

解析雑誌

Vol.54 2025.01

Journal of Analytical Engineering

Topics

- 森ビルと挑む、工学知を結集し
「麻布台ヒルズ」の安全・安心を守る取り組み
前編：「麻布台ヒルズ」のパブリックアートを
めぐる安全性検討
後編：高層階プールの安全を支える
スロッシング解析
- 建築構造部材断面の
即時簡易算出プログラム
- 建築・土木分野におけるデジタルツイン
～データ同化がもたらす精緻予測と効率化～
- 建設分野でのナレッジ活用における
生成AI活用

Technical Report

- 日常点検車搭載型橋梁伸縮装置点検システムによるゴムジョイント変状検知実験



兵庫県南部地震から 30 年

(株)構造計画研究所
防災・環境 1 部長
大月 俊典

1995年1月17日に発生し、阪神・淡路島を中心に甚大な被害を引き起こした兵庫県南部地震から今年で30年となります。この大震災が地震防災や耐震工学の道を志すきっかけとなった技術者の方もいらっしゃるのではないのでしょうか。震源から比較的近い岡山に住んでいた私もその一人です。当時は小学生でしたが、現実とは思えない激しい揺れや、時間の経過とともに明らかになる信じ難い被害、そして何日経っても増え続ける死傷者数を伝えるニュース映像や新聞報道は、今も忘れられない強烈な記憶として残っています。その後大学へ進学し「地震による構造物被害に伴う人命の損失を減らす」ことをテーマとした研究室へ入り、地震動の性質と構造物被害の関係を検討するための地震被害調査や、地震発生直後に被害程度を的確かつ迅速に予測するシステムの開発に取り組みました。2004年新潟県中越地震では地震発生翌日から現地入りしましたが、深刻な被害状況や被災された方々の様子を自らの目で見た経験が、防災・減災分野に携わりたいという想いを一層強くしました。

この30年で技術力や計算機の演算処理能力は飛躍的に向上し、構造物の耐震化や防災・減災システムの高度化は進んできております。しかし、地震のみならず、暴風/豪雨/豪雪/洪水/高潮/津波/火山噴火といった自然災害は大規模化・頻発化してきており、さらにCOVID-19などの感染症との複合災害のリスクも顕在化しています。このような状況下、構造工学による単なる耐震化だけでは十分とはいえない場面も増えてきております。また、従前から抱えるエネルギー問題や環境問題などの難題もあり、すべてを解決できる共通の「解」は存在しません。

我々が対面するお客様からのご要望もますます複雑化しておりますが、私が所属する解析グループには多様なバックグラウンドと解析技術を有する技術者が在籍し、また構造計画研究所全社としては情報通信、製造業、意思決定支援などの幅広い分野に長く取り組んでいることから、実績と経験に裏打ちされたソリューションをご提供できております。ただし、事象が複雑化しているからといって、高度でコストのかかる解析が必ずしも最善とは限りません。基本ではありますが、問題の本質を捉えるために初期段階からお客様と丁寧に対話を重ね、共通認識を持った上でコンサルティングを進めることが重要です。

お客様と関係を築いていくなかで、打合せや懇親会の場にて冒頭に記述した自身の経験をお話することもあります。そうすると、お客様からも貴重な経験談やターニングポイントなどを伺う機会もあり、「大切にしていること」や「こだわり」などが理解でき、表面上だけではないコンサルティングを提供できると感じております。

今後もお客様のさまざまな課題解決に貢献できる技術開発やソリューションの提供を目指し、努力してまいります。引き続きご支援を賜りますよう、お願い申し上げます。

解析雑誌 Vol. 54 2025. 01

巻頭言 兵庫県南部地震から 30 年 02

防災・環境 1 部長 大月 俊典

Topic 1

- 森ビルと挑む、
工学知を結集し「麻布台ヒルズ」の安全・安心を守る取り組み
前編：「麻布台ヒルズ」のパブリックアートをめぐる安全性検討 04

Topic 2

- 森ビルと挑む、
工学知を結集し「麻布台ヒルズ」の安全・安心を守る取り組み
後編：高層階プールの安全を支えるスロッシング解析 09

Topic 3

- 建築構造部材断面の即時簡易算出プログラム 12

Topic 4

- 建築・土木分野におけるデジタルツイン
～データ同化がもたらす精緻予測と効率化～ 18

Topic 5

- 建設分野でのナレッジ活用における生成 AI 活用 24
-

Technical Report 1

- 日常点検車搭載型橋梁伸縮装置点検システムによる
ゴムジョイント変状検知実験 32

矢部 明人、今枝 徳靖

Kaiseki Portal / From Editors 35

本誌内では私共「構造計画研究所」のことを「KKE」と称している箇所があります。

森ビルと挑む、工学知を結集し 「麻布台ヒルズ」の安全・安心を守る取り組み

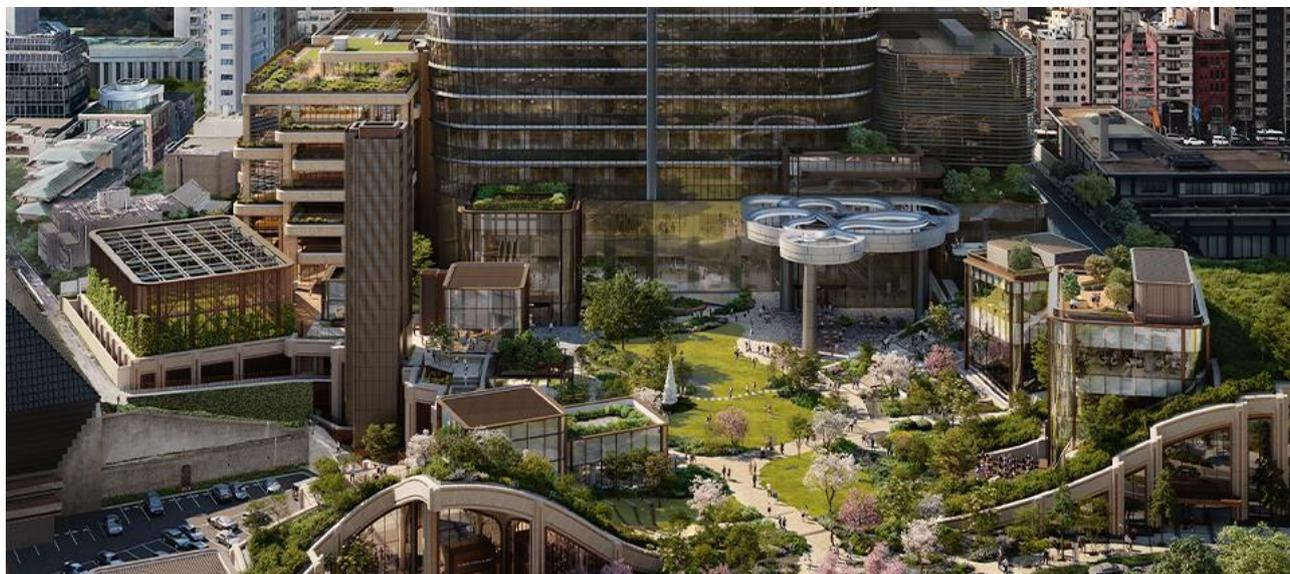
前編：「麻布台ヒルズ」のパブリックアートをめぐる安全性検討

街づくりにおいて安全・安心を守ることは最優先ですが、すべてにおいて明確な安全基準が存在するとは限りません。「パブリックアート」や「プール」などがその一例です。KKEは、森ビル株式会社様の依頼を受け、昨年末東京に誕生した新たな街「麻布台ヒルズ」における、それらの安全性を検討する業務を担当しました。

前編では、ヒルズ内を彩るパブリックアートを陰で支える、安全性検討の取り組みについてお届けします。

●森ビルが追求する都市の理想像

2023年11月、都心の真ん中に新たな街として誕生した「麻布台ヒルズ」。“緑に包まれ、人と人をつなぐ「広場」のような街 - Modern Urban Village -”をコンセプトに、多様な都市機能が高度に融合しシームレスな街が作り上げられています。神谷町駅から六本木一丁目駅の間、約8.1haもの広大な区域を対象に、老朽化していた都市インフラを整備し回遊性を向上。30年超の年月をかけてようやく開業した真に新しく豊かな都市のあり方は、まさに「ヒルズの未来形」と言えます。



森ビル様が目指す街づくりは、建物を高層化し地下を有効活用することで、職、住、遊、商、学、憩、文化、交流などの多彩な都市機能を立体的かつ重層的に組み込む「Vertical Garden City - 立体緑園都市」という考え方に集約されます。空いた地上は緑で覆い、誰もが徒歩であらゆる施設にアクセス可能なコンパクトシティを実現するという構想です。

都市を作るうえで、安全・安心を守ることは最優先事項です。森ビル様では「災害時に逃げ込める街」として、大地震が起きてもそのまま街として機能し続けられるよう、耐震設備や備蓄倉庫の導入、定期的な防災訓練の実施など、ハードからソフトまで徹底的に安全を追求しています。

一方で、都市の中には安全性の基準やルールが明確に存在しないものもあります。「パブリックアート」や「プール」がその一例です。ニッチな対象物であるがゆえに、安全性を検証する決まった方法がありません。しかし住民や利用者のためには、安全であることを根拠に基づいて示すことが使命でもあると森ビル様は考えています。答えのない難題に立ち向かうパートナーとして、**KKE** へご依頼をいただきました。

●自由な芸術表現と安全性を両立するチャレンジ

森ビル様の代表的プロジェクトとして、2003年に開業した「六本木ヒルズ」があります。そのシンボルとして66プラザに位置し、ひととき存在感を放つパブリックアートが、ルイーズ・ブルジョワ氏の作品である高さ10mの巨大な蜘蛛の像《ママン》(2002年/1999年)です。

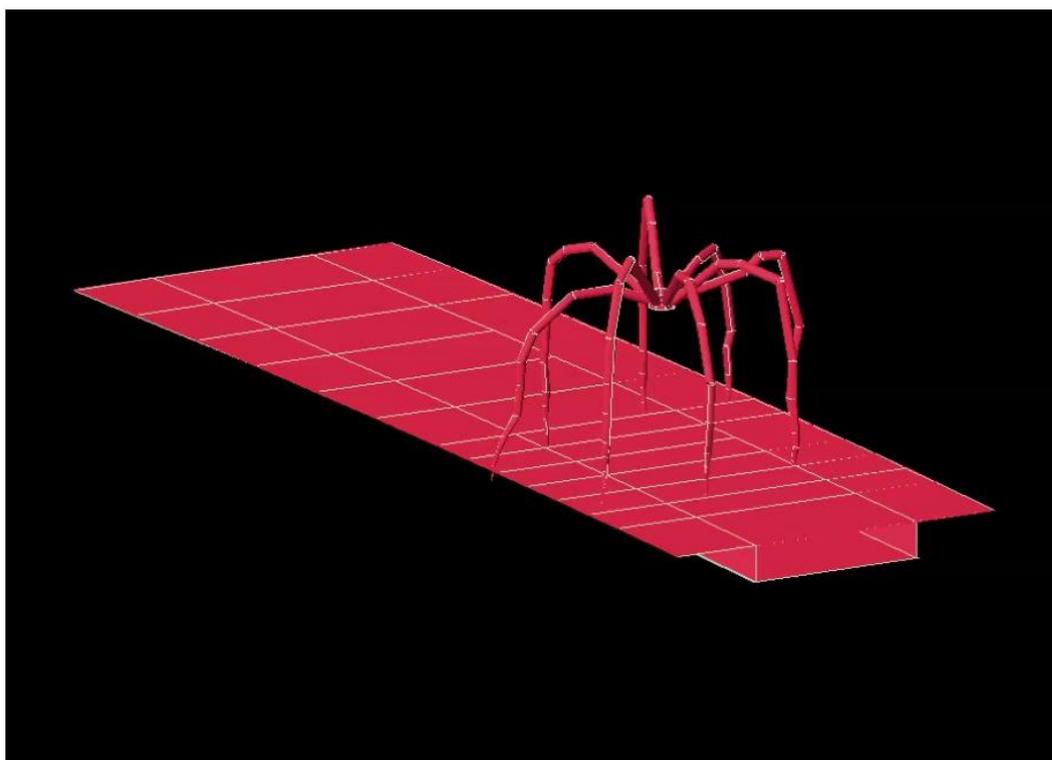
実はこの像、世界に数体存在しますが、六本木ヒルズの像だけがもつ構造的な特徴があります。それは何でしょうか？



ルイーズ・ブルジョワ 《ママン》 (2002年/1999年)

答えは「免震構造」になっていることです。大型アートを設置するうえでの安全性検討は、それまでほとんど前例がありませんでした。当時、1990年代から森ビル様と協働し、六本木ヒルズのランドマークである「六本木ヒルズ森タワー」の構造設計も担当した**KKE**に、《ママン》の構造検討について白羽の矢が立ちました。

当時の**KKE**の設計担当者がアメリカの制作現場まで赴き、現地の技術者と対話を重ねる中でたどり着いたのが「免震」です。実は、8本ある蜘蛛の脚は地面に固定されていません。地震の際には任意に動いて振動を分散させる仕組みになっています。アートには明確な図面が存在しないこともままあります。《ママン》の検討では、対象物の形状をまずはコンピューター上にモデル化した上で、脚部にどれだけ応力がかかるかを解析しました。



《ママン》の振動解析の様子

同じく六本木ヒルズ内にある、高さ 8m の彫刻作品《薔薇》(2003 年) も、KKE が振動解析を担当しました。事前に解析を行ったところ、アート自体の固有振動数が、アートの立脚している下部のデッキ構造の固有振動数にほぼ合致してしまうことが判明しました。そのままでは地震や交通振動を受けた際にアートの振動が増幅してしまうため、あえて花びら部分に重りを入れることで共振を回避しています。

これらの取り組みを出発点として、KKE は、虎ノ門ヒルズや JAKARTAMORI TOWER など、森ビル様が手がけるプロジェクトにおけるパブリックアートの構造検討を多く請け負ってきました。

「文化・芸術」は森ビル様の街づくりにおける重要な柱の一つとなっています。単なるビル群ではない街を作り出すため、人が集い、気付きやひらめき、交流が生まれる磁場として、森ビル様の街づくりではアート作品や文化施設が多く設置されています。

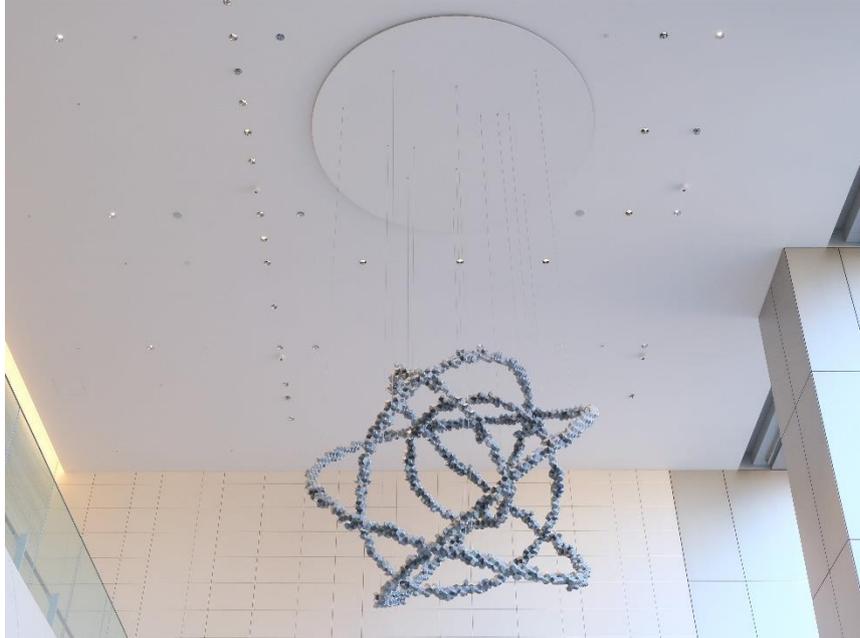
●麻布台ヒルズを彩る独創的なパブリックアート

麻布台ヒルズにおいても、さまざまなパブリックアートが目を引きまます。その一つが、気鋭の美術家オラファー・エリアソン氏が手がけた《相互に繋がりあう瞬間が協和する周期》(2023 年) です。麻布台ヒルズ 森 JP タワー内のオフィスロビー、広々とした吹き抜け空間に連続的に吊るされた構造体は、大きいもので一つ 750kg にもなります。

天井から鉛直方向のワイヤーでのみ固定された構造ですが、このままだと地震を受けた際には作品が大きく振り子のように揺れることになります。この作品が設置されているオフィスロビーは有事の際の避難経路にもなるため、設計担当者は作品が損傷を受けないだけでなく、「通行人になるべく恐怖感を与えないこと」を最重視しました。揺れを最小限に抑えるため、ドイツにいるアーティスト側の構造技術者や、制振装置の開発元企業と何度も Web 会議を重ねながら、日本と海外との安全基準の違いにも気を配り検討を進めました。作品の構造や組み立て方を学ぶため、現地のアーティストのスタジオに

も足を運んでいます。

結果的に、天井部分に制振プラットフォームを導入。揺れを受けた際には、作品が天井と平行に円を描くように動き、振動を最小限に留める方法を採用しています。実際に作品の頭上を見ると、円形の制振装置が設置されていることが確認できます。



オラファー・エリアソン 《相互に繋がりあう瞬間が協和する周期》（2023年）

アート作品の安全性検討は、コーディネーションを担当する森美術館と相談の上、ラフなプレゼン資料やパーツのみが存在する初期段階から、作品を図面化するなどして進められます。KKEには外国籍のエンジニアも多く在籍するため、海外の企業との技術的な会話を英語で主導できる点も高く評価いただいています。



奈良美智 《東京の森の子》（2023年）も、裏では安全性の検討が念入りになされています

中央広場に設置されたジャン・ワン氏の作品《Artificial Rock. No. 109》(2015年)では、恒久的な屋外展示に耐えうる構造にするため、基礎部分を改めて設計し直しています。同作品は既存作品であり、作品の構造が分かる図面がなく複雑な形状であったため、KKE が扱う移動式計測デバイス『NavVis VLX』を使用して作品をスキャンし、3次元データを取得。そのうえで、作品自体に影響を与えないような形でベースプレートを設計し、地中に埋め固定しています。

ステンレス製のこの作品は、3m という高さに対し重量が 100kg と比較的軽いため、設計初期段階に行う風洞実験から算出された、作品の設置場所で吹く風の強さ(風加重)も考慮に入れたうえで検討を行っています。



ジャン・ワン《Artificial Rock. No. 109》(2015年)を NavVis で計測する様子

麻布台ヒルズでは、その他、タワープラザエントランスの構造物から、住居エリアに展示されたアート作品に至るまで、全てにおいてその安全性を検討済みです。パブリックアートの安全性を追求する森ビル様からは、KKE には、超高層に取り組む黎明期から構造設計を依頼する中で培った人と人との関係性、確かな技術力に加えて、他の企業が引き受けられないような難題についても気軽に相談に乗ってくれる風土があると評価をいただいています。

KKE は 60 年以上前に構造設計事務所からスタートしていますが、現在は建設、情報・通信、製造など、社会のあらゆる場面における課題の解決に取り組んでいます。社内には技術分野も対象業界も異なるエンジニアが数多く在籍し、特殊形状のアート作品など前例のない対象であっても、さまざまな専門家の工学知をセカンドオピニオンとして取り入れながら試行錯誤し、信頼できる一つの解を愚直に見出していく姿勢を大切にしています。

森ビルと挑む、工学知を結集し 「麻布台ヒルズ」の安全・安心を守る取り組み

後編：高層階プールの安全を支えるスロッシング解析

後編では、森ビル株式会社様と KKE が業界に先駆けて実施している、高層階プールのスロッシング解析による安全性検討についてご紹介します。

●地震が引き起こす液面の揺動「スロッシング」

さまざまな分野の専門的知見を融合できる強みを駆使して、KKE が森ビル様とともに挑んだもう 1 つのプロジェクトが、プールのスロッシング解析です。一般に「スロッシング」という現象はあまり知られていません。「スロッシング」とは、タンクなどに貯留された液体が振動を受けた際に大きくうねる現象です。液槽の周期と地震等による振動の周期が一致することで発生します。日本でも過去には、地震により原油の屋外タンクでスロッシングが起き火災の発生につながるなど、大きな事故が報告されています。

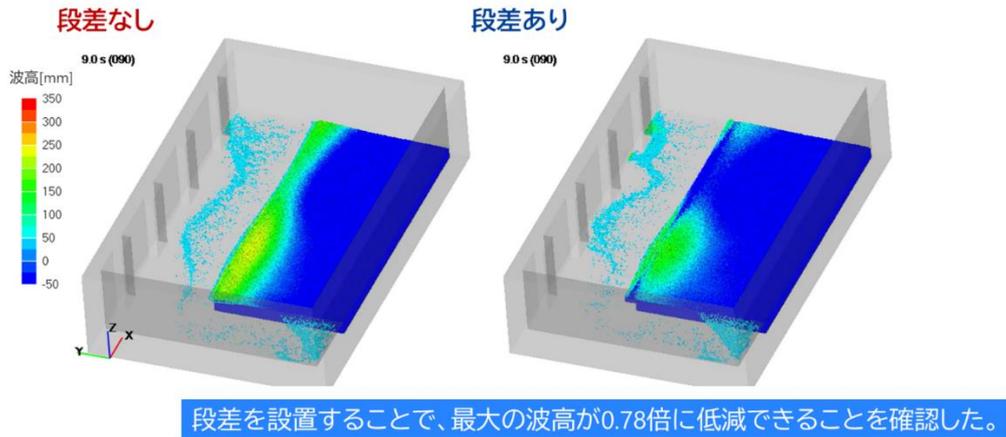
森ビル様では、2016 年に超高層ビルの高層階プールが漏水する事象が発生したことをきっかけに、流体解析に長年取り組んできた KKE へ相談いただきました。原因を分析したところ、福島県沖で発生した地震によりスロッシングが発生したことが分かりました。水があふれプールの排水能力を超えると、漏水などにつながります。森ビル様がスロッシングのリスクを認識する出来事となりました。

2019 年には、フィリピンで発生した地震により、高層ビルの屋上プールから水が滝のように流れ落ちる動画が拡散され、少しずつ業界内でもスロッシングの認知が高まりつつあります。現在では、国内の他の高層階プールやタンクにおいても基本的な安全対策が取られています。しかし、それ以上に利用者の安全を最優先に考慮する森ビル様が KKE とともに取り組んでいるのが、スロッシングの解析に基づく安全性評価です。

●シミュレーション結果と現実の比較

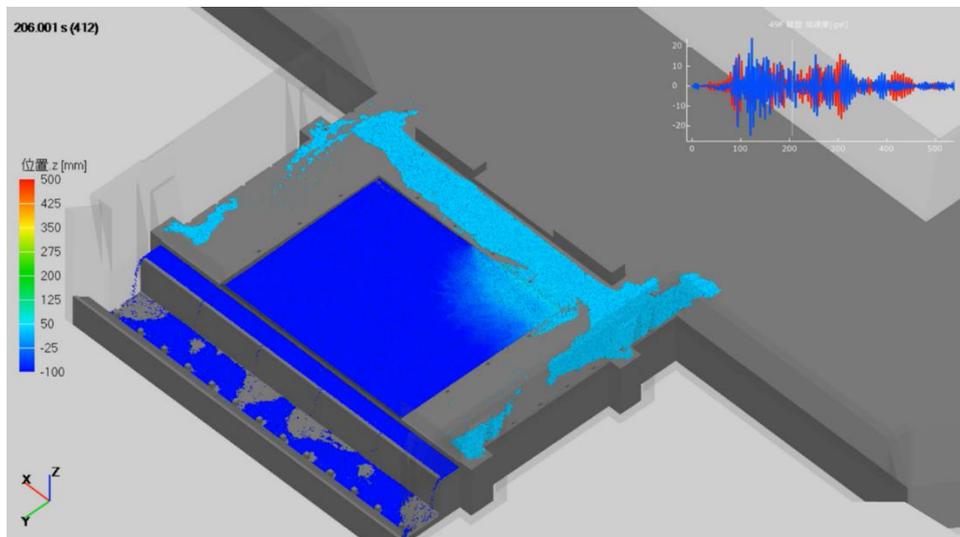
安全性評価にあたり、まずはプールの図面や床応答波といった既存のデータをもとに、KKE の扱う流体解析ソフトウェア「Particleworks」で解析を実施します。流体そのものを粒子で表現し、液体の微細な挙動や液面形状を細かく再現できるため、水がどこから、どのくらいあふれるかを可視化できます。その解析結果をもとに、プールの形状や什器の設置位置を変更するなど、スロッシングの影響を可能な限り低減することを試みます。

実際、麻布台ヒルズにおいても事前に解析を行ったところ、プール内に段差を設置することで、スロッシングが発生した際の波の高さを 0.78 倍まで低減できることが分かりました。これを受けて、設計時にはプールの形状を変更しています。さらに麻布台ヒルズの場合はそれに留まらず、プールサイド周辺への影響評価まで実施しました。仮に地震が起きた際に重要なのは、プールの中にいる人が安全に避難できるかどうかです。プール内で人が動ける速度や、避難困難な波の高さを仮定したうえで、人が避難出口までたどり着く時間が十分にあるかの検証も実施しました。さらに、生じた波によるプールサイドの家具の移動量も検討。それらの結果を受けて、プールサイドの梯子や家具の配置の見直し、安全な避難経路の策定につなげるなど、徹底的に安全性を検証しています。



3次元解析より、段差の有無によるスロッシング現象の低減効果を検証

こうした解析結果の信頼性は、2024年1月に発生した令和6年能登半島地震の際に示されました。虎ノ門ヒルズステーションタワーの49階に位置するプールにおいて、地震発生約1分後にスロッシングが発生。そもそも東京では大きな揺れはなく、安全性に影響はなかったものの、多少の水の流出が確認されました。後に、能登半島地震の地震波を入力して再解析したところ、導かれた水位の低下量は14.9cmであったのに対し、実際に計測された流出水位は15.0cm。わずか1mmの誤差に収まっていることが分かります。また解析結果の3Dデータと、監視カメラの映像データを比較すると、水の挙動や流出箇所もおおむね一致していました。さらに、溢れた水もプール周囲の排水溝に意図した通り排水され、小さな流出範囲に収まっていました。



能登半島地震の観測波に基づく解析結果の様子

森ビル様の街づくりでは、先例のない中でも考え得る限りの手段を用いて『これなら安心できる』という根拠に基づく検証を行います。しかしその妥当性を実際に確かめる機会はなかなかありません。今回、シミュレーション結果と実際の観測結果が一致したことは、検討の方向性が間違っていないことを示す補強材料となりました。

●長期的な視点で都市を創り、育むために

麻布台ヒルズは今後、実際に人が集い、暮らし、学び、つながることで、生きた街として機能していきます。しかし、安全基準を満たすことが、利用者の「安心」に直結するとは限りません。本当の安心を生むためには、根拠に基づく安全性を多方面から検討して、それを正しく周知し、利用者との信頼関係を積み重ねていくことが不可欠です。そして、街は「点」で開発して終わりではありません。目指すべきは、長期的な視点で都市を育み、次世代へと受け継いでいくことです。森ビル様では、そのための「100年先を見据えた港区全体のランドデザイン」を描いています。点と点、ヒルズ同士が有機的につながり、一つの都市として機能する絵姿です。

今回のプロジェクトを通じ、森ビルご担当者様からは次のお言葉をいただいております。

「麻布台ヒルズのプロジェクトでは、これまで両社をつないできた先人たちのバトンを受け継ぎ、若い世代のエンジニアの方々と新たな関係性を作ることができました。街づくりは複合的な要素が絡み、今回のような難題に突き当たることも多くあります。その中では、気軽に困りごとを相談でき、ともに試行錯誤を重ねていける信頼関係が何よりも重要です。今後も皆さんとともに、引き続き夢のある大きなプロジェクトに挑んでいきたいと思っております」

KKE では、新たな難題に立ち向かうべく、さまざまな分野のエンジニアが日々励んでおります。お困り事がございましたら、お気軽にご相談ください。



MPS 粒子法を用いた 最先端の流体解析シミュレーション

1. メッシュフリーの粒子法に基づくソフトウェア

- 煩雑になりがちなメッシュ作成が不要
- 界面の大変形や液滴の離合を伴う複雑な自由表面流れのシミュレーションが容易

2. 高粘性流れの解析、非ニュートン流体の解析が可能

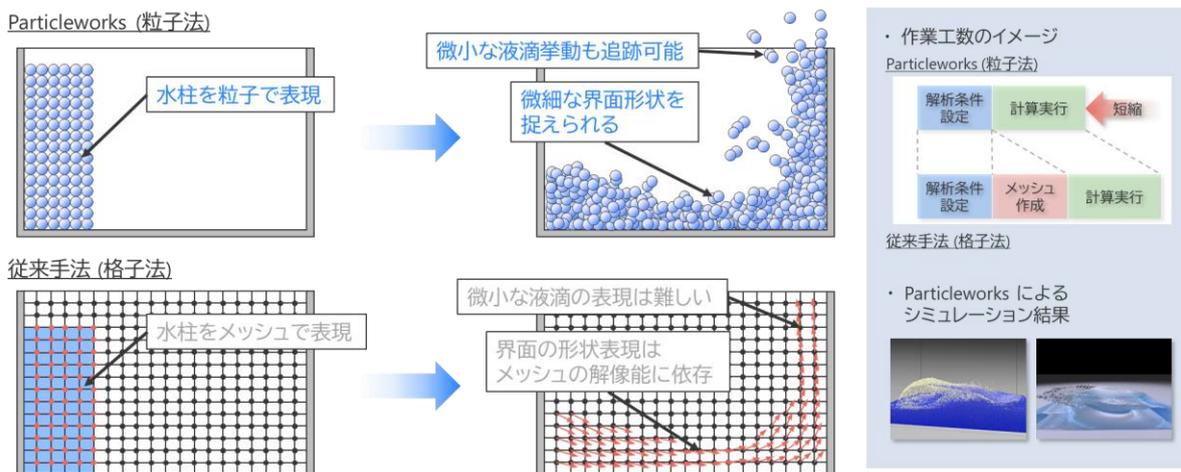
- 低粘性流体のニュートン流体だけではなく、非ニュートン流体を含む高粘性流体の解析が可能

3. マルチフィジックス問題への展開

- 剛体の 6 DoF 解析に加え、粉体解析・機構解析ソフトウェアとの連携が可能

4. GPU による高速演算

- MPI 並列だけではなく GPU による高速演算に対応



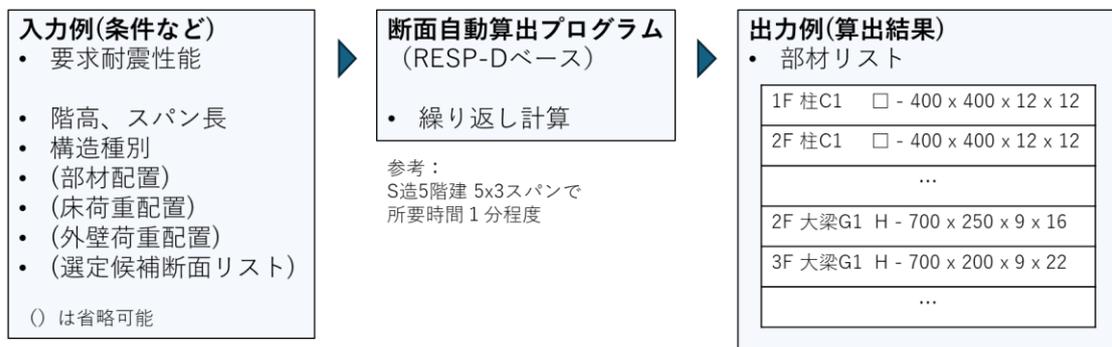
建築構造部材断面の即時簡易算出プログラム

建築物の計画・設計の初期段階における構造部材断面の算出は、設計者のノウハウや経験により実施されていることと思います。その一方、構造設計者に求められることは日々高度化し、設計で配慮すべきことは増加・複雑化する傾向があります。

構造設計者の限られたリソースを真に人が行うべきことに注ぎ込むためにも、一定のルールに基づき実施している業務についてはプログラム(ソフトウェア)側に任せることは大変意義があると考えます。上記に対するご提案として、「建築構造部材の算出プログラム」をご紹介します。

本ご提案は、以下のお客様・以下の用途でご活用いただけると考えます。

- ・発注者 : ある条件下での建物性能とコストを確認し、条件を変更した結果をその場で得る
- ・設計者、施工者 : より効率的に、複数の設計の選択肢を準備する



条件を満足する最小の断面をその場で算出することが可能

図1 プログラムの概要

● 部材断面算出プログラム

本稿で紹介するプログラムは、以下のような場面において、建築構造に関する深い知識・技術の有無に関わらずご利用いただけるようなプログラムです。

- ・複数プランの比較: 建築計画の決定のため、概略の情報に基づき複数のプランを作成し、建設コストを比較したい。
- ・仮定断面の算出: 建物の規模が決まり、階高・スパン・構造種別については決定することができた。建物の構造性能は満たしつつも、建設コストに配慮し鉄骨の総使用量を最小化したい。

建物計画を検討する際には、部材断面の算出、構造モデルの作成、構造性能(応答)の確認、必要によりその結果を踏まえた部材断面の再算出の繰り返しを行います。本プログラムでは、耐震性能の評価から計算・解析結果を踏まえた部材断面の再算出の繰り返しを一気通貫で行います。

建物の耐震性能(設定した地震力に対する層間変形角や各部材の余裕度)の計算には、弊社が開発・販売している構造計算ソフト RESP-D を使用します。また、RESP-D の構造モデルの生成、計算実行指示及び計算結果を踏まえた構造モデルの更新については、RESP-D Script という機能を用います。

・RESP-D

時刻歴応答解析による設計を行う建築構造物を対象とした**構造計算ソフト**です。建物モデル作成、許容応力度法による構造計算、立体フレーム非線形静的解析・動的解析、復元力特性のモデル化、質点系弾塑性振動解析、構造計算書作成、振動アニメーション作成の一連処理機能を持ち、特に超高層や免震・制振などを採用した物件の設計・解析に利用いただいております。本稿で紹介した通り、建物へ入力される外力に対する精度の高い応答値と、建物モデルデータを基にした躯体数量の把握が可能です。

・RESP-D Script

RESP-D のモデルデータ・計算処理をマウス操作なしに制御・操作する機能です。RESP-D Script を用いることにより、RESP-D のモデルデータに対してルールに基づいた処理を行わせる等、RESP-D の高度な計算・解析機能をコントロールすることができます。本稿のプログラムでは、「初期モデルの読み込み」「モデルの応答解析」「解析結果及び断面リストに基づくモデルの更新」等の処理を繰り返し実行する処理を実施しています。

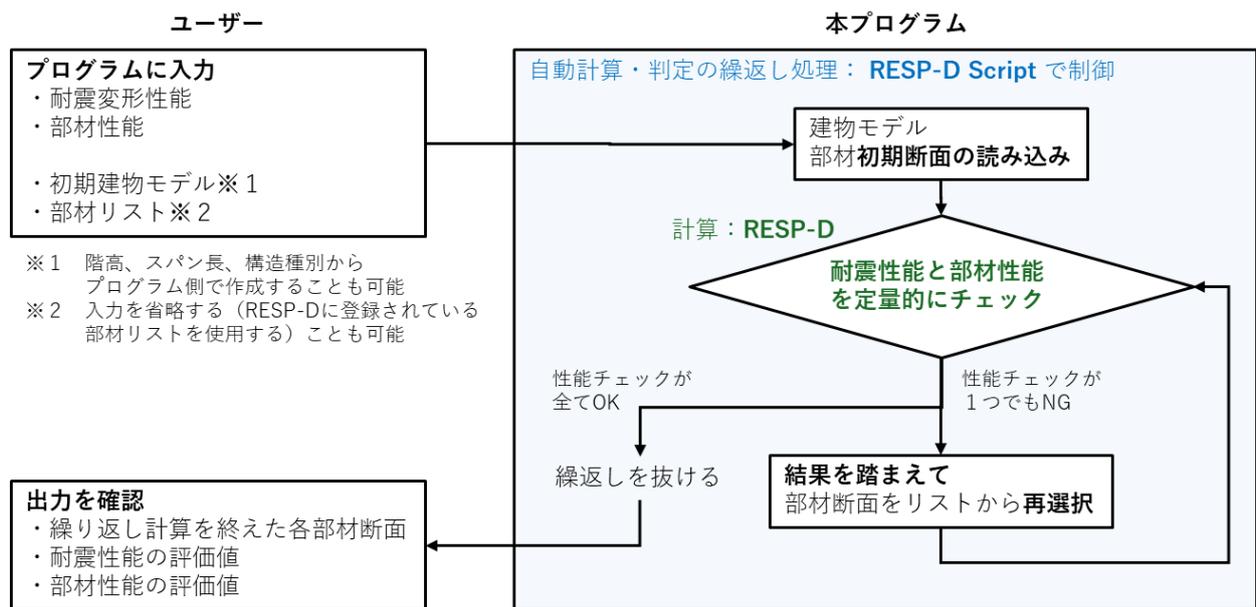


図2 断面算出プログラムの概要

本プログラムのように、設定した条件を満たす部材断面を選定する方法には「最適化」もあります※参考。本プログラムの特徴は以下の通りで、簡易な検討を大量に行う場合等においては最適化よりも目的に合う可能性があります。

- ・設計者の行う計算等の過程を自動化したものであり、結果が非現実的な部材断面になりにくい
- ・短時間で結果を得ることができる
- ・鉄骨の使用量を比較的小さくできるが、最小化するわけではない



※参考：RESP を用いた構造部材(ダンパー)最適化の例

<https://resp-blog.kke.co.jp/2024/04/24/%E3%80%90%E6%A7%8B%E9%80%A0%E8%A7%A3%E6%9E%90tips%E3%80%91resp-f3t%E3%81%AE%E6%B4%BB%E7%94%A8%EF%BD%9E%E8%A7%A3%E6%9E%90%E3%83%87%E3%83%BC%E3%82%BF%E3%82%92%E5%A4%9A%E7%9B%AE%E7%9A%84%E6%9C%80/>

● 断面算出プログラムの例題

1) 断面算出の対象

①建物モデル概要

部材断面算出プログラムを用いて、以下に示す架空の建物モデルを対象に主要な構造部材（柱及び大梁）の断面の算出を行いました。

- ・規 模：鉄骨造 5 階建て、X 方向 5 スパン×Y 方向 3 スパン
- ・スパン長さ：7,000 mm (全スパン共通)
- ・階 高：4,000 mm (全階共通)
- ・床 荷 重：居室（1～5F）及びアスファルト防水(押さえコン)程度の仕上げ荷重（RF）

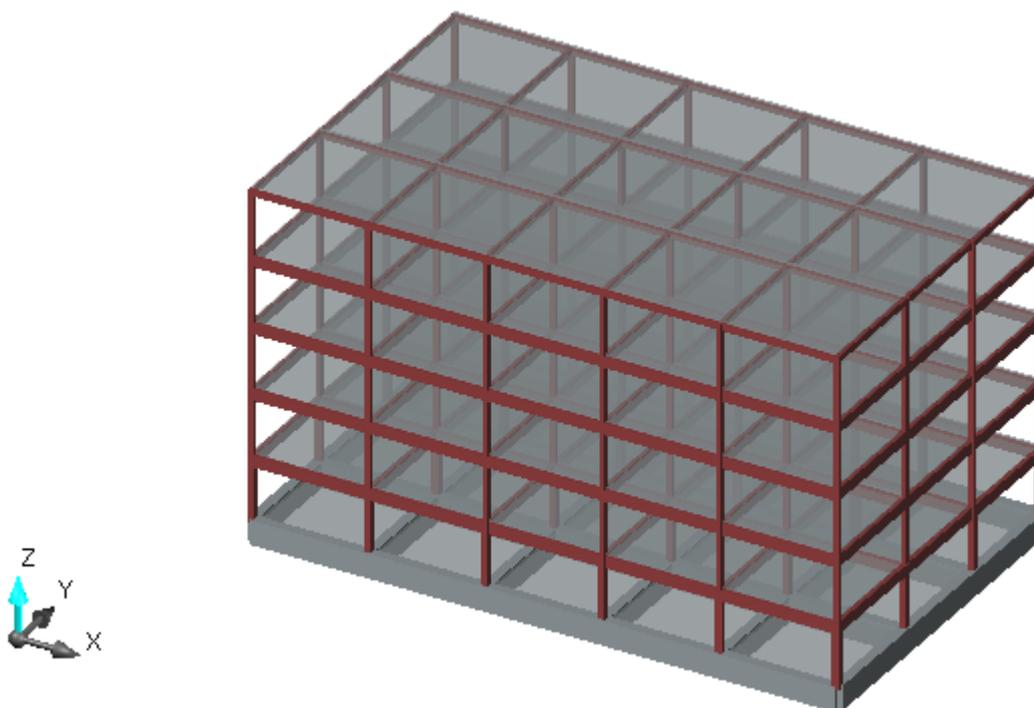


図3 構造モデル(RESP-D より)

②要求性能

想定地震力に対する層間変形角に関する要求性能は以下の通り設定しました。

- ・全ての階の層間変形角を $1 / 200 \text{ rad}$ 以下にする

層間変形角については、要求性能をそのまま計算上の制約値として使用しました。

部材断面の検定値＝存在応力÷許容応力についても要求性能として設定しました。検定の趣旨は検定値が1以下となることの確認にあり、これがそのまま要求性能となりますが、後々小さな変更が生じた際にも同一断面を採用し続けられるように余裕度を見込むケースが多く見られます。今回は、余裕度を1.1倍としこれを算定上の制約値としました。

- ・全ての柱・梁の断面検定値を $1 / 1.1 \approx 0.91$ 以下にする

③部材断面の初期値と部材断面リスト

初期断面は以下の通り設定しました。この情報を基にこれから断面を算出するため、設計の良し悪しは関係なく暫定で与えました。シンプルな例題とするため、柱・大梁はそれぞれ1種類の符号(それぞれ、C1、G1のみ)とし、初期断面はすべての階で共通としました。

・ボックス柱：(せい)×(幅)×(板厚) = 400mm×400mm×16mm

・H鋼大梁：(せい)×(幅)×(ウェブ厚)×(フランジ厚) = 500mm×200mm×9mm×19mm

部材断面は、RESP-Dに登録されている鉄骨既製品の断面情報から一部を取得し、部材断面リストとして与え、その中から選定することとしました。

//Shape	H	B	tw	tf	r	MAT
Box	200	200	6	6	15	BCR295
Box	250	150	6	6	15	BCR295
Box	250	250	6	6	15	BCR295
Box	300	200	6	6	15	BCR295
Box	350	150	6	6	15	BCR295
Box	200	200	8	8	20	BCR295
Box	200	200	9	9	23	BCR295
Box	250	150	9	9	23	BCR295
Box	300	300	6	6	15	BCR295
Box	400	200	6	6	15	BCR295
Box	250	250	8	8	20	BCR295
Box	250	250	9	9	23	BCR295
			⋮			
Box	950	950	36	36	36	BCR295
Box	950	950	40	40	40	BCR295
Box	1000	1000	36	36	36	BCR295
Box	1000	1000	40	40	40	BCR295

//Shape	H	B	tw	tf	r	MAT
H	400	150	6	9	13	SS400
H	450	150	6	9	13	SS400
H	500	150	6	9	13	SS400
H	400	150	6	12	13	SS400
H	400	200	6	9	13	SS400
H	450	150	6	12	13	SS400
H	450	200	6	9	13	SS400
H	500	150	6	12	13	SS400
H	500	200	6	9	13	SS400
H	550	200	6	9	13	SS400
H	400	150	6	16	13	SS400
H	400	200	6	12	13	SS400
			⋮			
H	1000	400	19	40	18	SS400
H	900	400	22	40	18	SS400
H	950	400	22	40	18	SS400
H	1000	400	22	40	18	SS400

図4 部材断面リスト

2) プログラムの実行

1) の情報を与え実行することにより、結果の出力まで算出で行います。

3) 実行結果

初期及び毎回の繰り返し計算のタイミングにおける鉄骨総使用量、部材検定値及び層間変形角を図4に示します。今回の例題では、初期断面(計算回数=0)において目標性能を上回る耐震性能を有しており、部材の断面を小さくする計算が行われました(計算回数=1~2)。これにより断面は小さくなったのですが、大梁の検定値が1/1.1を超えてしまい要求性能を満たさなくなり、計算を繰り返します。計算回数2~4にかけて各階の大梁の断面を調整し、初期状態よりも鉄骨量を抑えながら部材検定値の制約を満たしていきました。

初期断面と計算結果の断面を図5及び図6に示します。結果として、柱の材厚が薄く、大梁は検定値に応じて断面が大きく、或いは小さくなりました。図4に示す通り、要求性能を満たしたまま鉄骨総使用量を約1割削減することができました。なお、今回は柱・大梁の符号は1つのみに設定しましたが、柱・大梁の符号を適切に設定し実行すれば、更に合理化が図れる可能性があります。

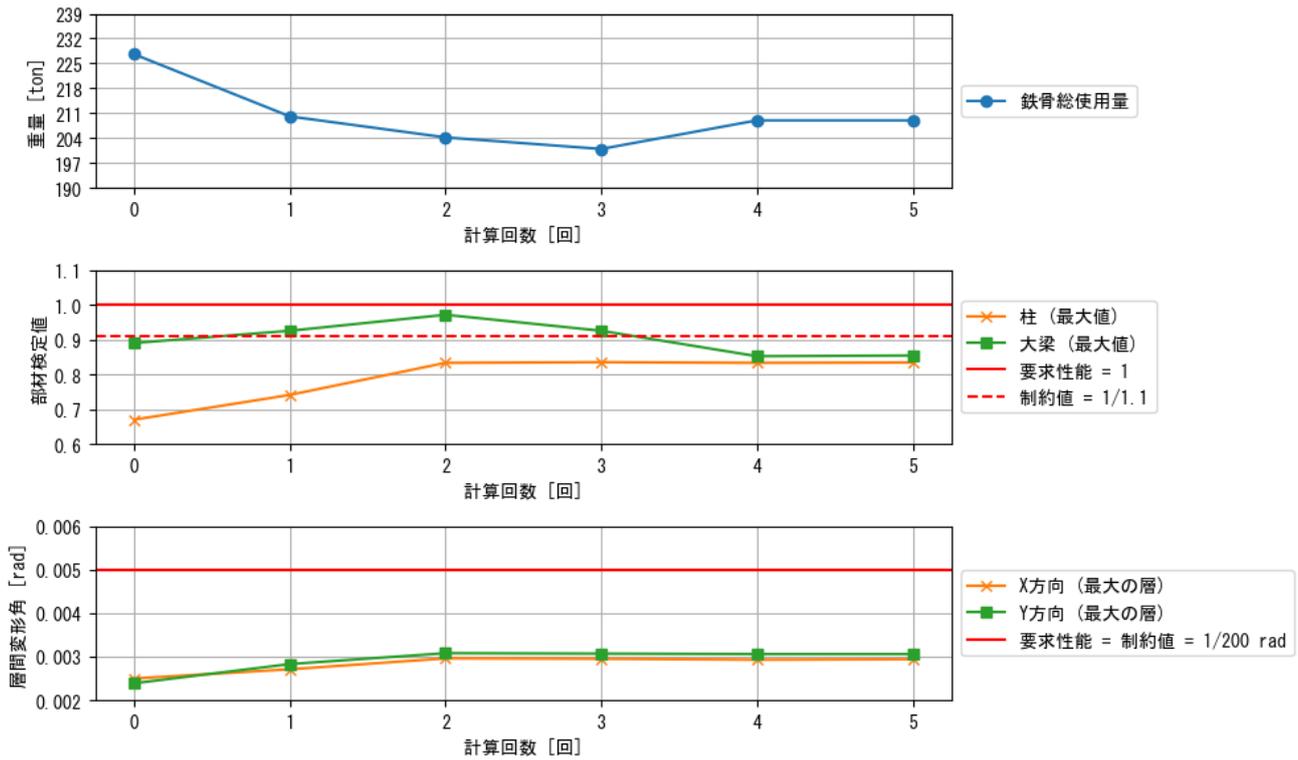


図4 実行結果（鉄骨総重量と要求性能）

初期断面						実行結果の断面							
//Floor	Shape	H	B	tw	tf	//Floor	Mark	Shape	H	B	tw	tf	
1F	Box		400	400	16	16	1F	C1	Box	400	400	12	12
2F	Box		400	400	16	16	2F	C1	Box	400	400	12	12
3F	Box		400	400	16	16	3F	C1	Box	400	400	12	12
4F	Box		400	400	16	16	4F	C1	Box	400	400	12	12
5F	Box		400	400	16	16	5F	C1	Box	400	400	12	12

図5 出力：柱（左：初期断面と右：結果断面）

初期断面						実行結果の断面					
//Floor	Shape	H	B	tw	tf	//Floor	Shape	H	B	tw	tf
2F	H	500	200	9	19	2F	H	700	250	9	16
3F	H	500	200	9	19	3F	H	700	200	9	22
4F	H	500	200	9	19	4F	H	700	200	9	19
5F	H	500	200	9	19	5F	H	650	200	9	19
RF	H	500	200	9	19	RF	H	400	200	9	19

図6 出力：大梁（左：初期断面と右：結果断面）

● おわりに

本稿では、設計・計画初期段階における構造部材の断面算出を算出化するプログラムをご紹介します、架空の簡易的な鉄骨造建物の部材断面の算出で算出を行いました。本プログラムでは、本稿で取り上げた内容に加えて、お客様の価値観やノウハウを組み込んだプログラムへと発展させることが可能です。言語化が難しい経験的な価値観や一筋縄ではいかないものもあるかもしれませんが、弊社構造エンジニアが丁寧にヒアリング、具体化のお手伝いをいたします。

私達、構造計画研究所 建築構造工学部は、構造設計業務をスマートにするご提案や最新の建築構造

技術を通じた解析を専門的に実施しております。少しでも関連する依頼がございましたらぜひお声がけください。RESP サポートメンバー・開発メンバーによる「RESP 技術ブログ」(下記 URL)にて、情報発信をしております。



RESP 技術ブログ

<https://resp-blog.kke.co.jp>

RESP-D

時刻歴応答解析による設計を支援する統合構造計算プログラム

RESP-D 使いこなせていますか？

RESP-Dをさらに有効活用するため、開発・サポートメンバーが強力に支援します。プログラム機能追加や作業支援など、予算に応じてご提案させていただきます。

- カスタマイズによる業務効率化
- モデル作成、結果整理支援、未経験者の育成支援

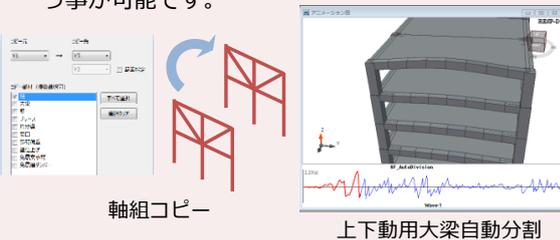


上記QRコードもしくはHPからお問い合わせください。

カスタマイズ事例

入力機能

現状の機能では入力できないモデル形状への対応やモデル化に非常に手間を要する作業の省力化を行う事が可能です。



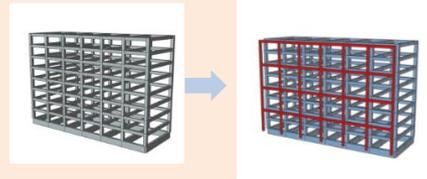
軸組コピー

上下動用大梁自動分割

解析支援事例

基本モデルの作成

RESPを熟知したメンバーが基本のモデル入力までを行い、設計作業に集中できるよう支援します。

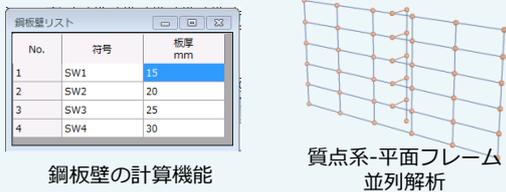


既存建物モデル作成 (KKE)

補強検討・設計 (発注者様)

計算機能

新しいデバイスや従来の一貫構造計算プログラムでは扱われない部材、もしくは解析手法を組み込みます。



鋼板壁の計算機能

質点系-平面フレーム 並列解析

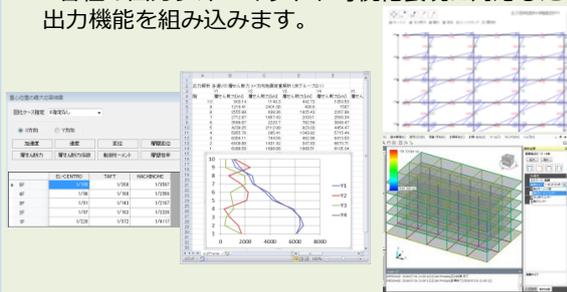
出力結果の整理

RESP-Dからの結果を各社様用の計算書フォーマットで整理します。ご要望に応じて、直接出力する機能をRESP-Dに組み込みます。

Step	δ x(mm)	Qx(kN)	δ y(mm)	Qy(kN)
01 層				
02 7F	53	19.199	-30789	0.07512 -1.19E+2
03 7F	54	20.4903	31139.7	0.071208 -1.05E+2
04 8F	50	19.1378	27659.9	0.11304 -2.21E+2
05 8F	52	21.4198	28351.4	0.115877 -2.18E+2
06 9F	50	22.8598	25384.7	0.048145 -3.29E+2
07 10F	46	21.8538	-21735.1	-0.00012 -2.46E+2

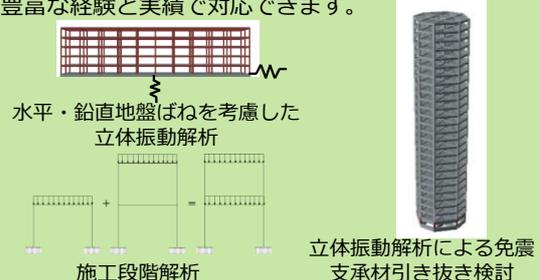
出力機能

各社の出力フォーマットや可視化表現に対応した出力機能を組み込みます。



追加検討の対応

評定で指摘された高度な追加検討もRESPであれば豊富な経験と実績で対応できます。



建築・土木分野におけるデジタルツイン

～データ同化がもたらす精緻予測と効率化～

近年、建設、土木、建築分野においても、デジタルツインや DX（デジタルトランスフォーメーション）といった現実とデジタルを融合する取り組みが加速しています。この動きは、インフラ構造物の設計・施工から維持管理、防災計画に至るまで、幅広い分野で大きな注目を集めています。特に、「計測」と「シミュレーション」を組み合わせたアプローチは、施工精度の向上やライフサイクルコストの削減、リスクの事前評価など、持続可能な社会インフラの実現に貢献する可能性を秘めています。

しかし、計測とシミュレーションにはそれぞれ異なる性質があり（表 1 参照）、計測される事実とシミュレーション結果との間にはしばしば乖離（ギャップ）が生じます。デジタルツインの実現において、このギャップの解消は不可欠な課題です。すなわち、高精度に現実（計測）を再現しうるようなシミュレーションモデルを構築するためには、モデルにおける未知の条件やパラメータの正確な設定が必要となります。従来は、熟練技術者の経験や勘、あるいはパラメータを一つずつ調整しながら計測値に近づける手法（パラメトリックスタディ）が主流でした。しかし、技術者の世代交代や構造物の大規模化・複雑化に伴い、これらの方法は非現実的になりつつあります。そのため、新しい方法論が求められる時代に突入しています。

こうした中で、構造計画研究所では、計測とシミュレーションの両面から課題にアプローチし、両者の強みを活用してギャップを解消する「データ同化」という手法に注目し、その適用技術の開発と普及に取り組んでいます（図 1 参照）。データ同化は、構造物の状態把握や施工プロセスの最適化、さらには災害時の迅速な対応計画の策定に至るまで、多岐にわたる応用可能性を持つ技術です。

本稿では、データ同化の基本的な仕組みと、建設・土木・建築分野における具体的な適用事例をご紹介します。

表 1 計測とシミュレーションの特徴

	長 所	短 所
計 測	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 現実を直接写し取っている 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 時空間的に疎であり、興味のある情報が直接計測できるとは限らない ➤ 限られたデータのみから直接推定や予測することはできない
シミュレーション	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 時空間的に密な情報を提供 ➤ 物理モデルに基づく将来予測が可能 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 未知の条件やパラメータの存在により、予測精度が悪化

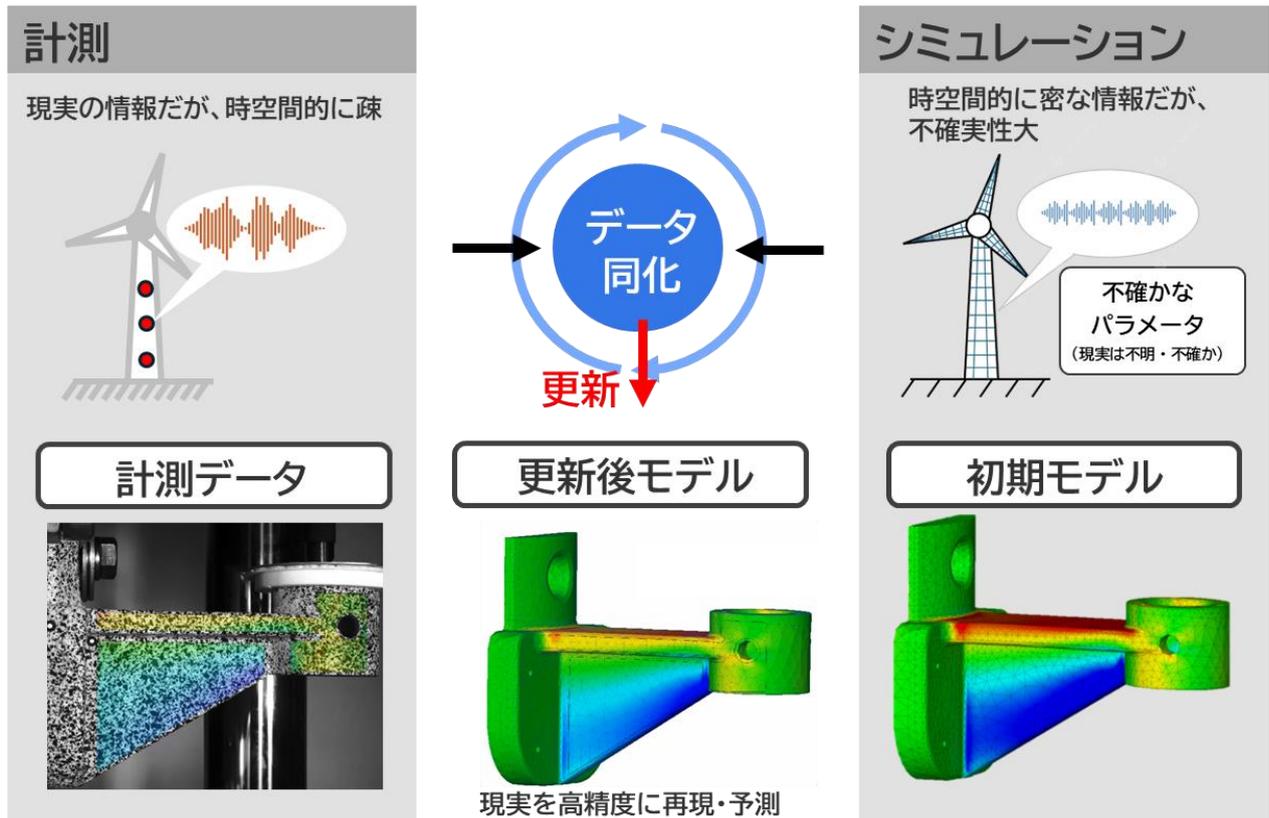


図1 データ同化の概念図

●データ同化とは

データ同化とは、計測とシミュレーションを融合する統計数理的な手法のひとつです。計測データとシミュレーション結果を両者の誤差を加味しつつ確率的な比較を行い、シミュレーション結果が計測データと整合するようにシミュレーションモデルにおける未知のパラメータや条件を推定します。データ同化が用いられている身近な例として、天気予報が挙げられます。天気予報ではラジオゾンデや気象観測衛星で得られる観測値をデータ同化により数値天気予報モデルに反映することで将来の天気を精度良く予測しています。近年では、建設、土木分野においても、地震時における構造物の状態把握やリアルタイム河川氾濫予測、施工時解析など、多岐にわたって活用され始めています。地震時における構造物の状態把握では、地震時に得られた加速度・ひずみデータをデータ同化により構造解析モデルに反映することで、構造物の損傷有無を推定することができます。また、リアルタイム河川予測は河川における水位観測情報をデータ同化によって逐次的に河川氾濫モデルに反映することで氾濫の有無・規模等を精度よく予測することができます。

データ同化を用いることで、手動によるパラメータチューニングよりもはるかに効率的に、熟練の技術者の勘や経験よりも客観性のある推定を行うことができます。また、データ同化はシミュレーションをベースとした手法であるため計測データは少量でも良く、かつ予測結果は物理的な解釈が可能である点も長所であるといえます。

データ同化には様々なアルゴリズムがありますが、図2のように「逐次型」と「非逐次型(平滑化型)」の2種類に分類することができます。それぞれ推定対象のパラメータの時間変化に関する仮定やシミュレーション機能の制約が異なり、問題や使用するシミュレーションに対し、適切に使い分ける必要があります。

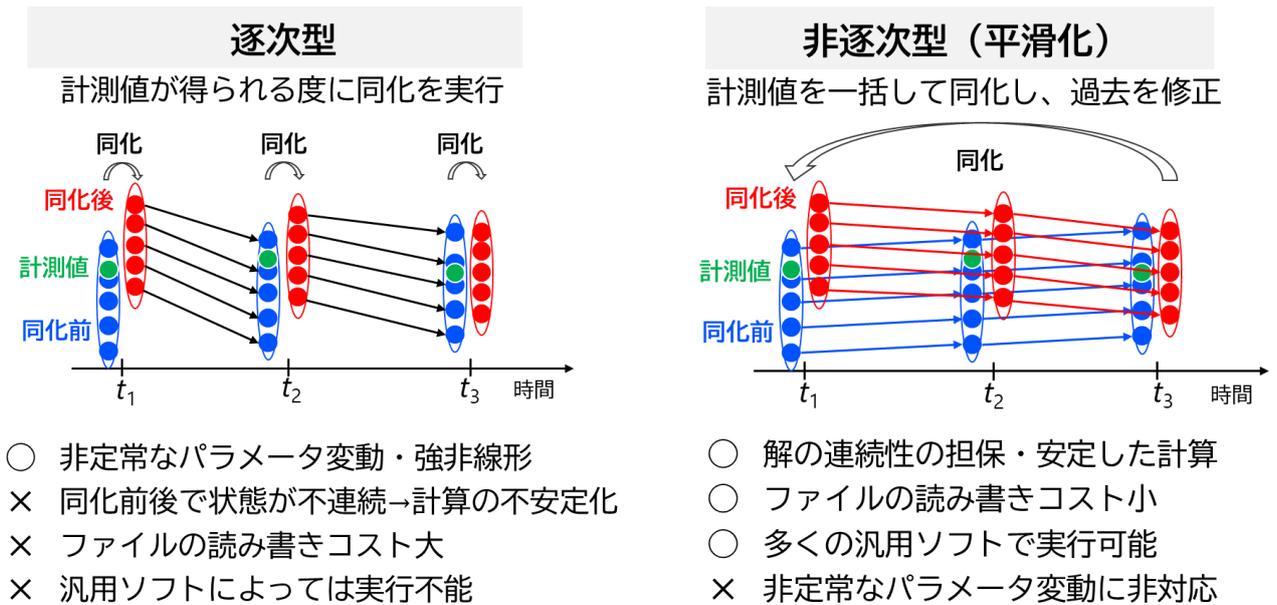


図2 データ同化アルゴリズムの分類

●データ同化の適用事例①：風車の健全性評価を実現するための構造減衰推定

設計寿命を迎える風車に対し、発電事業者は事業継続・建替・廃止を選択する必要があります。物理センサによる網羅的な計測に基づく健全性評価により客観的な意思決定を行うことが理想ですが、風車のような大型の構造物はセンサの取り付け可能な位置や数に制限があるため、限られた計測データから妥当な評価を行う方法が必要とされています。(図3)

データ同化による解決策

データ同化により、限られた位置・点数のデータ（加速度や歪など）を風車の応答解析モデルに反映することで、直接計測できない未知の状態量や物性（減衰や外力など）を推定することが可能です。更新されたモデルを用いて疲労評価を行うことにより、健全性評価や余寿命推定をより正確に行うことができます。具体的な同定方法は、図5に示しています。風車の頂部1点・中腹部2点の3点の加速度データと風車タワーを模した多質点曲げ剪断モデルを用いたデータ同化により、風車タワーに作用する外力、剛性・モード減衰定数の同定を実施しました。

本同定では、データ同化手法の中でも静的なパラメータ推定に長けた非逐次型のアンサンブル smoother という手法を用いました。

各位置におけるモデルと観測の応答振幅が主要モードに関して一致するような外力・減衰の同定を行い、同定前後のモデルを使った応答解析結果を比較したものを図4に示します。データ同化により未知パラメータを推定することで、モデルの再現精度が改善したことが分かります。

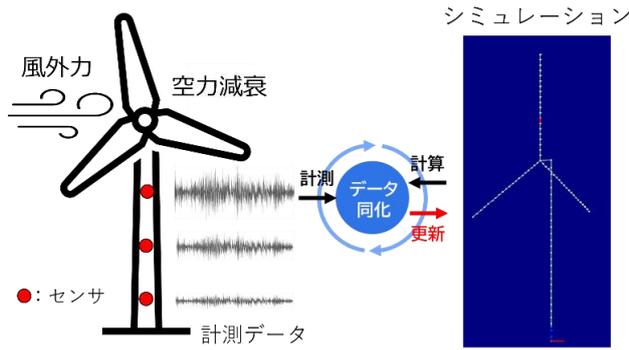


図3 外力・減衰推定イメージ

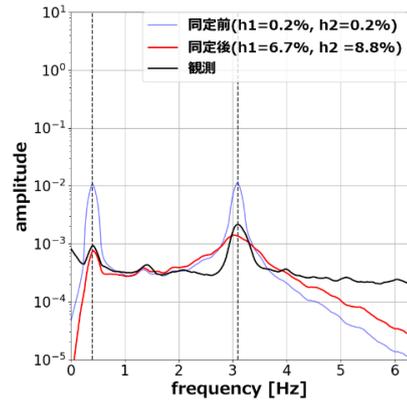


図4 同定した外力・減衰を用いた応答解析結果 (フーリエスペクトル@中腹部)

同定方法

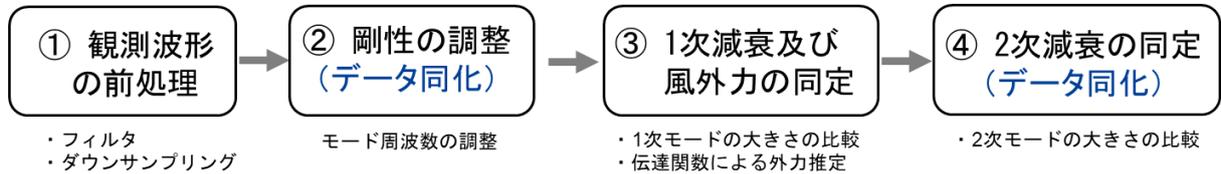


図5 データ同化による風外力・構造減衰の同定方法

●データ同化の適用事例②：画像計測で得られた表面ひずみから材料物性と境界条件の同時推定

有限要素法 (FEM) シミュレーションを用いることで、部材内部にかかる応力やひずみを評価することが可能です。しかし、適切な初期・境界条件や物性値を設定できなければ、現実的な評価を行うことはできません。一方で、ひずみゲージやデジタル画像相関法 (DIC) などの画像計測は物体表面の情報を直接計測することができますが、内部の状態を把握することはできません。

データ同化による解決策

画像計測によって得られた表面データと FEM シミュレーションのデータ同化により、直接計測できない内部応力や材料物性を推定することができます (特許技術)。図6の例では、両端に荷重をかけた部材の表面の変位データを画像計測 (DIC) により取得し、構造解析モデルとのデータ同化により荷重境界条件や材料物性 (ヤング率・ポアソン比) を同定した結果を示しています。端部のやや偏った荷重分布が良く再現されており、推定された材料物性は文献値とほぼ一致していることが分かります。

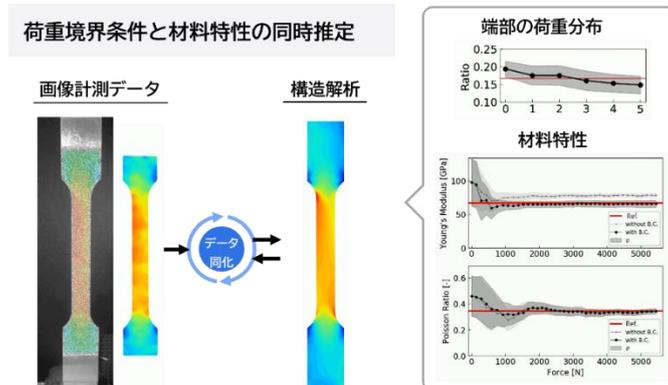


図6 画像計測データ (DIC) を活用したデータ同化

●誰でも使える「データ同化プラットフォーム」の開発

データ同化は、シミュレーション可能でありかつその一部が観測可能な現象であれば原理的には適用が可能であり、構造物の変形や破壊・振動、熱流体、電磁界、災害など、様々な分野に応用することができる汎用的な技術です。一方で、データ同化のアルゴリズム選択や実装には専門的な知識が必要であり、かつ適用するシミュレータや使用する計測データに対する連携は複雑である場合が多くあります。KKE では任意のシミュレータやデータに対する速やかな連携が可能な基盤システムを構築し、あらゆる課題に対し誰もが容易にデータ同化を利用できる『データ同化プラットフォーム』の開発をしております (図7)。

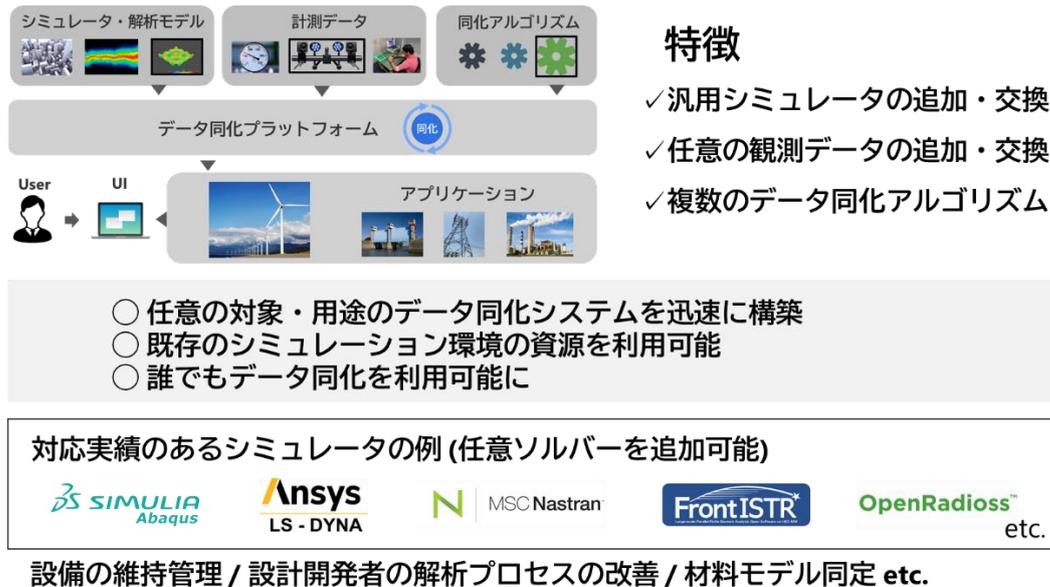


図7 データ同化プラットフォームの概要

※記載されている法人名、団体、製品名、およびロゴは、各社の登録商標または商標です。

●今後の展望

適用事例でご紹介した風車への適用に限らず、今後様々な構造物、自然現象への適用拡大を目指しております。例えば、以下のような対象への適用を検討しております。

- 橋梁、鉄塔のインフラ構造物の健全性評価
- 地震後の原子力構造物の状態把握
- 高精度なりアルタイム氾濫予測

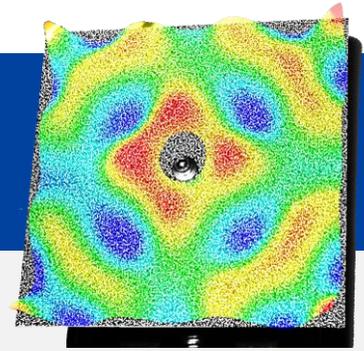
データ同化を活用した課題解決などお気軽に弊社までお問い合わせください。

参考文献

- [1] 齋藤 健太, 大峽 充己, 正月俊行, 藤下和浩, 富澤徹弥: 実測に基づく風力発電設備支持物の余寿命予測に関する研究 その4 データ同化を用いた風外力と減衰パラメータの推定, 2024年度日本建築学会 (関東), 2024年8月
- [2] 大峽 充己, 藤下和浩, 齋藤 健太, 正月俊行, 富澤徹弥: 実測に基づく風力発電設備支持物の余寿命予測に関する研究 その5 データ同化による同定モデルに基づく歪・応力の推定値と実測値の比較, 2024年度日本建築学会 (関東), 2024年8月
- [3] 特開 2020-201146: パラメータ推定装置、パラメータ推定方法及びプログラム
- [4] 特開 2023-142321: シミュレーション装置、シミュレーション方法及びプログラム

圧縮センシングDIC

特願 2022-086465：振動計測装置、振動計測方法及びプログラム



1200万画素、10fps で撮影した
金属板の振動 (2144 Hz)

サンプリングレートを超えた **画像振動計測** で
高速振動を **広範・高精度** に計測。

貼り付け式センサを用いた振動計測の現場で、こんな困りごとはありませんか？

- ・計測したい箇所が多い場合に、計測点数が足りなくなってしまう。
- ・複数点のデータの整理や分析が手間。結果を分かりやすく伝えるのも難しい。
- ・センサの貼り付けによって対象の振動が変化してしまう。 etc.

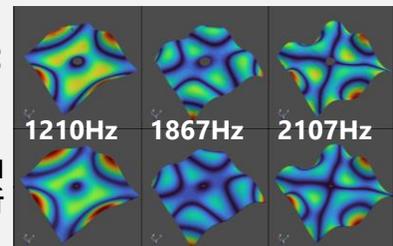
圧縮センシングDICなら、モード形状、周波数、ひずみ等を面的・非接触・3次元で計測可能。

圧縮センシングDIC

対象を低速度のステレオカメラで撮影することで、振動の変位やひずみを3次元で計測し、モード形状や固有周波数を推定可能な画像計測技術。

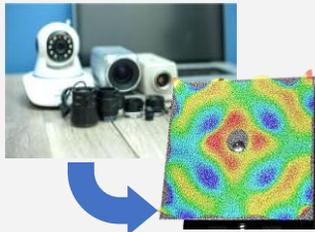
高知工科大学との共同研究により、
十数Hz程度の低速度撮影で数千Hzまでの高速振動の画像計測を実現。
高解像度の低速度カメラで、広範囲かつ高い分解能で振動を計測可能。

DIC
計測
FEM
解析



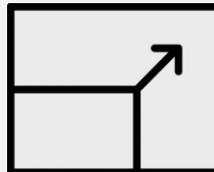
FEMの妥当性検証やパラメータ推定にも最適

本技術の特徴



撮影速度が低いカメラでも
高周波振動を計測

高解像度化



高解像度カメラにより
微細な高速振動を計測



複雑な形状の大型物体も
3次元で一度に計測

計測可能な対象

様々な素材に適用可能



金属、ゴム、樹脂、複合材料
など様々な材料、形状の部品
やアセンブリ状態の計測が可能。

複雑形状でも計測できる



電子基板やパワープラント
などのセンサ貼付けが難しい
複雑な対象の計測が可能。

大型対象の計測に



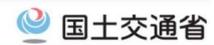
車体などの、
計測点を絞れない大きな対象を
広範囲で一度に計測が可能。

建設分野でのナレッジ活用における生成 AI 活用

日本の建設業では長年、人手不足の解消、生産性向上、ベテランの高齢化対策など、様々な課題が挙げられてきました。国土交通省が公開する就業者数のデータを見ても、人手不足対策が重要なことがわかります。特に、年齢を重ねた熟練者（ベテラン勢）が一気に現場から引退する時期が間近に迫っていることもわかります。言うまでもなく、ベテランが持っている技術を次世代に継承することは喫緊の課題であり、その解決に向けた鍵の一つとして、社内に蓄積されたデータの活用が挙げられます。特に、近年、生成 AI が一般的にも利用しやすくなってきたことを受け、建設業界では、「AI を活用して何とかこの課題を解決できないか」と模索している声をよく耳にします。

今回は、構造計画研究所が取り組んでいる「建設ナレッジ活用の仕組みづくり」と「生成 AI の活用しどころ」について、ご紹介します。

建設業就業者の現状



技能者等の推移

- 建設業就業者： 685万人(H9) → 504万人(H22) → 479万人(R4)
- 技術者： 41万人(H9) → 31万人(H22) → 37万人(R4)
- 技能者： 455万人(H9) → 331万人(H22) → 302万人(R4)

建設業就業者の高齢化の進行

- 建設業就業者は、55歳以上が35.9%、29歳以下が11.7%と高齢化が進行し、次世代への技術継承が大きな課題。
※実数ベースでは、建設業就業者数のうち令和3年と比較して55歳以上が1万人増加(29歳以下は2万人減少)。

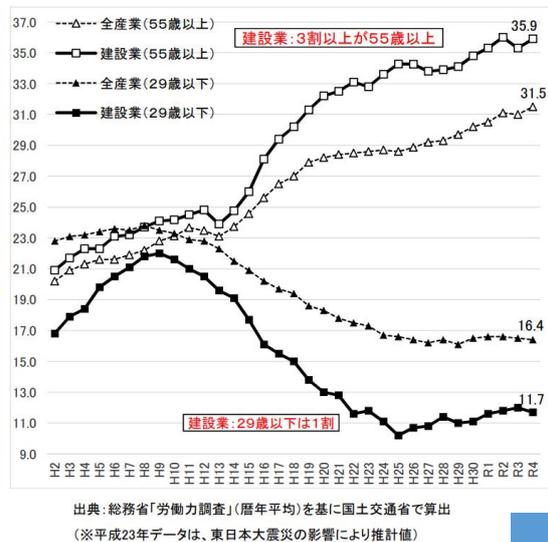
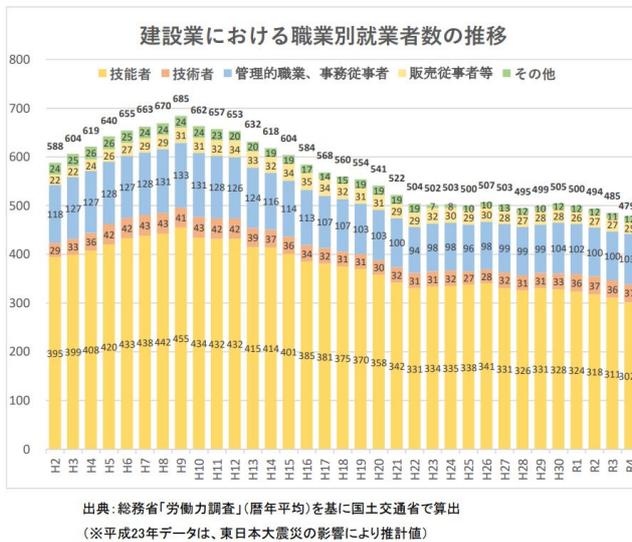


図 1 建設業就業者の現状

参照元：国土交通省「建設業を巡る現状と課題」3 ページ

<https://www.mlit.go.jp/policy/shingikai/content/001610913.pdf>

●建設ナレッジ活用の仕組みと必要な背景

主に、建設業の設計業務を対象例として、活用シーンを想定しています。特に、建築物の設計初期段階では、検討対象の物件の規模や用途、建設地に関する与条件を整理し、設計をまとめていくことが重要です。その際、ベテランの方であれば、過去に経験したことがある類似物件を参考にすることが多々

あるかと思いますが。一方で、経験年数が浅かったり、検討対象の物件の用途を経験したことがない場合は、社内の事例を参照して設計の参考にしたいと考えられます。ただし、社内の事例を参考にしようとしても、「過去の物件に関する情報が担当者のPCにのみ溜まっている」や「共通データベースには溜まっているものの、欲しい情報に辿り着けない」といった状況が多いのではないのでしょうか。例えば、「あの人に聞けばわかるはず」や「あの人に聞かないとわからない」といった状況もあるかと思いますが。

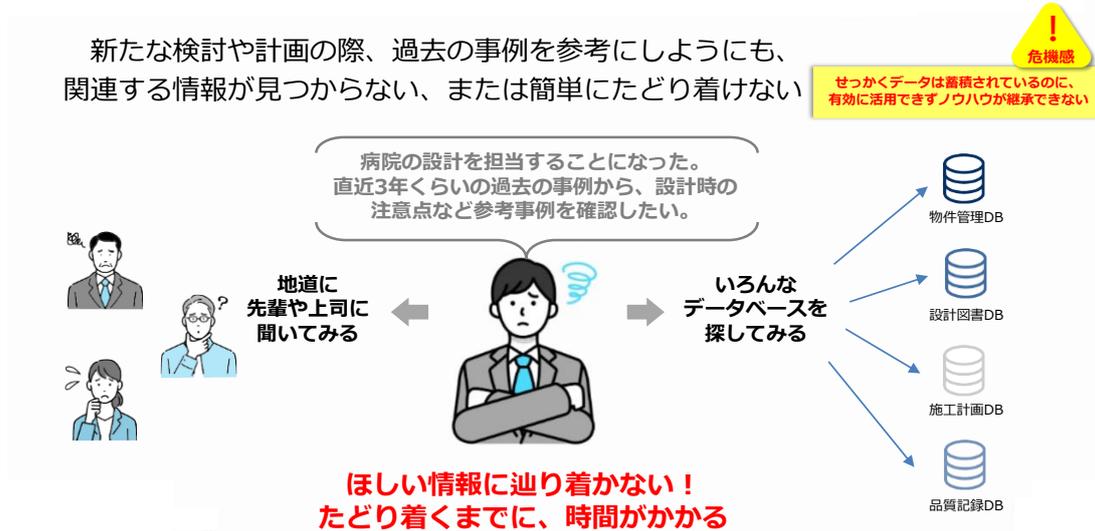


図2 社内の情報検索の課題

●建設ナレッジ活用が簡単ではない理由

建設ナレッジの活用が簡単ではない理由は複数ありますが、建設業ならではの事情が起因していると考えています。代表的な3つの理由を下図に示していますが、最も特徴的すべきなのは、「建設業ならではのデータ特性」という点です。世間一般の業務では、AI活用が進んでいる業務領域もありますが、それらは、一般的に使われるテキストや画像を対象にしていることが多く、図面や図形を含むドキュメントなど建設業のデータ特性に合わせたものは多くありません。世間一般で普及しているAIサービスを建設業の業務に適用させるには、「建設業ならではのデータ特性」を理解した上で、やり方を調整する必要があります。

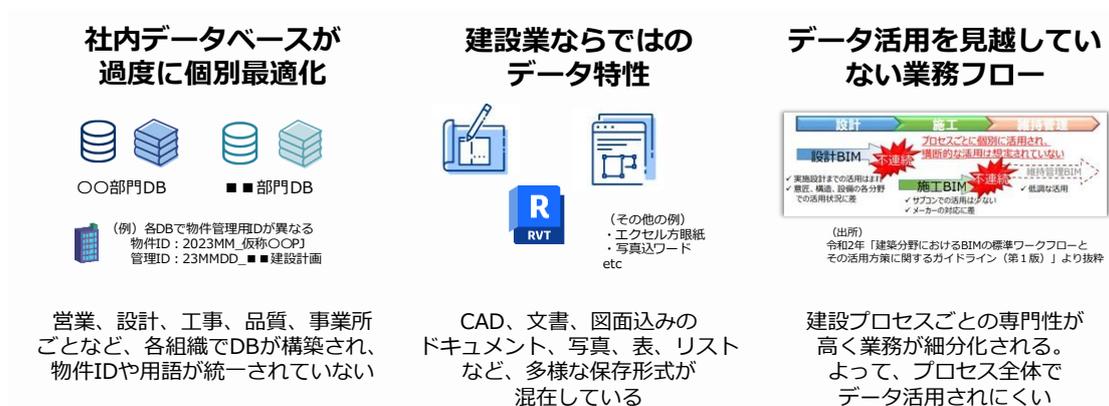


図3 ナレッジ活用が簡単ではない理由

●建設ナレッジ活用の仕組みを構成する技術要素

建設ナレッジ活用に向けては、すべての業務で使える万能なシステムや仕組みを目指すのは難しく、業務課題に応じてアレンジすることが重要です。課題解決したい業務プロセスや焦点を絞り、そのために必要な技術要素を組み合わせ、仕組みの構築を目指しています。

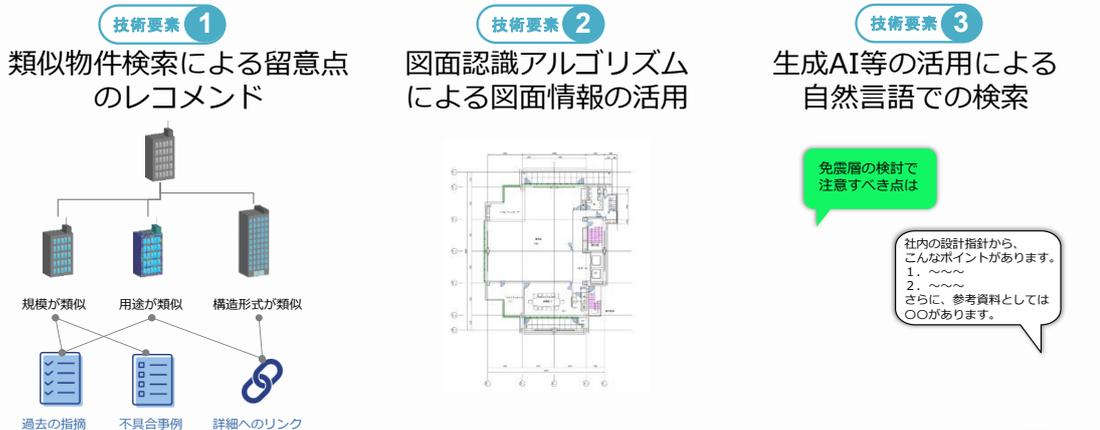


図4 建設ナレッジ活用に必要な技術要素

●技術要素1 「類似物件検索による留意点レコメンド」

技術要素の1つ目は、「過去物件からの留意点レコメンド」です。見た目は検索システムに近いイメージとなりますが、検索できる情報は、蓄積されているデータの種類や粒度によって異なります。基本的には、すでに蓄積されているデータを最大限活用し、設計者が検討する手掛かりとなる過去の情報を提示するための技術要素となります。さらに、検索した結果に対してユーザーが評価を与えることで、検索結果がより良くなっていくことも機能として付加することが可能です。

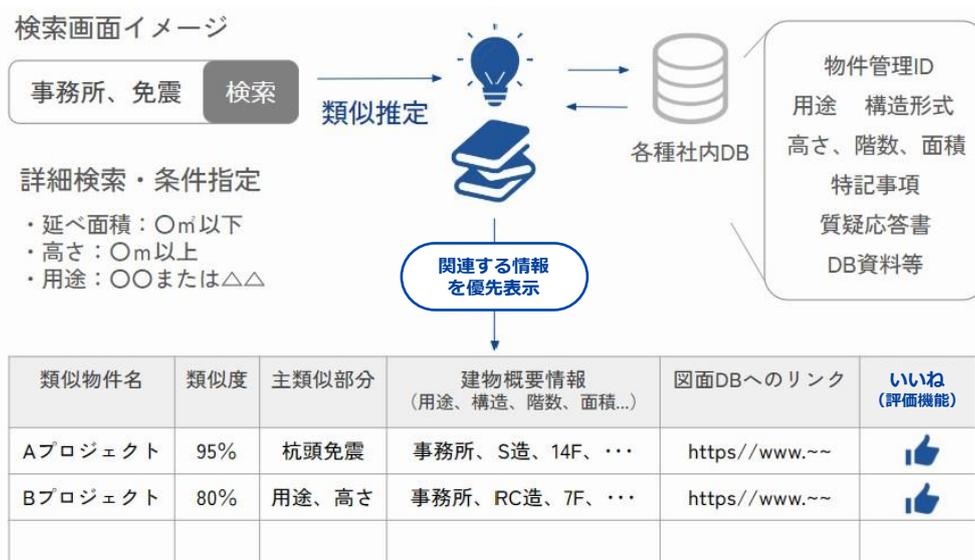


図5 検索画面イメージ

- 例えば、デザインレビュー（DR）の記録から、キーワードを抽出しデータ化
- 過去の事例から関連する指摘を検索でき、DRの事前準備にも活用可能

<設計DR書式（例）>

DR記録 第〇回	〇〇新館建設PJ	指摘事項	回答・対応内容	指摘タグ 制振ダンパー 点検 メモリアルーム 配置計画 仕上げ 施主の意向	回答タグ 構造部門 点検スペース 施主 確認
	日時：□□				
		制振ダンパーの点検を考慮した計画となっているか確認すること	構造設計部門に確認し、点検スペース等を含めて、再検討します		
		メモリアルームは施主にとって重要な要素であるため、施主の意向を踏まえた配置計画と仕上げにすること	施主へ確認した上で、丁寧に進めます。		

自然言語処理により情報抽出

建築辞書により言葉の揺らぎを吸収（各社独自用語を登録）

図6 過去の帳票（例：DR記録）からの留意点レコメンドイメージ

●技術要素2 「図面認識アルゴリズム」

技術要素の2つ目は、図面認識アルゴリズムです。当社では、建築図面からの情報抽出方法を継続的に検討しており、現時点では、下図に示すような「線」「部材・建具」「文字」を抽出することが可能です。これらの情報を活用して、例えば、「過去の設計図面内の情報を抽出し検索可能にする」という使い方があります。

さらに、室名と室領域の読取り機能を組み合わせることにより、「室の面積」を算出することも可能です。例えば、面積を元に検討するような概算見積の支援ツールとして、この技術を応用する使い方もあります。いずれの使い方も、読取対象となる図面をもとに精度検証を行い、業務上での使いどころを見極めます。

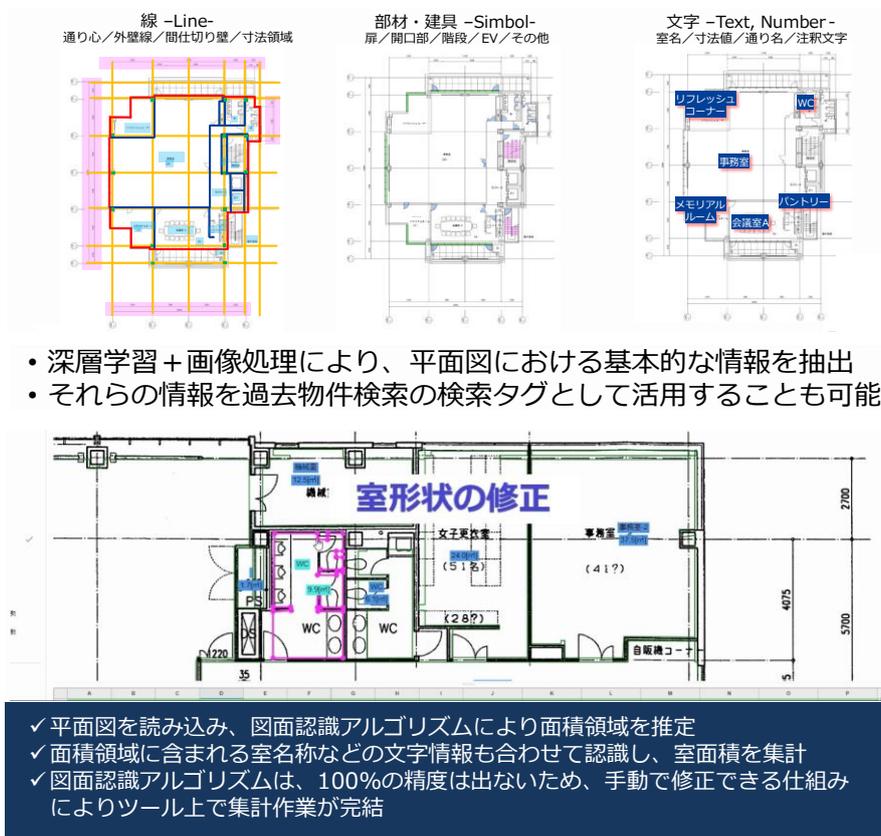
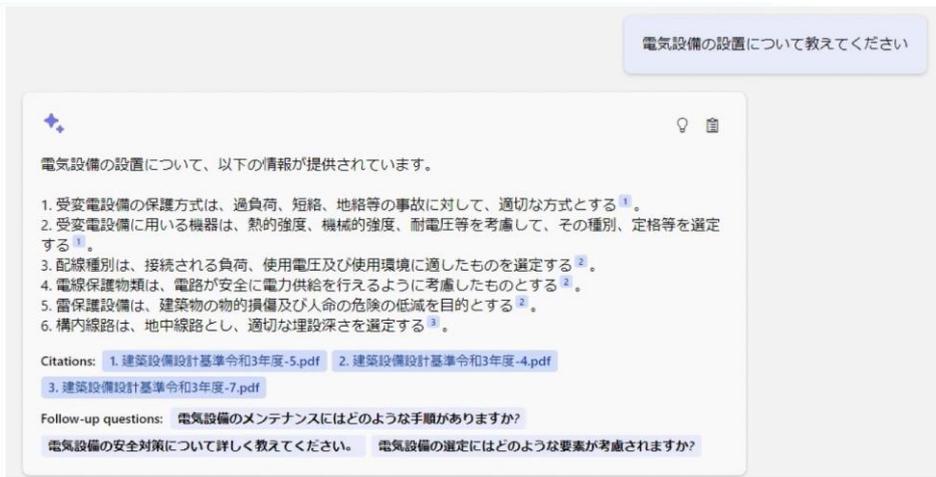


図7 図面認識アルゴリズムの概要イメージ

●技術要素3 「生成 AI 等による自然言語での検索」

技術要素の3つ目は、生成 AI 等の活用です。ChatGPT に代表されるテキスト系の生成 AI の特徴は、文章で質問すると、人間が作文したような文章で回答が返ってくる点です。この点に、多くの人は使いやすさを感じ、爆発的に普及したと考えられます。建設ナレッジ活用の仕組みでは、生成 AI をユーザーインターフェースの一つの方法として、積極的に取り入れて活用しています。

ただし、生成 AI を活用する場合でも、読み込ませるデータの量や質によって、生成 AI の回答内容が変わります。生成 AI を活用するためにも、読み込ませたい社内データの整理や事前処理は重要となります。



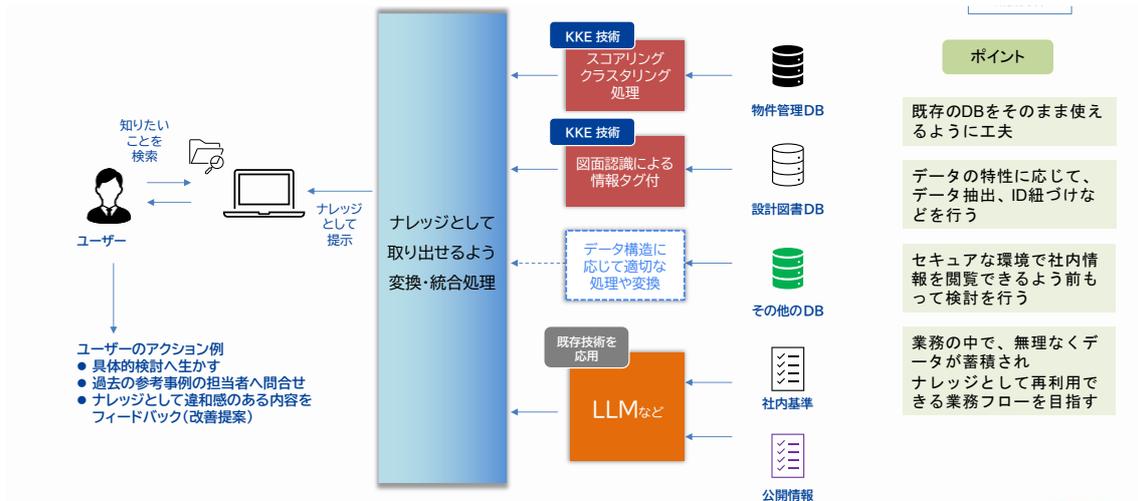
- 公開情報を読み込み、回答精度を検証（ファインチューニング、RAG等）
- 社内の標準類やマニュアル類（設計、施工、品質など）を読み込むことで、自社オリジナルの回答を含む対話的な検索が可能に。



図8 生成 AI 等による自然言語での検索イメージ

●まとめ

本稿では、建設分野でのナレッジ活用の仕組みについてご紹介しました。当社では、建築分野での業務実績や建築の知見をベースとして、社内の蓄積データを最大限活かしたナレッジ活用の仕組みの実現をご支援しております。お客様のデータ蓄積状況や業務フローに合わせて、課題解決に向けて目線を合わせたご提案を心がけています。AI 関連のプロジェクトの場合、実務部門だけではなく情報システム部門の方と早い段階で検討事項をすり合わせる事が重要とも考えています。そのためにも、目指したい全体像と一緒に描きつつも、スモールステップで効果を出していけるような進め方をご提案させていただきます。



- ✓ 業務課題や現状データの把握を行い、ナレッジの仕組みの方向性を検討し、関係者と合意することを重要視しています。
- ✓ そのために、プロトタイプによる検証が必要な場合はPoCを実施します。
- ✓ 仕組みとしてのシステムの要件や実施効果が見えてきた段階で、具体的なシステム開発のフェーズに進めていきます。

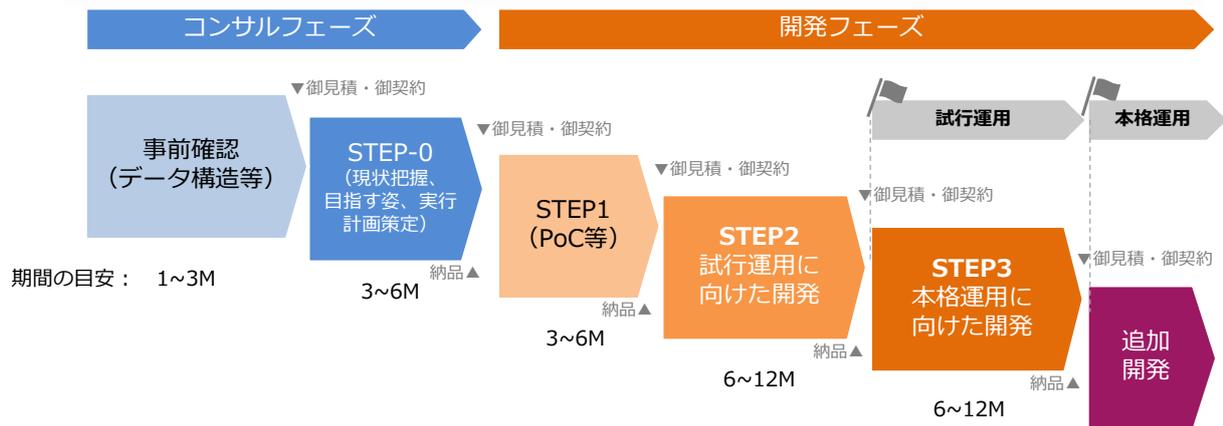
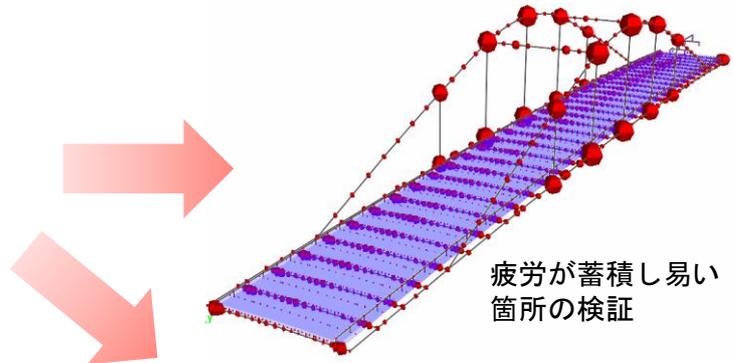
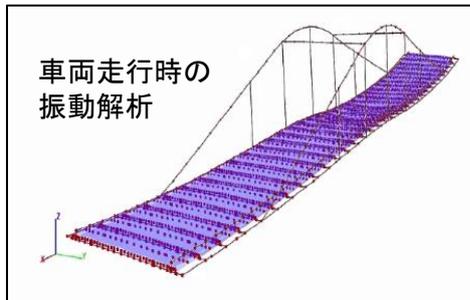


図9 ナレッジ活用の仕組み構成例と進め方例

車両走行振動解析プログラム DALIA

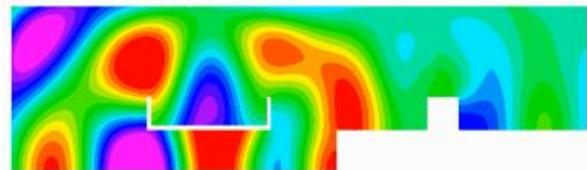
DALIA は、車両-構造物の動的相互作用を考慮した移動荷重を伴う時刻歴動的応答解析プログラム（走行解析プログラム）です。
交通振動や低周波騒音問題への対策、橋梁の疲労評価、車両の乗り心地評価などを目的とした振動予測シミュレーションを行います。



■主な適用事例

主に道路または鉄道橋を対象とした

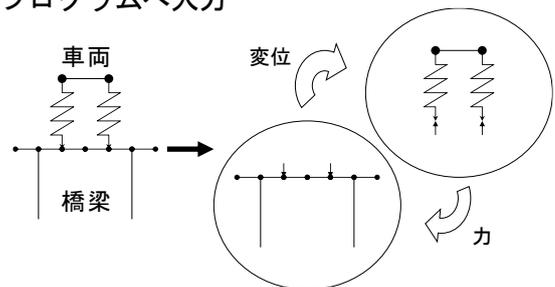
- ・ 車両走行時の安全性評価
- ・ 車両走行時の乗り心地評価
- ・ 車両走行時の運行計画
- ・ 環境振動問題
- ・ 繰り返し活荷重による疲労問題
- ・ 振動抑制デバイス設置計画
- ・ モニタリングセンサー設置計画



別の低周波騒音や環境振動の解析プログラムへ入力

■解析手法

- ・ 地盤-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。



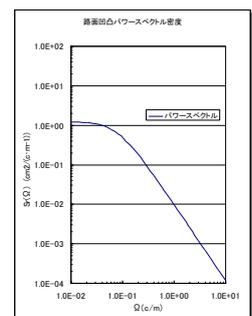
サブストラクチャー法による相互作用

■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、



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。



ジョイント・段差計測システム

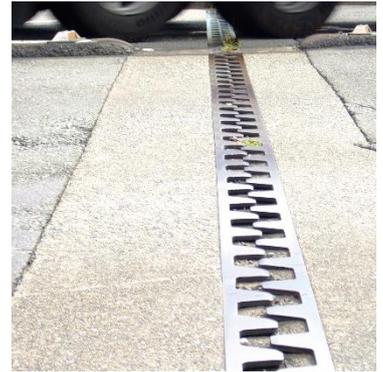
東日本高速道路(株)
中日本高速道路(株)
西日本高速道路(株)
(株)高速道路総合技術研究所
(株)構造計画研究所
による共同開発システム
特許第6666207号



道路巡回車に取り付けて、路面の段差計測を日常点検で行うことができるシステムです。

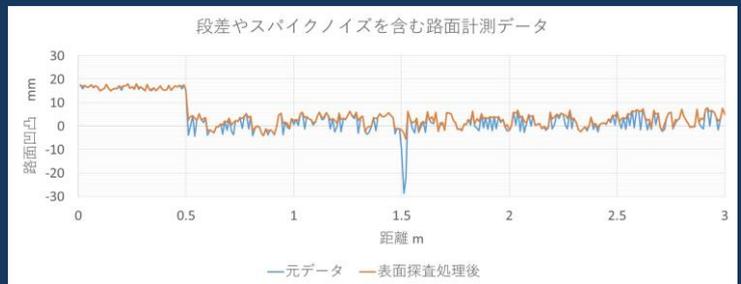


車体下に
レーザー変位計を設置



独自のノイズ除去技術による高精度な分析

段差の情報を残しつつ不要なスパイクノイズやジョイント継ぎ目のデータを除去
※特許第6885995号



計測データを使って2m水系法によるスクリーニング検査



長期計測で経年変化をキャッチ

路線内悪化ポイントの抽出



使用条件

- ・走行速度60km/h~80km/h ・GPS電波が受信できる路線
- ・降雪、荒天時は測定不可
- ・早朝、夕刻で車体下に日光が差し込むとデータが取得できない場合があります

日常点検車搭載型橋梁伸縮装置点検システムによる ゴムジョイント変状検知実験

構造計画研究所 防災・環境2部 矢部 明人

中日本ハイウェイ・エンジニアリング東京株式会社 今枝 徳靖

キーワード：伸縮装置，変状検知，日常点検車搭載型モニタリング

1. はじめに

中日本高速道路管内の橋梁に1万基以上設置されている伸縮装置（橋梁のつなぎ目）は，鋼製や硬質なゴム製でできており，疲労亀裂や劣化の進行に伴い破損や段差などが発生して交通事故の原因につながる可能性があります．この伸縮装置は車上からの目視などによる車上点検（4日以上/2週）や路肩に降りて確認する降車点検（2回以上/年）を行っています（図1）．降車点検による方法では，点検員の安全性確保および，聴覚や体感などに頼る定性的な点検となっていることが課題となっています．

既往の研究では，環境測定車に搭載したマイクロフォンを使って，後輪が伸縮装置直上を通過した際の音のパワースペクトル値の違いから，伸縮装置の変状を検知する手法が開発されています¹⁾．また，普通自動車の後輪車軸に登載した加速度センサと後輪前方に設置したレーザー変位計を使い，80km/hで鋼製の伸縮装置直上を通過する後輪車軸の一瞬の振動を抽出して，フェースプレートが破断に至る前の変状を検知する方法も開発されています²⁾³⁾．本実験に用いた日常点検車搭載型の橋梁伸縮装置点検システム「ROAD CAT」はこれらの研究成果を応用し「降車することなく安全な点検の実施」と「定量的な点検結果の取得」および「路上規制の削減」を目的として開発されたシステムです．ROAD CATの概要を図2に示します．

一方，既往の研究では鋼製フィンガージョイントの変状検知事例が示されているものの，ゴムジョイントに対する適応例がまだありません．そこで，本実験では同システムを用いて供用中のゴムジョイントを対象とした測定および変状検知を行いました．

2. 実験概要

本実験では，中日本高速道路管内関東近郊の橋梁に設置されたゴムジョイントのうち，日常点検において劣化等の変状が疑われた1箇所の伸縮装置を対象に，2023年11月に測定を行いました．測定は上り線，下り線それぞれの走行車線（約70km/h）および追越車線（約80km/h）を2回

ずつ，対象ゴムジョイント上をROAD CATで走行し，レーザー変形による路面凹凸，マイクロフォンによるジョイント通過時の後輪近傍の音，および加速度センサによる後輪車軸の鉛直加速度振動（以下振動）を取得しました．

分析は10kHzでサンプリングされた走行中の全測定データから，GPSの位置情報とレーザー変位計の路面プロファイル情報を用いて後輪が対象ゴムジョイント直上を通過時の0.2048秒間を抽出し，フーリエ変換による周波数解析を行いました．



図1 降車点検の様子



図2 ROAD CATの概要

3. 変状検知手法の概要

測定データから算出した物理量はそれぞれ独立であるとし、標準正規分布を仮定した負の対数尤度を使って周波数毎の変化度 $\alpha(x)$ を

$$\alpha(x) = -\log_e N(x|\mu, \sigma^2) \quad (1)$$

のように定義します。

ここで、全測定結果の平均値を $\mu(\mu(k)_x)$ 、標準偏差を $\sigma(\mu(k)_x)$ とし、ある対象の k 回分の測定の平均値 $\mu(k)_x$ が求まるとき、基準スペクトルを

$$S_p = \mu(\mu(k)_x) + \sigma(\mu(k)_x) \quad (2)$$

とおけば、全測定結果に対する $\mu(k)_x$ の変化度は

$$\alpha(\mu(k)_x) = \sum \frac{\mu(k)_x - S_p}{\sigma(\mu(k)_x)} \quad (3)$$

のように求めることができます。

なお、本実験では変状によって発生する音や振動を検知する目的で $\mu(k)_x - S_p > 0$ の値を変化度算出の対象としました。また、測定結果は各車線2回、かつ左右のデータが取得できます。本検討では、事前に損傷の箇所がわからない条件で評価を行うため、同型のゴムジョイントのデータは変状が疑われデータも含め $4 \times 2 \times 2$ 、全16データを用いて基準スペクトルを作成しました。

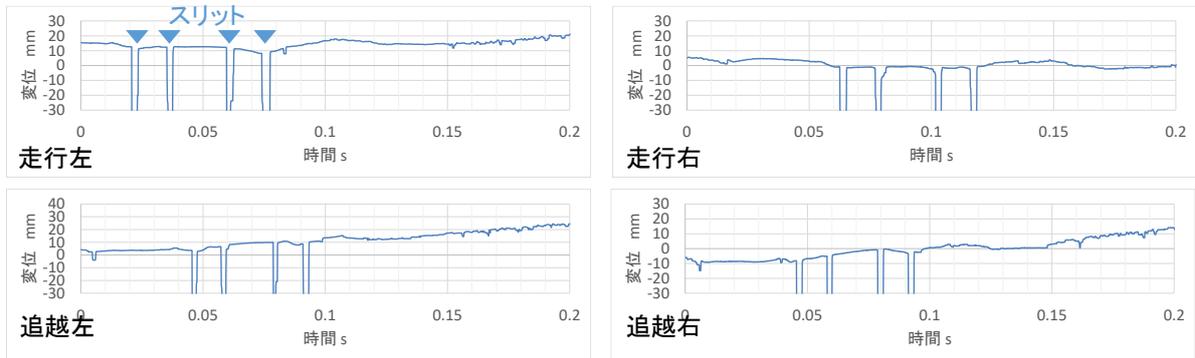
4. 測定分析結果

図3に1回目の測定によるレーザー変位計のゴムジョイント近傍の路面プロファイル結果を示します。各測定結果に見られる落ち込みはゴムジョイントのスリットを捉えたものです。上り線では走行車線、追越車線ともにゴムジョイントの大きな欠損等は見られませんでした。一方、下り線では走行車線右側のゴムジョイント表面の欠損を捉えているのがわかります。

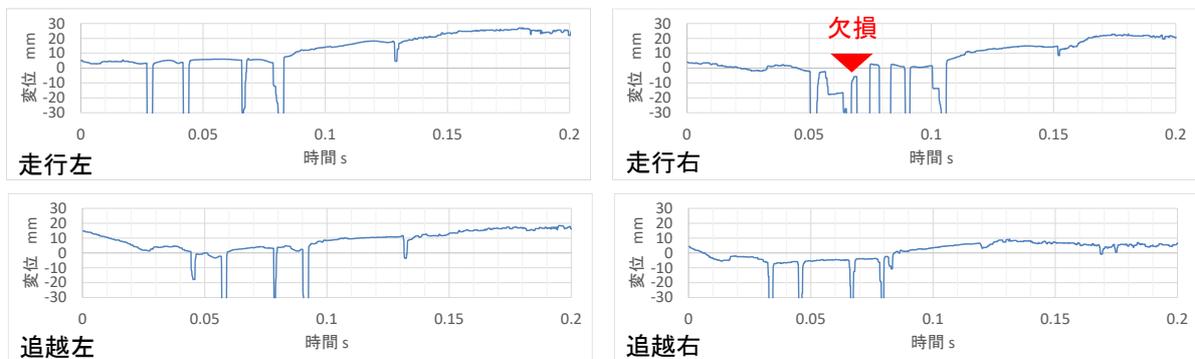
レーザー変位計で捉えたゴムジョイント前後の路面プロファイルの測定結果を用いて、走行速度から時間軸を距離軸に変換し、2m水系法と同じ方法で測定した段差量の結果を表1に示します。段差は下り線の方が大きく、追越車線側で最大で10.9mmでした。

表1 段差量測定結果

	走行	追越
上り線	6.3mm	7.4mm
下り線	10.3mm	10.9mm



(a) 上り線



(b) 下り線

図3 レーザー変位計の路面プロファイル結果

図 4 に下り走行車線後輪左右のゴムジョイント通過時の音、振動のフーリエスペクトルと基準スペクトルの比較を示します。フーリエスペクトルの比較では、その差があることは認められるものの、変状の有無を定量的に捉えることは難しいといえます。

次に、フーリエスペクトルと基準スペクトルを使い、式 (3)により上下走行追越車線左右毎の変化度を算出して比較した結果を図 5 に示します。欠損を捉えた下り線走行車線右側の変化度が大きく示された他、下り追越車線の変化度も大きな値を示しました。この結果は後の詳細点検（1回以上/5年）の所見とも符合することが確認されています。なお、下り追越左側の振動の変化度が小さい理由として、変状による振動が大きい下り走行車線右側のデータを含めて基準スペクトルを作成したことにより、左側の評価値が相対的に小さく算出されたことに起因すると考えられます。

5. まとめ

本実験結果から、日常点検車搭載型橋梁伸縮装置点検システムおよび変化度を用いてゴムジョイントの変状を定量的に捉えられることがわかりました。今後、他種の伸縮装置に対する適応性と変状検知に必要な閾値、測定条件毎の補正方法などについて検討を行う予定です。

参考文献

- 1) 今枝 徳晴, ジョイント点検システム及びジョイント点検方法, 特許第 6404652 号, 2018.9
- 2) 岩吹啓史, 中崎邦夫, 矢部明人: 損傷段階を模擬した鋼製フィンガージョイントの製作及び振動特性に関する研究, 土木学会第 73 回年次学術講演会, pp.909-910, 2018.8.号.p.923-932,2014.7.
- 3) 矢部明人, 岩吹啓史, 中崎邦夫: 巡回車を利用した鋼製フィンガージョイント変状検知手法に関する基礎的研究, 土木学会第 73 回年次学術講演会, pp.911-912, 2018.8

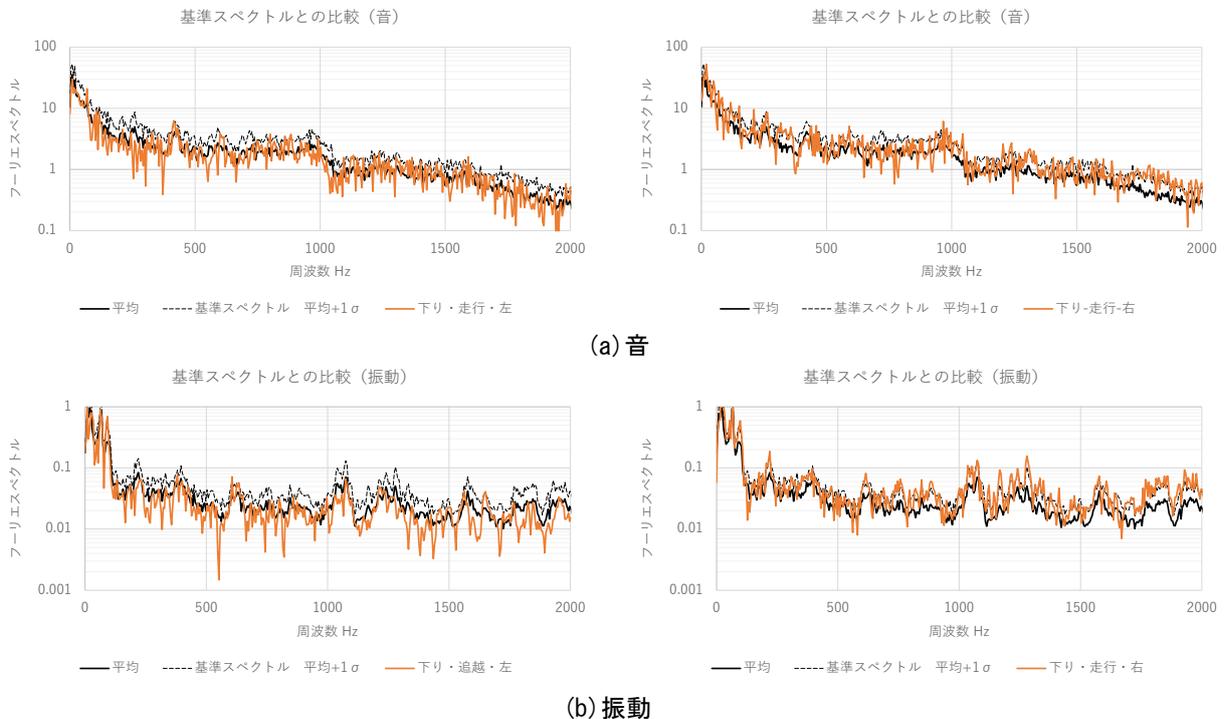


図 4 基準スペクトルとの比較結果

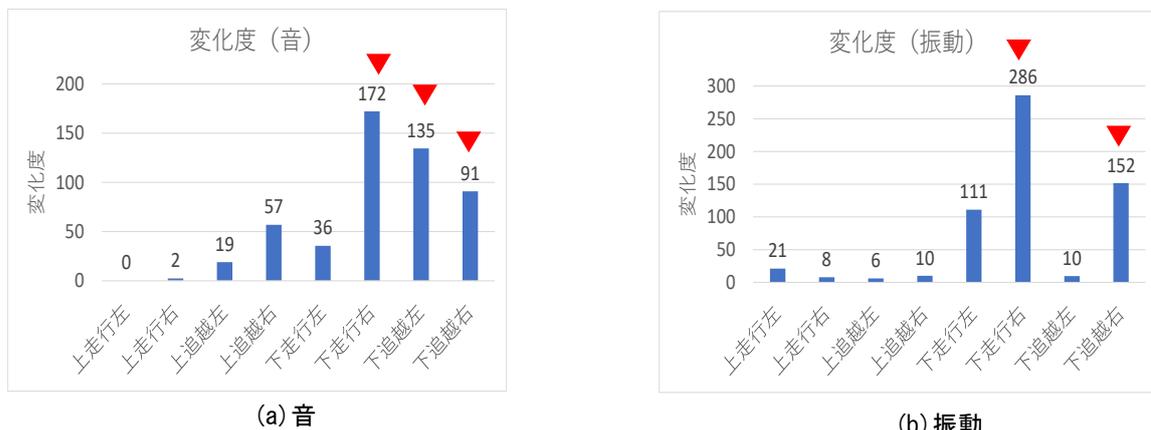


図 5 変化度比較結果

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

2024年は災害と事故で始まり、華々しく五輪が開催され、物価が高騰し株価は一時暴落し、猛暑とさらなる自然災害に苛まれ、54本塁打59盗塁まで記録が伸び、国内外で新リーダーが選出され……目まぐるしかった反面、戦争終結や被災地復興の進展には難しさも感じました。

これから、いい一年にしたいですね。え？前号とパターンが同じ？



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.54 2025.01*

発行日 2025年1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

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