催のご案内

防災産業展 in 仙台

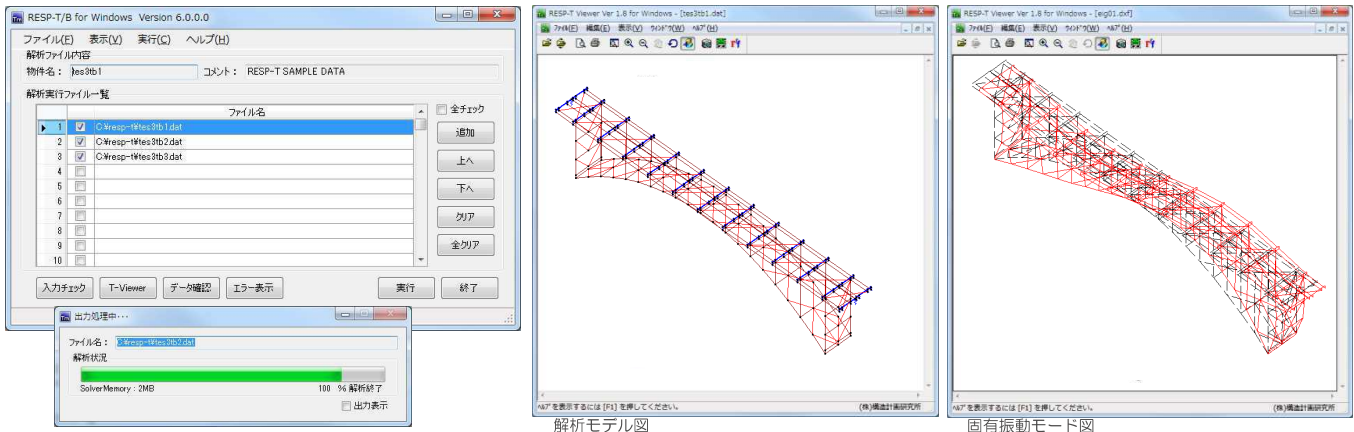
会 期	2015年3月15日（日）～17日（火）
会 場	夢メッセみやぎ（仙台市宮城野区港3丁目1-7）
主 催	内閣府、宮城県、日刊工業新聞社
出展テーマ（予定）	構造物の耐震対策、震災シミュレータ、避難シミュレーション、災害リスク評価

※招待状をご希望の方は、本誌裏面の「お問い合わせ先」までご連絡ください。

RESP-T

Version 5.1.2.2
3次元静的・動的複合非線形解析プログラム

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⁽¹⁾(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
* (1)荷重増分と強制変位の同時作用が可

要素

トラス要素⁽¹⁾⁽²⁾、ビーム要素⁽¹⁾⁽²⁾、材軸直交分割要素⁽¹⁾⁽²⁾、パネ要素⁽²⁾、
剛域付き4点支持パネ要素⁽²⁾、剛域付き2点支持パネ要素⁽²⁾、MSS要素⁽²⁾、
平面ひずみ要素⁽¹⁾⁽²⁾、平面応力要素⁽¹⁾⁽²⁾、板要素、減衰要素⁽²⁾、
剛域付き4点支持減衰要素⁽²⁾、剛域付き2点支持減衰要素⁽²⁾、Maxwell要素⁽²⁾
* (1)幾何学的非線形考慮可 (2)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⁽¹⁾、JR総研SRC型⁽¹⁾、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⁽¹⁾、原点指向型テトラリニア⁽¹⁾、
最大点指向型テトラリニア⁽¹⁾
* (1)最終勾配考慮可

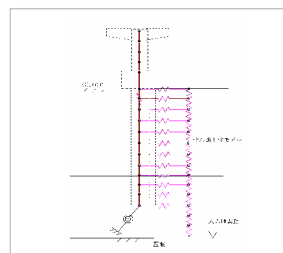
特殊復元力特性

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(hardning考慮)型、(株)ブリジストン鉛入り積層ゴム型、
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

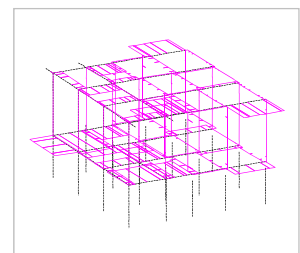
復元力特性(減衰)

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。



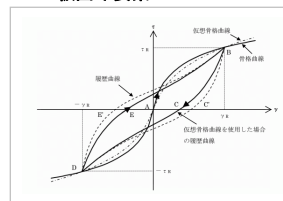
上部構造—基礎一体モデル
(動的相互作用考慮)



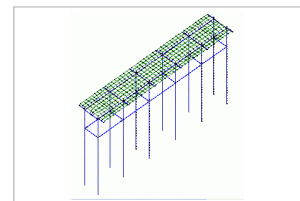
不整形ラーメン高架橋解析モデル
(ねじりモーメント図)

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

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

RESP&STANセミナー2014 ～最新免制震装置の特徴と設計時の留意点～ 開催報告

12月3日に「RESP&STANセミナー2014 ～最新免制震装置の特徴と設計時の留意点～」が開催されました。建築構造解析プログラムRESPシリーズにおいて、この1～2年間に各種免制震装置への対応が大幅に進む一方、各々の装置の特徴や設計における留意点が十分に伝えられていないのではないかと気がかりがあり、装置メーカー・販売会社各社との共同でセミナーを企画しました。

装置メーカー・販売会社13社による最新の免制震装置の特徴や留意点の説明と、弊社各プログラムの最新情報、新商品の発表を行い、当日は多くの皆様にご来場いただき、大盛況のうちに終了いたしました。

セミナー後、弊社新館1階の「en cafe」にて行った懇親会も、セミナー参加者・メーカー各社・弊社社員の交流がすすみ、その名の通り「en～縁～」をつなぐ場になりました。

■開催概要

- ・日時：2014年12月3日(水) 13:30～17:50 (懇親会：18:00～20:00)
- ・会場：株式会社 構造計画研究所 新館B1レクチャールーム



講演中の様子

■プログラム

○各社免制震装置の特徴と設計時の注意点

- ・(株)高環境エンジニアリング：鉛プラグ挿入型積層ゴム、粘性ダンパー
- ・住友理工(株)：TRCダンパー
- ・倉敷化工(株)：天然ゴム系積層ゴム、U型ダンパー一体型積層ゴム
- ・JFEシビル(株)：座屈補剛ブレース、制振間柱、制振パネル 他
- ・(株)ブリヂストン：高減衰ゴム系積層ゴム
- ・昭和電線デバイステクノロジー(株)：天然ゴム系積層ゴム、弾性すべり支承 他
- ・オイレス工業(株)：鉛プラグ入り積層ゴム、制震壁 他
- ・三菱重工メカトロシステムズ(株)：MCBダンパー
- ・東京ファブリック工業(株)：弾性すべり支承
- ・新日鉄住金エンジニアリング(株)：球面すべり支承、アンボンドブレース 他
- ・日立機材(株)：油圧式制振ダンパー
- ・住友ゴム工業(株)：粘弾性ダンパー
- ・(株)免制震デバイス：RDT, iRDT 他

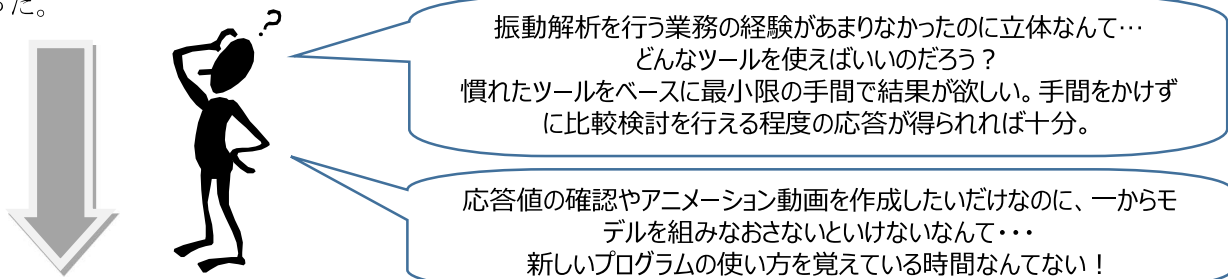
○プログラム最新情報 (株)構造計画研究所 建築構造工学部：STAN/3D、RESP-D、新商品他

○懇親会

■セミナー内で紹介した新商品「Quick-RESP」概要

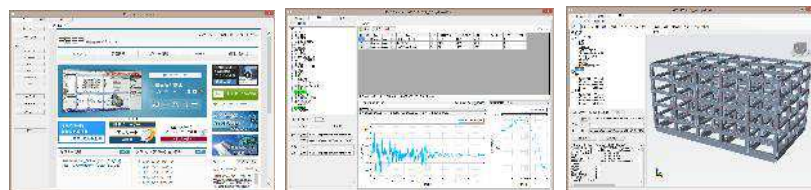
○立体振動解析で困ったことはありませんか？

- ・確認検査機関から、ねじれが大きい低層建物の設計に関して、立体振動解析による妥当性確認を求められた。
- ・大きな床開口を有する建物の設計に関して、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た。
- ・施主から地震時の建物挙動をアニメーションで見せてほしいと頼まれた。
- ・低層建物の設計コンペで、意匠事務所から地震応答アニメーションの作成を依頼された。
- ・質点系モデルの検討で設計を行ったが、追加検討対応で立体振動解析を実施しなければならなくなった。



これらの悩みを解決するために作られた簡易立体振動解析ツール。

それが **Quick-RESP** です。



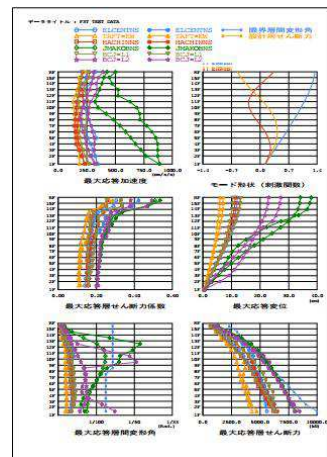
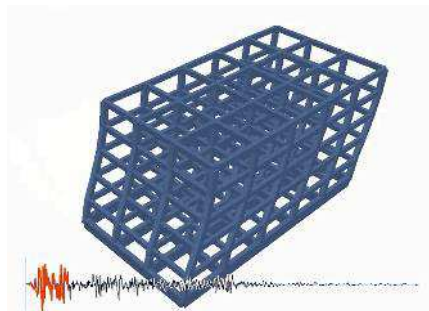
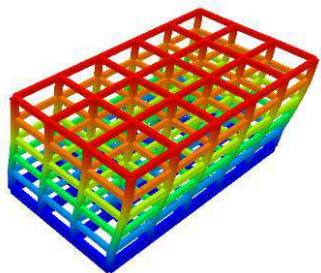
(株)構造計画研究所
Quick-RESP

【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
・最大応答値
・応答アニメーション
など

※変換元データによる出力制限があります。

※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。



RESP ホームページ : <http://www4.kke.co.jp/resp/>

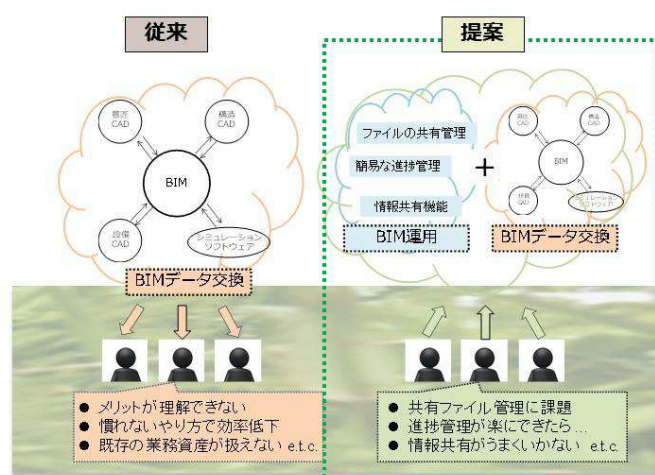
STAN ホームページ : <http://www4.kke.co.jp/stan/>

■セミナー内で発表した新商品「BIMプロジェクト統合グループウェア」開発概要

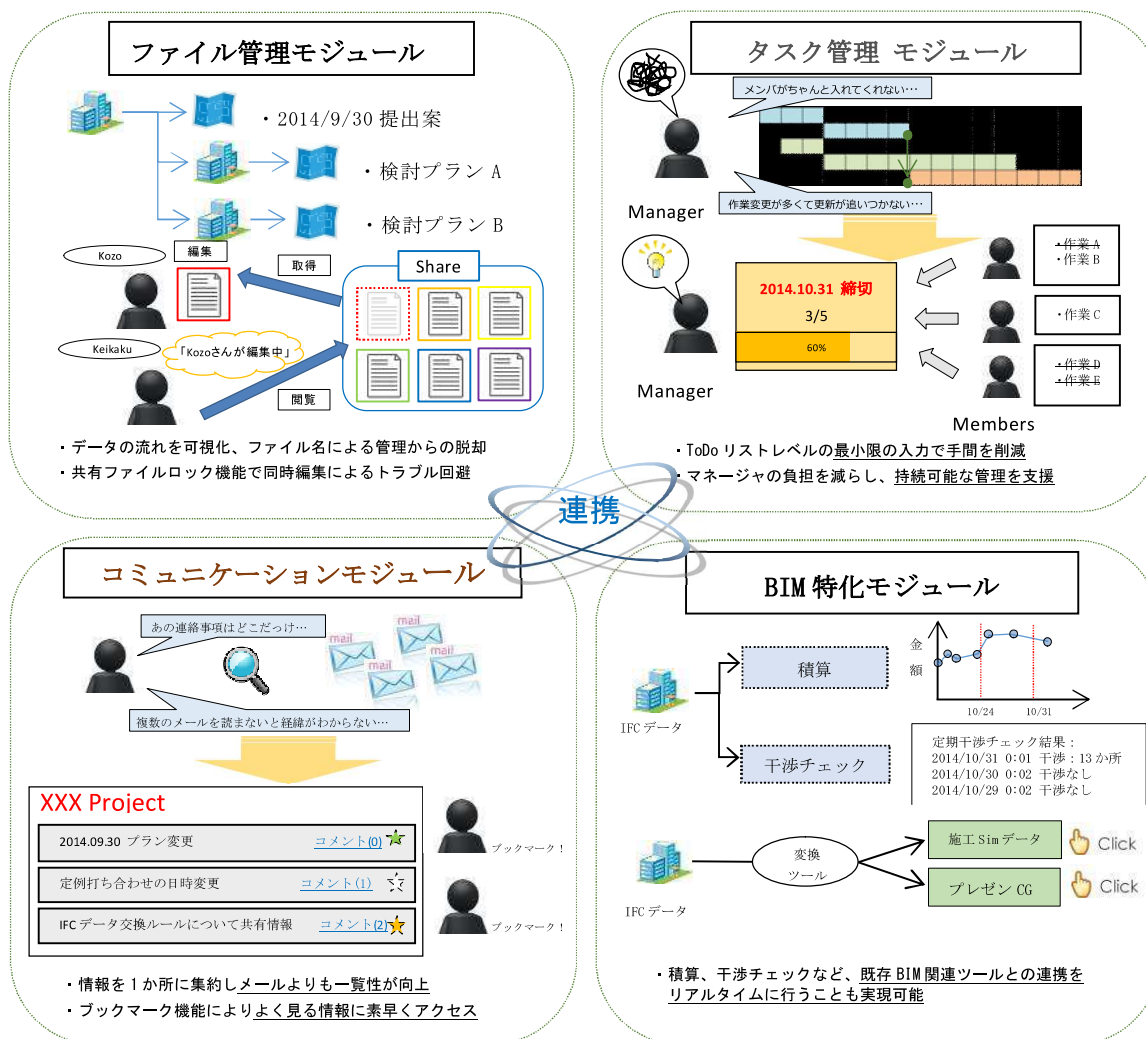
昨今、建築設計・生産において話題にのぼるBIM (Building Information Modeling)。各種ソフトのデータ交換機能の整備が進み、BIMに取り組んだプロジェクト実績も各所で発表されています。

しかし、実際の技術者に話を伺うと、データ連携による効率化以上にプロジェクト全体における運用・運営上の問題が多く、個々人の苦労の上に成り立っている状況であることが徐々に明らかになってきました。

そこで、運用支援・管理の視点からBIM推進をサポートするグループウェアを提案いたします。



BIMに業務を合わせるのではなく、業務効率化の延長でBIMを促進

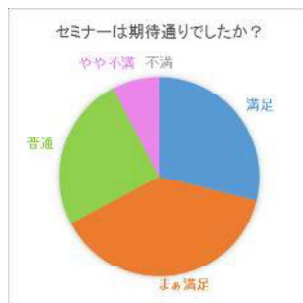
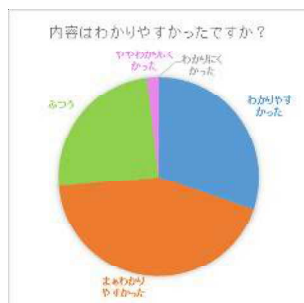


上記機能を相互に連携し、BIMの可能性を最大限発揮します！

■セミナー参加者アンケート

セミナー当日、参加いただいた方々にアンケートにご協力いただきました。結果の一部をここにご報告いたします。

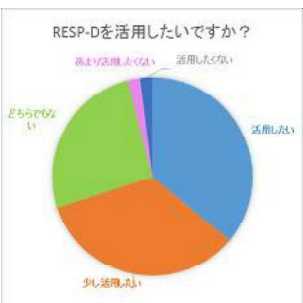
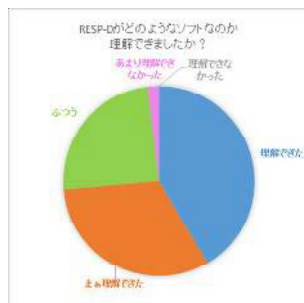
○セミナー全体について



＜セミナーに対するご意見・今後への期待＞

- ・各社様々な免制振部材があることは理解できたが、RESP 入力上の留意点に関する説明がもっと欲しかった。
- ・建築だけでなく機械装置の制震についても説明してほしい。
- ・多数のメーカーの商品が一度に開けるのはよかったのですが、ちょっと詰め込みすぎだったかも。メーカー数を絞って分けて開催してもよかった。
- ・RESP への入力例・設計例をまとめたセミナー企画を希望。
- ・振動解析について、基本的な部分を解説するセミナー。

○「RESP-D」について



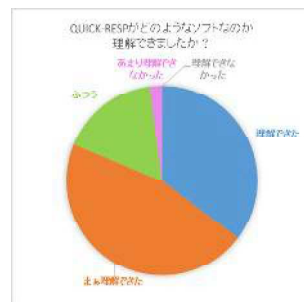
多くの方々に実際に RESP-D を体験していただき、業務での活用をご検討いただきたく、期間限定の試供版をご用意しております。

お申込みは RESP ホームページより受け付けております。
→<http://www4.kke.co.jp/resp/>

RESP-D
期間限定試供版
お申し込み受付中

1 回のお申込みで 2 週間、1 ライセンスお使いいただけます。お申込み後 2 営業日以内程度で使用を開始できますが、過去の試供状況等により、お申込みをお断りする場合がございます。あらかじめご了承ください。

○「Quick-RESP」について

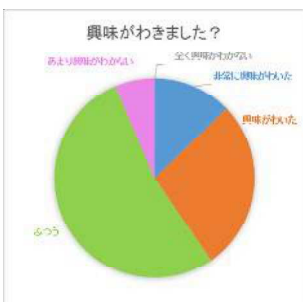
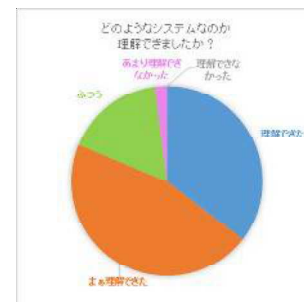


セミナー内で行った「Quick-RESP」のデモ動画を、下記セミナー報告ページにて公開しております。

<http://www4.kke.co.jp/resp/seminar/report141203.html>



○「BIMプロジェクト統合グループウェア」について



＜本システムに対していただいたコメント＞

- ・社内でも BIM は話題にはなっていますが、現状は止まっている状況。社内での調整ができれば、再度話を聞いてみたい。
- ・BIM 運用面での課題については、同様の認識を持っています。
- ・社内で BIM 運用に向けた活動は本格的になってきているが、自身は担当外。担当者に伝えてみたいと思う。
- ・2～3 年先でよいかな、と思う。



システムの思想的な部分の話が中心であったため、内容が伝わりにくかったようです。今後も順次、具体的な情報発信を行ってまいります。

○その他感想

- ・非常に勉強になった。定期的の実施いただきたい。
- ・毎年、免震制振のセミナーを開催してほしい。
- ・色々貴重な話が聞けたと思います。また機会がありましたら参加したいと思います。

RESP-D

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 SERIES

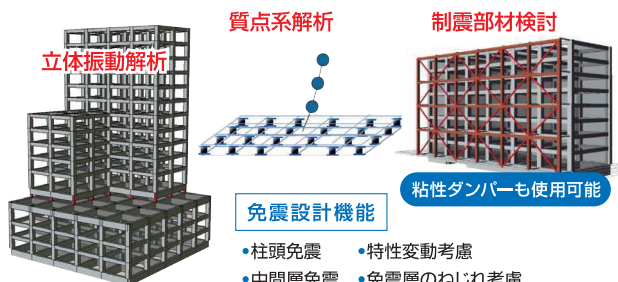
Program Package for Seismic Study of Building

概要

RESP-Dは許容応力度設計から質点系振動解析、立体振動解析までをシームレスで行う新世代の構造計算プログラムです。RESPシリーズが取り組んできた超高層建築、免震構造、制振構造に対して、数々の新しいアイデアを盛り込むことで、より高度で質の高い構造計算やプレゼンテーションをサポートします。

プログラムの特長

1. 許容応力度計算、荷重増分解析、振動解析まで一連処理可能です。
2. 立体振動解析・質点系振動解析が選択可能です。
3. 超高層、免震、制振構造に対しスピーディに振動アニメーションを作成可能です。



STAN

3次元任意形状フレーム構造解析ソフトウェア

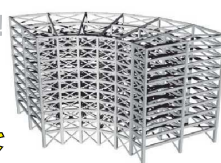
Ver.11 いよいよリリース!!

- ・Windows8.1対応
- ・木造を想定した数量集計機能の強化!!
- ・CGソフト用形状ファイルの出力!!

キャンペーンのご案内!!

今ならアップグレードがお得

眠っているライセンスをお調べします!
まとめてWeb認証版にして有効活用しませんか。



※ 市販ソフトでのレンダリング例

Quick-RESP

応答解析のための拡張ツール

**新商品
提供開始!**

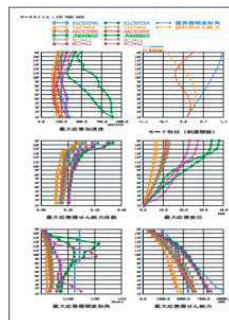
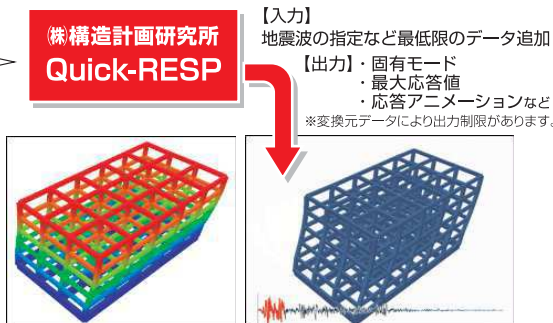
- ・簡単に立体振動解析を実施したい。
- ・立体振動解析プログラムは多機能すぎて使いこなせる自信がない。
- ・最小限の手間で応答結果を得たい。
- ・出力は最大応答値が確認できる程度で十分。
- ・手元にあるデータをベースに変換してできれば楽なのに...

これを実現したくて作られた**応答解析のための拡張ツール**。それが **Quick-RESP** です!

詳細は [RESP, STAN ホームページ](#) まで。



※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。



設計用入力地震動作成システム

【設計用入力地震動作成システムとは】

耐震設計に用いる入力地震動を建設地点に応じて作成することができるソフトウェアです。基準・法令等で定められている応答スペクトルに適合する模擬地震波を作成するだけでなく、建設地点周辺の地震環境や地盤特性を考慮した入力地震動を作成することができます。

2014年8月に、SeleSを7.0に、k-SHAKE+・k-WAVEを6.2にバージョンアップし、新機能の追加等を行いました。さらに、全てのパッケージにてWindows 8.x対応を行いました。また、SeleSの被害地震DBを更新し、2014年6月までに発生した地震を追加収録しました。

【各パッケージの機能概要と販売価格】

パッケージ名	概要
<p>地震荷重設定システム SeleS for Windows セレス</p> <p>販売価格 フル機能版 : 2,100,000円(税抜) 翠川・小林版 : 1,800,000円(税抜) ダム機能版 : 1,800,000円(税抜)</p>	<p>耐震設計の際の地震荷重を設定するために、建設地点周辺の地震環境を検索し、被害地震および活断層によってもたらされる建設地点での地震動強さを評価するシステムです。各種距離減衰式による建設地点での最大振幅計算や再現期待値計算、安中ほか(1997)やH20ダム式による応答スペクトルの計算、断層の拡がりや考慮した翠川・小林手法によるスペクトル評価が可能です。</p> 
<p>模擬地震波作成プログラム ARTEQ for Windows アーテック</p> <p>販売価格 フル機能版 : 1,000,000円(税抜) 建築限定版 : 700,000円(税抜) 土木限定版 : 500,000円(税抜)</p>	<p>構造物設計用の地震応答スペクトルを設定して、その応答スペクトルに適合する地震波を作成するプログラムです。改正建築基準法の告示1461号や設計用入力地震動作成手法技術指針(案)、道路橋示方書に準拠した目標スペクトル、耐震スペクトル、ダムの照査用下限スペクトル、SeleSで算定した地震応答スペクトル等を設定することが可能です。</p> 
<p>成層地盤の地震応答解析プログラム k-SHAKE+ for Windows ケイシェイク プラス</p> <p>販売価格 フル機能版 : 800,000円(税抜) 基本機能版 : 500,000円(税抜)</p>	<p>水平方向に半無限に広がる成層地盤を対象とした地震応答解析プログラムです。強震記録波形やARTEQで作成した模擬地震波を入力地震波として与えることが可能です。</p> <p>■基本機能 重複反射理論による等価線形解析機能を有します。土の非線形性は歪依存特性により考慮することが可能です。</p> <p>■非線形解析機能(フル機能版のみ) 直接積分法による時刻歴非線形解析機能を有します。直接積分法は線形加速度法を用いて、レーリー減衰により粘性減衰を指定することができます。復元力特性として、線形／非線形(Ramberg-Osgoodモデル、Hardin-Drnevichモデル、骨格曲線・履歴曲線を別々に設定する方法)を選択することが可能です。</p> 
<p>波形処理プログラム k-WAVE for Windows ケイウェイブ</p> <p>販売価格 : 200,000円(税抜)</p>	<p>強震記録波形データやARTEQ、k-SHAKE+で得られた波形データを読み込み、積分・微分・フィルタ処理・中立軸補正処理・各種スペクトル表示を行う波形処理プログラムです。複数の波形に対して行った処理結果を簡単に重ね描き表示することが可能です。また、波形データに対する処理過程を保存することができ、前回終了時の状態から作業を再開することができます。</p> 

固定屋根式タンクのスロッシング問題を対象とした SPH-FEM 連成解析

SPH-FEM coupling analysis for sloshing problem of a fixed roof tank

渡辺高志*, 登柳正夫**, 嶋村洋介***, 榎谷浩****

Takashi Watanabe, Masao Tonagi, Yosuke Shimamura, Hiroshi Masuya

* 博(工), (株)構造計画研究所, 防災・環境部 (〒164-0011 東京都中野区中央 4-5-3)

**修(理), (株)構造計画研究所, 防災・環境部 (〒164-0011 東京都中野区中央 4-5-3)

*** (株)構造計画研究所, 防災・環境部 (〒164-0011 東京都中野区中央 4-5-3)

****工博, 金沢大学教授, 理工研究域環境デザイン学系 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

Key Words: (FSI analysis, SPH Method, FEM, Sloshing, Seismic response analysis)

キーワード: 流体-構造連成解析, SPH 法, FEM, スロッシング, 地震応答解析

1. はじめに

地震時における液体貯槽の安全性検討においては、やや長周期成分により生じる液面揺動(スロッシング)や、短周期成分によって生じる液体と貯槽の連成振動(バルジング)の問題が知られている¹⁾。2003 年十勝沖地震や 2011 年東北地方太平洋沖地震で発生した各種タンクの被害事例は記憶に新しい。

スロッシングによる動水圧は流動速度が小さいことからタンク壁体に与える影響は少ないが、貯槽全体に圧力変動をもたらし、タンクの転倒や浮き上がりなどを生じる可能性がある。特に大型タンクにおいて重要であり、タンク底面の浮き上がりや滑動に対しては地盤との相互作用を考慮した検討が必要となる。また、有限振幅域の液面揺動では屋根との衝突が考えられ、屋根構造の損傷や溢流の発生などの検討が必要である。一方で、加振により相対的に短周期振動する構造が液体と接することで生じるバルジングは、壁体近傍に大きな圧力変動を生じ、構造物に直接的な損傷を与える可能性が高いため、貯槽の耐震設計における重要性が古くから知られている²⁾。これらの現象は着目する周期が異なり、個別に検討されることが多いが、どちらも液体と構造物が共通の界面を持って振動する流体-構造連成問題である。

液体と構造を連成した検討は、ポテンシャル流体要素を用いた FEM 解析が広く用いられている。しかし、大地震時には有限振幅域の非線形スロッシングが生じ、液面揺動の最大振幅を計る上で液体の粘性を考慮することが重要であり、その適用性には限界がある。オイラー記述の解析手法を組み合わせ、大きな液面揺動を生じる問題に適用する方法も一般に採用されるが、液体と固体の物質界面の捕捉精度が問題となる。近年では、自由液

面を有する流れ問題にはラグランジュ記述の粒子法が有効であり、メッシュフリーであることや、特に液体と構造の界面を直接取り扱える点に優位性がある。

本研究では、粒子法の一つである SPH 法^{3,4)}を採用し、FEM メッシュ表面を直接壁境界として取り扱う手法を導入した。本手法は、著者らが自社開発した個別要素法および SPH 法による数値解析コード「DYBECS」に組み込んだ。そして、スロッシング実験と波高応答を比較することで、スロッシング問題に対する SPH 法の計算精度を確認した。また、同様に著者らが開発した地盤-構造物連成系のための 3 次元動的非線形 FEM コード「NOLA」と連携させることで、固定屋根式円筒タンクに生じるスロッシングとバルジングの両方を同時に考慮する流体-構造連成問題に応用し、貯槽の地震応答解析に対する連成手法の適用性を検討した。

2. 数値解析手法

2.1. 貯槽内の液体の運動計算手法

液体運動の基礎方程式は連続の式と Navier-Stokes 方程式であり、ラグランジュ表記ではそれぞれ次式に示される。

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{D\mathbf{v}}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 \mathbf{v} + \mathbf{F} \quad (2)$$

ここで、 ρ は流体の密度、 \mathbf{v} は速度、 P は圧力であり、 μ とは \mathbf{F} はそれぞれ粘度と重力項である。本研究では液体も固体運動と同様にラグランジュ表記で取扱い、SPH 法を用いて離散化する。SPH 法では次式で示されるように位置 \mathbf{x} における物理量 $\phi(\mathbf{x})$ を着目粒子 i の影響

半径内の粒子物理量の重み付け和として表現する.

$$\phi(\mathbf{x}) \approx \langle \phi_i \rangle = \sum_j \frac{m_j}{\rho_j} \phi_j W(r_{ij}, h) \quad (3)$$

ここで, m_j と ρ_j はそれぞれ近傍粒子 j の質量と密度であり, 重みは粒子間距離 r_{ij} と基準距離 h の関数であるカーネル関数 $W(r_{ij}, h)$ により計算する. 勾配やラプラシアンはカーネル関数自体を距離で微分することによって計算でき, カーネル関数には高次のスプライン関数がよく用いられる. 本研究では Navier-Stokes 方程式の圧力勾配項と粘性項を以下のように離散化した式を用いた.

$$-\frac{1}{\rho} \nabla P = \sum_j \frac{m_j}{\rho_i \rho_j} (P_i + P_j) \frac{\mathbf{r}_{ij}}{r_{ij}} \frac{\partial W(r_{ij}, h)}{\partial r} \quad (4)$$

$$\frac{\mu}{\rho} \nabla^2 \mathbf{v} = \sum_j \frac{m_j (\mu_i + \mu_j)}{\rho_i \rho_j} \frac{(\mathbf{v}_i - \mathbf{v}_j)}{r_{ij}} \frac{\partial W(r_{ij}, h)}{\partial r} \quad (5)$$

圧力勾配項の計算に用いる流体圧力の計算は, SPH 法においては状態方程式によるモデル式より陽に計算する方法が用いられていた. しかし, 越塚らによる MPS 法⁵⁾の開発以降, 圧力のポアソン方程式を解くことによる半陰的な解法も用いられるようになった. 本研究においても, 圧力勾配以外の項による陽な粒子移動を, 次式に示すポアソン方程式の求解で求まる圧力の勾配項により修正し, 連続の式を満たす半陰的な解法を用いた.

$$\nabla^2 P = \sum_j \frac{m_i + m_j}{\rho_i + \rho_j} \frac{(P_i - P_j)}{r_{ij}} \frac{\partial W(r_{ij}, h)}{\partial r} = S \quad (6)$$

ここで, S は圧力のポアソン方程式の生成項であり, 本研究では近藤らのモデル⁶⁾を採用した.

運動方程式の時間差分は Leap-frog 法による数値積分を適用し, 上述の圧力勾配項以外による陽な粒子移動と, ポアソン方程式の求解によって得られた圧力勾配項による粒子運動の計算を行った.

2.2. タンクの構造計算手法

構造物や地盤は FEM によって離散化し, 次式の運動方程式を解くことによって動的応答を計算する.

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{K}\mathbf{x} = \mathbf{F} \quad (7)$$

ここで, \mathbf{M} , \mathbf{C} , \mathbf{K} はそれぞれ質量マトリックス, 減衰マトリックス, 剛性マトリックスである. 本研究では質量マトリックスは対角集中化したものを用い, 減衰マトリックスには Rayleigh 減衰を用いた. 構造の減衰は振動数に依存するため設定が難しく, 一般に振動数に比例する減衰を仮定し, Rayleigh 減衰は質量マトリックスと剛性マトリックスの線形結合として次式に示される.

$$\mathbf{C} = \alpha \mathbf{M} + \beta \mathbf{K} \quad (8)$$

α と β はパラメータであり, i 次モードの減衰比 h_i と固有円振動数 ω_i には次式の関係が成立することから, 2つのモードについて次式を連立することで算出できる.

$$2h_i \omega_i = \alpha \omega_i^2 \quad (9)$$

本研究では, 運動方程式の時間差分に対して Newmark

法による時間積分を適用した.

2.3. 貯槽内の液体と固体表面間の相互作用計算手法

SPH 法の固体表面 (壁境界) は一般に移動拘束を与えた粒子を用いてモデル化されている. 従って, 液体貯槽の変形を考慮するには, 構造の節点変位に対応する移動拘束を壁境界の粒子に与えることによって計算できる. しかしながら, 移動によって粒子間隔に粗密が生じて運動を拘束された粒子はそれを解消することが出来ないため, 大変形問題へ適用することは困難である. また, 円筒タンクなどの滑らかな表面を持つ構造物のモデル化には, 非常に多くの壁粒子が必要となり, モデル化精度や計算効率に問題がある.

一方で, 壁境界を三角形パッチでモデル化する計算手法⁷⁾が MPS 法の商用コードなどで用いられており, 壁境界の変形には対応できないものの, 後者の問題を解消することができる. 著者らは三角形パッチの壁境界計算手法を改良し, 任意の大変形に対応可能な SPH 法の壁境界計算手法を開発した⁸⁾. 本手法では, FEM メッシュの表面節点と SPH 法の壁境界の頂点を一対一に対応させることが可能であり, 完全にラグランジュ表記での液体と構造の連成解析を行うことができる. 開発した計算手法の概要を以下に述べる.

三角形パッチによりモデル化する壁境界の計算では, 一般に平面の壁を仮定して格子状に仮想の壁粒子を配置し, 個々の壁粒子の物理量を除いた(3)式の計算を行い, 壁から着目粒子点までの距離 r_{iw} とその総和値を対応付けたテーブルを解析実行前に作成し, 壁重み関数として解析実行時に参照し利用する. 本研究では, 同様にして以下の式に示される 0 階~2 階の壁カーネル関数 W^{wall} を通常のカーネル関数 W と粒子体積 L_0^3 から計算した.

$$W^{wall}(r_{iw}, h) = L_0^3 \sum_j W(r_{ij}, h) \quad (10a)$$

$$\nabla W^{wall}(r_{iw}, h) = L_0^3 \sum_j \frac{\partial W(r_{ij}, h)}{\partial r} \quad (10b)$$

$$\nabla^2 W^{wall}(r_{iw}, h) = L_0^3 \sum_j \nabla^2 W(r_{ij}, h) \quad (10c)$$

これらの壁カーネル関数を用いることで, 固体界面付近の液体の運動方程式の各項は, $fluid$ の添字を付けた周囲の流体粒子との相互作用項と壁境界内の領域との相互作用の和として以下の式で置き換えられる.

$$-\frac{1}{\rho} \nabla P = -\nabla P_i^{fluid} - \frac{(P_i + P_w)}{\rho_i} \nabla W^{wall}(r_{iw}, h) \quad (11)$$

$$\frac{\mu}{\rho} \nabla^2 \mathbf{v} = \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 \mathbf{v}_i^{fluid} + \frac{2\mu_i (\mathbf{v}_i - \mathbf{v}_w)}{\rho_i} \nabla^2 W^{wall}(r_{iw}, h) \quad (12)$$

ここで, P_w と \mathbf{v}_w はそれぞれ壁内部の圧力と速度であり, 壁表面の圧力 P_{ws} および速度 \mathbf{v}_{ws} とは異なる. 壁内部の物理量は, 深度方向に線形に変化することを仮定することで計算でき, 着目粒子と壁内部の圧力和および速度差は次式で示される.

$$(P_i + P_w) = P_i \left(1 - \frac{d}{r_{iw}}\right) + P_w \left(1 + \frac{d}{r_{iw}}\right) \quad (13)$$

$$(v_i - v_w) = (v_i - v_{ws}) \left(1 + \frac{d}{r_{iw}}\right) \quad (14)$$

ここで d はカーネル関数の総和計算における壁内部の代表点の深さであり、各階の壁カーネル関数の作成時に壁面内深度の一次モーメントから計算できる。

2.4. 壁境界面の变形と近傍曲率の考慮

既往の三角形パッチの壁境界モデルでは、計算効率を優先して最近接壁面距離の計算を省力化しており、壁境界面の变形を考慮することが出来ない。具体的には、解析範囲を一定分解能の格子で分割し、それぞれの格子点位置において最も近い壁面までの位置ベクトルを計算し、線形補間することで壁面までの最短距離を計算する。更に、格子点から壁面までの最短距離を差分計算することで近傍の曲率を計算することができる。着目位置の近傍曲率は、平らな境界を仮定して計算した壁面内の作用を、曲率を持った実際の壁面の作用に補正するために必要となる。この計算は分解能を高くするほど膨大な記憶容量と計算量を必要とするが、壁境界の变形を考慮しない場合においては前処理段階で一度のみ計算すれば良いため、広く用いられている。

本研究では、壁境界の变形を考慮するため、粒子点 \mathbf{x}_i から壁面までの最短距離 r_{iw} は直接次式で計算する。

$$r_{iw} = \mathbf{x}_i \cdot \mathbf{n}_w + d_0 \quad (15)$$

ここで、 \mathbf{n}_w は壁面の単位法線ベクトルであり d_0 は壁面原点間の最短距離である。また、近傍曲率の計算についても壁境界を構成する面の頂点座標から直接計算する必要があり、本研究では Meyer らによる三角形パッチの曲率計算手法⁹⁾を採用し、計算を行った。

2.5. 流体-構造連成の計算手法

本研究で採用した連成手法は、液体運動を計算する SPH プロセスと構造変形を計算する FEM プロセス間で相互通信を行う分離型の時差式解法である。それぞれのプロセスは一对一で対応するメッシュ表面の節点を介し、一定の解析時間間隔 Δt_c で節点情報の交換を行う。図-1 に時差式解法における節点情報の流れを示す。並列時差解法では両方のプロセスを並行処理できるため、計算効率の観点で優れているが、それぞれ 1 ステップ前の情報に基づき計算する必要があることから時間増分の数値定性に対する影響が大きい。逐次時差解法では少なくとも一方は同じステップの情報に基づくためより安定である。本研究では安定性を確認して使い分けたが、より不安定な問題には強連成手法が必要である。

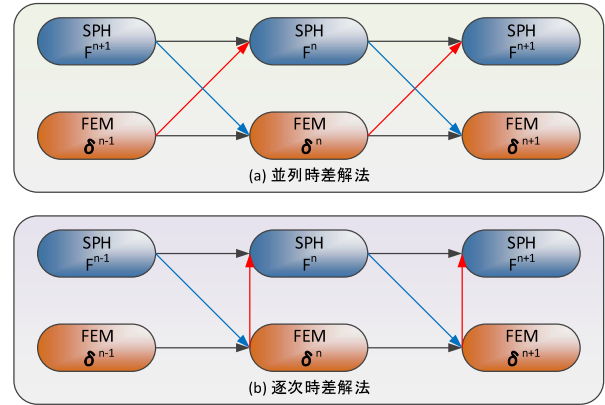


図-1 時差式解法における節点情報の流れ

SPH プロセスの時間増分 Δt_s および FEM プロセスの時間増分 Δt_f は Δt_c 以下とし、それぞれ連成通信間隔より小さい時間刻みで計算する場合、補間計算を行うことで通信のないステップにおける節点値を補った。

SPH プロセスから FEM プロセスへ伝達する節点作用力については、次式に示すように通信を行わないステップ時において力積を計算し、節点毎に算出した平均衝撃力を FEM プロセスへ送信する。

$$\mathbf{F}_i^{n+1} = \frac{1}{\Delta t_c} \sum_{k=n-1}^n \mathbf{F}_i^k \Delta t_s \quad (16)$$

ここで、 n は通信ステップであり、 k は個別プロセスの解析ステップを意味する。FEM プロセスでは荷重の変化勾配が次回通信時まで一定であると仮定し、SPH 側から渡された平均衝撃力と直前の時刻における作用力から節点荷重を次式から計算する。

$$\mathbf{F}_i^k = \mathbf{F}_i^{k-1} + \frac{\chi}{\Delta t_c} (\mathbf{F}_i^{n+1} - \mathbf{F}_i^n) \Delta t_f \quad (17)$$

ここで χ は 1~2 の値をとるパラメータである。 χ が 2 である場合に SPH 側のプロセスと力積が保存するが、節点荷重が時間領域で振動するため不安定であり、本研究では 1.0 を用いた。地震応答解析のような周期的な作用が想定される場合、力積の誤差は相殺されるため十分に小さいと考えらる。

FEM プロセスから SPH プロセスへ伝達する節点変位については、連成時間間隔の間に FEM プロセスで計算された節点変位増分を SPH プロセスへ送信し、次回通信時まで一定の節点速度を仮定し、節点変位を次式から計算する。

$$\mathbf{u}_i^k = \mathbf{u}_i^{k-1} + \frac{\mathbf{u}_i^{n+1} - \mathbf{u}_i^n}{\Delta t_c} \Delta t_s \quad (18)$$

3. SPH 法のスロッシング問題への適用性確認

開発した壁境界計算手法による SPH 法をスロッシング問題への適用性を確認するため、酒井が行った矩形

水槽を用いた 2 次元体系的スロッシング実験¹⁰⁾との比較検証を行った。この実験ではスロッシング波高の上昇により溢流が生じるため、徐々に液面揺動の周期が変化する。水槽は十分に剛であることから、この解析では構造の変形は考慮しないこととした。

3.1. 対象とするスロッシング実験の概要

酒井らは可動式床版と溢流した液体を貯めておく外側タンクを有する矩形タンクを振動台上に設置し、地震波を入力することでスロッシング実験を行った。内側タンクの床版の高さを調整することで実験条件を調整することが可能であり、液位 69cm、床版からの内壁高さ 74cm の条件で実施された実験ケースを対象とした。

酒井らは振動台に入力する加振波として、2003 年十勝沖地震の k-net 苫小牧での NS 方向の観測記録を用い、入力加速度波形の時間軸を 1/2 倍することで、地震動の卓越周期とスロッシングの一次の固有周期を合わせ、共振の発生を図っている。同様の処理を行った入力加速度波形を図-2 に示す。

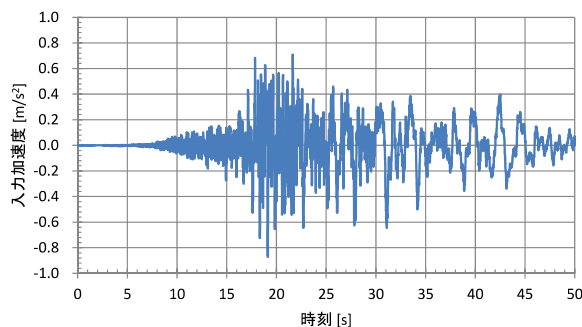


図-2 入力加速度波形

3.2. スロッシング実験の 2 次元解析モデル

幅 200cm×高さ 69cm の貯水層を 200×69 層の格子配置の粒子でモデル化した。矩形タンクは実験水槽を簡略化した奥行 2cm の 3 次元形状を用意し、1 辺が 2cm 程度になるように表面を三角形分割することで作成した。図-3 に重力加速度のみを载荷した静水計算が完了した段階の解析モデルを示す。SPH 法の計算に用いるカーネル関数には 5 次のスプライン関数を採用し、液体の物性値としては表-1 に一覧する水の物性を設定した。

地震動は物体力として入力し、全ての液体粒子に図-2 の加速度波形を反転して与え、タンクを固定した計算を行った。従って液面の揺動はタンク壁面に対する相対応答として得られる。

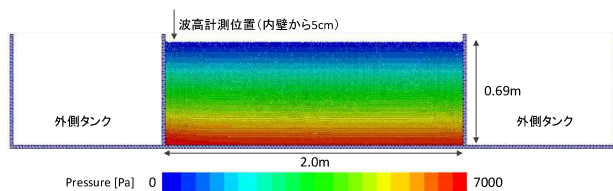


図-3 矩形貯水タンクの解析モデル

表-1 解析条件

	計算パラメータ
粒子間距離[m]	0.01
カーネル関数	5 次スプライン
粒子数[個]	13,800
液体密度[kg/m³]	1000.0
液体粘度[Pa・s]	0.001
時間増分[s]	0.0005

3.3. 解析結果と考察

スロッシング解析の結果より側壁から 0.05m の位置における液位から算出した波高の経時変化を図-4 に示す。解析結果は実験と良好な一致を示しており、スロッシングの発生によって溢流が生じることで、水位が徐々に低下するとともに、液面揺動の周期が僅かに長くなっていることが確認できる。

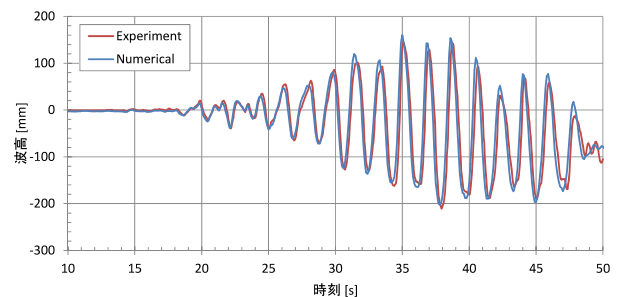


図-4 側壁から 0.05m 位置の波高時刻歴

溢流量の多い 35 秒経過時と溢流がほぼ終息する 45 秒経過時の圧力分布を図-5 に示す。35 秒経過時には溢流の発生個所で液位が高くなるため、静水圧を超過する範囲が拡大している。45 秒経過時には溢流によって平均液位が低下しており、液位が側壁高さと同程度までしか上昇しないことが確認できる。タンクの変形を考慮しない解析においては動水圧の影響は小さいこと分かる。

スロッシング実験との比較から、SPH 法と提案した壁境界の計算手法の精度および安定性が確認でき、スロッシング問題への適用性が認められた。

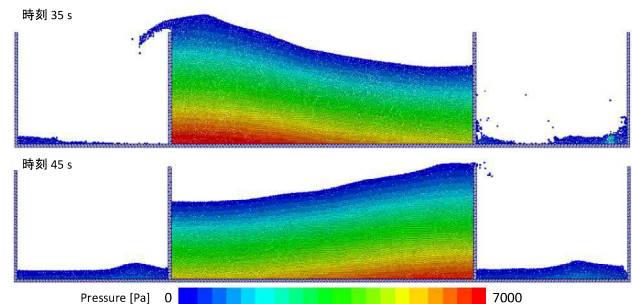


図-5 35 秒経過時および 45 秒経過時の圧力分布

4. タンクの変形を考慮した3次元スロッシング解析

バルジングとスロッシングの両方を考慮した問題への適用性を検討するために、10000kl級のドーム型固定屋根式の石油貯蔵タンクを対象とし、流体-構造連成による3次元スロッシング解析を行った。

4.1. 固定屋根式円筒タンクのモデル化

ドーム形状の屋根を有する鋼製円筒タンクは板厚が小さいことを考慮してシェル要素でモデル化を行った。タンクは直径30mで側壁高さ18mの10000kl級であり、貯蔵流体の液位は14.8mとした。要素のロッキングの影響を抑制するため側壁は全て四辺形シェルとし、屋根部分は接続のために三角形シェルとの混在とした。タンク底面について地盤との相互作用は考慮する研究例¹⁾もあるが、本研究では底面は固定境界とし、三角形要素のみを用いた。図-6に1辺が約60cmとなるように作成した節点数9,090、要素数11,388のFEMモデルを示す。また、図-7に粒子間距離30cmで作成し、静水計算を行った粒子数389,200の3次元SPH解析モデルを示す。

表-2にFEM解析条件の一覧を示す。Rayleigh減衰は円筒タンクの1次固有周期付近で3%となるようにパラメータを設定し、線形解析を行った。また、表-3にSPHの解析条件一覧を示す。なお、FEMとSPHの連成は並列時差解法により行い、通信間隔は0.01秒とした。

表-2 FEM 解析条件

	計算パラメータ
メッシュサイズ[cm]	60.0
板厚[mm]	屋根:7.5, 屋根以外:15
弾性係数[GPa]	206.0
固体密度[kg/m ³]	7900.0
ポアソン比	0.30
時間増分[s]	0.001

表-3 SPH 解析条件

	計算パラメータ
粒子間距離[cm]	30.0
カーネル関数	4次スプライン
粒子数[個]	389,200
液体密度[kg/m ³]	860.0
液体粘度[Pa・s]	0.0172
時間増分[s]	0.001

4.2. 地震入力条件

この解析では矩形タンクの2次元解析と同様に、2003年十勝沖地震のk-net 苫小牧での観測記録を用いた。時間軸の変換などの処理は一切行わず、3成分の観測記録の10秒から110秒経過時までを抽出し、100秒間の加速度波形としてFEMモデル底面に入力した。従って、タンク底面の絶対変位と壁の変形による作用が液体へ伝達され、バルジングおよびスロッシングを発生する。

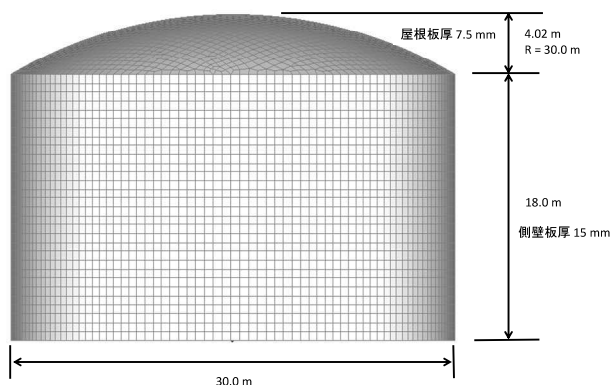


図-6 円筒タンクの3次元FEMモデル（正面図）

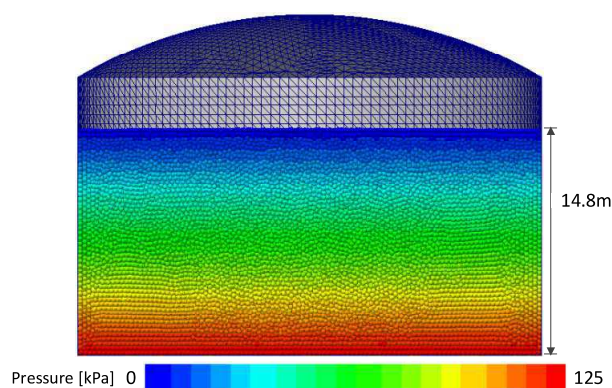


図-7 円筒タンクのSPHモデル（中央断面図）

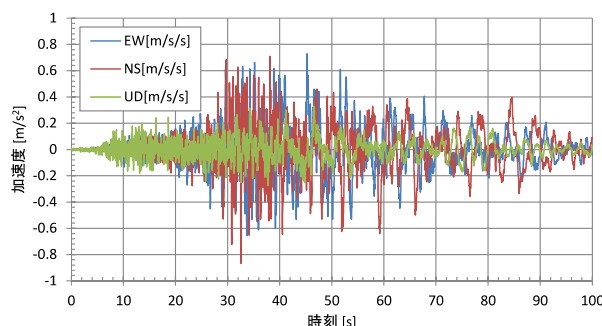


図-8 入力加速度波形（3成分）

4.3. 解析結果と考察

最大波高発生時刻の $Y=0$ (X 軸を EW 方向, 初期時刻のタンク底面中央を原点とする) 断面の圧力分布とタンク変形の鳥瞰図を図-9 に示す. 変位は底面に対する相対変位を変形倍率 10 倍で示しており, この倍率で目視できる大きさの歪みによって液体粒子と多少重なって描画されている. なお, タンク壁面は全て四辺形要素であるが, 図では三角形パッチで表現されている.

側壁近傍においてバルジングによる極めて大きい圧力変化が生じる一方で, それ以外の部位では静水圧的な圧力分布となっている. 図-10 にタンク壁面の四方の波高の時刻歴を, 図-11 に底面から 1m の高さにおける側壁面の圧力変動の履歴を示す. 側壁近傍における圧力変動の周期は約 0.7 秒であり, これは液体を考慮しないタンクの 1 次の固有周期 0.24 秒と比べて 3 倍程度長く, 付加質量に相当する連成の影響が認められる. また, スロッシング周期は約 6 秒であり, これは剛な円筒タンクの 1 次のポテンシャル理論周期 6.5 秒と比べて短い. なお, 壁面の長期的な圧力変動からはスロッシング周期による静的な圧力変化が確認できた. また, 水平加振は 2 方向であり, それぞれ周期や加速度の大きくなる時刻が異なることから, 圧力および液面揺動の方向には回転の発生が確認でき, タンクの変形にその影響が見られた.

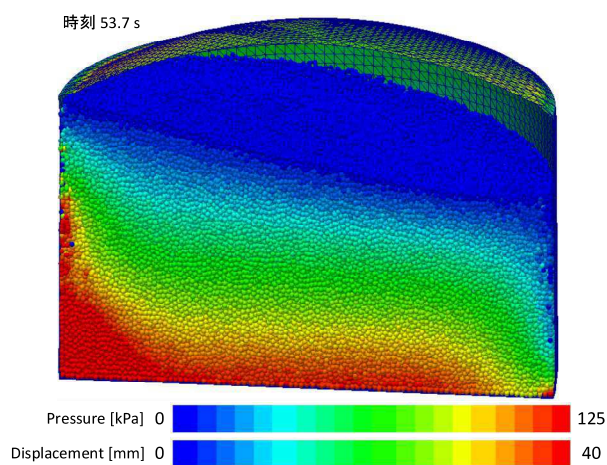


図-9 最大波高発生時の圧力分布とタンク変形図

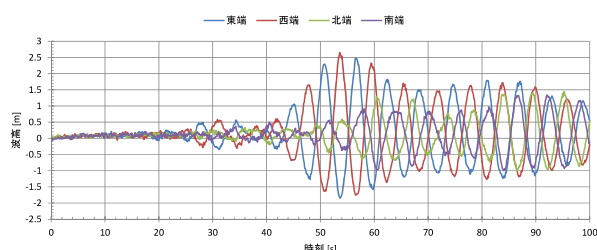


図-10 スロッシング波高の経時変化

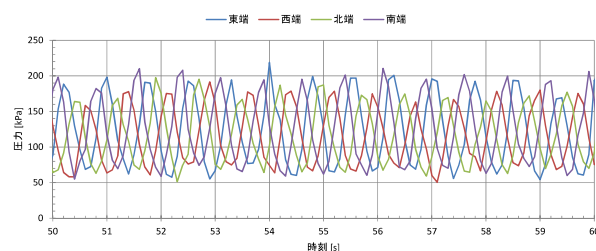


図-11 タンク側壁底部の圧力変動 (50~60 秒経過時)

5. 結論

本研究で得られた結果は以下のようにまとめられる.

- (1) 液面の大揺動に適用でき, 固液界面の取り扱いに優れる SPH 法に対し, メッシュ型解法との連成に優れる壁境界計算手法を導入した.
- (2) 矩形タンクの 2 次元スロッシング問題に開発手法を適用し, 溢流を伴うスロッシング実験との良い一致が得られた. また, タンクの変形を考慮しない解析ではバルジングが生じないため, 圧力は静水圧的分布になることが確認された.
- (3) 大型の固定屋根式タンクのスロッシング問題に開発手法を適用し, 変形を考慮した 3 次元解析を行うことで固体と液体相互の振動周期に影響があることを確認した.
- (4) 地震時において貯槽構造に作用する液体の圧力変動はバルジングによる局所的な応答が支配的であり, スロッシングの影響は僅かである.
- (5) 設定地震条件では, 液面が屋根に到達しないことが確認できたが, 地盤の変形やタンク底面のロッキング挙動を考慮することが更に必要と考えられる.

謝辞

スロッシング解析では, 入力地震波として (独) 防災科学研究所の強震記録を使用させて頂きました. ここに感謝の意を表させていただきます.

参考文献

- 1) 堀郁夫, 川端鋭憲: 地震による石油タンク火災の技術的考察と社会問題, 社会技術研究論文集, Vol.2, pp.414-424, 2004.10
- 2) 坂井藤一: 液体貯槽の耐震設計研究に関する現状と課題, 土木学会論文集, 第 362 号/I-4, pp.1-11, 1985.10
- 3) L. B. Lucy: A numerical approach to the testing of the fission hypothesis, The Astronomical Journal, 82, pp.1013-1024, 1977
- 4) R. A. Gingold, J. J. Monaghan, Smoothed Particle Hydrodynamics: Theory and Application to Non Spherical Stars, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 181, pp.375-389, 1977
- 5) 越塚誠一, 粒子法, 丸善, 2005.
- 6) 渡辺高志, 榎谷浩, 三橋祐太: 壁面境界の大変形を考

慮した粒子法の計算手法に関する基礎的研究, 日本計算工学会論文集, No.20130021, 2013.12

- 7) 近藤雅裕, 越塚誠一: MPS 法における不自然な数値振動の抑制, 日本計算工学会論文集, No.20080015, 2008.6
- 8) 原田隆宏, 越塚誠一, 島崎克教: MPS 法における壁境界計算モデルの改良, 日本計算工学会論文集, No.20080006, 2008.3
- 9) M. Meyer, M. Desbrun, P. Schröder, Alan H. Barr : Discrete differential-geometry operators for triangulated 2-manifolds, In Visualization and Mathematics III, pp.35-57, 2003
- 10) 酒井理哉, 東貞成, 佐藤清隆, 田中伸和: 溢流を伴う矩形水槽の非線形スロッシング評価, 構造工学論文集, Vol.53A, pp.597-604, 2007.3
- 11) 中村秀明, 森川慎吾, 麻生稔彦, 浜田純夫: 内容液と地盤との相互作用を考慮したコンクリート製液体貯蔵タンクの地震応答解析, 土木学会論文集, No.655/V-48, pp.47-61, 2000.8

汎用の非線形有限要素法解析プログラム

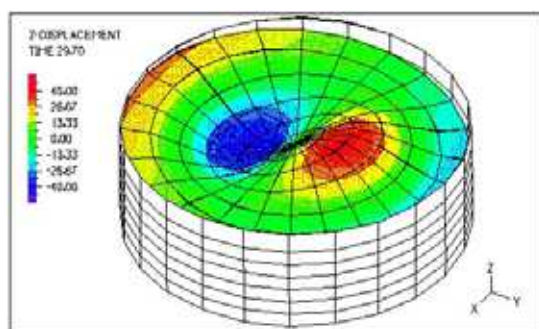
ADINA

特徴

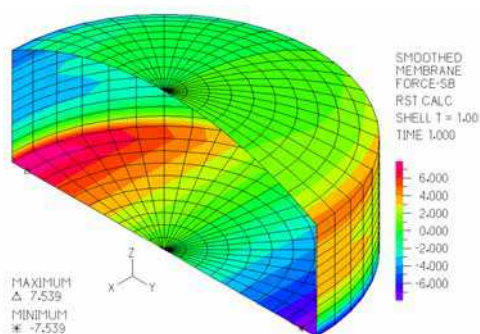
ADINA は、マサチューセッツ工科大学の研究成果を反映し ADINA R&D 社が開発した代表的な汎用の構造・熱伝導・熱流動解析プログラムです。非定常・非線形挙動を高精度な計算機能で解くことが可能です。 弊社ではプログラム販売の他、解析コンサルティング・サービスもご提供しております。

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



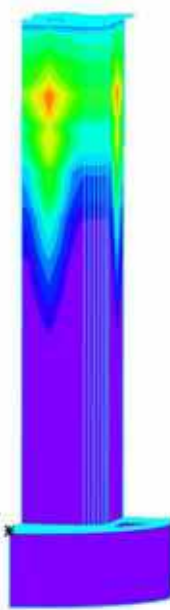
タンク壁面：断面力分布

■スロッシング解析のポイント

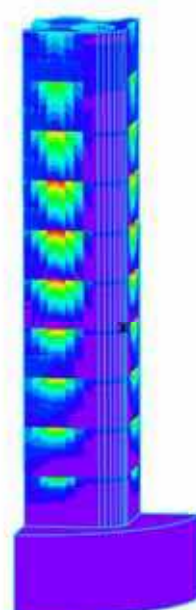
- ・構造と流体の相互作用解析
- ・タンクはシェル要素、流体は流体要素
- ・地震入力による動的応答解析
- ・スロッシング波高やタンク応力の算定
- ・浮き屋根の有無による差異の検討

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

■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。

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

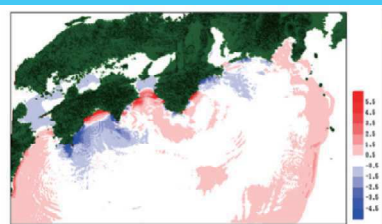
出力多彩

アニメーション等の
多彩な結果出力に
対応可能です。

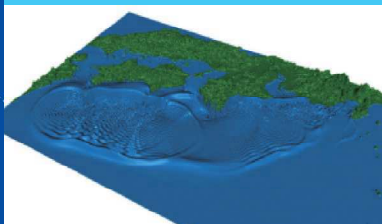
2D・3Dアニメーション表示だから解析結果が一目瞭然

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。

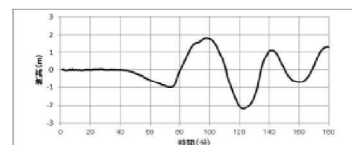
2D アニメーション



3D アニメーション



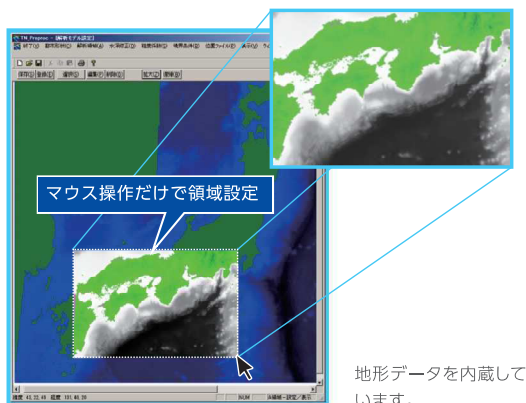
時刻歴波形グラフ



津波シミュレータ「TSUNAMI-K」の使い方

1 まずは解析したい領域を マウスでドラッグ

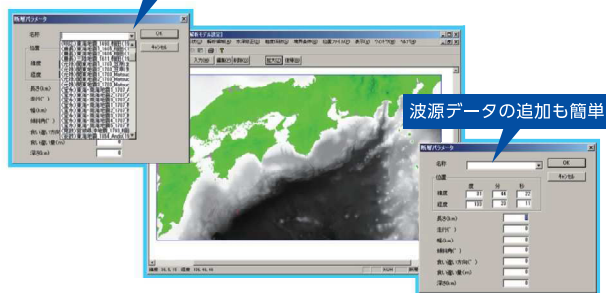
- 解析したい領域をドラッグし、メッシュサイズの入力で領域設定は完了



2 波源設定はデータベースから選択 データベースへの追加も容易!

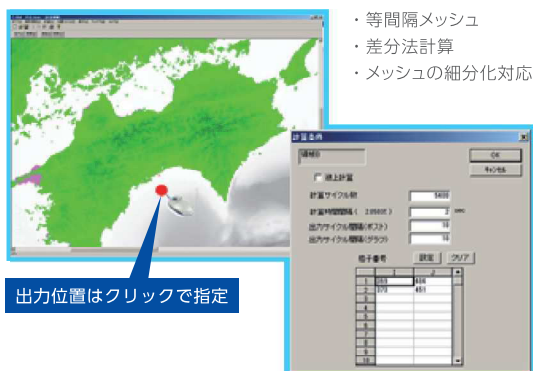
- 波源設定はリストから選択するだけ
- データ追加は登録ボタンを押し、パラメータを入力
- 位置の設定はクリックでも手入力でもOK

波源設定は選択するだけ



3 計算条件を入力し 解析実行

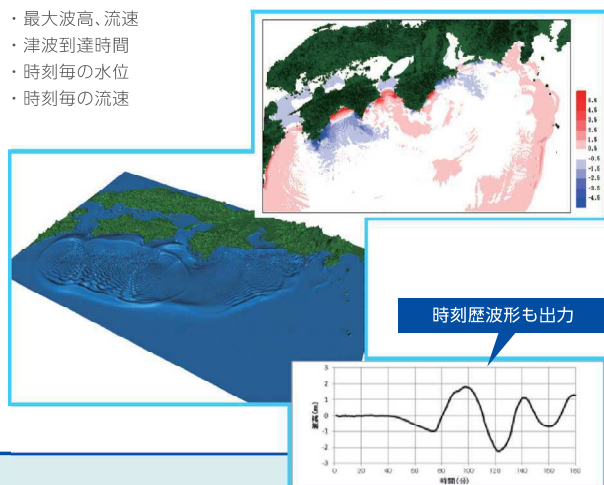
- 計算時間や出力間隔を設定
- 時刻歴の出力位置はクリックで指定



- ・ 等間隔メッシュ
- ・ 差分法計算
- ・ メッシュの細分化対応

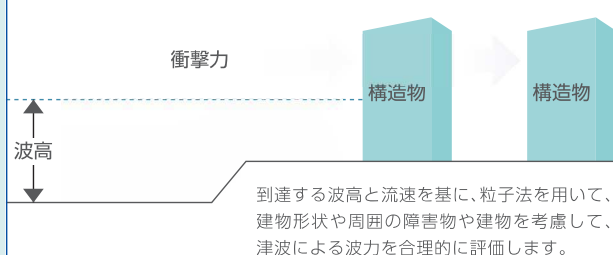
4 結果の図化、 アニメーションの作成

- 解析結果を読み込み2Dや3Dのアニメーションを作成

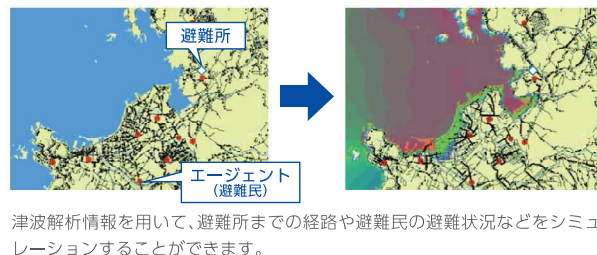


別ソフトとの併用で下記のようなシミュレーションも可能です

粒子法+FEM による構造物の安全性評価



避難シミュレーション



A Damage Detection Technique by Distributed Strain Measurements using Long-gage Fibre Bragg Grating Sensors

Kejian YANG

Chief Engineer of Seismic Engineering Department, KOZO KEIKAKU Eng. Inc., Tokyo, Japan
ykj@kke.co.jp

Kejian Yang, born 1962, received his civil engineer degree of Doctor of Philosophy from TOHOKU Univ., Japan. His main area of research is related to Computational Mechanics and Structure Health Monitoring.

Ryo YONAO

Section Chief of Seismic Engineering Department, KOZO KEIKAKU Eng. Inc., Tokyo, Japan
ryo@kke.co.jp

Ryo Yonao, born 1977, received his civil engineering degree from SAGA Univ., Japan. His main area of research is related to seismic analysis of bridges, dams, facilities, equipment and other civil structures.

Kazumi YAMAMOTO

Manager of Seismic Engineering Department, KOZO KEIKAKU Eng. Inc., Tokyo, Japan
kazumi@kke.co.jp

Kazumi Yamamoto, born 1961, received his civil engineering degree from NIHON Univ., Japan. His main area of research is related to the inter-action of soil and structure in seismic engineering.

Summary

In this paper, a damage detection technique for flexural structure using strain measurements from long-gage fibre Bragg grating (FBG) sensors for structural health monitoring (SHM) was developed. An experimental investigation of flexural beams based on distributed long-gage fibre optic sensors was carried out. A method of damage detection for flexural structure from distributed dynamic strain measurements was proposed and verified. Furthermore, a parameter study of the damage detection index proposed by author by means of analysis of experimental data was performed and the possible range for practical utility of the damage detection method was confirmed here. The above damage detection technique could be applied to the health monitoring of bridge and other flexural structures.

Keywords: structural health monitoring; long-gage fibre Bragg grating sensor; damage detection technique; distributed dynamic strain measurements; flexural structures.

1. Introduction

Regarding the on-going development of available fiber optic sensing techniques, FBG sensor in nature holds the excellent ability to provide a measurement having higher precision and measuring stability. A series of lab experiments and theoretical studies for the utilities of distributed long-gage FBG sensor system by authors has been performing since 2006. Such works include theoretical and experimental studies by Li & Wu [1][2][3] and Yang et al. [4][5], the actual survey for an old under-use RC bridge named KAWANE located in Ibaraki Japan from 2008 [6][7].

On the bases of above studies, a damage detection technique for flexural structure using strain measurements from long-gage FBG sensors was developed. An experimental investigation of flexural beams based on a distributed sensing system was carried out. A method of damage detection for flexural structure from distributed dynamic strain measurements was proposed and verified. Furthermore, a parameter study of the damage detection index proposed by author by means of analysis of experimental data was performed and the possible range for practical utility of the damage detection method was confirmed here. This damage detection technique could be applied to the health monitoring of bridge and other flexural structures.

2. Damage Detection Method using FBG sensors

2.1 A distributed long-gage FBG sensing system

The long-gage FBG sensor of which the effective sensing gauge length can be extended to several centimeters or meters through special packaging and broadening was developed by authors shown in Fig.1 [2][3][4]. It was applied to civil structures as a kind of distributed strain sensing technique by connecting a group of long-gage sensors in series shown in Fig.2.

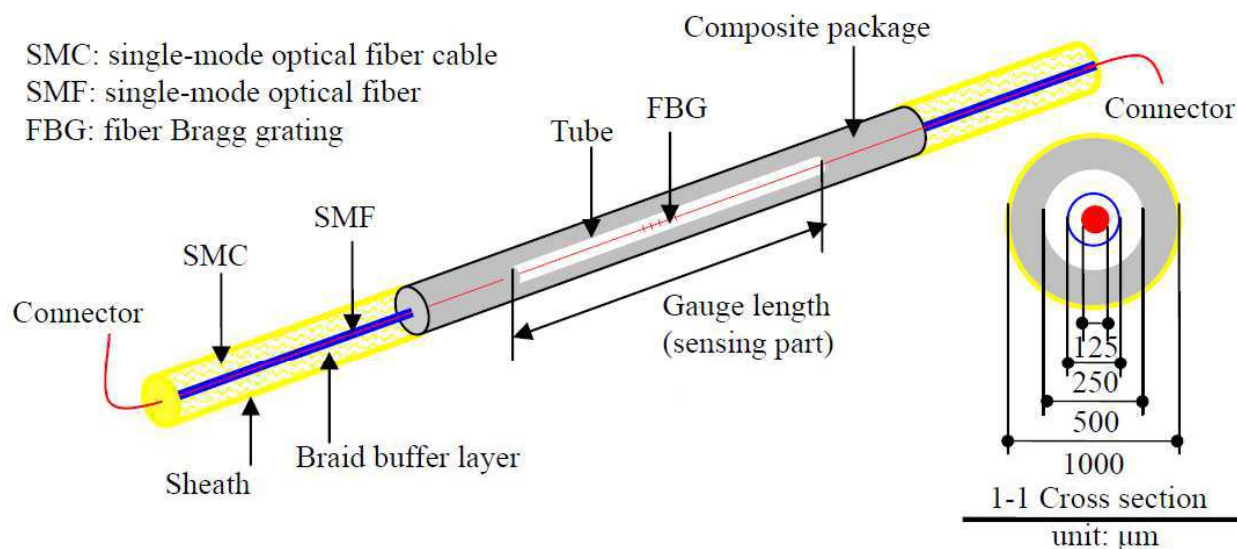


Fig. 1: A packaged long-gage FBG sensor

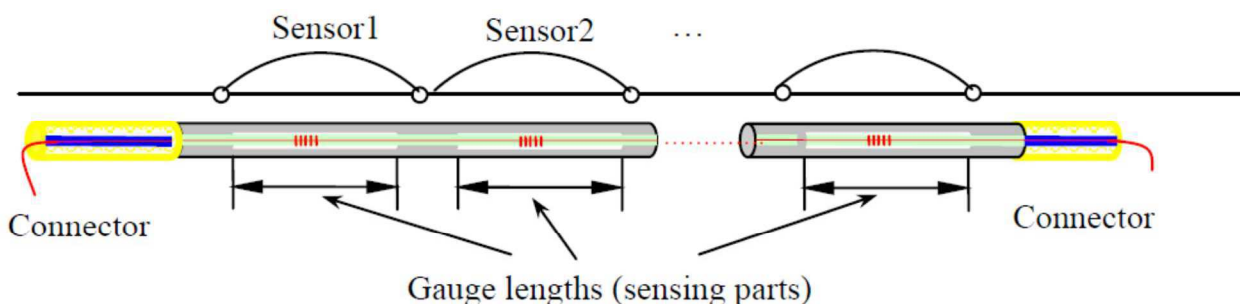


Fig. 2: Distributed long-gage FBG sensing system

2.2 Static method for damage detection

The strain distribution of a structure can be measured by above distributed long-gage FBG sensing system. As shown in fig.3, the damage of a flexural structure can be detected from the changes of measured strain distributions.

When a beam is under a static load, the Normalized strain, which is the ratio of the strain at any position vs. the strain at a selected position in the beam, will keep as a constant no matter how to change the values of the static load. Theoretically, the values of Normalized strains will be changed only when damage occurred somewhere. These phenomena could be used to develop a method for damage detection for a flexural structure.

However, in practical uses of bridges or other structures, the loads were difficult to keep always in static way and in same position usually, so it is unfortunate that the above static method for damage detection has less opportunity to apply in under-use structures for health monitoring.

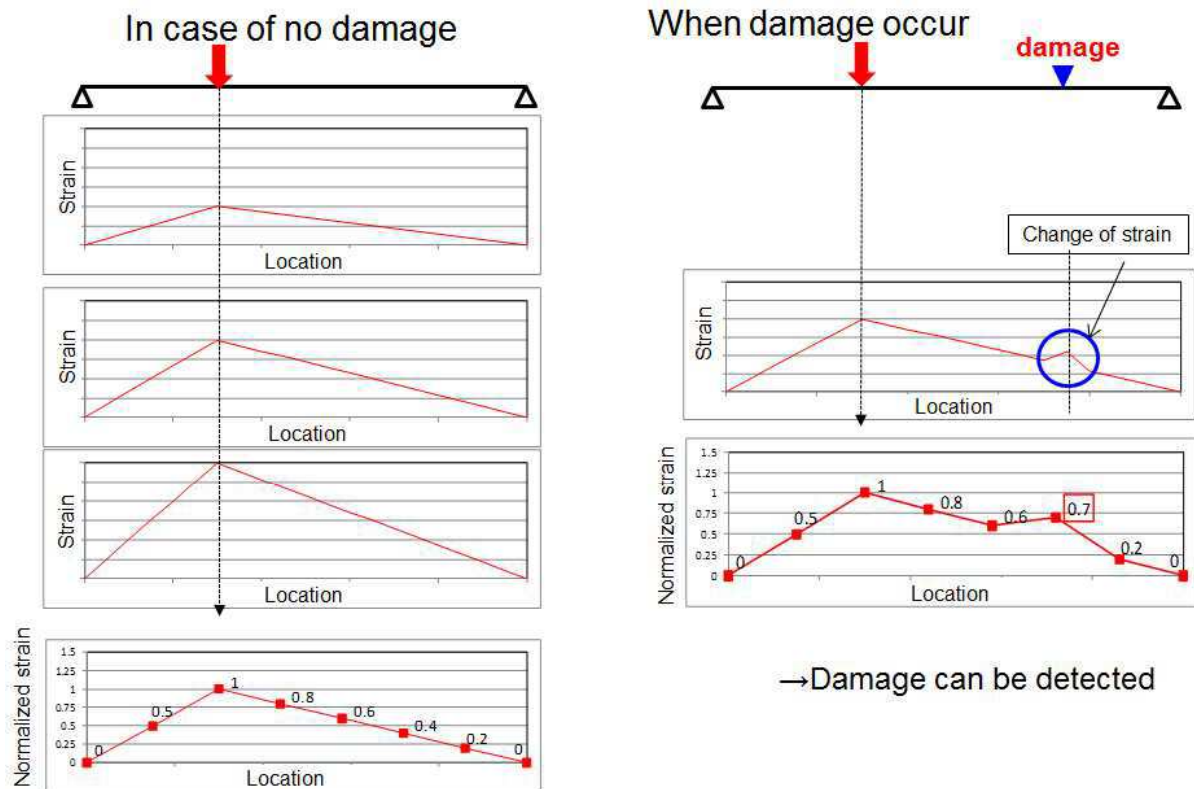


Fig. 3: Static method for damage detection

Base on the idea of above static method for damage detection, we developed the following dynamic technique for bridges and other flexural structures.

2.3 Dynamic method for damage detection

As we known, the structure mode shape is determined by the nature dynamic feature of a structure which will be no change by whatever the loads were in static way or dynamic way and wherever the loads were located. If our distributional strain measurement can be described as an evaluation of structure modes, the above idea of static damage detection method could be developed into a damage detection technique independence from load conditions.

2.3.1 MMSV

A theoretical research for the utilities of distributed long-gage FBG sensor system [2] verified that

$$\frac{{}_r H_{lp}^d(\omega)}{{}_r H_{mp}^{\varepsilon}(\omega)} = \frac{\varphi_{lr}}{\eta_m(\varphi_{ir} - \varphi_{jr})} \quad (1)$$

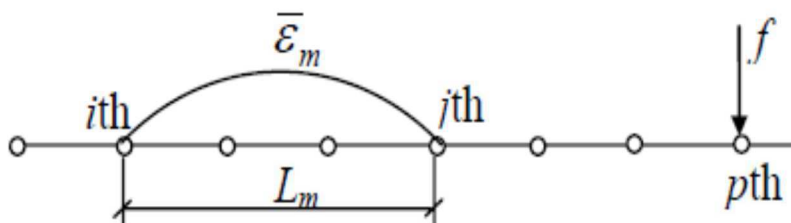


Fig. 4: Macro-strain measurements of Beam structure

the displacement and macro-strain modal constants have such relation as in Eq.(1), which ensures that a similar parameter can be obtained from macro-strain measurements as mode shape from displacements.

$\bar{\varepsilon}_m$ is macro-strain of several consecutive elements from the m th long-gage sensor with L_m gauge length shown in Fig.4.

${}_rH_{mp}^{\varepsilon}(\omega)$ is the macro-strain frequency response function between the measurement from the m th long-gage sensor and the excitation at the p th degree of freedom.

${}_rH_{lp}^d(\omega)$ is the displacement frequency response function between the measurement from the position of the l th long-gage sensor and the excitation at the p th degree of freedom.

φ_{lr} is the r th mode shape at the p th degree of freedom.

The subscript r is assigned to the r th mode.

$$\eta_m = \frac{h_m}{L_m} \quad (2)$$

h_m is the m th distance from inertia axis.

The relative ratio of all components of the combination of macro-strain magnitude of frequency response functions from all FBG sensors can construct a vector as:

$$\{\delta_{1r}, \delta_{2r}, \dots, \delta_{mr}, \dots\}^T \quad (3)$$

named by modal macro-strain vector(MMSV). It is verified that the time-series and frequency response of the measured macro-strain versus displacement response and the MMSV versus mode shape share the same relationships. Therefore, we can use MMSV as an index value of dynamic method for damage detection similar to the normalized strain in static method for damage detection.

2.3.2 The damage detection technique

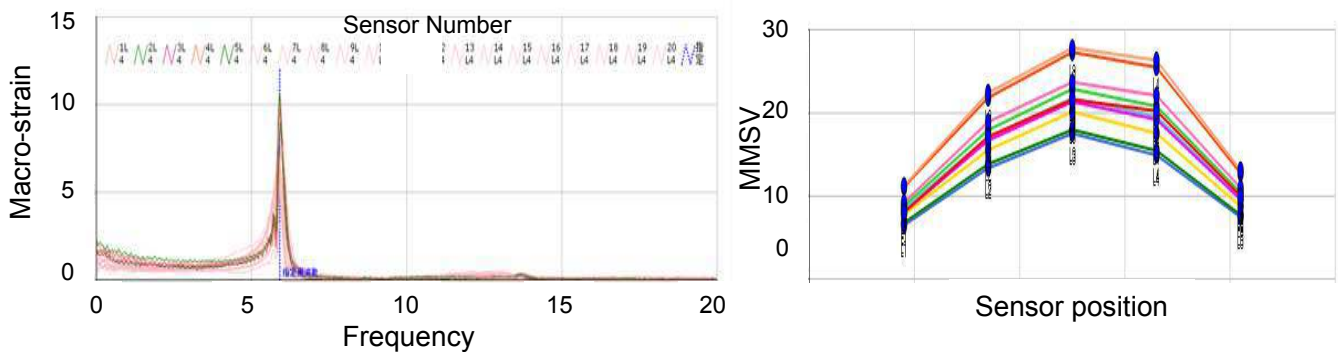


Fig. 5: Macro-strain magnitude of frequency response functions

A damage detection procedure for structures can be described as follows:

- 1) Install a distributional long-gage FBG sensing system on a bridge or other flexure structure.
- 2) Get time histories of macro strain of each sensor.
- 3) Calculate macro-strain magnitude of frequency response functions as Fig.5.
- 4) Record the MMSV of each sensor for every measurement as Fig.6.
- 5) Analysis the variation of MMSVs shown in Fig.6 and give a health diagnosis of the structure.

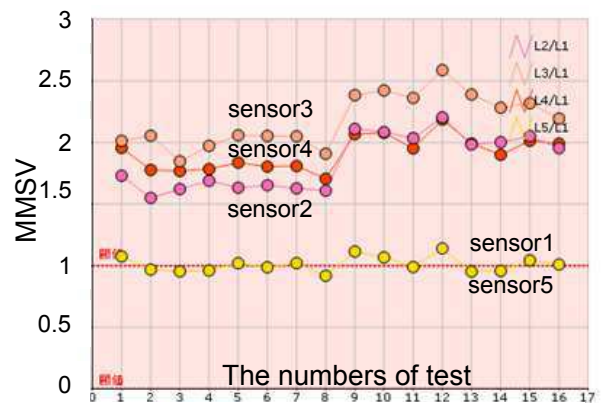


Fig. 6: Damage detection by MMSV

3. Experimental Verification

In order to verify the validity of our proposed dynamic damage detection technique, a series of experiments were performed last year. Two aluminium alloy specimens with 1m length, 25mm width and 8mm height, which are an intact specimen and a defective one, are used for the experimental verification. The detail plan and the results are shown as follows.

3.1 Outline of experiment

The section and the sizes of specimens are shown in Fig.7 and Fig.8 and the distributional sensors placements are shown in Fig.9. Two specimens of an intact one and a defective one

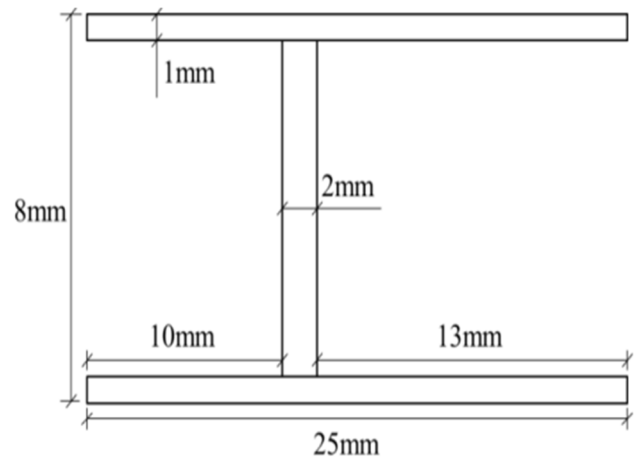


Fig. 7: Section of specimen

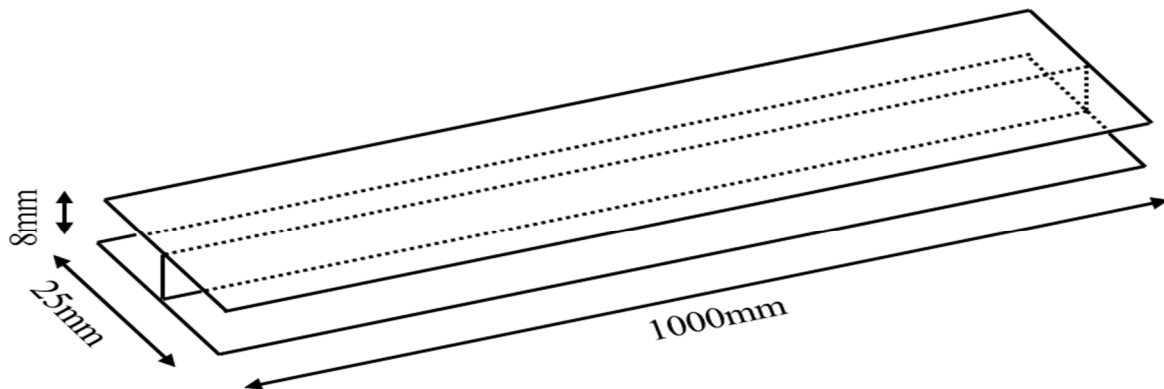


Fig. 8: Size of specimen

were prepared, while the slight damage of 4mm crack was made at the centre of span in the defective one. Five long-gage FBG sensors with 15cm gauge length were arranged along the line

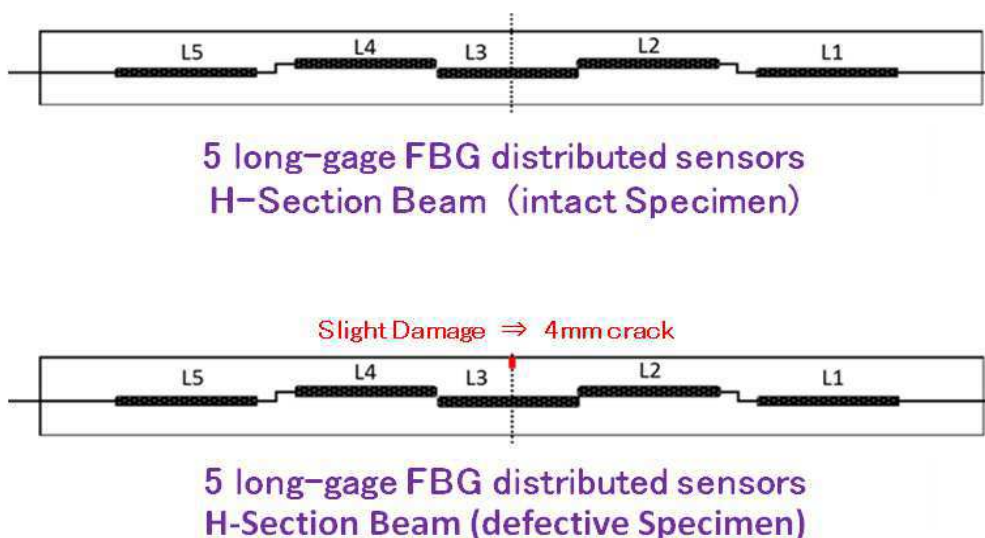


Fig. 9: Distributional FBG sensors

under the web in base surface of lower flange and covered the span of specimen beams. Two ends of specimen were simply fixed by tapes, and a simple impact excitation was added by hand on the centre of span to cause a vibration of the specimen beam. The time histories of macro strain of each sensor

were recorded and the calculation of MMSV for each sensor was done in every time of measurement. According to the analysis of the variation of measured MMSVs, it is clear that the proposed dynamic damage detection technique could identify the even slight defect effectively.

3.2 Experiment results

Fig.10 shows the specimens with distributed long-gage FBG sensors, interrogator

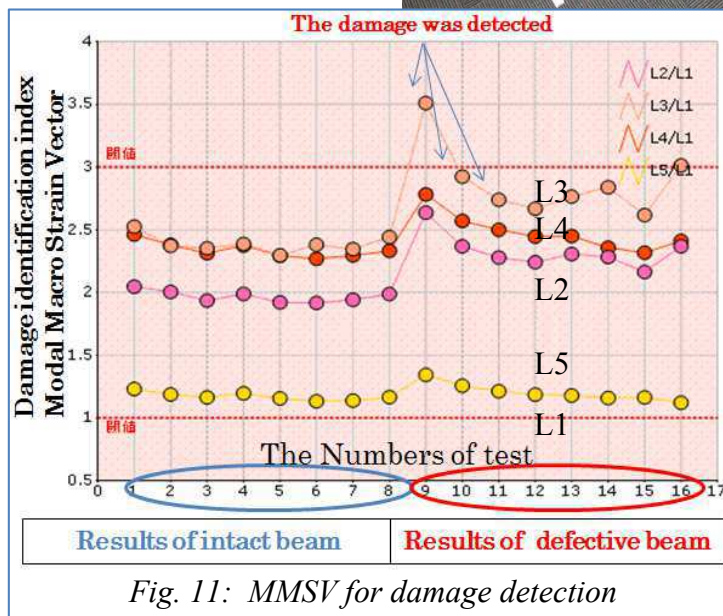
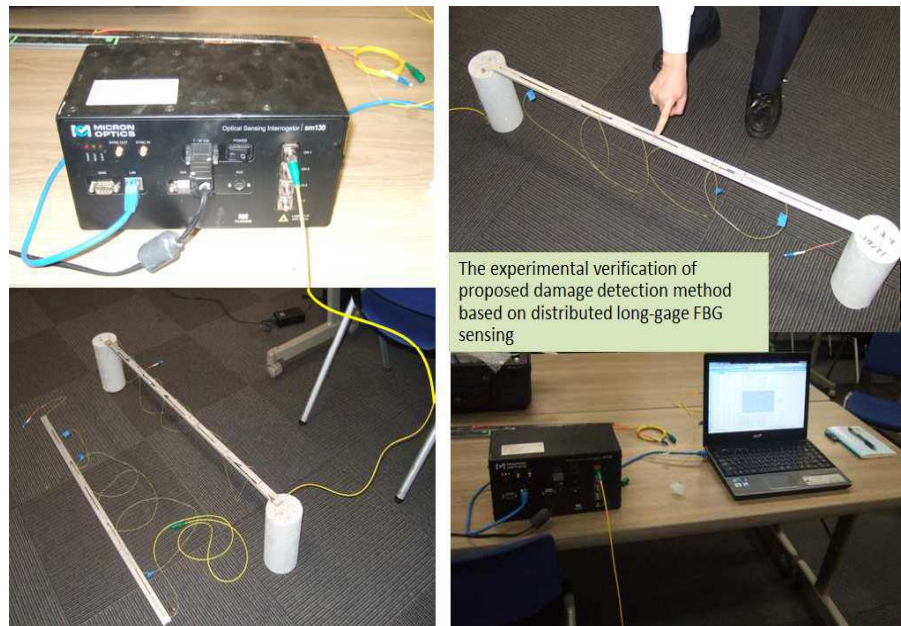


Fig. 11: MMSV for damage detection

named Modal Macro Strain Vector (MMSV) introduced in above section for all five sensors in a specimen.

It is obvious that in case of intact beam the MMSVs of each sensor keep almost no change and in case of defective beam the MMSVs of the sensors near the position of crack become abrupt change clearly. It provides us a useful and effective method to identify the damage of structure which is independence from any load conditions. It is feasible to apply on damage detection of bridge or other flexural structures for structure health monitoring.

Fig. 10: Experimental verification

and a personal computer. The software for data processing directly was developed and installed in this computer. Fig.11 shows the results of damage detection by these experiments. There are the results of 16 times of two specimen beams, in which 8 times are for an intact beam and 8 times are for a defective beam. The horizontal axis of Fig.11 is the number of experiment, which the first 8 times from 1 to 8 are results of intact beam and the second 8 times from 9 to 16 are results for defective beam, while the vertical axis of Fig.11 is the damage identification index

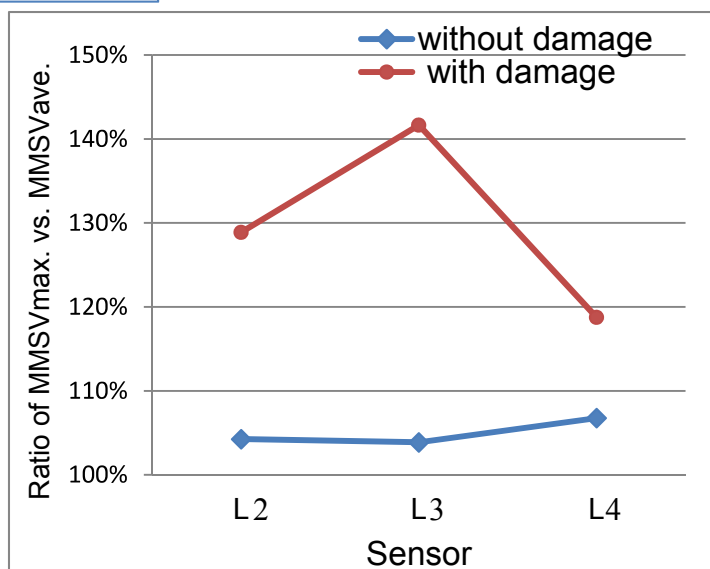


Fig. 12: Sensitivity of MMSV for damage detection

3.3 The possible range for practical utility

In order to elucidate the possible range for practical utility of proposed damage detection technique,

Table 1: Possible Range of MMSV for Damage Detection

Frequency (Hz)	Period (s)	Value of MMSV
7.990	0.125(+10%)	
8.789	0.114	
9.766	0.102(-10%)	

of MMSVs of monitoring results are changing larger than 15%, it should be possibly occurrence of some damages of the monitoring structure.

In practical use of structure health monitoring, sometimes it is difficult to get the vibration frequency of structure exactly because of the severe field condition. Table 1 gives the possible range of MMSV for damage detection, which is means that it is not necessary for us to measure the MMSV at the natural frequency value exactly. The measured values of MMSV around natural frequency of structure even with 10% difference could also identify the damage as same accuracy as the exact ones. In table 1, the exact natural frequency of specimen is 8.789Hz (Natural period is 0.114 sec.), when frequency equals 9.766Hz (Period is 0.102 sec.) or 7.990Hz (Period is 0.125 sec.), the values of MMSV change slightly even invisible. These superior features extend the utility of proposed method of dynamic damage detection.

some analytical studies of experimental results were performed. As shown in Fig.12, sensitivity of MMSV for damage detection was discussed and concluded as follows. In case of the test of intact beams, the ratio of the maximum value of MMSVs versus the average value of those MMSVs are near 105% that all values are less than 110%, while in case of the test of defective beams, the ratio of the maximum value of MMSVs versus the average value of those MMSVs are all larger than 115%. It means that, in practice use of this method, if the values of MMSVs of monitoring results are changing within 10%, it is probably the influence of noise or other circumstance condition, if the values

4. Conclusions

The conclusions of this paper could be drawn as follows.

The results of a series of experiments verify the validity of proposed method of dynamic damage detection for flexural structure using strain measurements from long-gage fibre Bragg grating (FBG) sensors for structural health monitoring (SHM)

Modal Macro Strain Vector (MMSV) of structure can be used as a damage identification index.

Since the values of MMSV change abruptly even when a slight structure damage occur, proposed method of dynamic damage detection could identify the damage of structure sensitively and effectively.

Because the measured values of MMSV of a frequency even with 10% difference from the structure natural frequency could also identify the damage as same accuracy as the exact ones, proposed method of dynamic damage detection is a robust one with many superior features, it could be widely used in damage identification of bridges and other flexural structures for structure health monitoring.

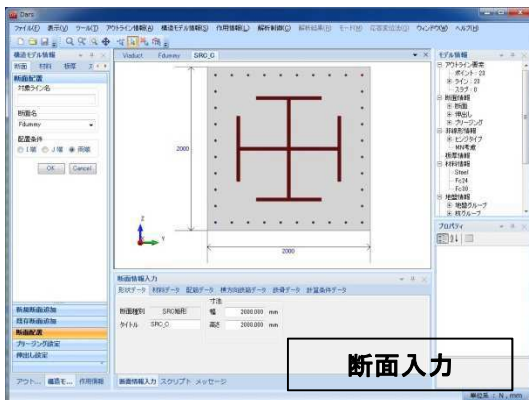
REFERENCES

- [1] Li SZ. and Wu ZS., “A Non-baseline Algorithm for Damage Locating in Flexural Structures using Dynamic Distributed Macro-strain Responses”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 36, 9, 2007, 1109-1125.
- [2] Li SZ. and Wu ZS., “Development of Distributed Long-gage Fibre Optic Sensing for Structural Health Monitoring”, *Journal of structural health monitoring*, 6, 2, 2007, 133-143.
- [3] Li SZ., Wu ZS. and WATANABE T., “A Health Monitoring Strategy for RC Flexural Structures based on Distributed Long-gage Fibre Optic Sensors”, *Journal of Applied Mechanics*, 10, 2007, 983-994.
- [4] YANG KJ., ARAKI H., YABE A., WU ZS. and Li SZ., “The Optimum Length of Long-gage FBG Sensors for Structural Health Monitoring of Flexure RC Members”, *The Proceeding of 4th China-Japan-US Symposium on Structural Control and Monitoring*, Oct.16-17, 2006, HangZhou.
- [5] YANG KJ., ARAKI H., YABE A., and WU ZS., “Load Identification of Flexure RC Structures using Distributed FBG Sensing System”, *The Proceeding of 3th International Conference on Structural Health Monitoring on Intelligent Infrastructure (SHMII-3)*, Nov.14-16, 2007, Vancouver.
- [6] YANG KJ., YABE A., YAMAMOTO M., ARAKI H. and WU ZS., “The Evaluation of KAWANE Bridge by Distributed FBG Sensors and by FEM Analysis”, *The Proceeding of 4th International Conference on Structural Health Monitoring on Intelligent Infrastructure (SHMII-4)*, July22-24, 2009, Zurich.
- [7] YABE A., YANG KJ. and MIYAMOTO A., “Sensitivity Analysis for Deteriorating Bridges using Bus Acceleration Sensors”, *IABSE Conference on Information and Communication Technology for Bridges, Buildings and Construction Practice*, September9-11, 2009, Bankok.

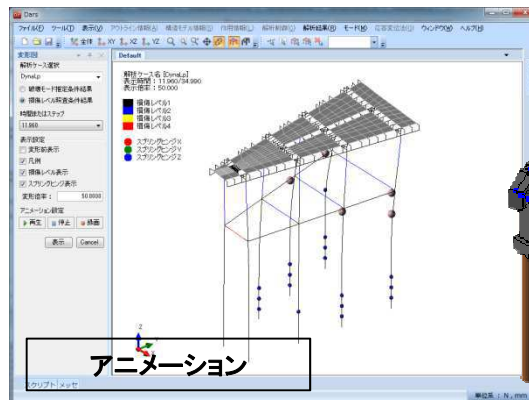
DARS

Version 1.2
鉄道構造物等の3次元耐震性能照査プログラム

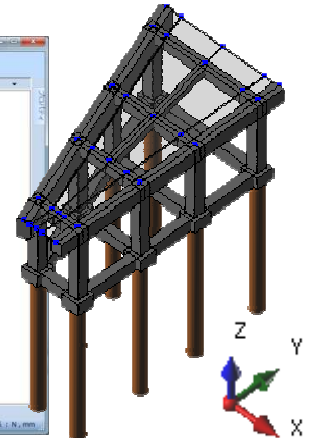
DARSは、鉄道構造物全体を3次元骨組構造としてモデル化し、非線形スペクトル法または時刻歴動的解析法により地震時の動的応答を算出し、線路方向、線路直角方向の損傷レベルを部材毎に求めるプログラムです。



断面入力



アニメーション

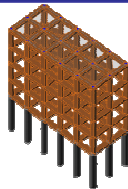


特徴

3次元での動的解析により、不整形なラーメン高架橋などに対応します。また、スラブへの直接的な荷重配置により複雑な荷重計算、荷重分担計算の省略や、1モデル2方向に解析・照査することにより解析ケース数、作業量を大幅に軽減し、これまでの設計者の悩みを解決します。

対象構造形式

- ◆ ラーメン高架橋
- ◆ ラーメン橋脚
- ◆ 連続桁橋
- ◆ 杭基礎(場所打ち杭・直接入力)
- ◆ SRIばね(直接入力)
- ◆ 支承ばね(直接入力)



対象部材

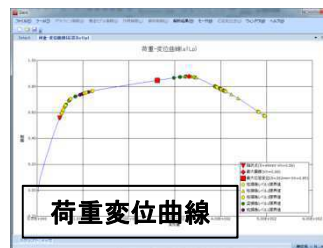
- ◆ RC(矩形・円形・T型)
- ◆ 鋼部材(矩形・円形)
- ◆ SRC(矩形・T型)
- ◆ CFT(円形)

計算機能

- ◆ 破壊モード推定解析(静的非線形解析)
- ◆ 所要降伏震度スペクトル法(静的非線形解析)
- ◆ 時刻歴動的非線形応答解析
- ◆ 固有値解析

動作環境

- ◆ Windows Vista / 7 / 8



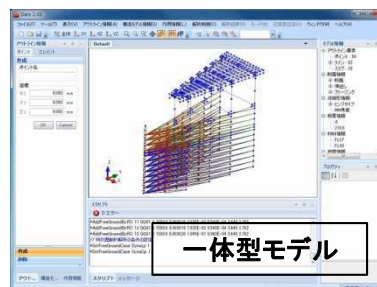
荷重変位曲線



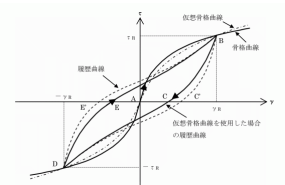
照査結果総括表

H24年鉄道構造物等設計標準・同解説 対応予定

- ◆ H24鉄道構造物等設計標準・同解説 基礎構造物
 - ・ 杭基礎対応
 - ・ 直接基礎の分布ばねモデル対応
- ◆ H24鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計
 - ・ 一体型モデルによる動的解析
 - ・ 応答変位法
 - ・ 土の非線形モデル GHE-S



一体型モデル



GHE-Sモデル

* 追加内容は変更になる可能性もあります。

- 解析コンサルティングも行っております。

<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。

液状化問題に対するソリューション

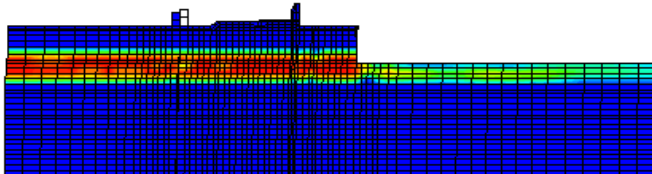
護岸および河川堤防などは、防災上重要な土木構造物です。これらは大地震時に背後地盤の変形や液状化により地盤が大きく変状することが予想され、防災対策として現状の変形、沈下を把握すること、および対策工による効果を検討することが重要です。

また、住宅地、工場敷地内の地盤が液状化することにより、地盤沈下、インフラとして重要な地中構造物の破損、工場施設の破損などを引き起こし住民生活、事業継続に対して大きな被害が生じます。これら防災対策の検討を行う上で、地盤と構造物をともに考慮した解析モデルによる有効応力非線形解析が有効です。

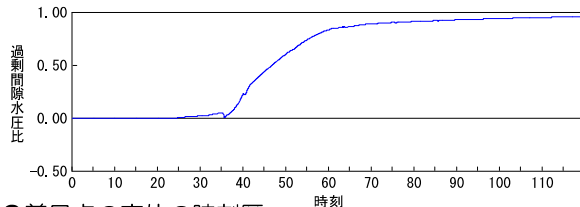
弊社では、自社開発の有効応力非線形解析プログラムの他に、各種解析プログラムを使用した解析にとりこんでおります。予測された地震動強さと地盤種別から簡便的に評価する方法から有効応力解析に基づく方法まで、検討内容に応じた解析手法、解析ツールを選択し対応いたします。

■海岸付近の地盤における液状化検討事例

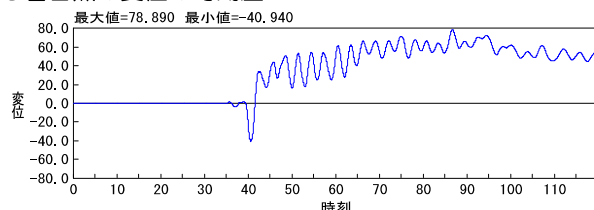
●過剰間隙水圧比コンター図



●過剰間隙水圧比の時刻歴

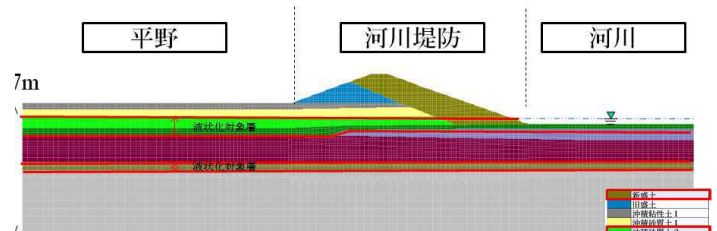


●着目点の変位の時刻歴

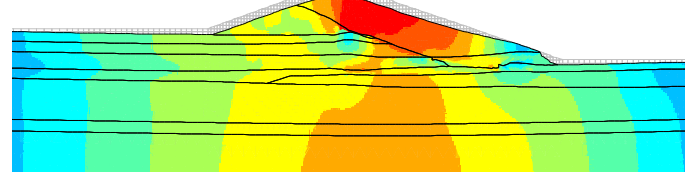


■FEMにより河川堤防の液状化による挙動をシミュレーション

●解析モデル図(全体)

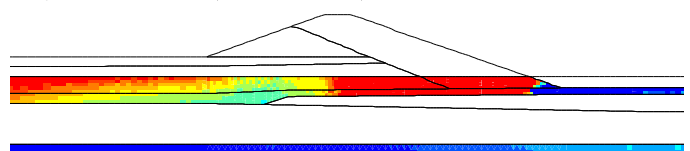


●変形コンター図(拡大)



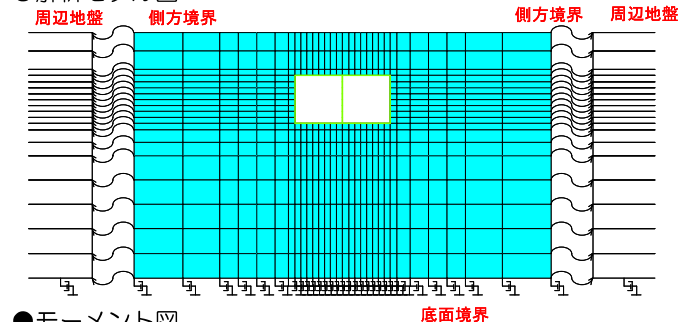
●過剰間隙水圧比コンター図

(拡大：赤色は液状化している状態)

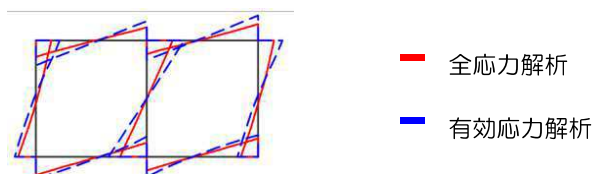


■有効応力解析と全応力解析により地中構造物の耐震性を比較検討

●解析モデル図



●モーメント図



実績（2007年以降で異なる内容の4件を抽出）

盛土の液状化解析（某コンサルタント）

護岸の液状化解析（某電力研究所）

液状化対策工の影響に関する検討（某コンサルタント）

土木構造物基礎岩盤の液状化解析業務(公)

使用ソフト

NANSSI	2次元有効応力非線形解析プログラム(自社開発・地震工学研究所と共同開発)
FLIP	2、3次元有効応力非線形解析プログラム
L IQCA	2次元有効応力非線形解析プログラム
ALID	2次元FEM液状化流動解析システム
LIQSMART	1次元簡易有効応力解析プログラム

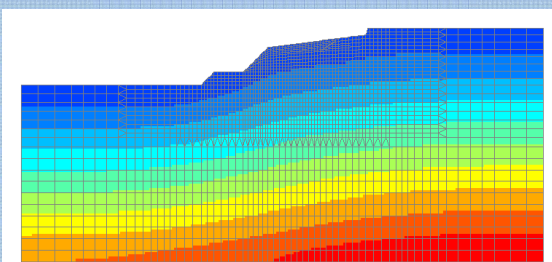
降雨時の地盤安定性問題に対するソリューション

近年、台風や大雨による土砂災害の増加に伴い、斜面や盛土の安定性に対する関心が高まっております。降雨時の地盤安定性を確認することは、災害発生の危険度予測や有効な対策の第一歩となります。

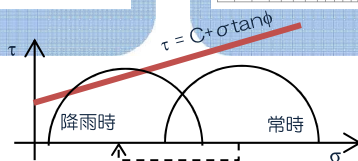
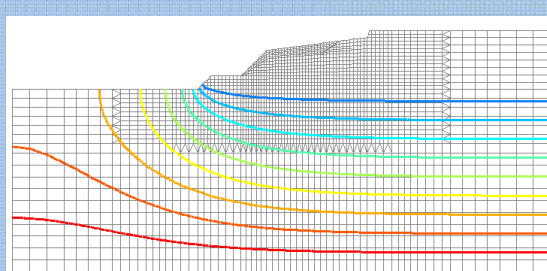
弊社では非定常浸透流解析プログラムをはじめ、すべり安全率・すべり変形量の算出プログラムなど様々な自社開発を積極的に行っております。これにより、浸透流解析結果から降雨時に時々刻々と変化する水圧や水位を把握し、有効応力を用いて想定すべり面の危険度を判定するなど、総合的な検討が実施可能です。

また、永年培ってきた解析コンサルティングの経験と実績に基づき、お客様の目的・予算に応じたモデル化や解析手法のご提案などニーズに合わせた柔軟な対応を行っています。

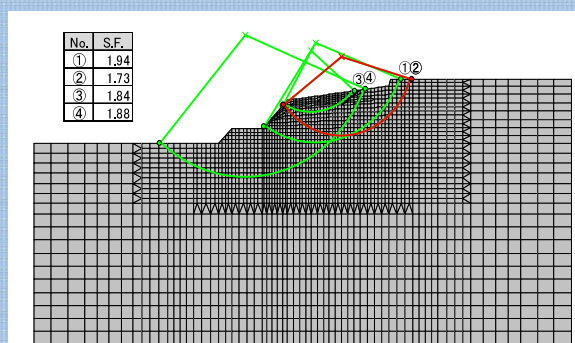
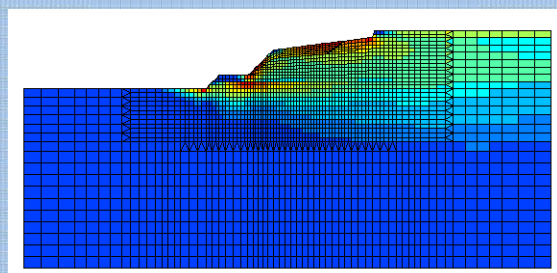
● 平時の応力状態（常時応力解析結果）



● 降雨時の水圧分布（非定常浸透流解析結果）



● 有効応力を用いた斜面安定の検討



局所安全係数と破壊状況のチェック

想定したすべり面毎にすべり安全率を時刻歴で算出

実績

降雨時の斜面安定性評価（某コンサルタント）

降雨による地下水位面の変動予測（某コンサルタント）

ロックフィルダムコア部の定常浸透流解析および非定常浸透流解析（二次元と三次元の比較。自社検討）

使用ソフト

UNSAT	二次元飽和-不飽和浸透流解析プログラム（自社開発）
NASKA	二次元応力と浸透流の連成解析プログラム（自社開発）
POST-S	二次元すべり安全率・すべり変形量の算出プログラム（自社開発）
GEOACE	三次元土水連成FEM解析プログラム（他社と共同開発）

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

あけましておめでとうございます。

冬休み初日の12月27日に第二子の長男が誕生しました。

ドタバタと忙しかった年末の仕事が一段落した絶妙のタイミングだったので感動も大きかったです。

私も生まれた息子と同じく第二子の長男なので、息子に思いを寄せつつ、自分が生まれた時の親の心境を想像していました。私の親は自分が生まれた時にどのような感情を抱いたのか？どんな大人に成長してほしいと思っていたのか？おそらく、今自分が息子に対して思っている心境と同じなんだと思います。二児の父親という立場に変わったことで、これまで見えなかった景色が見えるようになりました。これは仕事でも同じです。「相手の立場になってものを考える」という能力。仕事をしていると様々な場面でこの能力が求められます。この能力を養うための最善策は、「多くの立場を経験すること」これに尽きると思います。

冬休みは妻の疲れを癒すために、ほぼ家に籠りきりの生活でしたが、家族から沢山のエネルギーを貰えました。今年も一年間、気持ちを新たに仕事を頑張れそうです。

防災ソリューション部 吉松 慶

明けましておめでとうございます。年末年始は北海道に帰省いたしました。実家は札幌市内とはいえ辺鄙で何もないところなのですが、最近はどこにいてもインターネットで会社を含めた外部にアクセスでき、便利さ反面メリハリのない休暇になってきている気がします。少し前までは隔絶された環境を生かして(?)読書に精を出していたものなのですが……。道具の定義は“物をつくったり、あるいはなにかを行うために用いる器具の総称”とのことです。気づけば自らが道具になっていた……まで行くと休みボケのSF脳かも知れませんが、便利な道具に囲まれていると得てして道具に生活習慣を決められてしまいがちです。道具を道具たらしめるためにも、目標に向けて自らを律する必要性を感じました。それでは本年もよろしくお願いいたします。

防災・環境部 三橋祐太

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いいたします。

kaiseki@kke.co.jp

(株)構造計画研究所 エンジニアリング営業部、社会基盤営業部

〒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 エンジニアリング営業部 大阪支社

〒541-0047 大阪市中央区淡路町 3-6-3 NMプラザ御堂筋 5F

TEL (06) 6226-1231

(株)構造計画研究所 中部営業所

〒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

解析雑誌

Journal of Analytical Engineering Vol.37 2015.1

発行日 平成 27 年 1 月 19 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