

解析雑誌

Vol.20 2008.6

【 Topics 】

- 書籍「地震時の構造不安定とその照査法」のご紹介
- 構造計画研究所、プロメテック・ソフトウェアと業務提携
～ 粒子法を用いた解析コンサルティングとコンセプトデザインCAEを展開～
- 建築用非線形静的動的構造解析システムRESP-F3Tのご紹介
- 地震リスク評価プログラム ricomacast®による建物の地震リスク評価例

【 Technical Reports 】

- 地震波の水平・上下同時入力による時刻歴応答解析手法の検討
- 地域の地形に対応した地震防災マップの作成
- 光ファイバ分布センシングによるRC曲げ構造物の荷重同定手法の研究
- 光ファイバ分布センシングによるRC曲げ構造物の荷重分布形の同定
- バラスト・ラダー軌道の地盤振動特性に関する研究
- 5段積みパレット・ラックの地震による落下・転倒解析

Journal of Analytical Engineering



虫のいい話

株式会社構造計画研究所
エンジニアリング営業部 建設企画室長 為広 尚起

昨年8月、米ミネアポリスで大型橋梁が落下した事故は、記憶されている方も多いと思います。この事故の原因や崩壊過程は調査中ということで、まだ公式に発表されてはいませんが、いくつかの客観的な事実は報道などで知ることができます。

この橋は建設後ちょうど40年を経過しており、最近の点検で劣化の進行が著しいと判定され、対策として一部補強工事が開始されていました。管理者も利用者も「揺れるな」と感じてはいたようですが、「今にも落ちそうだ」という危機感までは持ち得ず、補強工事のために半分の車線が通行止めになっていた以外は、日常通り車は通行中でした。そして、それらの車が橋と一緒に落ちていく以外何もできないほど急激に、突然、橋が崩落してしまったことは、偶然現場で撮影されていた動画像で確認することができます。

日本国内では、この落下した橋と同年以上にあたる建設後40年を越える橋梁数は、現在は全体の20%、10年後には47%となるというデータがあり、このような老朽化しつつある社会インフラの保全システムの拡充や高度化については、切迫感のある議論を耳にすることが多くなってきました。対処療法から予防保全への転換を図るという主旨で、国交省が地方自治体に対し「道路橋の修繕計画策定費支援制度」をスタートさせたといった動きもありましたが、最近よく別の観点でニュースになっている財源の確保をはじめ、問題は山積みでしょう。

必ずしも手抜きではなかったと思われる、ミネアポリスで行われていた維持管理手順に、後何があればあのような事故が起きずに済んだのか？我々としては、今後の調査結果もひとつの教訓として、固有の技術で提案できることを考えていきたいと思っています。

これに関連して、東京大学の藤野陽三先生は、以前から、「点検やセンシング・モニタリングによる場やモノの現況データ取得」、「それらのデータによる現状分析と将来予測」、「その結果を元にした現場へのフィードバック」のサイクルを回すことの重要性を説いておられます*。藤野先生はこれを社会インフラの「知動化」と呼んでおられますが、私は今後の重要なキーワードになると認識しています。

この知動化の中で、「解析雑誌」でご紹介している技術に関連が深いのは、「現状分析と将来予測」にあたる部分です。本号でも、茨城大学の呉智深先生との光ファイバーセンシングからの荷重同定の研究、九州大学の犬塚久哲先生と弊社の共著となる新刊書籍「地震時の構造不安定とその照査法」、小田原市の防災マップ作成例ほか、多様な技術や事例をご紹介します。

知動化の推進で安心・安全な社会が構築されながら、我々の出番も増えてくれば・・・というのは虫のいい話でしょうか？

*藤野陽三、「センシングから見た都市空間における安全安心問題への取り組み」、システム制御情報学会第50巻、第10号、pp. 371-375, 2006

解析雑誌 Vol.20 2008.6 目次

【巻頭言】	虫のいい話	エンジニアリング営業部 建設企画室長 為広 尚起	02
-------	-------	--------------------------	----

Topic 1	書籍「地震時の構造不安定とその照査法」のご紹介		04
Topic 2	構造計画研究所、プロメテック・ソフトウェアと業務提携 ～ 粒子法を用いた解析コンサルティングとコンセプトデザイン GAE を展開 ～		06
Topic 3	建築用非線形静的動的構造解析システム RESP-F3T のご紹介		10
Topic 4	地震リスク評価プログラム ricomacast®による建物の地震リスク評価例		14

Technical Report 1			
■	地震波の水平・上下同時入力による時刻歴応答解析手法の検討		20
	梁川 幸盛		
Technical Report 2			
■	地域の地形に対応した地震防災マップの作成		22
	(その2) 微地形区分に基づく小田原市の50mメッシュ震度マップ		
	橋本 光史、栗山 利男、蔦野 雅俊、荏本 孝久、山本 俊雄		
Technical Report 3			
■	光ファイバ分布センシングによるRC曲げ構造物の荷重同定手法の研究		24
	楊克儉、荒木秀朗、矢部明人、呉智深、李素貞		
Technical Report 4			
■	光ファイバ分布センシングによるRC曲げ構造物の荷重分布形の同定		30
	楊克儉、荒木秀朗、矢部明人、呉智深		
Technical Report 5			
■	バラスト・ラダー軌道の地盤振動特性に関する研究		34
	渡辺勉、曾我部正道、奥田広之、浅沼潔、庄司正弘、島袋ホルヘ		
Technical Report 6			
■	5段積みパレット・ラックの地震による落下・転倒解析		45
	川上 誠		

お問い合わせはこちらへ

解析雑誌バックナンバーはKKE解析ホームページでご紹介しています。
PDF形式でダウンロードも可能ですので、是非下記アドレスにお立寄りください。

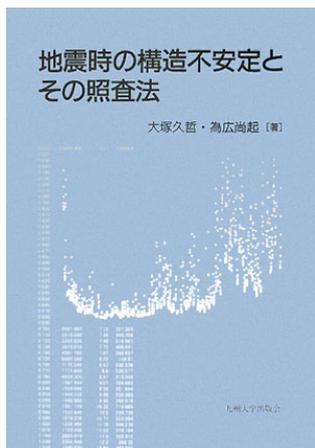
<http://www4.kke.co.jp/kaiseki/>

書籍「地震時の構造不安定とその照査法」のご紹介

九州大学大学院の大塚久哲教授と弊社の共著書籍「地震時の構造不安定とその照査法」が、この4月九州大学出版会から出版されました。

支間長数百メートルクラスの長大アーチ橋の地震時挙動を、振動中の座屈の危険性まで明白に考慮して解析的に評価したいという動機からスタートし、振動台実験や解析手法の提案と検証などを継続してきた成果をまとめたものです。

是非ご一読いただきたいのですが、なかなか書店では見つかりにくい恐れがありますし、amazonほかのオンライン書店では内容が分かりにくいと思いますので、ここで簡単にご紹介させていただきます。



- 著者 : 大塚久哲 (九州大学大学院教授)
為広尚起 (榊構造計画研究所 建設企画室長・工博)
- 出版社 : 九州大学出版会
- 定価 : 3,800 円 (税別)
- 目次 : 1 構造物の動的不安定 / 2 動的構造不安定の定量評価指標 / 3 実験による検証 / 4 増分形式座屈固有値解析による地震時座屈照査手法 / 5 座屈前後の状態評価 / 6 適用事例 / 7 本書のまとめと今後の展望

※全国の書店またはオンライン書店にてご購入いただけます。

本書のテーマは、「振動している構造物が不安定状態に陥る危険性を、非線形解析によって定量的に検証すること」です。

動的な構造不安定には、いくつかの異なる種類の現象がありますが、本書では主に座屈現象に着目しています。さらに振動中の構造物の座屈は、目立った余兆もなく突然発生し、急激な崩壊を招く恐れがありますが、本書は発生後の崩壊過程を明らかにすることよりも、発生前の余兆を掴むことに重点をおいています。

振動中の座屈の余兆は、点検などの機会に人間の五感で察知しにくいものもさることながら、数値解析で評価する場合も、多くはある外力下で座屈するかしないかの判定に止まっており、(特に動的問題としては) 明瞭には評価されていませんでした。

設計した構造物が地震時に座屈しないか心配になって、そのような判定計算を行い、「この構造物はこの地震動を受けても座屈的な現象は何も起こさなかった」という結果を得たとします。それでその地震動に対して安全性能を満たしていると安心できるでしょうか？ギリギリで座屈しなかったのかも知れません。何か起こってもおかしくない不安定状態に陥りながら、たまたま何も起きないまま安定状態に移ったのかも知れません。そもそも「座屈的」な現象と判定するのも解析結果から評価者が定性的に行うことなので、人によってバラつきがあるかも知れません。

発生していない状態での座屈の危うさを示すインジケータ（定量評価指標）があれば、これらを解決できるとの着想から、振動台実験やプログラム改造も交えて検討を行った結果、時々刻々求める「増分形式の座屈固有値」により、振動中の座屈危険性の変化を図1のように示すことを提案するに至りました。この検討経緯や手法の提案、適用事例などを本書では詳細に述べています。是非ご一読ください。

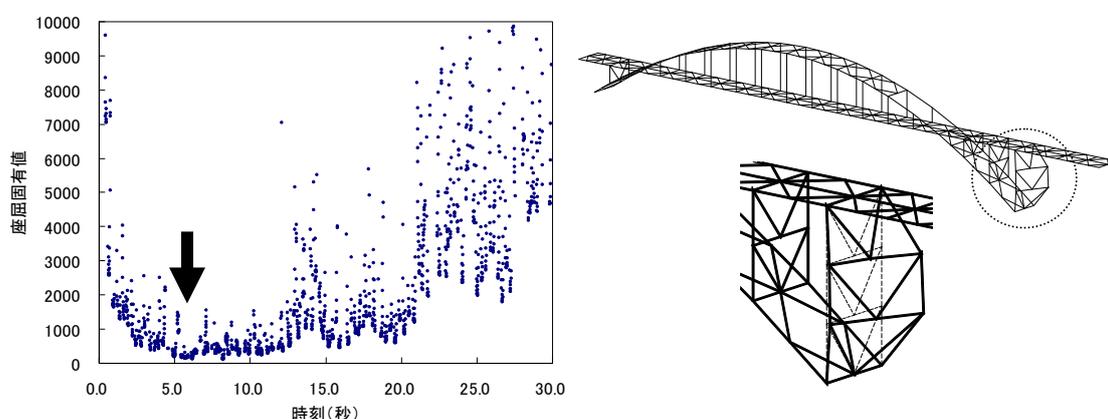


図1 地震時の座屈危険性を時刻歴で示す
(矢印が最危険時刻ですが、発生までは余裕があることを示しています)

➤ 本件に関するお問い合わせ先

- ・ ご購入に関するお問合せ

九州大学出版会 <http://www1.ocn.ne.jp/~kup/> TEL : 092-641-0515

- ・ 内容等に関するお問合せ

株式会社構造計画研究所 エンジニアリング営業部 為広 尚起

TEL:03-5342-1136 FAX:03-5342-1236 e-mail: kaiseki@kke.co.jp

構造計画研究所、プロメテック・ソフトウェアと業務提携 ～ 粒子法を用いた解析コンサルティングとコンセプトデザインCAEを展開 ～

株式会社 構造計画研究所（本社：東京都中野区、資本金10億1,020万円、社長：服部正太）は、粒子法ソフトウェアなどを取り扱うプロメテック・ソフトウェア株式会社（本社：東京都文京区、資本金2億161万円、代表取締役社長：藤澤智光）と粒子法ソフトウェアの販売及びコンサルティングに関して業務提携を行いました。

この提携により、構造計画研究所は、粒子法を用いた解析コンサルティングサービスを開始するとともに、「コンセプトデザインCAE」マーケットを開拓するという、2つのビジネス形態を切り拓くことを目指します。

▶ 粒子法を用いたコンサルティングサービス

構造計画研究所では、従来から構造物、地盤系の解析ソフトウェアの開発や原子力、超高層建築物、道路・橋梁・河川・沿岸構造物などの建設分野での解析コンサルティングを得意としていましたが、今回の技術提携でプロメテック・ソフトウェア社の要素技術を取り込み、河川の氾濫や、土石流、津波、洪水等における被害予測など防災分野でのコンサルティングサービスを提供していく方針です。

▶ コンセプトデザインCAE

構造計画研究所では、製造業の設計プロセスにおいて開発の初期段階でシミュレーションを行うための「設計者CAE」を販売・サポートしてきましたが、それらに加え、プロメテック社の感性に訴えるユニークな技術を利用し、開発のより上流で使える製品設計支援ツール（CAE）として、「コンセプトデザインCAE」のマーケットを開拓していく方針です。

粒子法を用いたプロメテック社のソフトウェアを用いることによって、設計・開発の段階でユーザーが思いついたデザインを、紙に下書きするような感覚でシミュレーションし、その結果を確認しながらリアルタイムに設定条件や形状を修正することができます。

これにより、企画段階における設計開発の新たなコンセプト創造のお手伝いができるものと考えております。ユーザーの発想次第であらゆるシミュレーションが可能となる新しいコンセプトのCAEのマーケットを啓蒙し、開拓していく所存です。

上記の「コンサルティングサービス」と「コンセプトデザインCAE」の粒子法関連で、構造計画研究所としては、3年間で5億円のマーケットを創出することを目標としています。



© Prometech Software, Inc.

土石流のシミュレーション例



© Prometech Software, Inc.

コンセプトデザイン CAE によるシミュレーション例

【動画】http://www.octaveengine.com/casual/movie/water_flow.htm

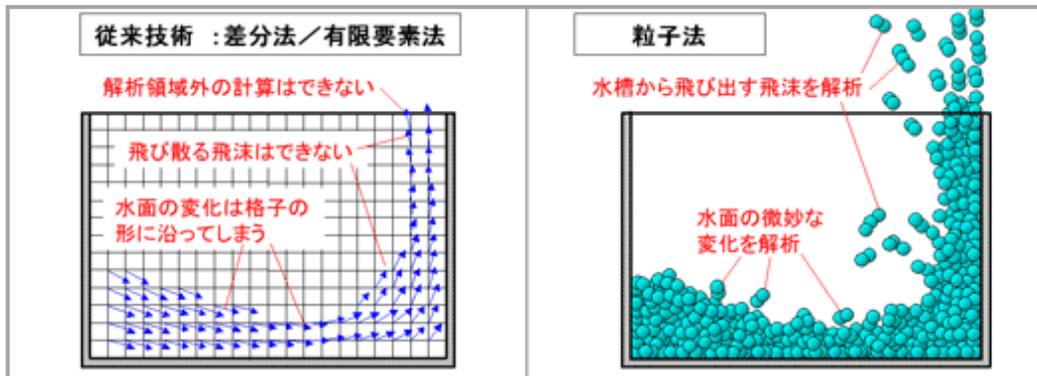
➤ 粒子法について

粒子法（MPS法：Moving Particle Semi-implicit Method）は、東京大学大学院工学系研究科の越塚誠一教授が独自に考案した新しい流体シミュレーションの手法で、水や空気などの流れを粒子の動きで模擬します。

従来のシミュレーション手法はメッシュ（格子）を用いて計算するため、煩雑で時間を要するメッシュ生成や水面の大きな変化にメッシュ生成が追従できないという問題点がありました。

粒子を用いて計算する粒子法では、激しい水面の変化や飛沫の発生、水塊の分裂や合体を精度よく安定に解くことができます。また、流体と構造物を一体化した解析対象を扱う流体-剛体連成解析が可能です。現在、土木、造船、自動車、機械、原子力等の各分野のCAE解析で幅広く適用されるなど、その有効性と信頼性が確認されています。

粒子法を用いた解析と従来技術での解析の違い



➤ コンセプトデザインCAEについては、以下の展示会でご覧いただけます。

- 粒子法についての詳細は以下のセミナーでご覧いただけます。

2008年6月3日(火)

午前：粒子法Workshop 「粒子がCAEを変える！ Inspiration CAEのすすめ」

午後：感性刺激CAEセミナー

「粒子がCAEを変える！ 粒子法最前線～粒子はエンジニアの感性を刺激する～」

主催：プロメテック・ソフトウェア株式会社 於：東京大学 小柴ホール

➤ プロメテック・ソフトウェアについて

プロメテック・ソフトウェアは、先端的な物理シミュレーション技術とCG技術の中核として、「インタラクティブ・リアリティ」——ユーザーとのインタラクティブ性のあるリアリティ——技術の実用化と産業展開を目指し、東京大学生産技術研究所の研究員であった藤澤智光と同大学大学院工学系研究科教授の越塚誠一が2004年10月に設立したベンチャー企業です。設立母体である東京大学ほか国内外の研究機関との密接なR&D体制を有し、最新テクノロジーのゲーム、映像制作、製造業への産業展開を行っています。詳細は、 <http://www.prometech.co.jp> をご覧下さい。

➤ 本件に関するお問い合わせ先

- ・ ニュースリリースの内容に関して

株式会社構造計画研究所 SBD 営業部 川村榮子

TEL:03-5342-1051 FAX:03-5342-1055 e-mail: eiko@kke.co.jp

<http://www.sbd.jp/>

風環境評価コンサルティングサービス

建物・道路建設が周辺の風環境に及ぼす影響(いわゆるビル風問題)を事前検討し、防風対策提案・評価します。

■ 評価対象

- 再開発建物，高層住宅，超高層建築
- 土木構造物（道路高架橋・盛土，プラント施設）

■ 評価内容

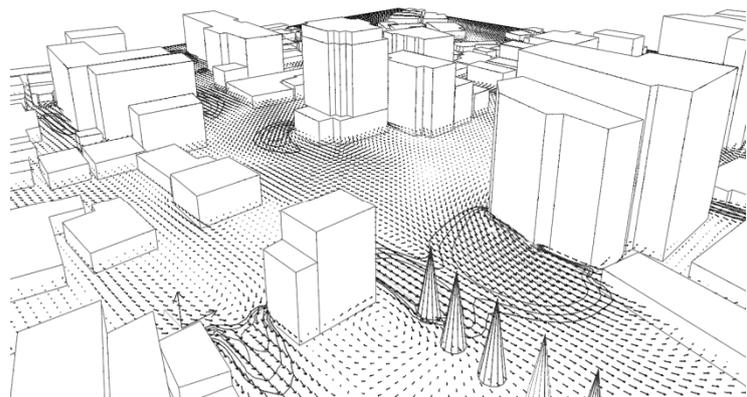
- 強風域の予測
- 近隣地域への影響
- 建設前後の風環境比較
- 風環境ランクの評価
- 防風対策の検討

■ 用 途

- 環境アセスメント
- 近隣説明
- 広域山間部での風環境

■ 所要期間

- 2週間～



風環境評価例

気流・温熱環境評価コンサルティングサービス

室内の気流・温熱環境解析を行い、効率的な空調機器の配置や、自然換気による温熱環境予測、濃度拡散予測を行います。

■ 評価対象

- 工場、建物全体・室内
- 車両空調など

■ 評価内容

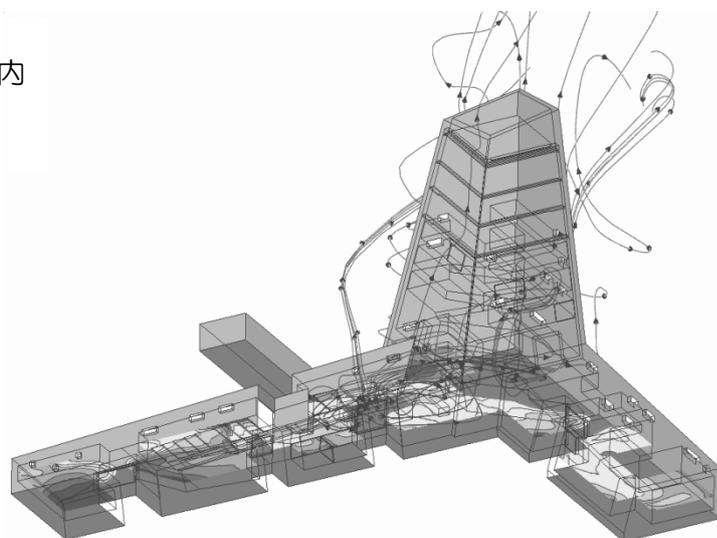
- 気流
- 温熱環境
- 濃度拡散

■ 用 途

- 空調機器配置検討
- 省エネ検討
- 大気質評価

■ 所要期間

- 2週間～

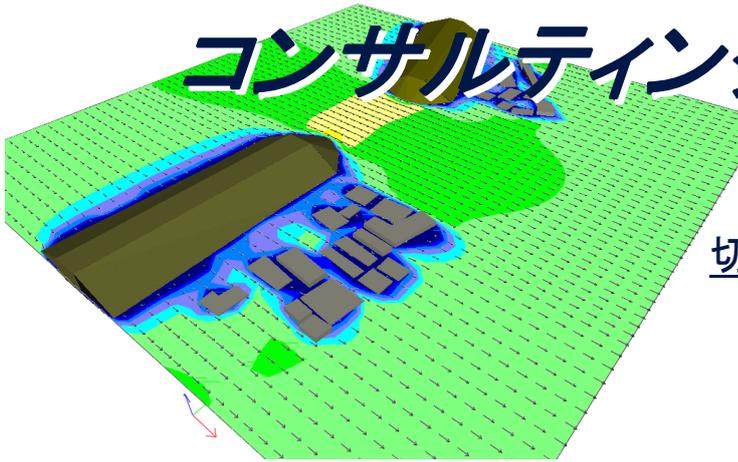


日本工業大学百年記念館室内温度評価例
(株式会社環境エンジニアリング様からの依頼)

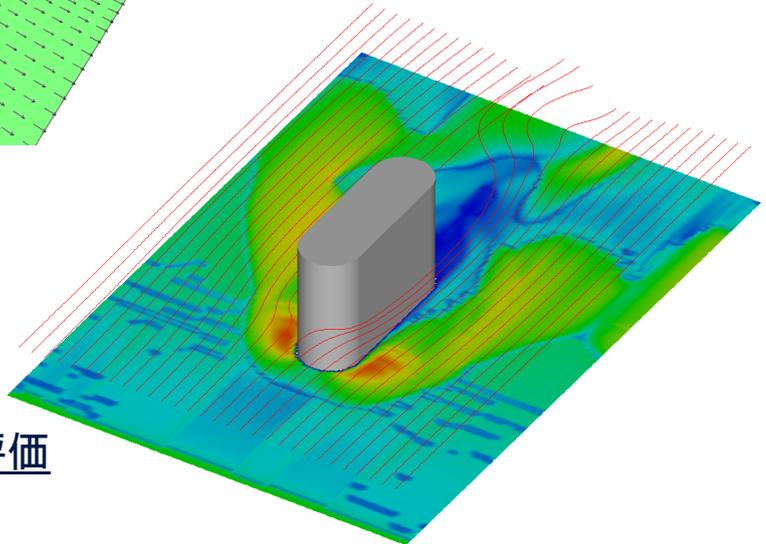
流れが見える！ 温度が見える！ 大気質が見える！

おまかせください！

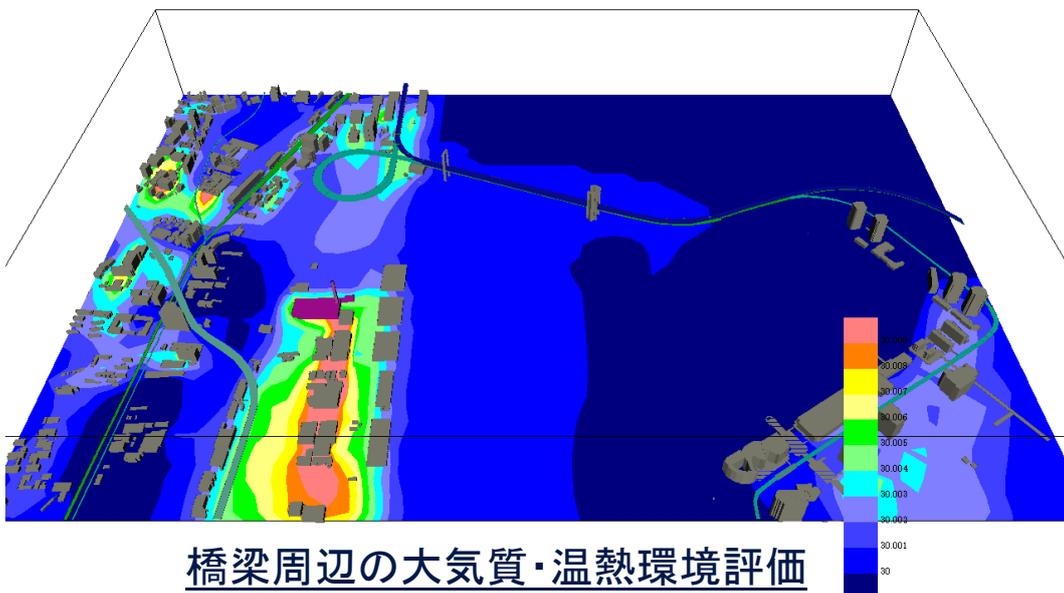
環境影響評価シミュレーション・ コンサルティングサービス



切土・盛土に伴う風環境評価



橋脚周辺の流況評価



橋梁周辺の大気質・温熱環境評価

【新商品ご紹介】

建築用非線形静的動的構造解析システム

RESP-F3T

～ 高層連層耐震壁 ・ 境界梁ダンパー 対応 ～

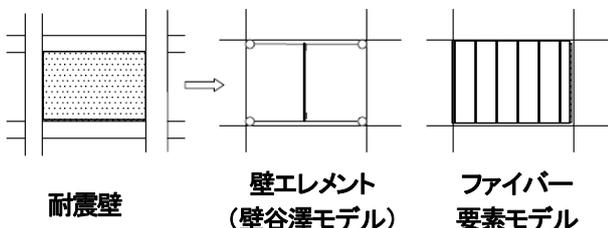
次世代構造のための建築耐震解析プログラム

■建築構造の高性能化を追求するために

建築に対して要求の大きい、コストダウン、大胆な意匠、および、高度な耐震性を実現するために、コア連層耐震壁、境界梁ダンパー、ロッキングダンパーを取り入れた高層構造が実用化されつつあります。

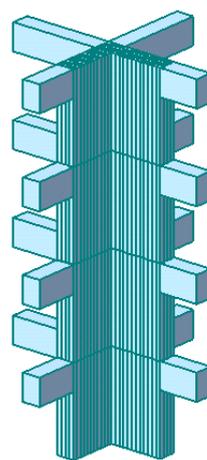
RESP-F3T は、このような新しい構造形式にも対応した耐震構造解析プログラムです。

- ・ファイバーモデル
- ・鉛直方向粘性ダンパー
- ・静的弾塑性解析、固有値解析の連続解析

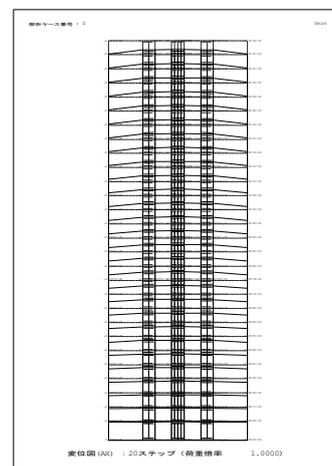


せん断剛性はファイバーとは無関係なので、独立に指定します。

RESP-F3T では材長のどの位置の曲げモーメントを塑性化判定に用いるか、指定することが可能です。



ファイバー要素によるコア壁のモデル化



鉛直方向荷重増分解析の変形図

■ファイバーモデル

コア連層耐震壁はファイバーモデル要素でモデル化できます。

ファイバーモデル要素は、部材断面を微小断面に分割し、微小断面ごとに軸構成則を設定することにより、部材剛性を評価します。

ファイバーモデル要素により、応力相関 ($M-N$, M_x-M_y , M_x-M_y-N) が自動的に考慮されます。

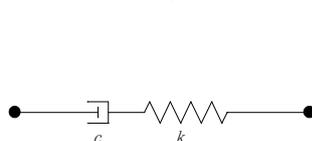
コア壁1部材は材軸直交方向に分割し、各分割点でファイバーモデルにより復元力特性を求め、材軸方向に剛性を積分して全体剛性とします。各分割断面は平面保持を仮定します。

■鉛直方向粘性ダンパー

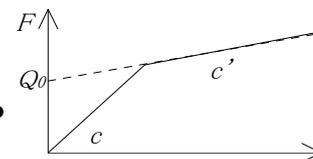
境界梁ダンパー、ロッキングダンパー等、粘性ダンパーを鉛直方向の速度に効果を持たせる配置形式が実用化されています。

RESP-F3T は各節点の鉛直振動自由度を考慮しますのでこれらのダンパー配置形式も解析可能です。

取り付け剛性を考慮したマックスウェルモデルにも対応しています。



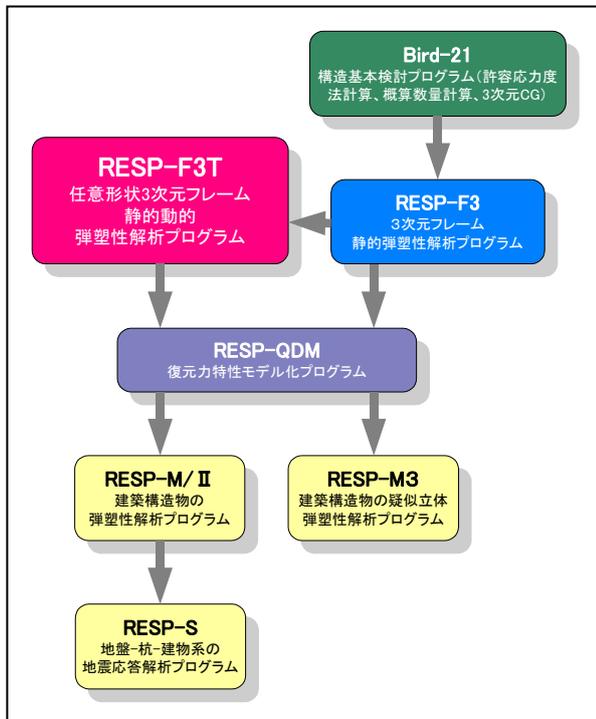
マックスウェルモデル



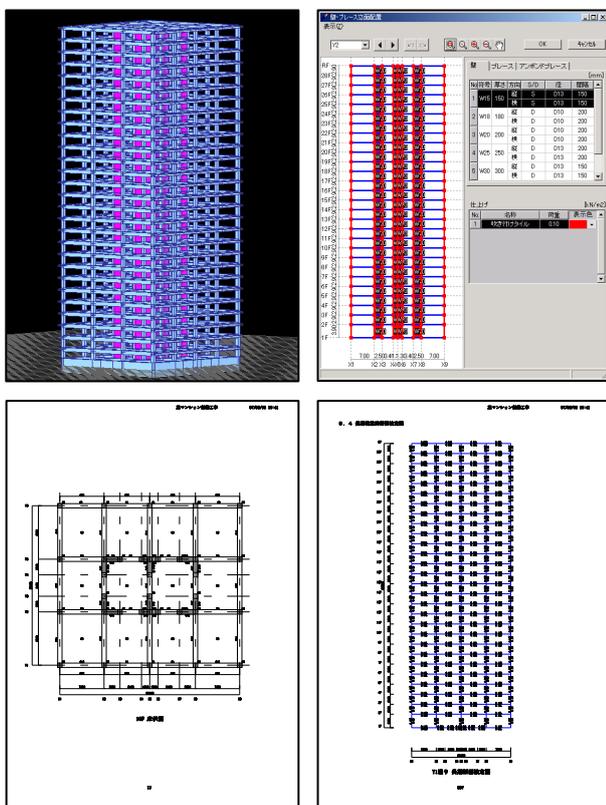
リリーフ付きオイルダンパー

■RESP シリーズとの関係

RESP-F3T は他の RESP シリーズプログラムとのデータ関係が可能です。これにより、データの連続性が保持され、効率的に利用することができます。



RESP シリーズとのデータ関係

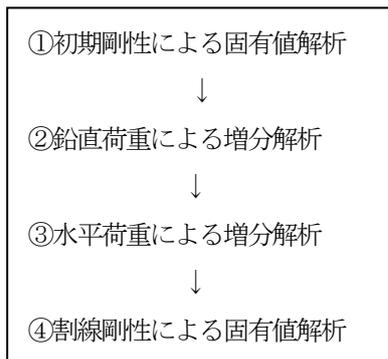


Bird-21 入力画面、計算書出力例

■静的弾塑性解析、固有値解析の連続解析

構造検討時には、鉛直荷重による増分解析に続けて、水平荷重による増分解析を行ったり、増分解析後に塑性化を考慮した割線剛性による固有値解析を行いたい場合があります。

RESP-F3T は静的弾塑性解析、固有値解析を任意に連続して行うことが可能です。これにより、下のような連続解析を行うことができます。



連続解析の例

■実行環境

対応機種：Intel プロセッサ (Pentium 4 以上推奨)

搭載のPC/AT 互換機

対応 OS：Windows2000、XP

ディスプレイ：解像度 1024×768 以上、256 色以上

メモリ：256MB 以上 (512MB 以上推奨)

ディスク容量：200MB 以上の空き容量

ドライブ：CD-ROM ドライブ

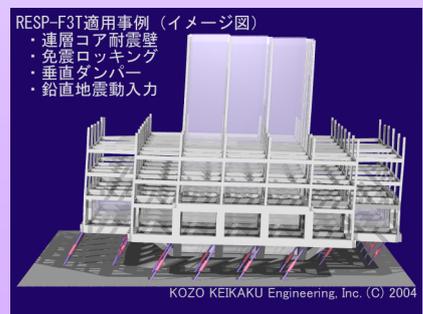
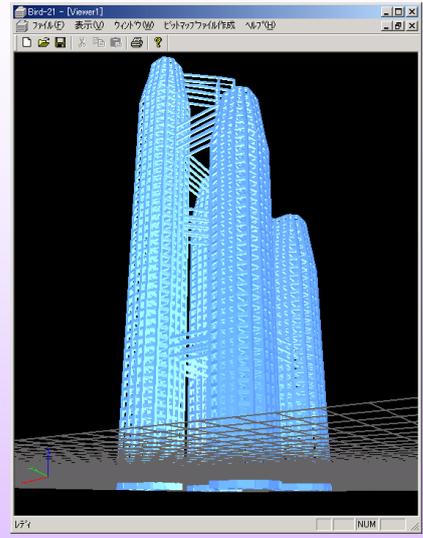
通信環境：インターネットへの接続、E-mail が使用できること (保守サービスのため)

管理者権限：インストールおよび運用時に必要

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

建築構造物の耐震解析プログラム RESPシリーズ

建築構造の高性能化を支援し続ける構造解析プログラム



RESPシリーズ最新情報

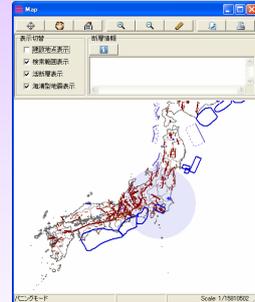
- ・RESP-F3 高強度鉄筋、高強度せん断補強筋式に対応
- ・RESP-F3D ねじれ地震力、加振力解析、高強度鉄筋、高強度せん断補強筋式に対応
- ・RESP-F3T Fafitis and Shah式、R-Oモデル、STAN/3Dからのデータ変換に対応

ricomacast(地震リスク評価プログラム)新登場

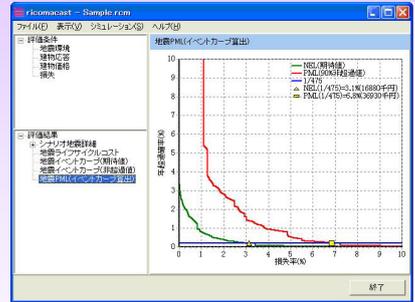
建物が保有する地震リスクを、周辺の地震環境を考慮して評価します。ricomacastには、地震リスクの評価に必要な専門知識と、日本全国の地震データベースが統合され、簡単な操作で地震リスク評価を行うことができます。Bird-21保有水平耐力計算結果の読み込みが可能です。

RESPシリーズ適用事例

- ・超高層、高層RC建築の地震応答解析、断面設計
- ・免震建築、超高層免震建築解析
- ・各種制震構造解析(曲げせん断分離型制振要素)
- ・高層建築、免震建築の地盤-杭連成解析
- ・長大構造物の位相差入力解析
- ・大スパン構造物の上下動水平動同時入力解析
- ・高層建築の風応答解析(風洞実験に基づく外力を作用)
- ・高層RC煙突の非線形動的解析、内筒-外筒の連成解析
- ・超高層集合住宅躯体と立体駐車場の衝突解析



・半径300km以内の活断層の検索例



・地震PMLの計算例

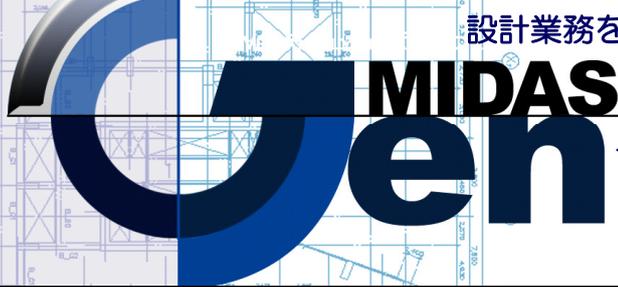
● 短時間で構造基本検討・数量計算が可能なBird-21が大好評 ●

実績豊富なRESPシリーズを1ヶ月単位でレンタル利用いただけます (RESP-F3T, Bird-21, ULT-DSを除く。ricomacast, RESP M+ は1年単位)。解析業務の受託も承っております。

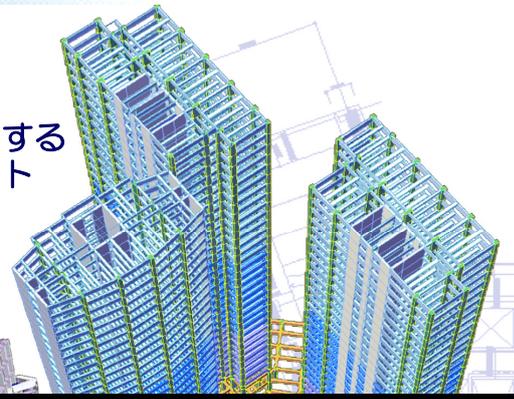


建設用構造解析システム

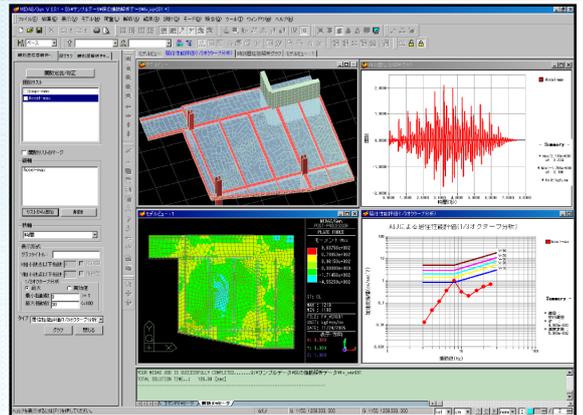
設計業務を広くサポートする
構造解析ソフト



マイダス / ジェン



- ★ 3次元任意形状の構造解析用ソフトウェア
フレーム要素、シェル要素、ソリッド要素、免制振要素が扱え、線形解析、非線形解析、静的解析、動的解析が可能です。
- ★ 基本機能(設計ヘイック)は、定価75万円(2008年1月現在)
- ★ 操作性は抜群!この種の解析ソフトのインターフェイスとしては群を抜いています。
- ★ 多分野で利用可能な汎用性。鉄塔、土木構造物、工作物等々。
- ★ 建築専用コマンドを豊富に装備



midas Gen 次のステージへ!

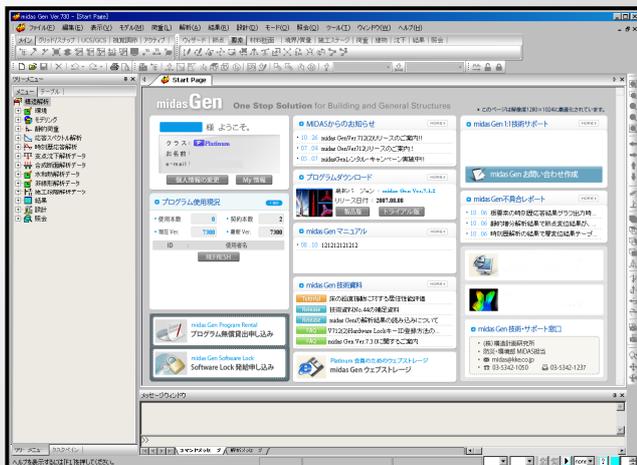
midas Gen Web基盤サービス 本格始動

MODS スタート
midas n emand ervice

— ネット環境を最大限に活用した各種サービス —

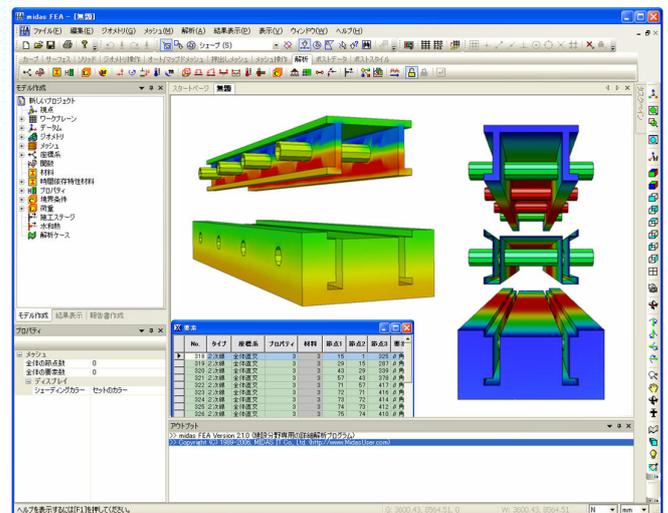
- ・Web経由でライセンスを認識 (Web認証システム)
- ・オンラインマニュアルがWebマニュアルに
- ・最新バージョンの状況を常に確認 (不具合情報 含む)
- ・ライセンスの利用状況 & 利用者をリアルタイムで確認
- ・ユーザ個別 Q & A サイト
- ・ソフトウェア・ロック(持ち運び用ライセンス)発給サービス
- ・無償レンタルサービス

— 上記サービス情報を一括確認するスタート・ページ —



FEM解析専用 「midas FEA」 — 建設用 FEM専用解析ツール —

- ★ 建設用に作られた FEM専用解析ソフト。FEM要素のモデリング機能 及び メッシュ自動生成機能を内蔵。線形解析/熱応力解析/動的解析 機能を装備。



midas Gen 及び midas DrawingShopは、MIDAS IT社の商標です。 midas FEA は、JIPテクノサイエンス社の商標です。表記の社名及び製品名等は、各社の登録商標または商標です。

各種お問合せ先 **構造計画研究所**
KOZO KEIKAKU ENGINEERING Inc.

防災・環境部 midas Gen担当
TEL : 03-5342-1050 / FAX : 03-5342-1237
Mail : midas@kke.co.jp

地震リスク評価プログラム ricomacast®による建物の地震リスク評価例

事業継続計画 (BCP) の策定に取り組む際には、まず検討対象とする災害を特定し、その災害に見舞われた場合に予想される被害の状況や、事業停止を余儀なくされる期間を見積もる必要があります。ここでは、検討対象とする災害を「地震」と特定して、災害に見舞われた際の状況を地震リスク評価プログラム「ricomacast®」を利用して評価した事例をご紹介します。

■ 地震リスク評価プログラム ricomacast®

弊社にて開発、販売を行っている地震リスク評価プログラム ricomacast®は、応答スペクトル法により地震時の建物応答を算定して、建物の地震リスクを評価するプログラムです。評価に必要な地震データベースや各種計算機能を内蔵しており、対象建物の属性を設定することで、特定シナリオ地震発生時の建物損失や、不動産証券化における地震リスク指標として用いられている地震 PML、建物供用期間における地震に対するライフサイクルコストなどを評価することができます。

2007年1月の販売開始以来、数多くの方にご利用いただいておりますが、2008年5月に新バージョンをリリースする運びとなりました。追加される主な機能は以下のとおりです。

- ・地盤増幅率のユーザー指定機能
- ・震源を予め特定しにくい地震の発生頻度評価方法の選択機能
- ・利用可能な地震データとして、地震ハザードステーション J-SHIS¹⁾ (2007年版) をラインアップ
- ・シナリオ地震の年発生確率評価機能 (オプション機能)
- ・複数建物群 (ポートフォリオ) 評価機能 (オプション機能)

ricomacast の標準販売版には建物の地震リスクを評価するために必要な基本機能が装備されていますが、基本機能だけではニーズを満たさないお客様に対して、ご利用の目的に応じたプログラムのカスタマイズも受託開発として対応しております。

次に紹介するのは、ricomacast の一部機能をカスタマイズした上で評価を行った事例です。

■ 建物の地震リスク評価例

ricomacast を利用した事例として、「シナリオ地震による地震リスク評価例」と「一様ハザードスペク

トルによる地震リスク評価例」をご紹介します。

いずれの評価においても、ricomacast の機能の一部をカスタマイズして実施しており、標準販売版には搭載されていない機能を利用した評価については、★印で示します。

・対象建物の概要

対象とした建物は、東京都中野区に位置する旧耐震設計法に準拠した地上5階建ての事務所ビルです。現行耐震基準で求められる耐力を満たさないことが耐震診断により判明したため、現在、ビルの改修案を検討中です。建物概要は以下に示すとおりです。

現状

- 構造：鉄筋コンクリート造 (地上5階建て)
- 長辺方向：ラーメン構造 (最小 $I_s=0.43$)
- 短辺方向：壁式構造 (最小 $I_s=0.61$)
- 竣工：1981年以前 (旧耐震設計法)
- 再調達価格：6.1億円

改修案

- 0.37億円の費用をかけて、各階の長辺方向2箇所鉄筋コンクリート壁を増設し、耐力を向上させる。

地震リスク評価を行うためには建物のモデル化が必要となります。ricomacast では、建築構造計算プログラム Bird-21²⁾の保有耐力計算結果から建物の耐力スペクトルを設定することができるため、本事例では、当該建物の耐震診断・補強計画書の内容に基づき、Bird-21を利用して現状と改修案の建物のモデル化を行いました。現状建物のモデルを図1に示します。

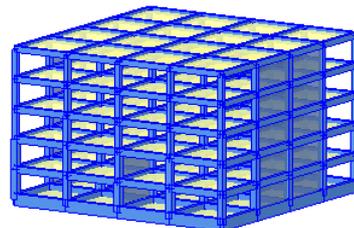


図1 建物モデル (現状)

・シナリオ地震による地震リスク評価例

1) 建設地の地震動強さの評価

特定のシナリオ地震に見舞われた際の状況の評価するために、まず、建設地周辺の活断層の状況や過去の地震活動状況をふまえて、どのような地震を想定すれば良いかを検討する必要があります。

ricomacast では、建設地を中心として半径検索することにより、地震ハザードステーション J-SHIS で用いられている断層・震源データから、対象建物に影響を与えると考えられる断層・震源を短時間で漏れなく抽出することができます。本検討では、建設地から半径 200km 以内の断層・震源を検索したところ、51,687 のシナリオ地震が評価対象となりました。

抽出された各シナリオ地震について、安中他による加速度応答スペクトルの距離減衰式³⁾を用いて地震動強さの評価を行いました。

2) 建設地の表層地盤増幅の評価

地震による揺れは、地中からの揺れが地表に伝わる過程で増幅されます。1) で評価した加速度応答スペクトルは S 波速度が 300~600m/s 相当の支持地盤（基盤）における地震動強さであるため、建設地の表層地盤の影響により、揺れがどの程度増幅されるかを別途検討する必要があります。

その際、表層地盤は応力-ひずみ関係に非線形性を有するため、支持地盤における地震動の強さに応じた増幅状況の評価が必要となります。そこで、本事例では、建設地の地盤調査報告書に記載された PS 検層結果に基づき支持地盤上部の表層地盤をモデル化し、以下の手順で各加速度レベルに対して重複反射理論による地震応答解析を実施して平均的な加速度応答スペクトルの増幅度を求め(★)、その結果を ricomacast に与えました。

- ① 地盤の不均質性によるばらつきを考慮して、PS 検層結果に基づき設定した地盤モデルに対して地層の厚さ、単位体積重量、S 波速度を 10% のばらつきで変動させて、計 10 パターンの地盤モデルを作成する。
- ② 揺れ方によっても増幅度が異なることを考慮して、揺れ方の異なる地震波を 10 波用意する。
- ③ ②の地震波を、加速度レベル 50~500gal の間で 50gal 刻みに 10 段階で振幅変化させたものを①の地盤モデルの基盤位置に入力して地震応答解析を実施する。
- ④ 解析により得られた地表波の加速度応答スペクトルと基盤露頭波の加速度応答スペクトルを

それぞれ算定して比をとり、加速度応答スペクトルの増幅度を評価する。この処理により得られる加速度応答スペクトルの増幅度は、1 加速度レベルあたり 10 モデル×10 波=100 ケースであり、その特徴を整理する。

図 2 に、基盤加速度レベルを 380gal（告示の極稀地震相当）として評価した増幅度のばらつき状況と限界耐力計算法における増幅度を比較します。建設地の表層地盤は等価二層地盤による近似との相性が良かったこともあり、精算法による結果は増幅度の平均的な傾向を捉え、また略算法による結果は、増幅度のばらつきを包含する結果となりました。

図 3 に①~④の手順で求めた基盤加速度レベルごとの増幅度の平均値を示します。加速度レベルが大きくなるにつれて地盤の非線形化により、短周期応答の減衰が増し、また、卓越周期が長周期化する傾向が確認できます。

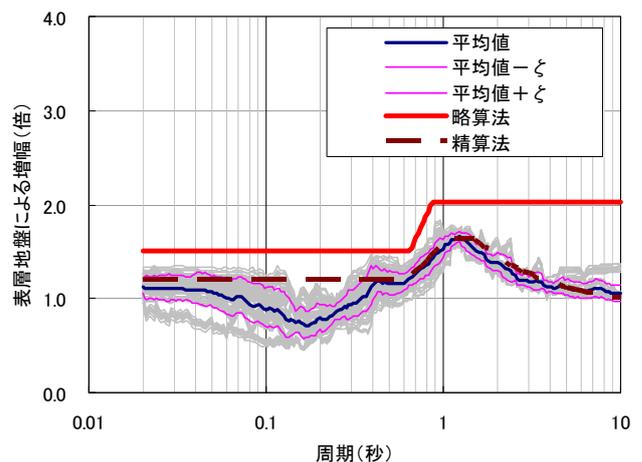


図 2 表層地盤増幅（基盤加速度 380gal）

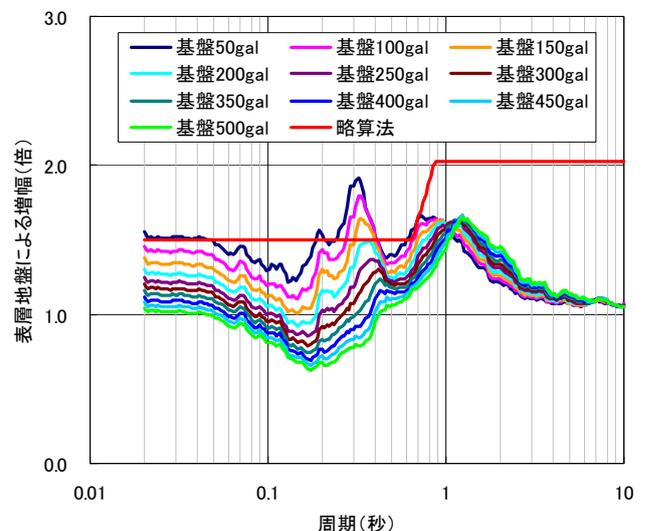


図 3 建設地の表層地盤増幅（平均値）

3) シナリオ地震による地震リスク評価

1) と 2) の評価結果を乗じることにより評価される地表の地震動強さと、対象建物の耐力スペクトル、さらには図4に示すような対象建物の構造部材、非構造部材のフラジリティ曲線とコストを設定し、ricomacast を利用して地震リスク評価を行いました。

評価が完了すると、ricomacast では、特定のシナリオ地震に対する評価結果を確認することができます。表1に示すのは、相模トラフ沿いで発生する地震と立川断層帯による地震の評価結果です。相模トラフ沿いで発生する地震とは、2～3百年間隔で発生する関東大震災クラスの地震の間起こると考えられているマグニチュード7クラスの直下型地震です。一方、立川断層帯による地震は、関東圏で確認されている活断層の中でも活動度が高い地震です（今後30年間の発生確率1.3%）。

表1には、被害予測額（被災したために生じる間接的な経済損失は含まず）に加え、建物の被害状況と復旧期間の関係を与えて評価した（★）、機能復旧期間を示します。図5に示すように、復旧と並行して機能継続が可能な場合には、機能が中断する期間はより短くなります。事業継続計画においては、機能中断期間を事業継続に影響がない範囲に留めるための取り組みが求められます。

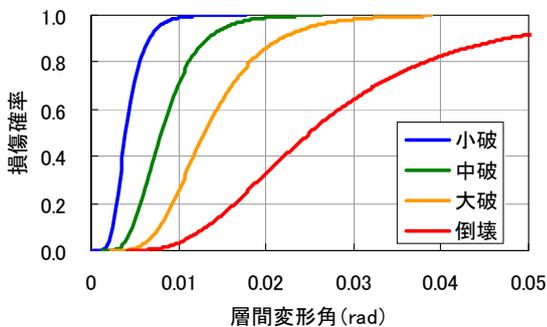


図4 構造部材のフラジリティ曲線の例

表1 特定シナリオ地震による地震リスク

	被害予測額 ()内は再調達価格に対する比	機能復旧 期間
相模トラフ沿いの地震 (M7.2、距離 36.9km)		
現状	0.36 億円 (5.9%)	1.0 ヶ月
改修案	0.20 億円 (3.1%)	0.5 ヶ月
立川断層帯による地震 (M7.4、距離 20.5km)		
現状	1.3 億円 (21.7%)	3.8 ヶ月
改修案	0.76 億円 (11.7%)	2.0 ヶ月

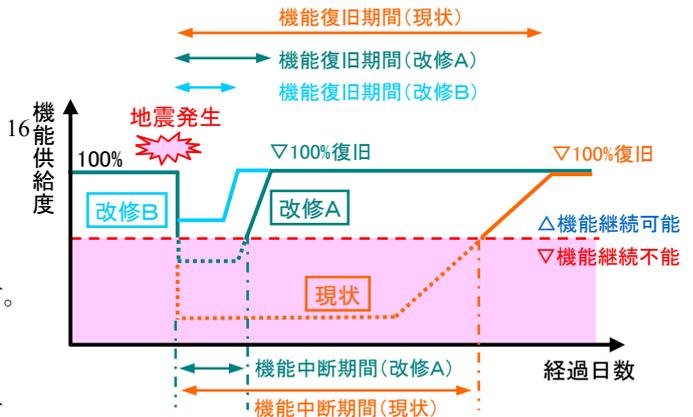


図5 機能復旧期間と機能中断期間の例

・一様ハザードスペクトルによる地震リスク評価例

前項は、ある特定のシナリオ地震を想定した評価例でしたが、建物の供用期間内に起こる地震は明確ではなく様々な状況が考えられます。そこで、対象建物に影響を及ぼす地震全てを考慮して、地震の発生の可能性と地震動の強さを計算し、建設地における地震動強さとそれを特定の期間内に超える確率との関係（ハザードカーブ）を求めて、ある期間で想定される地震動強さに対するリスクを評価するケースも考えられます。ここでは、期間と超過確率を固定して地震動強さを応答スペクトルで表現した一様ハザードスペクトル（等確率スペクトルとも呼ばれる）による地震リスク評価例をご紹介します。

1) 建設地の一様ハザードスペクトル

現在、J-SHIS では、ある特定の再現期間における地表の震度や、地表または工学的基盤における最大速度を確認することができますが、建物の周期特性に応じた地震動強さを確認することはできません。

そこで、J-SHIS で利用されている地震データを用いて、安中他による加速度応答スペクトルの距離減衰式（ばらつきは自然対数で0.5）により地震動強さを計算し、評価基準日を2008年1月1日とした建設地の一様ハザードスペクトル（減衰5%）を評価しました（★）。

図6に建設地の支持地盤における周期0.04秒と周期1.0秒のハザードカーブを示します。また、図7には各地点のハザードカーブを評価して求めた、関東圏の支持地盤における50年超過確率10%（再現期間475年）の応答加速度分布を示します。

本事例では、Vision2000⁴⁾で定められている4つの地震動レベルを設定して、その再現期間における地震動強さを一様ハザードスペクトルにより評価しました。

- 平均再現期間 43 年の頻繁な地震動
- 平均再現期間 72 年のたまにある地震動
- 平均再現期間 475 年の稀に発生する地震動
- 平均再現期間 970 年の極めて稀に発生する地震動

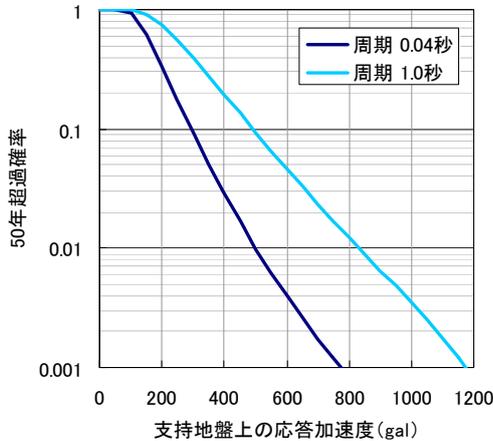


図6 建設地の応答加速度のハザードカーブ

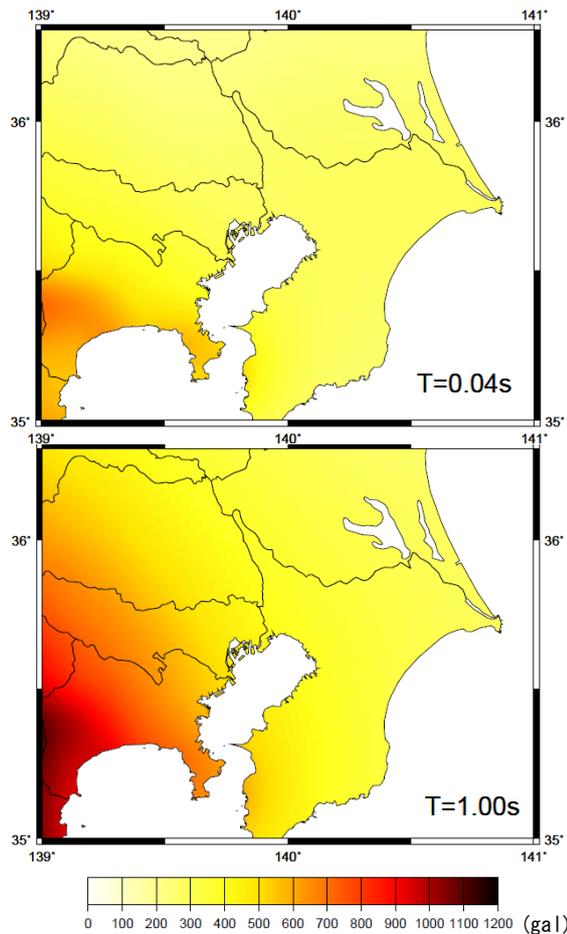


図7 50年超過確率10%に対応する支持地盤上の
応答加速度の分布
(上段：周期 0.04 秒、下段：周期 1.0 秒)

4つの地震動レベルに対して求めた建設地の一様ハザードスペクトルを図8に示します。表層地盤による増幅度はシナリオ地震による評価例と同様の方法で評価しました。ricomacastにおいて、この一様ハザードスペクトルを地震動強さとして与え(★)、対象建物の地震リスク評価を行いました。

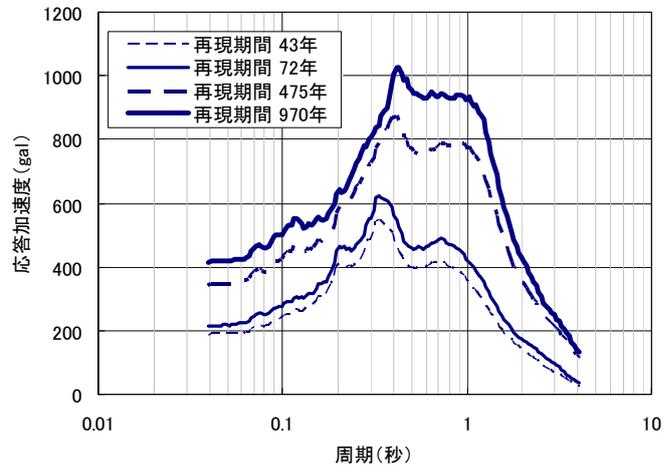


図8 建設地の一様ハザードスペクトル

2) 一様ハザードスペクトルによる地震リスク評価

シナリオ地震のケースと同様に、評価された被害予測額と機能復旧期間を表2に示します。表2には、各階の長辺方向にさらに2箇所、壁を増設した改修案*の結果も示します。改修に必要となる費用とその改善度を勘案して、事業継続のために最も効果的な対策を実施することが望ましいと考えられます。

表2 一様ハザードスペクトルによる地震リスク

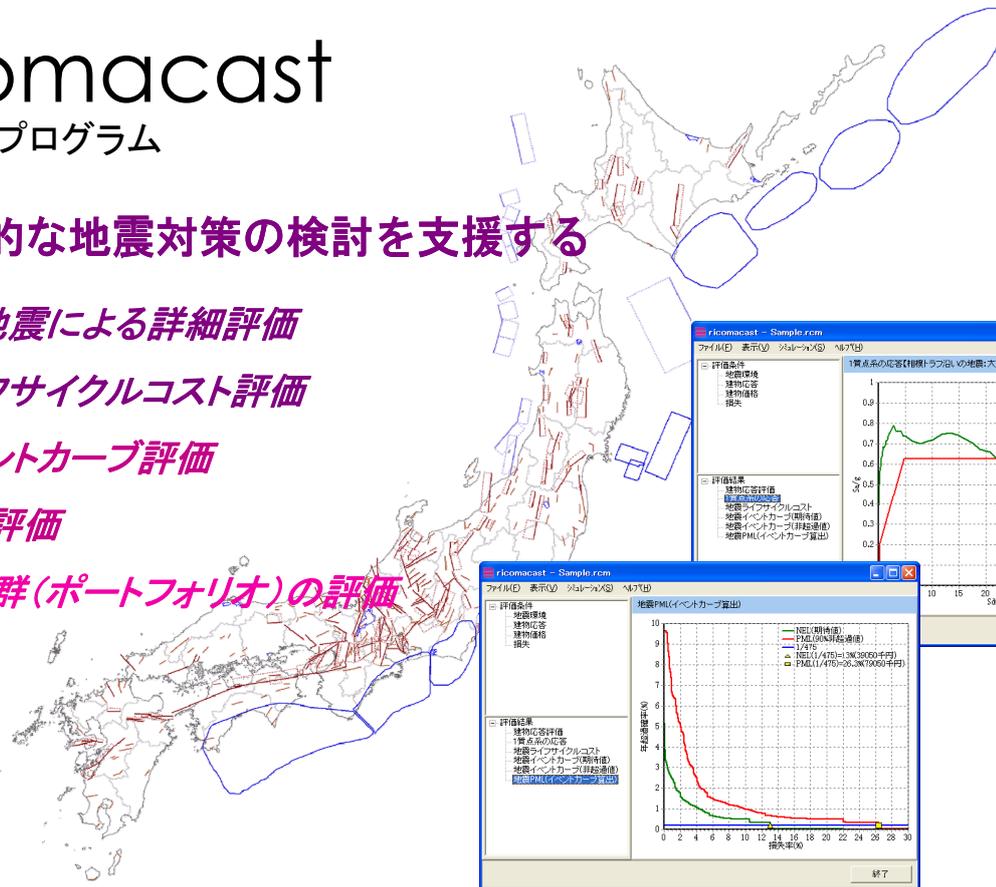
	被害予測額 ()内は再調達価格に対する比	機能復旧 期間
再現期間 43 年		
現状	0.46 億円 (7.6%)	1.3 ヶ月
改修案	0.21 億円 (3.2%)	0.5 ヶ月
改修案*	0.06 億円 (0.8%)	0.1 ヶ月
再現期間 72 年		
現状	0.79 億円 (13.0%)	2.2 ヶ月
改修案	0.38 億円 (5.8%)	1.0 ヶ月
改修案*	0.07 億円 (1.0%)	0.2 ヶ月

参考文献

- 1) 地震ハザードステーション J-SHIS
<http://www.j-shis.bosai.go.jp/>
- 2) 建築構造計算プログラム Bird-21
http://www4.kke.co.jp/resp/product/bird-21_01.htm
- 3) 安中・山崎・片平：気象庁 87 型強震計記録を用いた最大地動及び応答スペクトル推定式の提案、第 24 回地震工学研究発表会講演論文集
- 4) SEAOC Vision2000 Committee: Vision2000: A Framework for Performance Based Engineering of Buildings, JSEEP News No.146, Jan. 1996.

建物に効果的な地震対策の検討を支援する

- シナリオ地震による詳細評価
- 地震ライフサイクルコスト評価
- 地震イベントカーブ評価
- 地震PML評価
- 複数建物群(ポートフォリオ)の評価



ricomacastとは？

ricomacastは、建設地周辺の活断層の状況や過去の地震活動状況をふまえて、建物の地震リスクを評価するプログラムです。

日本全国の地震活動モデルのデータベースと、建物の地震リスクを評価するために必要な基本機能を内蔵しており、建物の属性を設定することにより、対象建物の地震リスクを評価することができます。

震源

現在の工学的知見に基づく地震情報データベースを利用して評価することができます。また、GIS機能を標準搭載しており、建物周辺の地震環境を地図上で確認することができます^{※1}。

【地震情報データベース】

- 主要98断層帯^{※2}
- 主要98断層帯以外の活断層^{※2}
- 海溝型地震^{※2※3}
- 震源断層を予め特定しにくい地震^{※3}

※1 国土地理院刊行の数値地図25000(行政界・海岸線)を基本地図として利用
 ※2 地震ハザードステーションJ-SHISで利用されている防災科学技術研究所の断層形状データを利用。
 ※3 地震ハザードステーションJ-SHISで利用されている防災科学技術研究所の断層形状データを数値化。

建物応答評価

建物応答は応答スペクトル法により評価します。建物の耐カスペクトルは、以下の4つの設定方法を用意しています。構造計算や耐震診断結果等に基づいた設定を支援しています。

【耐カスペクトルの設定方法】

- 保有水平耐力(せん断力係数 C_i)の入力
- Bird-21保有水平耐力計算結果を利用する
- I_s 値の入力
- 耐カスペクトルの直接入力

震源特性・伝播経路特性とサイト増幅特性の評価

応答スペクトルの距離減衰式と地盤種別による増幅特性を与えて評価します。

【距離減衰式・地盤種別】

- 安中・山崎・片平(1997)
 - ・建築基準法に基づく地盤種別のサイト増幅特性
 - ・ユーザー指定によるサイト増幅特性
- 山内・山崎・若松・SHABESTARI(2001)
 - ・11種類に分類された地盤種別のサイト増幅特性

損失評価

フラジリティおよび再調達価格により評価します。フラジリティはユーザーが自由に設定することができます。また、既往の研究結果を参考に設定したフラジリティを内蔵しています。

【フラジリティ】

- 鉄筋コンクリート造
- 鉄骨造
- 鉄骨鉄筋コンクリート造
- 非構造部材(加速度依存)
- 非構造部材(層間変形角依存)

動作環境

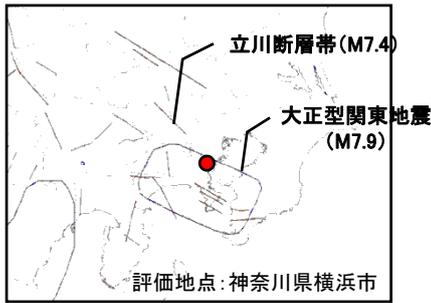
- 対応OS : Microsoft Windows XP 日本語版
Microsoft Windows Vista 日本語版
- CPU : Pentium 4以上
- 必要メモリ : 512MB以上
- プロトコル : TCP/IP (同一ルーター内で接続されている範囲)
- その他 : USBポートにセキュリティデバイスの接続が必要です
インストールには管理者権限が必要です

ricomacast をベースとしたシステム開発(受託開発)

ricomacastは単独で動作するソフトウェアですが、お客様のニーズに合わせたカスタマイズに対応いたします。

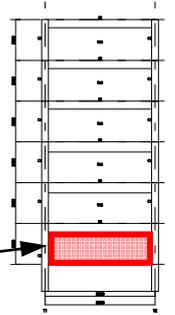
「自社独自の損傷評価モデルやコストモデルをricomacastに導入したい」、「自社の仕様に合わせてレポート出力機能が欲しい」等のご要望にお応えします。

評価地点と周辺の地震環境



建物モデル

- ・現状
地上6階、RC造
1Fにピロティを有する
旧耐震に準拠した建物
建物再調達費用 3億円
- ・耐震対策案
1Fピロティに壁を増設
補強費用 1千万円



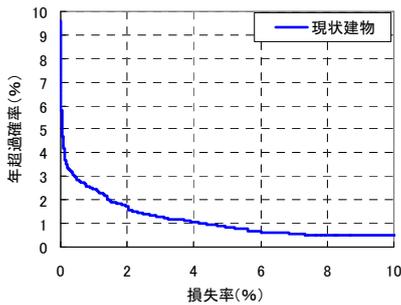
評価条件

距離減衰式: 安中・山崎・片平(1997)
地盤種別: 第2種地盤(建築基準法)
評価基準日: 2007年8月

周辺の地震環境をふまえた現状建物の地震リスクはどの程度？

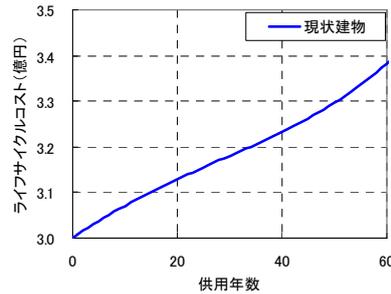
現状建物の地震リスクを評価します。

地震イベントカーブ(期待値)



損失率とは、建物が地震を受けたときに生じる損失を建物の再調達費用で除した割合です。年超過確率とは、それ以上の損失が生じる年間あたりの確率です。

地震ライフサイクルコスト



地震がもたらす長期的なキャッシュフロー(ライフサイクルコスト)への影響を評価します。

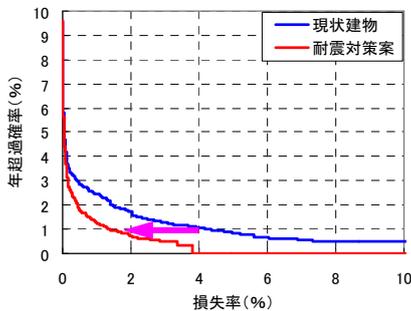
再現期間100年(年超過確率1%)の地震に対して予想される損失期待値は約4%(0.12億円)である。

30年間の地震ライフサイクルコストの期待値は約2千万円。

耐震対策の効果は？

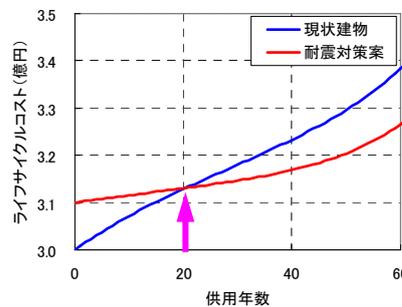
耐震対策前後の地震リスクを比較評価することにより、耐震対策の効果を検討します。

地震イベントカーブ(期待値)



再現期間100年(年超過確率1%)の地震に対して再調達費用の約2%の損失低減。

地震ライフサイクルコスト

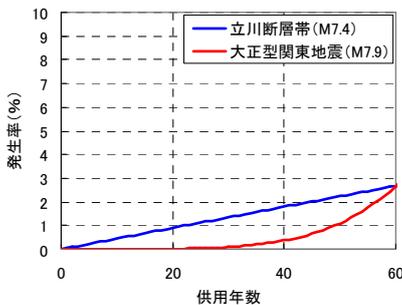


旧耐震基準の現状建物は地震に対するリスクが高いために急勾配のグラフになっています。一方、耐震対策を施した場合には初期投資が発生しますが、地震に対するリスクが低減されるために緩勾配のグラフになります。

耐震対策のために初期投資は発生するが20年後には地震ライフサイクルコストが逆転する。

発生リスクの高い地震は？

建物周辺で予想される地震の発生リスクを地震調査研究推進本部による長期評価結果に基づき評価します。



評価基準日と確率分布(BPT分布、ポアソン過程)により評価します。

M7.4クラスの立川断層帯による地震の40年発生確率は約2%である。

その他にも...

ricomacast では、以下のような評価を行うことができます。

□建物の応答結果の確認

シナリオ地震に対する等価1質点系の建物応答評価結果(加速度、変位)を確認することができます。

□地震PMLは？

90%非超過値のイベントカーブより地震PMLを評価することができます。

□複数の建物についての地震リスクは？

複数建物群(ポートフォリオ)の評価を行うことにより、保有する複数の建物に対する地震リスクを評価することができます。

地震波の水平・上下同時入力による時刻歴応答解析手法の検討

正会員 ○梁川 幸盛*¹

同時加振 水平動 上下動
軸力変動 高層免震建物

1. はじめに

高層建物の設計における地震応答解析では、鉛直部材の軸力を精度良く推定するために、水平方向・上下方向の地震波を同時に入力した応答解析が求められる。特に高層免震建物では、免震装置の引抜の設計がクリティカルであるため、水平・上下方向の同時加振による応答解析の重要性が高まっている。しかし、一般の建築構造物の水平変形と上下変形の固有振動数は10倍前後ほど離れた振動モードとなるため、広く用いられている剛性比例減衰では、それぞれの振動モードに適切な減衰を与えることが難しい。このため、全体系の1次固有周期（すなわち水平変形の1次モード）に基づいた剛性比例減衰を用いた同時入力の振動解析では、上下変形モードの減衰を過大に評価することになり、設計として危険側の結果を与えかねない¹⁾。

本稿では、上記の水平・上下の同時解析において適切な剛性比例減衰を与えるために、水平成分と上下成分の振動方程式を分離して並列に解き、それぞれの応答値を加算することにより、同時加振の時刻歴応答解析を行う方法を提案する。

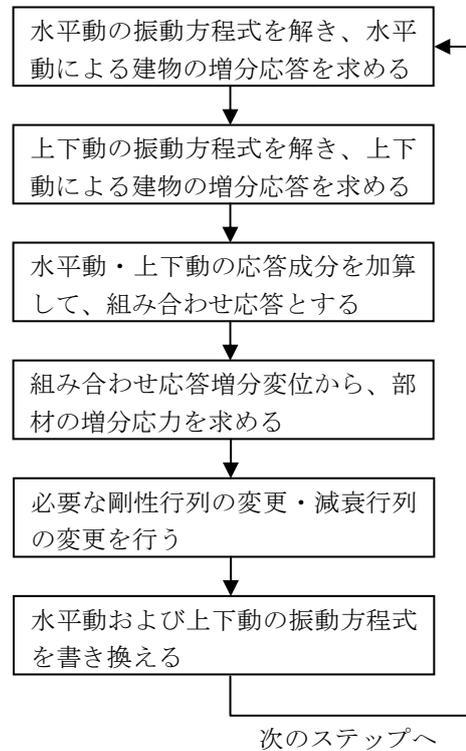


図1 解析のフロー

2. 解析方法

図1に計算フローを示す。水平動(式1)および上下動(式2)を独立して解き、得られたそれぞれの増分加速度・速度・変位を加算して水平・上下同時の応答とする。

$$[M]\{\ddot{x}_n\} + [C_h]\{\dot{x}_n\} + [S_n]\{x_n\} = \{f_n\} \quad (1)$$

ここで、 $[M]$: 質量マトリクス

$$[C_h] = \frac{2 \cdot h}{\omega_1} [S_n] \quad (h: \text{水平動減衰定数})$$

(ω_1 : 水平1次モードの固有角振動数)

$[S_n]$: 瞬間剛性マトリクス

$\{\ddot{x}_n\}$: 水平動による応答増分加速度

$\{\dot{x}_n\}$: 水平動による応答増分速度

$\{x_n\}$: 水平動による応答増分変位

$\{f_n\}$: 地震外力 (水平成分)

prefix h : 水平動のための変数

suffix n : n ステップ目の解析

$$[M]\{\ddot{x}_n\} + [C_v]\{\dot{x}_n\} + [S_n]\{x_n\} = \{f_n\} \quad (2)$$

ここで、 $[C_v] = \frac{2 \cdot h_v}{\omega_1} [S_n]$ (h_v : 上下動減衰定数)

(ω_1 : 上下1次モードの固有角振動数)

$\{\ddot{x}_n\}$: 上下動による応答増分加速度

$\{\dot{x}_n\}$: 上下動による応答増分速度

$\{x_n\}$: 上下動による応答増分変位

$\{f_n\}$: 地震外力 (上下成分)

式3により、それぞれの増分応答値を加算し、水平・上下の応答とする。

$$\begin{aligned} \{\ddot{x}_n\} &= \{\ddot{x}_n\} + \{\ddot{x}_n\} \\ \{\dot{x}_n\} &= \{\dot{x}_n\} + \{\dot{x}_n\} \\ \{x_n\} &= \{x_n\} + \{x_n\} \end{aligned} \quad (3)$$

3. 試解析

図2に水平・上下の入力地震動を示す。水平・上下動のそれぞれのピークは同時刻ではない。図3～5に示す40階建ての高層RC建物に入力し、○印の柱軸力を検討対象とした。表1に本建物の初期剛性による固有周期を示す。1次固有周期は約8倍の違いがある。それぞれの1次固有周期に対して、 $h=3\%$ の減衰を与えた。なお、

柱のMN相関の評価にはファイバー要素を用いた。

図5に全体の1次固有周期に対して単純に剛性比例型減衰を与えて解いた結果を示し、図6に今回提案する方法にて解いた結果を示す。表2には、この時の最大応答柱軸力の比較を示す。単純剛性比例型では、大きな減衰が作用して上下動の影響が極めて小さいのに比べ、今回提案する方法では上下動の影響が認められる。

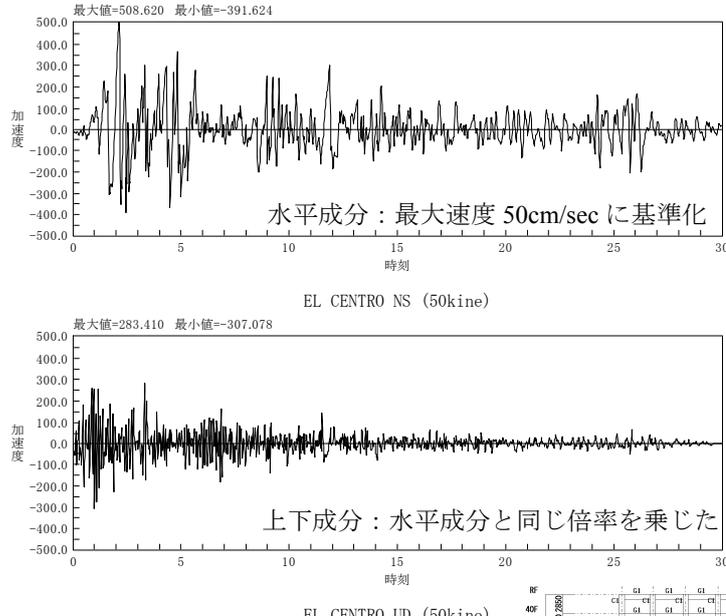


図2 入力地震波 (EL CENTRO)

表1 固有値解析結果 (秒)

	水平モード	上下モード
1次	2.00 (併進 X)	0.253
2次	2.00 (併進 Y)	0.146
3次	1.50 (振れ)	0.097

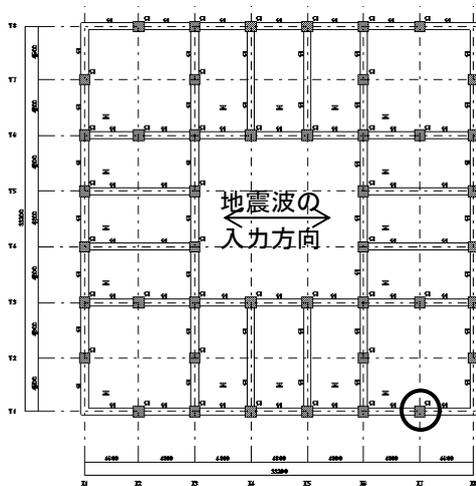


図3 基準階伏図 (○印の柱を対象)

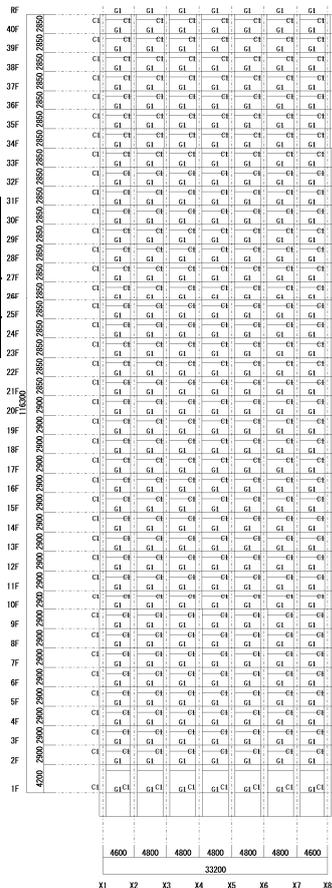


図4 代表構面軸図

4. まとめ

本稿は、時刻歴応答解析において水平・上下動が同時に入力される状況を解くための手法を提案した。本方法は、上下動と水平動の計算を分離することに特徴があり、設計のための解析手法としてはおおよそ妥当な解析結果の傾向を示すことが確認できた。しかし、下記の点では妥当性の確認ができておらず、今後の課題といえる。

- ・不釣合い力の処理方法
- ・速度依存 (流体・粘性・粘弾性) ダンパーの扱い方
- ・上下動の応答に関する表層地盤への逸散減衰の影響

表2 最大応答柱軸力の比較 (単位: kN)

解析ケース	最大応答柱軸力	
	圧縮側	引張側
水平動のみ入力	27603	-6750
水平+上下 (比例)	27530	-6769
水平+上下 (提案)	28421	-7124

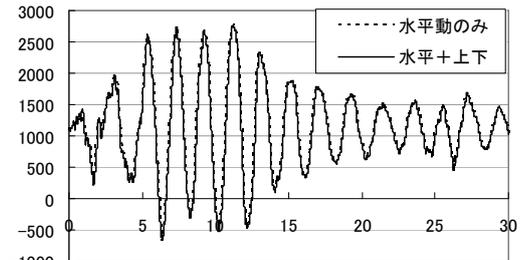


図5 柱軸力時刻歴 (単純剛性比例型減)

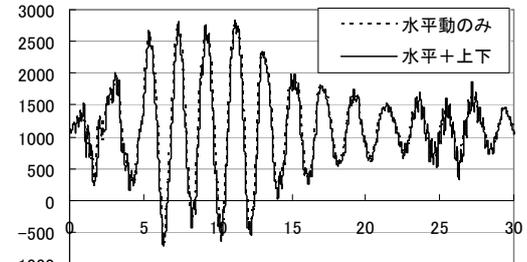


図6 柱軸力時刻歴 (今回提案方法)

参考文献 1):「多次元入力地震動と構造物の応答」、日本建築学会、1998、I編-2章 実現象からみた多次元挙動

地域の地形に対応した地震防災マップの作成

(その2) 微地形区分に基づく小田原市の50mメッシュ震度マップ

正会員 ○橋本 光史*1 栗山 利男*1
 正会員 蔦野 雅俊*2 荻本 孝久*3
 正会員 山本 俊雄*4

表層地盤 微地形区分 増幅特性
 震度マップ 50mメッシュ 小田原市

1. はじめに

地域防災力の向上には、住民が地域の地震災害に対する危険性を正しく理解・認識することが必要である。地域における揺れやすい場所を把握することは極めて重要であり、地域の特性を考慮して作成した震度マップなどは、直感的に理解しやすいハザードマップとして有用なツールとなる。一般的にハザードマップは、メッシュ単位で評価されており、その単位は全国レベルで評価を行なう場合は1kmが基本となっている。また、県や市などの地震被害想定調査などでは500mあるいは250m単位で評価されている。

地表での地震動(揺れの強さ)は、主に表層地盤特性の影響を受けており、内閣府による地震防災マップ作成技術資料(以下、技術資料)では、地域内の詳細な揺れの違いを把握するためには、地域の地形の違いに対応したメッシュ規模での評価が必要であるとしている。

著者らは、昨年度、神奈川県平塚市を対象として50mメッシュ(標準地域メッシュ第3次区画を20×20分割したメッシュ)での震度マップを試作し、地域の地形の違いに対応した揺れやすさマップが作成できることを確認した。本報では、昨年度に引き続き、神奈川県小田原市を対象として、50mメッシュでの震度マップを作成し、従来から市レベルで多用されている250mメッシュでの震度マップとの比較を行った。

2. 検討方法

(1) 微地形区分と増幅率

1/50,000土地分類基本調査図のうち地形分類図と表層地質図を用いて、小田原市全域に対して50mメッシュ単位で地形、地質を読み取り、技術資料の既存の地形分類図の主な区分から中央防災会議による微地形区分を設定する手順に準じて15区分の微地形を設定した。

表層地盤の増幅率は、藤本・翠川(2003)の経験式およびMidorikawa et al. (1994)の経験式から微地形と平均せん断波速度(AVS30)を関係付けることにより設定した。

(3) 地震動の予測

工学的基盤における最大速度を翠川・大竹(2003)の

距離減衰式により求め、平均せん断波速度(AVS30)から設定した増幅率を乗じることにより地表での最大速度を算定し、翠川ほか(1999)による経験式を用いて計測震度に換算した。なお、本検討では想定地震として1923年関東地震の再来を想定し、その断層モデル(断層位置、形状など)は日本の地震断層パラメータ・ハンドブックから図1に示すMatsu'ura et al. (1980)のモデルを用いて設定した。

3. 検討結果

図2に250mメッシュと50mメッシュでの表層地盤(微地形区分)を、図3に最大速度の増幅率を示す。50mメッシュでの表層地盤や増幅率は、酒匂川沿いや海岸線沿いの比較的地盤のやわらかい地域の特性を、より自然に近い形で評価できている。図4に関東地震を想定した場合の震度分布図を示す。250mメッシュでは大局的な震度分布しか読み取ることができないが、50mメッシュでは入り組んだ地形に対応した震度分布が得られた。

4. まとめ

本報では、神奈川県小田原市を対象として50mメッシュで微地形区分を行ない、経験式に基づき表層地盤の増幅率を設定し、関東地震を対象とした震度マップを試作し、従来から用いられている250mメッシュでの評価結果と比較した。その結果、50mメッシュで評価することにより、地域の地形に対応した直感的に理解しやすい揺れやすさマップが作成できることを確認した。

筆者らは、小田原地区において常時微動測定やボーリング柱状図の収集も行っており、今後、これらの地盤情報を考慮して増幅率を評価する予定である。

参考文献

- 1) 地震防災マップ作成技術資料：内閣府、平成17年3月、
- 2) 栗山利男・荻本孝久・山本俊雄(2006)：地域の地形に対応した地震防災マップの作成(その1)微地形区分を用いた50mメッシュでの震度マップ、日本建築学会大会(関東)
- 3) 1/50,000土地分類基本調査(地形分類図、地質分類図)「小田原・熱海・御殿場」(神奈川県)
- 4) 藤本一雄・翠川三郎(2003)：日本全国を対象とした国土数値情報に基づく地盤の平均S波速度の推定、日本地震学会論文集、第3巻、3号
- 5) Midorikawa,S., et.al. (1994)：Site Effect of Strong-Motion Records

Earthquake disaster prevention map corresponding to the topography of the area. Part2. Seismic intensity map of 50m-mesh that used small topography classification.

Mitsufumi HASHIMOTO, Toshio KURIYAMA
 Masayoshi TSUTANO, Takahisa ENOMOTO
 Toshio YAMAMOTO

Observed during the 1987-Chiba-ken-toho-oki, Japan Earthq. Eng. Sympo, Vol.3,85-90

- 6) 翠川三郎・大竹雄 (2003) : 震源深さにより距離減衰特性の違いを考慮した地震動最大加速度・最大速度の距離減衰式, 第 11 回日本地震工学シンポジウム
- 7) 翠川三郎・藤本一雄・村松郁栄 (1999) : 計測震度と旧気象庁および地震動強さの指標と関係, 地域安全学会論文集, Vol.1
- 8) 日本の地震断層パラメーター・ハンドブック: 鹿島出版会

本研究は, 神奈川大学における文部科学省学術フロンティア研究プロジェクト「災害リスク軽減を目的としたソフト・ハード融合型リスクマネジメントシステムの構築に関する研究 (研究代表者: 荏本孝久)」の一環として実施したものである。

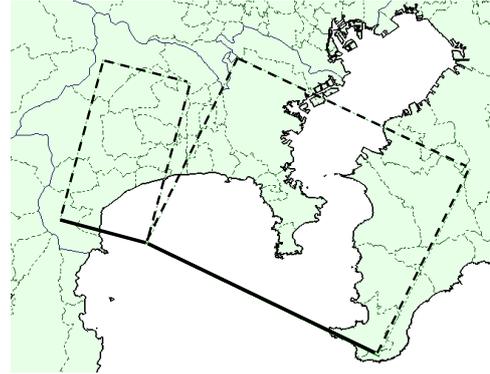


図1 断層モデル (関東地震)

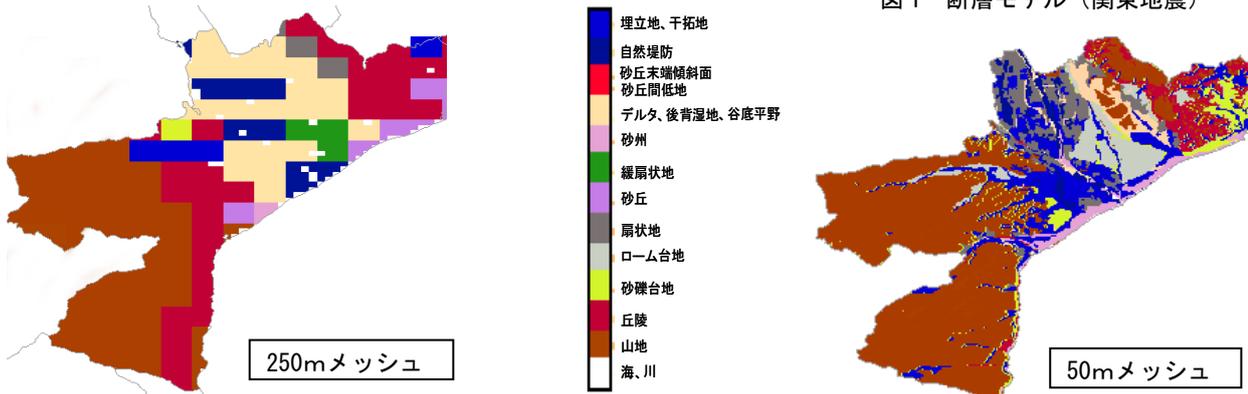


図2 表層地盤 (微地形区分) の比較

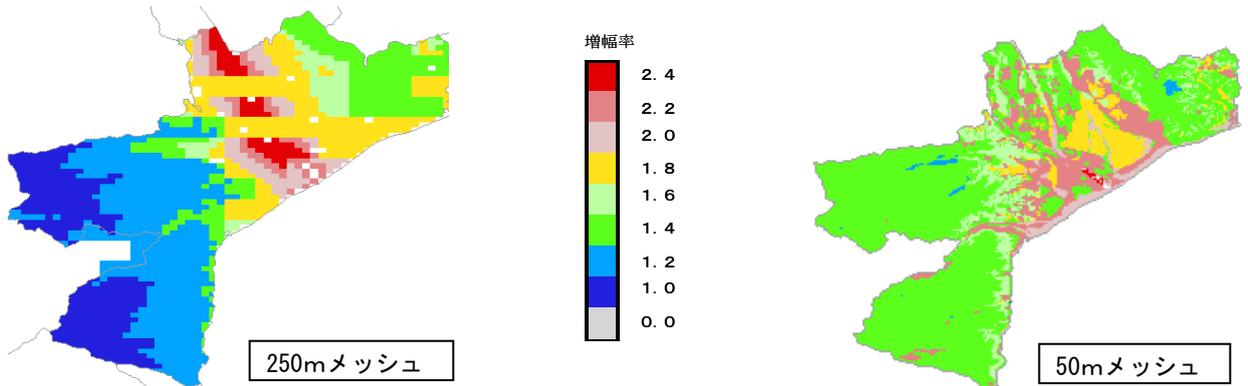


図3 最大速度の増幅率の比較

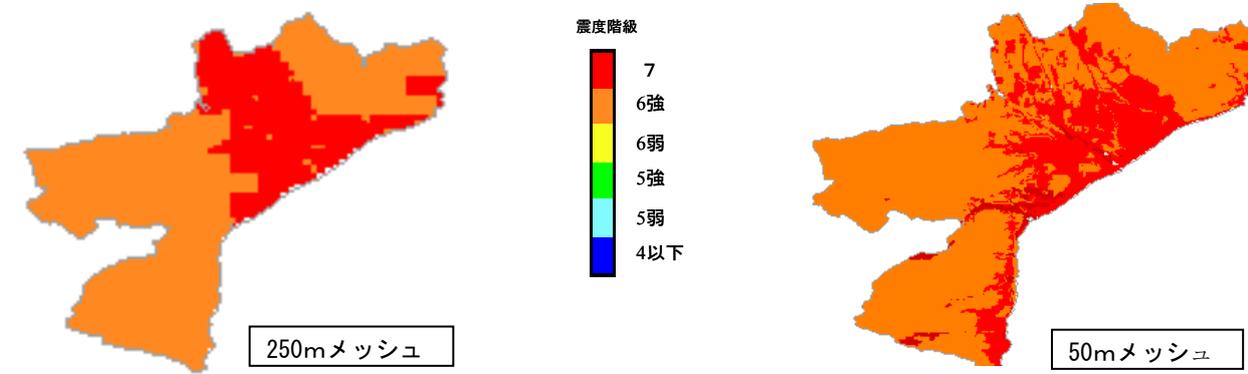


図6 震度マップ (関東地震)

*1 構造計画研究所 防災・環境部 工修
 *2 神奈川大学大学院 工学研究科修士課程
 *3 神奈川大学 工学部 教授・工博
 *4 神奈川大学 工学部 助手

*1 Kozo Keikaku Engineering Inc., M.Eng.
 *2 Graduate Student, Kanagawa University.
 *3 Prof., Dept. of Engineering, Kanagawa University., Dr.Eng.
 *4 Assoc., Dept. of Engineering, Kanagawa University.

光ファイバ分布センシングによるRC曲げ構造物の荷重同定手法の研究

楊克儉¹・荒木秀朗¹・矢部明人¹・呉智深²・李素貞²

¹株式会社 構造計画研究所 耐震技術部 (〒164-0011 東京都中野区中央4丁目5番3号)
E-mail: ykj@kke.co.jp

²茨城大学 工学部都市システム工学科 (〒316-8511 日立市中成沢町4-12-1)
E-mail: zswu@mx.ibaraki.ac.jp

鉄筋コンクリート (RC) 曲げビームの実験に基づいて、光ファイバ分布センシングと歪ゲージ分布センシングの計測データによって実験体の曲げモーメントの同定を行い、光ファイバと歪ゲージの分布センシングによるRC曲げ構造物における曲げモーメントの同定結果の精度を研究した。更に、分布センシングによるRC曲げ構造物の荷重分布の同定手法を開発した。

Key Words : structure health monitoring, flexure reinforced concrete structure, distributed long-gage fiber optic sensors, load identification

1. はじめに

コンクリート橋梁など構造物のヘルスマonitoringに関する研究に、モニタリング計測システムの構築などの研究成果が注目され、そのうち構築されたモニタリングシステムで計測したデータを利用して構造物の損傷状況の推定および荷重レベルの同定が重要である。

本研究は鉄筋コンクリート (RC) 曲げビームの実験に基づいて、光ファイバ分布センシングと歪ゲージ分布センシングによる計測データで実験体の曲げモーメントの同定を行い、その同定結果の精度を検討した。更に、分布センシングによるRC曲げ構造物の荷重分布の同定手法を提案する。

2. RC曲げビームの分布センシング実験

光ファイバ分布センシングシステムのRC構造への適用性を検証するため、図-1 と図-2 に示すように、標準RC曲げビームの実験¹⁾を実施した。

(a) 実験体

図-1 に示す実験体は鉄筋コンクリート造の単純ばりであり、スパンが1800mm、矩形断面が150mm×200mm、引張り主筋が2×φ16、圧縮主筋が2×φ13、主筋断面

中心と梁断面上下縁との距離が40mm、帯筋がピッチ80mmのφ10で配置されている。コンクリートの圧縮強度は $f_c' = 45.6 \text{ N/mm}^2$ 、鉄筋の降伏強度は 380 N/mm^2 である。集中荷重をスパンの真ん中に1/3スパン幅の2点に梁に作用し、荷重制御でゼロから梁破壊まで徐々に負荷し、プッシュオーバー実験を行った。

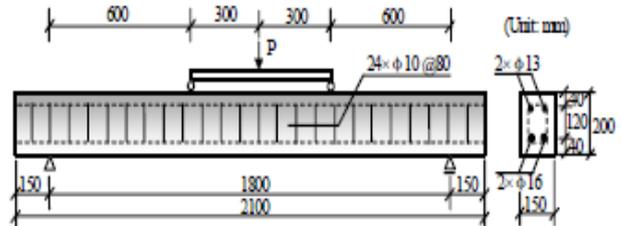


図-1. RC梁の分布センシング実験

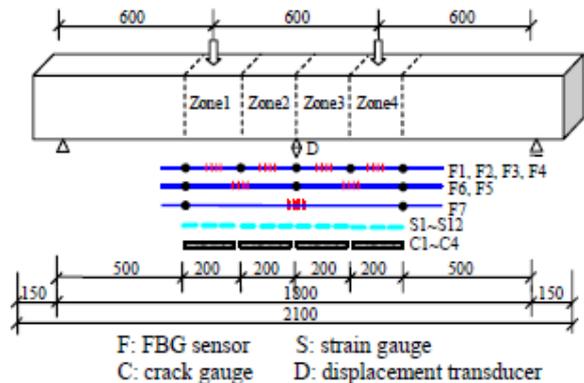


図-2. センシング配置

(b) センシング配置

分布式Long-gageFBGセンサシステムの歪計測機能を検証するため、図-2に示すように梁実験体の底面に4本のゲージ長さ200mmのFBGセンサ (F1,F2,F3,F4) を配置し、このほか、2本のゲージ長さ400mmのFBGセンサ (F5,F6) と1本のゲージ長さ800mmのFBGセンサ (F7) を設置した。また、歪ゲージ (S1~S12) とクラックゲージ (C1~C4) も配置した。

(c) 実験結果とその解析検討

図-3~図-7に示すように、実験結果と有限要素解析²⁾結果と比較すれば、光ファイバ分布センシングと歪ゲージ分布センシングによる計測値における特徴の違いが明白に見える。光ファイバ分布センシングによる計測値はファイバの配置区間の平均歪 (マクロ歪) であり、有限要素法の解析結果とよく一致している。一方、歪ゲージ分布センシングによる計測値は計測点の平均歪であり、弾性領域に有限要素法の解析結果とよく一致しているが、ひび割れが発生した後、各計測点にゲージで計測した歪状態はミクロの視野に入り、連続体の挙動にならなくて、有限要素解析結果と乖離することなどによって、連続体力学の視点で評価しにくくなる。この現象は連続体力学理論に基づく荷重同定の場合もある。

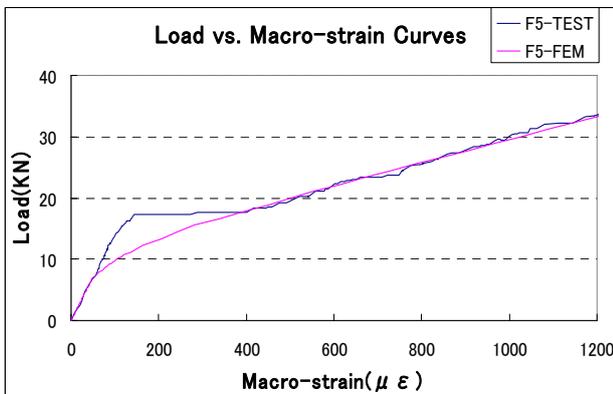


図-3 実験と解析の荷重-平均歪曲線の比較 (F3)

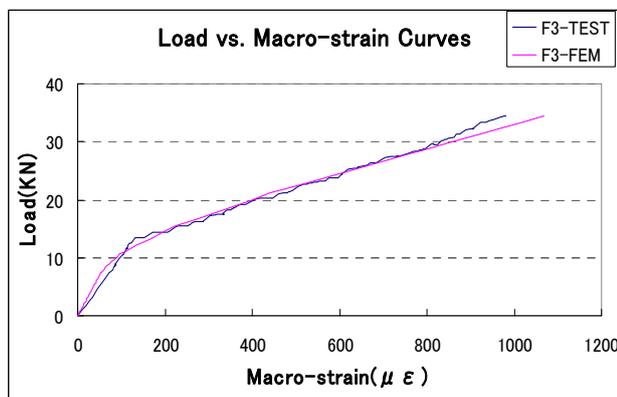


図-4 実験と解析の荷重-平均歪曲線の比較 (F5)

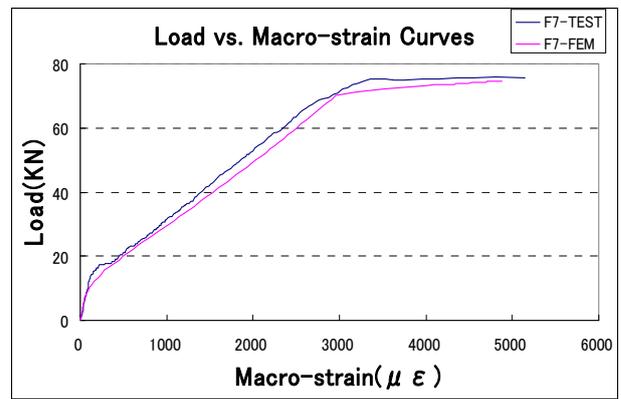


図-5 実験と解析の荷重-平均歪曲線の比較 (F7)

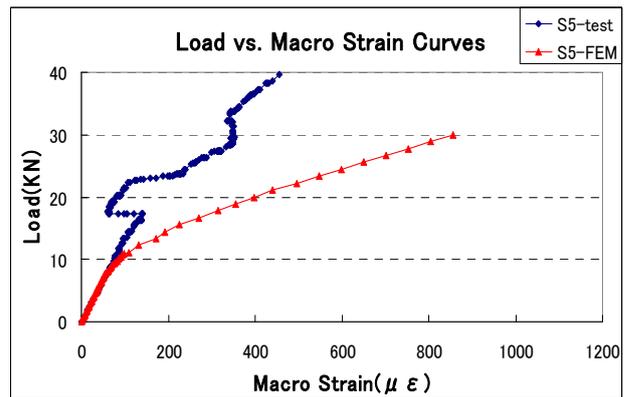


図-6 実験と解析の荷重-平均歪曲線の比較 (S5)

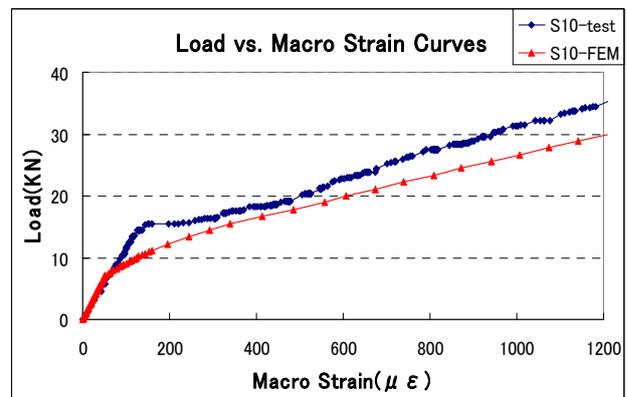


図-7 実験と解析の荷重-平均歪曲線の比較 (S10)

3. 計測歪による荷重モーメントの同定手法

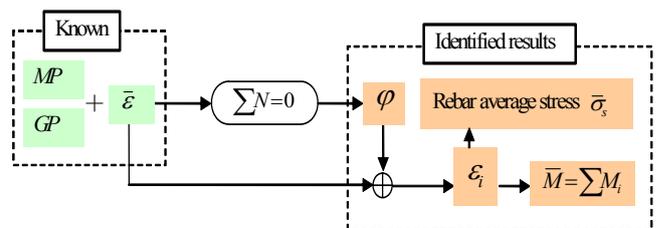


図-8 計測歪による曲げモーメントの同定手法

図-8に計測歪による曲げモーメントの同定手法¹⁾³⁾を

示す。RC構造の材料特性MPと幾何形状GPが既知する場合、計測した構造物底面の平均歪に平面保持仮定と断面の軸力の釣り合い式 $\sum N=0$ を適用すれば、該当断面の曲げモーメント値を以下のようにファイバモデルを利用して算定できる。

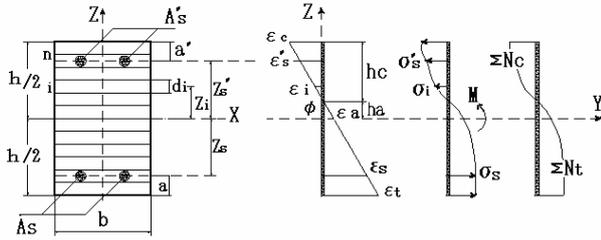


図-9 断面ファイバモデル

図-9にRC曲げ梁断面に断面高さ方向にファイバ要素でメッシュしたとき、歪と応力および軸力の分布状況を示す。 ϵ_i は計測された歪であり、平面保持仮定と断面の軸力の釣り合い式 $\sum N=0$ を利用して下記の手順で ϵ_i から断面モーメントを算定できる。

基本算定式と計算手順：

1) 断面中立軸位置を仮定して幾何関係式(1)(2)と歪算定式(3)(4)で鉄筋歪を計算する。また図-9の歪分布形によって各コンクリートファイバの歪を算出する。

幾何関係式：

$$h_a + h_c = h/2 \quad (1)$$

$$\phi = \epsilon_i / (h/2 + h_a) = \epsilon_a / h_a = \epsilon_c / h_c \quad (2)$$

歪の算定式：

$$\epsilon_s = \epsilon_i (Z_s + h_a) / (h/2 + h_a) \quad (3)$$

$$\epsilon'_s = \epsilon_i (-Z'_s + h_a) / (h/2 + h_a) \quad (4)$$

2) 図-10～図-11と計算式(5)～(6)のRC構造の非線形応力歪関係から鉄筋と各コンクリートファイバの応力を計算する。図上の数値は実験体の材料特性である。

鉄筋応力計算：

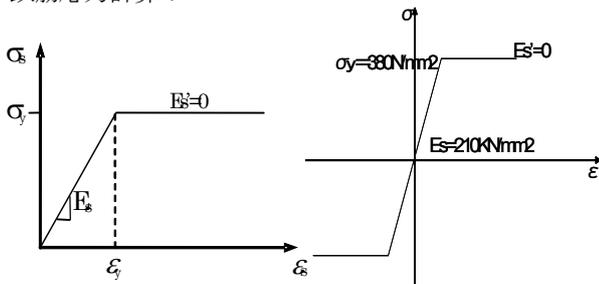


図-10 鉄筋の応力歪関係

コンクリート応力の計算¹⁾：

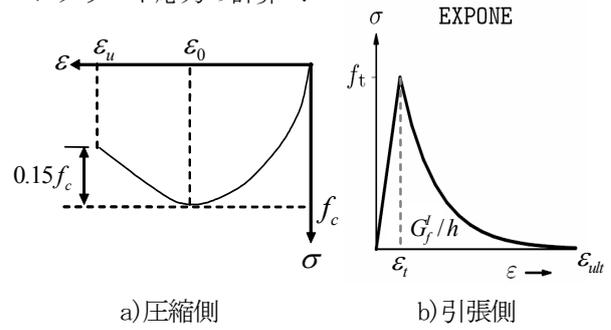


図-11 コンクリートの応力歪関係

図-1の実験体において、 $f_c=45.6\text{N/mm}^2$ $f_t=2.0\text{N/mm}^2$ $E_c=35.1\text{KN/mm}^2$ $\epsilon_u=0.0033$ $\epsilon_0=2f_c/E_c$

下記(5)式は圧縮側におけるコンクリートの応力歪関係式であり、(6)式は引張側におけるコンクリートの応力歪関係式である。

$$\sigma = \begin{cases} f_c \left[\frac{2\epsilon}{\epsilon_0} - \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_0} \right)^2 \right] & \text{if } \epsilon_0 < \epsilon \leq 0 \\ f_c \left[1 + \frac{0.15(\epsilon - \epsilon_0)}{\epsilon_0 - \epsilon_u} \right] & \text{if } \epsilon_u \leq \epsilon < \epsilon_0 \\ 0 & \text{if } \epsilon \leq \epsilon_u \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} \sigma = E \cdot \epsilon & \text{if } \epsilon \leq \epsilon_t \\ \frac{\sigma}{f_t} = \left(1 + \left(c_1 \frac{\epsilon - \epsilon_t}{\epsilon_{ult} - \epsilon_t} \right)^3 \right) \exp \left(-c_2 \frac{\epsilon - \epsilon_t}{\epsilon_{ult} - \epsilon_t} \right) & \text{if } \epsilon_t < \epsilon \leq \epsilon_{ult} \\ -\frac{\epsilon - \epsilon_t}{\epsilon_{ult} - \epsilon_t} (1 + c_1^3) \exp(-c_2) & \text{if } \epsilon > \epsilon_{ult} \\ \sigma = 0 & \text{if } \epsilon > \epsilon_{ult} \end{cases} \quad (6)$$

式(6)において、 $\epsilon_{ult} = \epsilon_t + 5.136 \frac{G_f^I}{hf_t}$

$$G_f^I = 100\text{N/m} \quad C_1=3, C_2=6.93.$$

3) 式(7)～(8)で断面の軸力を計算し、式(9)の釣り合い式に満足しない場合、断面中立軸の位置仮定を調節して手順1)に戻す。式(9)の釣り合い式に満足するならば次の曲げモーメント計算に進む。

断面軸力の釣り合い式：

$$\sum N_c = \sigma'_s A'_s + \sum \sigma_{ci} A_i \quad (7)$$

$$\sum N_t = \sigma_s A_s + \sum \sigma_{ti} A_i \quad (8)$$

$$\sum N_c + \sum N_t = 0 \quad (9)$$

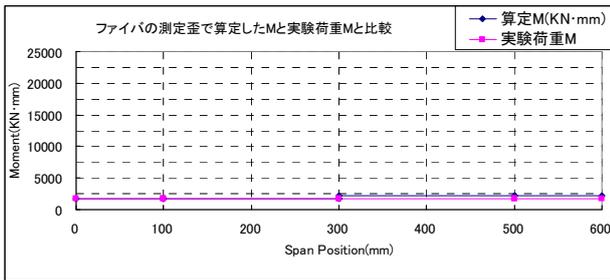
4) 式(10)で該当断面の断面形心に対する曲げモーメントを計算する。

断面形心に対するモーメントの計算式：

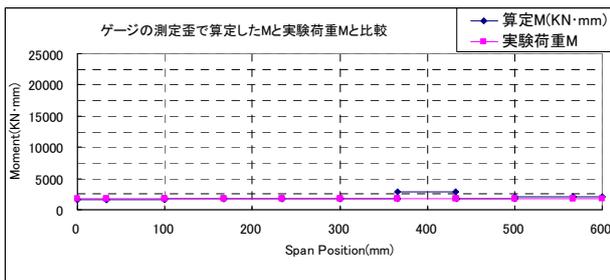
$$\sum M = \sum_{i=1}^n \sigma_i A_i Z_i + \sigma'_s A'_s \left(\frac{h}{2} - a' \right) + \sigma_s A_s \left(\frac{h}{2} - a \right) \quad (10)$$

4. 曲げモーメント同定の結果とその精度検討

上述の曲げモーメント同定手法で図-1の実験体において光ファイバ分布センシングと歪ゲージ分布センシングの計測結果によって同定を行い、図-12~図-16に各代表荷重レベルの測定歪で同定した曲げモーメント値と実験荷重モーメント値との比較を示す。

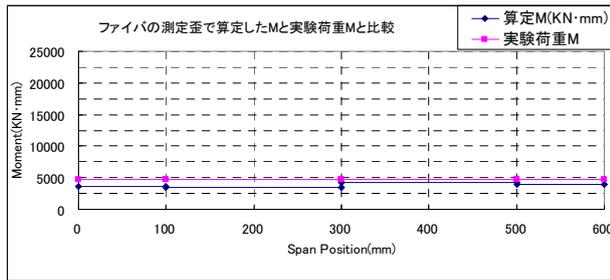


a) ファイバ識別モーメントと荷重モーメントとの比較

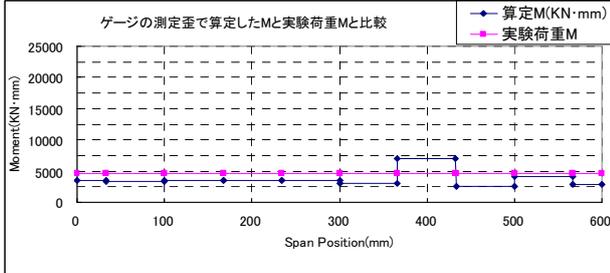


b) ゲージ識別モーメントと荷重モーメントとの比較

図-12 実験荷重モーメント1710.0(KN・mm)



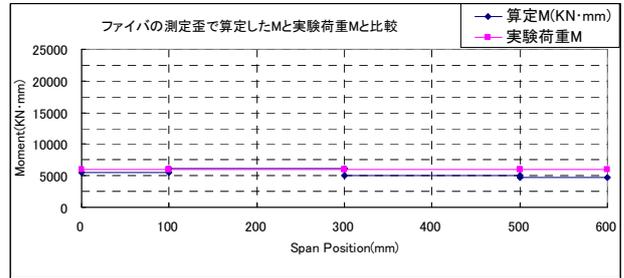
a) ファイバ識別モーメントと荷重モーメントとの比較



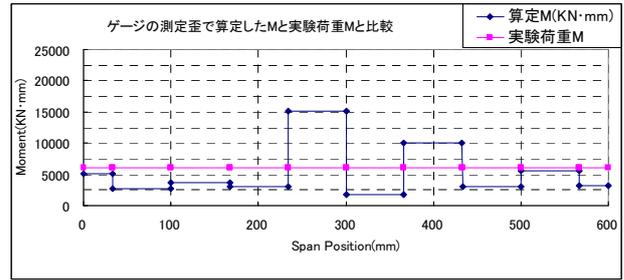
b) ゲージ識別モーメントと荷重モーメントとの比較

図-13 実験荷重モーメント4680.0(KN・mm)

図-2に示すように実験体に中央部の600mm長さのスパンに両集中荷重で負荷し、底面にファイバ分布センシングとゲージ分布センシングを配置した。負荷スパンにおいて曲げモーメントは均一値であり、図-12~図-16に負荷スパンにモーメントの同定結果の分布を示す。

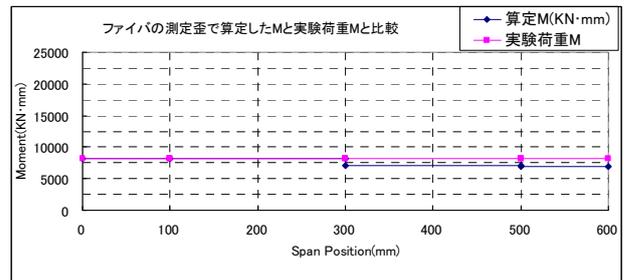


a) ファイバ識別モーメントと荷重モーメントとの比較

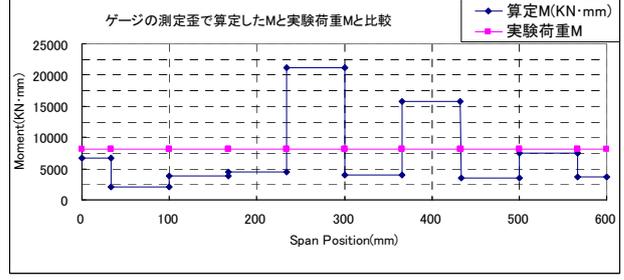


b) ゲージ識別モーメントと荷重モーメントとの比較

図-14 実験荷重モーメント6030.0(KN・mm)

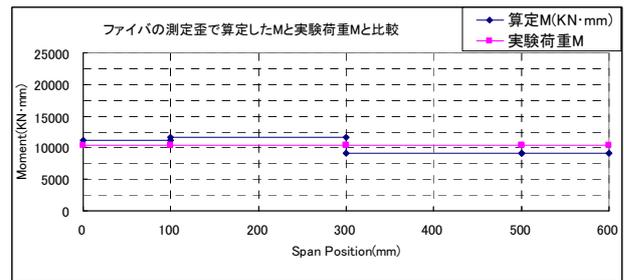


a) ファイバ識別モーメントと荷重モーメントとの比較

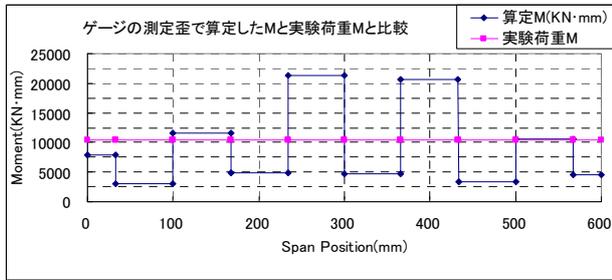


b) ゲージ識別モーメントと荷重モーメントとの比較

図-15 実験荷重モーメント8160.0(KN・mm)



a) ファイバ識別モーメントと荷重モーメントとの比較



b) ゲージ識別モーメントと荷重モーメントとの比較
 図-16 実験荷重モーメント10350.0 (KN・mm)

図-12～図-16に示した荷重レベルは弾性時の1710.0 (KN・mm)、ひび割れ発生による剛性変更時の4680.0 (KN・mm)、ひび割れ進展時の6030.0 (KN・mm)、8160.0 (KN・mm)、10350.0 (KN・mm)の五つである。

図-17に分布センシングで同定した負荷スパン上の曲げモーメントの平均値と実験荷重モーメント値との比の変動曲線を示し、表-1にRC梁の初期状態から破壊までの各荷重レベルにおいて同定結果精度を検討する。

- 1) ファイバセンシング結果による同定結果はばらつきが小さく、実験荷重とよく一致している。
- 2) 負荷スパンにおいてスパン上各点で同定した曲げモーメントの平均値は実験荷重とよく一致している。
- 3) 歪ゲージの測定値は計測点の歪であり、ひび割れ発生後の同定結果がばらつきが相当大きくなるので、歪ゲージ計測結果の生データで曲げモーメントの同定を薦められない。ゲージで分布センシングをやって一定長さの区間の平均値で曲げモーメントの同定を行うほうが良い。
- 4) 図-17に示す実験荷重4000KN・mm～6000 KN・mmの構造剛性変更点あたりに、ファイバとゲージ両方も同定精度がやや落ちる現象が見える。ただ、ひび割れによる構造の剛性変更は瞬間的なことで、通常のモニタリングはこの瞬間状況のデータを計測できないと思われる。
- 5) 第2勾配に入った破壊領域に、ファイバ計測結果による曲げモーメントの同定精度がよい。

よって、光ファイバ分布センシング結果による同定結果はばらつきが小さくて、弾性域と破壊域ともに同定精度がよく、RC曲げ構造物に適することが分かる。

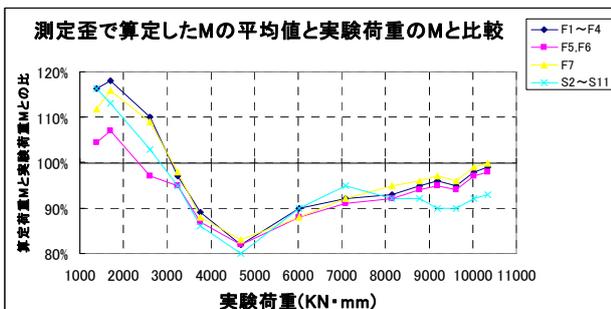


図-17 分布センシングで識別したモーメント平均値と実験値との比の変動曲線

表1. 歪ゲージの測定値とファイバの測定値による荷重同定精度の考察

計測歪の状態	ゲージ計測値による同定		ファイバ計測値による同定	
	識別した荷重平均値と実験荷重との差	実験荷重からのばらつき	識別した荷重平均値と実験荷重との差	実験荷重からのばらつき
	10%~20%	小	0%~20%	小
	0%~10%	中	0%~10%	小
	10%~20%	大	10%~20%	小
	5%~10%	大	5%~10%	小
	10%	大	0%~5%	小

5. 分布センシングによる荷重分布形の同定手法

図-18に同定したモーメント分布に対応する荷重分布形を示す。上述の手法で分布センシングの計測結果によってモーメント分布を同定してから、以下に提案する手法でモーメント分布から荷重分布形を算定できる。

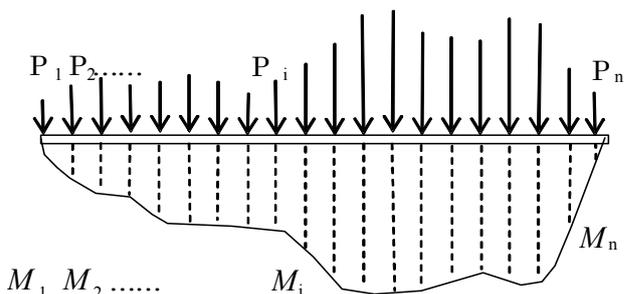


図-18 モーメント M_i 分布に対応する荷重 P_i 分布

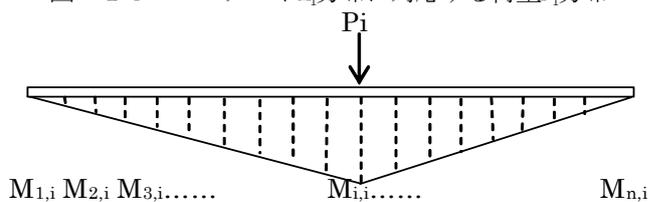


図-19 単一荷重 P_i によるモーメント分布

図-18に示すモーメント $M_1, M_2, \dots, M_i, \dots, M_n$ 分布は荷重 $P_1, P_2, \dots, P_i, \dots, P_n$ 分布に決められるもので、そのモーメント分布は図-19に示す各 P_i によるモーメント分布の線形組み合わせで式(11)のように表せる。

$$\begin{cases} M_{1,1} + M_{1,2} + M_{1,3} + \dots + M_{1,j} + \dots + M_{1,n} = M_1 \\ M_{2,1} + M_{2,2} + M_{2,3} + \dots + M_{2,j} + \dots + M_{2,n} = M_2 \\ \dots\dots \\ M_{i,1} + M_{i,2} + M_{i,3} + \dots + M_{i,j} + \dots + M_{i,n} = M_i \\ \dots\dots \\ M_{n,1} + M_{n,2} + M_{n,3} + \dots + M_{n,j} + \dots + M_{n,n} = M_n \end{cases} \quad (11)$$

ここで、 $M_1, M_2, \dots, M_i, \dots, M_n$ は分布センシングの計測歪から同定された分布モーメントであり、 $M_{i,j}$ は第 i 番荷重 P_i による分布モーメントの値である。

図-19に示すように、各分布モーメント値について、 $M_{1,1}, \dots, M_{1,1}, \dots, M_{n,1}$ は P_1 の線形関数、 $\dots\dots$
 $M_{1,j}, \dots, M_{i,j}, \dots, M_{n,j}$ は荷重 P_j の線形関数、 $\dots\dots$
 $M_{1,n}, \dots, M_{i,n}, \dots, M_{n,n}$ は荷重 P_n の線形関数であるので、 $M_{i,j}$ は以下のように表せる。

$$\begin{cases} M_{1,1} = \alpha_{1,1} \cdot P_1; \dots\dots; M_{i,1} = \alpha_{i,1} \cdot P_1; \dots\dots; M_{n,1} = \alpha_{n,1} \cdot P_1 \\ M_{1,j} = \alpha_{1,j} \cdot P_j; \dots\dots; M_{i,j} = \alpha_{i,j} \cdot P_j; \dots\dots; M_{n,j} = \alpha_{n,j} \cdot P_j \\ M_{1,n} = \alpha_{1,n} \cdot P_n; \dots\dots; M_{i,n} = \alpha_{i,n} \cdot P_n; \dots\dots; M_{n,n} = \alpha_{n,n} \cdot P_n \end{cases} \quad (12)$$

式(12)を式(11)に代入して、荷重 P_i は計測歪で同定した分布モーメント M_i から以下の式(13)で算定できる。

$$\begin{cases} \alpha_{1,1} \cdot P_1 + \alpha_{1,2} \cdot P_2 + \dots + \alpha_{1,j} \cdot P_j + \dots + \alpha_{1,n} \cdot P_n = M_1 \\ \alpha_{2,1} \cdot P_1 + \alpha_{2,2} \cdot P_2 + \dots + \alpha_{2,j} \cdot P_j + \dots + \alpha_{2,n} \cdot P_n = M_2 \\ \dots\dots \\ \alpha_{i,1} \cdot P_1 + \alpha_{i,2} \cdot P_2 + \dots + \alpha_{i,j} \cdot P_j + \dots + \alpha_{i,n} \cdot P_n = M_i \\ \dots\dots \\ \alpha_{n,1} \cdot P_1 + \alpha_{n,2} \cdot P_2 + \dots + \alpha_{n,j} \cdot P_j + \dots + \alpha_{n,n} \cdot P_n = M_n \end{cases} \quad (13)$$

ここに、 M_i は計測歪で同定した分布モーメント値であり、 $\alpha_{i,j}$ は集中荷重の位置と梁スパン値の関数で既知であり、式(13)で荷重 $P_1, P_2, \dots, P_i, \dots, P_n$ を算定できる。

6. まとめ

本研究は分布センシングによるRC曲げ構造物の曲げモーメントと荷重分布形の同定手法を提案し、鉄筋コンクリート (RC) 曲げビームの実験に基づいて、光ファイバ分布センシングと歪ゲージ分布センシングの計測データによって実験体の曲げモーメントの同定を行い、分布センシングによるRC曲げ構造物における同定結果の精度を検討した。

分布センシング結果による同定の精度について以下の結論を得る。

- 1) 光ファイバ分布センシングの計測結果による荷重同定結果は実験荷重と比べればばらつきが小さく、弾性域と破壊域ともに同定精度がよく、RC曲げ構造物に適する。
- 2) 歪ゲージの分布センシングについて、ひび割れ発生後ゲージの測定値による同定結果がばらつきが大きいので、RC曲げ構造物に応用する場合、歪ゲージによる分布センシングにおいて一定区間の平均値で荷重同定を行うことを薦める。

参考文献

- 1) Suzhen LI (李素貞) Zhishen WU (吳智深) and Watanabe TAKUMI (渡辺たくみ), 2006, A health monitoring strategy for RC flexural structures based on distributed long-gage fiber optic sensors, Journal of Applied Mechanics, JSCE (In review)
- 2) Kejian YANG (楊克儉), Hideaki ARAKI (荒木秀朗), Akito YABE (矢部明人), Zhishen WU (吳智深), Suzhen LI (李素貞), 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
- 3) Suzhen LI (李素貞) and Zhishen WU (吳智深), 2007, Parameter and Load Identification for RC Flexural Structures Based on Distributed Long-gage Fiber Optic Sensors, Engineering Structures (In review)

LOAD LEVEL IDENTIFICATION OF FLEXURE RC STRUCTURE USING DISTRIBUTED LONG-GAGE FIBER OPTIC SENSING SYSTEM

Kejian YANG, Hideaki ARAKI, Akito YABE, Zhishen WU and Suzhen LI

In this paper, an experimental investigation for a flexural reinforced concrete (RC) beam based on distributed long-gage fiber optic sensors and strain gauges were carried out. Furthermore, an extended numerical study to identify the load level of the RC structures using static macro-strain measurements from long-gage fiber Bragg grating (FBG) sensors or distributed strain gauges for structural health monitoring (SHM) was performed. A method of load level identification of flexure RC Structure from distributed strain measurements was proposed here.

光ファイバ分布センシングによる RC 曲げ構造物の荷重分布形の同定

株式会社 構造計画研究所 正会員 ○楊 克俊
 株式会社 構造計画研究所 正会員 荒木 秀朗
 株式会社 構造計画研究所 正会員 矢部 明人
 茨城大学 正会員 呉 智深

1. はじめに

本研究は鉄筋コンクリート(RC)曲げビームの実験に基づいて、光ファイバ分布センシングと歪ゲージ分布センシングによる計測データで実験での荷重と荷重分布形の同定を行い、同定結果の精度を検討した。

2. RC 曲げビームの分布センシング実験

光ファイバ分布センシングシステムの RC 構造への適用性を検証するため、図 1 と図 2 に示すように、標準 RC 曲げビームの実験を実施した。

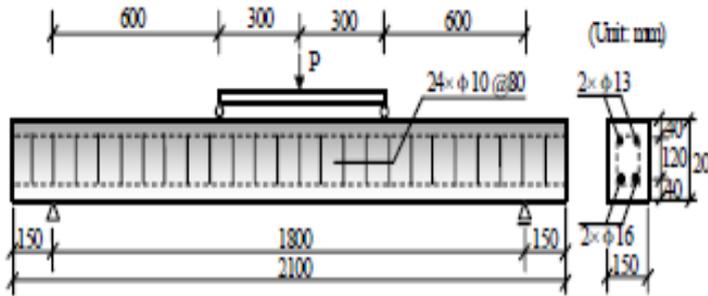


図 1 RC 梁の分布センシング実験

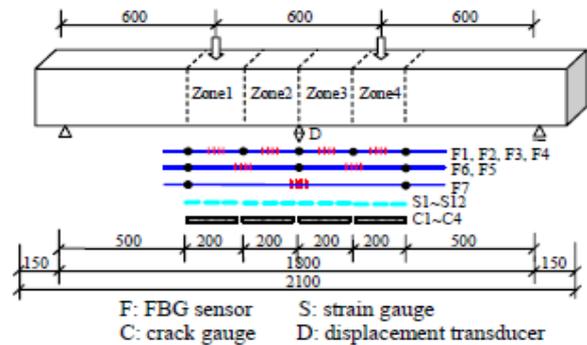


図 2 センシング配置

図 1 に示す実験体は鉄筋コンクリート造の単純はりであり、スパンが 1800mm、矩形断面が 150mm×200mm、引張主筋が 2×φ16、圧縮主筋が 2×φ13、主筋断面中心と梁断面上下縁との距離が 40mm、帯筋がピッチ 80mm のφ10 で配置されている。コンクリートの圧縮強度は $f_c'=45.6\text{N/mm}^2$ 、鉄筋の降伏強度は 380N/mm^2 である。集中荷重を梁スパンの 1/3、2/3 の位置 2 点に作用させ、荷重制御で梁破壊まで徐々に荷重を負荷させる実験を行った。実験体の歪を計測する分布式 Long-gage FBG センサシステムは図 2 に示すように梁実験体の底面にゲージ長さ 200mm の FBG センサ(F1,F2,F3,F4)を 4 本配置した。また、ゲージ長さ 400mm の FBG センサ(F5,F6) 2 本とゲージ長さ 800mm の FBG センサ(F7) 1 本を同様に梁の底面に設置した。なお、FBG センサの歪計測機能を検証するために歪ゲージ(S1~S12)とクラックゲージ(C1~C4)も配置した。

3. 分布センシングの計測歪による RC 曲げ構造物の荷重同定手法

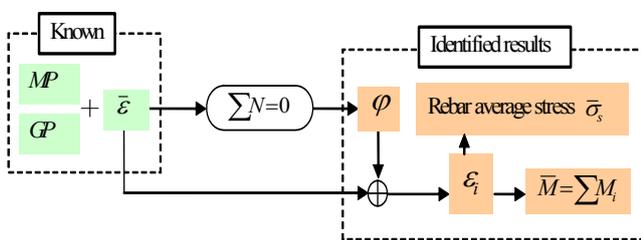


図 3 計測歪による曲げモーメントの同定手法

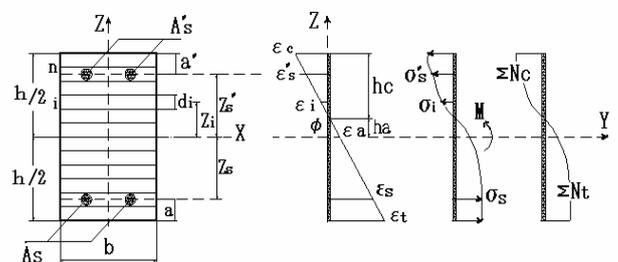


図 4 断面ファイバモデル

図 3 に計測歪による曲げモーメントの同定手法を示す。RC 構造の材料特性 MP と幾何形状 GP が既知する場合、計測した構造物底面の平均歪に平面保持仮定と断面の軸力の釣り合い式 $\Sigma N=0$ を適用すれば、当該断面の曲げモーメント値を図 4 に示すファイバモデルで定式化して算定できる。

キーワード 光ファイバ分布センシング, RC 曲げ構造物, 荷重同定, ヘルスモニタリング

連絡先 〒164-0011 東京都中野区中央 4 丁目 5 番 3 号 株式会社 構造計画研究所 TEL 03-5342-1138

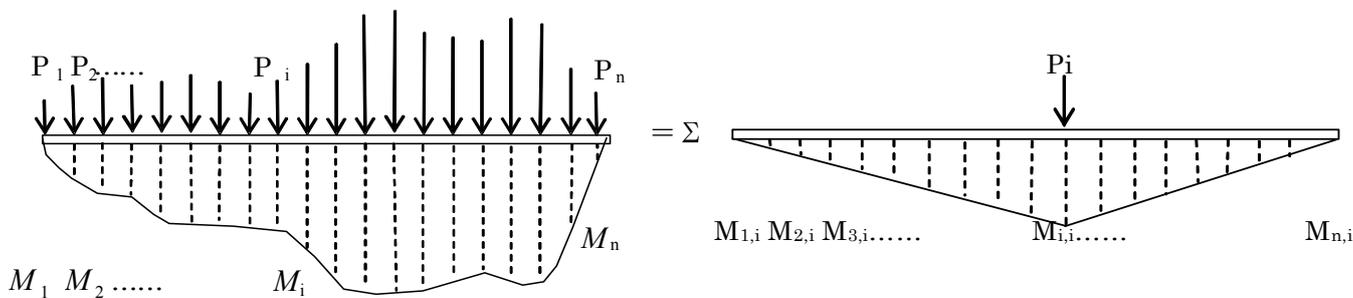


図5 断面曲げモーメントによる荷重分布形の同定手法

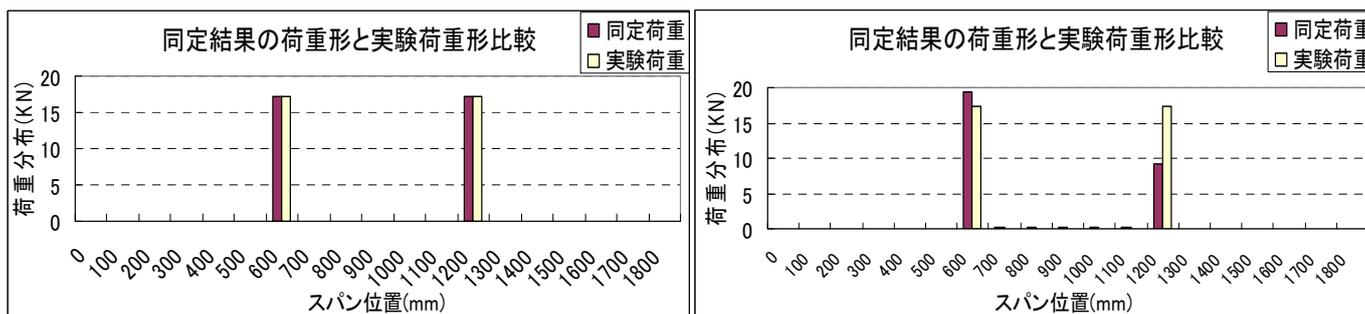
また、図5に示すように断面の曲げモーメントは荷重 P_i によるモーメント分布の累加で表現すれば、モーメント分布から荷重分布形を算定できる。

4. RC 実験における分布センシングの測定値による荷重分布形の算定とその精度検討

RC 実験体の光ファイバ分布センシングおよび歪ゲージ分布センシングの計測データによって荷重同定を行った。代表的な同定結果を表1と図6に示す。表1は実験荷重と同定結果から得られた荷重の比較であり、図6は荷重分布形の同定結果を比較したものである。表1に示すように本手法を使って光ファイバの分布センシングの計測データから同定した荷重値は実験の荷重値とよく一致している。図6に示すように、荷重分布形の比較を見ると、本実験においては長い FBG センサより得られたデータから同定した荷重が比較的精度がよかった。また、実験体破壊前後の弾性域と塑性域における各荷重レベルの同定結果によれば、荷重値の同定精度は実験体の各断面における曲げモーメントの同定精度と概ね同じことが分かった。短い FBG センサでセンシングを行う場合、ひび割れ発生後の測定データのバラツキによって荷重分布形の同定が一様ではなかったため、荷重分布形を算定する前に同定された曲げモーメントの分布形を補完して同定を行った。また、歪ゲージ分布センシングの計測データから荷重同定した結果では、荷重値も分布形も実験荷重と一致しないことが分かった。

表1 FBG ファイバセンシングによる荷重同定結果と実験値との比較

曲げモーメント実験値(KN・mm)	実験荷重(KN)	ファイバF7		ファイバF5~F6		ファイバF1~F4		
		同定荷重(KN)	実験値比較	同定荷重(KN)	実験値比較	同定荷重(KN)	実験値比較	
ひび割れによる剛性変更に前	3240.0	10.8	10.542	97.6%	10.238	94.8%	10.542	97.6%
ひび割れによる剛性変更に後	9630.0	33.0	30.906	96.3%	30.213	94.1%	30.788	95.9%
ひび割れの進展	10350.0	34.5	34.598	100.3%	33.681	97.6%	33.948	98.4%



a) ファイバ F7 の同定結果

b) ファイバ F1~F4 の同定結果

図6 実験荷重=34.5KN 時、同定結果の荷重分布形と実験荷重分布形との比較

5. まとめ

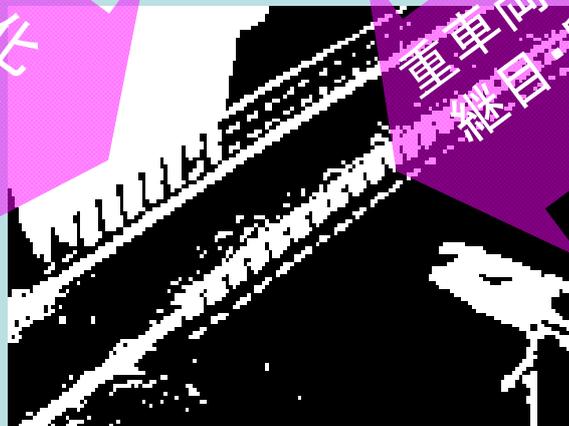
FBG センサの計測歪から載荷荷重の同定を行った。実験より得られた歪から求めた荷重は、載荷荷重とよい一致が見られた。今回の荷重同定では計測長が長いセンサから得られたデータがより実験に近い値を示した。

参考文献

- Suzhen LI, Zhishen WU and Watanabe TAKUMI, 2006, A health monitoring strategy for RC flexural structures based on distributed long-gage fiber optic sensors, Journal of Applied Mechanics, JSCE (In review)
- 楊克儉, 荒木秀朗, 矢部明人, 吳智深, 李素貞, 光ファイバ分布センシングによる RC 曲げ構造物の荷重同定手法の研究, コンクリート構造物ヘルスマonitoring技術に関するシンポジウム論文集, 07年4月

構造物・維持管理 解析エンジニアリングソリューション

～安心・安全を支える技術～

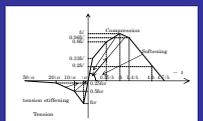
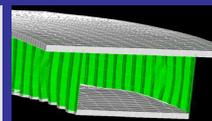
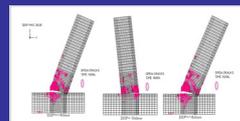


劣化
剥落

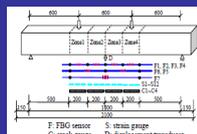
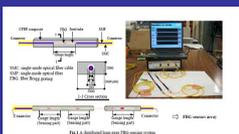
重車両交通
継目 段差

構造物の劣化・損傷による健全度・安全性評価

FEMを用いた破壊シミュレーション
評価システム・アルゴリズムの開発



センサー・制震デバイス配置計画最適化検討

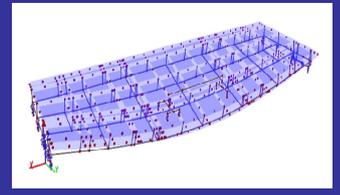


※FBGセンサー最適配置計画は茨城大学との共同研究開発です

FEMによるFBGセンサー配置計画
走行解析によるTMD配置計画

環境振動評価・疲労検討

走行解析による振動レベル評価
FEM、走行解析による累積損傷予測



DALIA

ver 1.00

Dynamic interaction Analysis program for Live load and Any structure

乗り心地性能評価用

車両側デバイスの性能評価用

運行計画

車両側振動

速度依存性

走行振動シミュレーション DALIA

橋梁振動メカニズム

繰り返し応力

環境振動(騒音)問題

繰り返し活荷重による疲労問題

振動抑制デバイス設置計画

モニタリングセンサー設置計画

※本プログラムは応答履歴のみ出力します。評価分析には別途プログラム等が必要です。

☆CSV形式でのテキストデータ書式 各種表計算ソフトが利用可能

☆入力したデータをすぐに確認

3D部材表示機能搭載

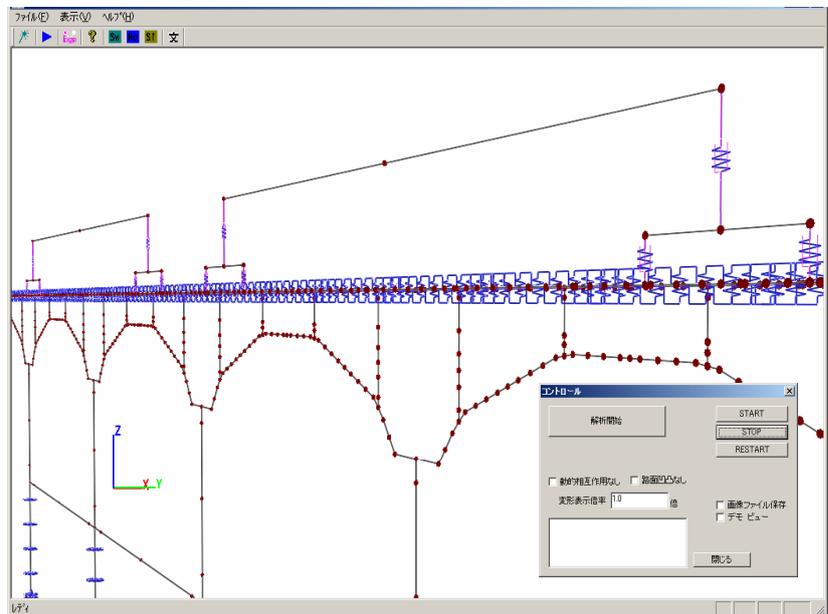
スベック	
パネ	2自由度間パネ
ビーム	材端パネビーム
板曲げ	ミッドリン・ライスナー-8点厚板要素
ソリッド	8点1次立体要素
ダンパー	2自由度間ダンパー
節点数	10000
要素数	10000
構造減衰	レーリー減衰
計算方法	サブストラクチャー法
応答計算方法	ニューマークベータ法による直接積分
固有値解析手法	サブスペース法
データ書式	CSVフォーマット書式
出力	節点: 加速度、変位履歴 要素: パネ、ビーム断面力履歴 その他、固有モード図、応答変位図(BMP)

レンタル価格 (現在の機能のみ)

(予定)

4ヶ月 50万円
1年 100万円

※ 車両情報、軌道狂い等の情報はプログラムに含まれていません



製品・運用環境

製品 プログラム・マニュアル一式をメール及び、専用ダウンロードサイトより配布
 運用環境 機種: IBM PC/AT互換機
 OS: Windows 2000, Xp
 CPU: Pentium III以上推奨 (OpenGL対応グラフィックカードが必要です)
 価格 価格表を参照

取り扱い元: (株)構造計画研究所 〒164-0011 東京都中野区中央4-5-3 耐震技術部 構造保全技術室
 電話: 03-5342-1138 FAX: 03-5342-1236 hozen@kke.co.jp

バラスト・ラダー軌道の 地盤振動特性に関する研究

渡辺勉¹・曾我部正道¹・奥田広之¹・浅沼潔¹・庄司正弘²・島袋ホルヘ²

¹正会員 (財) 鉄道総合技術研究所 鉄道力学研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

E-mail:tsutomuw@rtri.or.jp

²正会員 (株) 構造計画研究所 防災・環境部 (〒164-0012 東京都中野区本町4丁目5-3)

E-mail:shoji@kke.co.jp

バラスト・ラダー軌道は、現在在来線の一部区間に導入実績があり、地盤振動低減効果が確認された事例がある。本研究では、列車走行による地盤振動を解析できる軌道構造と周辺地盤から構成される三次元数値解析モデルを構築し、これまでバラスト・ラダー軌道の導入事例のない新幹線のような高速鉄道の速度域において、地盤振動低減効果を定量的に把握することを目的とした。各種パラメータ解析により、バラスト・ラダー軌道は横まくらぎ軌道と比較して、地盤のせん断波速度が80m/sの軟弱地盤において、振動レベルのオールパス値で、0.7dB～2.4dB程度の地盤振動低減効果を期待できることがわかった。

Key Words: ballasted ladder track, train-induced ground vibration, vibration reduction, dynamic interaction analysis, environmental preservation

1. はじめに

線路方向に高い剛性を有するバラスト・ラダー軌道は、保守省力効果および軌道の高座屈安定性などの長を有することが、これまでの実験などを通じて明らかにされている^{1),2)}。また、在来線に導入された区間において、地盤振動低減効果が確認された事例も見られる。しかしながら、当該軌道の地盤振動特性についてはこれまで定量的な検討は行われておらず、新幹線などの高速列車走行時における地盤振動特性についても未解明であった。定量的な検討が困難となる理由としては、列車走行による地盤振動を解析するためには、ある程度の解析モデル延長が必要となること、地盤振動で一般的に対象とする80Hz程度までの高周波数帯を再現するために詳細なモデル化が必要となることなどにより、大規模な三次元数値解析モデルが必要となること、さらにそのモデルの検証が困難であることが挙げられる。

以上のような背景から、本研究では、以下の内容について検討を行うこととした。

- (1) 高速列車走行による地盤振動を解析できる三次元数値解析モデルを構築し、その妥当性を実物大軌道模型の加振試験および既設在来線における実測結果によって検証を行う。
- (2) 各種パラメータに着目した数値解析によりバラスト・ラダー軌道の地盤振動低減効果の検討を行う。

2. 数値解析モデルの構築

本研究では、地盤と構造物の動的相互作用を解析することができるSuperFLUSH/3Dを用いて数値解析モデルを構築することとした。

(1) 軌道および地盤モデルの構築

構築した解析モデルの概要を図-1に、モデルに用いた要素を表-1に示す。

列車走行によって発生する周辺地盤への振動伝播を評価するためには、ある程度の列車走行距離を考慮できる三次元的な広がりを持つ解析モデルの構築が必要となる。しかし、軌道構造と三次元的な広がりを持つ地盤すべてを有限要素法でモデル化すると、解析自由度が膨大になるとともに、解析時間も長時間となり、実用的な解析モデルを構築することができない。そこで、本研究では、地盤と構造物の動的相互作用解析プログラムSuperFLUSH/3Dを用いて、レール/軌道パッド/ラダーマクラギ（または横まくらぎ）は有限要素法によりモデル化するが、周辺地盤は薄層要素法により層分割し、成層地盤としてモデル化した。これにより、地盤の三次元的な逸散減衰を考慮でき、かつ地盤部分での解析自由度を大幅に減少させることができる。このため、ラダー軌道および横まくらぎ軌道の構造的な違いを詳細にモデル化することができた。なお、さらに解析自由度を減らすため軌道中心から半分をモデル化した1/2モ

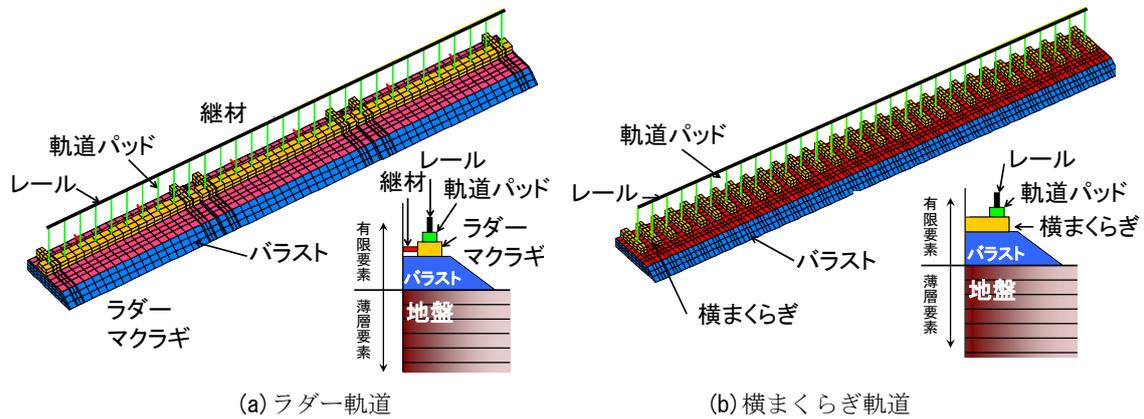


図-1 解析モデルの概要

部材	要素
レール	はり
軌道パッド	ばね
ラダーマクラギ/ 横まくらぎ	シェル (位相差加振) ソリッド (定点加振)
バラスト	ソリッド
地盤	薄層

モデルとした。また、レールの凹凸は考慮していない。

(2) 数値解析手法の検討

SuperFLUSH/3Dは三次元の地盤-構造物連成系モデルの動的相互作用問題をサブストラクチャー法に基づいて解析するプログラムである。本研究では、前述のように軌道構造を有限要素で、地盤を薄層要素³⁾でモデル化し、両者の力と変位の連続性や加振源に対する地盤の応答を薄層要素法による点加振解を用いて評価した⁴⁾。応答解析は複素応答法を用いた線形解析である。

具体的な解析手順は、構築した三次元モデルの軌道上に加振点（レール節点）から地盤の各応答評価位置までの伝達関数を軌道構造-地盤系全体モデルにおける加振解析によって計算する。ここで求めた伝達関数に、軌道加振力の時刻歴データをフーリエ変換したものを掛け合わせるにより、周波数領域での応答が求められる。これをフーリエ逆変換することによって応答評価位置での時間領域での応答が求められる。

(3) 軌道加振モデルの構築

列車走行を再現するために加振点をレール節点上に複数設定し、それらに列車速度に応じた位相差をつけて加振（位相差加振）を行った。ここで、レール上の節点すべてを加振すると解析時間が膨大になる。そのため、解析効率の向上を目的として軌道構造の連続性を考慮して、加振点はレール全節点ではなくモデル中央の一部のレール節点とし、解析上の測定点を地盤上に複数設けておき、位相差加振による各測定点の応答を時間のずれを考慮して足し合わせるによって、列車走行による地盤応答を求めている。具体的には図-2に示すように、加振点Aに対する測定点2の応答 R_{A2} は、加振点Bに対する測定点3の応答 R_{B3} と等しい。すなわち、 R_{A2} と R_{B3} は等し

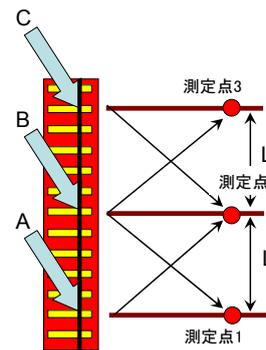


図-2 加振点と応答の関係

くなり、同様に R_{C2} と R_{B1} は等しい。したがって、列車がある速度で $A \Rightarrow B \Rightarrow C$ と進んだときの測定点2の応答 $R_2(t)$ は次の式(1)で表される。

$$R_2(t) = R_{A2}(t) + R_{B2}(t) + R_{C2}(t) = R_{B3}(t - \Delta t) + R_{B2}(t) + R_{B1}(t + \Delta t) \quad (1)$$

ここで、 t は時刻、 Δt は応答評価位置と測定点との列車速度から決まる時間のずれである。

以上の手法によって、横まくらぎ軌道における軌道加振力モデルを構築した。また、ラダーマクラギのユニット長は6.15mで、マクラギ1レールあたりに10締結存在する。したがって、加振点をレール上の節点10箇所位に位相差加振を行い、地盤での応答を時間のずれを考慮して適切に重ね合せれば、ラダー軌道においても時刻歴応答を得ることができる。なお、加振点はバラスト・ラダー軌道に合わせて、横まくらぎ軌道でもレール10節点を加振することとした。

このような手法は、線形応答解析であることを前提としているが、軌道構造-地盤系が線形弾性体とみなせる微小ひずみレベルの振動問題に関しては妥当な手法であると考えられる。

3. 実物大軌道模型による解析モデルの検証

2章で示した数値解析モデルの妥当性を検証するために、鉄道総研構内に実物大の軌道模型を構築し、起振機を用いて定点加振試験を実施した。

(1) 検証試験の概要

軌道構造の概要を表-2に示す。試験供試体を図-3に、起振機の設置状況を図-4に示す。試験は、バラスト・ラダー軌道と同様の試験を横まくらぎ軌道に

表-2 軌道構造の概要

軌道構造	まくらぎ数	レール	締結装置
バラスト・ラダー	3連	60	タイプレート式
PC横まくらぎ	3T×28本	60	102形



図-3 供試体(ラダー)



図-4 加振機

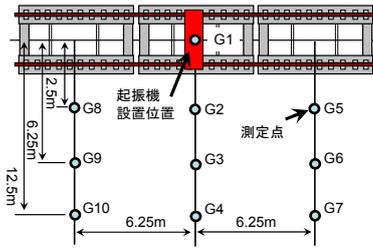


図-5 測定点配置

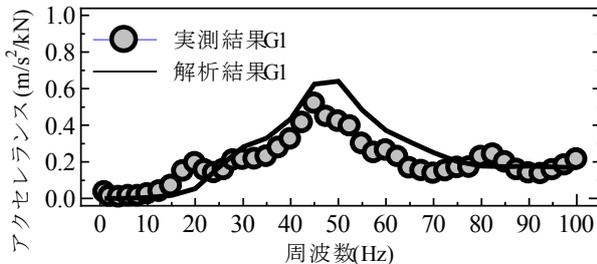


図-6 バラスト・ラダー軌道における実験結果と解析結果の比較

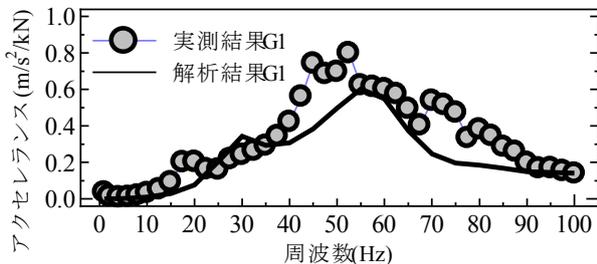


図-7 横まくらぎ軌道における実験結果と解析結果の比較

についても行った。測定点の配置を図-5に示す。

このような試験供試体に対して、レール上に設置した起振機によって、正弦波加振を行った。周波数ピッチは、0.1Hz～100Hzまでの2.5Hz刻みとした。

(2) 解析に使用した材料物性値

解析に使用した材料物性値を表-3に示す。ラダーマクラギ、横まくらぎおよびレールは一般的な値を用いているため省略する。地盤物性値は、ボーリング調査に得られた値を用いて設定し、バラストの変形係数については既往の文献⁵⁾を参考にした。減衰定数は、周波数依存性を考慮して、表-3に示す値とした。

(3) 解析結果

本試験は定点加振であるため、構築した三次元数値解析モデルでは位相差加振はせず、レール1節点

表-3 各種材料物性値

(a) 表層地盤

層種別	V_s (m/s)	単位体積重量 (kN/m ³)	減衰定数 (%)
ローム GL～-1.6m	140	15	表(b)
砂礫/ローム -1.6～2.2m	280	17	5
砂礫 2.2～13m	400	19	2
基盤	400	19	2

(b) ローム層における減衰定数

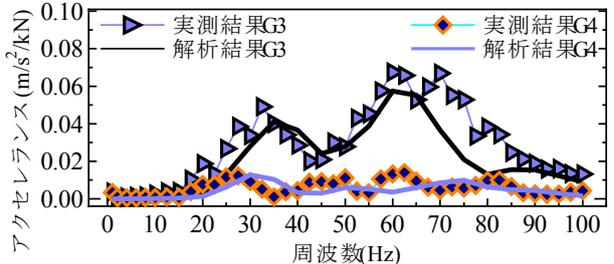
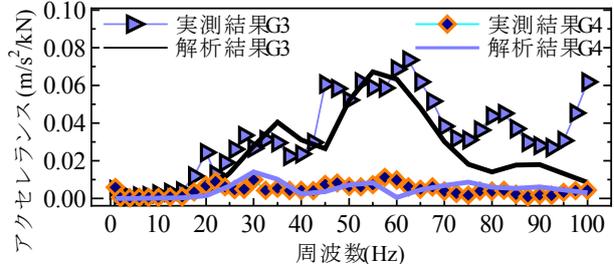
減衰定数(%)			
～25Hz	～50Hz	～75Hz	～100Hz
4	5	5	6

(c) 軌道パッド

鉛直ばね定数 (MN/m)	減衰定数(%)			
	～25Hz	～50Hz	～75Hz	～100Hz
60	0.5	1.5	2.5	3.5

(d) バラスト

変形係数 (kN/m ²)	減衰定数(%)			
	～25Hz	～50Hz	～75Hz	～100Hz
30000	5	10	20	20



を加振する定点加振である。バラスト・ラダー軌道および横まくらぎ軌道の軌道直下G1、6.25m離れG3および12.5m離れG4について、解析結果と実測結果の比較を図-6および図-7に示す。両軌道ともアクセラランスのピーク値およびピーク周波数が概ね一致し、数値解析モデルの妥当性を示すことができたと考えられる。

4. 既設在来線バラスト・ラダー軌道における実測結果による解析モデルの検証

3章と同様に、数値解析モデルの妥当性を検証するために、既設の在来線バラスト・ラダー軌道および横まくらぎ軌道における地盤振動の実測結果と解析結果を比較した。

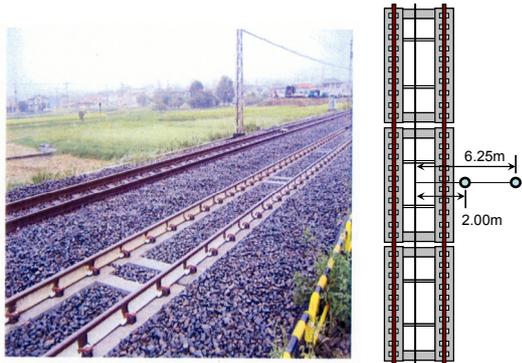


図-8 試験サイトおよび測定点配置の概要

表-4 地盤物性値

深度(m)	土質名	N 値	V_s (m/s)
0.25	表土		
1.00	玉石混じり砂礫	49	292
2.00	同上	49	292
3.00	同上	49	292
4.00	同上	49	292
5.00	同上	50	294
6.00	同上	50	294

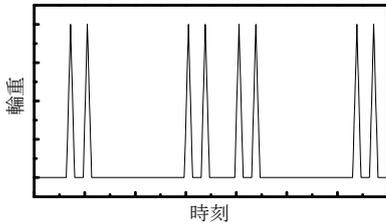


図-9 列車荷重

(1) 検証試験の概要

検証試験サイトの概要および測定点の配置を図-8に、試験サイトの地盤物性値を表-4に示す。当該サイトは、軌道周辺に大きな構造物はなく、地盤は非常に良好である。

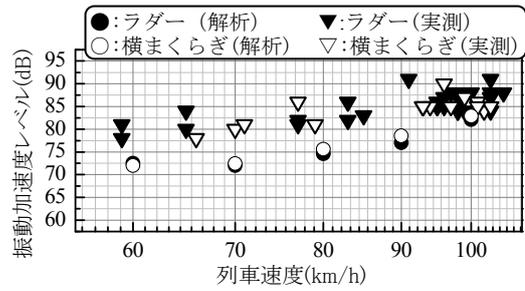
(2) 解析に使用した材料物性値

解析に使用した材料物性値は、一般的な値を用いているため省略する。地盤物性値は、表-4に示すボーリング調査に得られた値を用いた。

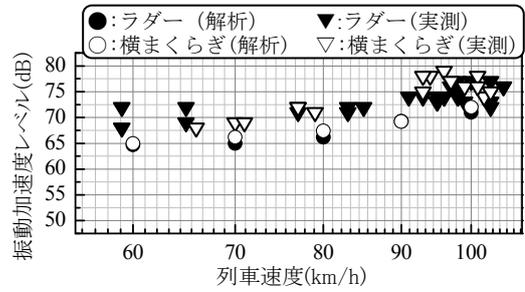
(3) 解析結果

解析での列車速度は、通過列車の実際の速度分布から60~100km/hまで10km/hとし、列車荷重は図-9に示すように三角パルスの非振動系の定荷重列とし、荷重の最大値は通過する列車の重量を参考に平均的な値とした。

軌道中心から2.0m離れおよび6.25m離れにおける振動加速度レベル（人体感覚補正なし）の実測結果と解析結果の比較結果を図-10に示す。同図より、速度に対する振動加速度レベルの増加傾向は再現できているが、解析結果は実測結果よりも全体的に小さくなった。この要因としては、解析ではレールおよび車輪の凹凸を考慮していないこと、車両の動的相互作用を考慮していないこと、当該地盤の特殊性の影響などが挙げられる。これらの影響の評価につい



(a) 2.0m 離れ



(b) 6.25m 離れ

図-10 実測結果と解析結果の比較

ては今後の課題であるが、以上のような結果から、軌道構造が地盤振動に及ぼす影響について一定の評価を行うことができるモデルを構築できたと考えられる。

5. 数値解析による地盤振動低減効果の検討

(1) 検討方法

構築した数値解析モデルを用いて、高速列車走行時におけるバラスト・ラダー軌道の地盤振動低減効果を把握するために各種パラメータに着目して数値解析を行った。解析パラメータを表-5に示す。各種材料物性値は、2章の定点加振解析の値を用いたが、地盤の減衰定数については一律5%とした。軌道中心から12.5m離れの地盤上で得られた応答加速度の時刻歴データをレベル変換し、1/3オクターブバンドごとに振動レベル（人体感覚補正あり）で整理した。なお、本解析では、地盤振動を対象とするため解析周波数は100Hzまでとした。また、以下列車速度270km/h、360km/hを中心に解析を行う。

(2) 列車荷重

荷重列の概要を図-11に示す。列車荷重は、変位制限標準を参考に新幹線荷重における標準列車荷重である輪重80kNとし⁹⁾、波形形状は4章の図-9と同様に三角パルスとし、編成両数は6両とした。

(3) 検討結果

解析パラメータを表-5に示す。パラメータ解析を実施し、地盤のせん断波速度、表層地盤の層厚および列車速度が振動レベルに与える影響について、軌道中心から12.5m離れでの解析結果を示す。合わせて振動レベルのオールパス（以下、A.P.値）も示す。

表-5 解析パラメータ

パラメータ	種別または設定値
軌道構造	バラスト・ラダー軌道 横まくらぎ軌道
地盤のせん断波速度 V_s (m/s)	80, 160, 240 (深さ方向に物性値は一定とする)
表層地盤の層厚(m)	10, 20, 30
列車速度(km/h)	(210), 270, 360

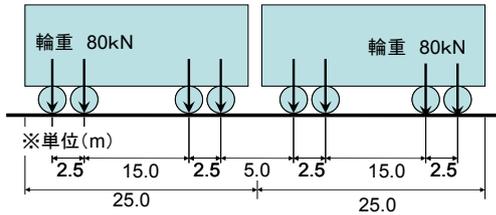


図-11 列車荷重の概要

a) 地盤のせん断波速度の影響

地盤の層厚10m, 列車速度270km/hで地盤のせん断波速度(以下, V_s)を変化させたときの振動レベルを図-12に示す. 地盤が軟弱であるほど振動レベルが大きいことがわかる. 特に16Hz以下の低周波数帯における振動レベルの増加割合が大きい. V_s が80m/sの場合, バラスト・ラダー軌道は8Hz~16Hzで振動低減効果があり, 横まくらぎ軌道に比べA.P.値で2.4dB低減された. V_s が160m/sの場合, バラスト・ラダー軌道は20Hz~50Hzで振動レベルが増加し, 横まくらぎ軌道に比べA.P.値が4.3dB増加した. V_s が240m/sの場合, バラスト・ラダー軌道は20Hz~25Hzで振動低減効果があり, 横まくらぎ軌道に比べA.P.値で0.6dB低減された.

b) 表層地盤の層厚の影響

列車速度270km/h, V_s が80m/sで表層地盤の層厚を変化させたときの振動レベルを図-13に示す. 層厚が増加するとバラスト・ラダー軌道では4Hz以下, 横まくらぎ軌道では8Hz以下の周波数帯における振動レベルが増加した. 層厚増加による低周波数帯における振動レベルの増加割合は, 横まくらぎ軌道の方が大きい.

c) 列車速度の影響

地盤の層厚10m, V_s が80m/sで列車速度を変化させたときの振動レベルを図-14に示す. 列車速度の増加にともなって, 振動レベルのピークが高周波数側に移動した. バラスト・ラダー軌道では, 6.3Hz以下の周波数帯における振動レベルが増加した. しかし, 列車速度270km/hでは8Hz~16Hz, 360km/hでは12.5Hz~40Hzでの振動低減効果があり, 横まくらぎに比べA.P.値でそれぞれ2.4dB, 0.7dB低減された.

地盤の層厚10m, V_s が160m/sで列車速度を変化させたときの振動レベルを図-15に示す. 20Hz~50Hzでバラスト・ラダー軌道の振動レベルが増加し, 列車速度270km/hでは横まくらぎに比べA.P.値で4.3dB, 360km/hについても4.3dB増加した.

地盤の層厚10m, V_s が240m/sで列車速度を変化させたときの振動レベルを図-16に示す. 両列車速度において20Hz~25Hzでバラスト・ラダー軌道に振動低減効果があり, 列車速度270km/hでは横まくらぎ

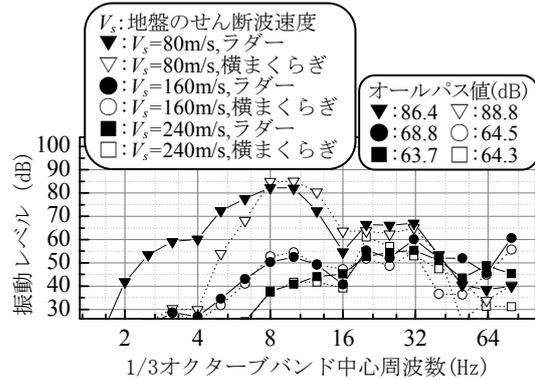


図-12 振動レベルへの地盤のせん断波速度 V_s の影響 (列車速度 270km/h)

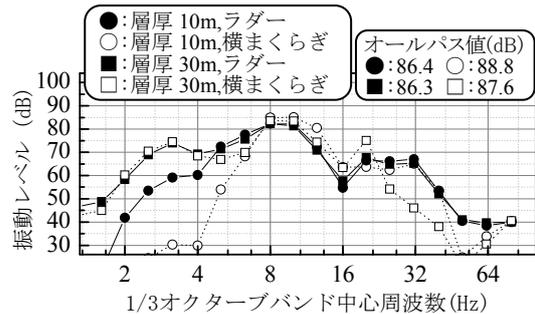


図-13 振動レベルへの地盤層厚の影響 (列車速度 270km/h, $V_s=80$ m/s)

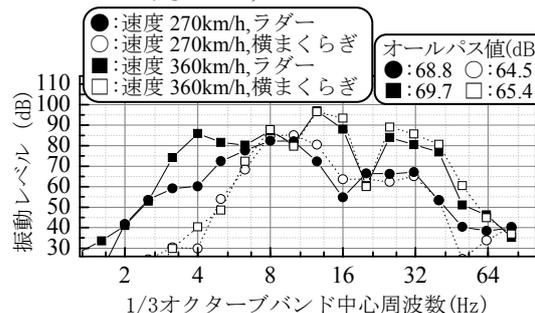


図-14 振動レベルへの列車速度の影響 ($V_s=80$ m/s)

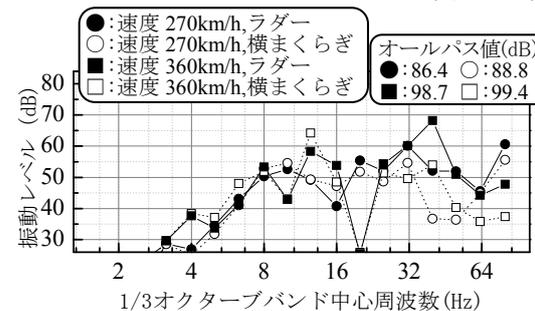


図-15 振動レベルへの列車速度の影響 ($V_s=160$ m/s)

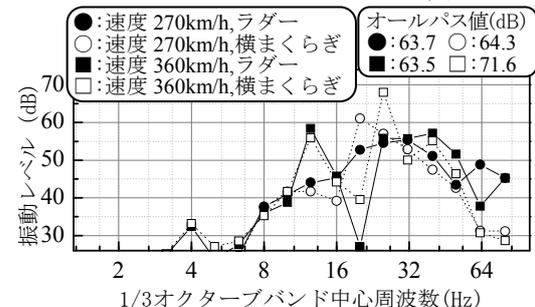


図-16 振動レベルへの列車速度の影響 ($V_s=240$ m/s)

に比べA.P.値で0.7dB, 360km/hで8.1dB低減された.

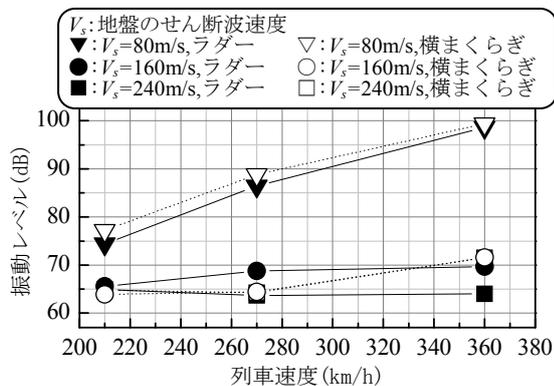


図-17 振動レベルの速度依存性

360km/hの結果についてはさらに精査が必要である
と考える。

d) 総合評価

列車速度と振動レベルのA.P.値との関係を図-17
に示す。地盤条件の中で最も軟弱な V_s が80m/sでは、
振動レベルの速度依存性が大きいことがわかる。こ
のような軟弱地盤では、もともと軌道支持ばね定数
が小さいため、現在軌道での振動対策として広く行
われている軌道の低ばね化による手法では、振動低
減効果が得にくいとされている箇所である。今回の
解析結果より、このような軟弱地盤においてバラス
ト・ラダー軌道は、横まくらぎ軌道に比べて振動レ
ベルが低減されており、軟弱地盤での振動対策軌道
として期待できると考えられる。また、図-13の結
果より、軟弱で層厚が大きい地盤の振動対策として
も有効であると考えられる。

6. まとめ

本研究で構築した三次元数値解析モデルについて、
その妥当性の検証およびパラメータ解析を行った結
果、以下のことが明らかになった。

- (1)実物大軌道模型の加振試験および既設在来線
での実測記録によって、解析モデルの妥当性を検証
し、軌道構造が地盤振動に及ぼす影響について一
定の評価を行うことができる解析モデルを構築で
きたことを示した。
- (2)地盤のせん断波速度 V_s により、バラスト・ラダー
軌道の地盤振動低減効果の得られる周波数帯が異
なることがわかった。
- (3)地盤特性により振動レベルの速度依存性が異
なり、軟弱地盤ほど速度依存性が大きいことがわ
かった。

(2007. 4. 16 受付)

A STUDY ON GROUND VIBRATION OF BALLASTED LADDER TRACK

Tsutomu WATANABE, Masamichi SOGABE, Hiroyuki OKUDA, Kiyoshi
ASANUMA, Masahiro SHOJI and Jorge SHIMABUKU

There are some cases that the ballasted ladder track, which now is used for some conventional lines, has the property that reduces ground vibration. In this study, 3D-numerical model which has track structure and the ground was made. The authors carried out parametric analyses in order to study the property of the ballasted ladder track for the high-speed train induced ground vibration. As a result the ballasted ladder track has the property that reduces ground vibration on soft ground.

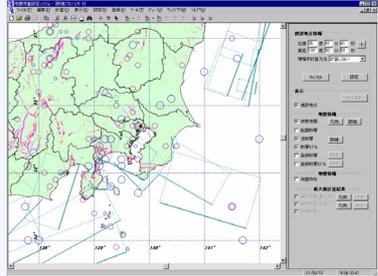
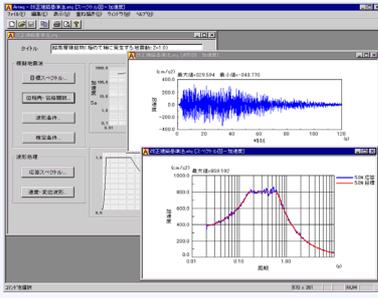
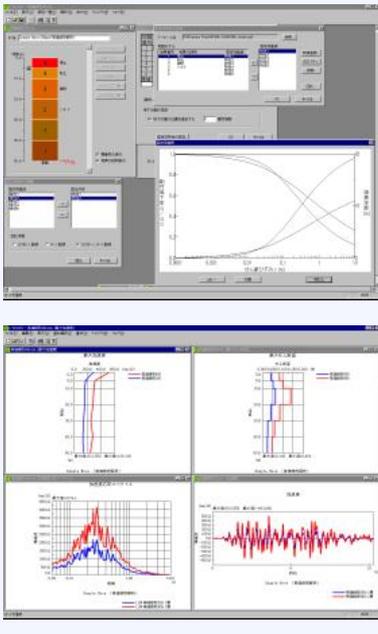
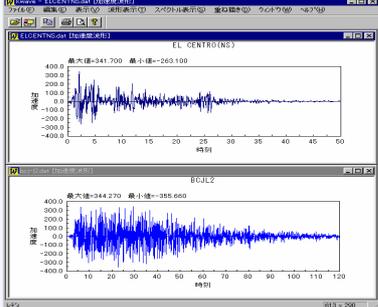
(4)従来の振動対策方法では低減効果が得にくい箇
所とされている地盤のせん断波速度 V_s が80m/sの
ような軟弱地盤において、バラスト・ラダー軌道
は振動低減効果を期待できることがわかった。

今後は、車両と軌道の動的相互作用、車輪および
レール凹凸を考慮できる解析モデルを構築し、解析
精度をより向上させるとともに、ラダー軌道にす
ることによって周波数帯ごとに振動レベルの増減が起
こるメカニズムについて分析を進めていきたいと考
えている。

参考文献

- 1) 浅沼潔, 松本信之, 奥田広之, 涌井一: プエブロ実験
線の重軸重列車走行におけるバラスト・ラダー軌道の耐
久性・保守省力効果, 鉄道総研報告, No.2, pp.45-50,
2002.2
- 2) 浅沼潔, 奥田博之, 松本信之, 涌井一, 富田耕司: バ
ラスト・ラダー軌道の座屈安定性に関する解析的検討,
鉄道総研報告, No.11, pp.41-46, 2006.11
- 3) 田治見宏, 下村幸男: 3次元薄層要素による建物-地盤
系の動的解析, 日本建築学会論文報告集, 第 243 号,
pp.41-51, 1976.5
- 4) 日本建築学会: 入門・建物と地盤との動的相互作用,
pp.113-129, 1996.4
- 5) 村本勝己, 関根悦夫, 蔭関魯: 繰返し荷重を受ける道
床バラストの粒度と強度・変形特性に関する検討, 第
36回地盤工学研究発表会, pp.1185-1186, 2001.6
- 6) 鉄道総合技術研究所編: 鉄道構造物等設計標準・同解説
変位制限, pp.22-26, 2006.2
- 7) 横山秀史, 芦谷公稔, 岩田直泰: 新幹線高速走行時の
地盤振動特性の速度依存性評価法, 鉄道総研報告,
No.1, pp.23-28, 2006.1
- 8) 竹宮宏和, 前河隆太, 児嶋基成: 高速列車下の軌道-地
盤系の2.5D-FEMによる振動予測と制振法の検討, 土木
学会論文集, No.710/I-60, pp.247-255, 2002.7
- 9) 竹宮宏和, 里中修平, 謝偉平: 高速移動加振源による
軌道-地盤系の動的応答と周辺地盤への伝播特性, 土木
学会論文集, No.682/I-56, pp.299-309, 2001.7
- 10) 竹宮宏和, 陳鋒, 島袋ホルヘ: 高架高速列車走行に対
する沿線地盤振動対策: 基礎梁とWIBの複合基礎によ
る減振法, 鉄道力学論文集, 第10号, pp.31-36, 2006.7
- 11) 阿部和久, 加藤宏輝, 古田勝: 地下鉄周辺地盤にお
ける波動の伝播特性, 鉄道力学論文集, 第9号, pp.43-48,
2005.7

設計用入力地震動作成システム

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：1,890,000 円</p>	<p>耐震設計のため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地震情報データベースやユーザが登録した断層・断層モデルから検索し、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。</p> <p>建設地点での最大振幅計算や再現期待値計算、断層の拡がりを考慮した翠川・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</p> <p>フル機能版：1,050,000 円 建築限定版：735,000 円 土木限定版：525,000 円</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。</p> <p>目標スペクトルは、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、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>また、位相特性は一樣乱数のほか、実地震記録による位相特性の利用が可能です。</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</p> <p>フル機能版：840,000 円 基本機能版：525,000 円 非線形機能版：525,000 円</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</p> <p>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。歪依存特性は、ユーザが任意に登録した特性のほか、告示1461号の特性、土木研究所の式等を選択することが可能です。</p> <p>■非線形解析機能(オプション)</p> <p>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、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。応力～歪関係としては Ramberg-Osgood モデル、Hardin-Drnevich モデルを選択できるほか、線形として扱うことも可能です。</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：210,000 円</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。</p> <p>処理結果として出力された図について、軸の調整および線種や色、タイトル等を簡単に編集することが可能です。また、外部出力機能として、テキスト形式でのデータ出力およびクリップボードへのコピー機能を有しています。</p>	

設計用入力地震動作成システム

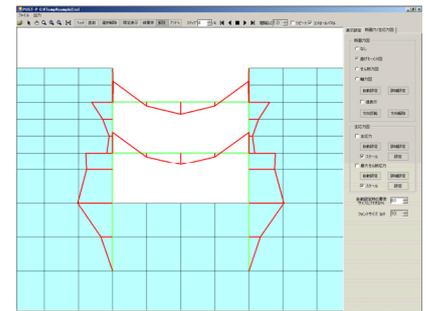
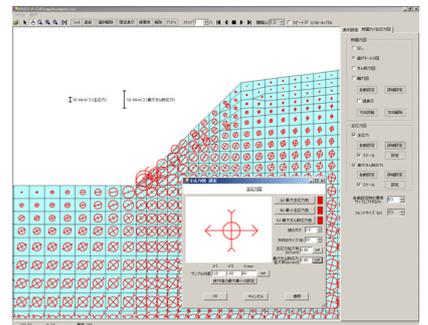
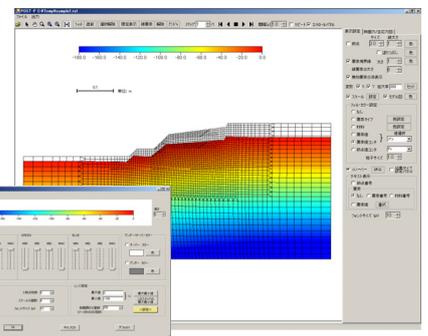
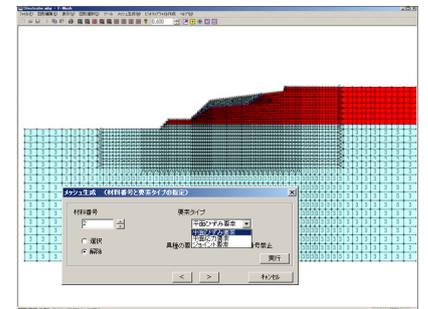
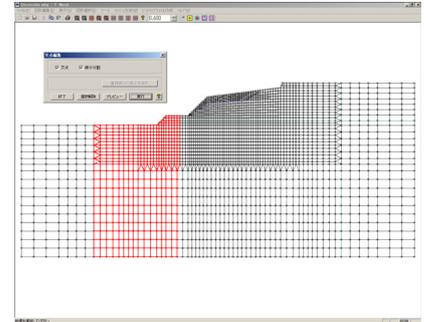
二次元有限要素法の統合解析システム

FRONT for Windows

FRONT for Windowsは、地盤に関する様々な変化を予測する統合解析システムです。

◆特長◆

- 1) 二次元有限要素モデルの作成～解析～結果の図化をWindows上で容易に行うことができます。
- 2) 必要な機能のプログラムのみを組み合わせ導入できます。
- 3) 有限要素法による静的・動的解析
掘削・盛土などの施工過程を考慮した地盤の安定問題
地盤と構造物の相互作用を考慮した動的挙動解析
交通や機械などから発生する振動の影響評価解析



◆構成プログラムの紹介◆

有限要素モデルの作成プログラム

—— F- Mesh for Windows

二次元有限要素モデルを作成することができます。DXF形式のCADデータより、形状をインポートすることもできます。

地盤の掘削・盛土を考慮した静的解析プログラム

—— EXAP for Windows

建物基礎、地下構造物、トンネルの掘削工事に伴う周辺地盤の挙動を解析することが可能です。

地盤・構造物連成系の動的解析プログラム

—— SuperFLUSH/2D for Windows

杭基礎建物、地中構造物、ダムなど、地盤・構造物連成系の動的解析を行います。地震応答解析、地震時安定解析の他、機械振動、交通振動による応答解析も可能です。

すべり安全率・すべり変形量の算出プログラム

—— POST- S for Windows

斜面の安定解析を行います。渡辺・馬場の方法による残留すべり計算にも対応しています(オプション機能)。

解析結果図化プログラム

—— POST- P for Windows

変形図、主応力図、断面力図の作成を行います。応答値のコンタ図表示、動画再生が可能です。

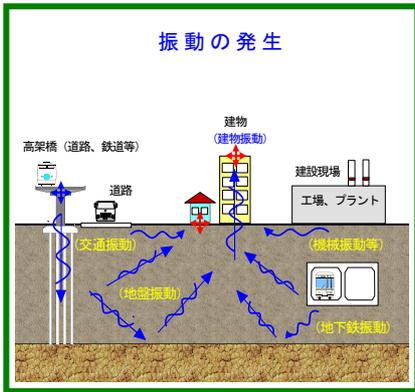
FRONTシステムのプログラム以外の解析結果も図化を行うことができます。

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

■SuperFLUSH/2D for Windowsは(株)構造計画研究所と(株)地震工学研究所の共同開発商品です。

環境振動の影響評価

コンサルティングサービス



環境振動とは？

自動車や列車等の走行時に発生する交通振動、工場での大型機械稼働時に発生する機械振動、建物内部で発生する床振動等、地盤、建物を介して我々が日常感じる振動は環境振動と呼ばれます。

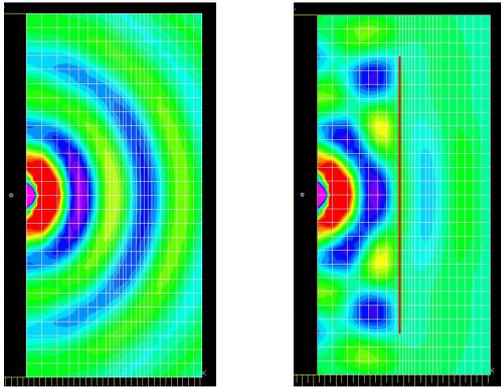
近年、高速・大量輸送に適応するため、道路の拡張や列車の高速化が行われるに従い、幹線道路の沿道や鉄道沿線に近接する住居からの苦情などが多くなる傾向にあります。

弊社では、これまで培ってきた地盤と構造物の相互作用解析のノウハウを基に、交通振動、機械振動の影響評価解析や振動対策工法の提案等のコンサルティングサービスを提供しています。

列車振動解析事例

目的：列車振動の低減を目的に施工された鋼矢板による振動対策工の効果を解析的に検証する。

解析手法：3次元モデルによる加振解析
加振源：列車軌道位置

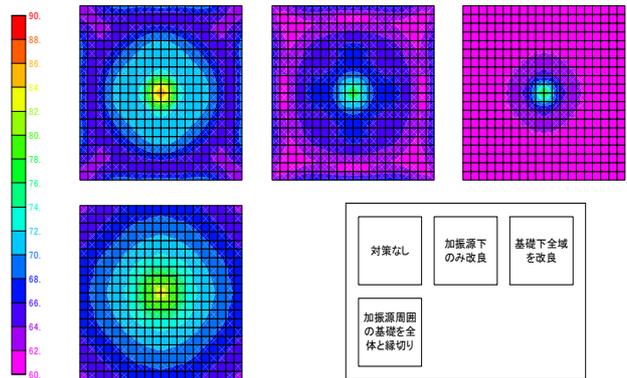


対策前 対策後
地表面での振動伝播性状

機械振動解析事例

目的：工場内で稼働する機械による振動に対し、基礎下の地盤改良を行った場合の振動の伝播性状の相違を解析的に検討する。

解析手法：3次元モデルによる加振解析
基礎マット：20m×20m、厚さ20cm
加振源：基礎マットの中心



基礎マット表面の鉛直方向加速度レベル(10Hz)

走行車両と橋梁の相互作用振動シミュレーション技術の紹介

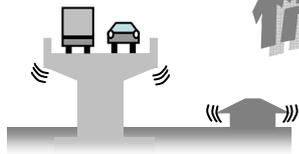
構造計画研究所
KOZO KEIKAKU ENGINEERING Inc.

放っておけない

橋のゆれ

※1

環境振動シミュレーター
がお役に立ちます



お問い合わせ先

株式会社構造計画研究所 耐震技術部 構造保全技術室

〒164-0011 東京都中野区中央4丁目5番3号

TEL. 03-5342-1138

E-mail. hozen@kke.co.jp

http://www4.kke.co.jp/kaiseki

- ・振動低減対策工検討に
- ・モニタリング計画時のセンサー取り付け位置検討に
- ・調査段階、設計段階での不快振動予測に
- ・点検調査計画時の検討に
- ・疲労損傷箇所予測の検討に
- ・その他 車両側の振動、橋梁活荷重の検討にもお使いいただけます

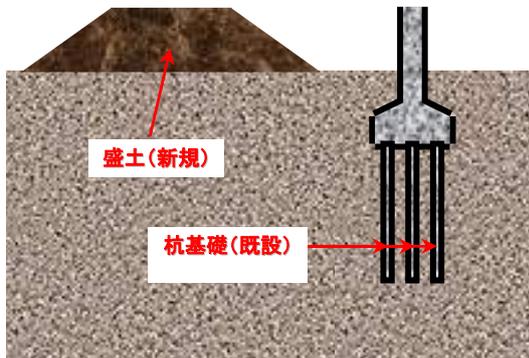
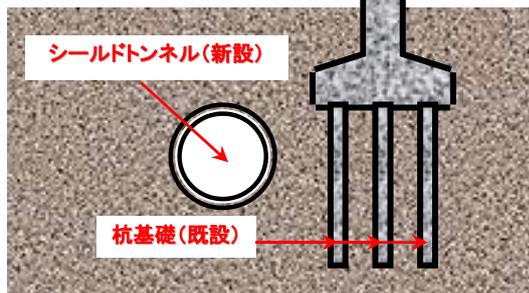
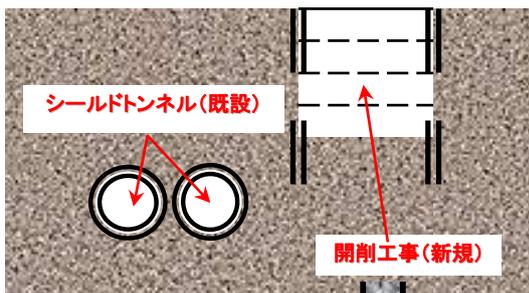
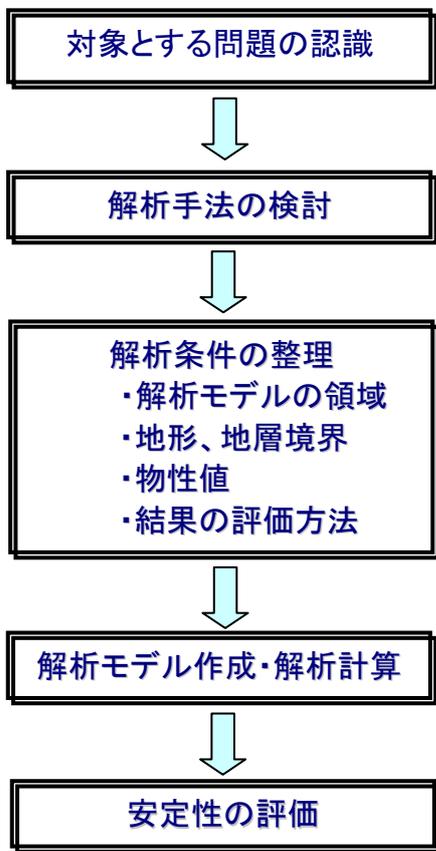
※1 環境振動シミュレーターは、日本技術開発(株)と(株)構造計画研究所が共同開発したプログラムです。現在、茨城大学・日本技術開発(株)との共同研究で使われています。

近接施工影響解析

コンサルティングサービス

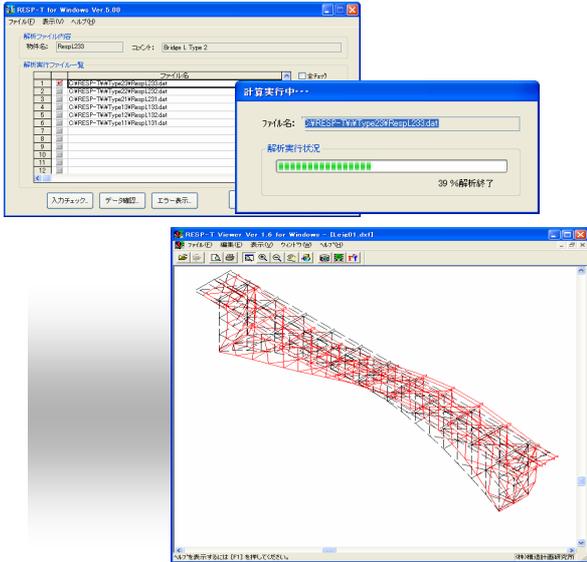
開削工、基礎工、トンネル、盛土等の施工において、地盤の変形に伴う近接構造物等への影響予測解析を行います。

<解析の流れ>



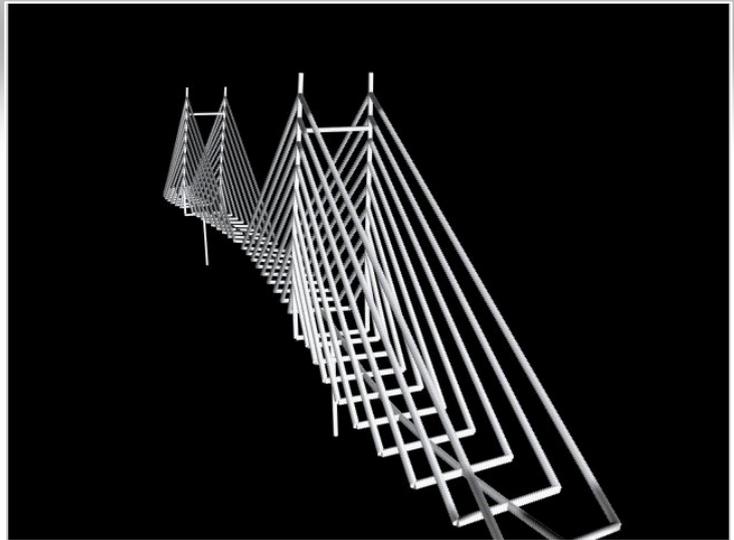
骨組構造物の汎用非線形解析プログラム

RESP-T for Windows



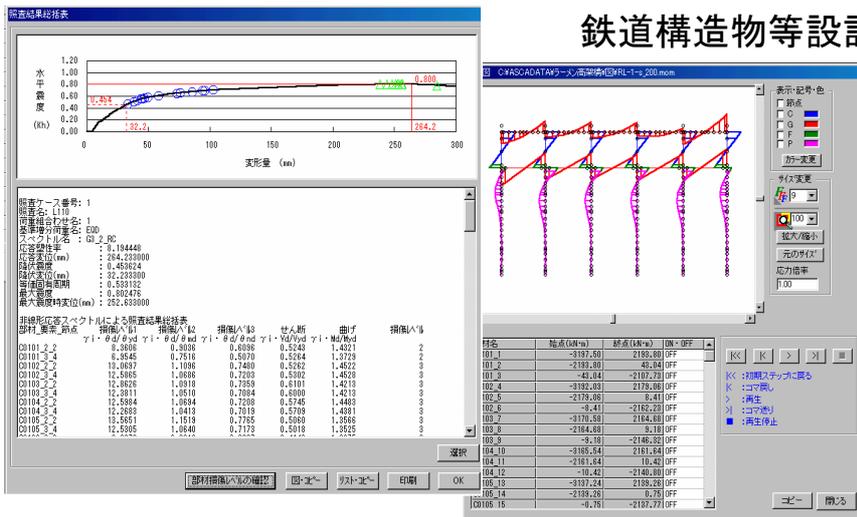
非線形問題、動的問題を
高解析機能でカバー！

- 3次元任意形状骨組モデル対応
- 静的／動的／固有値／座屈固有値解析
- 弾塑性／幾何学的非線形
- 各種の免震制振機構にも対応



鉄道構造物等設計標準・同解説

耐震設計編に準拠！



- Windows対応
- 静的非線形解析
- 所要降伏震度スペクトル
- 地盤応答変位解析
- 部材の損傷レベルによる耐震性能チェック
- テトラリニア対応

鉄道構造物等の耐震性能照査プログラム

ASCARS

Assessment Program for Seismic Capacity of Railway Structure

ASCARS は(財)鉄道総合技術研究所と(株)構造計画研究所の協同開発商品です。

5 段積みパレット・ラックの地震による落下・転倒解析

川上 誠¹⁾

1) 株式会社構造計画研究所 耐震技術部

1. はじめに

地震による被害は建物のみならず、その中に設置された設備・機器・装置・架台等の被害も地震以後における社会基盤の維持や企業の事業継続性の観点から重要視されている。この背景から、本報告では段積みされた硝子パレット・ラックが地震を受けた場合の落下・転倒の可能性を検討するために、有限要素法により解析した結果について記すものである。なお、解析には汎用の有限要素法解析プログラムADINA¹⁾を適用した。

2. 解析の対象

解析の対象とした硝子パレット・ラックの段積み状況を写真1に示す。このパレット・ラックは、箱形断面軽量型鋼(柱:40 x 40 x t2)で構成された立体フレーム構造であり、一段分の大きさは高さ 0.8m、短辺 0.7m、長辺 1.1mである。1段当たり約 300kgの積載硝子が固定装置を介してフレームに固定されている。このパレット・ラックが5段に積み上げられて倉庫内のコンクリート床上に置かれている。その積み上げ方法は(図1b参照)、各段の柱脚底面にある下向き凹型鋼製パーツがその下段の柱頭上面にある上向き凸型鋼製パーツの上に単純に乗るように積み上げられ、ボルト等で結合されてはいない。



写真1 硝子パレット・ラックの段積み状況

3. 解析の方法

図1に、解析モデルの全体(図1a)および各部(図1b)の詳細を示す。解析モデルは倒れやすい短辺方向振動を対象として2次元モデルを設定した。

ラックフレームの柱と梁はBEAM要素(図1中の黒い太線)でモデル化した。柱の上下端部の凹型パーツと凸型パーツはBEAM要素と2次元ソリッド要素でモデル化し、両者の接触対面には摩擦接触計算モデルを設定した。摩擦接触計算モデルとは、両接触表面が接触している場合は幾何学的整合性を保ちながら圧縮力と摩擦力(摩擦係数は0.3)を伝達しながら運動するが、両接触表面が離れる場合は力を伝達せず両パーツは独立に運動することを可能にする計算モデルである。

床は変形しない剛体とし、1段目柱脚の下向き凹型鋼製パーツ部材を逆T字型BEAM要素でモデル化し、摩擦接触計算モデル(摩擦係数0.4)を適用して自重下で接地させた(静的初期状態)。

図1中の柱梁で囲まれた網目部分は積載荷物を表現しているが、計算上は無質量・無剛性のダミー要素であり、積載荷物の質量は各段フレームの周囲4箇所のコーナー位置に集中質量として均等配置した。

部材はすべて線形弾性材料(鋼のヤング係数、ポアソン比)を仮定した。

外乱荷重は重力加速度および地震荷重である。地震荷重は、1995年神戸海洋気象台における実記録波(図2a:南北方向最大加速度818gal、図2b:鉛直方向最大加速度315gal)を選び、その変位時刻歴を解析モデルの床位置に強制変位として負荷した。減衰は臨界減衰比2%相当の初期剛性比例減衰を考慮した。

計算は、まず自重下における静的平衡状態を解いた後、これを初期状態として動的応答計算を行った。動的計算法には直接時間積分法(Newmark法、 $dt=0.001$ 秒)を、非線形平衡式計算にはニュートン法を、それぞれ適用した。

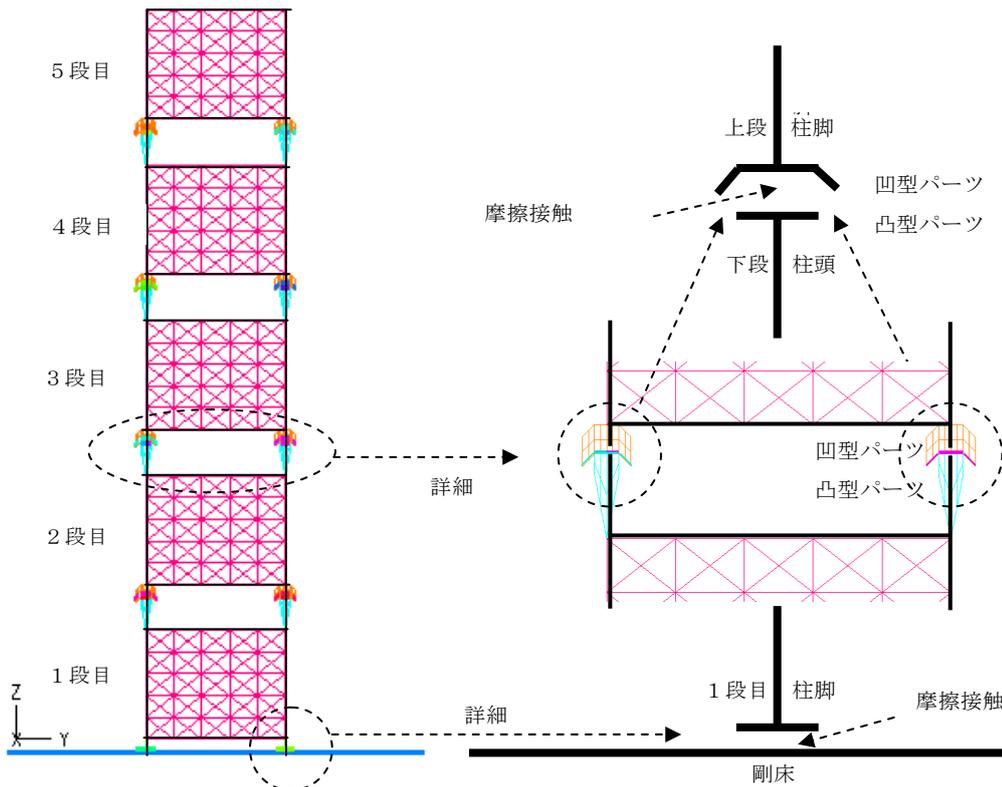


図 1 a 解析モデル (全体)

図 1 b 解析モデル (部分詳細)

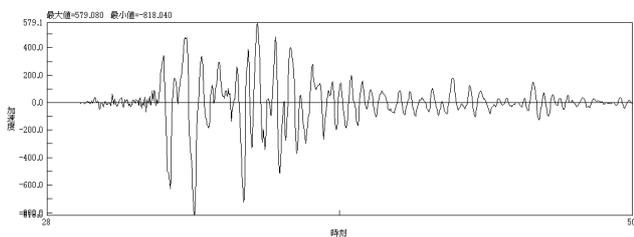


図2a 1995年神戸海洋気象台、南北加速度 (GAL)

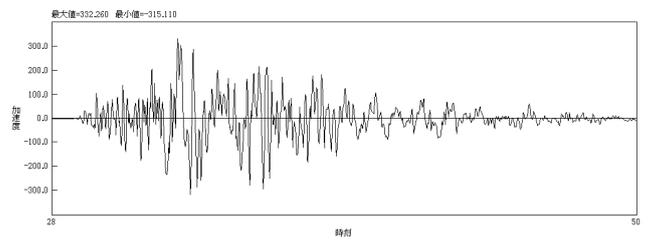


図2b 1995年神戸海洋気象台、鉛直加速度 (GAL)

4. 解析の結果

図 3 に、段積みの接合が外れ最上段が落下を開始するまでの経過を示す。地震入力の経過に伴い、段積み相互は柱脚/柱頭の接触パーツ部において微少な変位内での反発・分離・衝突を伴う振動応答挙動を示す。この挙動を繰り返しながら、入力地震が最大変位を示す時刻 (33.5 秒) 付近において、最上段が上方に突き上げられ大きな変位で宙に浮くことにより柱脚/柱頭の接触パーツ部が外れ、最上段の落下が始まる。

最上段頂点における加速度時刻歴を、図 4 に示す。入力地震が最大変位を示す時刻 (33.5 秒 : 図中の \blacktriangledown) において、水平右向き約 0.8G と同時に上向き 2G の加速度が発生しており、これにより最上段が浮き上がった。その後、 -1 G の鉛直加速度が見られ、最上段が重力により自由落下することがわかる。

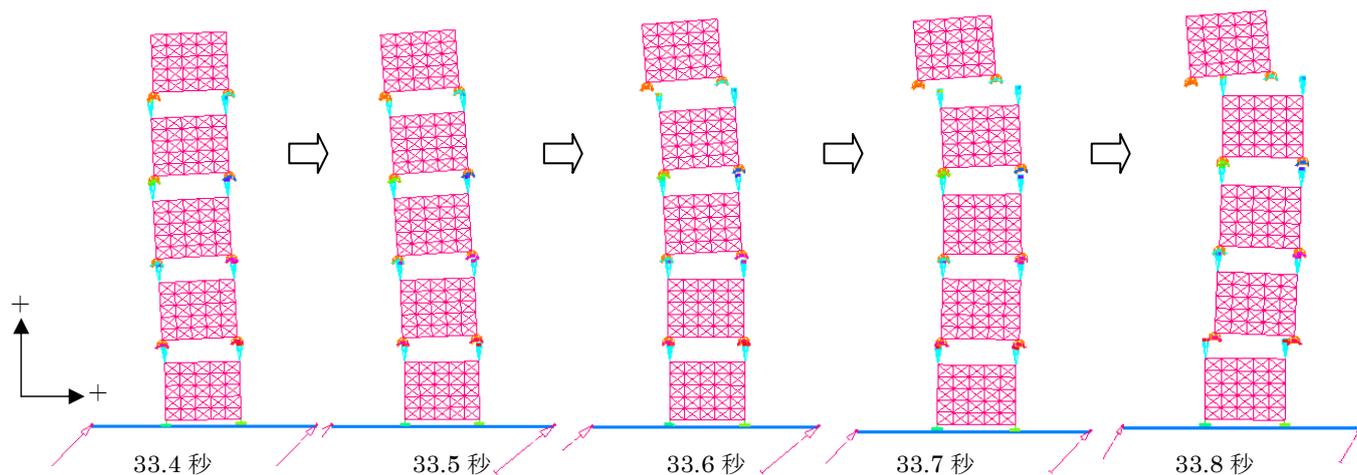


図3 段積み相互の反発・分離・落下の経過

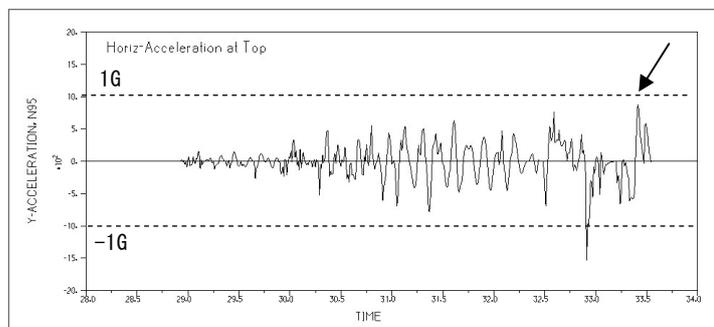


図4a 最上段頂点における 水平 加速度時刻歴

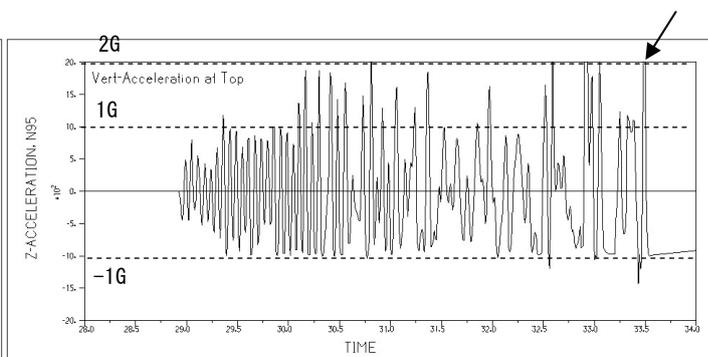


図4b 最上段頂点における 鉛直 加速度時刻歴

7. まとめ

荷物を積載する段積みパレット・ラックを対象として地震応答解析を行い、段積みの落下・転倒の可能性を検討した。

ラック部材間に摩擦接触計算モデルを適用した時刻歴応答計算を行うことにより、段積み相互の反発・分離・落下の挙動をシミュレートできることを確認した。

入力地震動が最大変位を記録する時刻付近において、最上段に上向き2Gの加速度が発生することにより最上段が浮き上がり、落下を開始する。

参考文献

- 1) ADINA R&D, Inc.: ADINA Theory and Modeling Guide, Report ARD06-7, 2006

謝辞

本検討を行うに当たり、旭硝子株式会社様には多大なご協力と貴重なご助言をいただきました。ここに厚く御礼申し上げます。

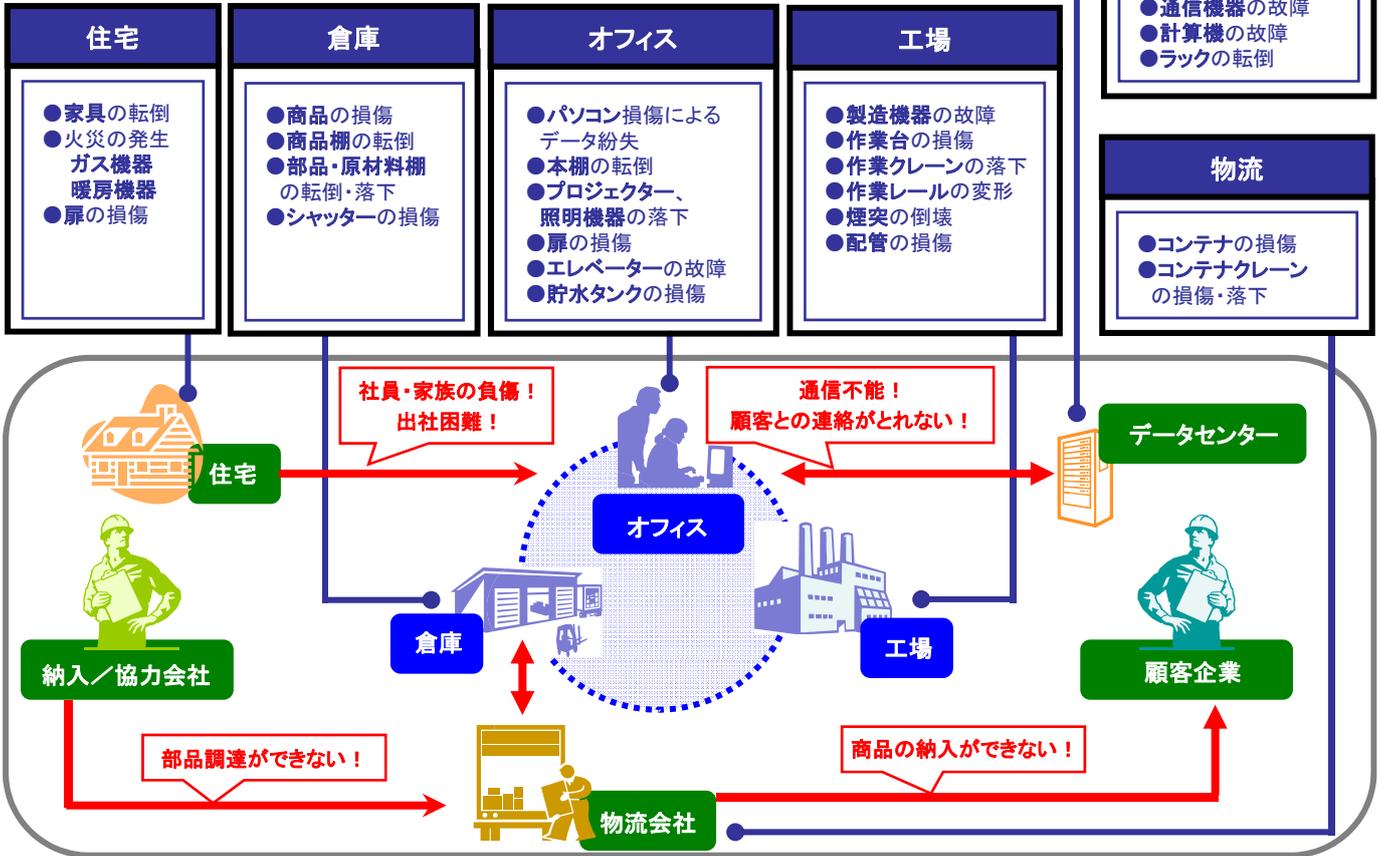
設備・機器・家具・什器の耐震解析コンサルティングサービス

近年、日本国内では被害地震が相次いで発生し、建物の耐震化が急速に進んでいます。しかし、一方で設備機器や商品などの建物内の収容物に対する耐震対策は遅れているのが実状です。建物が健全であったとしても収容物が機能しないことによる被害は深刻です。実際に、製造設備やサーバの稼働停止といった数多くの被害が発生しています。これらの被害を最小限にとどめるために建物内の収容物の耐震安全性について検討する必要があります。

株式会社構造計画研究所では、豊富な建築・土木構造物の耐震解析実績と最新の地震に関する解析技術をもとに、お客様の目的に合った設備機器や商品などの耐震解析コンサルティングサービスをご提供いたします。

<p>背景</p> <ul style="list-style-type: none"> ●相次ぐ地震被害による社会的関心の高まり <p>社会的要請</p> <ul style="list-style-type: none"> ●BCP (事業継続計画) ●CSR (企業の社会的責任) 	<p>検討課題</p> <ul style="list-style-type: none"> ●顧客の安全性の確保 ●従業員の安全性の確保 ●経済損失の低減 ●事業の継続／早期復旧 ●ステークホルダーに対する信頼性の向上 	<p>耐震解析コンサルティングの目的</p> <p>□設備を運用されている事業者様</p> <ul style="list-style-type: none"> ●地震によって想定される被害の把握とその対策検討 ●ステークホルダーに対するアピール <p>□設備メーカー様</p> <ul style="list-style-type: none"> ●自社商品の信頼性の向上 ●顧客に対するアピール ●実験と解析シミュレーションの併用による製品開発のコスト低減
--	---	--

■想定される被災事例



□問題点の的確な把握と最適なソリューションのご提案

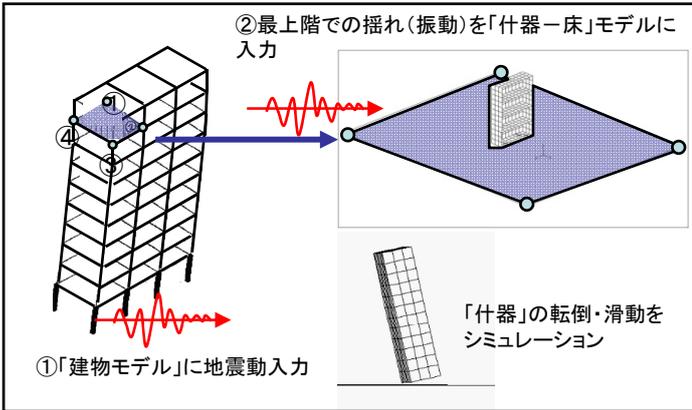
検討にあたっては、まずお客様のかかえる問題点やご検討の目的を十分にヒヤリングさせていただいた上で、最適な解析手法・モデル化手法をご提案いたします。

■耐震検討事例

□什器の転倒・滑動シミュレーション

オフィス内での什器（本棚等）の転倒・滑動（すべりによる移動）をシミュレーションした事例です。

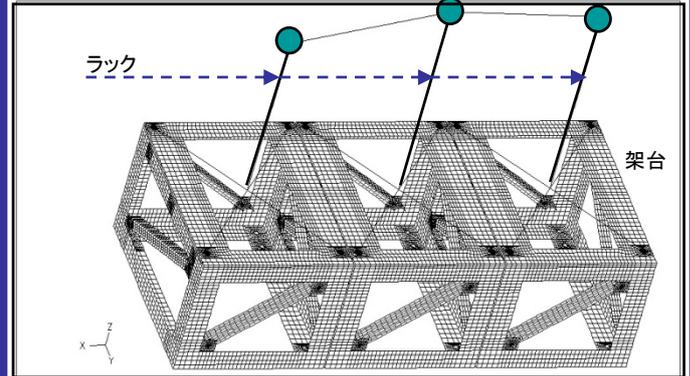
地震の揺れは、建物の構造やフロアによって異なります。事例では、まず建物全体を地震動で揺らし、次に最上階で得られた揺れ（振動）を用いて、什器の転倒・滑動について検討を行いました。



□通信機器ラック・架台の耐震検討

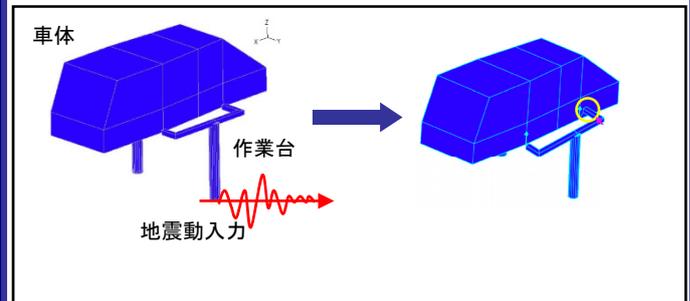
通信機器を搭載したサーバーラックの架台が地震によってどのような損傷を受けるかを検討した事例です。

架台の挙動に着目し、ラックは簡略化したモデル化を採用しています。目的にあった最適なモデル化・解析手法を用います。



□生産ライン上に設置された車体の落下検討

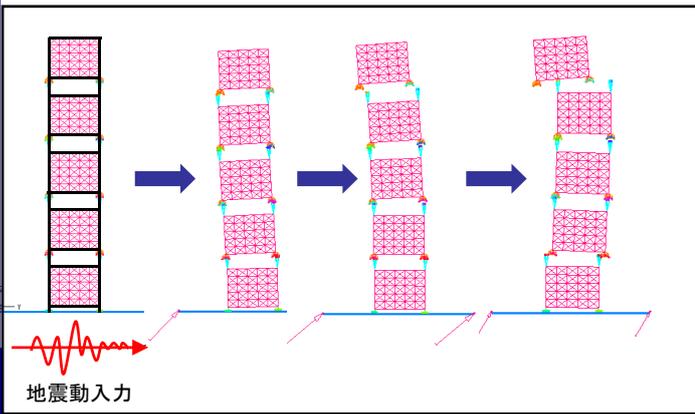
自動車製造ラインにおいて、作業台上に設置された車体が地震を受けた際に、車体が落下しないかどうかを検討した事例です。



□段積みされた商品ラックの落下検討

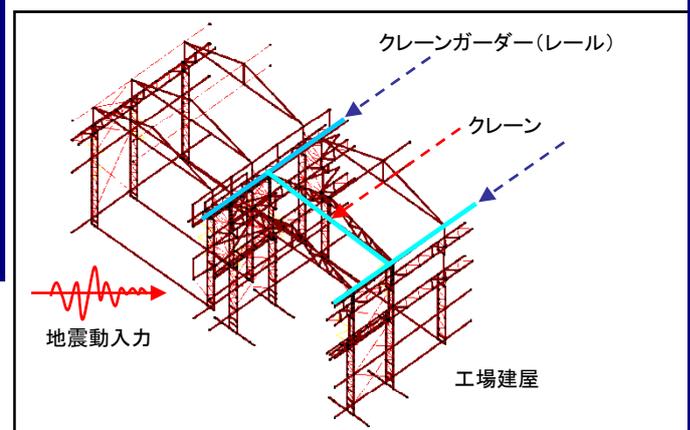
5段積みされた商品のラックが地震を受けた際に、倒壊や落下しないかどうかを検討した事例です。

検討では、水平方向と上下方向の地震動により、ラックの接合部がはずれ、落下する現象を確認しました。



□工場建屋内に設置されたクレーンの落下検討

工場建屋の天井に設置された移動式クレーンが地震を受けた際に、落下しないかどうかを検討した事例です。



汎用の非線形有限要素法解析プログラム

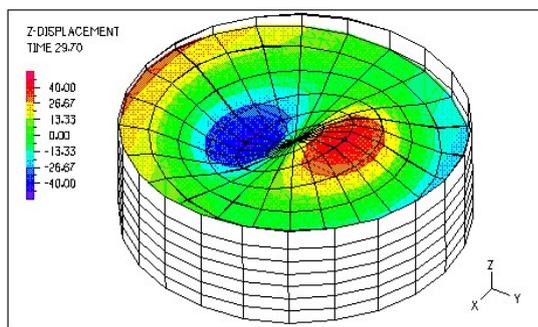
ADINA

特徴

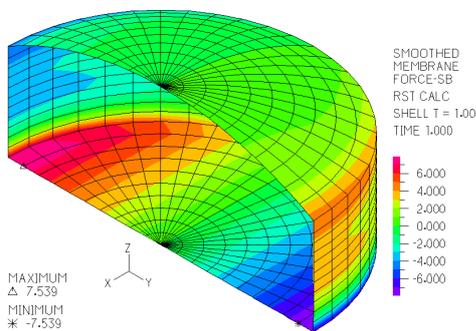
ADINA は、マサチューセッツ工科大学の研究成果を反映し ADINA R&D 社が開発した代表的な汎用の構造・熱伝導・熱流動解析プログラムです。非定常・非線形挙動を高精度な計算機能で解くことが可能です。 弊社ではプログラム販売の他、解析コンサルティング・サービスもご提供しております。

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



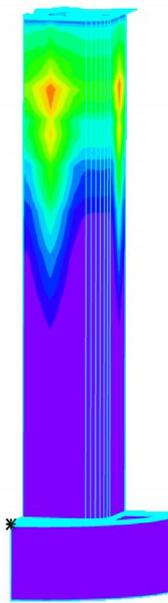
タンク壁面：断面力分布

■スロッシング解析のポイント

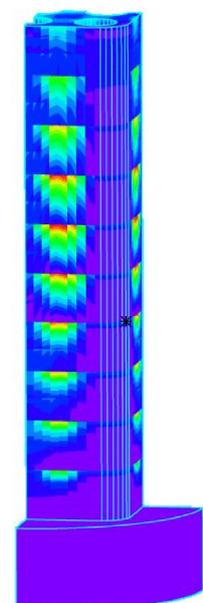
- ・構造と流体の相互作用解析
- ・タンクはシェル要素、流体は流体要素
- ・地震入力による動的応答解析
- ・スロッシング波高やタンク応力の算定
- ・浮き屋根の有無による差異の検討

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。

お問い合わせはこちらへ

本誌あるいは弊社の解析サービス・解析ソフトに関してのお問い合わせは下記までお願いいたします。

(株)構造計画研究所 エンジニアリング営業部

〒164-0012 中野区本町 4-38-13

TEL 03-5342-1136 FAX 03-5342-1236

Eメール : kaiseki@kke.co.jp

● 西日本営業所 06-6226-1231 ● 中部営業所 052-222-8461

また、本誌と連携して情報発信を行っております、構造計画研究所 解析関連部門のホームページにも是非お立寄りください。

<http://www4.kke.co.jp/kaiseki/>

尚、構造計画研究所全社の URL は <http://www.kke.co.jp/> です。



お客様が当社に提供された氏名・年齢・住所・電話番号等の個人情報は、当社の製品・ソリューションなどの情報提供や営業などの目的で使用することがあります。あらかじめご了承ください。お客様がご自身の個人情報の内容について照会または変更することをご希望される場合には、あるいは当社による個人情報の利用の中止をご希望される場合には、上記宛てにご連絡ください。可能な限り対処させていただきます。

解析雑誌

Journal of Analytical Engineering Vol.20 2008.6

(株) 構造計画研究所 エンジニアリング営業部 編集・発行

本誌は非売品です。本誌掲載記事・広告の無断転載を禁じます。

Journal of Analytical Engineering,
Vol.20, 2008.6

Kozo Keikaku Engineering, Inc.