# 解析雜誌

Vol.46 2021.10

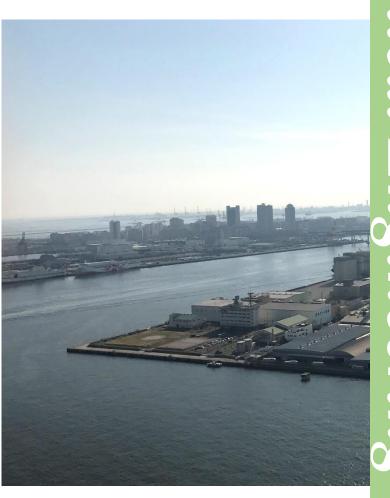
ournal o

# **Topics**

- ●計測×解析による構造物の詳細評価
- ●地盤問題への薄層要素法の活用
- ●ADINA, DIANA, LS-DYNA によるコンクリート 構造物の非線形 FEM 解析
- ●解析アラカルト

# **Technical Reports**

- ●流体構造連成解析による構造物の挙動評価
- ●流体構造連成解析による渦励振の再現
- ●せん断破壊後の軟化特性を考慮した構造解析
- ●せん断破壊後の挙動を考慮した地中構造物の 構造解析





構造計画研究所 KOZO KEIKAKU ENGINEERING Inc.

### 3年ぶりの復刊

構造計画研究所 防災・環境部長 與猶 竜

前回の発行(Vol.45 2018年2月)から3年ぶりの復刊にあたり、3年間を振り返ると自然災害や新型コロナウイルス感染拡大など多くの災禍に見舞われた激動の時代と言えるのではないでしょうか。

今も続く新型コロナウイルス感染拡大は、2020年1月に国内で初めて新型コロナウイルスの感染者が確認され、私たちの生活を一変させました。人と人との接触を避けることが求められ、テレワーク、オンラインでの会議やセミナーが普及し、遠くのお客様との打合せが簡単にできるようになった反面、友人やお客様と対面でお会いしお話する機会が激減しています。皆様の働き方も大きく変化したのではないでしょうか。このまま感染拡大が収まってくることを願っています。

自然災害で記憶に残るのは、2018年9月6日に発生した北海道胆振東部地震です。北海道胆振地方中東部を震央として発生したマグニチュード6.7の地震で、死者42名、重軽傷者は762名に上り、管内のほぼ全域で電力が止まる「ブラックアウト」が起きるのは国内で初となりました。同じ頃、私は経済産業省電力・ガス取引監視等委員会に出向しており、「ブラックアウト」の対応などに追われ、改めて電気の有難さと地震災害の怖さを考えさせられました。

また、ここ数年、水害は甚大な被害をもたらしています。特に令和2年7月豪雨では、九州、中部、東北地方を始めとした広範囲の地域において多くの人命や家屋への被害のほか、ライフライン、地域の産業等にも甚大な被害をもたらし、新型コロナウイルス感染症の影響下において、初めての大規模な災害となりました。水害による被害は今年も続いており、今後も風水害への備えはしっかり行う必要があります。

新型コロナウイルス感染症の影響下であっても自然災害は待ってはくれません。いつ発生するか分からない災害に対してしっかりと備えることが重要となります。当社では、地震動評価、災害リスク評価、各種構造物の耐震安全性検討、河川水位予測など防災・減災に関わる様々な課題に取り組んでまいりました。お客様のご要望にお応えしていくことは無論ですが、お客様の業務の合理化や高度化のために是非知っておいて頂きたい技術を発信することを目的として、本誌は3年ぶりに復刊いたしました。今後も、自然災害に対する防災・減災関連技術を高度化し、より安全・安心な社会に貢献できるよう、精進して参りたいと思っております。

何卒、今後とも皆様の温かいご支援を賜りますようお願い申し上げます。

# 解析雜誌 Vol. 46 2021.10

巻頭言 3年ぶりの復刊 防災・	環境部長 與猶 竜	02
Topic 1  ● 計測×解析による構造物の詳細評価		04
Topic 2		
<ul><li>地盤問題への薄層要素法の活用 環境振動/基礎ばね算定</li></ul>		06
Topic 3		
● ADINA,DIANA,LS-DYNA による コンクリート構造物の非線形 FEM 解析		10
Topic 4		
● 解析アラカルト 地震時の地盤沈下/土木・建築一体構造の耐震補強検討/		12
建設前後の風・水環境変化		
Technical Report 1		
<ul><li> ● 流体構造連成解析による構造物の挙動評価</li></ul>	佐々木 義志	14
<b>Technical Report 2</b>		
● 流体構造連成解析による渦励振の再現	<i>"</i> **	16
Technical Report 3	佐々木 義志	
<ul><li>せん断破壊後の軟化特性を考慮した構造解析</li></ul>		18
	山内 春絵	
Technical Report 4  ■ せん断破壊後の挙動を考慮した地中構造物の構造解析	折 山内 春絵	20
Kaiseki Portal / From Editors		23

# 計測×解析による構造物の詳細評価

センサーやカメラ等による構造物のデータ計測に何らか関わられている方は昨今増えていることと 思いますが、取得したデータはどのように活用されているでしょうか?

構造計画研究所(以後、KKE と称します)は、取得データを現状分析や将来予測に繋げるために多様な解析・分析手法を活用していますが(下図)、ここでは力学的手法による構造物の詳細評価についてご紹介します。

#### 実際の場やモノから取得されるデータ

(加速度、変位、歪、画像、動態、温度、 風向・風速、水位、空間形状・・・)



現状の定量把握と再現、将来予測、対策効果検証



### 力学的手法

構造解析、振動解析 地盤解析、流体解析 電波伝搬·電磁界解析

原因と結果の間のプロセスを 理論的に解き明かす。 不確実性の低い物理問題向き

#### 統計·経験的手法

ビッグデータ分析 データマイニング 機械学習、AI、リスク分析 モンテカルロシミュレーション マルチエージェントシミュレーション

> 原因と結果を統計的・経験的 に関連づける。 不確実性の高い社会問題向き

計測データを現状分析や将来予測に繋げる手法

#### ● 構造解析とデータ計測

構造解析は、モデル化した範囲であれば全体から細部に至るまで定量評価可能で、外力条件等を変えたパラメータスタディも容易ですが、明示的な形状寸法や材料物性値が必要であり、通常はそれらが記載されている設計図書を基にモデル化しています。このため設計図書から正確で十分な情報が得られない場合や、経年劣化等により実物と設計の乖離が大きくなってしまった場合は現況評価が難しくなります。

一方、センサーやカメラによる構造物のデータ計測では、設計や過去の経緯がどうあれ、最新状態に関するデータが継続的に取得できるので、計測開始以降の変化を監視することも可能ですが、計測できる成分項目(加速度、歪みなど)や直接計測できる場所は通常限定的で、計測できない成分や場所、あるいは全体挙動に関する評価は後処理に委ねられます。

#### ● 構造解析モデルの同定

計測データとの対比により構造解析モデルを可能な限り実物の状態に近づけることを、ここでは「同定」と呼ぶことにしますが、同定された解析モデルを用いることにより、現況評価や将来予測のリアリティが高くなり、不具合が検知された場合は合理的な対策検討が可能になります。

同定作業には、解析技術者の経験知とトライアンドエラーの他、計測値と解析値の差分を分析して 解消していく数理学的手法も取り入れています。

#### 「計測×解析」評価事例

計測データから同定した構造解析モデルを用いた構造物の詳細評価事例を以下に示します。

#### ① 計測困難な位置での応力集中検討

課 題:地盤沈下による水道管の応力集中確認

解決策:地上架管の計測によって解析モデルを

地下埋設管の応力集中を算定

同定し、同定した解析モデルによって

結果:埋設管の応力集中と劣化進行を監視

#### ② 工場内の床・設備の環境振動評価

課 題:機器設置前に設置後の環境振動評価

解決策:機器設置前の計測によって解析モデル

を同定し、同定した解析モデルにより

機器設置後の環境振動評価を実施

**結 果**:工場の床は機器に適するか事前把握

#### ③ 構造物補強効果の確認

課 題:橋梁桁の補強効果の確認

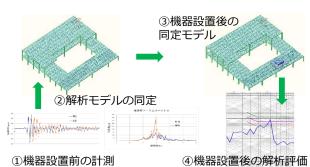
解決策:補強前後の振動モードを計測し、同定

した解析モデルのパラスタにより補強

前後のモード比で補強効果を確認

結果:補強による桁剛性変化を評価

# ①地上部分に計測によって解析モデルを同定 ②同定モデルより埋設部分の応力集中を評価



④機器設置後の解析評価

# 補強位置 ひずみ たわみor ①補強前後に計測 固有モード比は構造の 固有特性である ③FEMによる補強前後に解析

#### ④ 異常荷重の監視

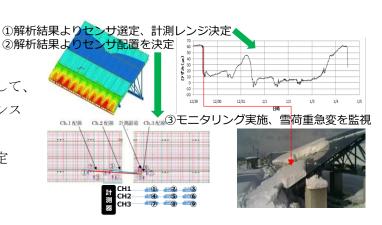
課 題:太陽光架台の風雨雪被害の監視

解決策:太陽光架台に風雨雪対策の一環として、

解析検討を基づいてモニタリングシス

テムを構築して異常荷重を監視

結果: 架台の異常荷重監視システムを決定



平成29年度 電気施設保安技術高度化の評価・検証事業の成果の一部です。

### 地盤問題への薄層要素法の活用 環境振動/基礎ばね算定

Super FLUSH/3Dは、地盤と構造物の動的相互作用解析プログラムです。

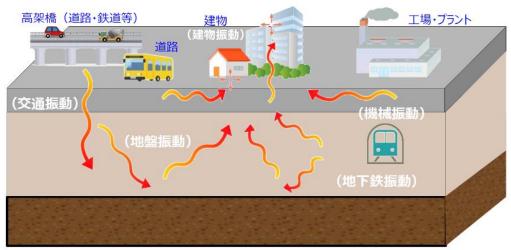
構造物の基礎形状や地盤の不整形性を3次元的に評価するために有限要素法のみを用いると、モデル規模が大きくなり、解析前後の作業や計算時間が増大しがちですが、Super FLUSH/3Dは地盤の半無限性を「薄層要素」によって考慮することで、高精度の解析を効率的に行うことができます。

ここではこの薄層要素法の活用についてご紹介します。

Super FLUSH/3Dは株式会社構造計画研究所と株式会社地震工学研究所との共同開発商品です。

#### ● 環境振動

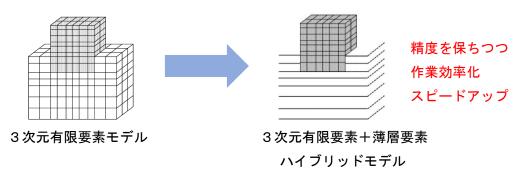
自動車や列車等の走行時に発生する交通振動、工場での大型機械稼働時に発生する機械振動、建物内部で人の歩行や運動によって発生する床振動など、地盤や建物を介して我々が日常感じる振動は「環境振動」と呼ばれます。(空気を介して伝わる波動は『騒音』に分類し、また別の機会の話題とします)



様々な環境振動

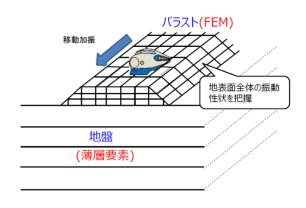
高速大量輸送を可能にするための道路の拡張や列車の高速化、あるいは生産性や品質向上のための 工場のオートメーション化など改善施策のスムーズな導入と運用のために、それらに伴って発生する 環境振動が近隣に及ぼす影響は十分に検討しておくべきです。

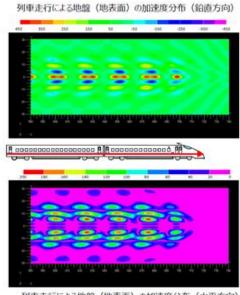
KKE は、耐震問題で培ってきた地盤と構造物の相互作用解析の経験を活かし、広範囲の地盤モデル 化が必要になる環境振動の影響評価と対策検討のために、有限要素法と薄層要素法をハイブリッドで 用いた解析コンサルティングをご提案しています。以下に適用事例の概要をご紹介します。



#### ① 列車通過時の周辺地盤への影響と対策検討

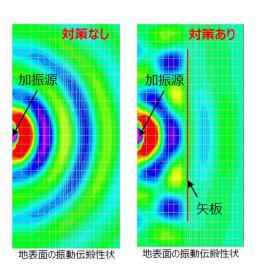
列車走行に伴う軌道周辺地盤の振動性状の検討、 鋼製矢板による対策検討を3次元ハイブリッド (有限要素+薄層要素)モデルで実施しました。

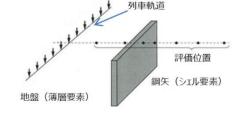




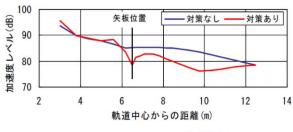
列車走行による地盤(地表面)の加速度分布(水平方向)

列車による環境振動を地中に矢板を埋めて抑制す 検討も実施しています。 :る



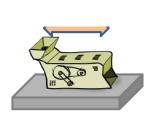


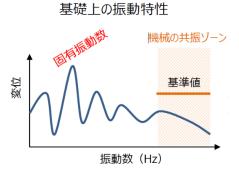
#### 矢板により加速度レベルが低減!!

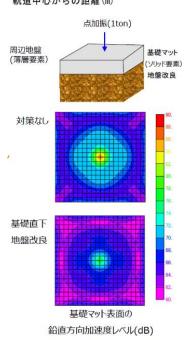


# 工場内で稼働する機械振動に対して、振動特性に 応じた基礎や地盤との共振リスク、基礎上の基準値 の確認、振動低減効果を左図のハイブリッドモデル で検証しました。

② 工場から伝搬する機械振動の影響評価







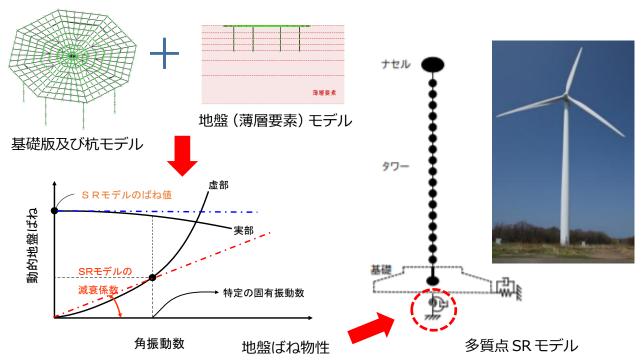
#### ● 基礎ばね算定

構造物の設計において、質点系モデルや有限要素モデルによる解析を実施する際、地盤部は構造物と地盤との動的相互作用を考慮した地盤ばねで表現する手法が多く用いられます。地盤ばねの剛性および減衰は「建物と地盤の動的相互作用を考慮した応答解析と耐震設計(日本建築学会)」や「道路橋示方書・同解説(日本道路協会)」に記されている算定式がありますが、KKEでは薄層要素法を用いた精度の高い合理的なばね値評価をご提案しています。

以下に適用事例の概要をご紹介します。

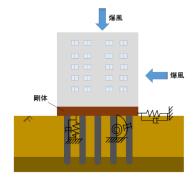
#### ① 風力発電設備(耐震性評価)

薄層要素法により算出した地盤ばね物性をSRモデルに適用し、設計の合理化を図っています。

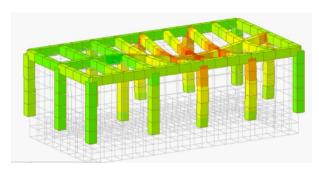


#### ② プラント構造物(耐衝撃設計)

爆風圧荷重を受けるプラント構造物の杭基礎の地盤ばね値も薄層要素法により算定しました。 詳細は「構造工学シリーズ27 爆発・衝撃作用を受ける土木構造物の安全性評価 -希少事象に備える— (土木学会)」の解析例2に記載されています。



解析対象 概念図



上部構造 解析モデル変形図

### 地盤と構造物の2次元動的相互作用解析プログラム

# SuperFLUSH/2D for Windows Ver6.2

#### 特長

- 1) 地盤と構造物の2次元動的相互作用解析プログラム SuperFLUSH/2DのWindows版です。
- 2) 様々な有限要素法プリ・ポストプログラムでインターフェースが取られている MSC.NASTRAN の入力データをメッシュデータとして利用する事が可能です。
  - 解析結果を MSC.NASTRAN の解析結果ファイル形式で エクスポートする事も可能です。
- 3) 波形図、応答スペクトル図、伝達関数図などの解析結果図 を簡単な操作で作成可能です。
- 4) 国際単位系でのデータ入力や解析結果の図化が可能です。

#### 機能概要

- ・複素剛性を用いた振動数領域における複素応答解析
- ・等価線形法により地盤の非線形性を考慮
- ・要素タイプ
- 平面歪要素、ビーム要素、剛体ビーム要素、平面応力要素、 並進ばね要素、ジョイント要素、ダッシュポット要素
- ・側方境界条件 エネルギー伝達境界、粘性境界
- · 底面境界条件 粘性境界、固定境界
- 外乱条件

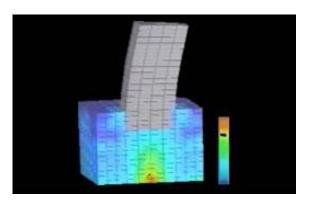
鉛直伝播波動(水平方向、鉛直方向同時入力可能)、 進行波、点加振

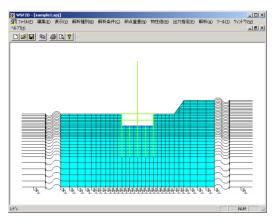
※液体要素、回転ばね要素を用いた解析、擬似3次元解析も、 支援ツールを利用して解析可能

#### 出力項目

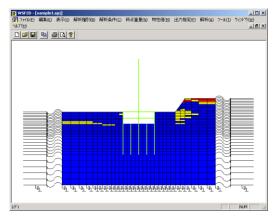
以下のファイル形式で解析結果を出力する事が可能です。

- ・CSV 形式(時刻歴、伝達関数、応答スペクトル) 加速度、速度、相対変位、応力、歪、ビーム断面力
- ・MSC.NASTRAN 解析結果ファイル形式 加速度、速度、相対変位、応力、歪、 ビーム断面力の最大値出力

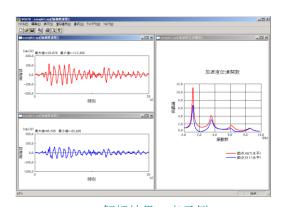




基本画面



収束誤差の出力



解析結果の表示例

# SuperFLUSH/3D

サブストラクチャ法による3次元動的相互作用解析 プログラムです。地盤の半無限性を「薄層要素」に よって考慮することで、効率的で高精度な解析を実 現しています。

SuperFLUSH/2D、SuperFLUSH/3D は株式会社構造計画研究所と株式会社地震工学研究所との共同開発商品です。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。

Windows は Microsoft Corporation の登録商標です。 MSC/NASTRAN は、エムエスシーソフトウエア株式会社の登録商標です。

# ADINA, DIANA, LS-DYNA にょる コンクリート構造物の非線形 FEM 解析

KKE では、これまで有限要素法(FEM)を用いる解析の場合、主に ADINA (K.J.Bathe博士 / ADINA R&D社)を用いてきましたが、コンクリート構造の解析機能が充実した DIANA (DIANA FEA社)、衝撃荷重問題に強い LS-DYNA (LSTC社) などの活用機会も増えています。これらを用いたコンクリート構造物の非線形解析についてご紹介します。

表記の社名および製品名は、各社の登録商標または商標です。

#### ● FEM解析プログラムの比較

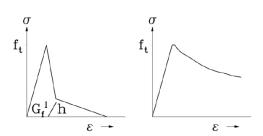
コンクリート構造物用の機能に着目したADINAとDIANAの比較を下図に示します。

	ADINA	DIANA	前川-福浦モデルを含む、豊富なモデル
ひび割れ モデル	直交固定ひび割れ モデルのみ	豊富なモデルから 選択可能	から選択が可能。 全ひずみ 回転ひび割れ
離散 ひび割れ	×	〇 界面の剥離・抜出 しをモデル化可能	分散ひび割れモデル 全ひずみ 直交固定ひび割れ
鉄筋の モデル化	△トラス要素/平 面要素でモデル化	〇埋込鉄筋要素 付着すべり考慮可 能	― 多方向固定ひび割れ
収束しない 場合の処理	計算停止	次ステップに繰り 越して継続可能	前川-福浦 多方向ひび割れ
特徴	汎用性・柔軟性	コンクリートに特 化した豊富な機能	離散ひび割れモデル

ADINAとDIANAの比較表

ADINA の特徴は多様な問題に適用できる汎用性です。要素、拘束条件などの柔軟性が高く、KKEでも、コンクリートの非線形の他、鋼材の非線形、有限変位、座屈、接触、流体連成など、様々な対象物や現象をモデル化してきました。人の血管の弁の動きを解析したこともあります。

DIANAの特徴はコンクリート構造物の解析に特化している点です。上図にも示したように、特にひび割れモデルは日本国内で提案されたものも含め豊富に組み込まれており、その他、離散ひび割れ、埋め込み鉄筋要素、鉄筋の付着すべりなどの機能もユニークです。コンクリート標準示方書にも対応しており、示方書記載の応力ー歪み関係や損傷評価指標の出力機能も有しています。



(g) JSCE softening (h) JSCE stiffening

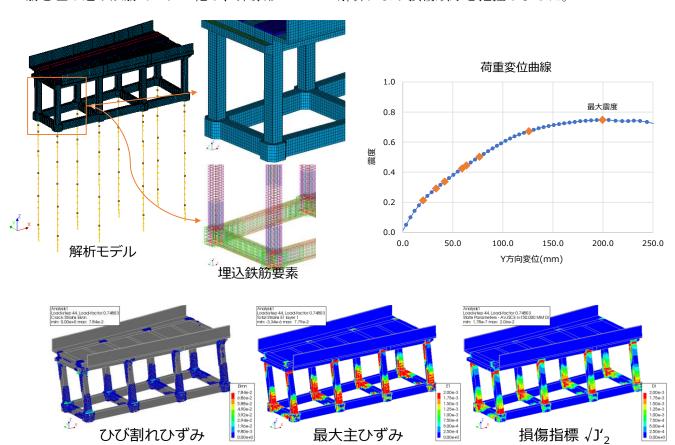
コンクリート標準示方書の応力ー歪関係

LS-DYNAの特徴としては、落下や衝撃など計算が収束しにくい問題も幾何学的非線形を考慮した陰解法で安定に解ける点が挙げられます。その他、流体構造連成問題への活用機会も増えています(本誌のテクニカルレポートをご参照ください)。

問題に応じて最適なプログラムを選択して検討した事例を二つご紹介します。

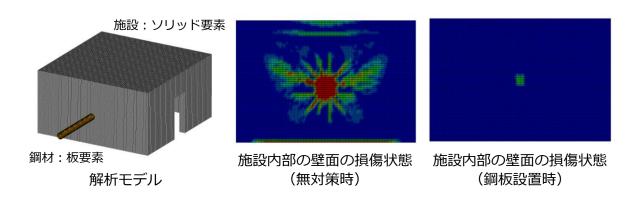
#### ● DIANAによる鉄道高架橋のFEM解析

鉄道高架橋の耐荷力および損傷順序を確認した事例です。コンクリートを3次元ソリッド要素、鉄筋を埋め込み鉄筋でモデル化し、非線形Push-Over解析により損傷順序を把握しました。



#### ● LS-DYNAによる飛来物の激突解析

竜巻により飛散した鋼材が居住施設の壁面に衝突した際の損傷評価を実施した事例です。FEMモデルを用いた衝突解析を実施することにより、現況での壁面の損傷範囲を把握し、施設内部への影響を抑制するための対策(鉄板設置)の有効性を検証しました。



# 解析アラカルト

ここまでにご紹介した以外にも、お伝えしておきたい解析手法やサービスがあります。

#### ● 地震時の地盤沈下

FLIP (FLIPコンソーシアム) に組み込まれたカクテルグラス要素を用いて透水を考慮した液状化解析を行うことで、間隙水圧の上昇および消散とそれに伴う地盤沈下量を評価できます。これを下記の試解析で確認しました。

解析モデルは図1の1次元モデルとし、砂層を液状化対象層とした。使用物性値を表1に、想定N値より 算出した液状化強度をターゲットとした要素シミュレーション結果を図2に示す。地震動は道路橋示方書 のレベル2 地震動(図3)を使用し、地震動250秒間および地震後4000秒間を評価対象とした。

解析結果として、地震時および地震動後の過剰間隙水圧比を図4に、地表面の沈下量を図5示す。

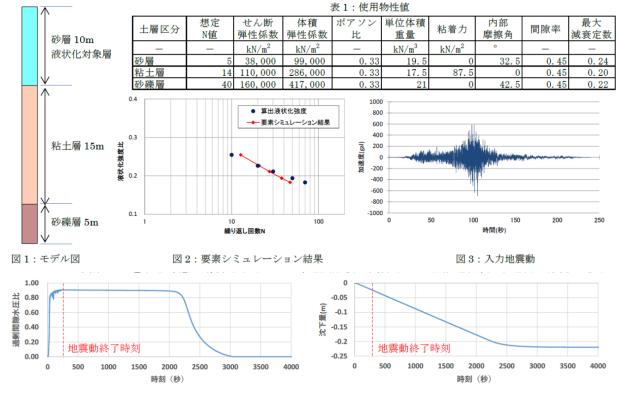


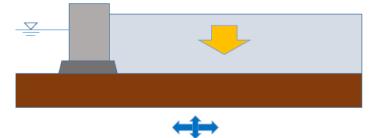
図 4:過剰間隙水圧比時刻歴図

図 5: 地表面沈下量時刻歴図

他方、非液状化層の構造物周辺領域における「揺すり込み沈下」現象は、上記とは発生メカニズム が異なります。 2 次元有限要素モデルで静的自重解析と地震応答解析を実施し、地盤に発生する繰り

返しせん断力を得て、累積損傷度理論 により評価しています。

> 常時解析+地震応答解析による 揺すり込み沈下予測



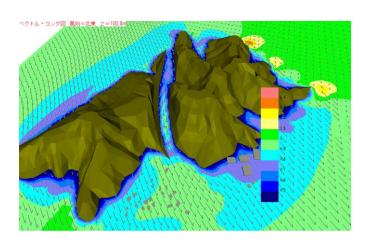
#### ● 土木・建築一体構造の耐震補強検討

上部に管理棟や機械室を有する排水機場や、低層部に鉄道軌道が入る駅ビルなど、建築基準と土木 基準の適用箇所が混在する構造物の耐震補強検討には、KKE の解析部門と建築の構造設計部門が共同 で対応しています。

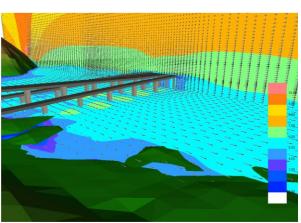
KKE に土木設計部門はありませんが、解析部門には橋梁、鉄道構造物、河川構造物、上下水道施設、エネルギー施設などを対象にした多様な解析実績があります。他方、KKE は元々建築の構造設計事務所として創業していますので、建築の構造設計部門の耐震診断や補強設計実績も豊富です。土木・建築一体構造に対してユニークで強力なタッグを組んでお応えしています。

#### ● 建設前後の風・水環境変化

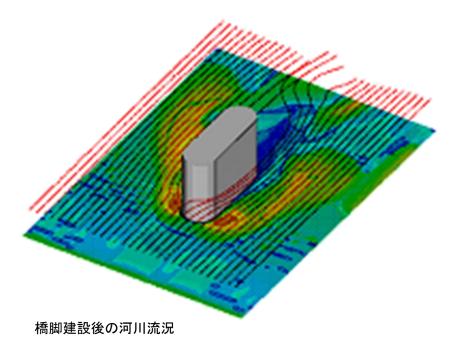
道路や橋梁の建設後の周辺地域の風環境変化(通風悪化、増風地域の発生など)を、事前に3次元モデル空間内における流体解析で評価しています。同様に、橋脚の建設や工作物の設置等による河川の流況変化(堰上げ・落込み流・偏流など)や海流の変化も評価可能です。



道路建設後(切土)後の風環境



高架橋周辺の風速分布



# 流体構造連成解析による構造物の挙動評価

構造計画研究所 防災・環境部 佐々木 義志

キーワード: 有限要素法 流体-構造連成解析 LS-DYNA

#### 1. 漂流物の衝突による鋼製柱の損傷評価

近年、漂流物や走錨した船舶などが空港・港湾施設 へ衝突し被害を及ぼす事例が増加している。特に施設 の重要な箇所や施設へのアクセスルートに衝突し、こ れらの機能が失われることでストック効果が喪失する ことが社会的な問題となっており、その対策が急がれ ている。

図1は海上に設置された構造物が漂流物の衝突により損傷することを想定した計算事例である。構造物はその基部が固定された中空の円形鋼製柱とし、直径2m、高さ20mである。漂流物は4.8m×5.2m×12mの直方体型とし、質量が50t程度となるように調整した。鋼製柱と漂流物はどちらもシェル要素によりモデル化を行い、損傷を考慮するためにバイリニア型の非線形特性を適用している。流体部分は74m×40m×20mの範囲をオイラー要素でモデル化し、そのうち底部から9mの範囲に水を充填することで、水と空気の二相系を表現している。

流体と漂流物、鋼製柱の相互作用を考慮するために、ALE 法を適用した解析を実施する。また、流速を与えるために、図1に示すように境界に速度2m/s の流入境界を与えている。これに加え重力加速度および漂流物と鋼製柱の接触を考慮することで、水に浮いた漂流物が流され、 鋼製柱に衝突する現象を表現する。解析はLS-DYNA により実施した。

図2は解析終了時の変形状態である。本図より、漂 流物の衝突により鋼製柱が水中から折れ曲がり、かつ その円形断面が大きく潰れる変形を示していることが 確認できる。

図3は鋼製柱に発生した塑性ひずみのコンター図である。塑性ひずみは主に柱の基部と中央部に発生している。漂流物が鋼製柱に衝突すると柱の全体曲げモードが発生するため、柱基部にモーメントが集中し、特に引張側に相当する部位に損傷が発生する。また、漂流物の衝突点近傍では柱の断面形状が大きく潰れる局所的な変形が発生する、したがって、鋼製柱の円周方向全体に渡って、柱の面内座屈による損傷が発生する。

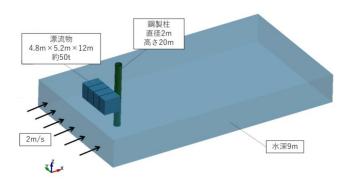


図1 流体-構造連成解析による漂流物の衝突問題

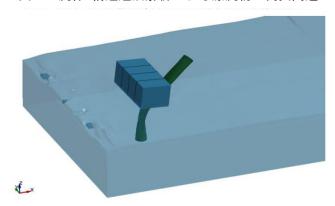


図2 解析終了時の変形状態

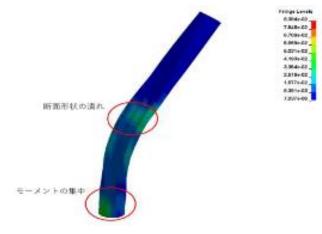


図3 鋼製柱の塑性歪みコンター

# 2. 砂防堰堤の 設置された河道における流下シミュレーション

我が国では激甚化する豪雨により、河川の氾濫や堤防の決壊といった水害が毎年のように発生しており、 治水に対する関心が高まっている。例えば、土石流への対策では砂防ダムを設けることで比較的大きな砂礫を捕捉し、下流域の被害を抑制することができる。しかしながら、砂礫の量が多いと河川の流下能力を減じるため、砂防ダムには一定の流下能力を維持することが求められる。

図4は河道に透過型の鋼製砂防堰堤を設置した場合における流下シミュレーションを実施した事例である。堰堤は直径500mmの鋼管を組み合わせたものであり、高さは7m、勾配が5°の河道に設置されていると仮定した。鋼管の間隔は1.5mであり、流下した水はこの間隙を抜けていく。また、透過型堰堤の両端から0.75mの間隔を空けて不透過型の堰堤を模擬した構造物を設置した。砂礫は一辺500mmの立方体を仮定し、堰堤の上流にランダムに配置している。モデル化は河床と堰堤をシェル要素、砂礫をソリッド要素とし、河道・堰堤と砂礫の接触を考慮している。

河川を流下する水はオイラー要素でモデル化し、解析開始と同時に水深 1m の水が流速 8m/s で流入する条件とした。解析ソフトウェアはLS-DYNA を適用し、ALE 法による解析を行うことで水と構造物の相互作用を考慮している。

図5は解析終了時における 河道内 の状況である。 本図より、堰堤が存在することにより水が通過できる 正味の 断面積 が狭まるため、堰堤付近で水深が深く なっていることが確認される。また、河床付近では流 速が水面に比べて落ちることから、堰堤付近に砂礫が 蓄積する結果となっている。

図6は同条件で砂礫がない場合の流下シミュレーションを実施した結果である。図5の結果と同様に堰堤付近では水深が深くなっている傾向を確認することができる。一方で、砂礫がない分流下能力が高く、図5に比べて水深は浅めである。

これらのことから、砂礫が堰堤付近に蓄積することにより流下能力が低下し、堰堤付近の水深が深くなるという現象を表現できることが確認できる。

LS-DYNA は LSTC 社が開発・サポートする構造解析ソフトウェアです

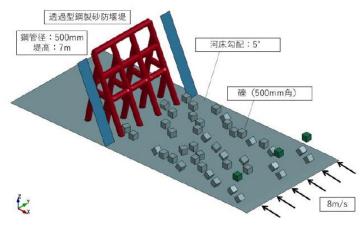


図4 堰堤を設置した河川の流下シミュレーション

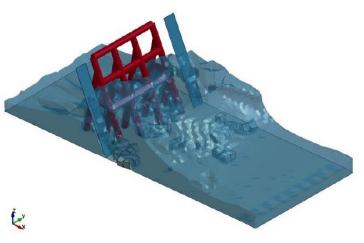


図5 解析終了時の河道内の状況

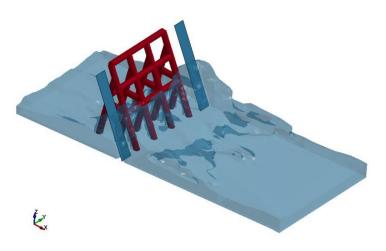


図6 解析終了時の河道内の状況(砂礫なし)

# 流体構造連成解析による渦励振の再現

構造計画研究所 防災・環境部 佐々木 義志

キーワード: 有限要素法 流体-構造連成解析 LS-DYNA 渦励振

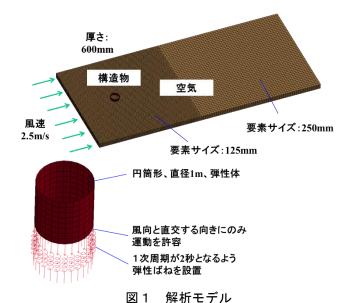
一般に、流れのある流体中に物体を置くと、物体から周期的に渦が発生し流れと直交する方向の振動を励起する原因となる。これは渦励振と呼ばれる現象であり、過去、アメリカのタコマナローズ橋がこれにより崩落している。したがって、長大橋のように流体の影響を強く受ける構造物の建設に際しては渦励振を正しく評価しこれを回避することが非常に重要である。本稿では流体-構造連成解析を用いて渦励振を再現した事例を紹介する。

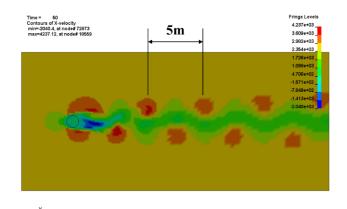
図1は渦励振を再現するために作成した解析モデルである。空気と構造物の相互作用を考慮するため、解析には ALE 法を適用する。流体(空気)部分はオイラー要素でモデル化し、端部から風速 2.5m/s の空気が厚さ 600mm の範囲に流入する条件とした。構造物は直径 1m の弾性体をラグランジュ要素(シェル要素)でモデル化し、中腹 600mm の範囲で空気との相互作用を考慮している。また、構造物の1次固有周期が 2 秒となるように基部にばねを設置し、空気の流入方向と直交する方向にのみ運動を許容している。

図2は解析中に計測した空気の流速分布図である。 本図より円柱後方の空気に周期的な乱れ(カルマン渦) が発生していることが確認できる。このカルマン渦の 周期は2秒\*\*であり、構造物の1次固有周期と合致して いる

図3は構造物に発生した流れ直交方向の変位時刻歴である。空気の流入直後はほとんど変位が発生していないが、15 秒付近から徐々に振動が発生し始め、カルマン渦が発生すると同時に周期 2 秒の振動が励起されていることが確認できる。渦励振は減衰力の符号が負となった形で与えられることから、時間の経過とともに振動エネルギーが流入していくこととなる。したがって、渦励振の発生を防ぐためには構造物の形状を変える、流入する流体の性質を変える、構造物にダンパーのように正の減衰力を与える装置を設置する等の対策を実施することが必要である。

※カルマン渦の波長が 5m、空気の流速が 2.5m/s である ことから、周期は2秒となる。





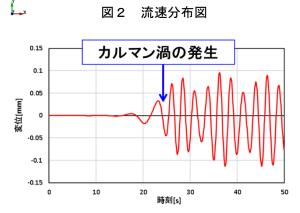
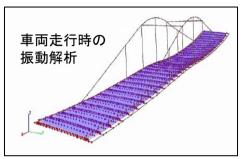


図3 流れ直交方向の構造物の変位時刻歴

# 車両走行振動解析プログラム DALIA

DALIA は、車両一構造物の動的相互作用を考慮した移動荷重を伴う時刻歴動的心容解析プログラム(走行解析プログラム)です。

交通振動や低周波騒音問題への対策、橋梁の疲労評価、車両の乗り心地評価などを目的とした振動予測シミュレーションを行います。



#### ■主な適用事例

主に道路または鉄道橋を対象とした

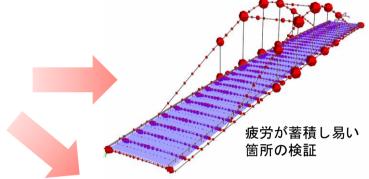
- ・車両走行時の安全性評価
- ・車両走行時の乗り心地評価
- ・車両走行時の運行計画
- 環境振動問題
- ・繰り返し活荷重による疲労問題
- ・振動抑制デバイス設置計画
- ・モニタリングセンサー設置計画

#### ■解析手法

- ・地盤ー構造物連成系問題で広く用いられている サブストラクチャー法を採用しています。 車両と構造を分離して各々の運動方程式で定式化し、 両者が自由度間の外力と強制変位加振で連結される ことで相互作用が考慮されます。
- ・道路面上走行への適用の場合は、 パワースペクトル密度により路面凹凸状態を 設定し、モンテカルロ法により凹凸による振動を 生成してサブストラクチャー法の解に加算します。

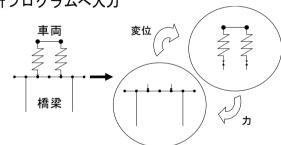
#### ■要素種別

2自由度間バネ、2自由度間ダンパー、 材端バネ付ビーム要素、8点1次ソリッド要素、 ミンドリン・ライスナー8点厚板要素、





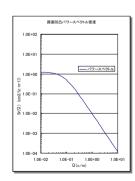
別の低周波騒音や環境振動の 解析プログラムへ入力



サブストラクチャー法による相互作用



道路面凹凸の設定



#### ■出力・表示機能

- ・加速度・変位時刻歴図、バネ・ビーム断面力履歴図、固有モード図、応答変位図
- ・マウス操作による3次元ウォークスルー表示システム搭載により、入力したデータを簡単に確認することができます。
- ・解析中にリアルタイムに変形の様子を確認することができます。

# せん断破壊後の軟化特性を考慮した構造解析

構造計画研究所 防災・環境部 山内 春絵

キーワード: RC ラーメン構造 せん断破壊 軟化特性 フレームモデル RESP-T

#### 1. せん断破壊後の RC ラーメン構造の解析

せん断破壊先行型の RC ラーメン構造を対象として、フレームモデルを用いた構造解析を実施する際に、せん断破壊後の軟化特性を設定することで、一部の部材がせん断破壊した後の応力の再配分を評価することが可能となり、RC ラーメン構造のせん断破壊発生後の挙動を構造解析で算定することが出来る。

文献 1) には RC ラーメン高架橋の柱のせん断破壊を考慮した評価手法が述べられている。この評価手法の試解析を、構造計画研究所が開発・販売している「3次元汎用静的・動的非線形解析プログラム: RESP-T」の計算機能を用いて実施した。

#### 2. 解析モデル

図 1 に今回設定した 2 次元フレームモデルを示す。 RC ラーメン高架橋の梁は剛とし、柱について非線形特性を設定した。 柱は上下 2 本の梁要素でモデル化し、上下端には塑性ヒンジを設定する。塑性ヒンジは曲げモーメント M~回転角  $\theta$  で定義される完全バイリニア型の非線形特性を設定する。柱の中央部には軸力ならびに曲げを伝達するための剛なバネ値を有する鉛直バネ Kv と、せん断力を伝達するための 水平バネ Ks を設ける。表 1 に柱の曲げ耐力 Mu、せん断耐力 Vud を示す。

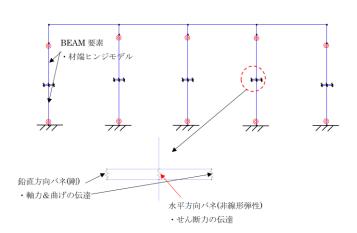


図1 RC ラーメン高架橋\_フレームモデル

水平バネ Ks には文献 1) に示されているせん断軟化特性をモデル化するために、非線形弾性の復元力を設定する(図 2)。解析は RC 高架橋梁位置に水平力を漸増載荷させる静的非線形解析とする。このとき、柱の発生せん断力がせん断耐力 Vud を超過すると柱中央に設けた水平バネのせん断軟化特性により、外力に対する架構の抵抗力が減少するため、「RESP-T」の有する荷重制御手法の 1 つである増分荷重を増加・減少させて変位増分を制御する手法を適用している。

表 1 柱部材耐力

	終局曲げ耐力	終局時せん断	せん断耐力
	Mu(kN·m)	Vmu(kN)	Vud(kN)
端柱	5617	1459	633
中間柱	2920	687	431

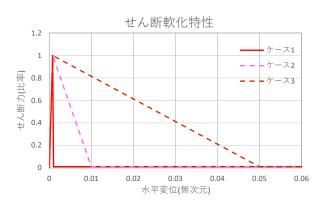


図2 柱のせん断軟化特性

#### 3. 解析結果

図3にRCラーメン高架橋モデルの水平震度~水平変位特性を示す。A点において端柱にせん断破壊が生じ、せん断剛性の軟化ならびに中間柱への応力の再配分が発生する。さらにB点において中間柱にせん断破壊が生じる。ケース1はA点で急激な水平力の低下後、水平力の増加が回復しB点以降は水平力の抵抗がなくなる。ケース2はA点以降の水平力の低下が緩やかになりB点以降はケース1と同様に水平力の抵抗がなくなる。ケース3は端柱ならびに中間柱にせん断破壊が生じても、直ちに水平力の抵抗が無くなることは無い。

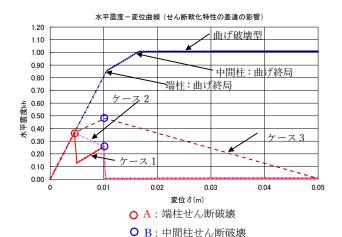


図3 解析終了時の河道内の状況

これは文献 1) と同様の結果であり、文献 1) の評価手 法を本検討で行えることが確認出来た。今回は静的荷 重を同一方向に漸増した解析である。今後、せん断軟 化特性をモデル化した非線形弾性特性に、原点指向型 などの履歴特性を付加することで、静的荷重の繰り返 し載荷や動的地震力に対する検討を行う予定である。

#### 参考文献

1) 中田裕喜,田所敏弥,本山紘希,岡本大,室野剛隆、せん断破壊する柱を有するRCラーメン高架橋の耐震性能評価法の検討,構造工学論文集 Vol.61A(2015 年 3 月) 土木学会



Version 2.3

鉄道構造物等の 3 次元耐震性能照査プログラム

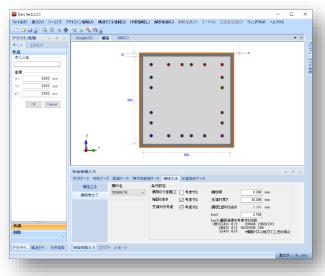
# Retrofitオプション

「既存鉄道コンクリート高架橋柱の耐震補強設計指針」に準拠した 耐震補強工法に対応した応答解析、照査が可能となりました。

対応工法

鋼板巻立て工法 鋼製パネル組立て工法 波形分割鋼板巻立て工法

# 耐震補強設定画面



- ●補強用パラメータ
  - •鋼材
  - ▪鋼板厚
  - ・充填材厚さ

などを設定します。

- ●既存の RC 矩形断面データをもとに 補強工法を適用した断面を作成することができます。
- ●少ない手間で補強工法を切り替えることができるため、最適な工法の 選定を行えます。

### せん断破壊後の挙動を考慮した地中構造物の構造解析

構造計画研究所 防災・環境部 山内 春絵

キーワード: 地中構造物 せん断破壊 軟化特性

フレームモデル RESP-T

#### 1. せん断破壊後の地中構造物の検討

地中構造物の耐震補強は地上構造物に比べ施工の技術的、経済的な制約が多く、特に杭基礎の対策は困難な場合が多い。杭基礎の一部にせん断破壊が生じた後の構造物の挙動を構造解析で算定することは、地震後に対象構造物が機能維持することが可能かの判断をする際に有用である。本稿は杭が2列配置されているボックスカルバートを例題として、杭体の一部にせん断破壊による剛性低下(せん断軟化特性)を考慮した構造解析を2次元、3次元で実施し、せん断破壊後の構造物の発生断面力等を検討したものである。

#### 2. 解析モデル(2次元)

図1にボックスカルバートの横断面を対象に、ボックスカルバート躯体ならび杭を梁要素で、周辺地盤をバネ要素でモデル化した応答変位法2次元フレームモデルを示す。

事前の検討で杭にせん断破壊が生じる区間については、杭をモデル化する梁要素は上下2本の梁要素でモデル化し、梁要素の中央部には軸力ならびに曲げを伝達するための剛なバネ値を有する鉛直バネ Kv と、せん断力を伝達するための水平バネ Ks を設けた。水平バネ Ks にはせん断軟化特性をモデル化するために、非線形弾性の骨格曲線を設定した(図2)。

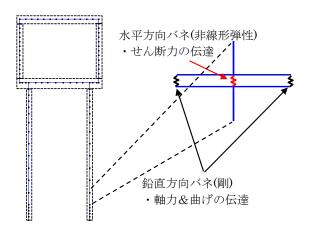


図1 ボックスカルバートの2次元解析モデル

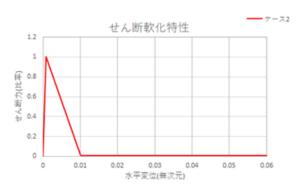


図2 せん断軟化特性のモデル化

#### 3. 解析結果(2次元)

図3にせん断破壊を無視したケース1と図4にせん 断破壊を考慮したケース2の比較を示す。支持層(礫層)上部の杭体がせん断破壊し剛性低下が生じると、杭 体部分は水平方向に剛体移動に近い変位分布を示すた め、杭体の発生断面力は小さくなり支持層上部以外の 杭体には損傷は見られない。

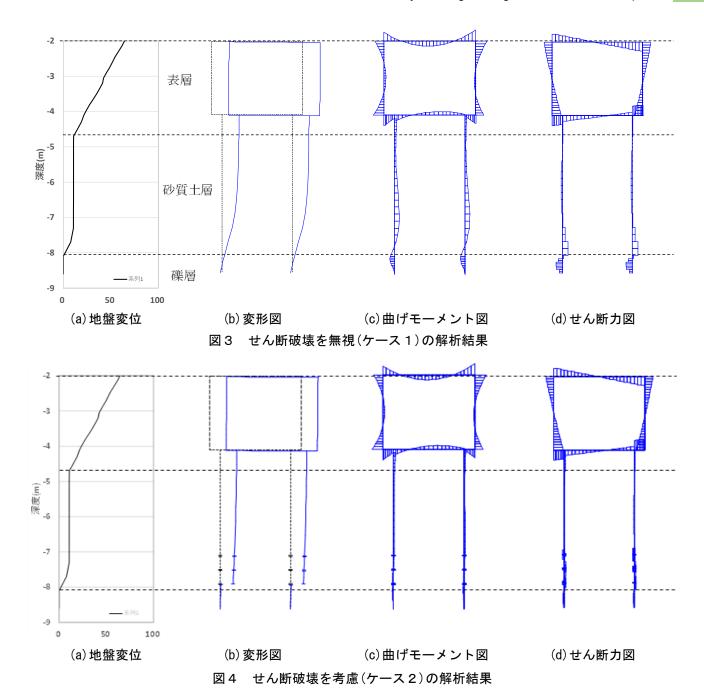
一方、表層近くでは杭頭位置の変位量やカルバート 躯体に発生する断面力は表層地盤の地盤変位の影響が 主であるため杭体のせん断波破壊による差違は小さい。

杭体のせん断破壊部分の水平方向のずれ量は 5mm であり、これにより直ちに杭体の鉛直支持が失われる状況に至るとは判断出来ない。さらに鉛直力の伝達状況を確認する手法としては、コンクリート非線形特性を考慮した杭体の FEM 非線形解析を実施することが考えられる。

#### 4. 解析モデル (3次元)

2章、3章に示す2次元モデルを3次元モデルに拡張したモデル図を図5に示す。ただしボックスカルバート部は底版部のみ平面要素でモデル化した。杭にせん断破壊が生じる区間について、2次元モデルと同様の図2の非線形弾性の骨格曲線を設定する。

10 本の杭全てせん断破壊しないケースと、2 本の杭にせん断破壊を考慮するケースについて解析を行った。



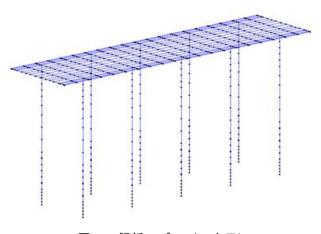
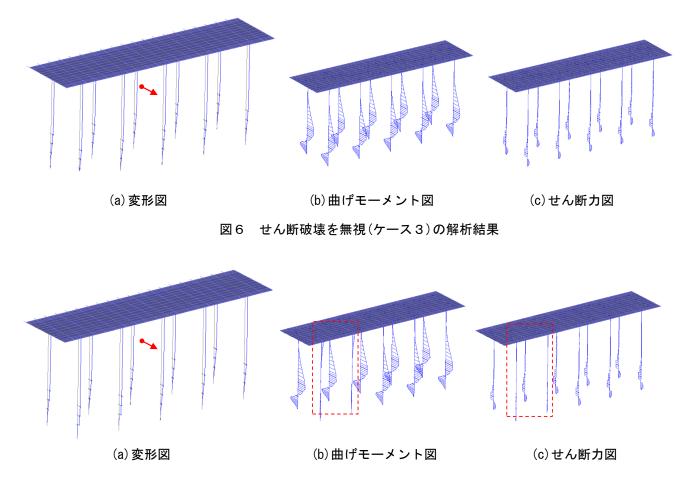


図5 解析モデル(3次元)

#### 5. 解析結果(3次元)

図6にせん断破壊を無視したケース3と、図7に10本のうちの2本の杭にせん断破壊を考慮したケース4の比較を示す。2次元モデルの解析結果と同様に、せん断破壊し剛性低下が生じるため杭体の発生断面力が小さくなっている。

ケース 4 では 2 本の杭のせん断破壊後の断面力再配分を考慮し、残りの杭の照査を行うことが可能である。杭基礎の一部にせん断破壊が生じた後の構造物の挙動を確認し、地震後に対象構造物が機能維持することが可能かの判断をする際に有用である。



せん断破壊を考慮(ケース4)の解析結果

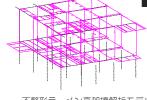


### 3次元汎用静的・動的複合非線形解析プログラム



#### 橋梁の耐震解析

- ■荷重増分解析による 橋脚の地震時保有水平耐力の計算
- ■曲線橋の動的非線形解析
- ■各種免震/制震装置による補強検討
- ■ラーメン橋/ラーメン橋脚/鉄道ラーメン 高架橋の軸力変動を考慮した解析
- ■アーチ橋・斜張橋の動的複合非線形解析

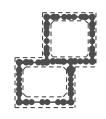


不整形ラーメン高架橋解析モデル (ねじりモーメント図)



曲線橋動的解析モデル

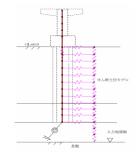




カルバート解析モデル

#### 地中構造物

- ■応答変位法による杭基礎の応力解析
- ■応答変位法によるカルバートの応力解析
- ■応答震度法によるカルバートの応力解析



上部構造―基礎一体モデル (動的相互作用考慮)

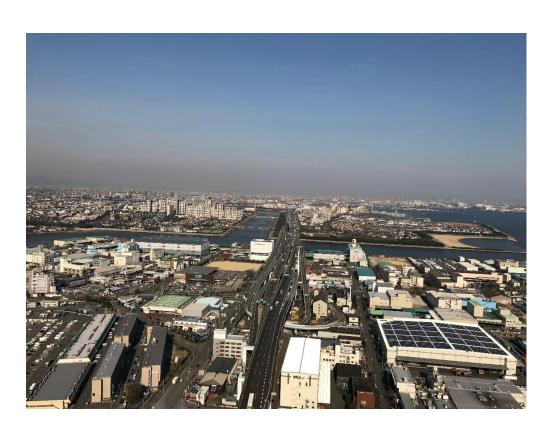
このほか河川構造物、下水道施設、エネルギー施設など、あらゆる土木・建築構造物に対応する 3次元汎用静的・動的非線形解析プログラムです。

### Kaiseki Portal

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

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

https://kaiseki-kke.jp/activity/



# **From Editors**

久しぶりの解析雑誌新号でしたが、間を空けずにまた次号でお目にかかる予定です。でも、 約束はそこまで。その先はまたどうなることやら。

# 構造計画研究所 KOZO KEIKAKU ENGINEERING Inc.

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

# kaiseki@kke.co.jp

#### (株)構造計画研究所 エンジニアリング営業 1,2 部

164-0011 東京都中野区中央 1-38-1 住友中野坂上ビル 10F TEL (03) 5342-1136

#### (株)構造計画研究所 西日本営業部

〒541-0047 大阪市中央区淡路町 3-6-3 御堂筋 MTR ビル 5F TEL (06) 6226-1231

# 角体扩射 Journal of Analytical Engineering Vol.46 2021.10

発 行 日 2021年10月31日

編集・発行 株式会社構造計画研究所 エンジニアリング営業2部

164-0011 東京都中野区中央 1-38-1 住友中野坂上ビル 10F

お問い合せ 電話 (03)5342-1136 FAX (03)3367-1011

kaiseki@kke.co.jp