

解析雑誌

Vol.12 2004.5

【 Topics 】

- 環境評価コンサルティングサービスとソフトウェア

【 Technical Reports 】

- オイルダンパーの微小振幅モデルを用いた環境振動応答解析
- 地震応答解析における瞬間剛性比例型減衰についての考察
- すべり支承のモデル化に関する一考察

Journal of Analytical Engineering



【巻頭言】

「もっとよくしたい」、「共に進化したい」 という思いを込めて

エンジニアリング営業部 副部長 庄司正弘

先日、五月晴れの空を悠々と泳ぐ鯉のぼりを見ながら、近所の小川に出かけてきました。自宅から自転車で半時ほどの所にある初めて訪れる川幅2m程度のきれいな小川でした。川辺で休憩していた近所の方の話によると、近くにある湧き水から流れが始まっていると言うことで、ヤマメなども釣れるそうでした。

その日も子供たちと早々に糸をたれてみたところ、7cm程度の小魚が1時間ほどで10数匹つれました。私自身も夢中になってしまい、暫し子供の頃に帰った心地でした。子供はというと、もう既に初夏を思わせる様な天気でもあったので、シャツを着たまま小川に入り、最後には頭から入って泳ぎ初めていました。私も川遊びは好きな方で、時々川に入ることもありますが、そのときは着ていた服のままで泳ぎだした子供の行動力がやや羨ましかったです。

話によると、コンクリートで固められていた護岸の一部を自然に戻し、そのまま川に入れるような岸辺を作ったりしたことで、川岸に多くの家族や男女が休める場所ができてだけでなく、魚が戻り、子供が川で遊び、最近では蛍を見ることもできるようになったようです。このような川の環境の変化については、耳にする機会も増えてきており、東京の多摩川も流域の町の下水处理を進めたことで、昔に較べて水質が良くなってきて、多くの種類の魚（鮎も戻ってきている）や水生昆虫などが生息できる様になってきているとのことです。

その日は、初めて訪れた都内（新宿から30分程度西にある）の小川においても、環境の変化は良い方向に進んでいるのだなあと大変うれしい思いをしたと共に、環境変化のすばらしい一面を実感できた一日でした。

このような変化は自然に生じたのではなく、「もっと良くしたい」と願っていた人々の努力によって成し得たことであると思います。共通した価値観で、「川を生き返らせたい」「もっと良く変えたい」という同じ目的を持った行動力ある人々の活動の結果の一部として現れたのであり、それは素晴らしい「変化」を生んだのであると考えます。

この「解析雑誌」は発刊して4年を過ぎますが、当初より、単なる私どもの技術紹介雑誌ではなく、先に触れましたように、「もっと良くしたい」「もっと何かを良い方向へ変えたい」というような、皆様と共通した価値観やビジョンを持ち、「共に進化したい」という思いを皆様にお伝え申し上げることが大きな目的の一つであると考えております。そして、皆様方の日頃のご愛顧により、「共に進化したい」という私どもの思いを少しでも共有して頂けるようになれば大変に幸いなことであり、そのことは、将来においてすばらしい「変化」を生じさせる最初の一步であると考えております。

このように、私どもは皆様方と「共に進化したい」という思いを共有できる良き「パートナー」でありたい、と常に願っております。

解析雑誌 Vol.12 2004.5 目次

【巻頭言】「もっとよくしたい」、「共に進化したい」という思いを込めて 庄司正弘	02
Topic 1 環境評価コンサルティングサービスとソフトウェア	05
Technical Report 1 ■オイルダンパーの微小振幅モデルを用いた環境振動応答解 関口 洋平・岡 功治・梁川 幸盛	13
Technical Report 2 ■地震応答解析における瞬間剛性比例型減衰についての考察 梁川 幸盛・関口 洋平・宇佐美 祐人	17
Technical Report 3 ■すべり支承のモデル化に関する一考察 金山 亨・荒木 秀朗	21
解析雑誌 読者アンケートのお願い	26
お問い合わせはこちらへ	27

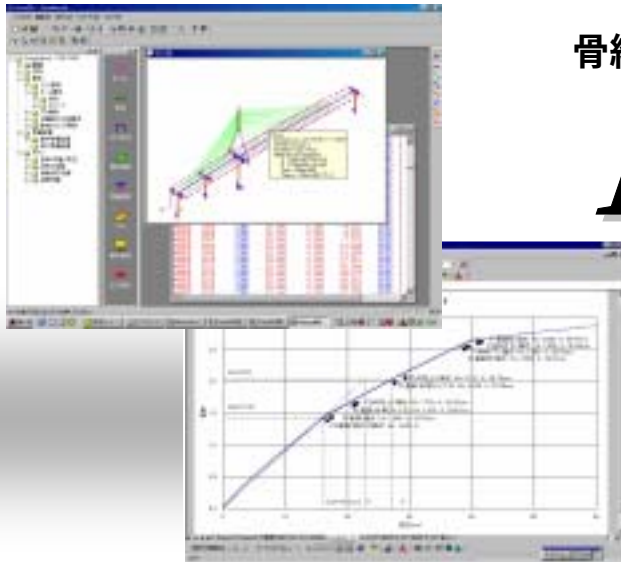
本誌内では弊社(株)構造計画研究所を KKE と呼称しています。

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/>

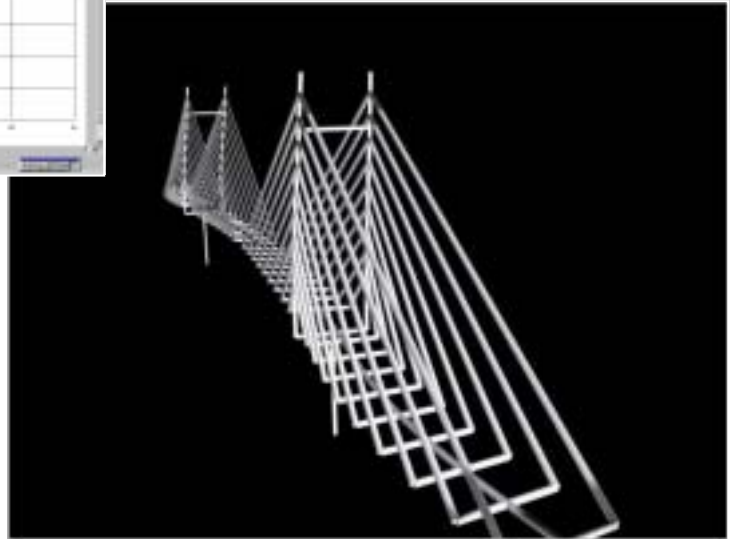
骨組構造物の汎用非線形解析プログラム

RESP-T for Windows



非線形問題、動的問題を
高解析機能でカバー！

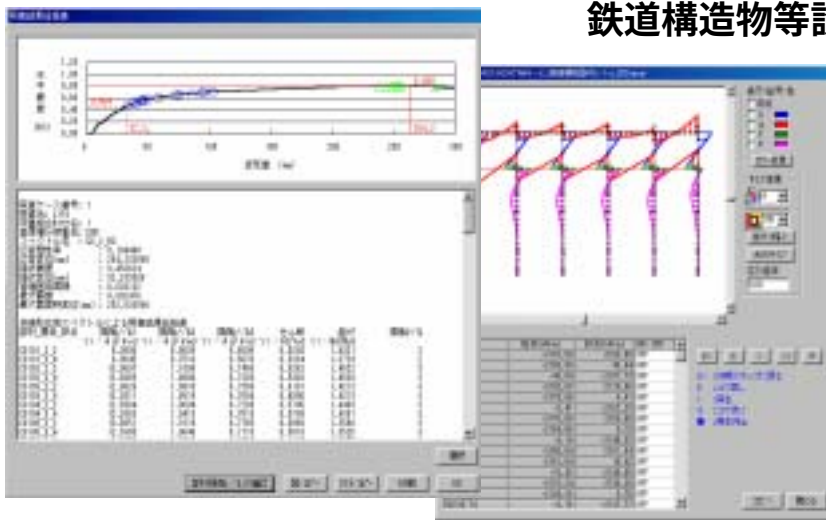
- 3次元任意形状骨組モデル対応
- 静的／動的／固有値／座屈固有値解析
- 弾塑性／幾何学的非線形
- 各種の免震制振機構にも対応



鉄道構造物等設計標準・同解説

耐震設計編に準拠！

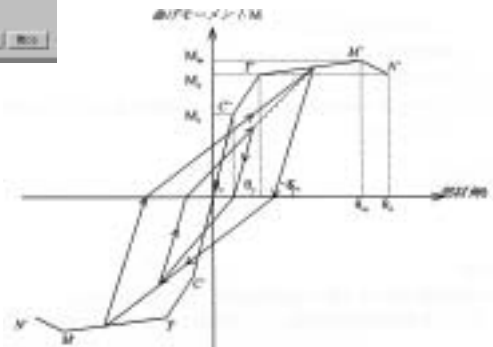
- Windows対応
- 静的非線形解析
- 所要降伏震度スペクトル
- 地盤応答変位解析
- 部材の損傷レベルによる
耐震性能チェック
- テトラリニア対応



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。

[技術紹介]

環境コンサルティングサービス とソフトウェア

建設事業の様々な局面で、環境への配慮が高い水準で要求され始めています。これに関連して、本誌前号で水環境評価システム Water-design をご紹介しましたが、ここではこれを含む環境評価コンサルティングの最新技術とソフトウェア、さらにそれらの応用分野をご紹介します。

■SoundPLAN を用いた騒音評価

建物建設や道路事業等の環境アセスメントでは、騒音予測・評価が必須となりつつあります。建物建設時の建設機材稼動時の騒音、高速道路を走る車の騒音、鉄道や空港の建設中及び供用後の日常的な騒音、工場からの騒音、大規模店舗供用後の騒音等音環境に関わる事業は多岐に渡ります。

この程 KKE は、これら広範な音環境問題、騒音問題に対応するため、(株)小野測器と技術提携し、3次元シミュレーションに基づく柔軟な評価手法により、お客様のニーズに即したコンサルティングサービスを提供することとなりました。両社は、騒音の測定技術や評価ノウハウを含め、数値シミュレーションの豊富な経験・実績を基に、個々の状況・問題に対応したソリューションを提供致します。



工場稼動時騒音の周辺地域への影響評価

【対 象】

- ・道路交通騒音
- ・プラント施設
- ・鉄道騒音
- ・建設現場騒音

【評価内容】

- ・音圧レベルの予測
- ・近隣地域への影響
- ・建設前後の音環境比較
- ・防音対策の検討

【用 途】

- ・環境アセスメント
- ・近隣説明
- ・大規模小売店舗立地法の騒音予測 ほか

SoundPLAN はドイツ Braunstein + Berndt 社で開発されたソフトウェアで、株式会社小野測器が日本国内総代理店です。日本で用いられている各種の騒音予測手法に対応し、幅広い分野の音環境の予測に用いられています。



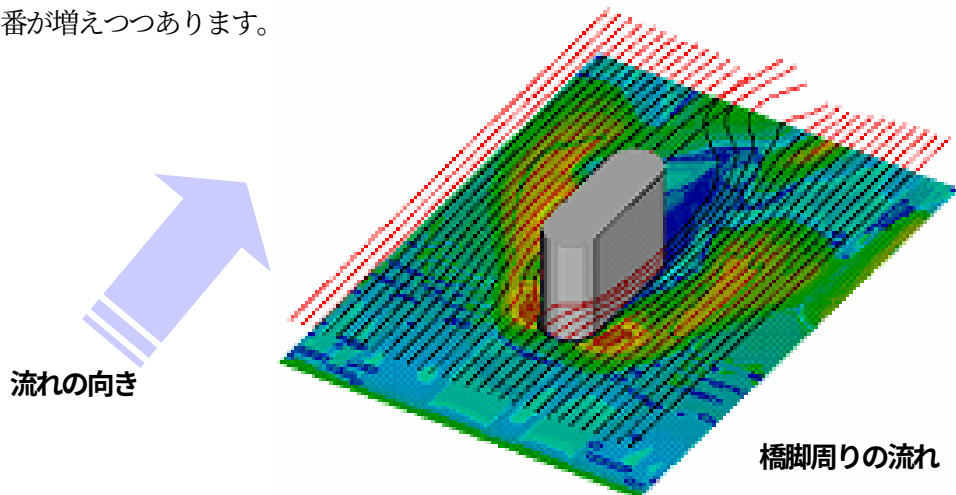
幹線道路沿線の騒音予測

■Water-design による海洋・河川流況解析

橋梁、堰等の河川構造物建設による流況・水位変化、河床変動や洗掘問題、魚道の確保や生態系、湖沼・ダム湖の富栄養化、水質問題、埋め立てや防波堤等の海洋構造物による潮流変化や汀線変化、水質問題等水環境問題は、多岐に渡ります。また、近年の防災意識の高まりとともに、洪水問題や津波の被害予測等水を対象とした流況予測の出番が増えつつあります。

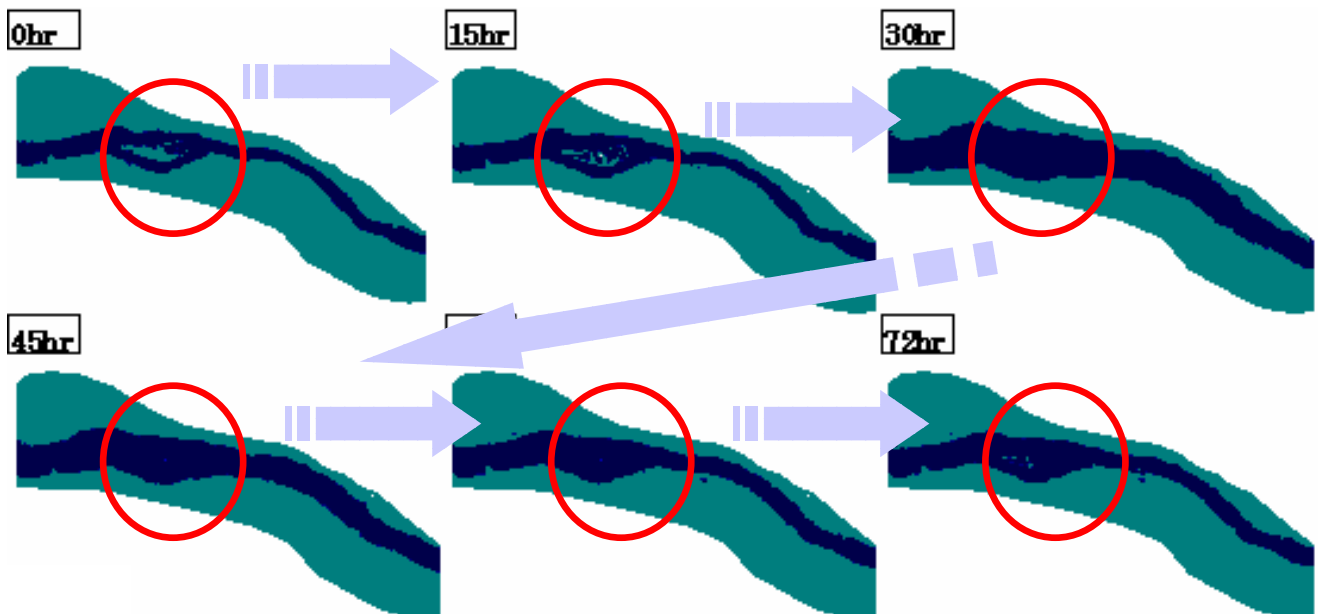
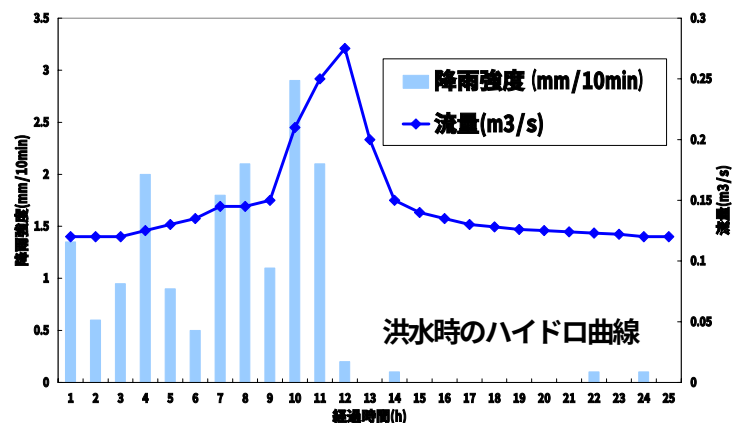
KKE は、河川や港湾内で生ずる流況問題と連成した汚染物質の拡散問題や水温、塩分濃度等に影響される富栄養化を伴う水質問題等を、本誌前号でご紹介した Water-design for Windows を始めとした CAD や可視化機能を含む豊富なシミュレーションツールをベースに総合的に解決しています。

橋脚周りの流況予測



河川の洪水氾濫による水面変動

洪水時の水面変動



■Wind-design による風環境評価

近年、市街地に大規模かつ複雑な建築物が数多く建設されるに伴い、建物と周辺環境との調和がますます重要なテーマになってきております。特に再開発建物では、建物建設が周辺の風環境に及ぼす影響（いわゆるビル風問題）を事前検討しなければならないケースが増加しています。また、道路環境影響評価の改正に伴い、高架橋、切土・盛土周辺での通風悪化や増風域の発生等風環境を事前に評価し、事業計画に反映させるといった風環境アセスメントの要求が増えてきております。

KKE は、従来から蓄積してきました建築計画・構造設計や流体問題の解析技術を基に、数値シミュレーションによる風環境評価コンサルティングサービスを手掛けて参りました。

【対 象】

- 再開発建物、高層住宅、超高層建築
- 道路高架、切土・盛土
- プラント施設

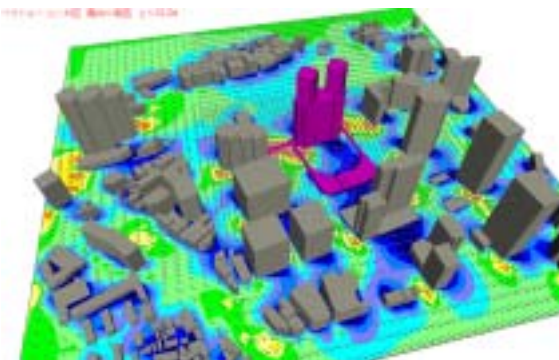
【評価内容】

- 強風域の予測
- 近隣地域への影響（近隣住宅、公園）
- 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

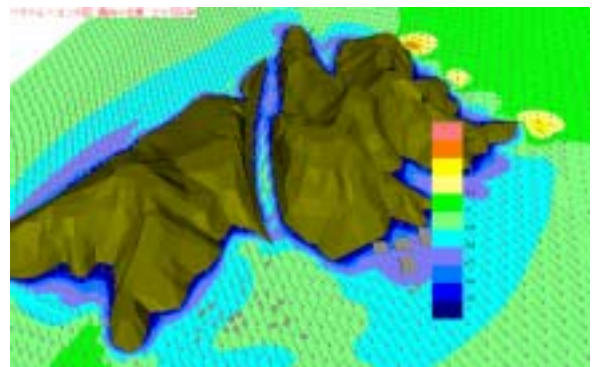
【用 途】

- 環境アセスメント
- 近隣説明
- 道路、鉄道施設の影響評価
- 広域山間部での局地風予測

Wind-design for Windows は、新規建物の建設、地形変化、植栽や暴風フェンス等に対応して風環境を評価します。



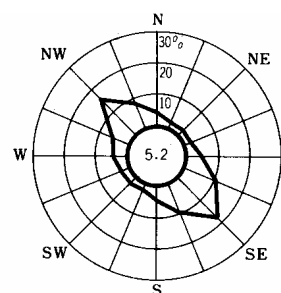
計画建物供用後の風環境



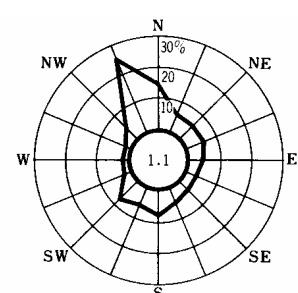
道路建設（切土）後の風環境



風洞実験



札幌



東京

風観測（風配）

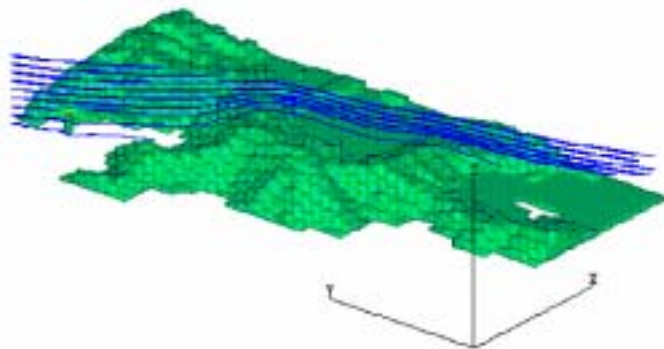
風洞実験結果や風観測データの分析

■Air-design による大気質の環境評価

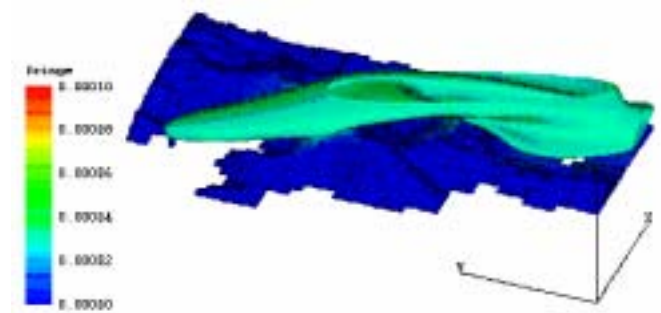
KKE では、温度、湿度、汚染物質の拡散状況等の大気質評価、ヒートアイランド現象など広狭各種の屋外気流・温熱環境及び大気質問題を扱っております。

これらの問題に対しては、従来から風洞実験や現地観測、プルーム、パフモデルによる予測等が取られてきましたが、前者が検討・評価に時間を要すること、後者が精度及び地形、障害物に対する形状適応能力等に問題があるため、近年、迅速かつ精度良く、形状適用能力に優れた計算機風洞(数値流体力学(CFD))技術が利用され始めております。

【対 象】	【評価内容】
■都市空間	■温度や濃度の拡散程予測
■自動車からの排気ガス	■近隣地域への影響
■建物施設等からの排熱	■流入風の影響
■工場排煙	■地形・建物形状の影響
【用 途】	
■環境アセスメント	
■都市計画	
■ヒートアイランド現象	
■大気汚染	



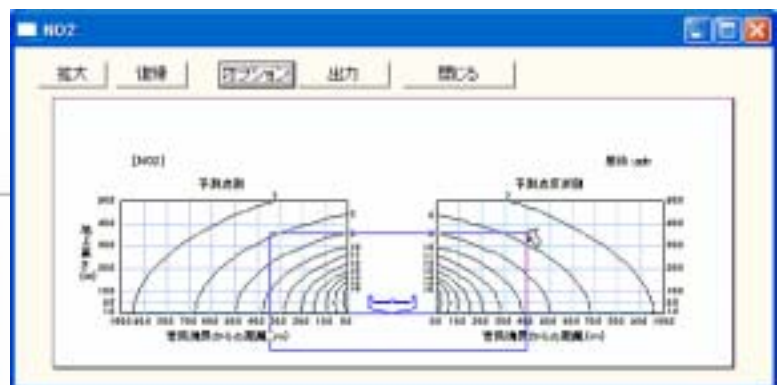
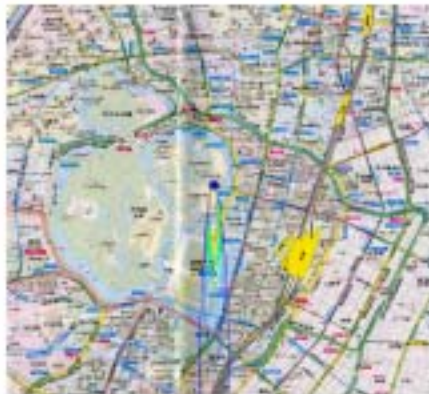
ストリームライン



濃度等値面 (3/100000)

地形を考慮した煙突からの排ガス評価

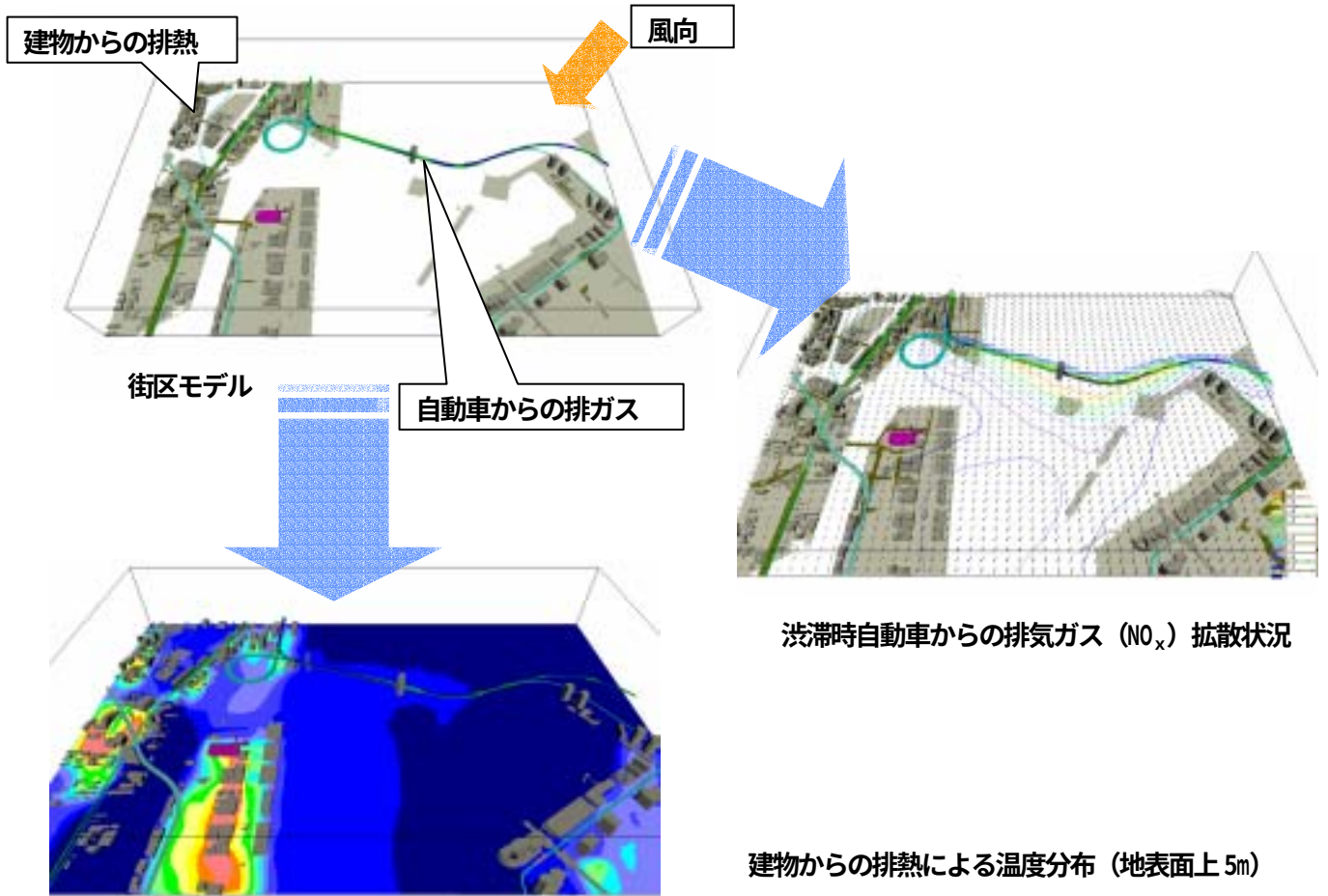
平代田区 風向=北 N-Y 断面 Z=20,000m



↑ 排気ガスの成分 (NO_2) の拡散予測
(高速道路高架上の垂直断面)

← 駐車場からの排出ガスによる
一酸化炭素濃度：年平均濃度

プルームパフモデル

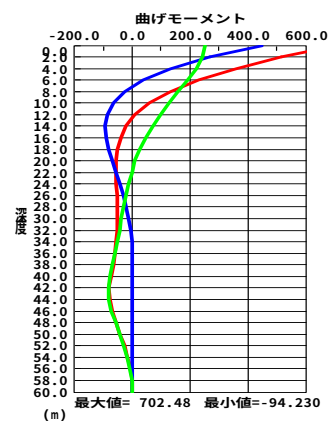
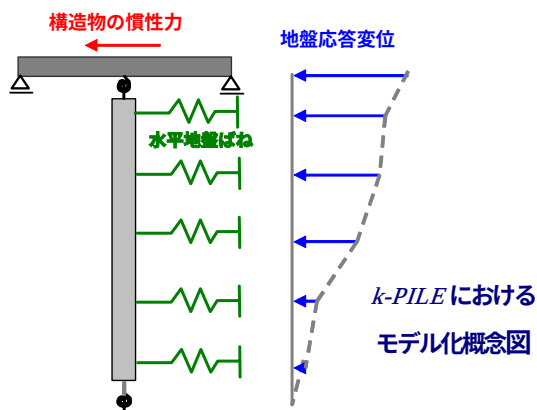


街区の温熱・大気質評価シミュレーション

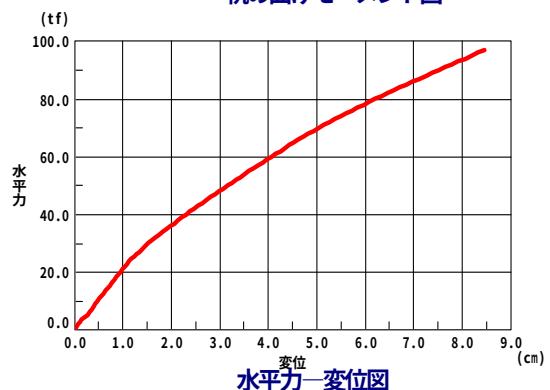
k-PILE

*k-PILE*は、建築、土木構造物の杭基礎設計において広く用いられる応答変位法のプログラムです。杭の断面力、基礎梁—杭の荷重—変形関係を算定します。

k-PILE では、地盤ばねの非線形特性の自動計算機能、*k-SHAKE* の地盤応答変位の自動読み込み機能を有しており、構造設計者が手軽に用いることができます。



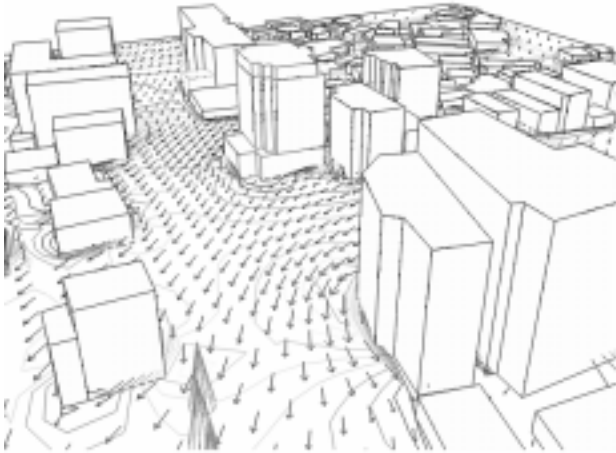
杭の曲げモーメント図



水平力—変位図

Wind-design

for Windows

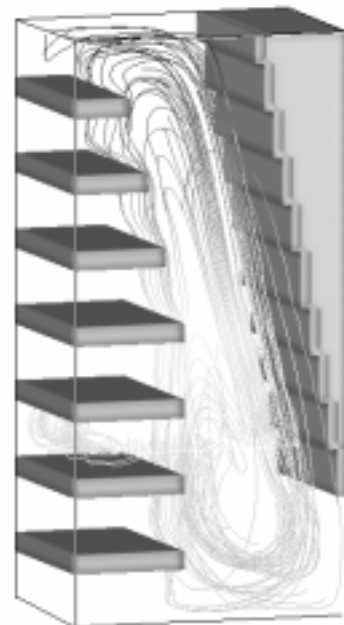


- 地図情報(bmpファイル)の読み込み可能
- 2D or 3Dによる確認表示
- 自動メッシュ分割機能
- GUI操作によるメッシュ範囲分割や追加・削除が可能
- 簡単な計算条件設定および出力指定
- 風環境評価機能による客観的評価が可能

AC-design

for Windows

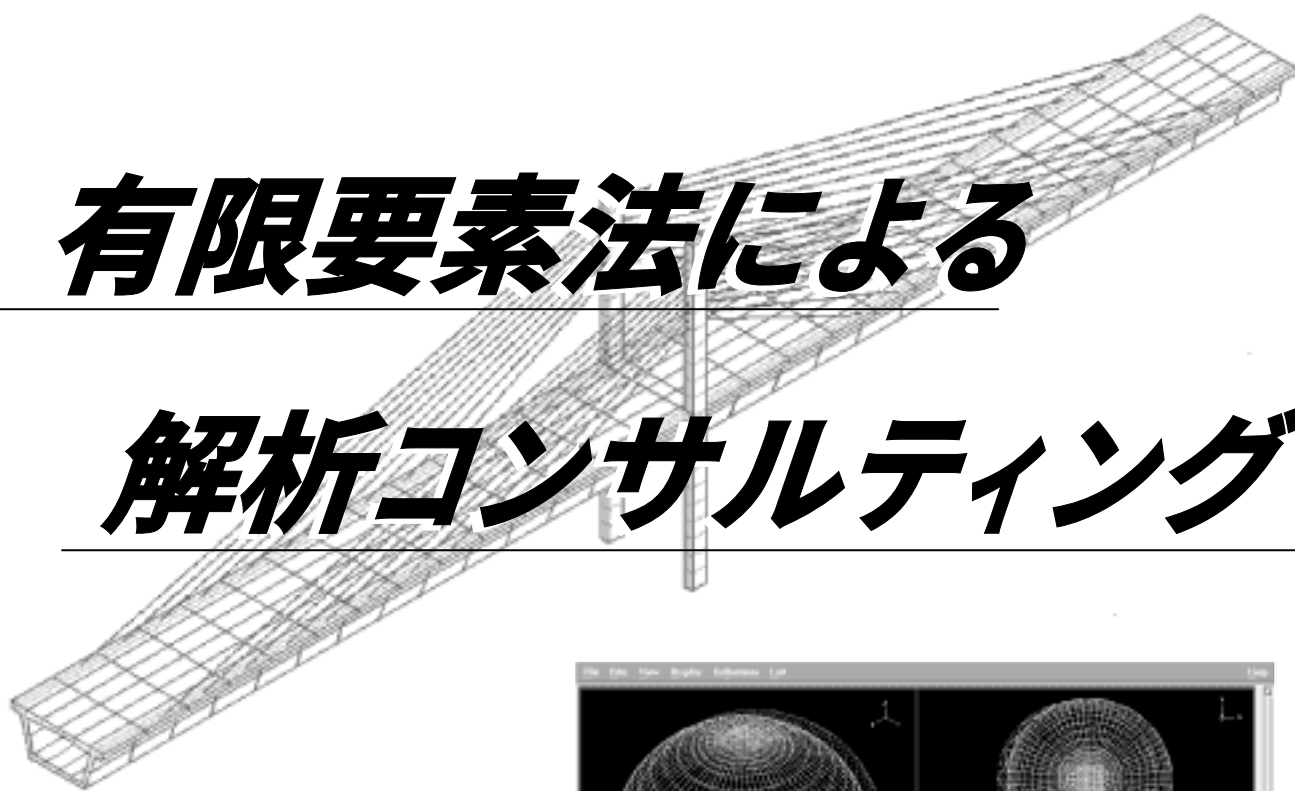
- AutoCADをカスタマイズした容易な形状定義機能
- 自動メッシュ分割機能
- 高性能熱流体ソルバの搭載。流れと熱の連成計算や濃度拡散解析が可能
- 豊富な可視化機能。ベクトル・コンタ等値面・マーカ粒子追跡・ストリームライン表示・アニメーション表示



水、空気、ガス拡散、地下浸透流・・・ 流体解析コンサルもお任せ下さい

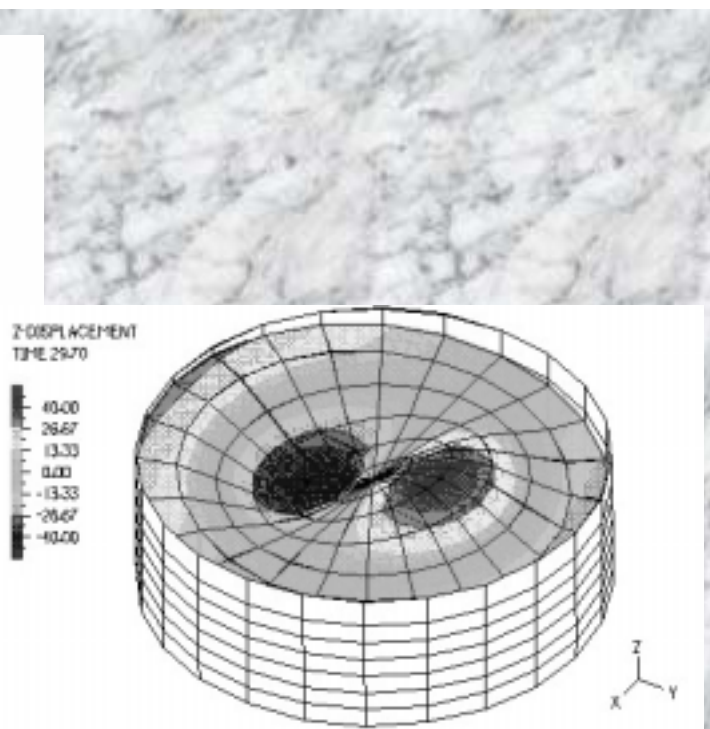
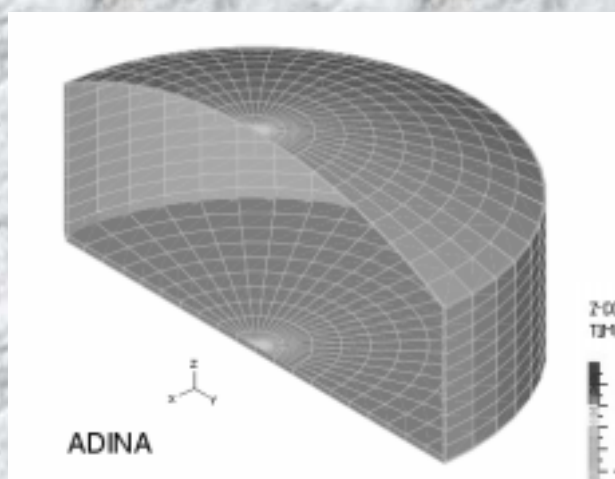
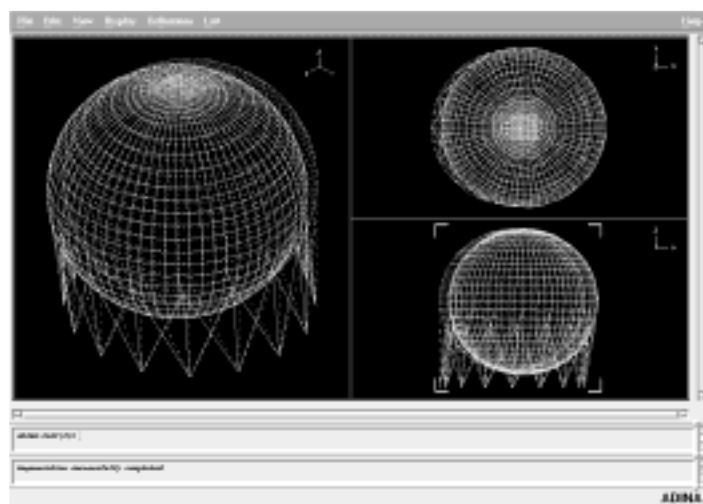
有限要素法による

解析コンサルティング



非線形有限要素法プログラム

ADINAを用いた解析コンサルティングがご好評をいただいております。
構造・地盤から熱流体まで、様々な問題を解決してきたノウハウにご期待ください。



★ ADINAはADINA R&D, Inc.
(米国)の登録商標です。

設計用入力地震動作成システム

地震荷重設定システム *SeleS for Windows*
模擬地震波作成プログラム *ARTEQ for Windows*
成層地盤地震応答解析プログラム *k-SHAKE+ for Windows*
波形処理プログラム *k-WAVE for Windows*

設計用入力地震動作成システムは、免震構造物の設計には欠かせない模擬地震波や構造物の建設地域の地盤特性を考慮した入力地震動を手軽に作成できる Windows 対応の設計者のためのソフトウェアです。

ユーザは、過去の被害地震や活断層から建設地点での地震動強さを評価し、表層地盤の増幅特性を考慮した、設計用入力地震動を簡易に作成することが可能です。



活断層による最大値一覧出力画面

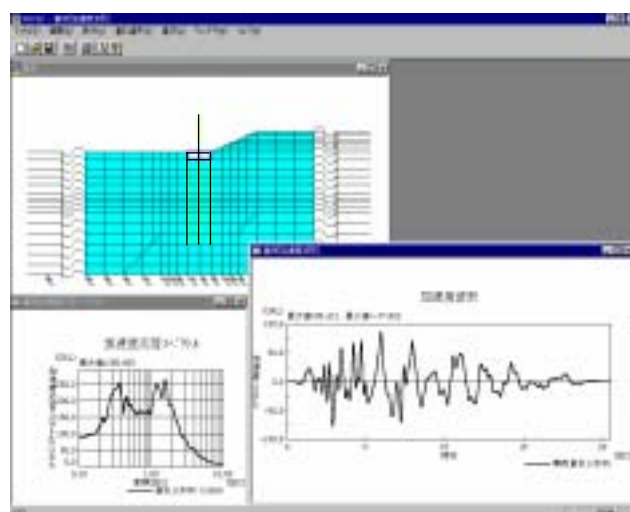
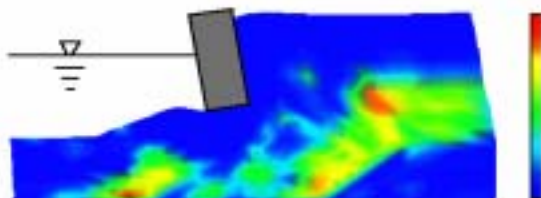
地盤と構造物の動的相互作用解析プログラム

SuperFLUSH/2D for Windows

軟弱地盤に建設される橋梁や港湾構造物、既設埋設構造物との近接施工、異種地盤にまたがる長大橋等の耐震性照査に威力を発揮します。

有効応力解析手法による相互作用解析は...

NANSSI



★ Super FLUSH/2DとNANSSIは（株）地震工学研究所と弊社の共同開発商品です。

オイルダンパーの微小振幅モデルを用いた環境振動応答解析

関口 洋平¹⁾ 岡 功治²⁾ 梁川 幸盛¹⁾

- 1) 株式会社 構造計画研究所 耐震技術部
2) 株式会社 大本組 技術本部 技術研究所

1. はじめに

オイルダンパーは地震応答の低減を目的に制振構造にしばしば適用されているが、近年では居住性向上のために交通振動などの微小振幅の揺れに対してもその減衰効果を発揮することが期待されている。

本稿はオイルダンパーを制振装置として設置した地上5階建の鉄骨造事務所ビル(図1)を対象とし、隣接する鉄道線路における列車通過時の振動に対するオイルダンパーの減衰効果¹⁾に着目し、オイルダンパーの微小振幅モデルを用いた応答解析結果について報告する。

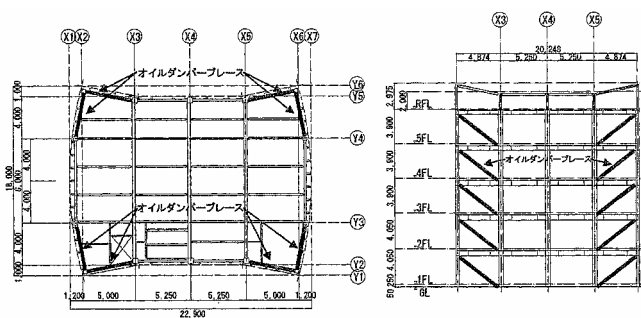


図1 建物形状図

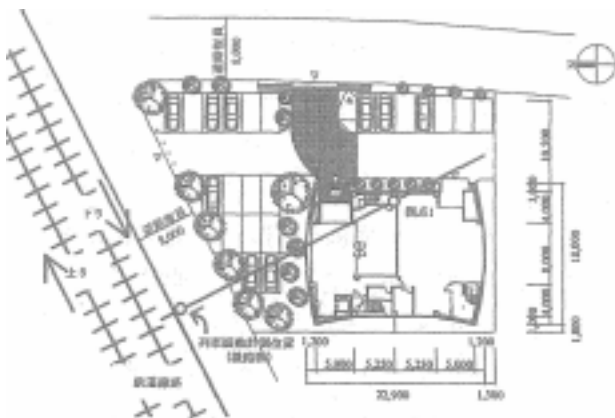


図2 敷地配置図

2. オイルダンパーの微小振幅モデル

一般にオイルダンパーはMaxwell要素によってモデル化され、その減衰性能を精度よく再現する。しかし微小振幅下では、機械的なギャップを排除した接合機構を使用した場合でも摺動抵抗、作動油内に存在する気泡などの影響によりMaxwell要素では正しくモデル化できない場合がある²⁾。本稿ではこのようなオイルダンパーの機構に基づいた力学モデル³⁾によってモデル化を行った(図3)。気泡による剛性低下を考慮した作動油剛性 K_d は内圧 P を用いて次式で表される。

$$K_d = \frac{AD^2 \cdot K}{Vf_0} \cdot \frac{(1-x_0) \cdot P^2 + P_0 \cdot P \cdot x_0}{(1-x_0) \cdot P^2 + P_0 \cdot K \cdot x_0}$$

AD : 受圧面積

K : 作動油の真の弾性率

Vf_0 : 初期容積

P_0 : 初期タンク圧

x_0 : 気泡の混入率

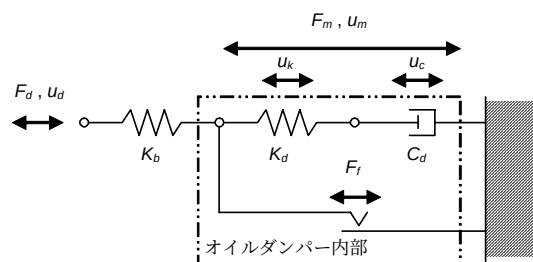


図3 オイルダンパーの微小振幅モデル

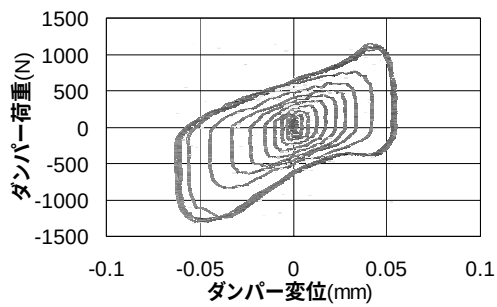
K_b : 取付け部材の支持剛性

K_d : 気泡による剛性低下を考慮した作動油剛性

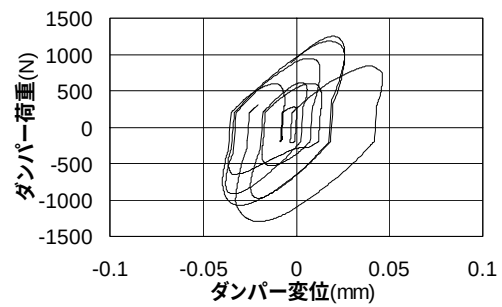
C_d : 粘性減衰係数

F_m : Maxwell要素部の減衰力

F_f : 摺動抵抗

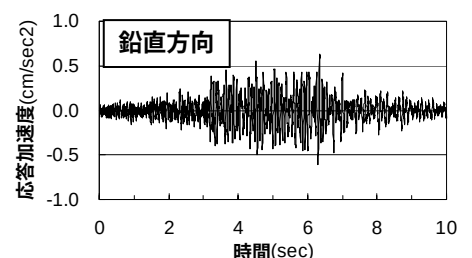
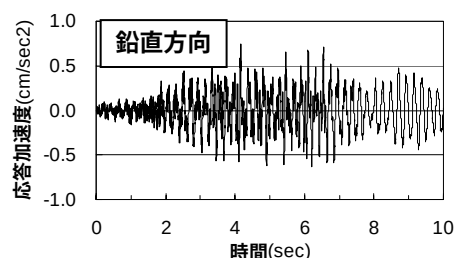
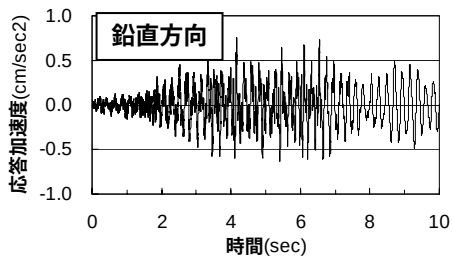
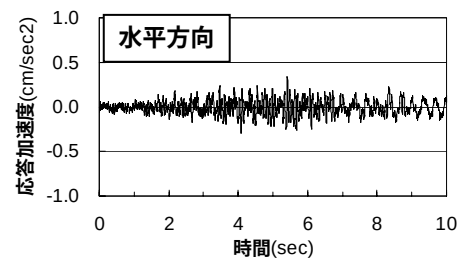
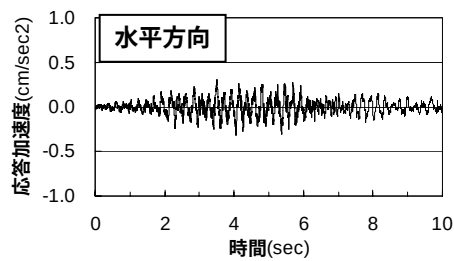
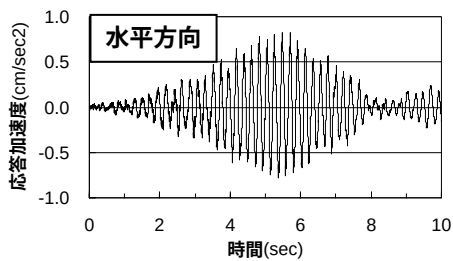


(a) 起振実験結果（正弦波加振 1.8Hz）



(b) 時刻歴応答解析結果(8-10 秒)

図4 微小振幅下での履歴ループ
(ダンパーの最大減衰力: 200kN)

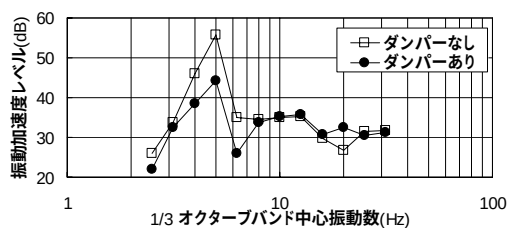


(a) 解析結果（ダンパーなし）

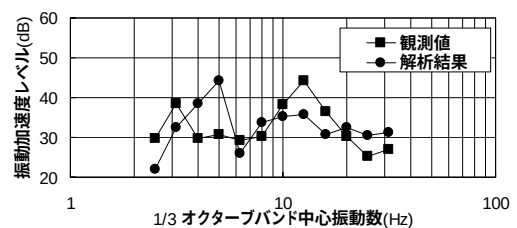
(b) 解析結果（ダンパーあり）

(c) 観測値（ダンパーあり）

図5 応答加速度の時刻歴波形（5 階床中央位置）



(a) オイルダンパー有無の比較



(b) 解析結果と観測値の比較（ダンパーあり）

図6 振動加速度レベル（水平方向）

図 4 に起振実験によるオイルダンパーの応答履歴と時刻歴応答解析により得られた上述のモデルの応答履歴を示す。本モデルが、微小振幅時のバイリニアに近い履歴特性を表現できていることが確認できる。摩擦部のモデル化を工夫することで精度の向上が期待できる。

3. 時刻歴応答解析

本建物に隣接する線路を列車が通過する際に 1 階床中央位置で観測した加速度 3 成分を地動加速度として、前述のオイルダンパーの微小振幅モデルを適用した立体フレーム時刻歴応答解析を行った（構造計画研究所 R E S P - E V 使用）。

図 5 に 5 階床中央位置における応答加速度の時刻歴波形を、オイルダンパーを適用しないモデルの応答結果と比較して示す。数値解析上鉛直方向の固有モードが高次であるため、鉛直方向の応答加速度はオイルダンパーを適用する場合としない場合とでほとんど差が見られないが、水平方向についてはオイルダンパーによる応答の低減が大きく、前述した微小振幅モデルの減衰性能の効果が確認できる。またダンパーを適用した場合の加速度の振幅は、解析結果と観測値で概ね一致している。

水平方向の応答加速度について、環境振動等を評価する際によく用いられる周波数分析の一つの手法である 1/3 オクターブバンド分析⁴⁾を適用し、図 6 に示す。ダンパーを適用することにより振動加速度が大きい振動数領域で振動加速度レベルが低減していることが確認できる。また、ダンパーを有するモデルの振動加速度レベルは観測値と同等のものとなった。

4. まとめ

提案されているオイルダンパーの機構に基づいた力学モデルを用いた環境振動応答解析を行い、環境振動によって生ずる水平方向の応答加速度を低減できることが確認できた。

謝辞

本稿で用いたオイルダンパーの微小振幅モデルはカヤバ工業(株)亀井俊明様よりご提案、ご指導頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

1) 岡 ほか: オイルダンパー直付け方式による制震構造（その 1～3）, 日本建築学会大会学術講演梗

概集, B-2, pp.933-938, 2000 年 9 月

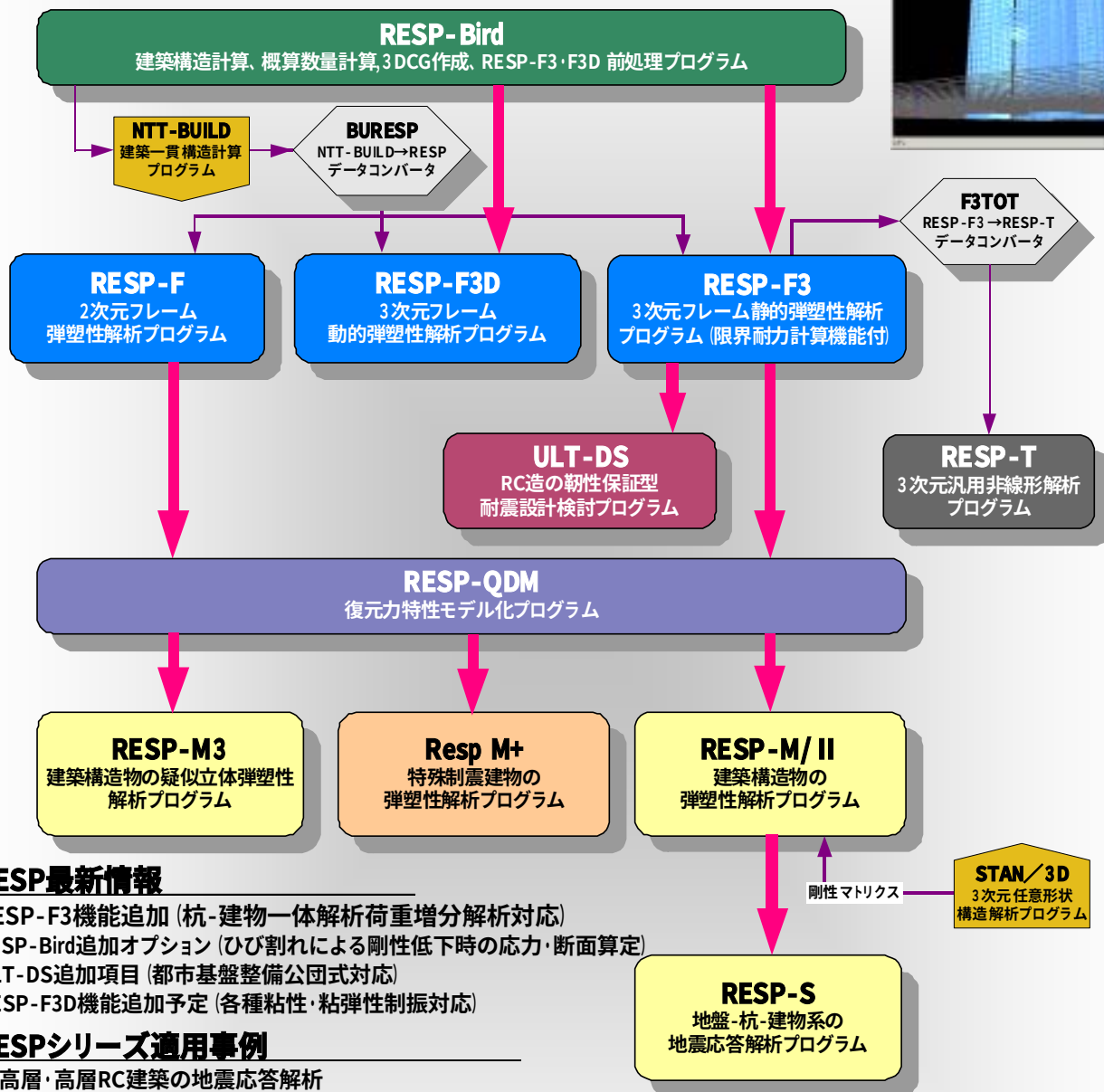
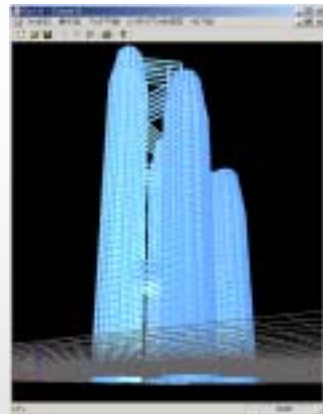
2) 大木, 笠井 ほか: 微小振幅における速度依存型ダンパーの性能について, 構造工学論文集, 日本建築学会, Vol.50B, pp.601-610, 2004 年 3 月

3) 亀井 ほか: パッシブ制振構造設計・施工マニュアル 第 7 章 オイルダンパーの設計, 日本免震構造協会, pp.13-150, 2003 年 10 月

4) 環境振動・固体音の測定技術マニュアル, 日本建築学会, 1999 年

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

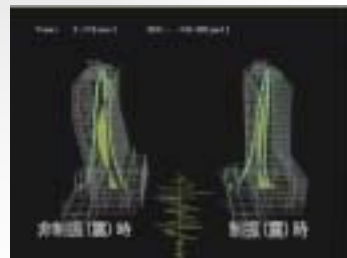
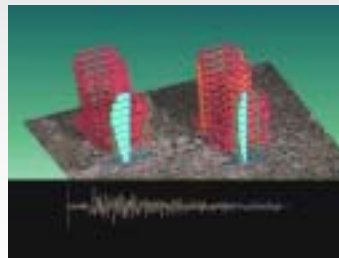


RESP最新情報

- ・RESP-F3機能追加 (杭-建物一体解析荷重増分解析対応)
- ・RESP-Bird追加オプション (ひび割れによる剛性低下時の応力・断面算定)
- ・ULT-DS追加項目 (都市基盤整備公団式対応)
- ・RESP-F3D機能追加予定 (各種粘性・粘弾性制振対応)

RESPシリーズ適用事例

- ・超高層・高層RC建築の地震応答解析
- ・免震構造解析
- ・各種制震構造解析 (曲げせん断分離型制振要素)
- ・不整形構造のねじれ応答解析
- ・非剛床構造の静的動的解析
- ・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
- ・建築構造物の機械振動、交通振動、歩行振動解析



● 短時間で構造基本検討・数量計算が可能なRESP-Birdが大好評 ●

・BUILDの開発元は(株)NTTデータです。

免震建築・高層建築等に実績豊富なRESPシリーズを、1ヶ月単位でレンタル利用いただけます。詳細はお問い合わせ下さい。

地震応答解析における瞬間剛性比例型減衰についての考察

梁川 幸盛¹⁾ 関口 洋平¹⁾ 宇佐美 祐人¹⁾

1) 株式会社 構造計画研究所 耐震技術部

1. はじめに

鉄筋コンクリート造超高層建物の設計用地震応答解析の場面では、塑性化域での粘性減衰特性として、(1)式で示されるような瞬間剛性比例型減衰と呼ばれる内部粘性減衰の考え方が採用されることが多い^{1)~3)}。

$$[C] = \alpha [K_p] \quad \alpha = 2h/\omega \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $[C]$ ：減衰係数行列、 $[K_p]$ ：瞬間剛性行列、
 h ：減衰定数、 ω ：弾性または瞬間剛性1次モードの円振動数

(1)式には、構造物の剛性が低下した場面では粘性減衰も剛性に比例的に低下させ、結果的に大きな応答変位を導くことにより、安全側の設計を行うという考え方が根底にあると考えられる。ただし、(1)式には複数の解釈方法があり、このことが若干の混乱を招いている。

一方RESPシリーズでは、従来から特定の瞬間剛性比例型減衰の考え方のみ採用してきた。今回、我々の開発した「振動解析プログラム Resp-M+」の最新版において、複数の考え方の採用したのを機会に、瞬間剛性比例型減衰の解釈方法の違いによる利点・問題点の考察、および、建物応答の比較を行いそれぞれの方法の特徴をまとめる。

2. バイリニア標準型バネに対する挙動

図1のようなバイリニア標準型（等方硬化則）の復元力特性を持つバネに対して、それぞれの方法の瞬間剛性比例型減衰を適用した場合の挙動を示す。

一般に非線形振動解析では振動方程式を増分形で考え、第1の考え方として(2)式の解法（減衰項の力を累積させていく方法）が採用される。

$$F_d = \sum ([C] \cdot \Delta v) \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 F_d ：減衰項の累積力、 Δv ：増分速度

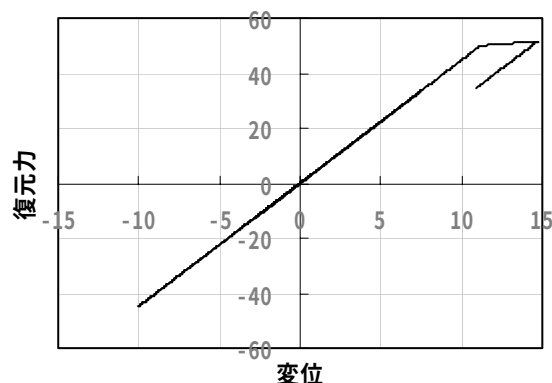


図1 バイリニア標準型バネ復元力特性

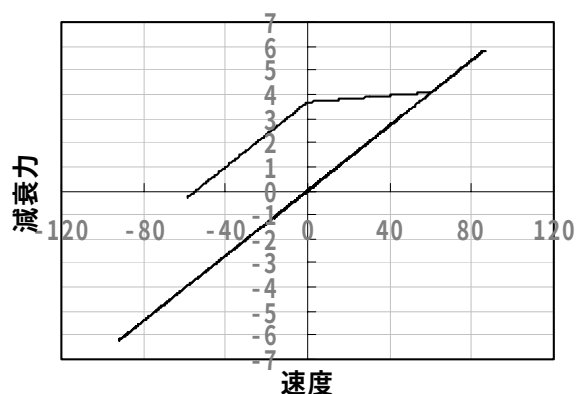


図2 (2)式による減衰項の挙動

(2)式を適用した場合には図2に示すような挙動が得られる。すなわち剛性が変化した場合には、それまでに負担していた減衰力は保存され、減衰係数（勾配）だけが変化する。この考え方では、減衰項の大きさは剛性変化時には連続的に変化するが、結果的に大きな残差力が生じることになる。この残差力は、開放されない力として構造物に作用し続けるため、運動エネルギーがゼロになるまで自由振動させたとしても、構造物の応答せん断力はゼロにはならず、大きな残留変位を生むことが多い。

第2の考え方として、(3)式のように累積速度を採用する方法を適用した場合の挙動を図3に示す。

$$F_d = [C] \sum \Delta v \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 $\sum \Delta v$: 累積速度（現在の速度）

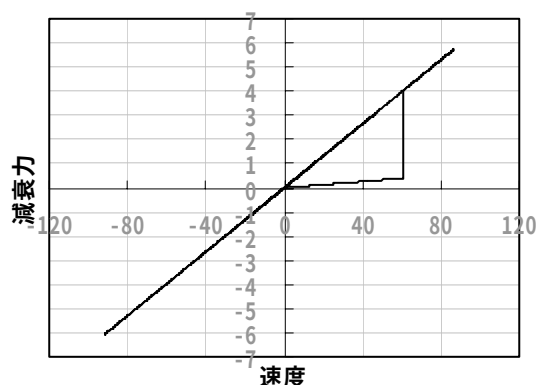


図3 (3)式による減衰項の挙動

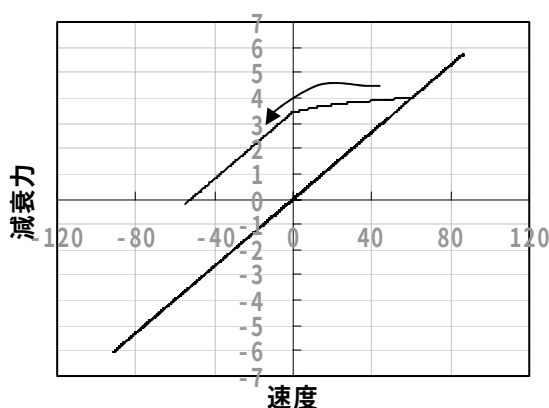


図4 ニュートン・ラフソン法適用結果

この考え方では、剛性が変化した場合には、減衰係数（勾配）が変化すると同時に、それまでに負担していた減衰力が開放され、必ず原点を通過する直線に乗る。従って、残差力が開放されないまま残ることは無い。ただし、部材が降伏した時点で、それまで負担していた内部粘性減衰の抵抗力を開放してしまう考え方には疑問が残る。

また、瞬間剛性比例型減衰は数値解法の上でも問題がある。非線形方程式の解法におけるニュートン・ラフソン法に類する手法の考え方は、おおよその勾配が決定でき、かつ、正確な不平衡力が求められれば、反復計算を行うことによって解に収束することが出来るということである。しかし、瞬間剛性比例型減衰では、減衰項に関しては減衰としての骨格曲線に基づいているわけではなく、明確に不平衡力を算出できない。図4は、図2の状況に関してニュートン・ラフソン法を用いて解こうとした結果である。図中の矢印の部分で、適切な不平衡力が算出できず、ゆるいカーブを描いてしまっている。

3. 高層RC建物の地震応答の比較

解析対象建物の規準階プランを図5に示す。20階建ての高層RC住宅で、階高は2850~2900mmとした。断面等・ダンパー等の設定は、文献4)と同じとした。

振動モデルの骨格曲線は、立体モデルの静的荷重増分解析の結果に基づき、3折れ線⁵⁾を作成した。

基本振動モデルは、図6に示す曲げせん断分離モデルとした。内部粘性減衰として、初期剛性比例型減衰 $h=3\%$ 、(2)式型瞬間剛性比例型減衰 $h=3\%$ 、(3)式型瞬間剛性比例減衰 $h=3\%$ の3種類を比較した。いずれも ω 一定型で、時刻歴積分中に反復計算を行わずに、不平衡力は全て次ステップの外力項に加算した。

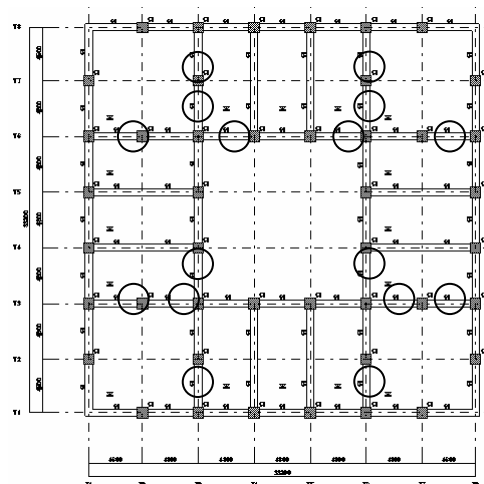


図5 規準階プラン（○はダンパー位置）

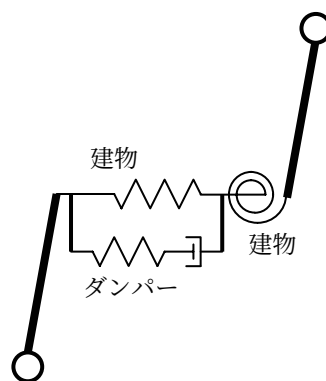


図6 曲げせん断分離モデル

図7にそれぞれのモデルの最大応答層間変形角を示す。粘性減衰の考え方の違いにより応答は大きく異なるが、概ね(2)式型の瞬間剛性比例が最も大きな

応答変形角を示す。断面切替階の応答が大きくなることから、層の降伏時に大きく変形が伸びることが考えられる。一方、ダンパーを付加したモデルでは、概ね応答は押さえられているが、断面切替え階の変形が伸びる傾向は同じである。

まとめ

1. 瞬間剛性比例型の内部粘性減衰の考え方に2種類(減衰項の力を累積し残差力が生じるタイプ(従来からRESPシリーズで採用)、および、常に原点を通過するタイプ(今回Resp-M+で採用))があり、それぞれに利点・問題点があることを示した。
2. 減衰項の力を累積し残差力が生じるタイプでは、反復計算時に正確に不平衡力が求められないことに起因する問題があることを示した。
3. 2種類のモデルを用いた高層RC建物モデルの応答解析結果を比較すると、減衰項の力を累積し残差力が生じるタイプの応答が大きくなる(設計として安全側となる)ことが確認できた。
4. 瞬間剛性比例型減衰を運用する上では、実現象の忠実なモデル化ではなく、設計時の安全性確保に重きを置いた計算モデルとして認識するべきである。

参考文献

- 1) 小谷 俊介、「鉄筋コンクリート造骨組の動的破壊実験 —動的的非線形解析の資料—」、日本建築学会大会学術講演梗概集、1980年2552番、p.1555.
- 2) Otani, "SAKE Inelastic Response of R/C Frames to Earthquake", The NISEE Software Library 2nd edition.
- 3) 「多次元入力地震動と構造物の応答」、日本建築学会、1998年.
- 4) 梁川・関口・宇佐美、「高層RC建物の一本棒振動モデルにおける曲げとせん断成分の分離について」、日本建築学会大会学術講演梗概集、2003年21418番、p.835.
- 5) 「鉄筋コンクリート構造物の弾塑性地震応答解析(その2)」、江戸宏彰・武田寿一、大林組技術研究所報No.13,1976.

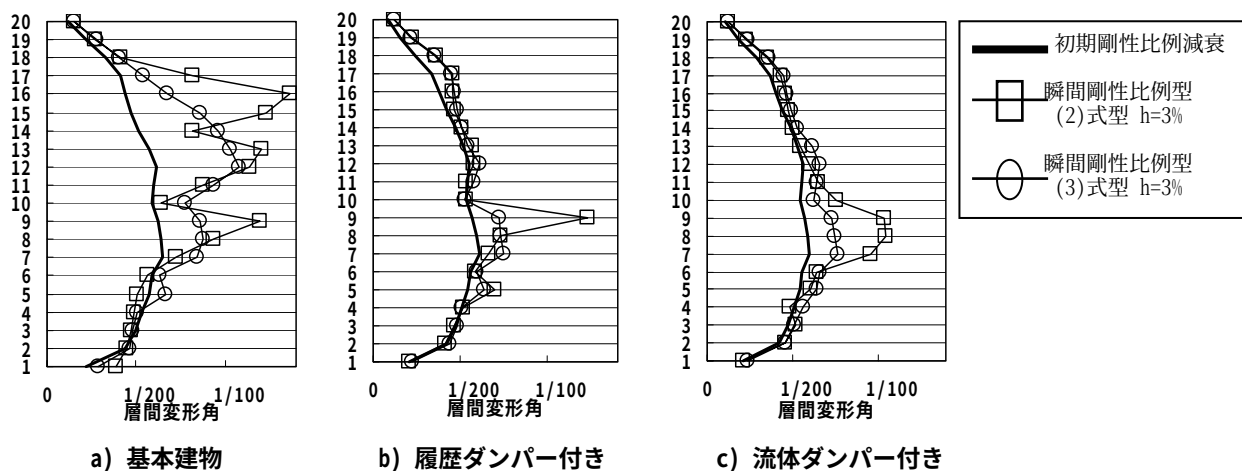
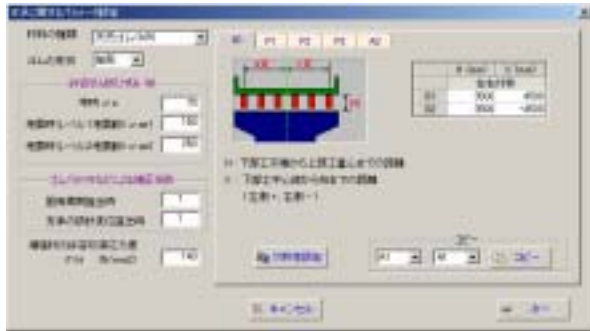


図7 応答最大層間変形角の比較

Version1.5



●簡単な操作で高度な解析を実現

- ・桁橋の一連の静的、動的非線形解析機能を完備
- ・分かりやすい画面構成で入力をサポート
- ・基本的な設計諸元から解析モデルを自動生成
- ・解析結果の豊富な出力機能
- ・報告書の自動作成機能

● 支承周りの設計機能を充実

- ・常時荷重から支承形状を自動設定
- ・免震支承の動的解析時の繰り返し計算の自動化

● $RESP-T^{(*)}$ とのデータ互換性

●道路橋示方書・同解説（平成14年3月）

道路橋支承便覧[改訂版] (平成15年9月発行予定) に対応

(*) *RESP- π* は弊社が開発しました汎用非線形解析ソフトウェアです。



支承形状決定画面

対応支承：固定、反力分散、LRB、HDR、任意バネ、HDR-S

対応橋脚：RC(矩形／円形／小判型)、任意 M-φ、M-θ

好評オプション機能：支承金物設計機能、橋脚補強設計機能（予定）

Ver1.5 リリースを記念して

04年6月末までキャンペーン価格で販売中！

お試し版や報告書例がダウンロードできます。

www.navi-design.com

すべり支承のモデル化に関する一提案

金山 亨¹⁾ 荒木 秀朗¹⁾

1) 株式会社 構造計画研究所 耐震技術部

1. はじめに

支承部の機能性および経済性を考慮して、新設の橋梁や既設橋梁の補強に機能分離型支承の採用が増えている。機能分離型支承の鉛直力の分担には一般的にはすべり支承が用いられており、最近ではすべり支承の摩擦抵抗力を減衰力として積極的に考慮しようとする研究が盛んである¹⁾。既往のすべり支承の実験結果から、摩擦抵抗力はすべり支承の動摩擦係数の変化に対応しており、動摩擦係数は設置面の材質、相対速度、面圧、すべり累積距離等に依存していると言われている。しかしながら、すべり支承の挙動を振動解析モデルで再現する場合、その解析モデルやエネルギー吸収性能の妥当性などに言及した研究は少ない。一般的にはすべり支承をバネでモデル化し、履歴特性を完全バイリニアで表現する例が多いが、初期剛性の設定により固有周期や剛性比例型の減衰に影響を与え、解析結果に妥当性を欠くことが懸念されている。これらの課題に対して、我々は新たな解析モデル化方法を提案し、すべり支承を有した橋梁の振動モデルについて言及する。

2. 数値解析モデル

既往のすべり支承の実験結果より、地震時に発生するすべり支承の摩擦抵抗力は、支承にかかる面圧、支承表面と接地面との相対速度、支承表面および接地面の材質に依存していることが分かっている。また、交番載荷を繰り返すことにより、すべり支承の表面が磨耗し、摩擦抵抗力が徐々に低下して行く現象も確認されている。実験毎にこれらの依存性に関して定式化されているが、支承構造に因るところも多い。我々は上記の依存性のすべり挙動の制御に取り込める仕組みを作成し、動的解析プログラムRESP-Tへの組み込みを行った。

また、組み込みにあたってはバネモデルですべり支承の履歴特性を表現するのではなく、運動方程式内で発生する力の項として評価することにした。これは、すべり支承を完全バイリニアのバネモデルで表現する場合、そこで評価されるバネ剛性が剛性マトリクスに反映されることにより、固有周期に影響

を与えることに加え、減衰をレーリー減衰等の剛性比例型で評価する場合にも影響を与えることになる。すなわち、固有周期および応答解析中の減衰が正しく評価されないため、実際の橋梁とは全く違った振動モデルを解くことになる可能性があるからである。したがって、支承と桁の間に相対速度が発生した場合のみに力が生じるような要素モデル（摩擦要素）を想定し、それを用いて振動モデルとした。摩擦要素は、初期に設定される質量、減衰および剛性の各マトリクスには一切、影響を与えず、構造物が動的挙動を示した時、すなわち、要素間に相対速度が発生した時に初めて抵抗力を発生させ、運動方程式内の力の項として評価される。上記のような考え方をを用いることによって、振動モデル上において、固有周期やレーリー減衰など解析結果に影響を与える、すべり支承の過度な剛性を設定しないようにした。

$$M^{t+\Delta t} \ddot{U} + C^{t+\Delta t} \dot{U} + K^{t+\Delta t} U = {}^{t+\Delta t} R - {}^{t+\Delta t} F \quad \dots \dots (1)$$

式(1)は運動方程式に摩擦抵抗力を組み込んだ力の釣合い方程式である。Mは質量、Cは減衰、Kは剛性で、橋梁の数値解析に用いる各マトリクスを表している。 $\ddot{U}$ 、 $\dot{U}$ 、Uは加速度、速度、変位ベクトルであり、 ${}^{t+\Delta t} R$ は外力(地震力)、 ${}^{t+\Delta t} F$ はすべり支承に生じる摩擦抵抗力を表している²⁾。図-1にすべり支承(摩擦)を概念的に表した要素モデルを、図-2にすべり支承の履歴特性を表す概念図を示す。

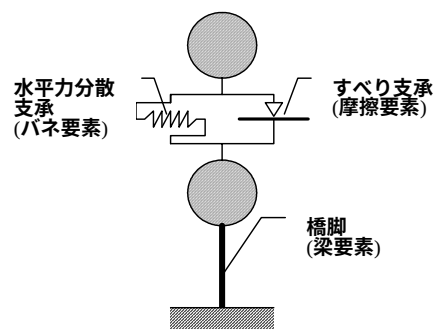


図-1. すべり支承（摩擦）要素モデル

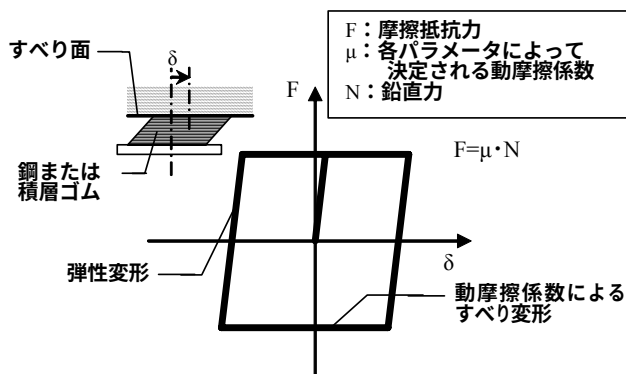


図-2. 履歴ループモデル

3. 依存性のモデル化

定式化したプログラムを動的解析プログラム R E S P - T に組み込み、強制的に変位を与え、履歴ループの性状を確認した。以下にその結果を示す。

図-3. は要素間の相対速度によるすべり支承表面に発生する動摩擦係数が変化する現象を表したものである。左図は要素間の相対速度と動摩擦係数の関係を表しており、右図はその特性を用いたときの要素が描く水平力と変位の履歴ループを示したものである。動摩擦係数の速度に対する依存性（以下、速

度依存性）は、速度の上昇に伴って動摩擦係数が下がる傾向を表している。ここで与えている変位は sin 波としており、最大振幅付近に近づくにつれ徐々に速度が遅くなる。最大振幅位置では一旦、速度が 0 になり、静摩擦係数に支配され、再び速度に依存した動摩擦係数による変形に移っていく。また最大振幅位置で変位が発生していない部分は支承にすべりが発生していない状態であり、その間の左右に移動する履歴部分がすべりを発生させている状態を表している。上述した結果より、最大振幅付近で水平力が増大し、かつ支承にすべり現象が生じている状態では水平力が低減されることが確認でき、摩擦抵抗力における速度依存性が再現できることを確認した。

仮定した面圧依存性のモデル図と履歴結果を図-4 に示す。摩擦係数の面圧依存性は、面圧が大きいほど摩擦係数が小さくなる現象を表現した。強制的に与えている変形は上述の速度依存性と同じ sin 波である。履歴結果より、面圧により履歴結果の描く面積が異なることが判る。履歴は、面圧が大きいほど水平力が大きくなっているが、これは面圧が大きいほど摩擦係数は小さくなるが、面圧を乗じた水平力としては大きくなる結果となっているためである。

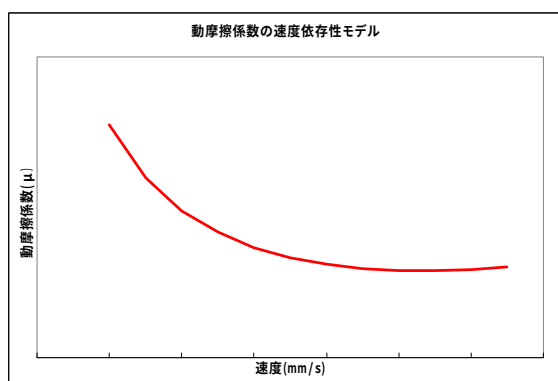


図-3. すべり支承履歴（速度依存性）

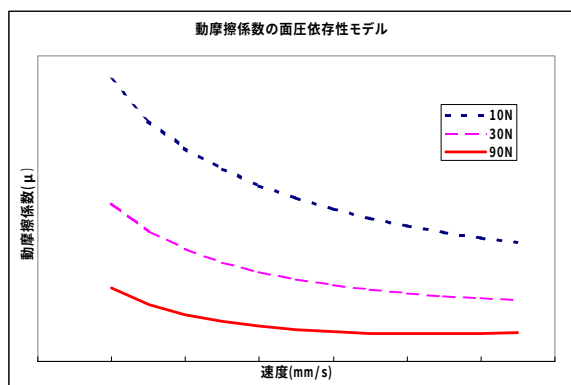


図-4. すべり支承履歴（面圧依存性）

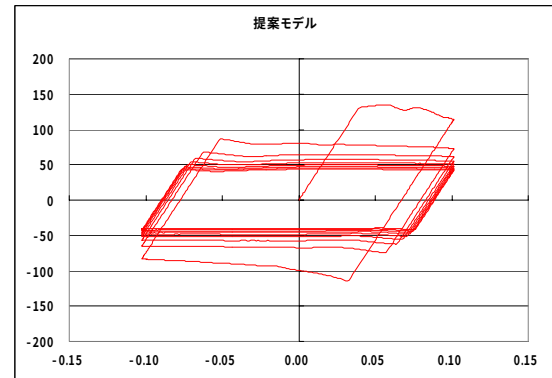
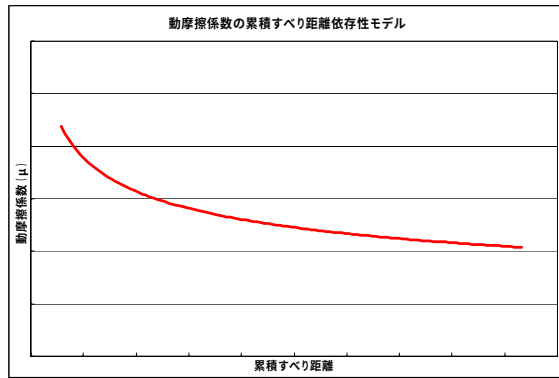


図-5. すべり支承履歴（累積すべり距離依存性）

図-5.は支承にすべり現象が発生した後、支承表面の磨耗により、動摩擦係数が低下して行く現象を表したものである。支承表面の磨耗を表現するために、ここではすべりが発生した累積の距離で表現することとした。左図はその累積すべり距離と動摩擦係数の関係を示した図であり、右図はその特性を用いたときに要素が描く水平力と変位の履歴を表したものである。累積すべり距離の増加に伴い、磨耗による動摩擦係数の低下が生じている現象を表している。履歴ループから分かるように、ループを描くたびに抵抗する水平力が低下しており、すべり距離が累積することにより動摩擦係数が低下して行く現象を表している。上述した結果より、すべりが発生した後、その累積した距離により、摩擦抵抗力が低下して行くという現象と支承にすべり現象が生じた以降の磨耗による抵抗力の低下をプログラムで再現できることを確認した。

4. モデル化の影響

これまでに述べたような摩擦抵抗 force に依存性を考慮できるプログラムを使って、すべり支承によるエネルギー吸収を考慮した場合における、橋脚への影響を検討した。解析モデルはすべり支承を有する機能分離型支承を想定して、以下のような条件で橋脚基部の塑性化状況を比較した。解析モデルは、すべり支承を完全バイリニアのバネ要素でモデル化した場合と摩擦要素を用いて動的挙動中の摩擦抵抗 force で評価する場合とでモデル化による違いを見た。また、応答解析で想定する減衰はレーリー減衰とした。

- ①すべり支承なし（水平力分散支承のみ）
- ②バネによるモデル化（低摩擦すべり支承： $\mu = 0.01$ で一定）
- ③バネによるモデル化（通常の摩擦すべり支承： $\mu = 0.1$ で一定）
- ④摩擦によるモデル化（低摩擦すべり支承： μ

$= 0.01$ で一定）

- ⑤摩擦によるモデル化（通常の摩擦すべり支承： $\mu = 0.1$ で一定）

図-6 にすべり支承の摩擦係数を低く（低摩擦時）設定した場合の橋脚の塑性化状況を示す（①②④）。設定した摩擦係数を下げることにより、応答結果はモデル①に近づくと考えられる。モデル④は想定した通り、応答がモデル①に酷似しているが、モデル②は、応答が抑制されていることが判る。これは完全バイリニアのバネ要素でモデル化したことにより、減衰の評価が過度に影響を与えたものと考えられる。

図-7 に、すべり支承の摩擦係数を一般的な値（通常摩擦時）に設定した場合の橋脚の塑性化状況を示す（①③⑤）。モデル⑤は、応答がモデル①よりも抑制される結果となっている。このことから一般的な摩擦係数を持つすべり支承がエネルギー吸収性能を有することがわかる。モデル③も同様の傾向を示しているが、こちらはモデル③よりも更に応答が抑制されている。これも先に述べた過度な減衰の評価が影響を与えているものと考えられる。

したがって、解析モデル上では、すべり支承を完全バイリニアのバネ要素ではなく、摩擦により発生する力としてモデル化する方が、すべり支承を有する橋梁の解析モデルを精度よく表現できていることが判る。バネによるモデル化において応答が抑制されている原因としては、初期剛性が粘性減衰に与えている影響が大きいと想定できるが、より詳しい検討が今後必要である。

5. まとめ

すべり支承を数値解析に取り入れる場合のモデル化の提案を行った。今回の検討により以下の結論を得た。

- ・ すべり支承のモデル化はバネ要素ではなく、運動方程式に摩擦抵抗 force の項として加える釣

合い方程式で表現した。

- ・ 数値解析中の速度、面圧、累積すべり距離の値を用いて摩擦係数の変化を考慮できるプログラムを作成した。
- ・ 摩擦係数が影響を受けるパラメータを特定し、かつ、定式化が可能であれば、短時間でプログラムに反映できる仕組みができた。

今後は、面圧、材質、相対速度と動摩擦係数の相関性についての検討を行っていく予定である。

参考文献

- 1) 水田, 橋本: ゴムとコンクリートのすべり摩擦を利用したすべり支承とその減衰効果, 構造工学論文集, Vol149A, pp.611~621, 2003年3月
- 2) RESP-T 理論マニュアル, 構造計画研究所

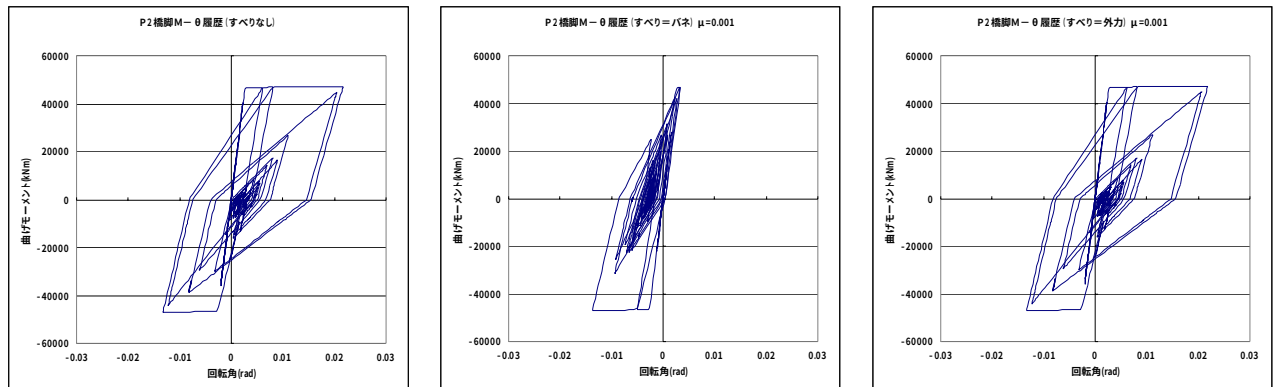


図-6. 低摩擦モデルでの橋脚基部の塑性化状況
(左図: ①すべり支承なし, 中図: ②バネモデル, 右図: ④外力モデル)

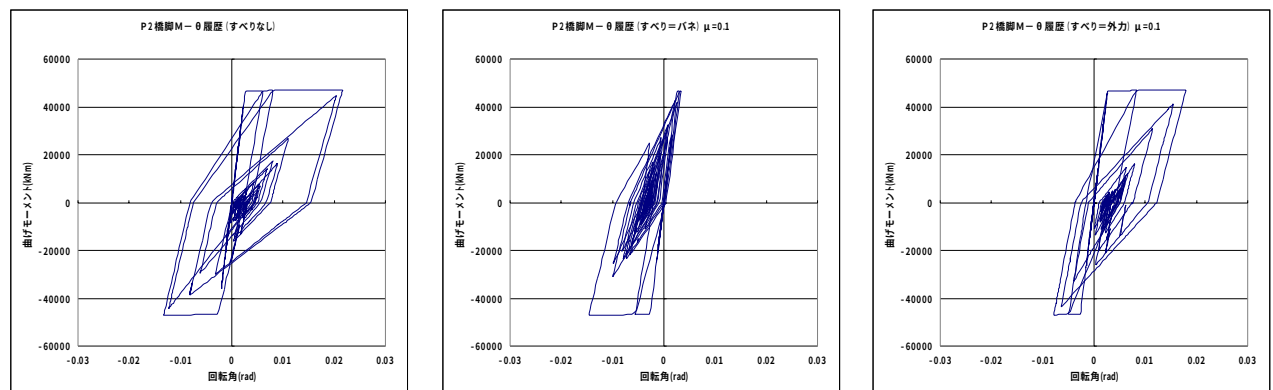
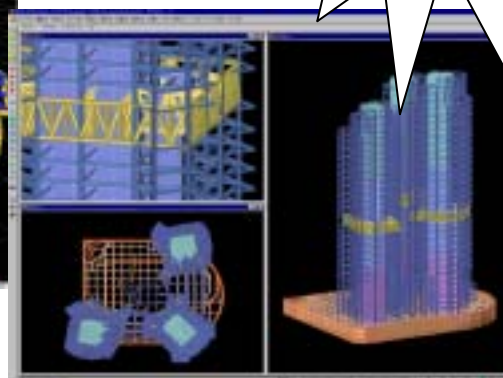
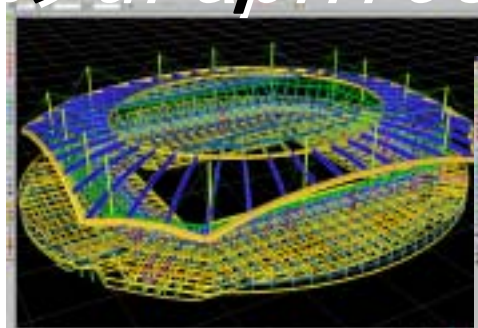


図-7. 通常の摩擦モデルでの橋脚基部の塑性化状況
(左図: ①すべり支承なし, 中図: ③バネモデル, 右図: ⑤外力モデル)

直感的なInterface 先端のGraphics機能

Ver.6 リリース
静的材料非線形解析
動的材料非線形解析



建設用構造解析システム

Modeling, Integrated Design & Analysis Software

MIDAS/ Gen

適用構造物：一般建物、競技場、工場、格納庫、鉄塔、その他の特殊構造物

CAD ライクのモデリングにより卓越した操作性と生産性を実現

各国 4000 余りのプロジェクトに利用された信頼と実績

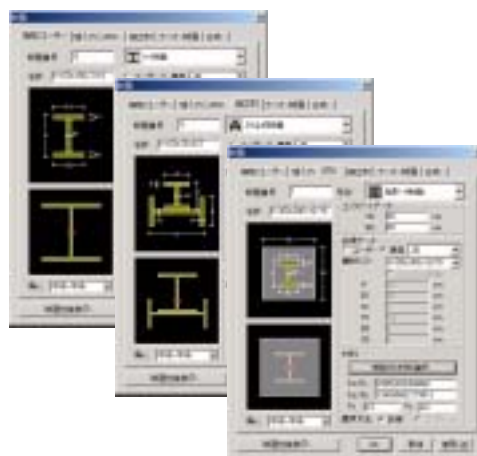
日本建築基準法に対応 (地震・風荷重、断面算定等)

MS-Excel、AutoCAD DXF、STAN/3D、STAAD/Pro、NASTRAN 等との互換

便利な建築専用機能 (建物モデル自動生成機能、鉄骨断面・鉄筋 DB 内蔵等)

多彩なモデル表現 (レンダリング、透視図、ウォークスルー機能等)

Multi-frontal Solver による計算速度の高速化 (Sky-line Solver に比べ 10~20 倍)

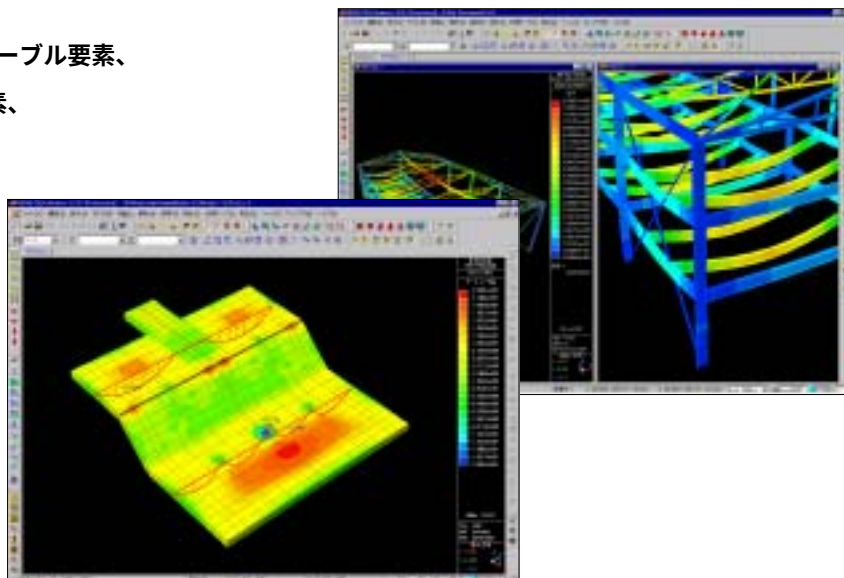


■ 有限要素

トラス要素、引張/圧縮専用要素、ケーブル要素、
梁要素、テーパ断面梁要素、壁要素、
平面応力要素、板要素、
平面ひずみ要素、ソリッド要素、
免震制振要素 他

■ 解析機能

静的線形解析、線形座屈解析、
固有値解析、時刻歴応答解析、
応答スペクトル解析、
水和熱解析、幾何学的非線形解析、
施工段階解析、静的非線形解析、
断面算定 他



MIDAS は MIDAS IT 社の商標です。



解析雑誌 Vol.12 読者アンケートのお願い

先日、弊社の社内イベントに東京大学大学院経済学研究科の藤本隆宏先生をお招きして、ご講演をいただきました。トヨタに代表される日本の自動車産業の国際的な競争力の根幹は、地道な KAIZEN 努力によって培われた生産現場の強さ、いわゆる深層の競争力であったというお話がありました。やはり底力が肝心ということかと再認識した次第です。

今後の本誌が皆様にとって有益なものとなりますよう、是非とも本ページ下のフォームにご意見・ご要望をご記入の上、下記番号まで FAX にてお送りください。e メールにて同内容をお送りいただいても結構です。ご協力をお願いします。

尚、本誌および弊社へのお問い合わせは右ページに記載の TEL、FAX、E メールで承っております。

お名前			
会社名			
電話番号		FAX 番号	
E メール			

本誌の内容について全般的な感想をお聞かせください	☐ 業務上参考になった ☐ 業務とは直結しないが興味深かった ☐ あまり面白くなかった ☐ 主旨が理解できない ☐ そのほか：
特に興味深かった記事・報文があればお書きください	
今後の刊行についてご意見をお聞かせください	☐ 次号があるならまた読みたい ☐ 次号はもっと高度な内容を ☐ 次号はもっと入門的な内容を ☐ 次号以降には期待できない ☐ 定期刊行をのぞむ（年____回程度） ☐ そのほか：
次号以降の内容に関してのご要望があればお聞かせください	分野： ☐ 建築 ☐ 橋梁 ☐ 地盤 ☐ 地下構造 ☐ 上下水道 ☐ 河川 ☐ 港湾 ☐ 環境 ☐ 地震防災 ☐ そのほか（ ） テーマ：
本誌と関連の深い K K 解析ホームページについてお聞きします	☐ 前から見ていた ☐ 本誌で知ってアクセスした ☐ まだ見ていない ホームページのご感想を一言：
そのほか本誌あるいは業務内容などに関して、ご意見・ご要望・お問い合わせなどありましたらお書きください	

FAX 0 3 - 5 3 4 2 - 1 2 3 6 構造計画研究所「解析雑誌」編集担当行

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

〒164-0011 中野区中央 4-5-3

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

Eメール: kaiseki@kke.co.jp

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ち寄りください。

URL: <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。

各地の支社、営業所でもお問い合わせを承っております。

●大阪支社 06-6243-4500 ●名古屋営業所 052-222-8461

解析雑誌

Journal of Analytical Engineering Vol.12 2004.5

(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。

Windows は米国マイクロソフト社の登録商標です。

Journal of Analytical Engineering,
Vol.12, 2004.5

Kozo Keikaku Engineering, Inc.