

解析雑誌

Vol.53 2024.09

Topics

- 「Project PLATEAU」 ユースケース
開発実証 土砂災害シミュレーション
- 断層変位を受ける構造物の安全性評価
手法のご紹介
- 道路橋の FEM 解析
- 理想化陽解法 FEM を用いた溶接構造物の
変形・残留応力解析
- トンネル覆工コンクリート施工時の
流動解析

Technical Report

- 計測データを再現できる解析モデルの
自動作成に関する研究

Journal of Analytical Engineering



地震の活発化に対応する解析技術の発展

(株)構造計画研究所
解析グループ担当 専門役員
梁川 幸盛

令和6年能登半島地震の記憶が新しい中、南海トラフ地震・首都直下地震の予兆を想わせる中小地震が続いています。地震活動度の活発化を感じざるを得ない状況に、普段から耐震・防災に関わられている皆様も不穏な日々を過ごされているのではないのでしょうか。地震を専門とする学者の中にも、約80年前の南海地震(1946年, M8.0)では、発生10年前くらいから能登半島地震のような地震が3~4回起きている。単純に類型的に考えれば、今から約10年後に南海トラフ地震が発生することになる、と言われる方がおられます。企業におけるBCP担当者の方々も心配なご様子で、耐震補強計画を塩漬けにしたままの既存不適格建物や、10年前に策定したBCPの見直しなど、様々なご相談をいただいております。

このような中で、地震防災をテーマとするTV番組の制作者から、一般の視聴者に杭の損傷メカニズムや問題点を解説するための動画を作成する依頼を受ける機会がありました。番組に出演する学者らが解説に使う動画を、地盤-杭-建物の連成振動解析によって作成するものです。番組制作者は耐震設計の専門家ではないため、杭や建物の構造設計の考えやその課題について、杭の設計の歴史をなぞりながら番組で伝えるべき内容を模索するところから始まりました。御存知のとおり、建築の杭の設計は上部構造の設計に比べて二周遅れとも言える状況です。上部構造の二次設計が普通に運用されるようになった時点でも、杭については一次設計を推奨しているのみで、杭の一次設計の義務化はかなり後になってからです。一般の方から見れば、なぜ杭の設計はぞんざいに扱われているのか理由がわからないと思います。それは、杭の破壊によって人命を失った経験がほとんどなかったこと、地盤と杭の力のやり取りが複雑で手計算の時代には扱い切れなかったこと、そのような中で杭の大幅コストアップを社会的に納得させられなかったことなど、様々な説明を行なうのですが昭和の体罰を肯定するようなもので、当時は黙認されていたと言っても現時点での共感は得られません。

一方で、水平地盤ばねの非線形特性や粘性減衰に関して、設計用モデルで採用しているような安全側に振ったパラメータ設定では、全く自然な動画にならないという悩みもありました。地盤が液状化に至ると、あらゆるパラメータがあやふやです。先生方の研究室の研究生になったような気分に取り組むことになり、軟弱地盤における地盤-杭-建物の連成解析の難しさを改めて認識すると同時に、安全側の設計という逃げ口が深い思考を妨げていることを再認識しました。

検討の途中で明白になった、杭が早期に壊れてしまえば建物の損傷は減る、しかし鉛直支持能力が問題になる。逆に杭をリッチにすると上部建物の損傷が増える、という現象については当然ですよと言いたくなりますが、放送すれば誤解を招きかねないとの判断でお蔵入りとなったと聞きました。杭や地盤のわずかな違いが上部構造の挙動に比較的大きな影響を及ぼす点も、設計的な「みなし」や「割り切り」が必要になる原因だと思われます。現行の耐震設計は、妥協の産物であって理想的なものにはまだまだ遠く及んでいないという事実を実感する経験となりました。

せっかくの経験は、一般向けのTV番組だけでなく、熟成させた上で実際に動くプログラムとしてユーザーの方々に提供していきたいと考えています。構造物の解析技術の発展に貢献し続けたいと願っております。

解析雑誌 Vol. 53 2024. 09

巻頭言 地震の活発化に対応する解析技術の発展	02
解析グループ担当 専門役員 梁川 幸盛	

Topic 1

● 「Project PLATEAU」ユースケース開発実証 土砂災害シミュレーション	04
---	----

Topic 2

● 断層変位を受ける構造物の安全性評価手法のご紹介	12
---------------------------	----

Topic 3

● 道路橋の FEM 解析	20
---------------	----

Topic 4

● 理想化陽解法 FEM を用いた溶接構造物の変形・残留応力解析	28
----------------------------------	----

Topic 5

● トンネル覆工コンクリート施工時の流動解析	30
------------------------	----

Technical Report 1

● 計測データを再現できる解析モデルの自動作成に関する研究	34
-------------------------------	----

Kaiseki Portal / From Editors	39
--------------------------------------	-----------

本誌内では私共「構造計画研究所」のことを「KKE」と称しています。

「Project PLATEAU」ユースケース開発実証

土砂災害シミュレーション

KKE は国土交通省が主導する「Project PLATEAU」に参画し、先進的なユースケース開発の実施を通じて社会課題の解決に取り組んでいます。2022 年度には「都市の賑わい評価のシミュレーション」および「雪害対策支援ツール」の実証を行いました。2023 年度に新たに、「精緻な土砂災害シミュレーション」の実証に取り組みました。本稿では、ユースケース開発の概要、ベースとなる解析ソルバである iRIC Morpho2DH (平面二次元の土石流・泥流モデル)の概要、本プロジェクトの要素技術である土砂による建屋倒壊判定技術、およびシミュレーション結果の可視化等をご紹介します。なお、2022 年度のユースケースについては、解析雑誌 Vol52 で紹介しておりますので、ぜひそちらもご覧ください。

●Project PLATEAU

「Project PLATEAU」は、国土交通省が主導する日本全国の都市デジタルツイン実現プロジェクトです。都市活動のプラットフォームデータとして 3D 都市モデル (図 1) を整備し、様々な領域でユースケースを開発するとともに、誰もが自由に都市のデータを引き出せるようにすることで、オープン・イノベーションの創出を目指しています。

近年、都市の防災や環境、まちづくりなど多様な分野で、シミュレーションによる施策検討の期待が高まっています。しかしながら広大な都市空間を再現するために必要なデータ作成には膨大なコストが必要となっていました。そこで「Project PLATEAU」の 3D 都市モデルを活用することで、シミュレーションコストの障壁が下がり、スピーディに施策検討に活用できるようになることが期待されています。



図 1 PLATEAU View による 3D 都市モデル

今回のユースケース開発においては、KKE が持つ建築構造・建築工学の知識を活用し、土石流による家屋の倒壊メカニズムを組み込んだ、精緻な土石流の流体数値シミュレータを開発しました。また、シミュレーション結果から土砂災害警戒区域等のエリア内のリスク分布を三次元表現する可視化システムをあわせて開発することで、今後の行政の避難所選定を支援し、避難計画の高度化を目指しています。

● 「精緻な土砂災害シミュレーション」ユースケースの概要

近年、記録的短時間大雨情報が頻繁に配信されており、日本各地で河川災害のみならず土砂災害の危険にさらされています。これに合わせて、全国的に土砂災害警戒区域等の指定範囲が拡大されています。しかし、土砂災害警戒区域等は地形から力学的に推定される最大範囲を網羅するものであるため、特に中山間地では、土石流警戒区域等が幾重にも重なり（図2）、避難計画立案自体が困難な状況も発生しています。

他方、平成29年5月19日に公布された「水防法の一部を改正する法律」において、土砂災害警戒区域内の要配慮者利用施設の管理者等に対して、避難確保計画の作成・避難訓練の実施が義務化されていますが、現行のハザードマップの活用を前提とすると、上述のような地域では、計画作成すら困難となる可能性もあります。



図2 イエローゾーンが幾重にも重なる地域の例

また、土砂災害警戒区域等は地形条件から定められていますが、土石流等が家屋に衝突し、家屋を流出・半壊状態させたことによって生じたエネルギー変化や流動方向に対する変化の影響が評価されておらず、実態に即した土石流の氾濫範囲となっていないという課題もあります。地域防災計画が目的とする住民主体の防災計画策定・啓発の進展には、住民一人一人が災害時の避難イメージをもてることが重要ですが、自分が逃げるべき避難先施設・通るべき避難ルートが現実的でない場合、その目的を達成することは難しくなってきます。

そこで、土砂災害警戒区域等の重複エリアにおける、避難先施設ないし避難ルート選定に係る課題を解決するため、3D都市モデルを活用し、家屋の倒壊状況等を加味した精緻な土石流の流体数値シミュ

レータを開発しました。さらに、シミュレーション結果から土砂災害警戒区域等のエリア内のリスク分布を三次元表現する可視化システム(図3)をあわせて開発することで、自治体の避難所選定を支援し、避難計画の高度化を目指しました。

開発したシステムの有用性検証として、自治体の避難計画の策定におけるシミュレーション結果の活用可能性等について岡山県備前市の職員様にヒアリング及びアンケートを行いました。

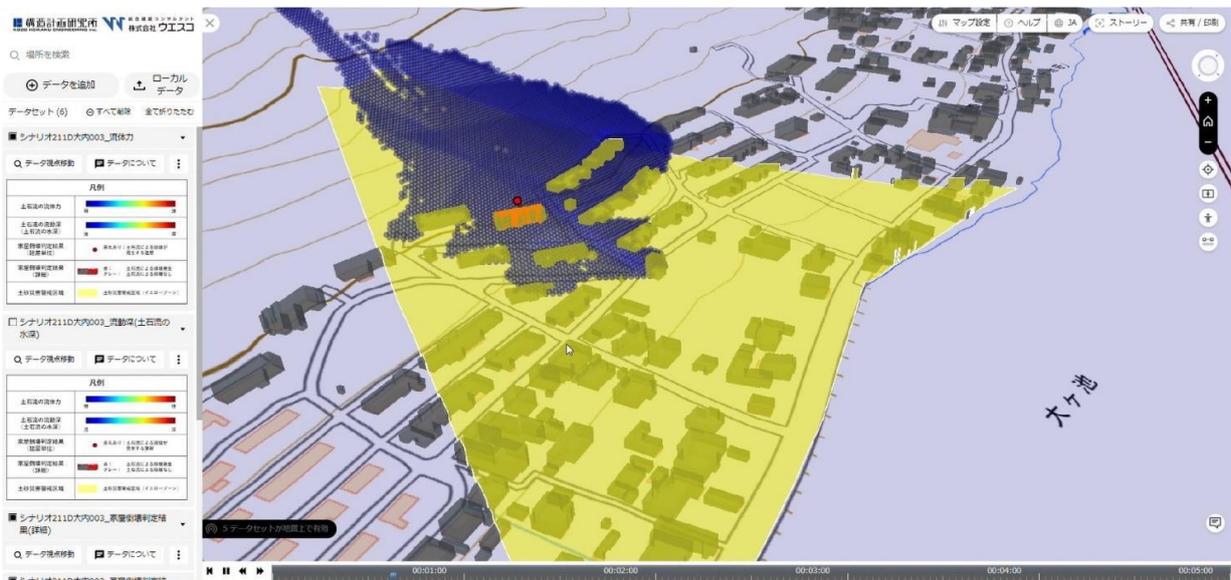


図3 建屋倒壊を加味した土砂災害シミュレーション結果の3次元表示

以下に、本ユースケースによる実証のフローを示します(図4)。

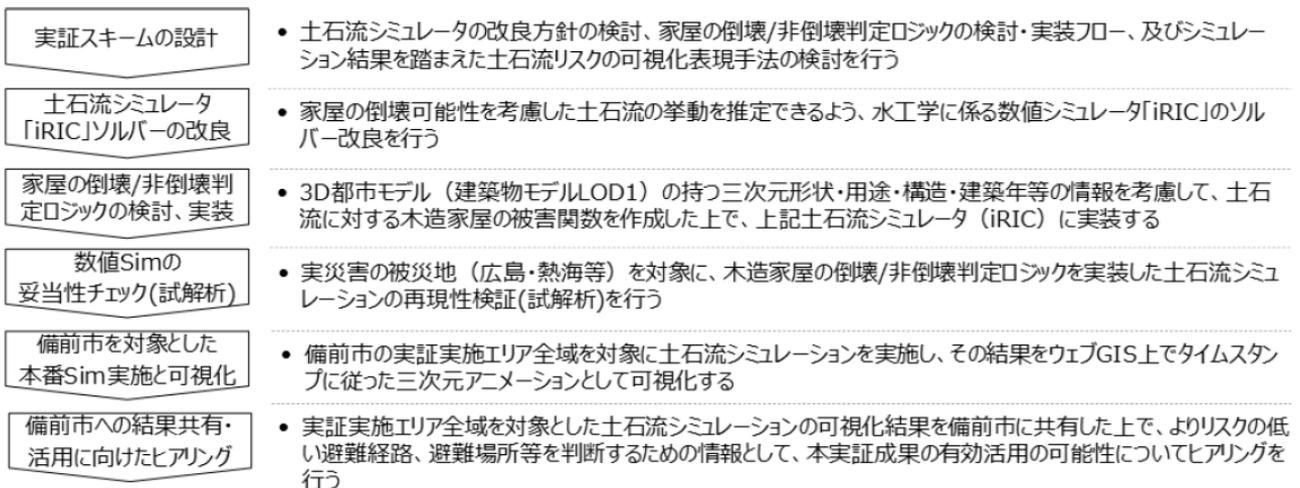


図4 本ユースケースの実証フロー

なお、本ユースケースは株式会社ウエスコ様とKKEが共同で開発し、主に「避難計画の立案にかかわる業務分析とその課題設定」、「土石流シミュレーションの条件設定およびシミュレーション実施」、

「シミュレーション結果の妥当性評価」をウエスコ様、「建屋倒壊判定ロジックの構築」、「シミュレーション結果の3次元可視化システムの構築」、「シミュレータと3次元可視化システムとのデータコンバータ」をKKEが担当しました。ベースとなる土石流シミュレーションは京都大学 竹林洋史准教授が開発された、iRIC Morpho2DHを採用し、竹林准教授のご支援をいただきつつ、建屋倒壊を判断するテーブルの組み込みを行いました。また、建屋倒壊判定ロジックの構築に際しては、広島大学の三浦弘之准教授の監修の下開発を行いました。

●解析ソルバ iRIC Morpho2DH

iRIC Morpho2DHは平面二次元の土石流・泥流モデルを主体とした解析ソルバであり、斜面崩壊を初期条件とした土石流・泥流の流動・堆積過程を表現可能なモデルです。今回のカスタマイズでは、iRIC Morpho2DHの土石流流動モデルをベースに、3D都市モデル（地形 LOD1 モデル）を地形条件として土石流流動を計算できるようにしました（図5）。さらに、ここで算出した2m×2mサイズのメッシュ単位の流体力を用い、3D都市モデル（建築物 LOD1 モデル）の位置情報及び属性情報を組み合わせることで、メッシュごとに土石流に対して家屋が倒壊したか否かを判定する機能を追加実装しました。また、3D都市モデルは外部ツールであるFME DesktopによってCSV形式またはShapefile形式に変換することで、iRICで読み込めるようGUIの改良も行いました。

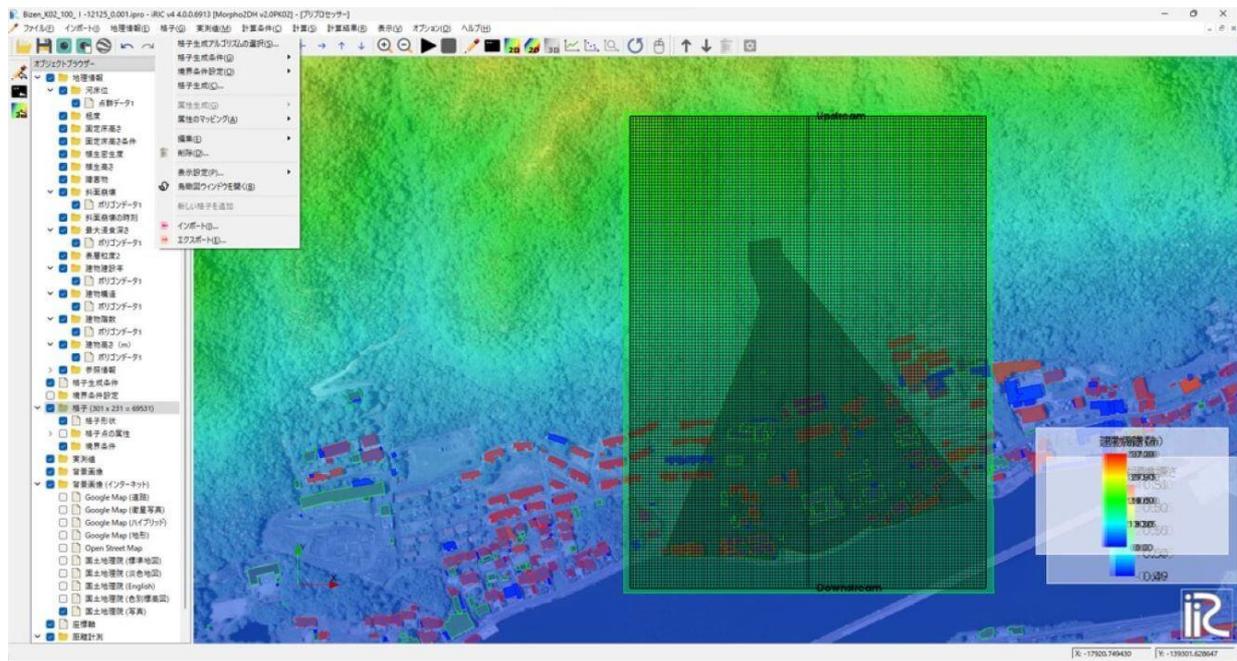


図5 iRIC Morpho 2DHによる土石流シミュレーション実行

●建屋倒壊判定ロジックの構築

家屋倒壊判定機能は、流体力を外力として、今回新たに構築した「建物耐力テーブル」を参照しつつ、建築物 LOD1 を対象とした家屋倒壊判定を実行します。判定はメッシュ単位に行われ、iRIC Morpho 2DHが出力した流体力を外力として、「建物耐力テーブル」に基づく fragility関数を実行することで、メッシュ及び家屋ごとに家屋の倒壊確率を計算する仕組みとしました。判定結果はステップごとに

計算された流体力、浸食深さ等と併せて倒壊/非倒壊のフラグとして出力できるよう改良しました。

ここで、「建物耐力テーブル」とは、外力の大きさに応じた構造物の壊れやすさを確率論的に評価するためのテーブルとなります。テーブル構築に際しては、構造物に荷重を与えて倒壊するかどうかを解析するための三次元フレーム構造解析モデル(図6)を構築しました。構造解析モデル構築では、木造建物の築年代や、構造種別による(家屋が水平方向に抗う)耐力に関する既往文献(「損害険料率算出機構(2019 住宅の耐震性能に影響を及ぼす要因の調査」等)を参考としました。

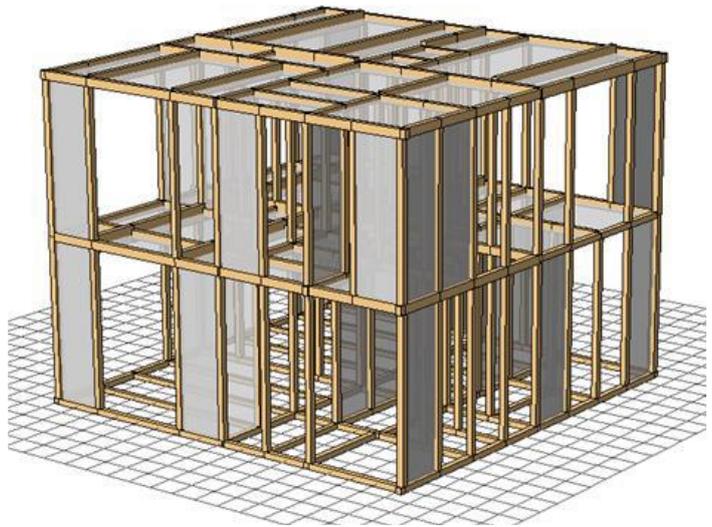
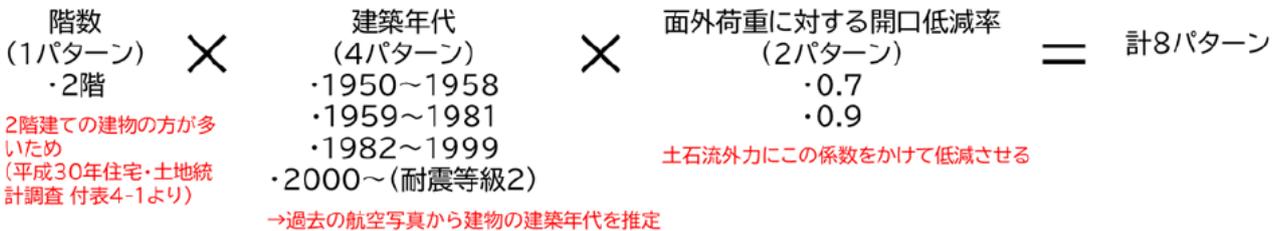


図6 作成した建屋の三次元解析モデルの例

そして、このモデルに土石流を想定した外力を与え、倒壊するかどうかを応答解析により求めました。ばらつきを考慮した様々なパターン(図7)を想定したパラメトリックスタディを実施し、倒壊/非倒壊に影響が大きい因子を明らかにした上で、倒壊判定ロジックへの落とし込みを行いました。



- ・ 立ち上がり時間・ピーク倍率・流速・推進を変動させ、模式化した土石流の水深と流速の時刻歴波形を生成
- ・ 解析事例の分析結果を用いて流速、土石流高さを数ケース設定する。
- ・ 作用角度は、0度・45度・90度

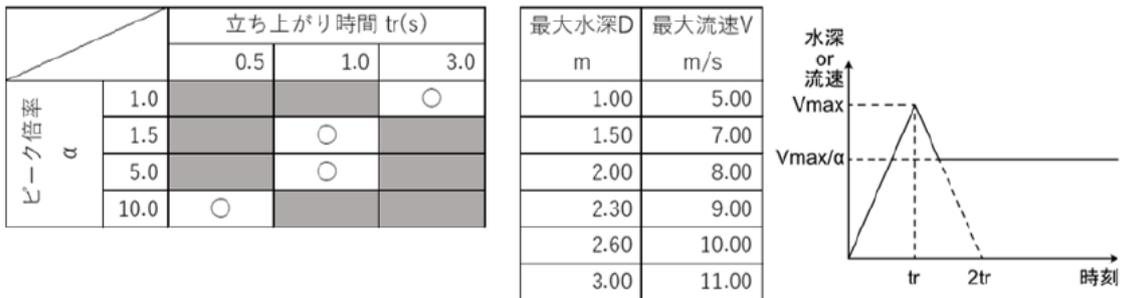


図7 パラメトリックスタディのパターン

最後に、家屋倒壊判定機能を具備した iRIC Morpho 2DH を用いて技術的な妥当性の検証を行いました。検証は実災害の被災地を対象に、現地で記録された被災状況の情報と解析結果を建屋単位で、倒壊/非倒壊判定を行い、正答率という形で検証を行いました(図8)。

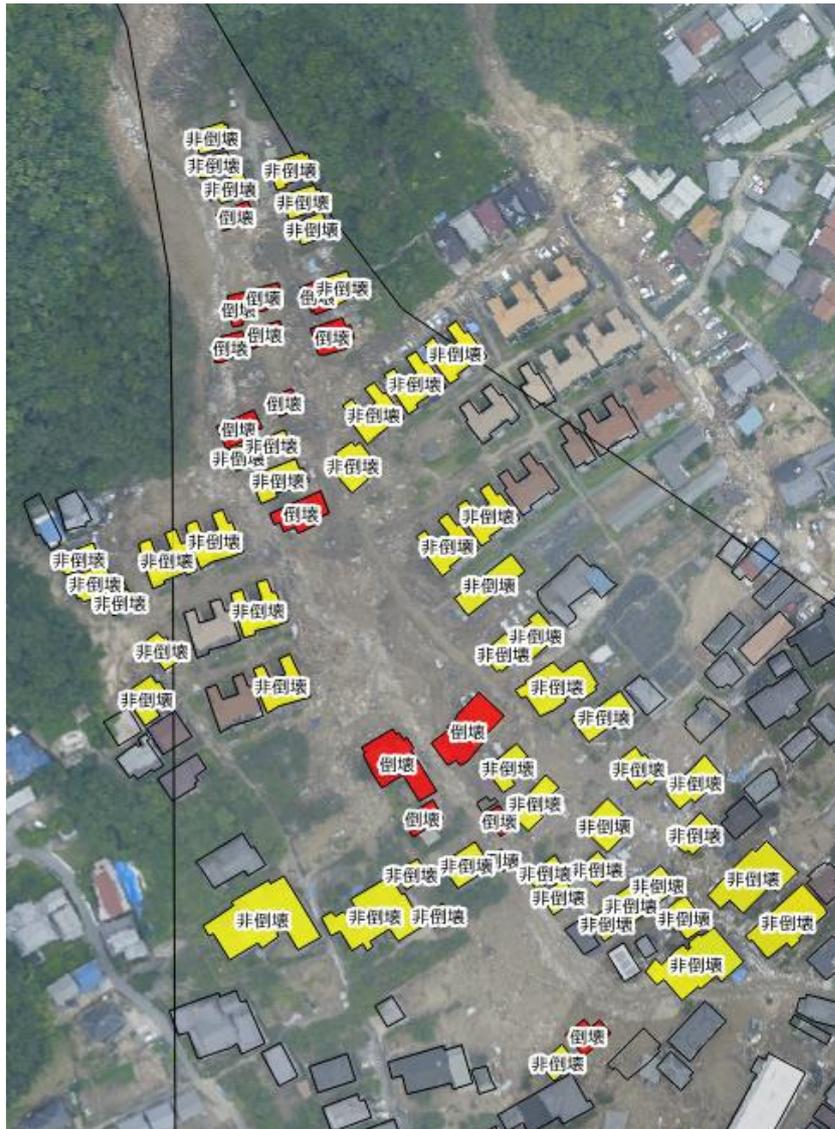


図8 検証結果

(赤：シミュレーション結果が誤った建屋、黄：正解した建屋 正答率85%)

●建物倒壊判定結果を含めた土石流シミュレーション結果の3次元可視化

iRIC Morpho 2DH による解析結果をアニメーションとして Terria Map 上で表示できるようにするための可視化機能を構築しました (図9)。Terria Map はさまざまな地理空間情報を集約できるオープンソース型のデータカタログ3Dビューアです。本実証では Terria Map の画面をカスタマイズし、かつ iRIC Morpho 2DH が出力した解析結果を Terria Map 上で土石流が流れ、建物の倒壊/非倒壊箇所がアニメーション的に可視化されるコンバータを用意しました。

可視化の項目としては、避難計画の策定及び住民への啓発に有用と思われる項目を中心に検討した結果、土石流の流動深、流体力及び家屋倒壊判定結果、さらに土砂災害警戒区域 (イエローゾーン) を選定しました。また、閲覧者が解析結果を直感的に把握できるよう、結果表示のカラーリング、ワークベンチ機能を活用した表示項目の切替え、データカタログを活用した可視化地点の選択機能等も実装しました。これにより、行政担当者が、解析結果と既存ハザードマップとの重ね合わせや、土石流災害のリスク分布と避難路・避難先の位置関係の把握や対象避難者数の分析を容易に行うことができます。

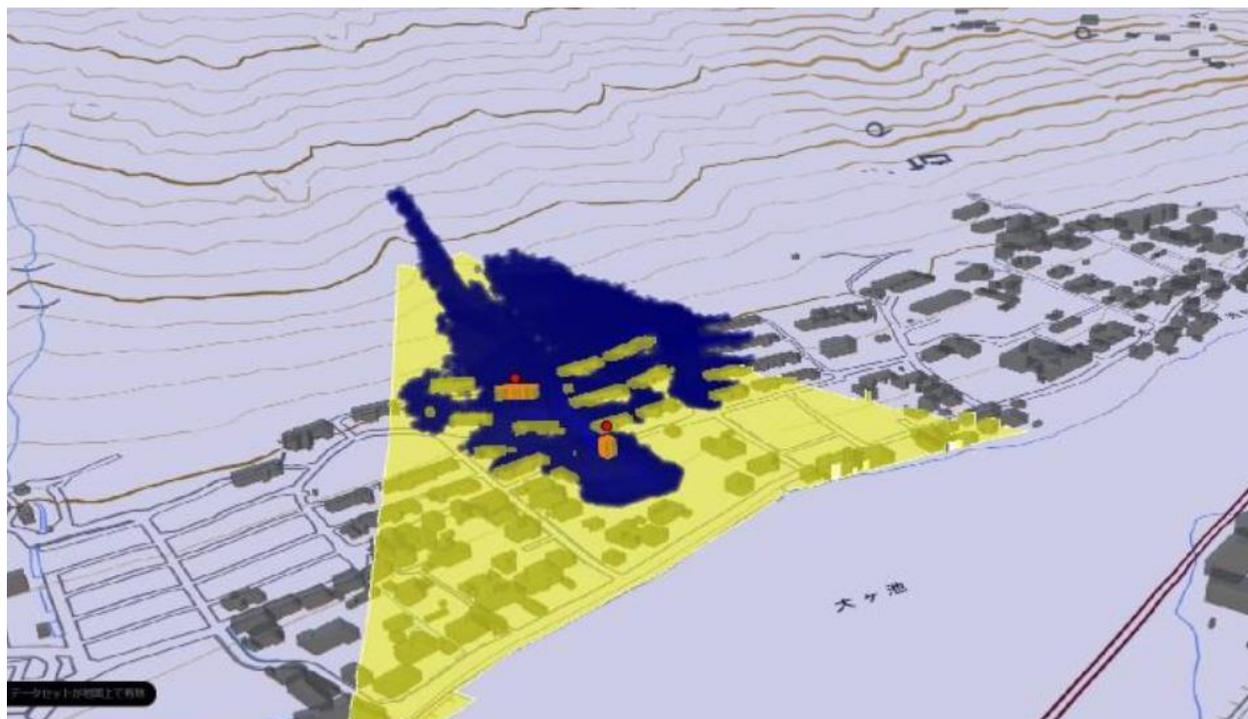


図9 3次元可視化

●今後の展望

本年度のユースケースで開発した「木造家屋の倒壊/非倒壊判定ロジックを実装した土石流シミュレーション」を、試行利用いただいた自治体様からは、概して好意的なフィードバックが寄せられ、今後の他自治体等への展開に向けて好感触を得ることができました。

シミュレーション結果の3次元可視化により、避難計画への反映や住民啓発への活用の面で、以下のことが期待されています。

- ・住民が土石流現象の危険性を実感でき、正しい避難行動につながる
- ・防災教育や防災訓練等に活用される
- ・行政、専門家、住民等で共有可能となるため、防災計画等に関する円滑な合意形成が可能となる

今後とも、KKEが有するさまざまな災害に対応したシミュレーション技術、災害リスク分析などの分析技術、可視化を含めたシステム構築技術を、3D都市モデルと連携させていくことで、社会課題の解決に貢献していきます。

流況・河床変動解析 コンサルティング

水工学に係る数値シミュレーションプラットフォーム iRIC による、河川の流れ・河床変動・氾濫解析等の解析サービスを提供しています。目的に応じて各種ソルバや弊社開発の解析エンジンを使用し、柔軟な解析に対応します。

使用ソフトウェア



事前対策

直前・直後対応

復旧対応

解析業務

現況のモデル化から設計条件におけるシミュレーションと結果のレポートまで、流体問題の解析技術をもとに、数値シミュレーションによる解析コンサルティングサービスを提供します。

■ 氾濫解析

河川氾濫箇所と流量を指定し、土地の形状、土地利用を考慮した河川の氾濫状況を時系列に計算します。

■ 2次元流況解析

橋脚などの土木構造物周辺の2次元流況解析。水制や橋脚などの構造物をモデル化し、その影響を評価します

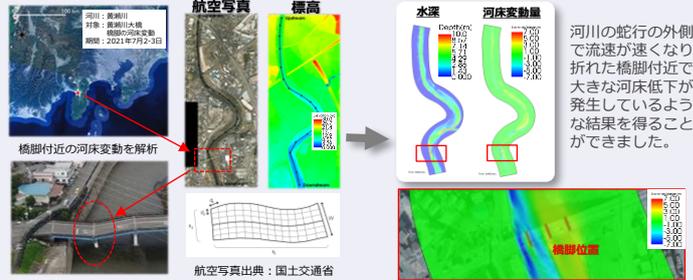
■ 2次元河床変動解析

河道掘削事業や、水制などの治水事業、橋脚などの構造物による河床変動などの影響を解析します。

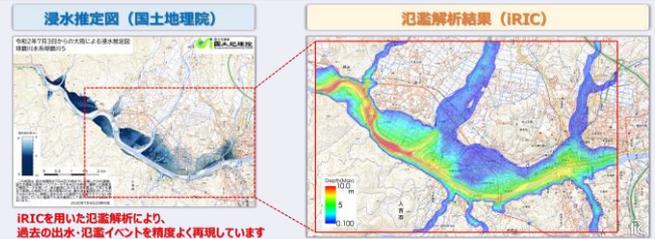
■ 土石流解析

豪雨によって発生した表層崩壊に起因した土石流の解析。地域にフォーカスした危険範囲や土石流水深などを評価します。

黄瀬川大橋（静岡県沼津市）再現解析



令和2年7月豪雨における球磨川氾濫の再現解析



NETIS登録番号KT-220028-A



クラウド型の洪水予測システムRiverCast®は、早期の避難判断をはじめ、河川周辺の施設・工事現場における安全管理、水門や排水ポンプ操作を支援します。

浸水回避

態勢判断

安全確保

避難指示

事前対策

直前・直後対応

復旧対応

リアルタイムに15時間先までの水位を予測

「いつ」「どこで」「どのくらい」の危険が迫っているのか？最先端の予測技術で、水位と雨量から増水のピーク・規模を可視化します。



システム特徴

- 1 スピーディに導入可能
- 2 Webで“いつでも どこでも”閲覧可能
- 3 情報を逃さない、安心のメール配信サービス

主な適用先



態勢判断
水防活動



工事現場の
オペレーション



河川周辺の
施設管理



鉄道・電力の
インフラ管理

ピンポイントかつ確率的な予測情報

予報雨量の誤差を考慮した確率的な予測情報で、的確な意思決定を後押しします。

水位予測で 安全管理



重機の退避や作業員の避難判断に利用している。現場に無くてはならないサービスになっている。

大手総合建設事業者



危機管理部門は、警戒態勢や避難情報の発令に、河川管理部門は、水門やポンプの操作判断に役立つ。

市役所



多くの実績

精度と導入の手軽さが評価され、全国の中小～大河川で活躍しています。

利用実績

鹿島建設、西松建設、西武建設、前田建設工業、国土交通省 徳島河川国道事務所、神奈川県川崎市、熊本県大津町、山形県鶴岡市、遊水池管理施設、インフラ事業者ほか、九州/北陸/関東/近畿/東北地整発注工事

実証試験

NTT西日本、大阪府、川崎市、横浜市ほか13自治体45地点以上

学術表彰

ネイチャー・パブリッシング・グループ「Scientific Reports」にて、2020年出版論文のTop 100 in Physicsに選出など

※ 労働災害防止のためのICT活用データベース、NETIS登録済み

断層変位を受ける構造物の安全性評価手法のご紹介

近年、大規模な内陸地震が発生すると、地震動だけでなく地表に生じる断層変位によって構造物が被害を受ける事例が見られます。1995年の兵庫県南部地震や台湾の1999年集集地震、近年では2014年長野県北部の地震や2016年熊本地震（図1）などで、地表地震断層やそれに伴う構造物の被害が報告されています。また、2023年のトルコ・シリア地震でも、長大な地表地震断層が発生し報道などでも話題になりました。



図1 熊本地震における地表地震断層と被害の例

そもそも地震とは、プレート運動を原動力とする広域的な応力が長期にわたって蓄積し、それが震源断層の破壊として一気に解放される現象です。震源断層のすべりが大きい場合や、震源断層が浅い場合などに地表地震断層として地表面に断層変位が出現しやすい傾向があります。図2に示すように、震源断層は文字通り地震動を引き起こす震源となる断層ですが、それ以外に震源断層の地表面延長部に沿って連続的に認められる主断層や主断層近傍に分布し一般的に主断層より小規模である副断層なども存在します。地震の際には震源となる震源断層以外にも、震源断層のすべりに伴う地殻変動に起因して、副断層に発生した変位が被害を引き起こす事例も見られます。震源断層や主断層、分岐断層においては、地表面位置での変位が数 m オーダーに及ぶ場合があります。一方、副断層は主断層から離れたところに出現し、主断層よりも小規模な断層です。さらに地震を引き起こす震源断層の幅や長さは数 km～大きいものでは数百 km にもおよぶ長大なものです。一方で耐震安全性評価の対象となる構造物は数 m～数百 m 程度であり、サイズの違いから一体で取り扱うのに適していません。もちろん動的な 3 次元一体モデルなどによる研究もおこなわれていますが、まだまだ課題も多いのが現状です。

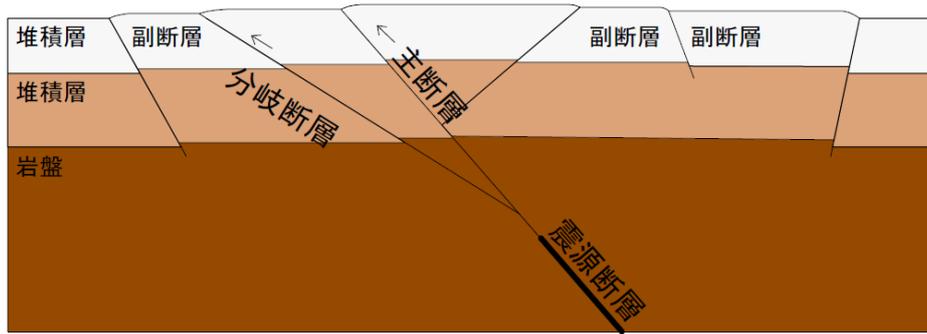
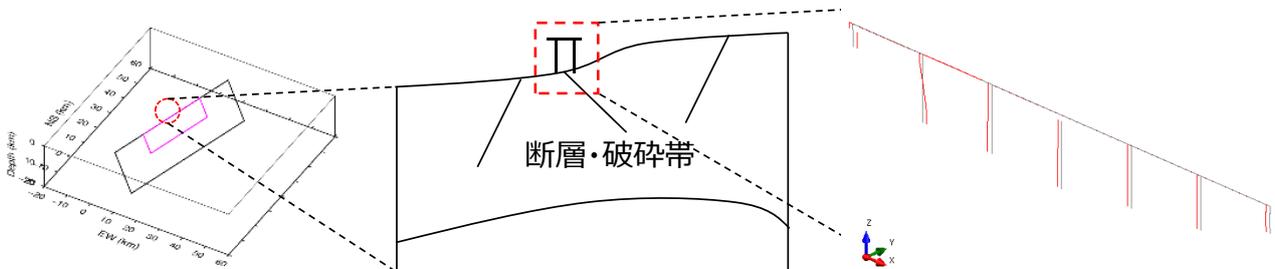


図2 断層の形態 1)を参考に作成

一般的な地震動に起因する耐震設計においては、必要な震源断層モデルの評価に資するために従来から綿密な調査や研究が実施されてきています。一方で2016年4月の熊本地震における阿蘇大橋の被害事例など、断層変位に着目した耐震安全性検討はまだまだ評価手法が確立されていないのが現状です。一般的に水道施設や地中配管²⁾、高圧ガス導管、鉄道構造物などは線状構造物であるため断層を避けることが難しく、地表地震断層が出現した際に被害を受ける可能性があります。橋梁を対象として断層変位の影響を検討した事例としては文献3)や4)などがあります。

文献5)によると、地表地震断層のずれに起因する断層変位による構造物などへの被害を予測・対策を行うためには、図3に示すように大きく分けて①震源断層を含む広域地盤の変形量の把握、②評価対象構造物周辺地盤の応答把握、③評価対象構造物の検討の3つのステップに分けられます。

- ① 地震モーメントの定義式や震源断層を特定した地震の強震動予測手法(「レシピ」)⁶⁾を基に、震源断層のすべり分布を設定します。そのうえで、食い違い弾性論などを用いて広域な地盤の変形量を求めます。強震動予測手法では震源断層の比較的深い領域(おおよそ深さ km 以深の地震発生層内)が着目されることが多いのに対して、断層変位の検討においては地震発生層以浅(おおよそ深さ数 km 以浅)におけるすべりも適切に考慮する必要があります。
- ② ①で得られた広域な地盤の変形を境界条件として、有限要素解析などを用いて対象構造物周辺地盤の変形状態を求めます。特に震源断層の上に厚い堆積層がある場合や、評価対象となる構造物が副断層などと交差している場合、地表面近くの応答変位を求めるためには表層地盤の解析が必要になります。
- ③ 評価対象となる構造物や地盤を詳細にモデル化した解析モデルに対して、②で得られた構造物周辺の変位を構造物に入力することで、断層変位を受ける構造物の挙動をシミュレーションします。



- ① 震源断層を含む広域地盤の変形量の把握
- ② 評価対象構造物周辺地盤の応答把握
- ③ 評価対象構造物の検討

図3 おおまかな評価の流れ

次に、①～③の各ステップにおいて、具体的にどのような検討が実施されるかを見ていきます。

● 震源断層を含む広域地盤の変形量の把握

内陸地震に伴う地殻変動による広域地盤の変形を求めるためには、対象とする震源断層をモデル化する必要があります。その際には、震源断層の幾何形状やすべり分布、地盤物性値を適切に設定する必要があります。震源断層を特定した地震の強震動予測手法（「レシピ」⁶⁾などを参考にできます。

レシピに従ってすべり分布をモデル化する際に必要となるパラメータとして、震源断層の位置、大きさ、深さ、傾斜角、地震規模、平均すべり量などがあります。レシピは強震動予測を実施する際の考え方を取りまとめたものですが、断層変位を評価するためにまとめられたものではないため、適用に当たっては注意が必要です。一方で、レシピで示されている特性化震源モデルの考え方を拡張して、2014年長野県北部の地震や2016年熊本地震で観測された変位量を概ね説明できている例もあります（例えば文献7)、8)。広域地盤の変形量の評価においては、食い違い弾性論など3次元的に変位を評価することが必要です（図4）。

その他、対象構造物付近で十分な震源断層の調査などが行われていない場合には、確率論的断層変位ハザード解析（PFDHA）により地表面に生じる断層変位量を推定する方法もあります（高尾・他⁹⁾）。

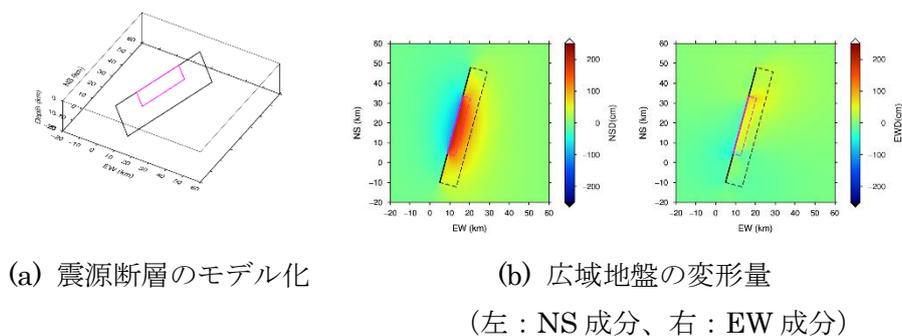
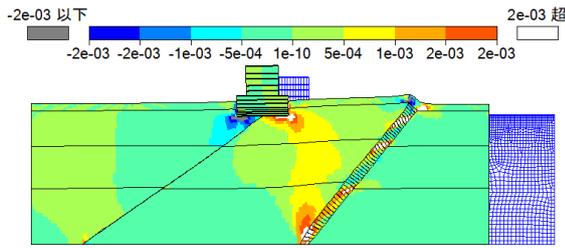


図4 震源断層のモデル化と広域地盤の変形量の評価

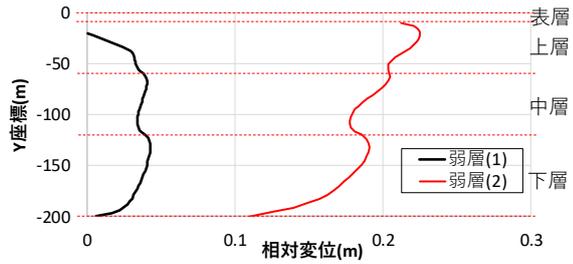
● 評価対象構造物周辺地盤の応答把握

次に、対象構造物付近の地盤の応答を把握するために、三次元静的非線形解析によるモデル化を実施します。地盤調査などで地表ないしは地下浅部での断層の分布が把握されている場合は、それらも適切にモデル化します。特に堆積層が厚い場合などは、震源断層に生じたずれ変位が直接構造物に作用することは考えづらく、評価対象となる構造物周辺の地盤の挙動をシミュレーション解析により求める必要があります。一方で比較的硬い岩が露出している場合や、堆積層が薄い場合などは、このステップを飛ばして、想定されるずれ変位を直接構造物に作用させる事などが考えられます。

評価対象構造物周辺地盤の解析例¹⁰⁾を図5に示します。2枚の弱層と、薄い弱層と交差するように建物をモデル化した上で、モデル境界に変位を入力し、弱層のずれと建物への影響を評価した事例です。与えた変位は厚い弱層で吸収されるため、薄い弱層にはそれほど変位が発生しない結果となっています。この検討は2次元解析により実施しましたが、弱層と構造物の交差条件などをより正確にモデル化するためには、3次元解析による検討が必要です。また、ここでは建物をモデル化して検討を行っていますが、このあとに続く評価対象構造物において建物の検討を行う場合は、建物をモデル化しない方法も考えられます。建物をモデルに含めた場合、弱層は建物により拘束を受けるため、構造物に入力する変位は小さく評価されるものと考えられます。



(a) 変形図およびせん断ひずみコンター図



(b) 弱層ずれ変位量分布図

図5 評価対象構造物周辺地盤の解析例

● 評価対象構造物の検討

平成 29 年に改定された道路橋示方書では、断層変位に対して以下の記述があります。

【断層変位に対して】

橋の耐震設計にあたっては、断層変位に対して影響を受けないよう架橋位置または橋の形式の選定を行うことを標準とし、やむを得ずこの影響を受ける場合には、少なくとも致命的な被害が生じにくくなるような構造とする等、必要な対策を講じなければならない。

断層変位の影響を受ける道路橋の応答を評価する一般的な手法は確立されていない一方で、近年関係する研究もさかんに行われており、道路橋の解析において断層変位の影響を考慮する工夫が様々試みられています³⁾。事象の再現性については議論の余地があるものの、断層変位の影響を加味した多点地震動の入力による動的非線形解析や、初期状態において断層変位の変形分を考慮した動的非線形解析 (図 6 の検討例①)、断層変位の影響を強制変位として考慮した静的非線形解析 (図 7 の検討例②) などが考えられます。

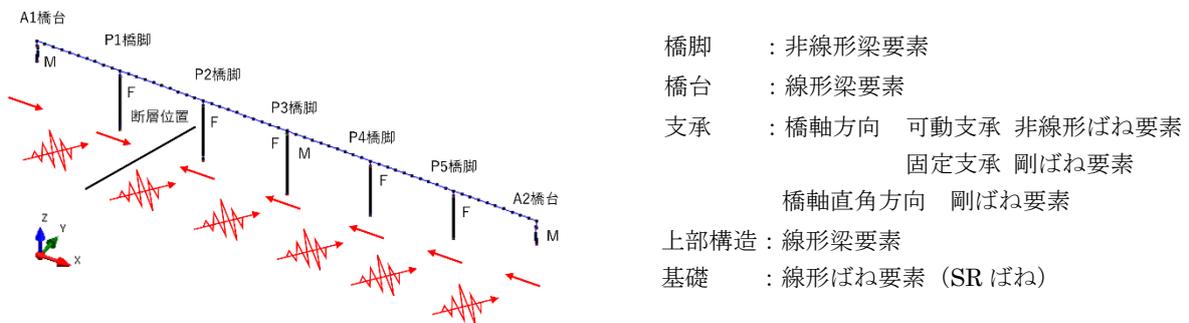


図6 検討例①：断層変位として強制変位を入力後、地震動を考慮した動的非線形解析

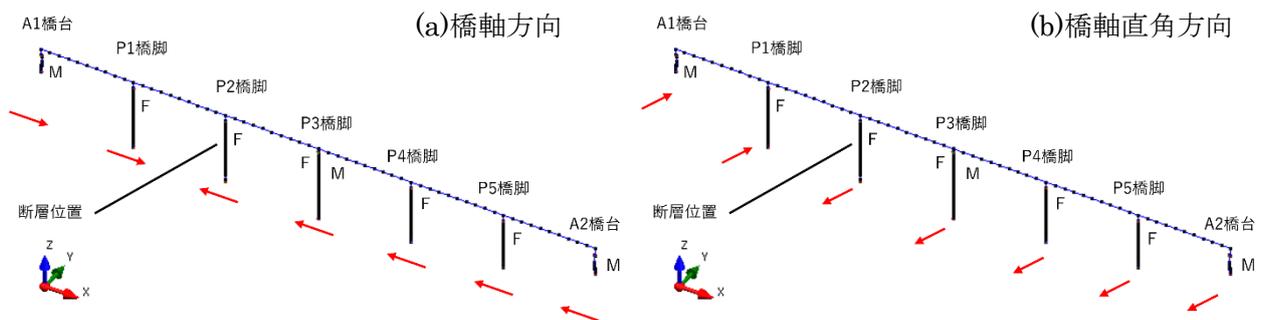


図7 検討例②：橋脚基部に断層変位を考慮する静的非線形解析

ここでは解析例として、検討例②を示します。

検討対象は P3 橋脚にかけ違い部を有する 3+3 径間連続箱桁橋です。P1 橋脚-P2 橋脚間に断層が存在すると仮定し、橋脚基部に強制変位を与える静的非線形解析を行いました。強制変位量はそれぞれ 100cm とし、図 7 に示す通り橋軸方向に作用したケース 1 と橋軸直角方向に作用したケース 2 の 2 ケースを検討します。使用した解析ソフトは RESP-T (構造計画研究所) です。

橋軸方向、橋軸直角方向ともに P1 橋脚が最初に損傷します。図 8、図 9 に P1 橋脚の曲げ降伏時の変形図、曲げモーメント図、図 10 に P1 橋脚天端位置の変形量と断層変位の関係を示します。ケース 1 の P1 橋脚は、基部が X 正方向へ動くものの、橋脚天端は P2、P3 橋脚の影響を受けて X 負方向へ挙動することがわかります。一方、ケース 2 は、断層位置を境に P1 橋脚は Y 正方向、P2 橋脚以降は Y の負方向へ変形しています。なお、今回の断層変位の入力においては、P3 橋脚位置で掛け違いであることや、断層位置から離れていることにより P4・P5 橋脚は曲げモーメントがほぼ発生しない結果となりました。

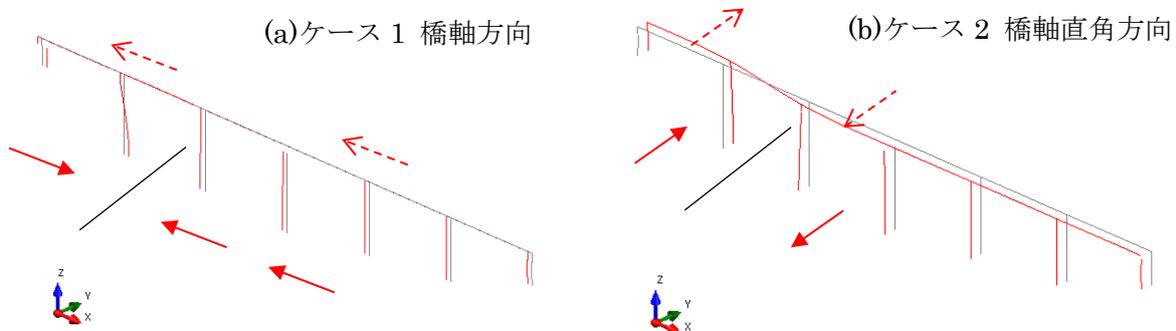


図 8 変形図

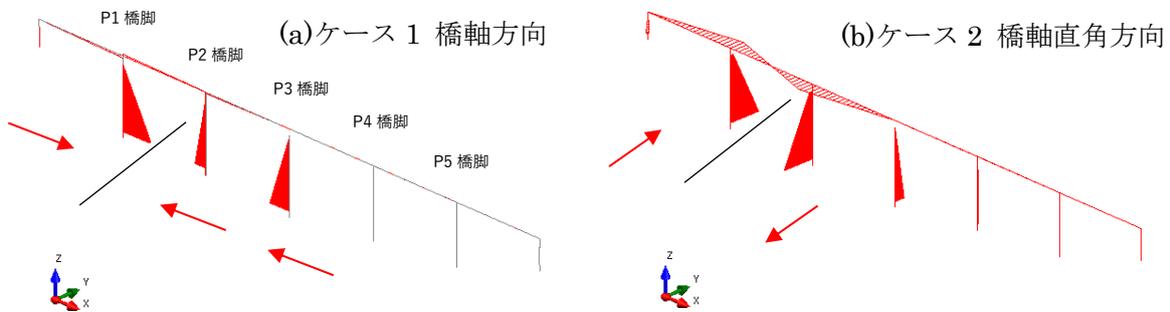
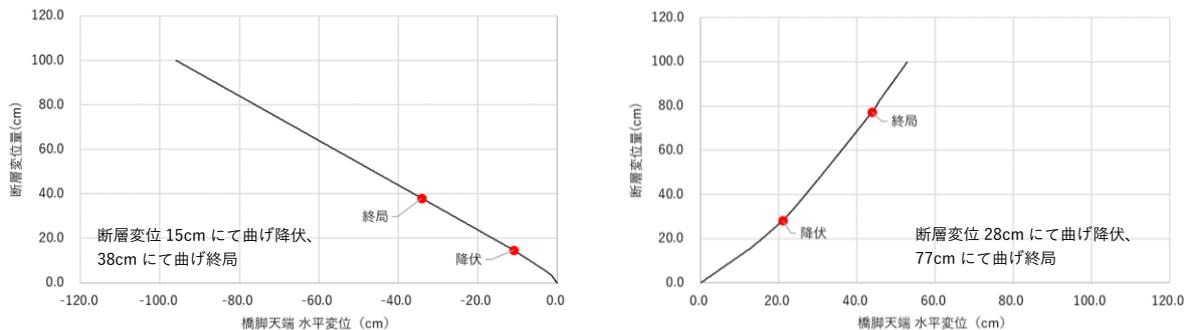


図 9 曲げモーメント図



(a) ケース 1 橋軸方向

(b) ケース 2 橋軸直角方向

図 10 断層変位-橋脚天端変位関係

こちらの事例は固定支承が剛ばね要素ですが、より詳細な検討として支承の損傷を精緻にモデル化し、評価することが考えられます。

● その他の留意事項

断層変位の影響を受ける構造物は、同時に地震動の影響を受けると考えられることから、断層変位と地震動の同時作用の影響を考える必要があります（文献 11)、12)など)。地震動と断層変位の伝播速度の違いから、地震動が先行するという指摘もありますが余震なども踏まえると一概には言えません。

また、本文中では断層変位を静的に与えた検討を実施していますが、実際には現象はあるすべり速度をもって動的に生じます。すべり速度は十分小さく動的な影響は考慮しなくても良いという指摘もありますが、十分に現象が理解されているとはいいがたく今後の研究が待たれます。

● おわりに

断層変位を受ける構造物の安全性評価手法についてご紹介を行いました。断層変位による構造物の被害に関しては、事例の少なさからまだ分かっていないことも多いですが、より安全な社会の実現に向けて取り組むべき問題であると考えています。KKE では、ここでご紹介した評価手法以外にも様々な取り組みを行っており、お客様の状況に合わせたご提案が可能です。

- 1) 日本原子力学会: 断層変位に対するリスク評価と工学的な対応策, 「断層の活動性と工学的なリスク評価」調査専門委員会報告書, 2017年.
- 2) 土木学会 地震工学委員会 断層変位を受ける地中管路の設計手法に関する研究小委員会 研究成果報告書, 2021年.
- 3) 星隈・他, 新阿蘇大橋の性能に及ぼす地盤変状の影響を小さくするための構造的な配慮と工夫, 土木学会論文集 A1, 77 巻 2 号 p. 339-355, 2021年.
- 4) 佐々木・他, 横ずれ断層の近傍に建設される橋梁の形式選定に資する断層変位の影響評価, 土木学会論文集, 79 巻 13 号 論文 ID: 22-13008, 2023年.
- 5) 土木学会 原子力土木委員会 原子力発電所における基礎地盤の変形評価技術, 2024年.
- 6) 地震調査研究推進本部 地震調査委員会: 震源断層を特定した地震の強震動予測手法 (「レシピ」), https://www.jishin.go.jp/main/chousa/20_yosokuchizu/recipe.pdf, 2024年8月16日確認, 2020年3月.
- 7) 松元・他: 2016年熊本地震(Mj7.3)の永久変位を含む長周期(2秒以上)地震動評価のための特性化震源モデルの設定, 第15回日本地震工学シンポジウム 2018年12月.
- 8) 松元・他: 2014年長野県北部の地震(Mj6.7)の長周期(2秒以上)地震動評価のための特性化震源モデル, 日本地震学会秋季大会 2019年9月.
- 9) 高尾・他: 確率論的断層変位ハザード解析手法の日本における適用, 日本地震工学学会論文集, 第13巻, 第1号, pp.17-36, 2013年.
- 10) 三橋・他: 主断層の活動による地殻変動に起因する破砕帯変位量に関するパラメータ解析, 第16回日本地震工学シンポジウム 2023年11月.
- 11) 土木学会 原子力土木委員会 原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針 2021年.
- 12) 三橋・他, 動力学的破壊シミュレーションによる副断層変位を受ける RC カルバートの解析的検討, 土木学会論文集 80(13) 2024年6月.

地震動マップ推定システム QUIET+(クワイエットプラス)



大規模地震・発生直後の課題と対応策

大地震は広域に甚大な被害をもたらす災害であるため、限られた人員・体制で速やかな救援、復旧活動を行うためには、地震発生直後に限られた情報からできるだけ早く**被害の全体像を把握し、被害が大きい地域を特定**するなど、**情報集約と状況把握**が必要不可欠です。市町村名で伝えられる震度の情報だけでなく、面的にどのような揺れが生じたのかを知ること、**重要な建物に生じる被害や被害の大きいエリアを推定**することが可能です。

 発災直後に**状況がつかめない**ため
闇雲な対応になり
やすい

 被害状況の把握に
時間がかかるため
迅速な対応が取れ
ない

被害の全体像を把握する仕組み構築

震度情報を自動取得し面的に展開
発生直後に**各施設の被害を推定**

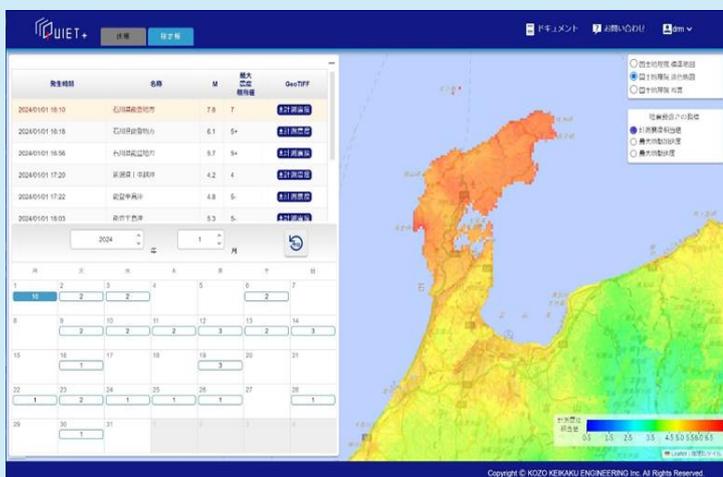
↓

- ・本部での情報集約
- ・被災状況の早期把握

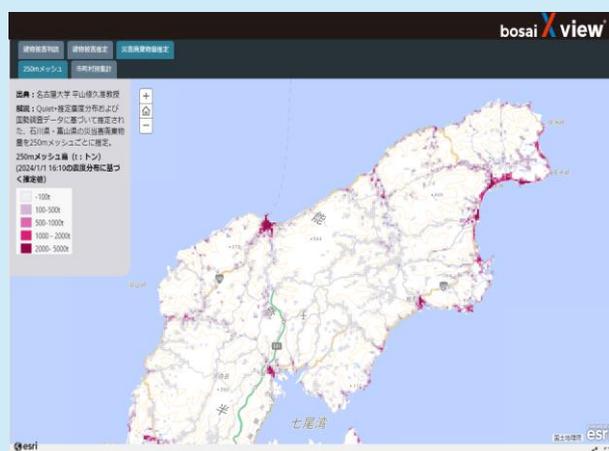
どこから確認したらよいかわかる

地震動マップ推定システム QUIET+では、地震後に公開される地震記録を用いて日本全国250mメッシュの分解能で**各種地震動強さ指標***を推定し、WEBブラウザ上でその結果を確認することができます。**建物に生じる被害や地域の被害分布の推定に活用可能**です。
※計測震度相当値、地表最大加速度、地表最大速度、5%応答加速度、液状化発生確率

令和6年能登半島地震での活用事例



QUIET+：能登半島地震の推定例



防災クロスビュー：令和6年能登半島地震被害量推定
③災害廃棄物量推定
出典：名古屋大学 平山修久准教授

QUIET+のホームページはこちら →

「アカウント登録」より、すぐにご利用いただけます。登録は無料です。



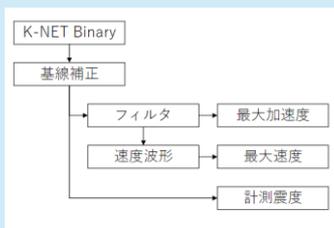
QUIET+のサービス内容

QUIET+ではブラウザアクセスによるWEBサービスのほか、APIサービスにも対応しています。APIサービスを利用する場合は、WEBサイトへログインすることなく、ご利用者様独自のWEBシステムから直接、API方式でQUIET+の推定結果を取得し、その情報を活用することができます。独自に作成したウェブページでQUIET+の推定結果を表示したり、推定された揺れの大きさや予想される被害状況をモバイル端末上で確認するアプリケーションを開発するなど、幅広い活用が可能です。



波形処理

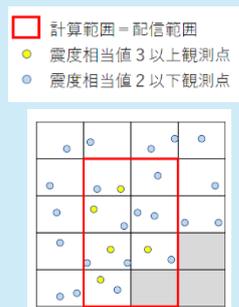
- 基線補正
- フィルタ処理
- 最大値算定



処理	設定
基線補正	Binary記述のオフセット値
フィルタ	ハイパス(0.1-0.13)
最大加速度	幾何平均波形の最大値
最大速度	幾何平均波形の最大値
計測震度相当値	気象庁告示第4号

空間補間

- 250mメッシュ単位
- 震度相当値3以上の観測点を包含する一次地域区画の南西・北東を対角とする矩形範囲を対象



出力

- 地震動マップAPI**
リクエストした日時に該当する地震の計測震度相当値、地表最大加速度、地表最大速度の分布図を GeoTIFF形式で取得
- ポイント情報API**
リクエストした日時に該当する地震の、リクエストした位置における計測震度相当値、地表最大加速度、地表最大速度の値をJSON形式で取得
- 地震情報API**
リクエストした年月に該当する地震の震央地名、マグニチュード、最大震度の値をJSON形式で取得

最新研究成果を反映したアウトプット

QUIET+の推定手法の開発ならびに、扱う地盤の揺れやすさデータ (Vs30マップ) ※については、東京工業大学 松岡昌志教授にご協力をいただいております。

※Vs30とは：表層地盤（地表からおよそ30m程度の深さまで）の平均せん断波速度を指す専門用語です。軟弱地盤ほど値が小さくなり、地震の揺れに対する予測係数であることが知られています。QUIET+では、松岡教授らによる以下の最新研究成果を反映したVs30マップを利用しています。

桑原光平, 高宮奎志朗, 松岡昌志, 翠川三郎：機械学習を用いた日本全国の地盤の平均S波速度分布の予測, 日本地震工学会論文集, Vol.21, No.5, pp.119-139, 2021.11.

松岡昌志, 桑原光平, 橋本光史：日本全国を対象にした新しいVs30マップを用いた地震動強さの推定精度について, 地域安全学会概集, No.51, pp.149-152, 2022.10.

道路橋の FEM 解析

近年、道路橋の設計においても従来の格子解析等に加えてより詳細な FEM 解析が用いられるようになってきています。FEM 解析はこれまでも部分的な取り出しモデルなどで活用されてきましたが、最近では橋梁全体の構造解析に FEM 解析を適用する事例がますます増加しています。

一例として、古い設計基準で設計された既設道路橋の補強検討では、新しい基準のより厳しくなった荷重条件を考慮することとなりますが、通常的设计手法では、広範囲の補強が必要という結果となってしまうことがあります。このような場合に、FEM 解析を適用することで、構造上本当に必要な補強箇所を特定し、現実的かつ最適な補強案を策定できる場合があります。

一方で従来の設計手法で検討した結果、より精緻な FEM 解析を実施しようとする、様々な解析手法やモデル化方法からどれを選べばよいのか、設計者の判断に委ねられる条件をどう設定すればよいのか、戸惑うこともしばしばかと思えます。KKE のコンサルティングサービスでは設計者の課題のヒアリングを行い、解析手法や評価方法のご提案からサポートします。

【コンサルティングサービスの流れ】

- ・ 図面や既往の計算書の確認、設計上の課題のヒアリング
- ・ 検討方法（解析手法、評価手法など）のご提案、御見積
- ・ 検討方法の擦り合わせ、業務受託
- ・ 解析方針書の作成、詳細な解析方法のご説明
- ・ 解析モデル作成、解析実行、結果処理（照査）作業
- ・ 報告書の作成、解析結果・評価結果のご報告

また FEM 解析にも解析手法やモデル化方法には多種多様なものがありますが、本稿では、弾性設計範囲内を想定した最も基本的な線形静的 FEM 解析の事例をご紹介します。

● 道路橋の線形静的 FEM 解析事例

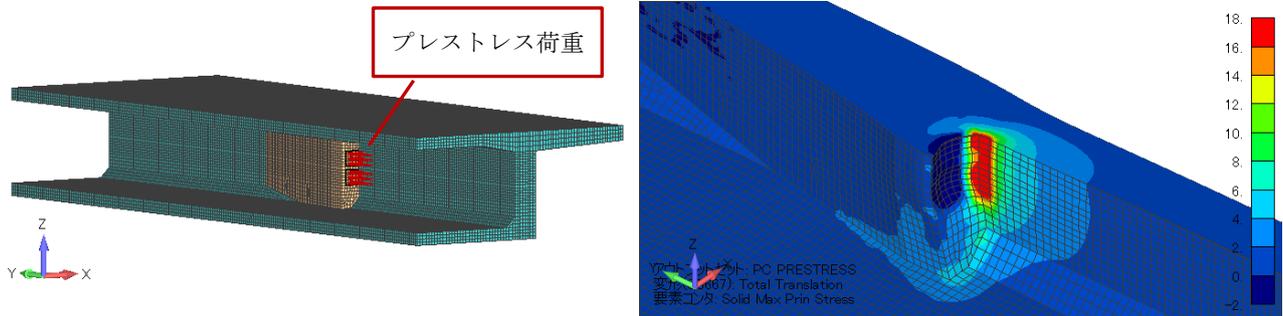
KKE がこれまでに経験した主な解析事例をご紹介します。

- ① 床版取替えに伴う既設桁の発生応力のより詳細な評価（橋梁全体モデル）
- ② 鋼 I 桁橋の床板の横力の検討（橋梁全体モデル）
 - H29 道示で床板の横力の検討が必須となりましたが、道示の設計手法では床版が全て負担し鋼桁の負担を考えない保守的な設計となっています。
 - 3次元線形静的 FEM 解析により、床版と鋼桁それぞれについて実際の横力荷重分担割合を評価しました。
- ③ PC 桁の PC 定着部の局所的な応力状態の確認（図 1）
 - PC 鋼棒の突起定着部は道示に従って各部位に生じる引張力を算定し、それに対して適切な補

強鉄筋を配置するのが一般的です。

- 3次元ソリッド要素を用いた FEM 解析により、橋梁毎の構造・形状や境界条件を反映した引張力の精査、突起内部の応力状態の可視化が可能となります。

➤



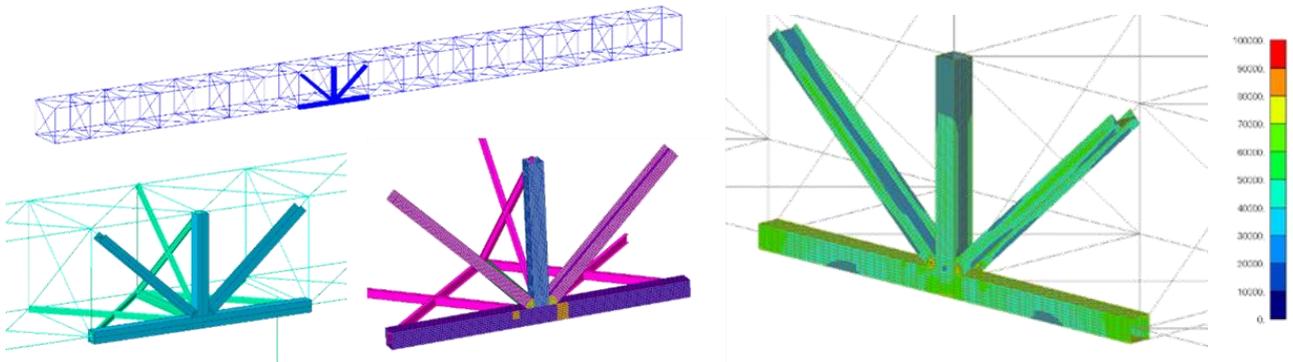
解析モデル

変形図、応力コンター図

図1 PC 定着部の FEM 解析

- ④ 橋梁全体モデルによる補強施工時における鋼材腐食が生じた桁の安全性の検討 (図2)

- 点検の結果、鋼材の腐食が確認された鋼橋について、腐食による減肉を考慮した場合の発生応力を FEM 解析により評価しました。
- 全体系フレームモデルに着目範囲のシェルモデルを組み込み、FEM 解析を実施しました。



解析モデル

応力コンター図

図2 腐食による減肉を考慮した FEM 解析

- ⑤ 変状が生じた橋梁の損傷要因の分析 (橋梁全体モデル)

- 点検の結果、橋脚近傍の主桁に変形とき裂が認められた橋梁の損傷要因の分析を実施しました。
- FEM 解析により、現況での構造安定性を評価し、供用を続けるかどうかの判断材料を提供しました。

上記事例のうち、①について、以下でより詳細なイメージ図とともにご紹介します。

● 床版取替えに伴う既設桁の発生応力のより詳細な評価

既設の鋼 I 桁橋の床版取替えにあたって、主桁の発生応力をより精緻に評価するために FEM 解析を用いた事例です。格子解析による主桁の照査は実施されていましたが、格子解析で評価できない以下のような要因を FEM 解析で評価することが目的でした。

- ・ 格子解析では桁の有効幅で考慮される床版について、面的な床版形状を考慮した荷重分配効果を評価する
- ・ 壁高欄や地覆の剛性の効果を考慮する
- ・ 格子解析では平面保持仮定を前提とするのに対し、FEM 解析ではこの仮定を外すことでより実際に近い応力分布を得ることができる

目的を踏まえ、解析手法は線形静的解析とし、モデル化方法は 3 次元モデルで、床版をソリッド要素、鋼桁をシェル要素でモデル化しました (図 3)。荷重条件は死荷重及び活荷重とし、格子解析結果で最も厳しい条件となる活荷重分布を用いました。床版のモデル化、壁高欄のモデル化がポイントとなりました。



図 3 解析モデル図

解析結果を図 4 に示します。活荷重により床版に 3 次元的なたわみが発生しており、発生応力等を含めて分析することで、床版が隣接桁に荷重を分配させる挙動が確認できました。

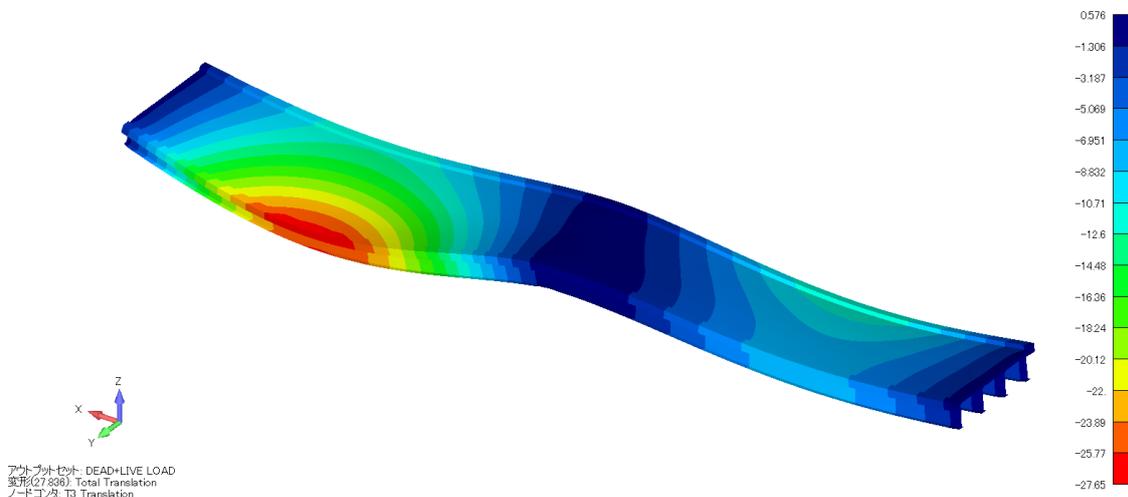


図 4 変形図

これは格子解析では考慮されない床版の影響です。活荷重条件や構造形式にもよりますが、FEM 解析で算出された応力度は格子解析により算定した応力度に対して小さくなる傾向となりました。

● Load Rating による耐荷性能評価

ここで、本 FEM 解析結果を用いて、既設橋梁の耐荷性能を Load Rating 手法により評価する方法を紹介します。

Load Rating は、既設橋梁の耐荷性能評価手法で、日本よりも早くインフラ老朽化問題が顕在化した米国の AASHTO やカナダの CSA 基準で規定され、実用化されています。Load Rating では式(1)に示す RF (Rating Factor) 値を用いて評価を実施します。分母の基準となる活荷重に対して、分子の橋梁の健全性を考慮した現状における耐荷力が何倍であるかという形で数値化し、RF 値が 1.0 以上ならば余裕があることを示します。H29 道示で導入された部分係数法の考え方を既設鋼橋に適用するもので、従来の安全率に対してより合理的な評価が可能となります。

$$RF = \frac{\phi_c C - \gamma_D D - P}{\gamma_L (L + IM)} \quad (1)$$

現状の耐荷力

活荷重

ここで、

- ・ C : 部材耐力
- ・ D : 死荷重効果
- ・ L : 活荷重効果
- ・ P : 死荷重以外の永続的効果 (乾燥収縮、クリープ、プレストレス力)
- ・ IM : 衝撃係数
- ・ ϕ_c : 状態係数 (橋梁の健全性に応じた耐荷力の低減を評価する係数)
- ・ γ_D : 死荷重係数 (=1.05 : H29 道示より)
- ・ γ_L : 活荷重係数 (=1.25 : H29 道示より)

対象橋梁の各部材の余裕度を RF (Rating Factor) 値で評価した結果を図 5 に示します。

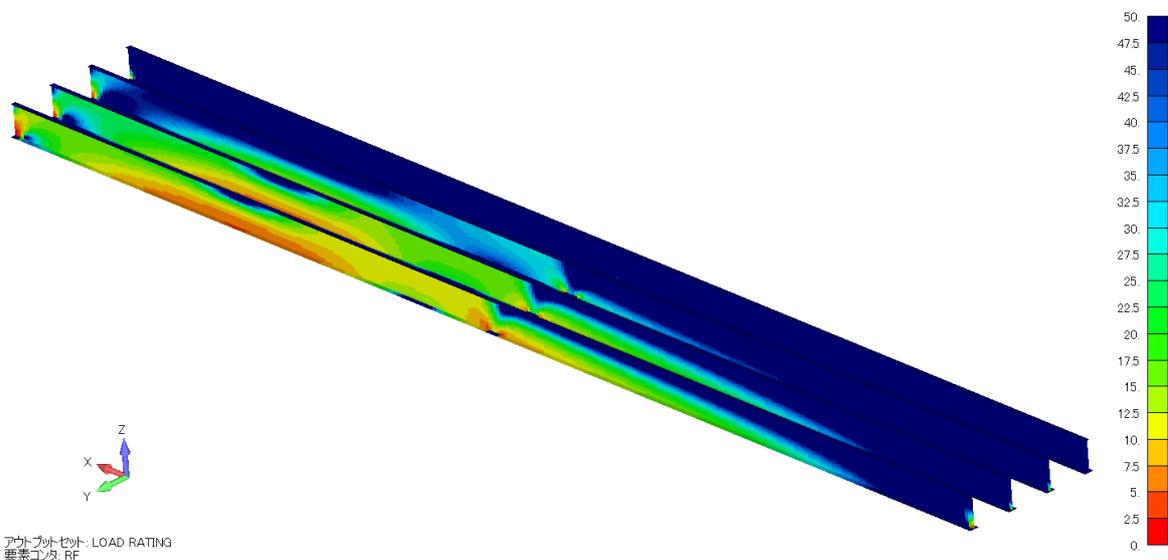


図 5 RF 値コンター図

例えば、安全率（許容応力／発生応力）のコンター図からは、死荷重と活荷重による合計の発生応力に対する余裕度であるため、建設当時と比較した活荷重の増加と床版厚の増加等による死荷重の増加のどちらの影響が大きいかまでは読み取れません。一方で、死荷重分を除いた耐荷力が活荷重の何倍かを示している RF 値はその意味がより明確であるといえます。

このように FEM 解析と Load Rating を組み合わせることで、既設橋梁の耐荷性能を定量的に評価し、可視化することが可能となります。

本手法は国内でも H29 道示で部分係数法を用いた限界状態設計法による照査が導入されたこともあり、実用段階を迎えており、損傷による耐荷力低減を評価するための状態係数や、上部構造形式に応じたりダンダンシーを評価するためのシステム係数などを考慮することで、構造形式や供用年数、損傷程度の異なる橋梁間の耐荷性能を横並びに評価することができます。

● KKE の FEM コンサルティングサービス

ここまでご紹介した基本的な線形静的 FEM 解析事例に加えて、KKE では鋼材、コンクリート、複合構造の材料非線形や座屈などの幾何学的非線形を考慮した解析や動的解析など設計者の課題に応じた、より高度な FEM 解析についても豊富な実績があり、対応が可能です。

【参考文献】

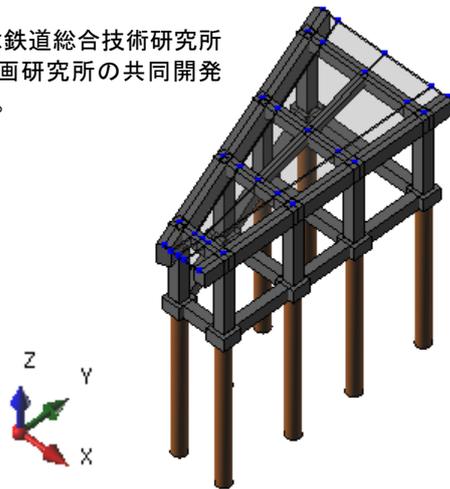
- ・笠松徹，奥井義昭，石橋正博，山川創：Load Rating を用いた既設橋梁の耐荷性能評価に関する一検討，土木学会論文集 A，Vol. 77, No. 3, 418-326, 2021.
- ・ASSHTO: Manual for Bridge Evaluation (MBW), 2011.
- ・AISC: Load Rating of Steel Bridges, 2022.

DARS

Version 2.4
鉄道構造物等の3次元耐震性能照査プログラム

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

DARS は鉄道総合技術研究所と構造計画研究所の共同開発商品です。



3次元でのモデル化により、これまでの2次元耐震性能照査プログラムでは対応できなかった不整形なラーメン高架橋に対応します。また、スラブへの直接的な荷重配置により複雑な荷重計算、荷重分担計算の省略や、1モデル2方向に解析・照査することにより解析ケース数、作業量を大幅に軽減し、これまでの設計者の悩みを解決します。

プログラム概要

■ 対象構造形式

- ラーメン高架橋 (2D・3D)
- 杭基礎 (場所打ち杭・直接入力)
- SR バネ

■ 対象部材

- RC (矩形・円形・T型)

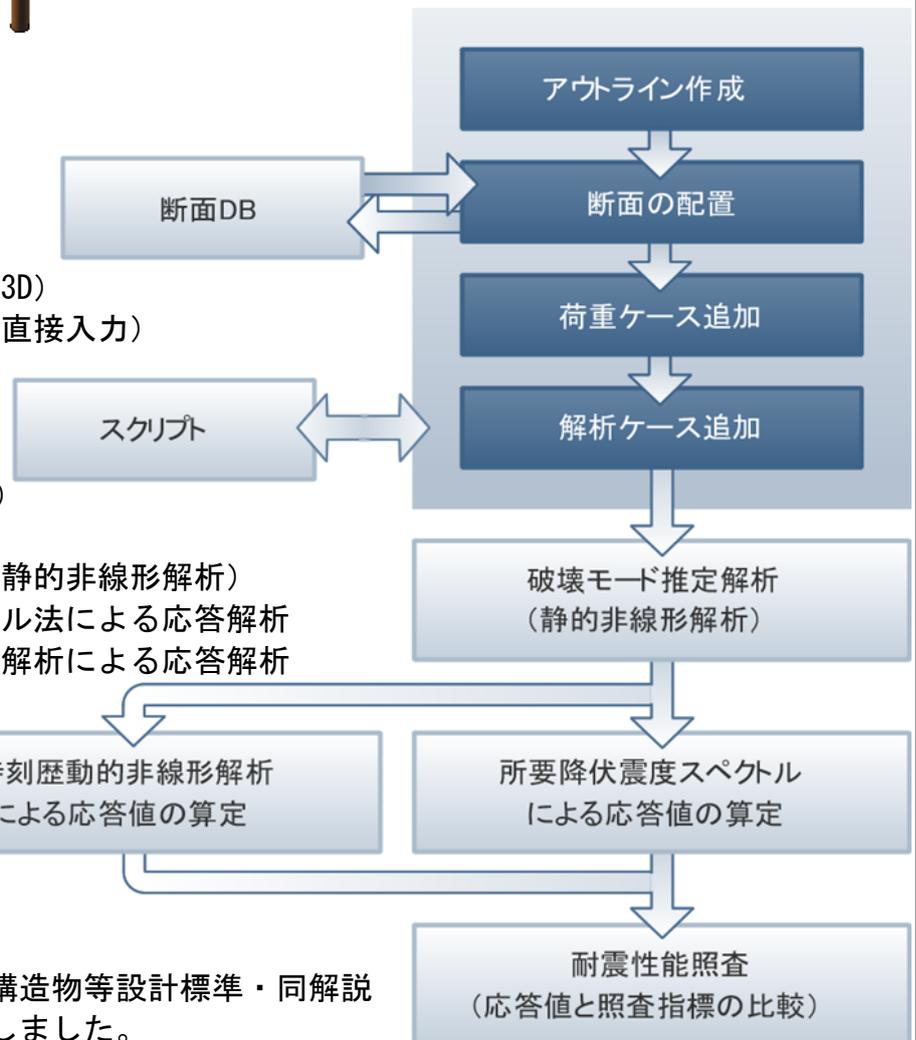
■ 計算機能

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

■ R5年鉄道設計標準への対応

令和5年1月に発刊された鉄道構造物等設計標準・同解説 (コンクリート構造物) に対応しました。

- T形断面のフランジ鉄筋の考慮
- 部材の支持条件に応じたせん断耐力式の適用
- $p_w \cdot f_{wyd} / f'_{cd} = 0.10$ を上限としたせん断耐力の計算
- 場所打ち杭の杭頭部に対して、等価せん断スパンを用いたせん断照査法を導入



New!

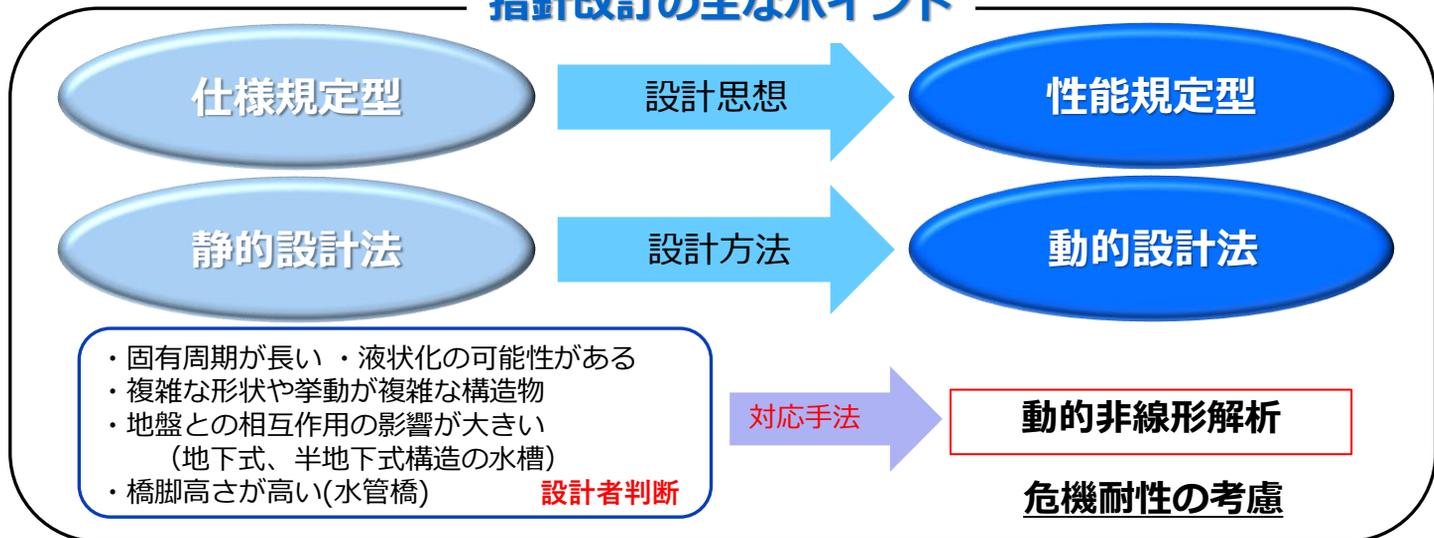


詳細な
製品情報は
こちら

水道施設耐震工法指針2022改訂に対応した解析業務

新設・既設の水道施設について、各種解析モデルを用いた静的・動的非線形解析により水道施設耐震工法指針・解説の2022年度改訂版に対応した耐震性能評価を実施しています。永年培ってきた解析コンサルティングの経験と実績に基づき、課題に応じた最適な検討方法をご提供いたします。

指針改訂の主なポイント

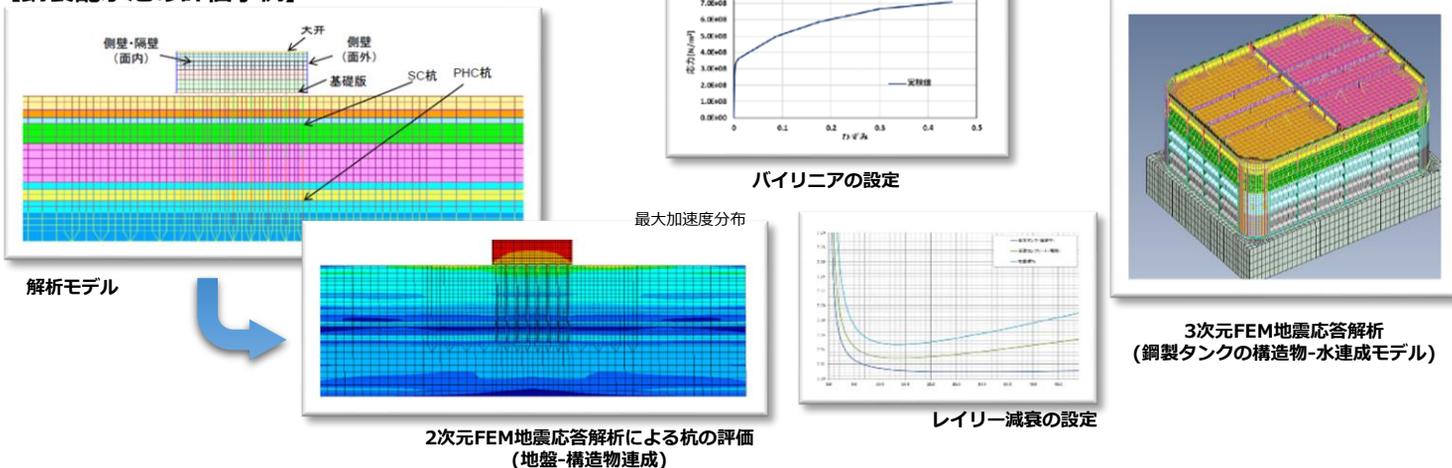


■ 水道施設の地盤-構造物-水連成モデルによる地震応答解析 2次元静的・動的非線形解析、3次元静的・動的非線形解析、地盤の液状化評価

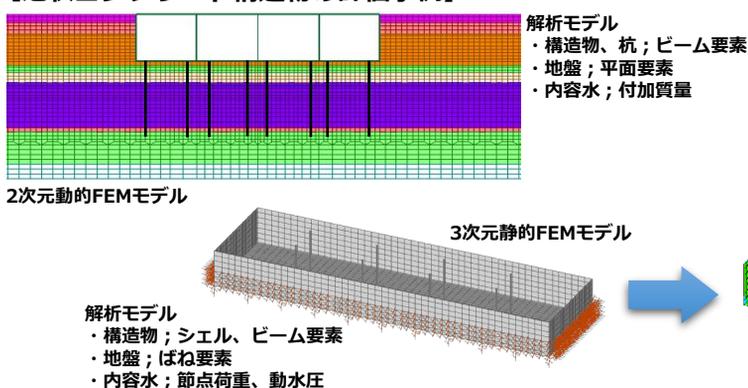
地下式・半地下式の池状コンクリート構造物、および地上水槽(PC製、鋼製)の配水池の地震応答解析により水槽本体、基礎版、杭の照査を行います。RC製、PC製配水池はコンクリート示方書や道路橋示方書による評価、鋼製タンクについては流体要素によるバルジングを考慮した3次元解析の結果を用いた照査を行います。

鋼製タンクの評価においては建築、橋梁、プラント等の鋼構造物設計における多くの実績により、最適なクライテリア値をご提案いたします。

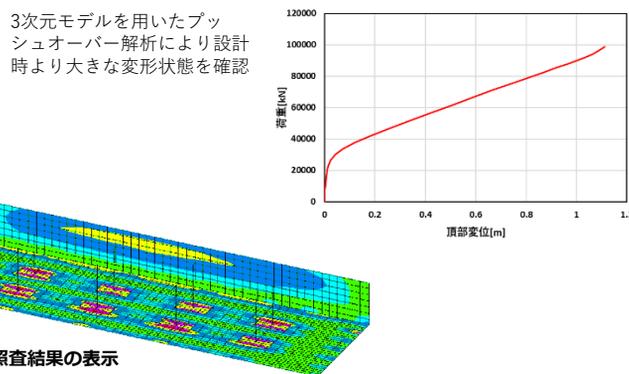
【鋼製配水池の評価事例】



【池状コンクリート構造物の評価事例】



【構造解析による危機耐性の検討の例】



■ 水管橋の動的・非線形解析

2次元地震応答解析、3次元地震応答解析、地盤の液状化評価

数多くの橋梁解析の実績を踏まえ、独立形式・共用形式・添架形式の水管橋の耐震性能評価を実施します。フレームモデル、FEMモデルを用いた静的・動的・非線形解析が可能です。

水管橋を構成する上部構造、下部構造、基礎をモデル化し、橋脚、杭などの主要部材とともに、支承部や伸縮可撓管など近年損傷被害の多い構造部位の耐震性を評価します。

【水管橋の被害事例】

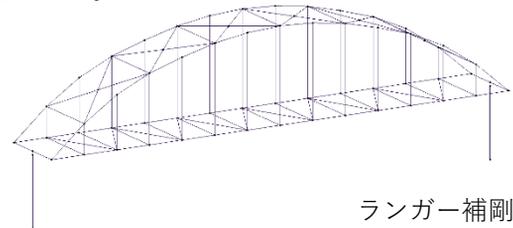
水管橋の地震時被害事例は過去の被災事例等から以下のように分類できます。

- ①橋台の移動、沈下、転倒
- ②支承の破壊
- ③伸縮可撓管・継手部の損傷

近年の事例からは特に支承部、伸縮可撓管などの被害が多く、これら構造部位の耐震性にも十分配慮する必要があります。

【動的解析が必要な水管橋】

液状化のある地盤条件の場合や、固有周期の長い水管橋、橋脚高さが高い水管橋、ケーブル系やランガー形式のような複雑な地震時挙動を考えると考えられる水管橋は動的解析が必要と考えられています。



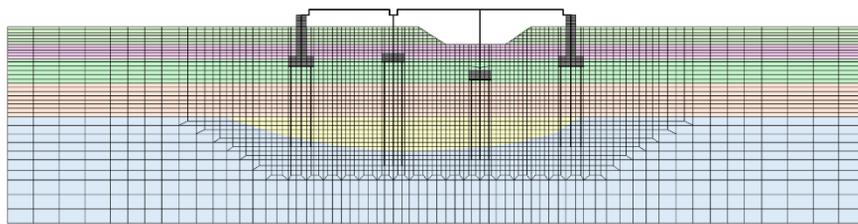
ランガー補剛形式

【水管橋の動的解析事例】

解析モデル

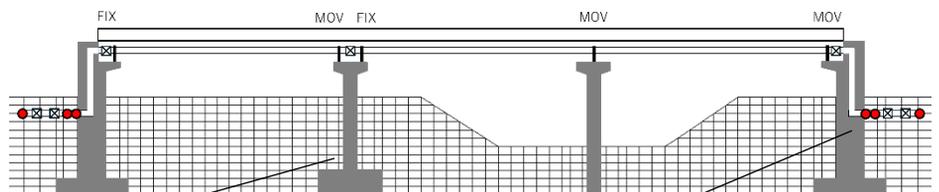
- 通水管、橋脚、鋼管杭：非線形梁要素
- 橋台躯体：平面ひずみ要素
- 地盤：平面ひずみ要素（液状化考慮）

- モデル化幅は地盤深さの3倍程度
- 地盤は1波長あたり5要素以上の要素上限高さ
- 側方及び底面境界：粘性境界



照査内容

- 橋脚、橋台の照査
- 鋼管杭の照査
- 伸縮可撓管の照査



赤丸間の相対変位

(例)	応答曲率 (1/m)	曲率の制限値 (1/m)	照査値
P1橋脚	6.89E-03	2.25E-02	0.31

	軸方向相対変位 (mm)	鉛直方向相対変位 (mm)
伸縮可撓管	55	18

■ 入力地震動の作成、選定

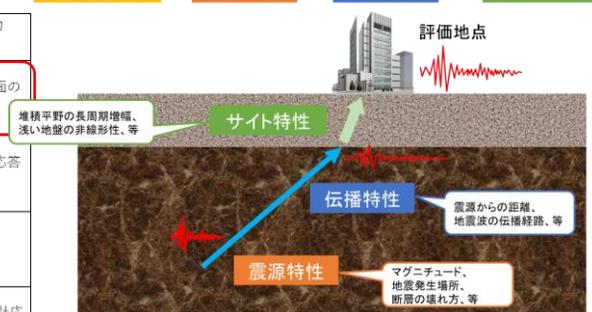
指針で示された方法1による地震動作成と方法2,3,4による地震動選定

ダムや橋梁などの土木構造物を対象とした実績を踏まえ、震源断層を想定した当該地点での入力地震動作成や、想定地震動・強震記録を利用する際の地震動選定のサポートをいたします。

水道施設耐震工法指針2022改訂で示された地震動の設定方法

$$\text{地表の揺れ} = \text{震源特性} \times \text{伝播特性} \times \text{サイト特性}$$

設定方法	動的解析に用いる設計地震動	静的非線形解析に用いる設計地震動 (ブッシュオーバー等)
方法1	地震動評価結果の地表面、工学的基盤面の加速度時刻歴波形、あるいは応答スペクトルを用いる	地震動評価結果の地表面、工学的基盤面の応答スペクトルを用いる
方法2	地域防災計画等の想定地震動を使用する	想定地震動の地表面、工学的基盤面の応答スペクトルを用いる
方法3	当該地点と同様な地盤条件（地盤種別）の地表面における強震記録の中で、震度6強～震度7の記録を用いる	強震記録の応答スペクトルを用いる
方法4	兵庫県南部地震の観測記録を元に設定された設計震度、設計応答スペクトル	「2009年版指針 総論解説編III」の設計応答スペクトル等を用いて設定する



方法1による地震動設定

理想化陽解法 FEM を用いた溶接構造物の変形・残留応力解析

プラントやタンク、橋梁といった建造物、及び、船舶などの大型の溶接構造物においては、それらの製造及び組み立て時に多層溶接が用いられます。入熱量の大きな溶接の施工に伴って、溶接近傍には残留応力が必然的に生じ、応力腐食割れや疲労き裂などの原因となる場合があります。また、溶接変形は加工精度に大きく影響してきます。

これら、溶接に関するシミュレーションは、固有ひずみ法といった評価法や静的陰解法による熱弾塑性 FEM 解析があるものの、精度や解析設定、計算時間において課題があり、大規模溶接構造への適用例はありません。そこで、静的陰解法 FEM と同程度の解析精度を有し、かつ、高速・省メモリな解析が可能となる理想化陽解法 FEM と呼ばれる手法を用いた溶接構造物の変形・残留応力シミュレーションについてご紹介します。

●理想化陽解法について^[4]

理想化陽解法 FEM においては、以下の①②③の手順に従い解析を進めます(図 1)。

- ① 荷重増分、すなわち溶接過渡状態において温度増分を荷重とした運動方程式を扱う。
- ② 動的陽解法 FEM の基礎式(1)に基づき静的平衡状態に達するまで変位を計算する。
- ③ 静的平衡状態が得られた場合には、次の荷重ステップの計算に移るために、手順①に戻る。

$$\left(\frac{1}{\Delta t^2}[M] + \frac{1}{2\Delta t}[C]\right)\{U\}_{t+\Delta t} = \{F\}_t - \left([K] - \frac{2}{\Delta t^2}[M]\right)\{U\}_t - \left(\frac{1}{\Delta t^2}[M] - \frac{1}{2\Delta t}[C]\right)\{U\}_{t-\Delta t} \quad (1)$$

ここで、質量マトリックス[M]および、減衰マトリックス[C]を節点集中型の対角マトリックスとすることで省メモリに解析を行うことが可能となるとともに、[M]、[C]を適切に調整することにより発散することなく数ステップの反復計算でつり合い式を満たすことができます。このとき、慣性項と減衰項の影響は無視できる程度に小さくなることから、静的平衡状態を陽的に求めることができます。以上の計算手順を荷重増分毎に用いることで、動的陽解法 FEM に基づきながらも準静的問題を解析することが可能となります。静的陰解法 FEM と同程度の解析精度を有しつつ、高速かつ省メモリな解析が期待できます(図 2)。

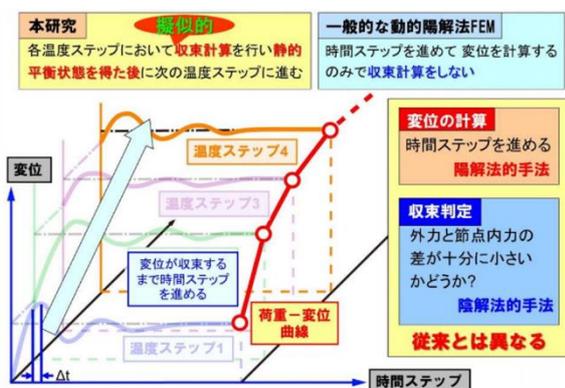


図 1 理想化陽解法 FEM の概要

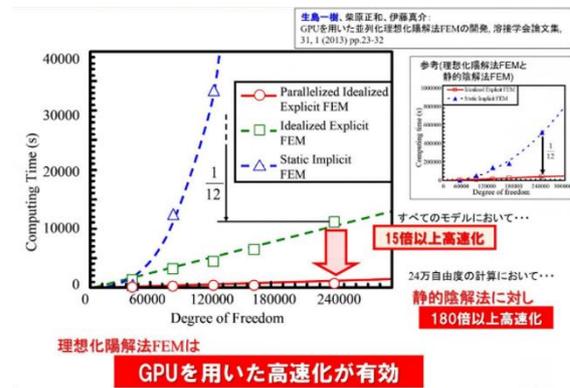


図 2 静的陰解法との計算時間の比較

●大規模薄板構造物の溶接変形解析への適用^{[2][3]}

バルクキャリアなどの大型船体の建造においては、部材の切り出しにはじまり、小規模な部材同士を溶接する小組工程、小組工程により作成された部材同士を溶接し大型ブロックを製作する大組工程を経て、最後にドック内にて大型ブロックを船体へ搭載するといったブロック建造方式が主流です(図3)。

このうち、船体二重底ブロックを建造する際の小組工程と大組工程を解析対象とし、溶接工程の過渡の溶接変形・応力解析を、理想化陽解法 FEM を用いることで約5日で解析できることが分かりました。更に、GPU 並列化を適用した理想化陽解法 FEM では、GPU を用いない場合に比べて約5倍～10倍更に高速になることが分かっています。

これにより、大規模構造における溶接プロセスの最適化検討や改善方法の検討がシミュレーションで可能となります。

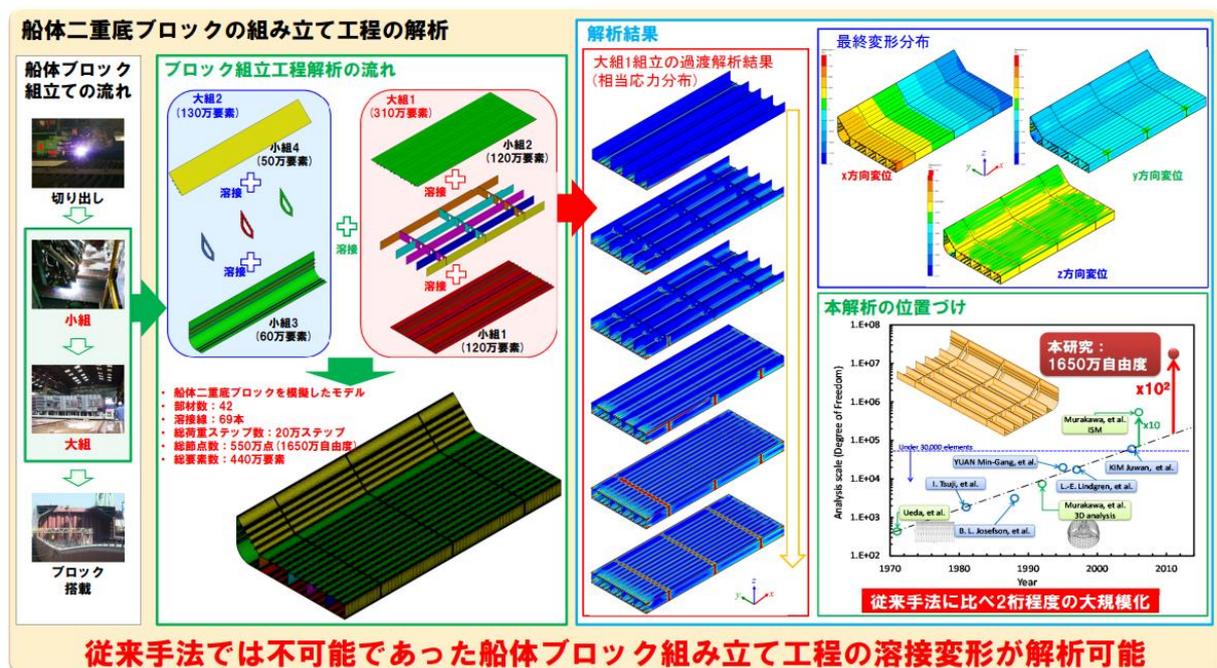


図3 船体ブロックの大規模モデルへの適用

●まとめ

本稿では、理想化陽解法と呼ばれる手法に基づいた溶接変形・残留応力における解析評価方法をご紹介します。局所的な溶融や塑性を伴う非線形性の強い溶接分野において、高精度かつ高速にシミュレーションを実施できる技術は重要です。特にプラントや船舶といった溶接が用いられる大規模構造物における応力腐食割れや疲労亀裂の予測など様々な場面で活用が可能です。

参考文献

[1] 理想化陽解法 FEM による溶接構造物の大規模接合・組立シミュレーション

リンク：https://www.jstage.jst.go.jp/article/jjws/87/6/87_430/_pdf

[2] 柴原正和, 動的陽解法 FEM を基にした大規模構造のための溶接過渡変形・応力解析手法の提案

[3] 生島一樹, 理想化陽解法 FEM を用いた溶接構造物の変形・残留応力の予測手法の開発に関する研究

トンネル覆工コンクリート施工時の流動解析

覆工コンクリートは、トンネルにおける最も内壁のコンクリート層で、その背面にある防水シート、断熱材、吹付けコンクリートを保護する役割を持っています。覆工には外力が作用しないことを基本としていますが、内壁であるため強度が不足した場合、剥落の危険性があります。そのため、以下のように、想定しない外力に対しても余力を持たせるような設計が求められています¹⁾。

- 覆工を施工した後、水圧、上載荷重等によって外力が作用した場合、これを支持する。
- 地質の不均一性、支保工の品質のばらつき、ロックボルトの腐食等の不確定要素を考慮し、構造物としての安全率を増加させる。
- 使用開始後の外力の変化や地山・支保工材料の劣化に対し、構造物としての耐久性を向上させる。ただし、将来的に覆工に作用する荷重の影響が大きいと考えられる場合には、覆工の耐荷力を評価し、適切な対策を講じなければならない。

強度低下の原因としては、凍害、漏水、塩害、施工不良による材料分離、充填不足が挙げられます。覆工コンクリートの施工は、難易度が高いことが指摘されています²⁾。側壁は、コンクリートの充填時に自由落下を伴うため材料分離の可能性が高くなります。天端部は、ポンプで吹上げて打設を行うため、充填不足による空洞が生じる可能性があります。そのため、施工時には、充填口を複数設置、バイブレータ、排気ホースが用いられますが、内部での充填状況は目視確認が困難なため、事前に材料分離の有無、空洞箇所を特定することで、効率的な施工が可能となります。

● トンネル覆工のコンクリート流動解析

本稿では、空洞箇所の特定、回避策の検討を目的として、覆工コンクリートの天端部の吹上げ方式の流動解析を実施しました。型枠形状³⁾は、幅約 2.5m×延長 6m×覆工厚 225~300mm（凹凸を含む）としました。解析の評価項目は、以下の通りです。

- 流動状況の可視化
- 空洞化しやすい箇所の特定
- 打設経過時間・流動距離の空間分布

解析は、スランプ 15cm、26cm の 2 ケースを実施しました。解析手法は、自由表面流れを得意とする MPS 法⁴⁾を採用し、商用ソフトウェア Particleworks を用いました。粘性モデルは、bi-viscosity モデル⁴⁾を用いて、スランプ試験の解析を行い、所定のスランプとなるように塑性粘度、降伏値のパラメータスタディを行い、覆工コンクリート解析の物性値として適用しました。

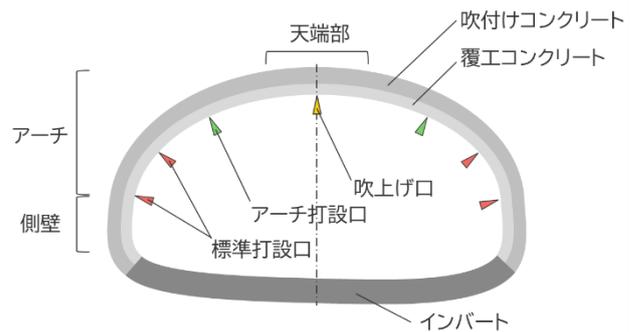


図 1: 覆工コンクリートの各部の名称 (参考 2)

表 1: 解析条件

項目	単位	スランプ15cm	スランプ26cm
密度	kg/m ³	2,300	2,300
塑性粘度	Pa・s	2,700	500
降伏値	Pa	1,800	100

表 2: コンクリート物性値

項目	単位	値
初期粒子間距離	mm	25
時間刻み	s	0.008
粒子数	-	346,690
重力加速度	m/s ²	9.8
吹上げ流量	m ³ /h	15

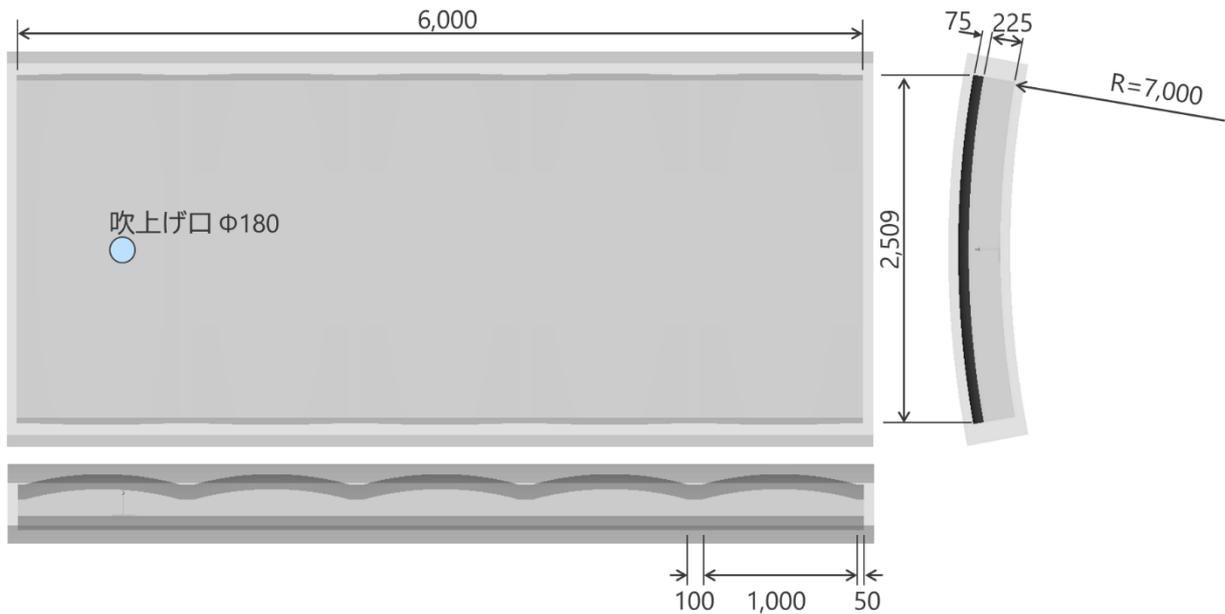


図 2: 天端部型枠形状(左上: 平面、左下: 側面、右: 正面)

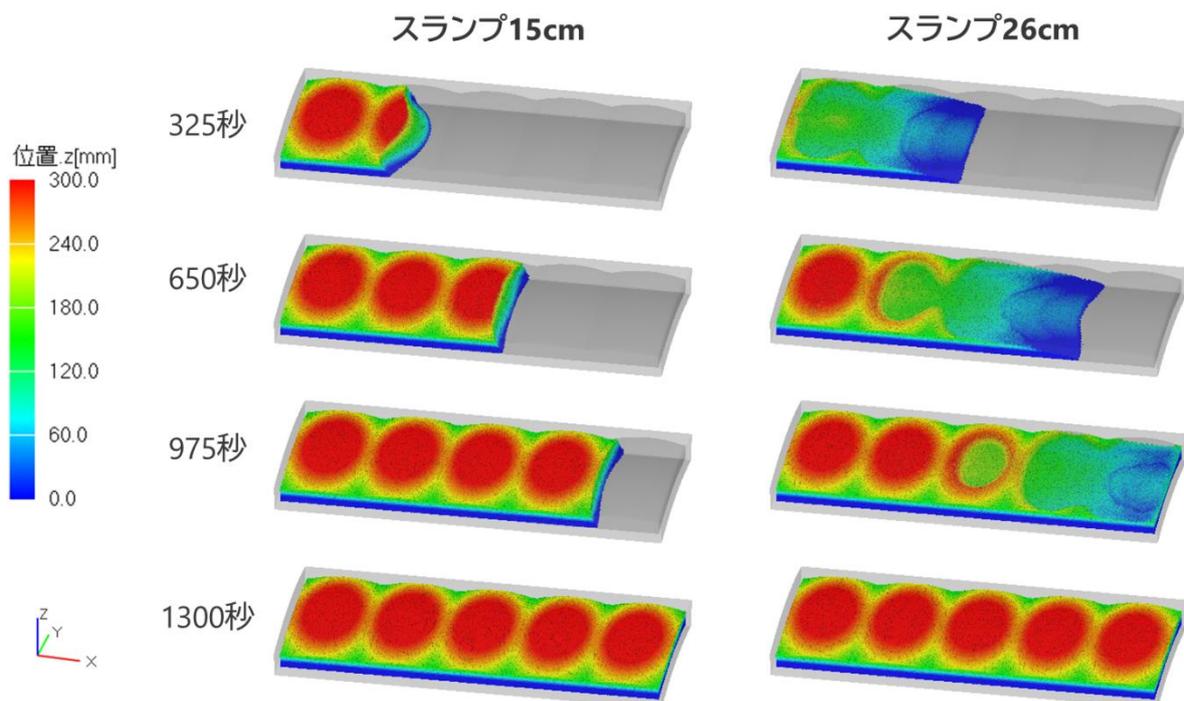


図 3: 流動状況 (位置 z コンター表示)

● 解析結果と結果評価

図 3 の解析結果において、スランプ 15cm は鉛直方向に空洞なく充填されていますが、スランプ 26cm では凸部に空間が形成され、x 方向の流動距離が大きくなっていることが確認できます。スランプ 26cm の 975 秒では、閉塞された空洞が形成されましたが、当計算では、簡単のため気相を考慮していないため、1300 秒後には空洞がコンクリートで満たされる結果となりました。しかしながら、気相を考慮せずとも空間が閉塞される現象は確認できることから、解析結果により、空洞化しやすい箇所の特定が可能であると考えられます。

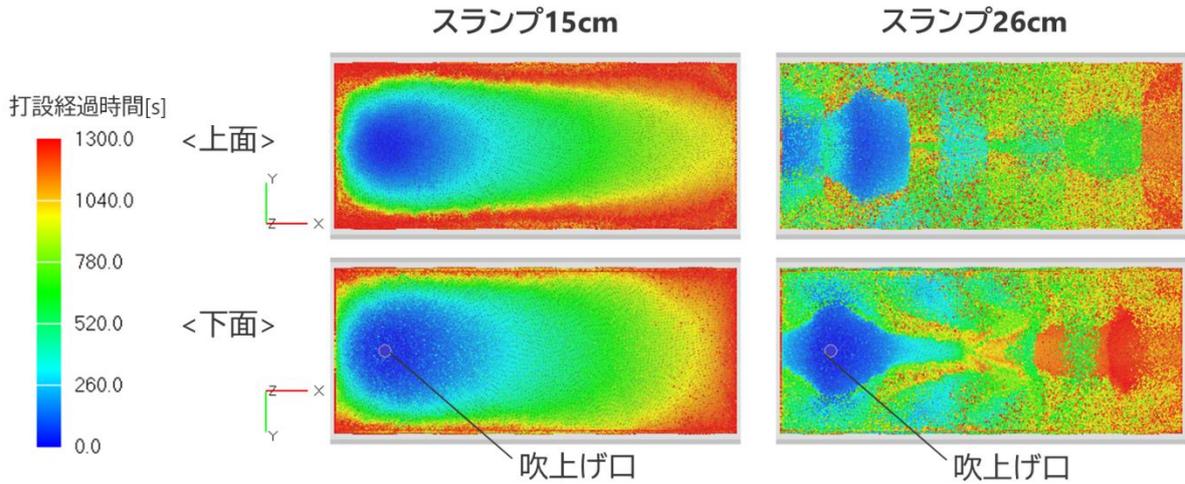


図 4：打設経過時間の分布（1300 秒時点）

図 4 では、コンクリート流体が型枠内に打設されてからの経過時間を示しています。スランプ 15 cm は、吹上げ口から離れるほど、楕円状に打設経過時間が大きくなっています。これは、流動性が低く、ポンプによって内部から膨張するようにコンクリート押し出されて流動したことが要因と考えられます。

スランプ 26cm は、縞模様のような打設経過時間の分布が形成され、打設経過時間が大きい箇所、小さい箇所が、x 方向に対して層状に分布していることを確認しました。スランプ 26cm は比較的流動性が高いため、打設経過時間が空間的に乱されたと考えられます。

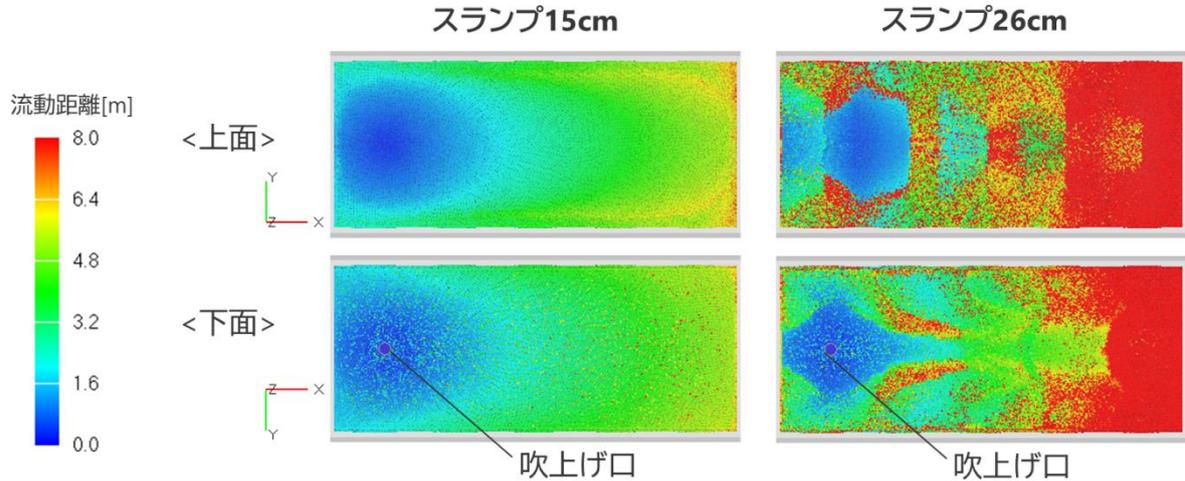


図 5：流動距離の分布（1300 秒時点）

図 5 は、吹出し口からの流動距離を示しています。スランプ 15cm は吹上げ口を中心に流動距離が小さくなり、全体として流動距離が型枠延長の 6m ほどに収まっています。これは、流動性が低く、ポンプの押し出しの力によって膨張するように流動しているためと考えられます。

スランプ 26cm では、流動距離が 8m を超える箇所が多く存在しています。これは、流動性が高いため重力を受けやすく、X、Y 方向に流れることで流動距離が大きくなったと考えられます。

図 4、図 5 は類似の分布傾向にあり、打設経過時間、流動距離の分布が明瞭に分かれているほど、打ち継ぎに近い特性になることで、ひび割れの発生に影響すると考えられます⁵⁾。このことから、解析結果が、打ち継ぎ及び、ひび割れ箇所の予測として活用できると考えられます。

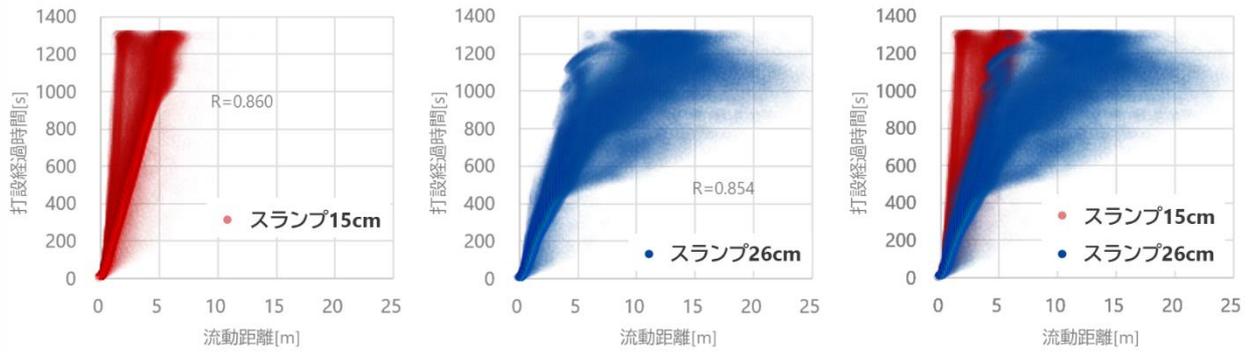


図 6：打設経過時間と流動距離の関係（1300 秒時点）

図 4, 5 で類似の分布を確認したため、打設経過時間と流動距離の関係を確認しました（図 6）。スランプ 15cm、26cm の相関係数は 0.860、0.854 で、打設経過時間と流動距離は比例関係にあると考えられます。図 6 より、スランプ 15 cm に比べて、26 cm の流動距離が大きいことが確認でき、スランプによって流動状況が大きく異なることが示されました。

● おわりに

本稿では、トンネル覆工コンクリートの流動解析を、スランプ違いで実施しました。解析結果の流動挙動の可視化により、空洞化しやすい箇所を特定しました。打設経過時間・流動距離より、ひび割れのしやすい箇所を特定しました。このように解析を事前実施することで、空洞化を回避するような型枠形状、吹出し位置・流量、コンクリート特性の検討が可能であると考えられます。今後の課題としては、バイブレータの考慮、気相を考慮した計算による空洞化の再現性の向上が挙げられます。

参考文献

1. 北海道開発局：北海道開発局道路設計要領 第 4 集 トンネル第 6 章 覆工，令和 6 年 4 月
https://www.hkd.mlit.go.jp/ky/kn/dou_ken/ud49g700000021j2-att/splaat0000003wx4.pdf
2. 国土交通省 東北地方整備局コンクリート構造物の品質確保の手引き(案)(トンネル覆工コンクリート編)平成 28 年 5 月 <https://www.thr.mlit.go.jp/road/sesaku/tebiki/tonnelfukoukonkurito.pdf>
3. 椎名,佐藤,高橋,金丸：覆工コンクリートの天端充てん性と品質の向上への実験取り組み，西松建設技報 VOL.35, 2012 https://www.nishimatsu.co.jp/solution/report/pdf/vol35/g035_17.pdf
4. 入部, 伊良波, 富山, 松原：フレッシュコンクリートの流動問題への粒子法の適用，コンクリート工学年次論文報告集, Vol.25, No.1, 2003. https://data.jci-net.or.jp/data_pdf/27/027-01-1167.pdf
5. 小池, 小野里, 諸澤, 野間, 多寶：覆工コンクリート天端部の品質に関する実験的検討，安藤ハザマ研究年報 Vol.5 2017 https://www.ad-hzm.co.jp/trr/2017/pdf_file/04.pdf

計測データを再現できる解析モデルの自動作成に関する研究

構造計画研究所 建築構造工学部 三沢 健介, 村木 唯人, 正月 俊行
西松建設 山崎 康雄, 茨城大学 肥田 剛典

キーワード： システム同定
スタビライゼーションダイアグラム

部分空間法 構造ヘルスマonitoring

1. はじめに

近年、構造物の損傷や劣化状況の度合いを把握するため、地震被災後の建物を対象として、構造ヘルスマonitoringが行われています。実測を精度よく再現できる解析モデルを準備することで、計測データの妥当性検証や被災後の建物補修または補強検討等に役立てることが出来ると考えられています。

しかし、解析モデルを作成するには専門家や設計者が手を動かして推定結果を検証しておく必要があることや今後Monitoring対象建物が増え続ける見込みであり、それらに伴う検討の手間は増加していく可能性が高いと推測されます。そこで、自動で精度の良い解析モデルを

作成することが出来れば手間やコストの削減に対して有用であると考えています。

今回、部分空間法を用いて自動で精度が高い解析モデルを作成する手法を構築しました。その手法を数値実験データ及び地震被害時の実測データに対して適用し、検証した結果を示します。なお、部分空間法により得られる状態空間モデルのことを「解析モデル」と呼称します。

2. 再現度の高い解析モデルの自動作成手法

部分空間法によって同定された解析モデルを用いることで入力波形から応答波形を推定することが出来ます。

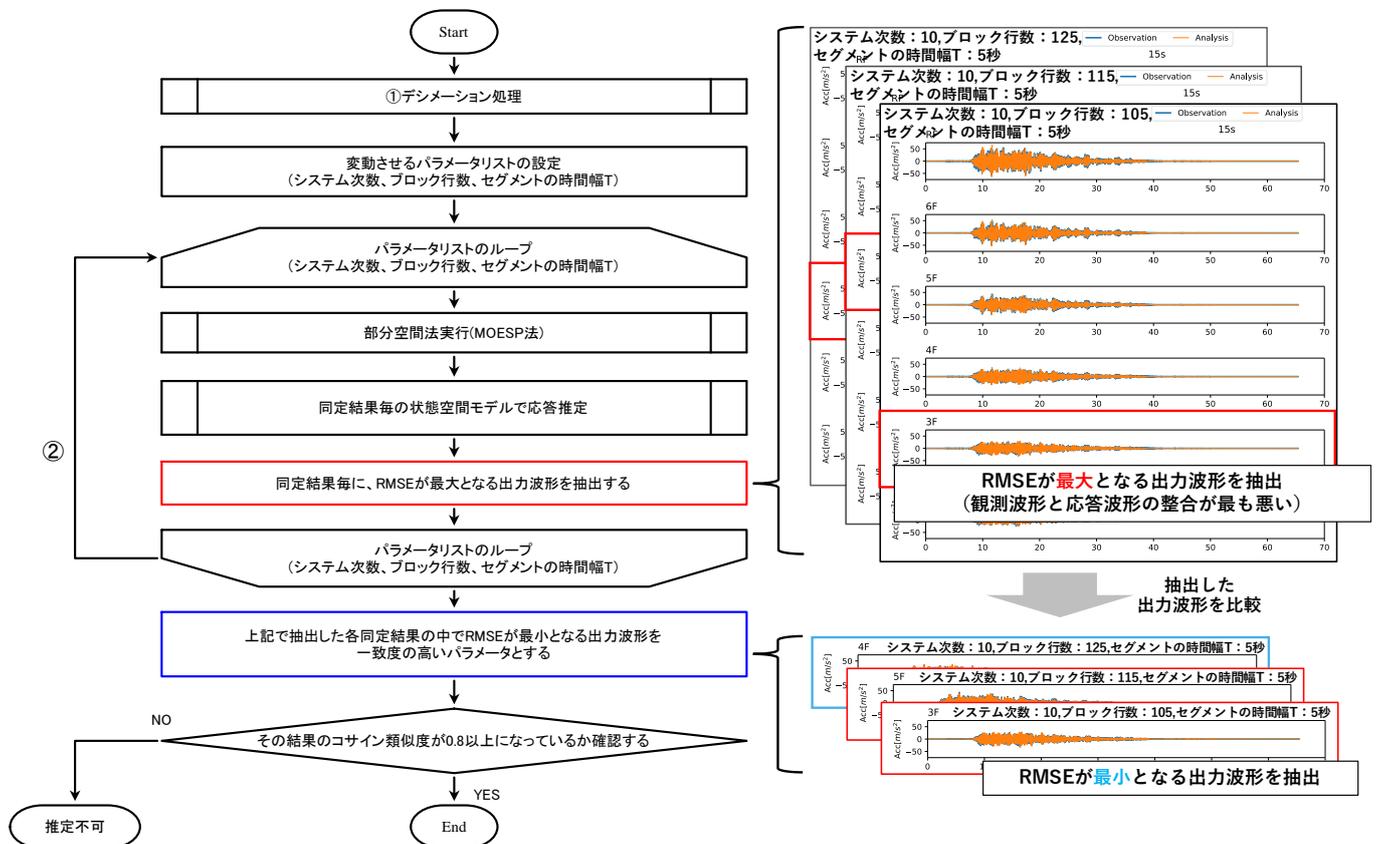


図 1 再現度の高い解析モデルの自動作成手法のフロー

しかし、与えるパラメータ毎に解析モデルが作成されるため、パラメータの与え方やどのパラメータを選択するかは専門知識や経験が必要とされます。そこで、図 1 に示すフローに従って、同定時に用いるパラメータを網羅的にばらつかせて、実測値との乖離を二乗平均平方根誤差 (Root Mean Squared Error, RMSE) (式 1) 及びコサイン類似度 (式 2 中の $\cos sim(A, B)$) を用いて定量的に評価することで、再現度が最も高い解析モデルを自動で作成することが出来る手法を構築しました。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (\text{式 1})$$

ここに、 y_i : 観測記録、 \hat{y}_i : 推定値、 n : データ総数

$$\cos sim(A, B) = \frac{A \cdot B}{\|A\| \|B\|} \quad (\text{式 2})$$

ここに、 $A \cdot B$: ベクトルの内積、 $\|A\|$: ノルム

ここでは、手法の流れについて説明します。まず始めに、得られた観測波形に対して、デシメーション処理を行います (図 1 の①)。この処理により、建物応答に対して殆ど影響の無い高振動数成分を除去することで、同定精度が向上し、解析時間を短縮できます。次に設定したパラメータの組み合わせを用いて部分空間法 (MOESP 法) によるシステム同定を行い、同定された解析モデルを用いて応答波形の推定をします。パラメータはシステム次数、ブロック行数、セグメントの時間幅 T となります²⁾。同定に用いた全出力波形で RMSE を計算し、誤差が最大となる RMSE を各パラメータの代表値として取り出します (図 1 の②)。抽出した各パラメータの代表値同士を比較し、RMSE が最小となる出力波形を決定することで、精度の良い同定結果を抽出することが出来ます。また、複数の指標で精度の良い結果とするため、コサイン類似度は閾値を 0.8 以上のみの結果を採用することとしています。

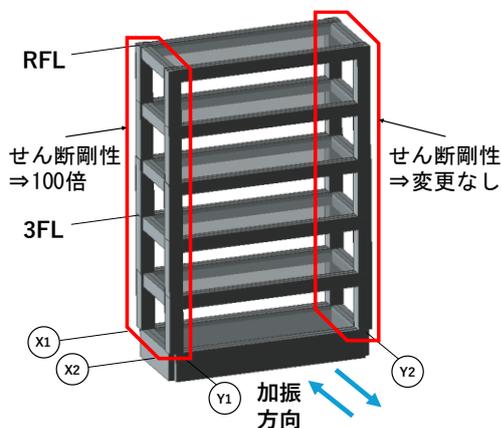


図 2 立体解析モデルと応答波形

3. 数値実験による同定精度の検証

3.1. 検証データの概要

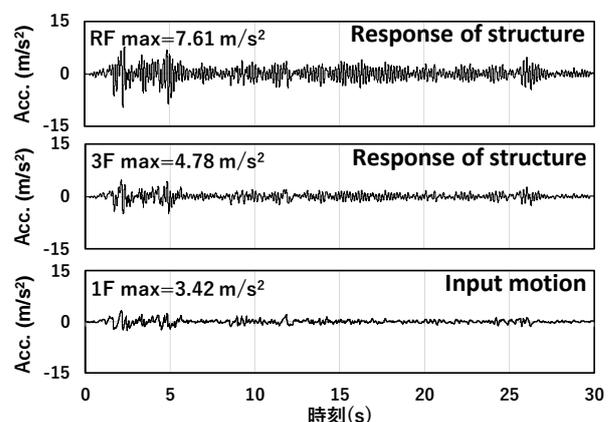
2章で提案した手法の妥当性検証のため、ねじれ応答が生じる立体解析モデルの応答解析結果を用いて、本手法による同定精度を確認します。図 2 に立体解析モデルと応答解析結果を示します。応答解析の諸元は、1×1 スパンの 5 層立体解析モデルとし、ねじれは図 2 に示すように Y1 及び Y2 通りの柱のせん断剛性に差異を生じさせることで再現しています。また、時間刻み 0.001 秒、入力波形は EL-CENTRO_NS とします。本検証では、デシメーション (30Hz で LPF をかけ、62.5Hz にダウンサンプリング) をかけた 3FL と RFL における応答波形を再現対象としており、パラメータの変動範囲は表 1 に示す通りです。

3.2. 検証結果

図 3 に再現した応答波形のフーリエスペクトル比 (代表として 3FL, RFL) と図 4 に応答推定結果と時刻歴波形の比較を示します。図には、立体解析モデルから作成した多質点系せん断ばねモデルでの応答解析結果も併せて示しています。最も一致したパラメータはシステム次数 8、セグメントの時間幅 5 秒、ブロック行数 200、時刻 35 秒の組み合わせとなりました。部分空間法によって同定されたフーリエスペクトル比は、図中の赤枠に示す 1 次固有振動数のピーク付近にねじれによるもう一つのピークが確認されます。応答波形のフーリエスペクトル比と状態空間モデルの伝達関数は一致していますが、せん断質点系モデルの伝達関数は一致していません。これは、状態空間モデルのシステム次数を上げることで、伝達関数で極の個数が増加し、より複雑な挙動を再現できるためです。また、システム同定したモデルと立体解析モデルによる応答解析結果の応答波形は、よく一致しており、前章で提案した手法が妥当であることを確認できました。

表 1 数値実験の検証に用いる変動パラメータ

システム次数	ブロック行数	セグメントの時間幅
6~10	50~210 (5 刻み)	5 秒, 10 秒



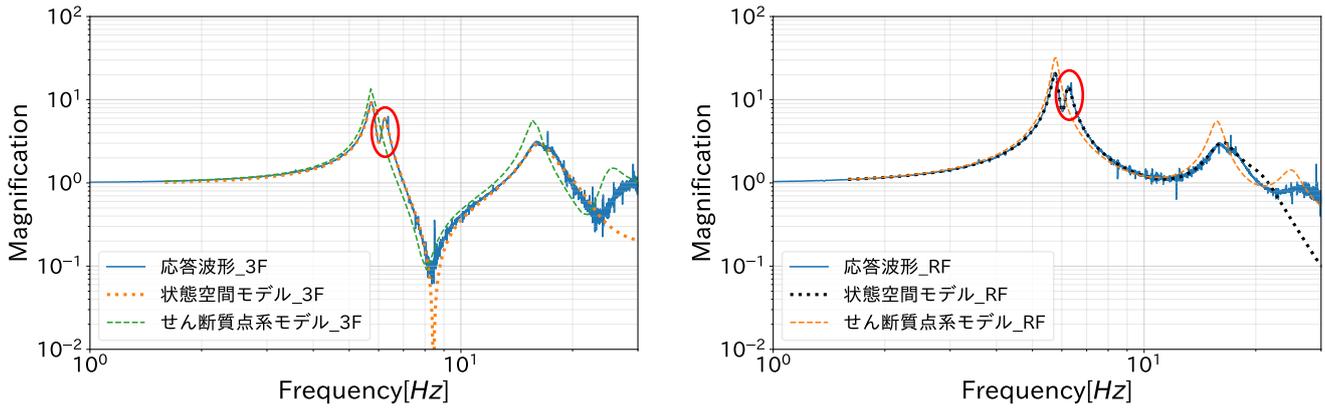


図 3 フーリエスペクトル比 (3F, RF)

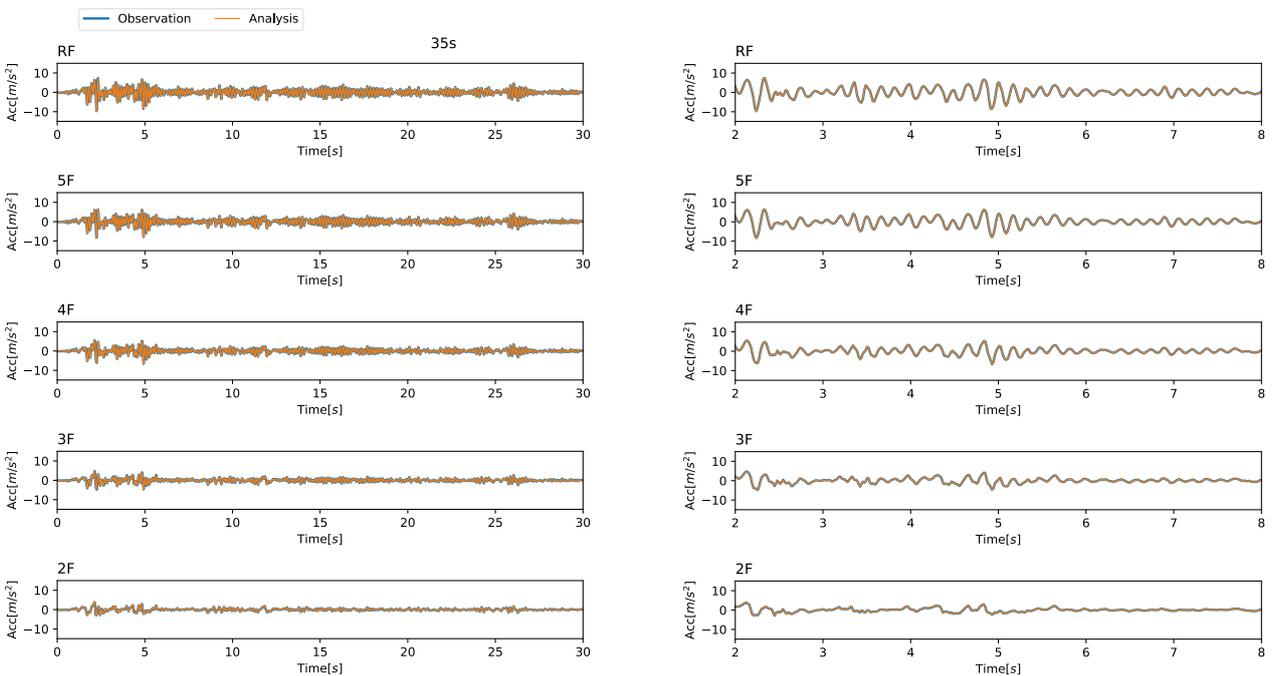


図 4 応答推定結果と時刻歴波形の比較

4. 実測データを対象とした同定精度の検証

本章では、実建物で観測された強震記録を用いて、図 1 で示した手法による同定精度の検証を行い、得られた結果から主要な固有振動数を算定します。

4.1. 検証データの概要

対象建物は東京都内の事務所ビルで、その諸元を表 2 に、2024 年 1 月 28 日 8 時 59 分 (震源：東京湾、Mj4.8) の地震時に強震計の設置階で観測された加速度波形を図 5 に示します。サンプリング周波数は 100Hz ですが、デシメーションにより 12.5Hz で LPF を掛け、25Hz にダウンサンプリングしています。

システム次数 10、セグメントの時間間隔 10 秒、ブロック行数 100 の観測時刻 50 秒となりました。このパラメータで同定できた状態空間モデルで応答推定を行った結果を図 7 に示します。最大値、位相ともに精度よく再現できていることがわかります。

表 2 建物の諸元

建物規模	地上 8 階、地下 2 階、塔屋なし
構造種別	上部：S 造、地下：RC 造
建築面積/延床面積	680.63m ² /6349.32 m ²
最高高さ	33.04m
架 構	上部：長辺短辺共にラーメン構造 地下：耐震壁付ラーメン構造
加速度計設置階	B1F、2F、3F、5F、8F

5. 同定結果と応答推定結果

表 3 の範囲で変動させた全同定結果に対応する応答推定の RMSE を図 6 に示します。最も波形が一致したのは

表 3 実測データの検証に用いる変動パラメータ

システム次数	ブロック行数	セグメントの時間幅
6~100	55~165(5 刻み)	10 秒

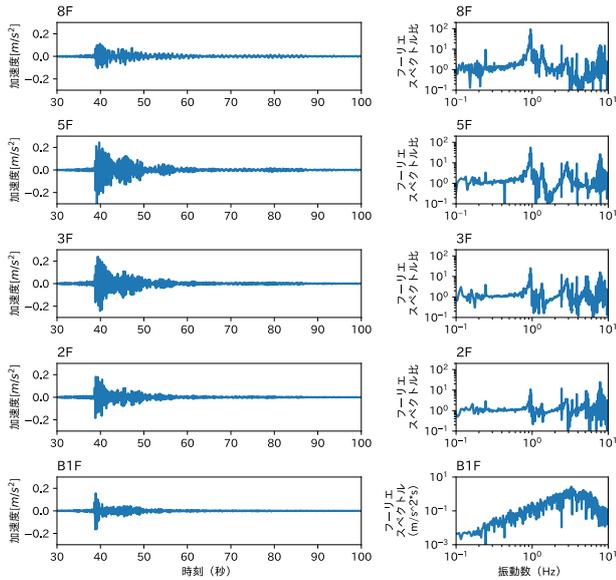


図 5 観測波形とフーリエスペクトル (B1F) 及びスペクトル比

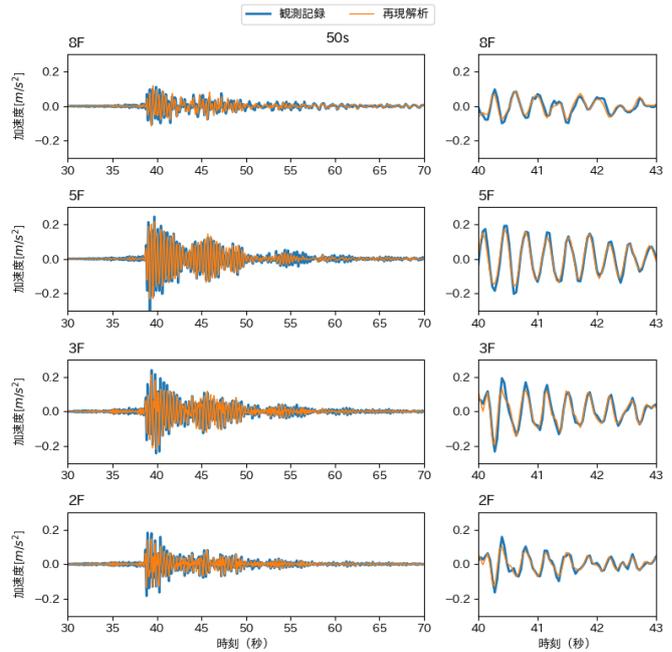


図 7 応答推定結果と観測波形の比較

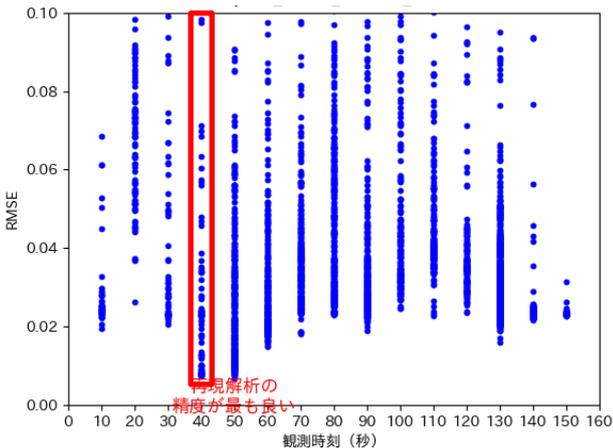


図 6 全同定結果に対する RMSE

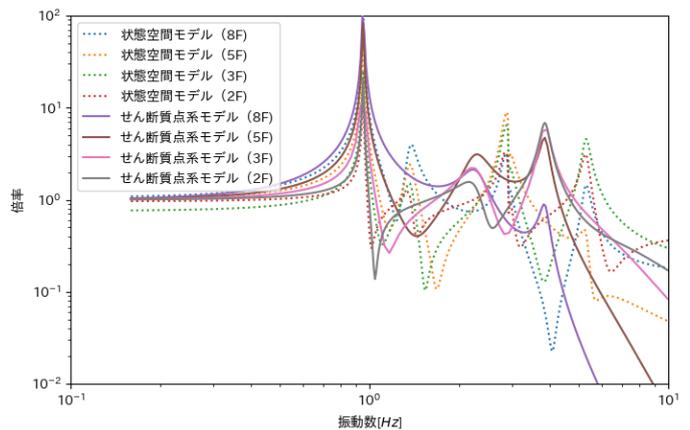


図 8 状態空間モデルとせん断質点系モデルの伝達関数の比較

この状態空間モデルと設計時の質量を使い、せん断質点系モデルを算定し、伝達関数の比較を行いました (図 8)。その結果、数値実験と同様に伝達関数が一致しないことから、単純化されたせん断質点系モデルでは表現できない挙動があると推定されました。

6. 建物の主要な振動特性の抽出結果

状態空間モデルは質点系モデルの M, C, K とは異なり、同定された値に物理的な意味がありません。一方、建物の特性把握のため、同定された値から主要な固有振動数を算定することもシステム同定の目的となります。しかし、観測記録にはノイズや複雑な挙動の成分が含まれており、波形の一致度が最良となるパラメータのシステム次数が大きくなった場合に伝達関数が複雑になるため、主要な固有振動数の特定が困難となります。そういった

状況の場合に、スタビライゼーションダイアグラムと呼ばれる手法で目視の評価を行うこともありますが、自動的に主要な固有振動数を抽出することは難しく、専門的な知識や判断を要することがあります。そこで、次のような方法でスタビライゼーションダイアグラムから自動的に主要な固有振動数を抽出する手法を考案しました。

1. 各同定結果で応答推定を実行し RMSE を算出
2. RMSE の大きさに応じて、標準偏差を対応させる関数を設定
3. 固有振動数を平均値、2.で求めた標準偏差の正規分布を作成して、すべての同定結果で重ね合わせる

この手法は、スタビライゼーションダイアグラムに現れる固有振動数の特性を出現頻度と考え、応答推定で一致度が高いパラメータに小さい標準偏差を与えることで、重みをつけて評価をすることができます (図 9)。今回出

力された応答推定結果の RMSE に対して与えた標準偏差はロジスティック関数 (式3) を用いて、下限 $a = 0.001$ 、上限 $b = 10$ 、勾配係数 $c = 3.5$ 、反曲点位置 d は RMSE の最大値と最小値の範囲で 10% に設定しています (図 10)。

$$f(x) = a + \frac{b - a}{1 + e^{-c(x-d)}} \quad (式 3)$$

今回の同定結果に対して適用した結果を図 11 に示します。グラフを見ると 0.95Hz、2.88Hz、5.30Hz の出現頻度が高く示されており、目視に頼らずに図 12 に示すスペクトル比のピークとおおよそ一致している事から、主要な固有振動数が抽出できていることがわかります。ただし、この手法は式3の関数に依存するため、注意が必要です。今後は、さらなる自動化のため、関数の合理的な決定方法の構築も必要となります。

7. 結論

- 部分空間法により得られる状態空間モデルを用いて精度の良い解析モデルを作成する手法を提案し、数値実験の観測記録及び実建物の観測記録から高精度

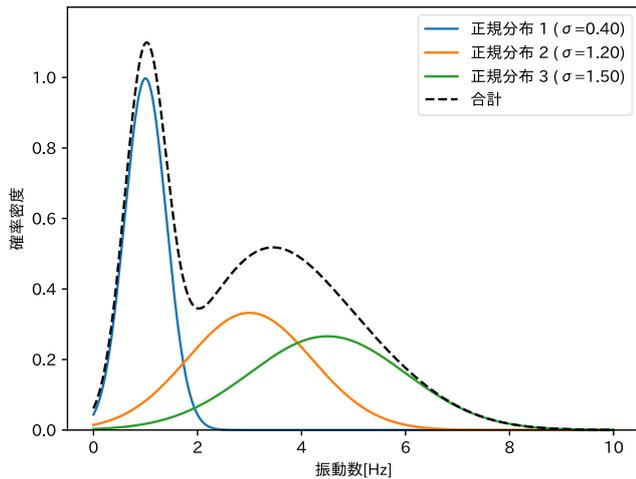


図 9 正規分布足し合わせのイメージ

で応答推定結果が得られることを確認しました。

- 建物の主要な振動特性である固有振動数を自動的に抽出できることを確認しました。

昨今、病院等の重要施設やインフラ等の被害状況を素早く把握し、迅速な対応に繋げようという動きが加速しています。内閣府が主導する「戦略的イノベーション創造プログラム (SIP)」の第3期 SIP 課題である「スマート防災ネットワーク」では、構造ヘルスマonitoring技術は被害状況の瞬時把握と多角的な詳細把握が可能な実用レベルの技術として期待されています。そのような動向の中、構造ヘルスマonitoringは多くの建物に活用され、更なる発展を遂げていくことになると思います。本手法・本技術が普及・発展の一助になれば幸いです。

参考文献

- 楠浩一:建物の構造ヘルスマonitoringによる被災度区分判定技術の開発 地震災害対応として求められるもの,シンポジウム 建物から人間に至るモニタリング技術の取り組みと災害時への適用,p.59-71,2024.3.
- 肥田剛典,永野正行:部分空間法に基づくシステム同定による建物の固有振動数と減衰定数の推定精度,日本建築学会構造系論文集,第 701号,p.923-932,2014.7.

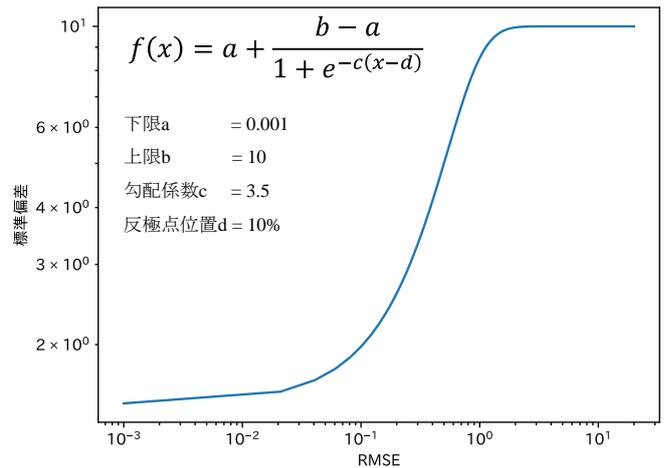


図 10 RMSE と標準偏差の対応関係

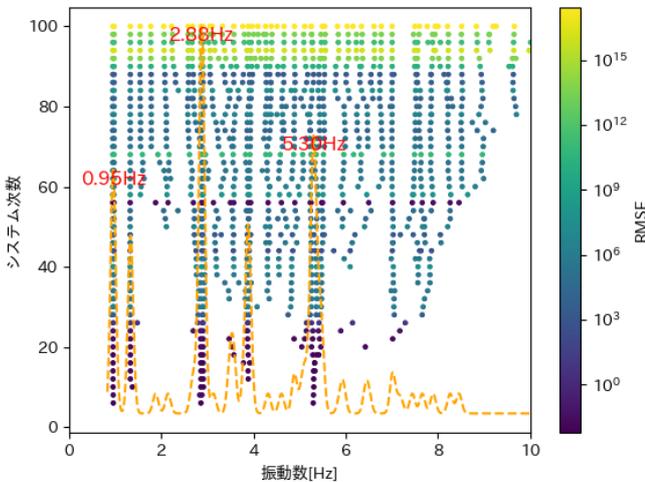


図 11 スタビライゼーションダイアグラムと固有振動数の抽出

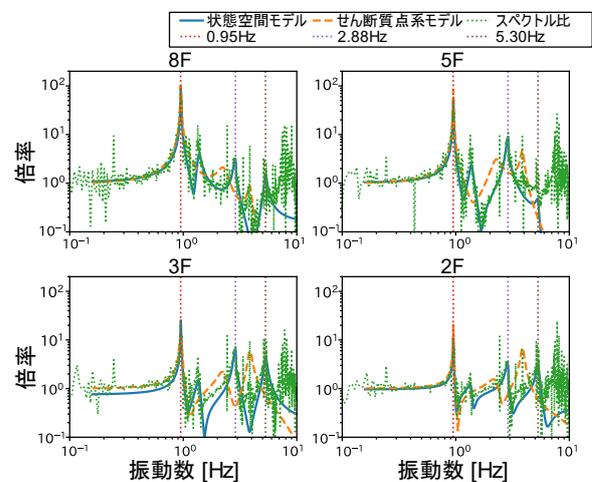


図 12 各フロアにおける伝達関数の比較

Kaiseki Portal

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

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

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



From Editors

各地で最高気温や猛暑日数の記録が更新された厳しい暑さ、立て続けに発生した大型台風や激しい局地的ゲリラ豪雨、宮崎地震の発生と南海トラフ地震臨時情報……自然現象に限定しても平穏とは言い難い夏でしたが、ここからは次第に秋めいていくのでしょうか。体調を崩さない季節の変わり目にしたいものです。

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わせは下記までお願いいたします。

kaiseki@kke.co.jp

(株)構造計画研究所 エンジニアリング営業 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

解析雑誌 *Journal of Analytical Engineering Vol.53 2024.09*

発行日 2024年9月30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

お問い合わせ 電話 (03)5342-1136 FAX (03) 3367-1011
kaiseki@kke.co.jp