

解析雑誌

Vol.52 2024.04

Topics

- 能登半島地震における土砂災害と地震動の可視化
- 地盤の液状化解析
- SMiRT27 出展報告
- OpenAI による社内ナレッジの活用
- BIM 今昔
- 鉄道高架橋の CIM モデルと構造解析データの連携
- 「Project PLATEAU」ユースケース開発実証

Journal of Analytical Engineering



令和 6 年能登半島地震

(株)構造計画研究所
解析グループ管掌 取締役
荒木 秀朗

この度の能登地方を中心とした地震により、お亡くなりになった方のご冥福をお祈りすると共に、怪我をされた方、近しい方を亡くされた方、被災をされた方々に心よりお見舞い申し上げます。

本当に衝撃的な年明けとなりました。おそらくこの日本においては 1 年を通じて一番心安らかに過ごしている人が多いであろう、元日の夕方にそれは起きました。能登地方を中心としたマグニチュード 7.6 の地震。場所によっては、震度 7 を記録し、多くの家屋が倒壊し、多くの道路が寸断し、この原稿を書いている現在でも、道路や水道、がれきの撤去もままならない状態が続いています。発生から 2 ヶ月が経過する中、復旧や復興に懸命に携わっておられる地元の皆様、応援の皆様のご苦勞は計り知れませんが、一刻も早い日常生活の回復を心よりお祈り致します。

今回の「令和 6 年能登半島地震」について調べようと「地震調査研究推進本部」が公開している「全国地震動予測地図 2020 年版」を覗いてみました。「今後 30 年間に震度 6 弱以上の揺れに見舞われる確率」を示した地図を見ると、能登半島付近は他と比べて地震発生確率が低い予測となっていました。この地図の公開が令和 3 年 3 月ですから、3 年に満たない間に震度 7 の地震に見舞われたこととなります。当然、発生確率は 0%ではありませんので、起きても不思議はないのですが、もしかしたら、この表現が対策を遅らせてしまったのではないかと。気象予報等での降雨確率も地震の発生確率も単位は%でありながら、専門家がその数値を捉えるのと、一般の方がその数値をどう受け止めるかは大きく異なるような気が致します。明日の雨の確率といつ起こるか判らない地震の確率、そういった数字が並ぶ中、過疎化と高齢化が進んだ地域における「地震発生確率 3%未満」は住まわれている方にどのような印象や行動動機を与えるのか、何か他に伝える方法はないのか、考えてしまいました。

被災地では、地震により損壊した家屋の「公費解体」が始まったと聞きます。罹災証明書等での判定された損壊家屋を、市町村が所有者の代わりに公費で解体・撤去をする制度ですが、この公費をどう使うかについても「防災」にフォーカスした議論が進めばと願う次第です。復旧・復興にかかった費用、携わった方々の人件費、携わった人たちが本来生み出したであろう価値、経済が停滞していた期間の機会損失など、その累計額が「防災」に活かされていれば、どうであったか、そういった議論も進めばと思います。翻って自身のことを考えると、今回の災害も悲しく、痛ましい、多くのご家族のエピソードがありました。もしかしたら聞く側から、語る側になるかも知れない、そういったイメージを持って、考えるだけでなく、防火や転倒防止など小さくてもまず行動に移すことが大事だと改めて肝に銘じた次第です。

解析雑誌 Vol. 52 2024. 04

巻頭言 令和6年能登半島地震	02
解析グループ管掌 取締役 荒木 秀朗	
<hr/>	
Topic 1	
● 能登半島地震における土砂災害と地震動の可視化	04
Topic 2	
● 地盤の液状化解析	08
Topic 3	
● SMiRT27 出展報告	12
Topic 4	
● OpenAIによる社内ナレッジの活用	21
Topic 5	
● BIM 今昔	22
Topic 6	
● 鉄道高架橋のCIMモデルと構造解析データの連携	28
Topic 7	
● 「Project PLATEAU」ユースケース開発実証	32
<hr/>	
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。

能登半島地震における土砂災害と地震動の可視化

2024年1月1日に石川県能登地方においてMj7.6の地震（能登半島地震）が発生しました。能登半島地震は、断層の片方が乗り上げるようにずれ動いた逆断層型の地震と評価されています（地震調査研究推進本部¹⁾）。この断層活動により、珠洲市若山町中では、水田や道路を切断して並走、雁行する複数の地表変状が認められた他（産業技術総合研究所²⁾）、揺れによる土砂災害（国土地理院³⁾）や液状化（日本地震工学会⁴⁾）、建物被害（東北大学の報告⁵⁾）が発生しました。建物被害では地震で傷つくなどした屋内の電気配線がショートしたことを出火原因とした大規模火災が発生しました（総務省消防庁⁶⁾、国土地理院³⁾）。また、断層が海域であったことより津波が発生し、浸水被害も発生しました（国土地理院³⁾）。これらの災害情報は様々な機関より発信がなされています。

KKEでも、地震の脅威を速やかに察知し、効果的な災害対応行動につなげるための情報として、地震動マップ QUIET+⁷⁾を利用した発信を行っており、数多くの方々にご利用いただいています。また、KKEが培ってきた最新の解析技術、関心のある解析等をエンジニアリングブログ⁸⁾で発信しており、能登半島地震についても発信しました。

前述のように、能登半島地震では様々な災害が発生していますが、本稿では、能登半島地震による土砂災害範囲を地図上に可視化します。さらに、2024年能登半島地震の発生前の先行研究（例えば、伊藤・他(2009)⁹⁾、桂・他(2016)¹⁰⁾）では、ある震度以上で土砂災害が多発するという指摘がなされているため、特に土砂災害発生範囲と地震動の関係に着目します。

本稿は、エンジニアリングブログで「能登半島地震の被害の可視化」として4回にわたり発信した内容を再構成したものです。なお、可視化・処理ツールとして QGIS¹¹⁾を使用しています。背景地図には国土地理院の地理院タイル¹²⁾を使用しています。

● 能登半島地震による土砂災害範囲と土砂災害警戒区域

能登半島地震による土砂災害範囲

能登半島地震による土砂災害範囲は、国土地理院から公開されているデータ³⁾を利用します。なお、ここでの土砂災害範囲は、「空中写真から判読できる斜面崩壊・堆積分布範囲」を指します。また、現地調査は実施しておらず、実際に崩壊等のあった箇所でも表示できていない箇所がありうるようなのでご注意ください。土砂災害範囲（ピンク）の一部を図1に示します。

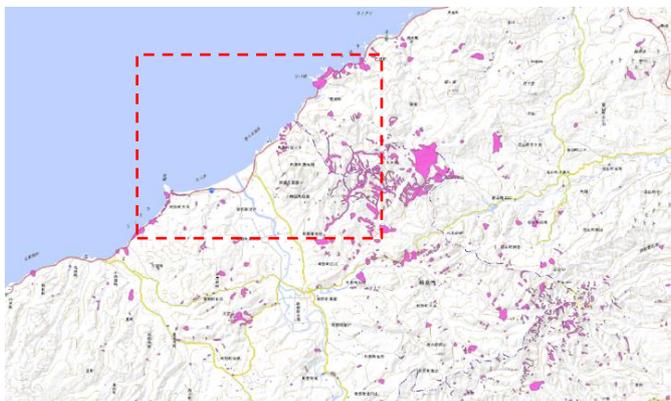


図1 輪島市町野付近の土砂災害範囲

ピンク：土砂災害範囲



図2 左図の赤破線部を拡大

図1では、輪島市の町野付近を拡大表示しています。この付近では、山間部を中心に、土砂災害箇所が点在しています。また、図1の沿岸部を拡大してみると(図2)、国道249号(図2のオレンジの道路)は、「三ツ子浜」や「中田浜」付近で土砂災害範囲と重なっていることが分かります。能登半島地震発生からしばらくは、道路の寸断、物資輸送・救助の困難さが報じられておりましたが、このように地図上で土砂災害の発生分布を確認してみると、車両の通行は困難であったことが想像できます。

土砂災害警戒区域

ここで、地震発生前の時点では、どのような箇所で土砂災害が想定されていたのかも確認します。

国土交通省は土砂災害の恐れのある地区を、土砂災害警戒区域として定めており、これらの区域データは、国土数値情報¹³⁾で公開されています。公開データは2022年9月時点のものであることに留意ください。

土砂災害警戒区域を図3に示します。土砂災害警戒区域は、3種類の現象(急傾斜地の崩壊、土石流、地すべり)に分かれているため、それぞれの区域を順に、赤、青、緑で表示しています。図3から、能登半島では、地すべりのエリア(緑)が比較的多く見られることが分かります。

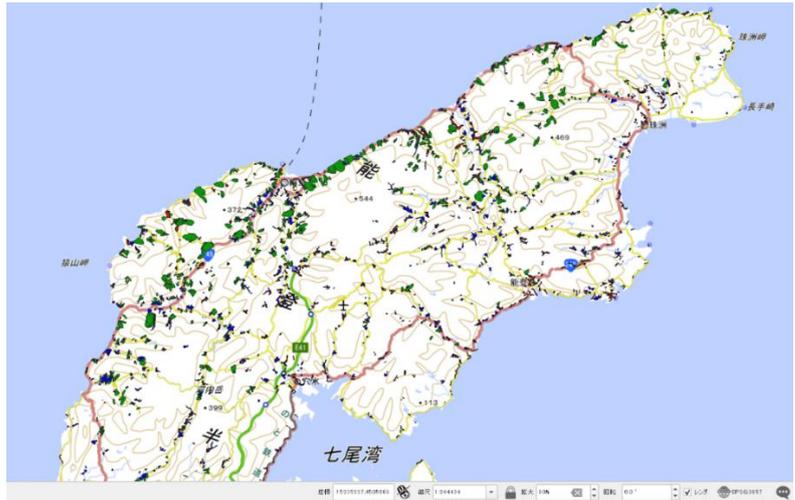


図3 能登半島における土砂災害警戒区域

赤：急傾斜地の崩壊、青：土石流、緑：地すべり

能登半島地震による土砂災害範囲と土砂災害警戒区域の比較

能登半島地震によって発生した土砂災害範囲と土砂災害警戒区域を、地図上で重ねて比較します。

ここでは、前述の国道249号(珠洲市の沿岸部；図4)に着目します。図4から、土砂災害警戒区域に指定されていない区間で、土砂災害が発生していることが分かります。この被害があった区間の一部は「逢坂トンネル」ですが、土砂災害防止法¹⁴⁾によれば、土砂災害警戒区域は住民等の生命又は身体に危害が生ずるおそれがあると認められる区域が指定される、とされています。そのため、当該トンネルの周辺は土砂災害警戒区域に指定されていなかった可能性が考えられます。

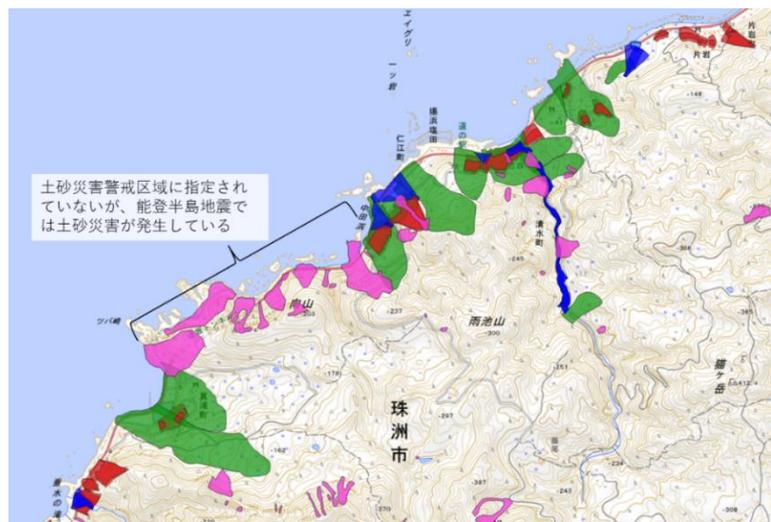


図4 珠洲市沿岸の土砂災害範囲と土砂災害警戒区域

ピンク：能登半島地震による土砂災害範囲、
赤：急傾斜地の崩壊、青：土石流、緑：地すべり

このような例があるため、警戒区域に指定されていないエリアだからといって安全とは限らないと言えます。

● 能登半島地震による震度

土砂災害の発生したエリアの揺れ（震度）の程度を確認するために、震度の情報を取得します。KKEでは、QUIET+(クワイエットプラス：QUick Identification of Earthquake Threat PLUS)⁷⁾というサービスを展開しています。QUIET+は地震記録を用いて日本全国 250m メッシュの分解能で計測震度相当値、地表最大加速度、地表最大速度を推定し、その結果を提供します。QUIET+の詳細は、解析雑誌のVol.50 または Web サイト(<https://site.quietplus.kke.co.jp/>)をご覧ください。

QUIET+より計測震度相当値を取得し作成した能登半島地震による震度分布を図 5 に示します。図には参考までに震央（黄色の丸）も示しています。震央のある能登半島先端は震度 6 強（赤）で、震央から離れて南下していくとおおよそ震度 6 弱（橙）、震度 5 強（黄）と小さくなっていきます。ただし、震度は震央からの距離に応じた単調な減少傾向にはなっていません。これは、ある地震に着目したときの揺れの強さは、距離だけでなく、地点直下の地盤に地震波が到達するまでに通ってきた地層の物性値にも左右されるためです。例えば、能登半島西部の大半は震度 6 弱（橙）ですが、能登半島西岸に面する志賀町付近では、震度 6 強（赤）、震度 7（紫）を示しており、部分的に揺れが大きくなっています。

● 土砂災害範囲と震度の関係

最後に、能登半島地震による土砂災害範囲と震度分布を比較します。

土砂災害の発生エリアは能登半島全域に点在しているため、土砂災害範囲と震度分布を地図上に重ねただけだと、震度との対応が不明瞭です。そこで、土砂災害範囲ごとに計測震度の値を集計し、土砂災害範囲（面積）と計測震度の関係をグラフにします。

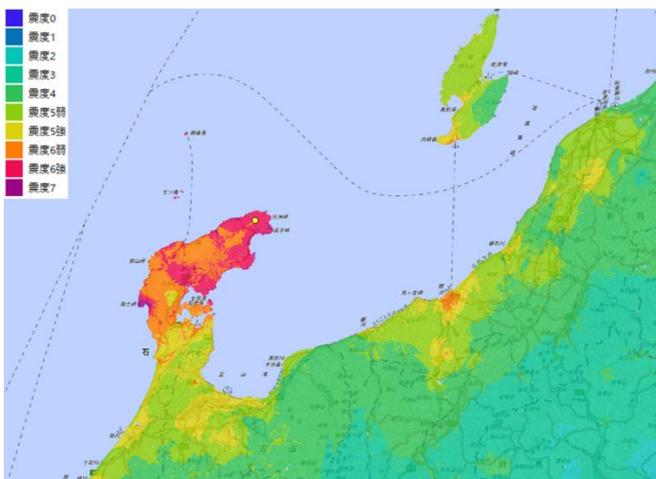


図 5 能登半島地震による震度分布

丸：能登半島地震の震央

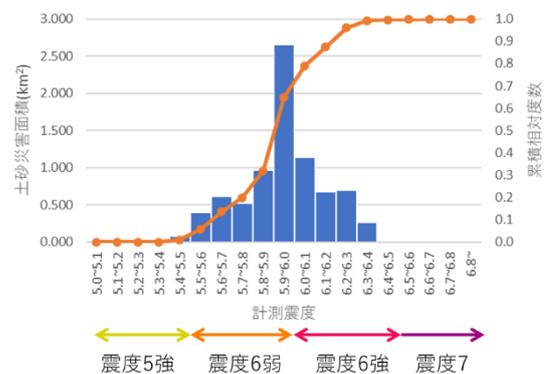


図 6 土砂災害発生範囲と計測震度の関係

左軸は土砂災害面積[km²]；棒グラフ、右軸は累積相対度数；折れ線グラフ

その結果が図 6 になります。図の棒グラフは、任意の計測震度区間（例：5.5~5.6）と土砂災害面積[km²]の合計値の関係を表しています。図 6 から土砂災害が発生した範囲では、震度 6 弱の揺れが一番多かったことが分かります。計測震度 5.5~6.0 の区間が震度 6 弱に対応するため、震度 6 弱の中でも比

較的強い揺れ（計測震度：5.9~6.0）のエリアで土砂災害が多く発生していたという見方もできるかもしれませんが。また、折れ線グラフで累積相対度数を示していますが、計測震度 5.5 以上の割合はおよそ 9 割なので、土砂災害発生範囲のほとんどは震度 6 弱以上だったと言えます。

以上から、能登半島地震の土砂災害発生範囲と揺れの強さには関係があることが考えられます。

ただし、土砂災害（例えば、地すべりや斜面崩壊）の発生については、斜面の傾斜角や土壌の水分量、地質なども影響するため、条件によっては震度 5 強以下でも土砂災害が発生することがあります。

KKE は、土砂災害や地震動に限らず、自然災害による影響分析コンサルティングを得意としております。このような状況を把握できないか、自社情報を取り込めないかなどのご要望がありましたら、是非お問い合わせください。

● 参考文献

- 1) 地震調査研究推進本部、令和 6 年能登半島地震の評価：
https://www.static.jishin.go.jp/resource/monthly/2024/20240101_noto_3.pdf
- 2) 産業技術総合研究所 地質調査総合センター、第九報 2024 年能登半島地震の緊急調査報告（陸域に出現した地表変状の現地調査）：<https://www.gsj.jp/hazards/earthquake/noto2024/noto2024-09.html>
- 3) 国土地理院、令和 6 年(2024 年)能登半島地震に関する情報：
https://www.gsi.go.jp/BOUSAI/20240101_noto_earthquake.html
- 4) 日本地震工学会、2024 年 1 月 1 日に発生した令和 6 年能登半島地震：
<https://www.jaee.gr.jp/jp/disaster/2024年1月1日に発生した令和6年能登半島地震/>
- 5) 東北大学、令和 6 年能登半島地震に関する速報会：
https://irides.tohoku.ac.jp/research/prompt_investigation/2024noto-eq.html
- 6) 総務省消防庁、令和 6 年能登半島地震において発生した輪島市大規模火災における消防庁長官の火災原因調査<速報>：
https://nrifd.fdma.go.jp/research/saigai_chousa_shien/notohantou_jishin/files/20240215_1.pdf
- 7) QUIET+：<https://site.quietplus.kke.co.jp/>
- 8) 構造計画研究所 エンジニアブログ：<https://kaiseki-kke.jp/blog/>
- 9) 伊藤英之、小山内信智、西本晴男、臼杵伸浩、佐口治(2009)：地震による崩壊発生箇所と震度分布との関係、砂防学会誌、Vol.61, No.5, p.46-51.
- 10) 桂真也、木村諤、丸山清輝、石田孝司(2016)：2014 年 11 月 22 日長野県神城断層地震に伴う斜面崩壊・地すべりの分布特性と発生箇所の特徴、日本地すべり学会誌、Vol.53, No.3, p.85-94.
- 11) QGIS：<https://qgis.org/ja/site/about/index.html>
- 12) 国土地理院、地理院タイル：<https://maps.gsi.go.jp/development/ichiran.html>
- 13) 国土数値情報 土砂災害警戒区域データ：https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-A33-v2_0.html
- 14) 土砂災害防止法の概要（国土交通省）：
https://www.mlit.go.jp/river/sabo/dosyahou_review/01/110803_shiryo2.pdf

地盤の液状化解析

令和6年能登半島地震では、地盤の液状化による住宅の傾斜や変形、地中の水道管の損傷などの被害が報告されていました。この他令和3年、4年の福島県沖地震、平成30年の北海道胆振東部地震、平成28年の熊本地震など、液状化被害は近年の大きな被害をもたらした地震の大半で報告されています。

液状化が発生すると、地盤沈下により建物が傾いたり、地中構造物が浮き上がったりします。また液状化が発生する場合としない場合では、その場所に建っている構造物の揺れ方が変わります。構造物の耐震設計では、FL値等を用いた液状化判定を行い、発生判定が出た場合は、液状化後の地盤の挙動やそれによって構造物に作用する力などを評価する必要があります。

この点については建築・土木の各分野で考え方が整理されており、主だったもので以下の基準・指針類があります。

- ・道路橋示方書・同解説 V耐震設計編（日本道路協会、平成29年）
- ・鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計（鉄道総合技術研究所、平成24年）
- ・港湾の施設の技術上の基準・同解説（日本港湾協会、平成30年）
- ・建築基礎構造設計指針（日本建築学会、令和元年）

しかし、これらに沿って実際に液状化の検討を実施しようとする、様々な評価手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ではこれまでの建築・土木分野の豊富な業務経験と、高度な解析技術を駆使して、液状化地盤の挙動評価や構造物の評価・設計支援を行っています。

● KKEの液状化解析コンサルティングサービス

KKEでは有効応力解析を用いて、設計用入力地震動の作成や構造物（新設・既設のタンクやカルバートといった杭基礎構造物・地中構造物など）の耐震性能評価、液状化対策効果の比較検討解析などを実施しています。液状化の発生が懸念される場合に、液状化解析に必要な地盤情報データを取得するための地盤調査内容のアドバイスや、データが不足している場合のデータ補完（例：液状化強度特性）の支援なども行っています。

【コンサルティングメニュー】

- ・液状化を考慮した設計用入力地震動作成、建築評定対応
- ・応答変位法による杭基礎の評価・設計
- ・地盤-構造物連成モデルによる側方流動検討
- ・地盤改良、鋼管矢板設置などの対策案の検証

有効応力解析とは、土粒子骨格と間隙水との相互作用を考慮した解析です。これにより、地震時の間隙水圧の変動と有効応力の変動を直接的に求めることが可能となるため、過剰間隙水圧の上昇と有効応力の減少を考慮して地盤の変形量を評価することができます。また、構造物への入力として用いる地震動についても、同様の影響を考慮した計算が可能となります。

● 液状化解析事例

(1) 液状化を考慮した設計用入力地震動の作成、建築評定対応

図1のような地盤を想定し、1次元の動的な有効応力解析により液状化の発生を考慮した地表の地震動を計算した事例をご紹介します。

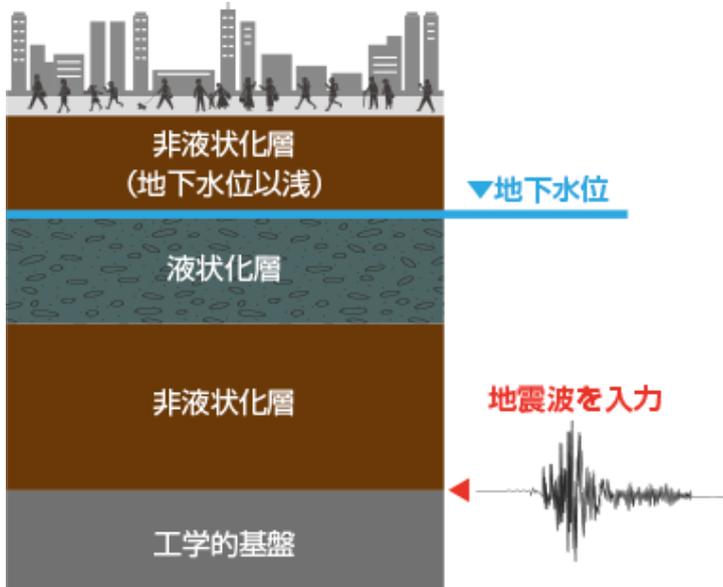


図1 想定する地盤設定

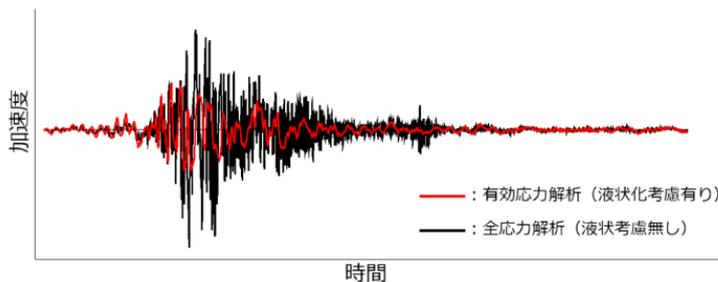


図2 地表の加速度波形 (液状化考慮／非考慮)

液状化の発生により、液状化層が天然の免震装置的な役割を果たすことで、このように地表での地震動は短周期成分が欠落し卓越周期が長周期化することがあります。激しい揺れが緩和されているかのように見えますが、地盤沈下や噴砂等の被害を伴う他、地盤の変位が大きく出ることによって地下構造物に大きな被害が発生することがあります。また地盤の卓越周期が免震構造物の固有周期に近づいて共振を誘い、建物の揺れを増幅させることもあります。

このように、液状化の考慮の有無で地震動や地盤の応答は様相が異なってくるため、液状化を考慮出来る手法による解析が必要となります。KKEでは、どのように液状化の影響を評価し、構造物の設計に用いる地震動を作成したのかをストーリー立てて審査機関に説明する支援も行っています。

液状化を考慮した地表での加速度波形の例を図2に示します。比較のために液状化層を非液状化層として扱った結果（全応力解析）も併記しています。

どちらも揺れ始めは同程度の振幅を持っていますが、途中から有効応力解析の振幅が明らかに小さくなっています。さらに後の時間帯では、有効応力解析の短周期成分が欠落し、長周期成分が卓越した波形となっています。図3に示す応答スペクトルにも同様のことが示されています。

この現象は急激な地盤の非線形化を示唆しており、まさに液状化の発生を表しているものです。

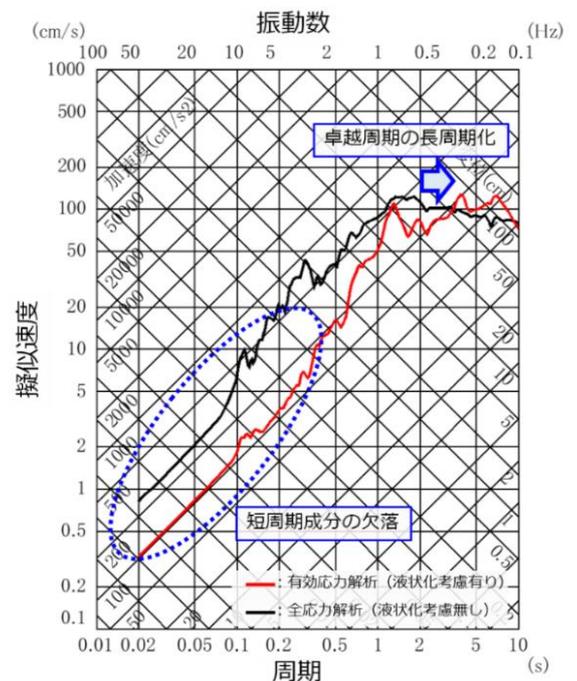


図3 擬似速度応答スペクトル図

(2) 液状化を考慮した設計用入力地震動を用いた構造物の耐震解析

液状化を考慮した地震動を用いる構造物の耐震解析手法の一つに応答変位法があります。

地下構造物を地盤ばねにより支持されたフレーム構造や 3 次元 FEM でモデル化し (図 4)、液状化を考慮した地盤の 1 次元動的有効応力解析で算定した地震時の地盤応答 (変位、せん断力、加速度など) を地盤ばね端部に静的に作用させる手法です。

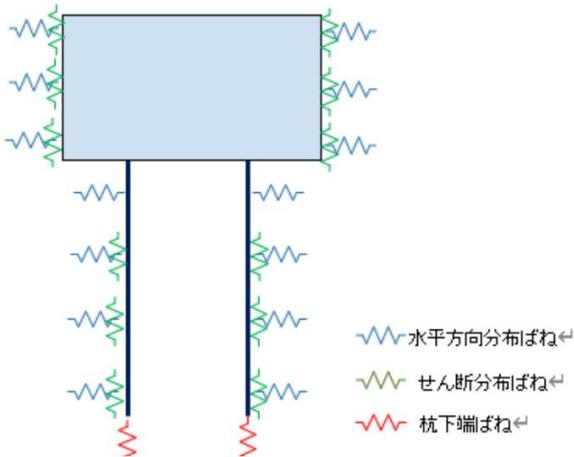


図 4 応答変位法モデル図

評価・設計は以下の流れで行います。

- ① 解析条件のヒアリング、解析条件資料の作成
 - ・地盤情報・構造物情報の整理
 - ・モデル化手法検討
- ② 液状化強度フィッティング (要素シミュレーション)
- ③ 地盤モデルの地震応答解析 (1 次元モデル、2 次元モデル)
- ④ 地震応答解析結果の抽出
- ⑤ フレームモデルの作成、解析実施
- ⑥ 解析結果に基づく構造物の評価検討
- ⑦ 杭基礎の評価・設計

(3) 地盤—構造連成モデルによる側方流動の検討

護岸構造物を対象として、地震時に液状化が発生するかどうかの確認と、護岸の変形量について検討した事例です。

想定地震動を入力し、動的有効応力解析を行った結果を図 5、図 6、図 7 に示します。

過剰間隙水圧比としては 1.0 に近い値 (有効応力はほぼゼロの状態/図 5 の赤い部分) で、液状化が進行するとともに地盤変位も増大していくことが分かります。

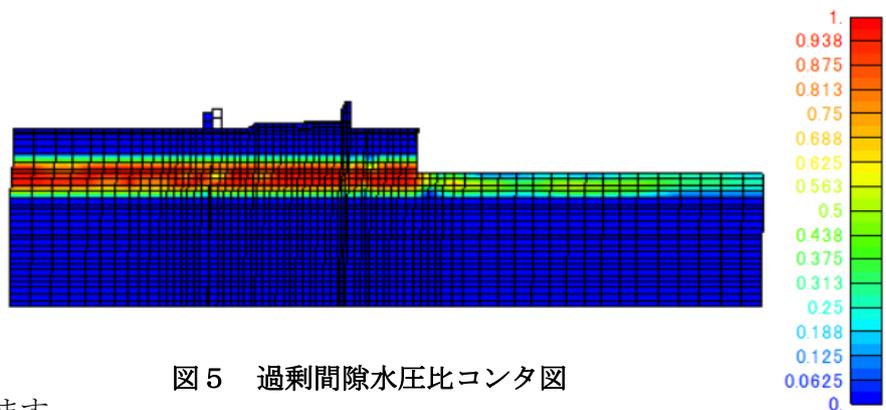


図 5 過剰間隙水圧比コンタ図

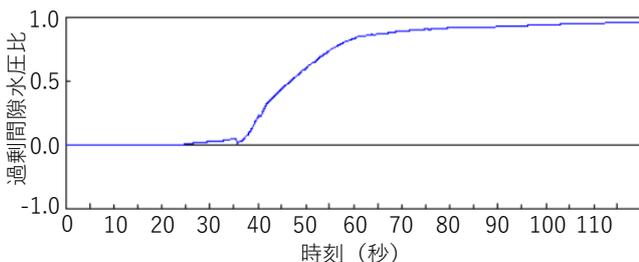


図 6 過剰間隙水圧比の時刻歴

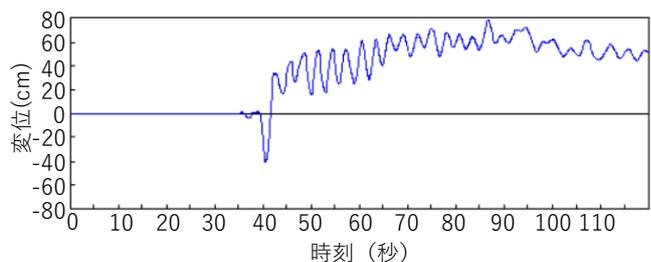


図 7 変位の時刻歴

(4) 地盤改良の効果検討

先ほどの事例は現況地盤における液状化現象の評価でしたが、その結果を踏まえた地盤改良案や構造物側の対策工案を反映したモデルによる対策効果検討を行うことも可能です。

図8, 図9は液状化対策前と地盤改良による液状化対策後の過剰間隙水圧比発生状態を示しています。対策により構造物周辺の過剰間隙水圧比の上昇が抑えられる(液状化が発生しにくくなる)傾向を確認することができます。

また、構造物への影響度合いについても設計指針やお客様ご指定の評価基準と照らし合わせ、改良前後の比較検証を行っています。液状化の状態は想定する地震動によっても異なることから、検討地点において想定される地震動を複数ケース設定した検討を行うことが多くなっています。

コンサルティングは以下の流れとなります。

- ① 解析条件のヒアリング、解析条件資料の作成
 - ・地盤の物性情報の整理
 - ・評価構造物の物性情報の整理
 - ・モデル化手法の検討
- ② 液状化強度フィッティング(要素シミュレーション)
- ③ 地盤モデルの地震応答解析(2次元モデル)
- ④ 解析結果の整理
- ⑤ 液状化対策の検討、ヒアリング
- ⑥ 対策後の地震応答解析(2次元モデル)
- ⑦ 対策前後の応答比較、評価検討

● 液状化解析 使用ソフトウェア

本稿でご紹介した解析事例は、いずれも液状化による構造物被害予測プログラム FLIP を使用しています。FLIP は、旧運輸省港湾技術研究所で開発された液状化による構造物被害予測プログラムです。

● 液状化解析の技術資料ダウンロード

<https://kaiseki-kke.jp/consulting/earthquake/page10.html>

上記 URL から解析事例などの PDF を無料ダウンロード出来ます。是非ご利用ください。

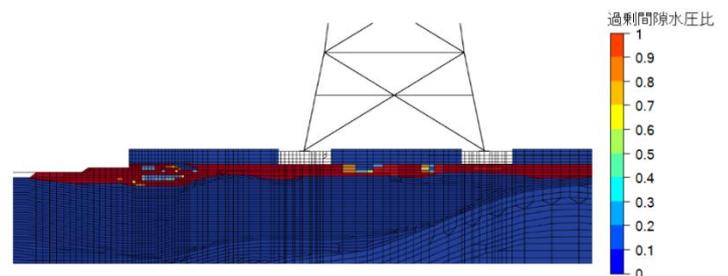
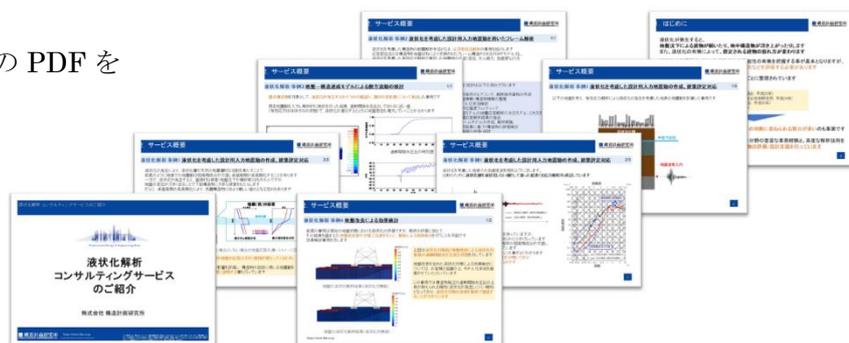


図8 地盤の液状化解析結果
(液状化対策前)

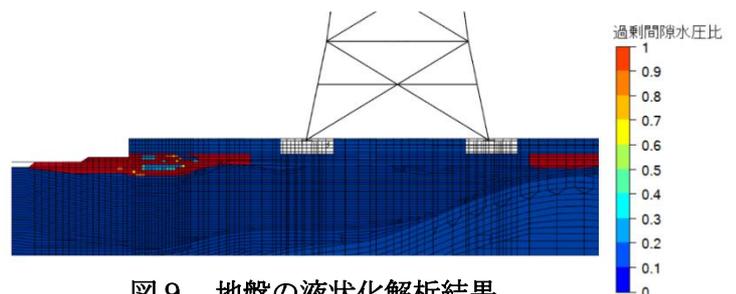


図9 地盤の液状化解析結果
(液状化対策後)

SMiRT27 出展報告

令和6年3月3日～8日にパシフィコ横浜において、SMiRT27 (27th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology、別名：国際原子炉構造工学会議) が開催されました。国内外から約600名が参加される会議で、1991年の東京大会以来、32年ぶりの日本開催でした。

今回は福島第一原子力発電所事故から学んだ教訓に基づいて、「原子炉技術における次世代の構造力学」を議論することが会議のメインテーマでした。様々な観点による12からなるディビジョンでの論文発表をはじめ、特別セッションやテクニカルツアーなどボリュームのある構成で開催されました。

KKEはSilver Sponsorとして会場内に展示ブースを出展しました。出展の結果、国内外から様々な方に訪れて頂きました。日本開催のためか、国外はアジア圏が多かったように思います。国内は日頃からお取引させて頂いている方々をはじめ、委員会や学会などでお付き合いさせて頂いている方々に多く訪れて頂きました。展示ブースのテーマは“原子力施設の安全性向上のための取り組み”です。以下の4つのサブテーマで構成しました。

- (1) 自然ハザードに対する研究支援：地震を対象としたハザードの評価から構造物の評価まで
- (2) 維持管理の効率化×高度化：3MAによる高度化とNavVisによる効率化
- (3) 斜面安定性評価：従来型の評価技術ではなく粒子法やDEM、3次元解析による評価
- (4) 広域避難シミュレーション：シミュレーションの流れとアウトプットイメージ

本稿では上記のうち、解析雑誌という媒体の特性上、(1)と(2)に絞り、その内容をご紹介します。いずれも研究的な内容が多く含まれますが、引き続き力を入れて取り組んでまいります。

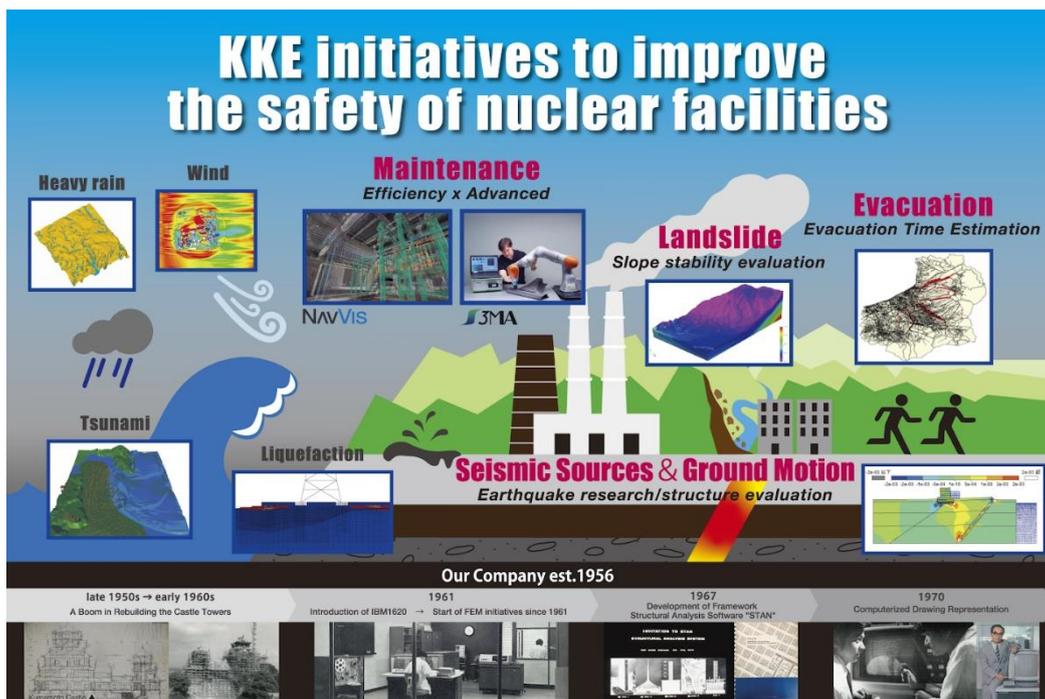


図1 KKEの展示ブースのテーマ (全体像)



図2 会場写真 (左:メイン会場、右:展示ブース)

● 自然ハザードに対する研究支援のご紹介

【データベースアプローチの研究事例】

近年の地震観測網の発達により、大きな地震が起こる度に重要な地震観測記録が得られています。観測記録の特徴分析と予測問題への手法開発や、観測記録へのデータ駆動型手法の適用性について研究を行っています。

① 距離減衰式の開発¹⁾

多数の観測記録に基づき、地震動の伝播経路による減衰特性や表層地盤の増幅効果の違いを考慮できる計測震度や応答スペクトルの距離減衰式を構築しています。

マグニチュードや観測記録数などのバランスを見て観測データを収集します。震源・伝播経路・表層地盤の各特性を表現した式型を仮定し、観測記録の回帰分析から各係数を求めていきます。複雑な仮定を置かず簡便に地震動が評価できる距離減衰式の利点を活用し、面的な地震動分布の推定や確率論的な地震動評価の高度化を進めています。

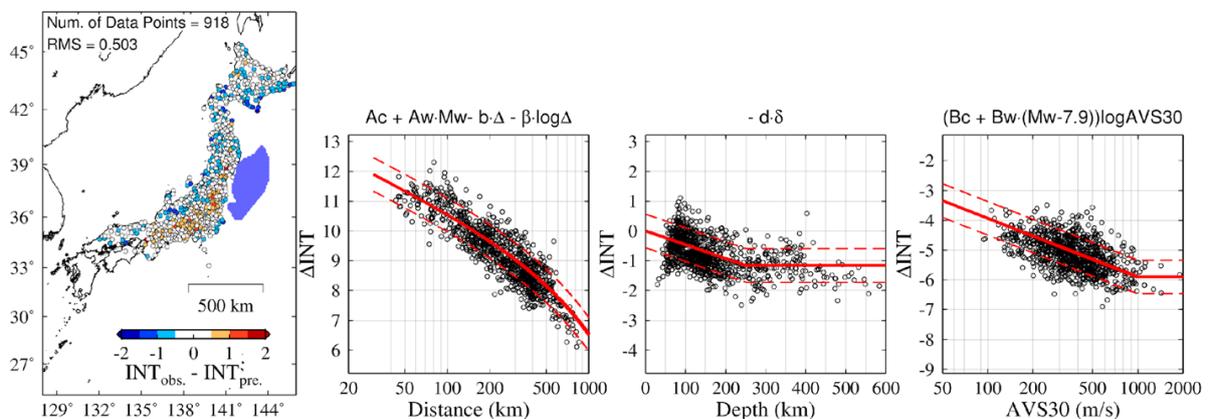


図3 距離減衰式の開発イメージ図

② 動的モード分解 (DMD) の適用性検討²⁾

DMD とは時系列データの時間発展に着目してモード分解を行う手法です。元は流体解析の分野で使われて始めた手法ですが、KKE では最近、地震波形に適用する試みを進めています。多くの観測記録から特徴・傾向の抽出や 2 点間の関係性を DMD で構築し、予測問題に適用することを検討中です。

(例えば、地盤情報が明に分からなくても地中→地表の地震応答を求めることができます)

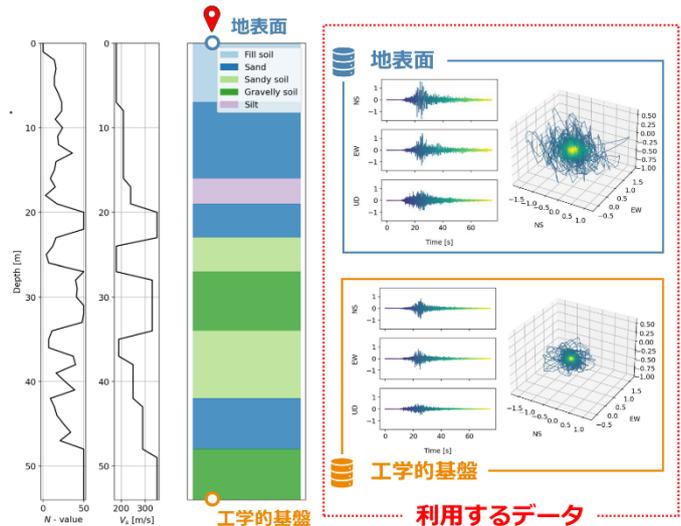


図4 DMD の検討イメージ図

③ 機械学習による応答スペクトル予測

機械学習手法を用いて、地震観測記録のフーリエ振幅スペクトルから PGA、PGV、及び加速度応答スペクトル (減衰定数 5%) を予測する研究³⁾です。理学分野ではフーリエスペクトルに基づく分析が主ですが、工学分野では PGA、PGV、応答スペクトル等の指標が多く用いられます。理学分野の研究成果を工学分野に利活用するためにスペクトル変換の精度向上を目指しています。

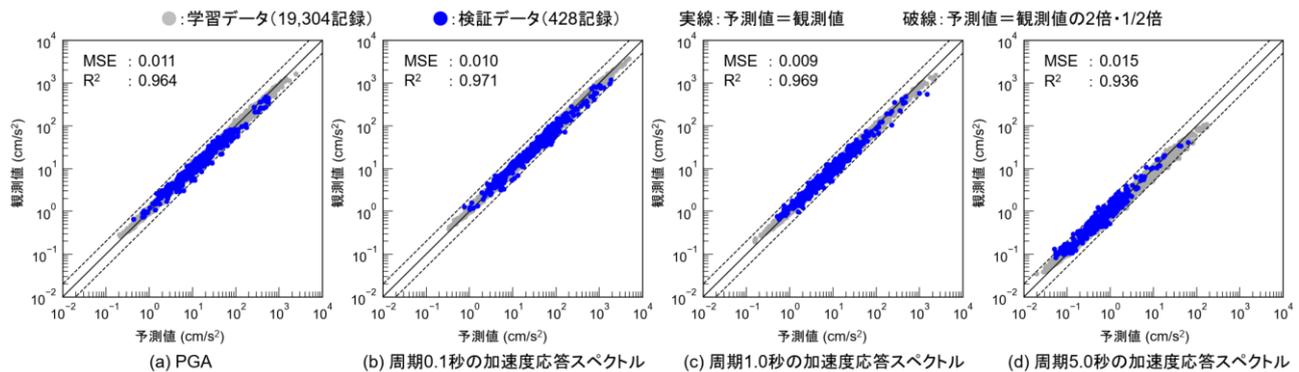
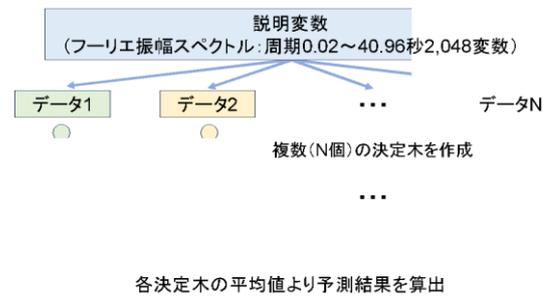


図5 目的変数 (PGA、周期 0.1, 1.0, 5.0 秒の加速度応答スペクトル) の観測値と予測値の関係の例

【物理モデルベースアプローチの研究事例】

① 断層変位を受ける地中構造物の評価

震源断層の活動によって生じる地殻変動に引きずられる形で、副断層や破碎帯に変形が生じる可能性が指摘されています。このような現象を解析的に検討する手法として、図6に示すように、震源断層による地殻変動を食い違い弾性論等によって求め (広域地盤変形評価モデル)、求められた変位をサイトや構造物、基礎地盤などを含んだ詳細なモデル (基礎地盤変形評価モデル) に入力するという 2 段階の手法で検討を実施します。

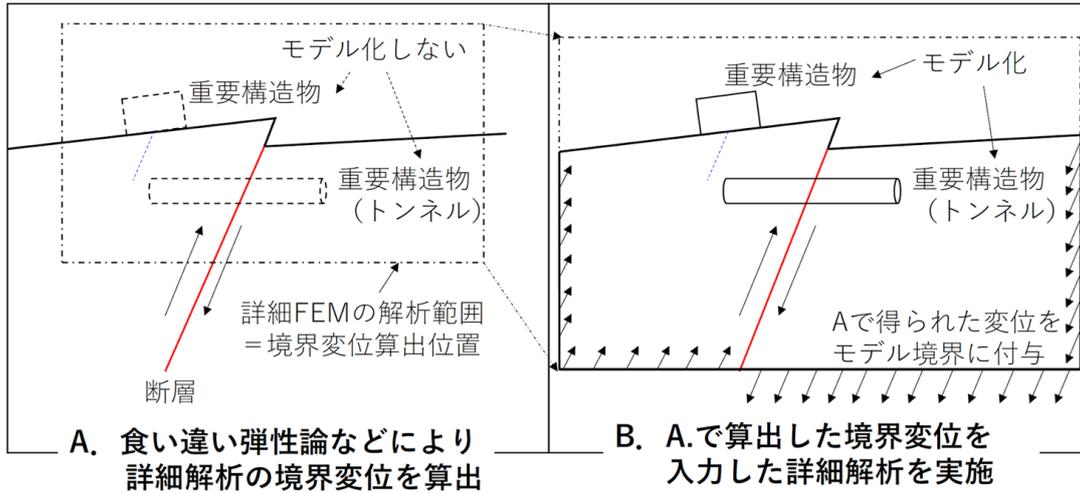


図6 広域地盤変形評価モデルと基礎地盤変形評価モデルを用いた2段階の評価手法

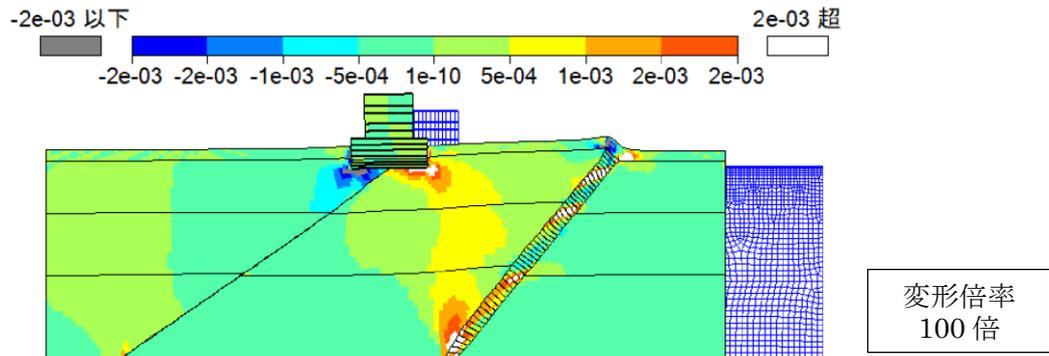


図7 解析結果(変形図およびせん断ひずみカウンター図)

● 維持管理の高度化×効率化

【非破壊検査デバイス3MAを用いた検査の高度化】

原子炉压力容器における中性子照射脆化の計測は、「破壊試験用サンプル」を使用しています。運転開始時から压力容器と同環境に配置された当該サンプルを定期的に取り出して、破壊検査を行うことで構造材料の脆化度合いを確認しています。しかし、素材の不均質性や高年化に伴う試験片の不足が深刻な問題となってきています。特に試験片は限られた数しか存在せず、今後運転期間が延びていくにつれて、問題が一層深刻化することが懸念されます。

これに対処するために、KKEは設備へのダメージなく磁気特性から機械特性を高速・高精度に推定する新しいソリューション「3MA」の活用による検査の高度化について検討しています。

対象の事象 : 原子炉压力容器の中性子照射脆化

解決を目指す問題① : 長期運転に起因する破壊試験用サンプルの不足

解決を目指す問題② : 経年劣化した原子炉压力容器の素材不均質性を含めた評価の難しさ

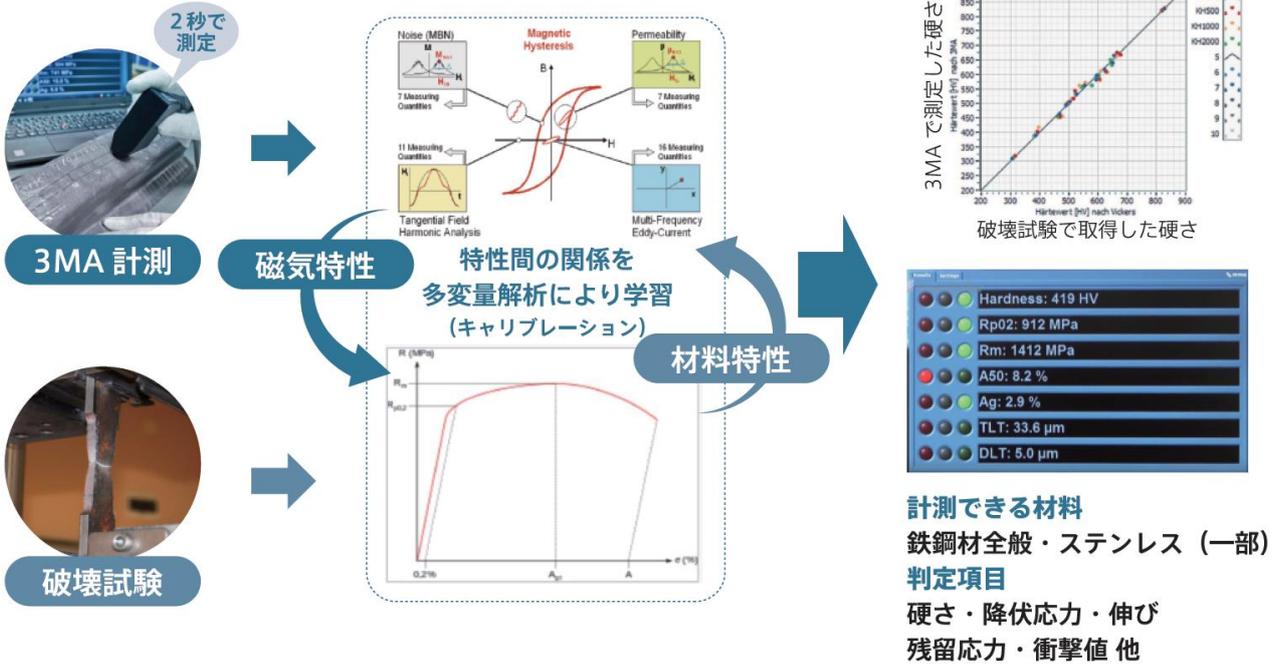


図8 3MAの仕組み

図8に3MAの仕組みを示しています。磁気特性から材料特性を推定することで、非破壊検査を可能にしています。EUでは、2018年から既存原発の延命プロジェクト(NOMAD)が進行中です。3MAによる先進的な計測技術が、原子炉圧力容器の中性子照射脆化に伴う損傷評価において有力視されています。また、3MAは素早く計測が可能のため、高線量下の過酷な現場での利用可能性があります。さらに、本稿で取り上げているのは原子炉圧力容器ですが、蒸気発生器の伝熱配管など他の設備にも広く適用できる可能性があります。

※KKEは、Fraunhofer IZFPが開発・製品化した「3MA」を、2021年7月より国内向けに販売、受託計測、および品質検査の非破壊化コンサルティングを展開しております。

【ウェアラブル型3Dスキャンデバイス Navis を用いた維持管理の効率化】

原子力発電所における点検・維持管理の場面では、多くの設備・配管が存在する上、場所によっては高線量下で過酷な現場が存在します。多くの設備・配管を漏れなく管理することが求められますが、作業時間が限定されるケースがあります。

こういった状況に対処するために、KKEはウェアラブル型3Dスキャンデバイス「Navis」を用いて、点検・維持管理の効率化を目指しています。



図9 ウェアラブル型3Dスキャンデバイス Navis

対象の作業 : 原子力発電所の点検・維持管理

解決を目指す問題① : 多くの設備・配管が存在する環境で管理が複雑

解決を目指す問題② : 高線量下で頻繁に立ち入ることができない環境での管理

① 高線量下の現場に対する活用

Web ブラウザビューワを通じて、誰もが直感的に現場を確認できるため、高線量下の現場に入ることなく各種ルート検討（点検、設備の搬入経路、避難等）や、設備補修・交換時の納まりの机上確認が可能となります。



② 高経年化に対する活用

保全データをバーチャル空間内に埋め込み、手順・点検結果等を共有することでデータの一元管理、長年にわたる維持管理の効率化を図ることができます。また、定期的に3Dデータ取得することで変化した場所を漏れなく遡って確認でき、現場のアーカイブ化に最適です。共有したデータ上では、追加情報をタグ付けすることも可能なため、点検状況の台帳管理に活用することが可能です。

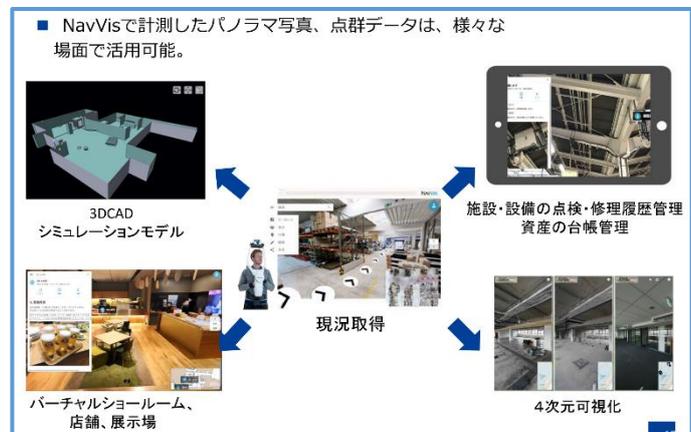


図 1 0 NavVis の特徴

③ 福島第一原子力発電所の建屋内調査での活用例

「NavVis」は福島第一原子力発電所事故後の建屋内調査において、その有効性が確認されました⁴⁾。

● まとめ

- ・ 令和6年3月3日～8日に開催されたSMiRT27に出展し、国内外から様々な方に訪問頂きました。
- ・ KKEは“原子力施設の安全性向上のための取り組み”というテーマを掲げ、4つのコンテンツを準備しました。本稿ではそのうちの2つをご紹介します。
- ・ 自然ハザードに対する研究は、特定の解決方法に偏りすぎないように、主にデータベースアプローチや物理モデルアプローチに分けて取り組んでいます。
- ・ 原子力施設の維持管理をさらに高度且つ効率的に行うために、3MAというデバイスやNavVisという製品の活用を検討、推進しています。

1) Ritsuko S. Matsu'ura, Hiroto Tanaka, Mitsuko Furumura, Tsutomu Takahama, and Akemi Noda(2020), A new ground motion prediction equation of Japanese instrumental seismic intensities reflecting source type characteristics in Japan, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.110, No.6, pp.2661-2692.

2) 塩井・他(2023), 時間遅延埋め込み動的モード分解に基づくデータ駆動型地震応答解析, 土木学会第26回応用力学シンポジウム

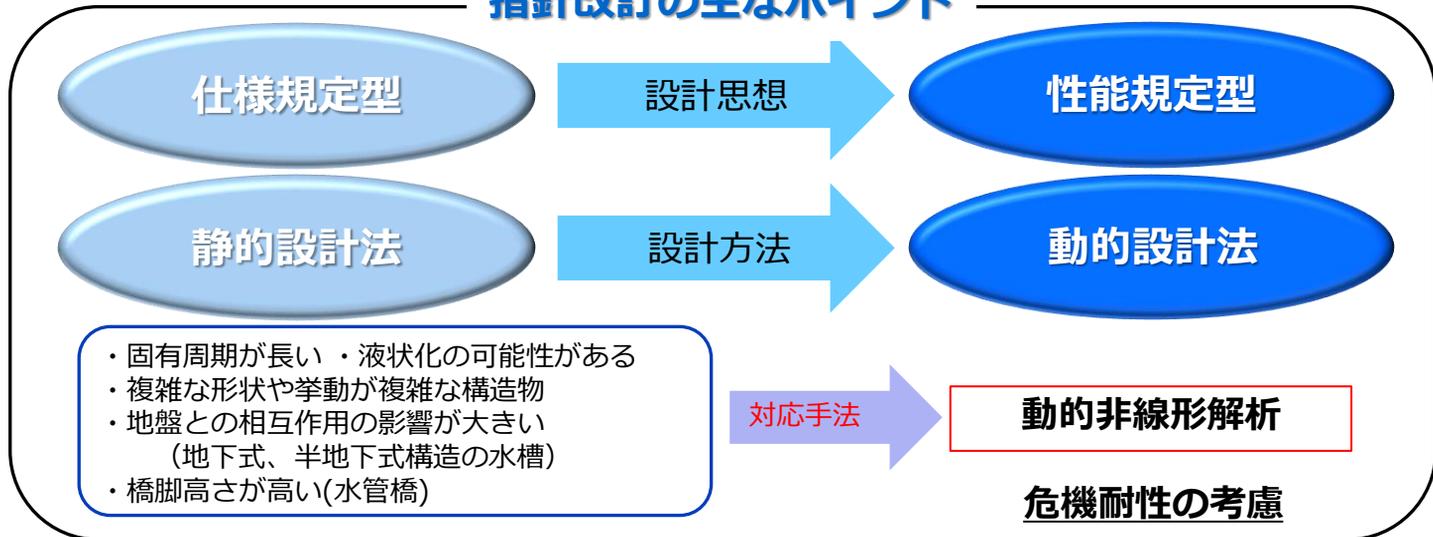
3) 倉田・他(2023), 機械学習によるフーリエ振幅スペクトルから応答スペクトルを予測する試み, 日本地震学会2023年秋季大会

4) ㈱構造計画研究所 第63期 株主通信 (https://www.kke.co.jp/cms/uploads/2021/08/kkereport_20210916.pdf)

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。

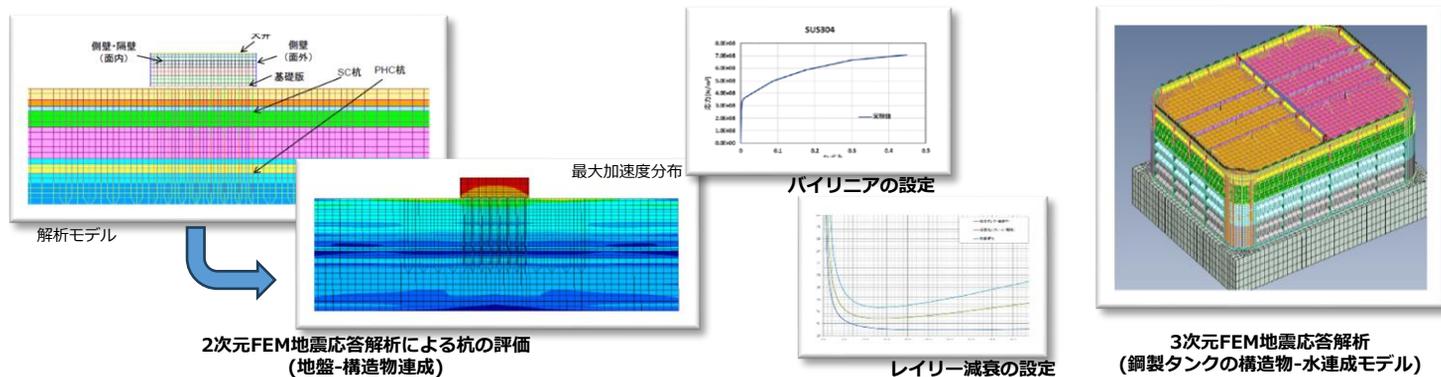
指針改訂の主なポイント



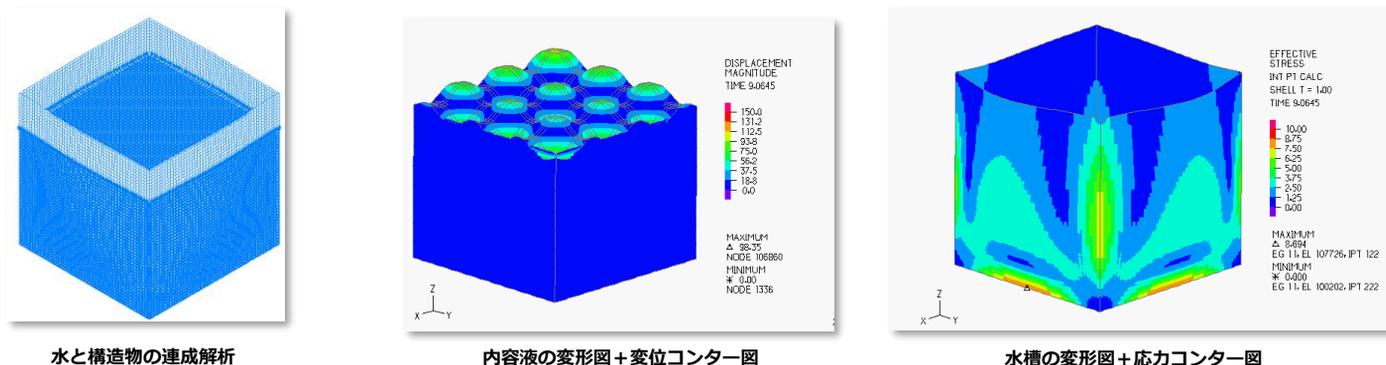
■ 配水池の地盤-構造物-水連成モデルによる動的非線形解析 2次元地震応答解析、3次元地震応答解析、地盤の液状化評価

RC製地下式・半地下式の池状構造物、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経験値により、最適なクライテリア値をご提案いたします。



【簡易モデルによるバルジング現象の再現】



【ADINAでバルジング現象をシミュレーションしてみた件】
https://www.youtube.com/watch?v=kZf6m_242-c

■ 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】

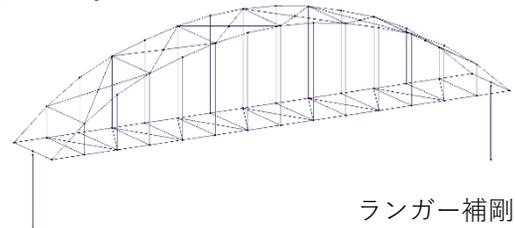
水管橋の地震時被害事例は過去の被災事例等から以下のように分類できます。

- 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】

液状化の可能性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。



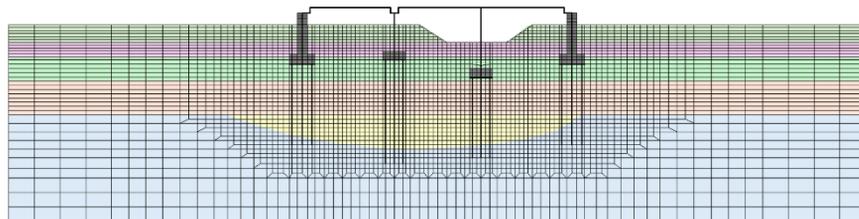
ランガー補剛形式

【水管橋の動的解析事例】

解析モデル

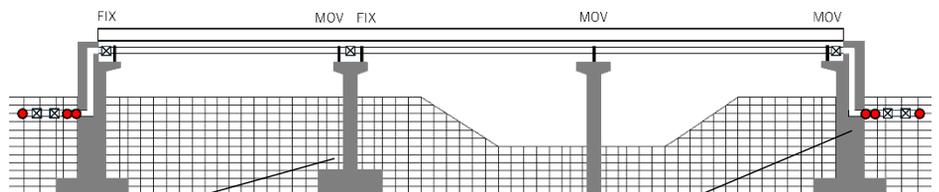
- 通水管、橋脚、鋼管杭：非線形梁要素
- 橋台躯体：平面ひずみ要素
- 地盤：平面ひずみ要素（液状化考慮）

- 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

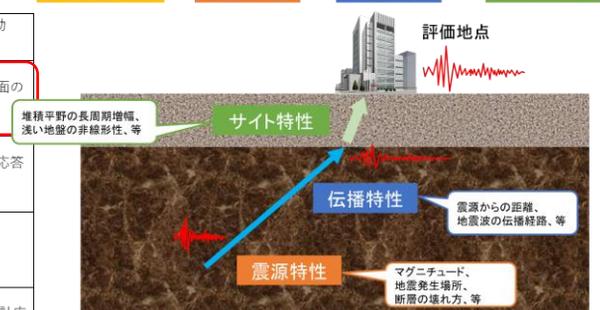
指針で示された方法1による地震動作成と方法2,3,4による地震動選定

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

地表面の揺れ = 震源特性 × 伝播特性 × 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	想定地震動の地表面、工学的基盤面の加速度時刻歴波形を用いる	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基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

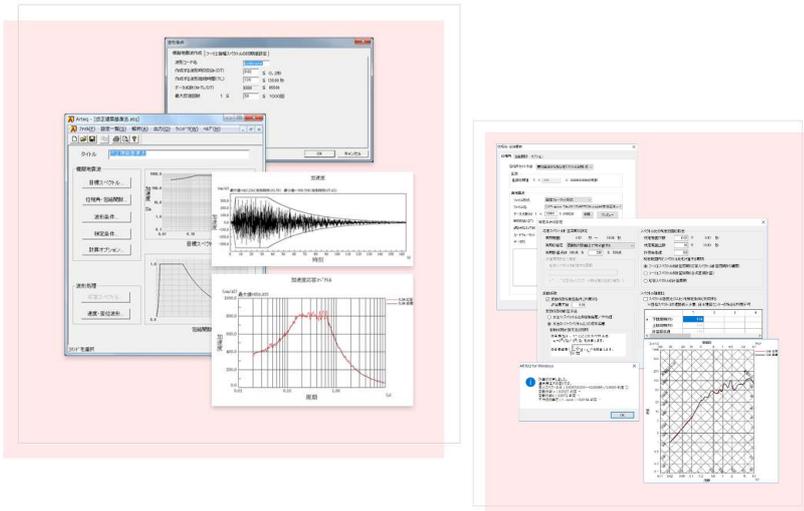


方法1による地震動設定

模擬地震波作成プログラム

ARTEQ for Windows

- POINT1** 目標スペクトルに適合する 模擬地震波を作成
- POINT2** 模擬地震波の位相を 実地震記録等により設定
- POINT3** k-SHAKE+等他システムの 入力地震波として使用可能



目標スペクトル設定

- 告示第 1461 号に基づく加速度スペクトル
- 告示第 1461 号×上下動成分係数*1、*2
- 設計用入力地震動作成手法技術指針*1に基づく 設計用スペクトル
- 道路橋示方書(H24)に基づく設計用スペクトル
- 大崎スペクトル (原子力用*3、土木・建築用*4)
- 耐専スペクトル (水平 (NFRD 効果、内陸地殻内地震補正)・上下) *5
- 大規模地震に対するダム耐震性能照査指針 (案) に基づく 照査用下限加速度応答スペクトル (水平地震動・鉛直地震動) *6
- 任意の目標スペクトル (加速度・速度)
 - *1 設計用入力地震動作成手法技術指針 (案) 日本建築センター
 - *2 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)
 - *3 原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1987 (日本電気協会)
 - *4 新・地震動のスペクトル解析入門 (大崎順彦著、鹿島出版会)
 - *5 原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-2008 (日本電気協会)
 - *6 大規模地震に対するダムの耐震性能照査について (国土交通省)

位相スペクトル指定機能

- 乱数位相
- 実地震記録の位相、実地震記録読み込み設定確認機能

包絡関数設定

- 設計用入力地震動作成手法技術指針による 包絡関数 (レベル1・レベル2)
- Jennings 型の包絡関数
- 耐専スペクトルの包絡関数
- 任意の包絡線を定義することも可能

適合の判定条件

- スペクトル比
- 変動係数 (スペクトル比の標準偏差÷平均値 または (1-スペクトル比)の標準偏差のうちいずれか)
- スペクトルインテンシティの比 (S.I.比)

解析機能

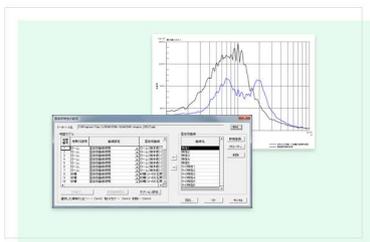
成層地盤(一次元地盤)での地震応答解析を行います。
解析手法は、SHAKEと直接積分法(※)の2種類をサポートしています。
※非線形解析オプションのみ。

1.基本機能

- 地盤の非線形性を考慮した重複反射理論による等価線形解析
- 従来型・改良型の複素剛性を選択可能
- ひずみ依存特性をデータベースとして管理
 - 土木研究所の式
 - 港湾の施設の技術上の基準・同解説の式
 - 建築学会文献の特性(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、2006)
 - ユーザ設定
- 道路橋示方書・同解説に準拠した簡易液化判定機能
- ベータ低減による液化化を考慮した地震応答解析

2.非線形解析オプション

- 直接積分法(線形加速度法または平均加速度法を利用)による時刻歴非線形解析
- 復元力特性
 - 修正 R-O モデル
 - H-D (双曲線) モデル
 - 骨格曲線と履歴曲線を別々に設定する方法 (石原・吉田の方法)
- ひずみ依存曲線から非線形特性パラメータを自動計算
- レイリー減衰により粘性減衰を指定可能

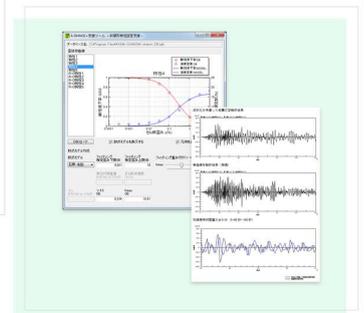
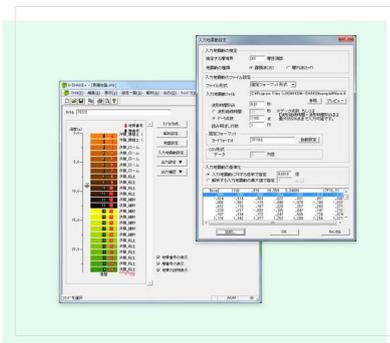


出力項目

出力図は文書ファイルへの貼り付け(クリップボード機能)が可能です。
また、各解析結果をCSV 形式・固定フォーマット形式で出力(エクスポート機能)することも可能です。

- 最大応答分布図(加速度、相対変位、せん断応力、せん断ひずみ等)
- 時刻歴波形図(加速度、相対変位、せん断応力、せん断ひずみ等)
- 応答スペクトル図、加速度伝達関数図、ひずみ依存特性図、FL 値表
- 履歴曲線図 (せん断応力-せん断ひずみ関係)、フーリエスペクトル比図

※履歴曲線図とフーリエスペクトル比図は非線形解析オプションにのみ対応



成層地盤地震応答解析プログラム

k-SHAKE+ for Windows

- POINT1** ボーリング調査等を基に 建物入力位置(床付)の地震波を作成
- POINT2** 各種計算手法により 各層での地震応答解析に 幅広く対応

OpenAI による社内ナレッジの活用

●背景

建設業界において企業内には長年培われてきたノウハウや知見、手掛けた多数の物件の数々等、今後の業務を進めて行くにあたり有益な情報が満ち溢れています。

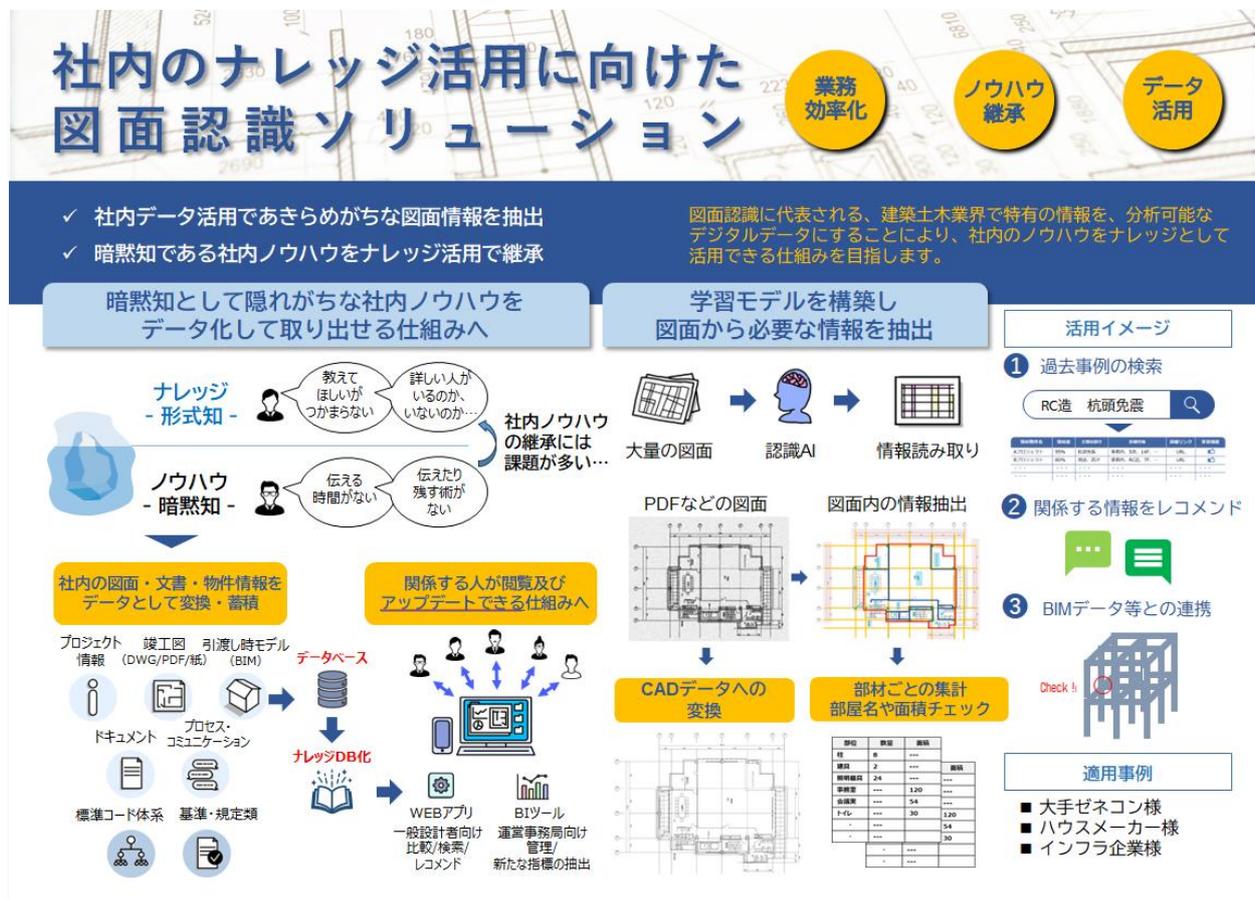
例えば RC10階建てのオフィスビルの設計、施工を担うとなった場合に過去に手掛けた物件に同等の条件のものがあるというケースは少なくないと思われます。その過去に手掛けた際の気をつけなければならないポイント、設計のノウハウ等々は社内のどこかにあり、とても参考となる情報です。

しかしながらそれらの情報は、膨大なファイルが格納された社内サーバーであったり、手掛けられた中堅、ベテランの方の頭の中であったりします。担当される方は、その膨大なファイル群の中から参考となる情報を探し出す、若しくは担当された中堅、ベテランの方を見つけ出し、ヒアリングを行う等の行動をおこす必要があります。これらの作業は、少なくない工数を要すると思います。

●アプローチ

KKE では、この情報収集の効率化を図る為の ChatGPT に代表される OpenAI 技術を駆使した仕組みづくりの業務を行っております。ノウハウ、知見、過去物件等の情報を学習データとした DB を構築し、対話形式のインターフェースを用意し、最短ルートにて必要とする情報を取得するお手伝いをさせて頂いております。

ChatGPT の普及にて一般化しつつある対話式のインターフェースは曖昧な切り口から精度を上げて行くのに適したインターフェースです。場面により従来のキーワード検索と併用可能としております。



BIM 今昔

最近、橋梁 CIM (Construction Information Modeling) のお取り組みをされている方から、「建築の BIM (Building Information Modeling) は、今どういう状況で、どこまで出来るようになってきているのか聞きたい」というお話をいただきました。そのご要望をきっかけにして可能な範囲で、建築 BIM のこれまでの経緯、現状と事例、そして将来展望について整理してみたのが本稿です。

KKE は建築 BIM には 2010 年代半ばからの取り組みがありますが、今後も発展の一翼を担っていきたいと考えています。その経験を、まだ実績が少ない橋梁他の土木構造物の CIM 支援に活かすことが出来ればなお幸いです。

● 建築 BIM の経緯

図 1 は CAD の歴史と BIM の歴史を並べて示したものです。

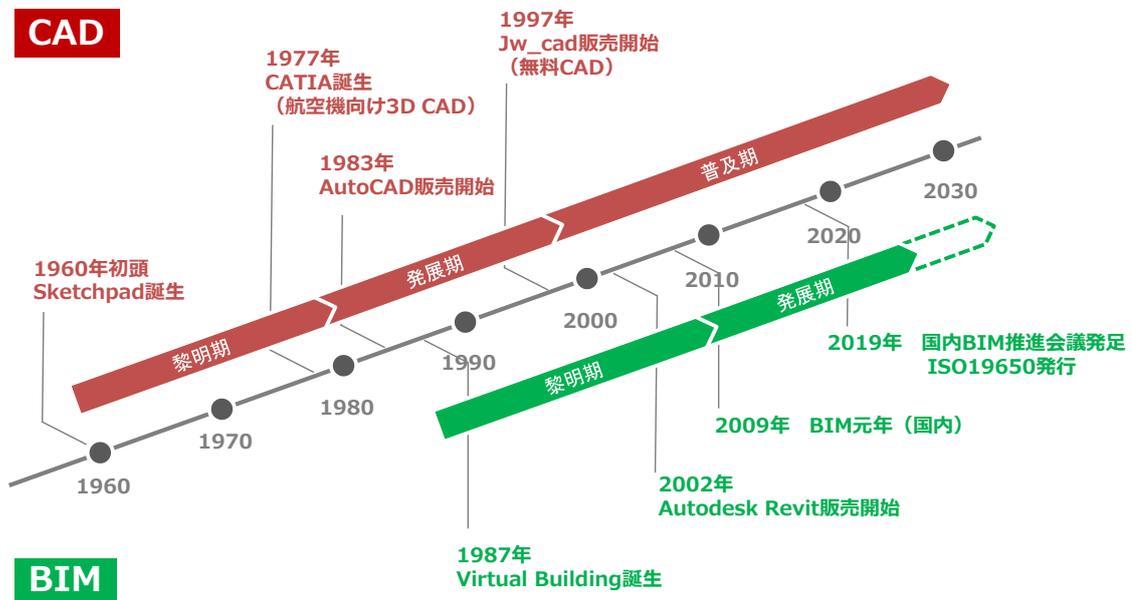


図 1 国内の CAD, BIM の歴史

シンプルな線分データの集合体である CAD は、Autodesk 社の AutoCAD 等の定番ソフトウェアの進化、あるいは建築図面向けの無料ソフトウェアの出現等に伴って発展期・普及期へと利用レベルが高まってきました。

一方の BIM は、目的別の詳細度 (LOD : Level of Development) が定められた形状モデルと属性情報から成るオブジェクトの集合体です。初期はこれらに対応可能なソフトウェア (Autodesk 社の Revit 等) の出現が火付け役となり、その後、米国の文献¹⁾や英国における BIM 成熟度の定義とその高度化ロードマップ³⁾が注目を集めました。

- 1) 米国の建設産業における不十分な情報相互運用に関するコスト分析 (米国 NIST, 2004)
- 2) National Building Information Modeling Standard NBIS v1 (米国立研究化学研究所, 2007)
- 3) Bew-Richards BIM maturity model (2008)

日本国内では、それらの海外動向に刺激を受けて関連の書籍出版やセミナーが相次いだ 2009 年が「BIM 元年」と言われています。それ以降しばらくは民間主導の取り組みが続きましたが、2019 年国土交通省によって官民学で構成される建築 BIM 推進会議が設置されると、当会議体にて将来像に向けたロードマップや官民の役割分担が定められるとともに、各種課題に対応した部会での体系的な取り組みが加速しました。こうした経緯で現在は、トップランナー企業の各社が試行や研究開発を行う「黎明期」を過ぎ、トップランナー企業がメリットを実感しながら本格運用し、従来は積極的に利用してこなかったフォロワー企業もこれに倣おうとしている「発展期」に移行しつつあります。

● 建築 BIM の現在

国土交通省は BIM が担うべき役割・機能として下記の 3 点を掲げています⁴⁾ほか。

Process : コミュニケーションツールとしての活用 設計プロセス改革等を通じた生産性の向上

Data Base : 建築物の生産プロセス・維持管理における情報データベース

ライフサイクルで一貫した利活用

Platform : IoT や AI との連携に向けたプラットフォーム

前述の通り、現在これらを建築 BIM 推進会議主導で官民学一体となって推進・実現していこうとしているのですが、令和 4 年 12 月に国土交通省が公表した「建築分野における BIM の活用・普及状況の実態調査」⁵⁾の結果からは、必ずしも順風満帆とはいえない現状もうかがえます。

まず、BIM 活用は中規模以上のゼネコン等にはおおむね行き渡っているものの、中小事業者への浸透は十分でない実態が分かります。BIM のメリットを感じられていないケースとして「CAD と BIM の二重作業の負担」や「協会会社との連携が出来ない」を多くの事業者が挙げています。結果として、導入効果を「期待以上」と実感している企業もあれば、メリットを感じる事が出来ていない企業も同数程度あるという二極化の様相が見て取れます。図 2 に示した BIM の活用レベルに置き換えて言えば、「つくる BIM」か、それ以前の段階にいる企業は、まだまだ多いということです。

4) 建築分野における BIM 活用促進 (令和 2 年, 国土交通省)

5) <https://www.mlit.go.jp/jutakukentiku/build/content/001395118.pdf>

(令和 4 年, 国土交通省)

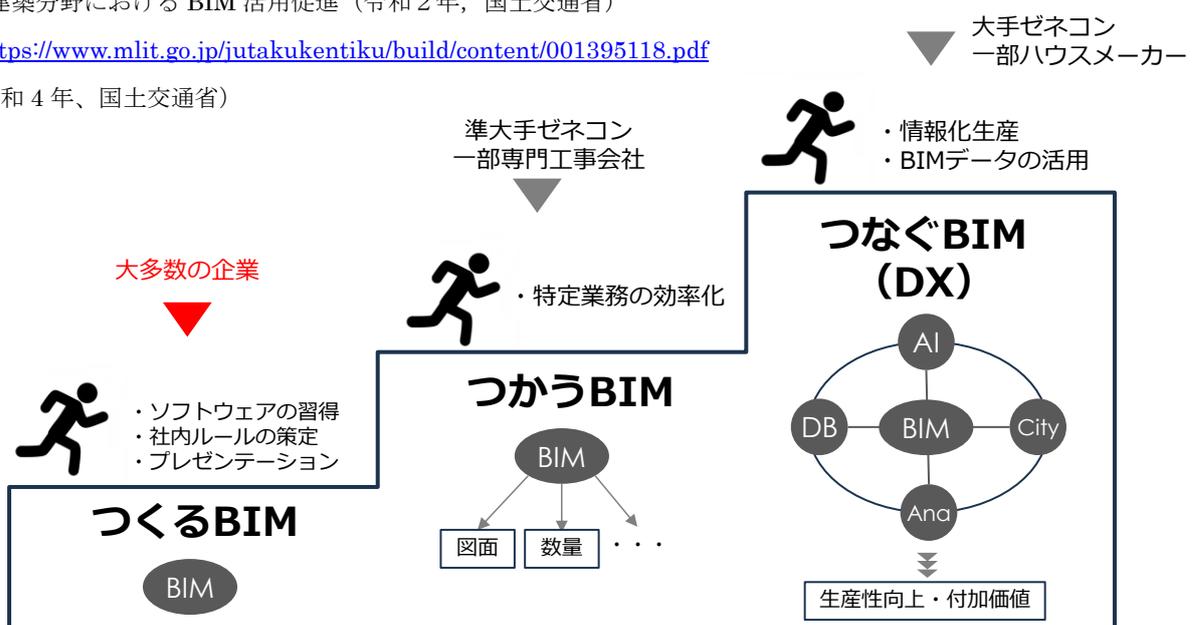


図 2 BIM の活用レベル

この「つくる BIM」段階から（メリットが実感出来る）「つかう BIM」以上へのレベルアップを図る際に障壁となっているのが、主に下記の2点です。

人材不足……IT と建築の知識を持ってソフトを使い、社内の活用方策をまとめられる人が少ない。
データ分断……BIM だけでは業務が完結しないが、BIM と他ソフト間のデータ連携が不十分。

これらの課題に対する支援としては、国、関係団体が手引きやガイドライン⁶⁾⁷⁾などを発行している他、近年は先行している民間企業（日建設計、大林組、UR 都市機構など）からのノウハウ公開・共有も活発化しています。また国土交通省は令和4年に終了した「BIM を活用した 建築生産・維持管理プロセス 円滑化モデル事業」に続いて、令和4年から新たに、主に中小事業者を対象とした「建築 BIM 加速化事業」で建築 BIM データ作成に係るソフトウェア購入費、教育費、人件費等補助を継続しています。

データ分断の解消のためには、建築生産プロセス間とプレイヤー間で必要な情報をスムーズに繋ぐことが重要です。そのためには、各社の従来業務フローを BIM に置き換えるだけでなく BIM を据えた新たな業務フローの検討、また業界取り組みではオブジェクトやデータの共通化を進める必要があります。

データ共通規格化を目指している具体例としては、ST-Bridge（日本国内の建築構造分野での情報交換のための標準フォーマット）や IFC（BIM の国際的なデータ規格）による構造計算プログラム、BIM、躯体積算プログラム等との双方向データ連携（図4）があります。

6) 建築分野における BIM の標準ワークフローとその活用方法に関するガイドライン（2022年、国土交通省）

7) 2020年設計 BIM ワークフローガイドライン（2020年、建築設計三会）

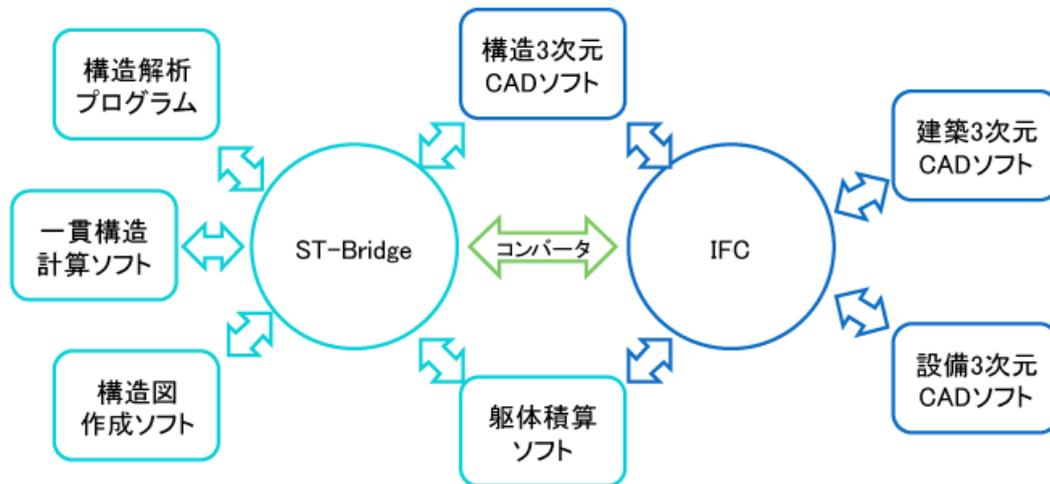


図4 建築構造分野におけるデータ連携

(出典：一般社団法人 building Smart Japan 構造設計小委員会)

●建築 BIM の将来

建築 BIM の将来について、国土交通省は（現状を BIM-Level1 として）、まず下記の3本柱で BIM-Level2 を実現するとしています⁸⁾。

横断的活用の円滑化による協働の実現 → スムーズにデータを共有・引継ぎ
BIM 確認申請による効率化 → 安全・省エネな建築物の安定した供給
 FM/PM/BM の高度化・効率化 → **維持管理・運用段階**での活用

さらにその先の目指す将来像（BIM-Level3）として、下記を掲げています⁸⁾。

建築分野と他分野（都市、不動産、交通、物流、観光、福祉、エネルギー等）の情報が連携・蓄積・活用できる社会の構築

BIM 確認申請に関しては、海外ではエストニア、ノルウェー、シンガポール、ドバイで先行して整備や運用が進められていますが、日本国内では建築 BIM 推進会議の中で、3D ビューワを用いた申請 BIM データのチェックの仕組みや手順が検討されている段階です。国土交通省が示している工程表⁸⁾では、2025 年から試行開始とされています。

こうした個別建物の BIM モデル活用拡大の他に、図 5 のような複数の建物が集まった都市モデルのデジタル化に関する動きも活発化しています。国内では 2020 年から国土交通省主導で PLATEAU（3D 都市モデルのオープンデータ）の試用が開始されています。単体建物の BIM と同様に、ユースケースに応じた詳細度が定義されています。広域の都市形状モデルに建物用途、構造種別、築年、建築面積、災害リスク等の属性情報が付随している点も BIM と同様です。

8) 「建築 BIM の将来像と工程表（増補版）」（令和 5 年 3 月,国土交通省）

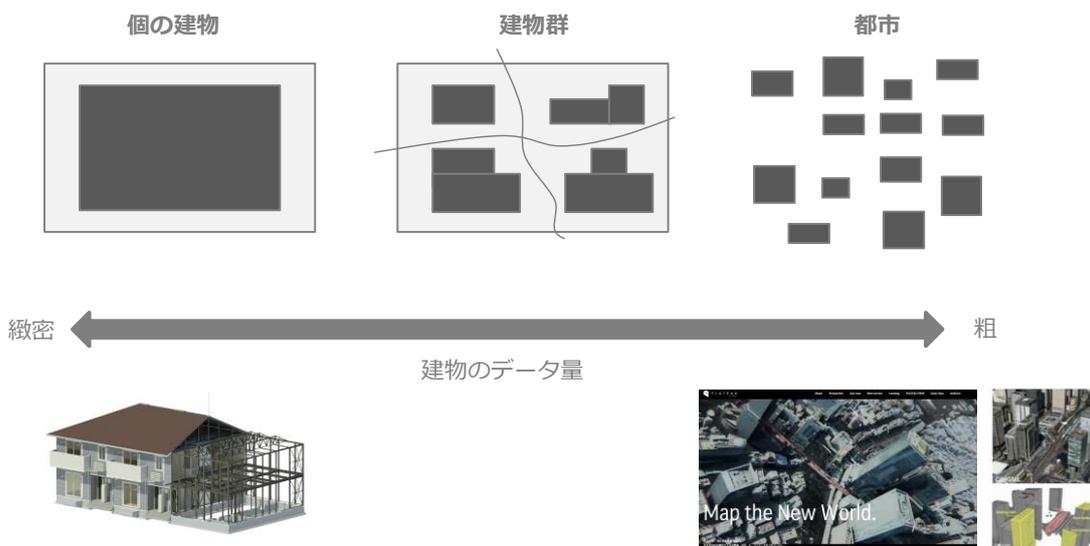


図 5 個別建物モデルと都市モデル

環境シミュレーションや複数の建物ファサードによる街並みのデザインなど、都市モデル上での検討用の新たなソフトウェア商品も出ており、「単体の建物だけでない広域計画でのデジタル活用」は、BIM 動向と密接に関連する今後の潮流の一つと考えています。

●最近の事例

KKE は BIM コンサルティング、システム構築、関連ソフトウェアのカスタマイズのみならず、過去本誌でも繰り返しお伝えしてきた AI やデータサイエンス、各種のシミュレーションや力学的数値解析など多様な技術を用いて、計画、設計、施工ほか様々な場面の建設 DX を支援しています。

BIM 支援に限っても、図 6 のように様々な対象物に関する実績がありますが、ここではこれらの中から特徴が異なる 3 例をピックアップしてご紹介します。



図6 様々な BIM の対象

BIM による建物ライフサイクルサポート (図7)

戸建住宅の BIM モデルを中心として、営業、実施設計、生産設計の各段階に必要な図書や図面を出力する Full BIM モデルを用いたシステムです

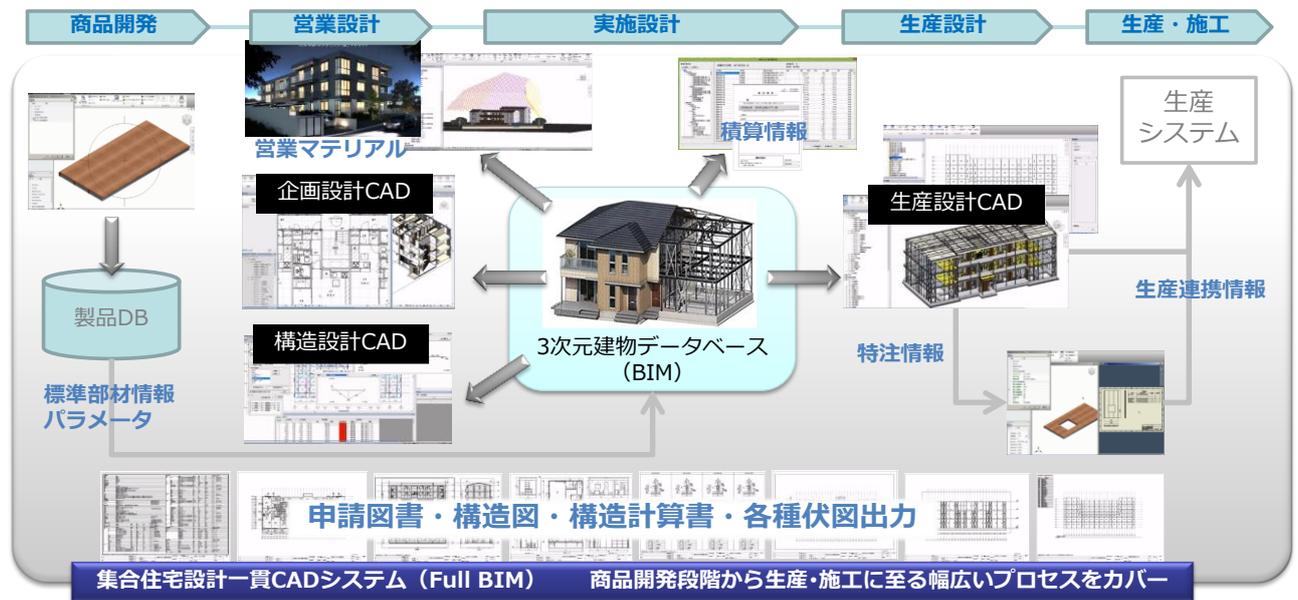


図7 戸建住宅設計一貫 CAD システム (FullBIM)

業務フェーズに則した BIM 利活用 (図8)

お客様の業務フローに則した BIM 利活用構想を立案するとともに、専用機能のカスタマイズを施すことでモデリング効率化、モデル品質向上を実現しました

非 BIM ユーザの BIM 情報活用 (図9)

BIM 専用ソフトを持たない設備メーカーとデータ連携するために、BIM モデルを Web ブラウザ上で参照・技術計算を可能にした事例です。



図8 集合住宅の一貫設計システム

BIMモデルを受け取ったメーカーがモデルを基に技術計算を実施
要件を満たす製品を自動選定するWebシステムを構築

Point

- メーカーの担当者がBIMソフトを導入することなく業務を遂行できる仕組み

ゼネコン・サブコン
設備設計者

メーカー

短時間での技術計算
および製品選定を実現

「技術計算支援システム」
BIMモデルから、管路、設備情報を取得して技術計算を行い、
性能を満たす製品情報をBIMモデルに自動反映する

図9 配管の技術計算支援システム

● まとめ

- ・ 国内の建築 BIM は 2009 年を BIM 元年として、まずは民間主導で発展し、2019 年以降は建築 BIM 推進会議主導で、官民学一体となってレベルアップが図られてきました。
- ・ 現状では、自社の生産性向上を目指して取り組み、メリットを実感している企業も多く存在しますが、そうとは言えない企業も少なくありません。
- ・ 個別の建物から都市レベルへの展開が進行中です。
- ・ 限られたユーザのための BIM ではなく、非 BIM ユーザへの普及も図られています。

鉄道高架橋の CIM モデルと構造解析データの連携

日本の建設業界は人手不足や生産性の向上など様々な課題を抱えており、業務の効率化が急務の状況です。業務効率化の解決策の1つとして BIM/CIM が挙げられており、設計、施工、維持管理のサイクルを BIM/CIM モデルで連携する動きが活発になっています。ただし、実務では可視化による設計時の配筋等のチェックや施工時の情報伝達に用いられることが多く、その他の場面で BIM/CIM モデルが有効に活用されていることはあまりありません。

例えば、多くの鉄道構造物の設計は 2 次元図面で設計を行い、構造解析を実施する際には 2 次元図面からデータを読み取り、解析ソフトにデータを入力しています。設計の現場において、3 次元モデルを活用してさらなる業務の効率化・高度化を図るためには、BIM/CIM モデルと構造解析モデルのデータ連携の仕組みが必要です。

BIM/CIM モデルと構造解析モデルの連携を行う場合に、データの抽出や変換が必要になります。データ抽出や変換のために必要なデータをまとめた中間的なファイルを仲介することで、モデル作成ソフトや解析ソフトを限定することなくデータの連携が可能になります(図1)。ただし、BIM/CIM モデルの作成ルールやファイルのデータ仕様については、ルールを決める必要があります。

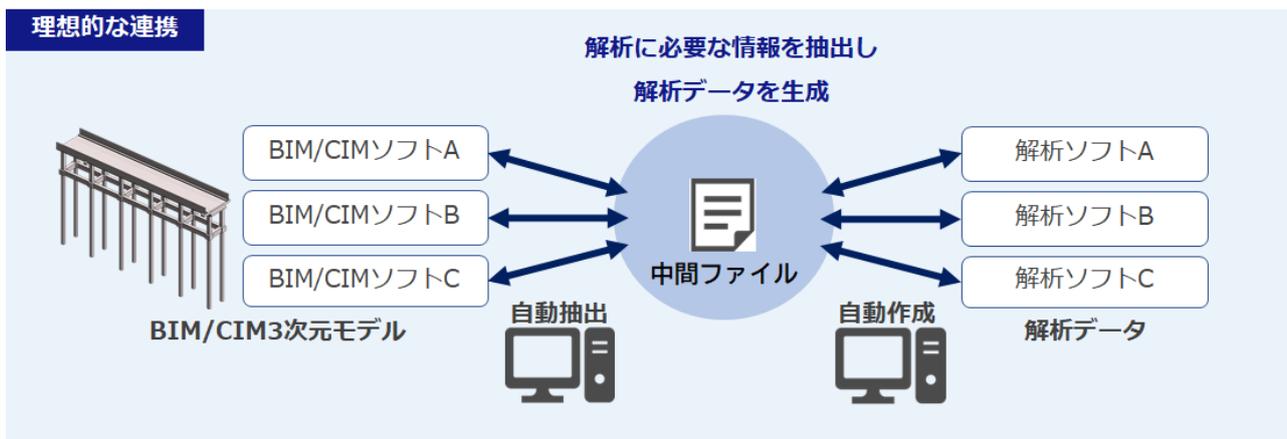


図1 BIM/CIM モデルと解析データの連携イメージ

公益財団法人 鉄道総合技術研究所と構造計画研究所は、鉄道構造物の BIM/CIM モデルと構造解析モデルのデータ連携に取り組んでいます。このたび、BIM/CIM モデル（以下、CIM モデル）と「鉄道構造物等の耐震性能照査プログラム DARS」のデータ連携ツール（構造解析用中間ファイル出力アドオン、DARS コンバーター）を開発し、無償トライアル版を公開しました。

● データ連携の流れ

Revit で作成した CIM モデルを DARS で解析するにあたり、以下の流れでデータの連携を行います。

- ・ Autodesk Revit 2021（以下、Revit）による CIM モデル作成
- ・ Revit から構造解析用中間ファイルの出力（データ連携ツール①：アドオン）
- ・ DARS で構造解析用中間ファイルの読み込み（データ連携ツール②：コンバーター）
- ・ DARS で構造データ以外の設定を追加（地盤データ、荷重等）→解析実行

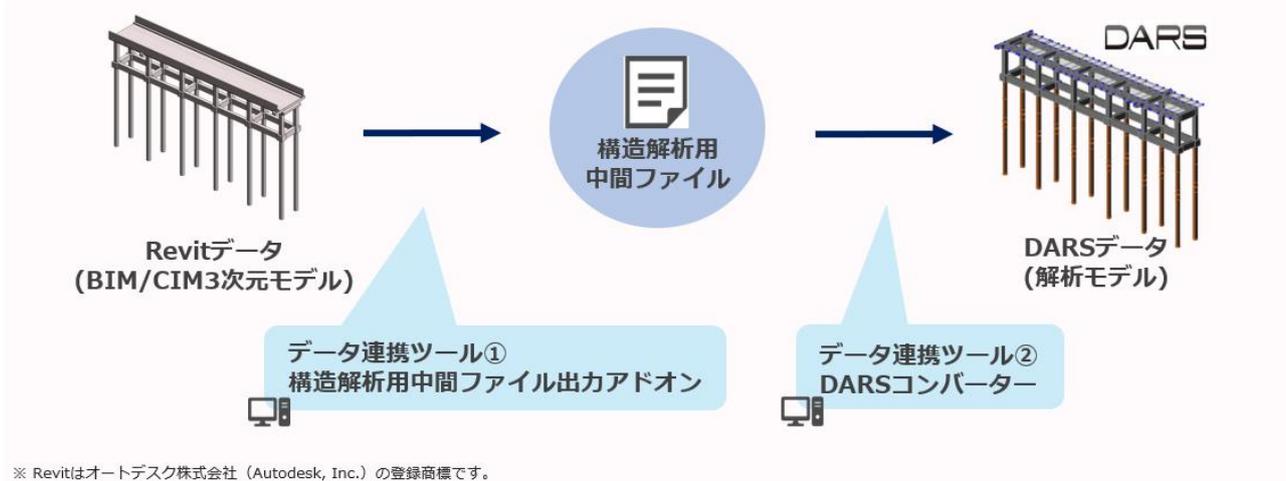


図2 データ連携の流れ

構造解析用中間ファイル（以下、中間ファイル）は、材料や部材情報等が一般的なデータで構成されており、このデータ仕様通りに作成すれば、Revit 以外の方法で作成したデータでも、DARS で読み込むことが可能です。

● 3次元モデル (CIMモデル)

図3に、今回のデータ連携に使用した CIM モデルを示します。杭基礎を有する鉄道 RC ラーメン高架橋を対象として、中間ファイルを正確に作成するために、「Revit モデル作図ガイドライン (案) 令和6年1月」^{※1} (以下、ガイドライン) に従い作成しています。

現在のガイドラインは、対象の CIM モデル（整形の鉄道 RC ラーメン高架橋）にのみ対応した内容になっています。RC の柱、梁、杭、スラブ、フーチングや鉄筋などの部材種別を属性情報に設定したファミリを使用して作図します。鉄筋は構造鉄筋でのみ構成し、軸方向鉄筋、帯鉄筋を属性情報に設定して区別しています。

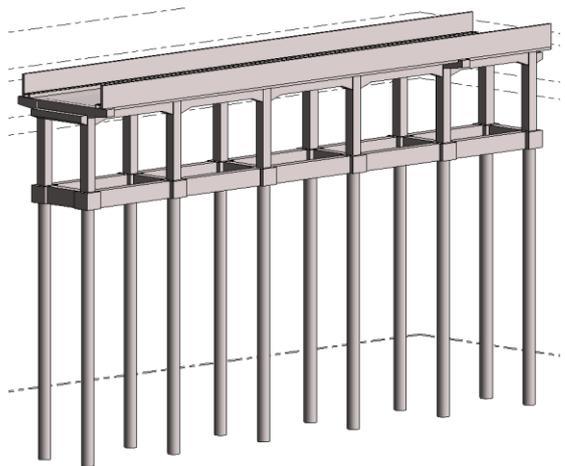


図3 データ連携に使用した CIM モデル

● Revit からの中間ファイル出力

Revit に中間ファイル出力用のアドオン（図2のデータ連携ツール①）をインストールすることで、Revit のリボンメニューに「構造解析用中間ファイル出力」が表示されます（図4）。メニュー内の「中間ファイル出力」コマンドを実行することで、中間ファイルが出力されます。

中間ファイルは、様々な言語ライブラリでサポートされているデータ交換フォーマットである JSON (Javascript Object Notation) 形式で作成されます。中間ファイルの詳細は、「中間ファイル仕様書 令和6年1月」にまとめてあります^{※1}。

中間ファイルの内容は、構造解析モデルの作成に必要な情報でまとめられています。アドオンにより、Revit のデータから、構造物形状のアウトライン情報や断面情報（形状、寸法、材料）や鉄筋情報が自

動的に作成されます。なお、中間ファイルの作成時に認識できなかった部材については、別途、CSV形式で出力されますので、適宜チェックが可能です。

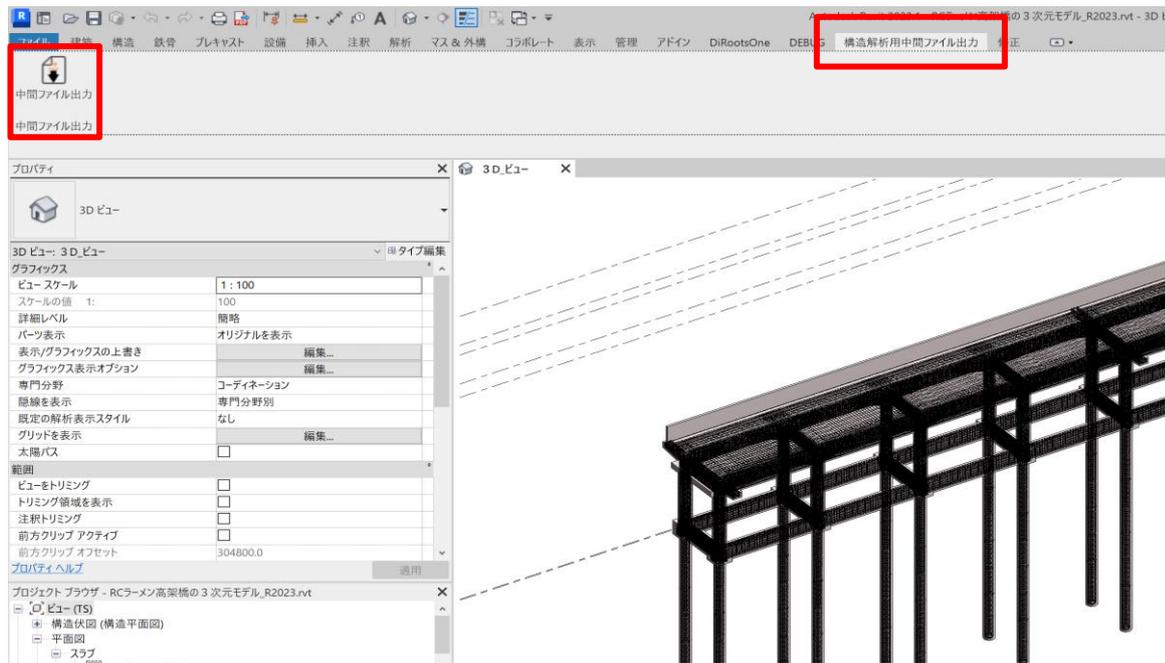


図4 Revit へのアドオン追加

● DARS での中間ファイル読み込み

中間ファイルを DARS で読み込む場合は、読み込み用のコンバーター（図2のデータ連携ツール②）が必要です。DARS コンバーター Ver.1.0 をインストールすることで利用することができます※1。

DARS コンバーターを使って中間ファイルを DARS 用解析データに変換することで、DARS で構造データを読み込むことができます。中間ファイルに含まれない地盤情報や荷重情報、解析制御情報などは別途設定する必要があります。これ以降は、通常の解析業務の手順となります。

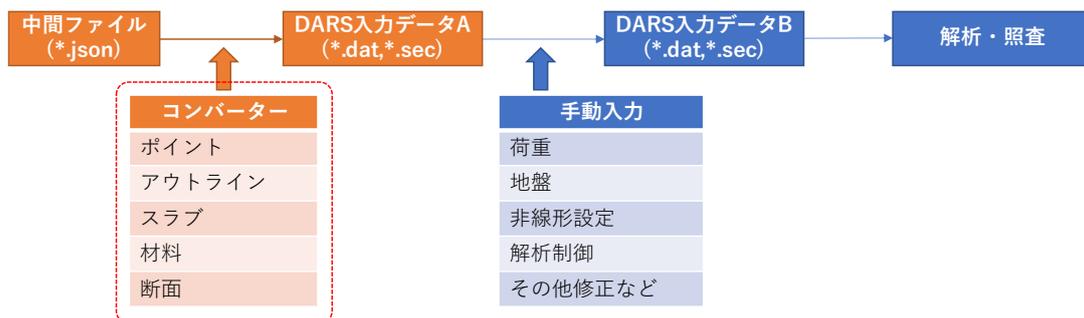


図5 DARS コンバーターを用いた解析・照査の流れ

● 今後

整形の鉄道 RC ラーメン高架橋について、CIM モデルと DARS のデータ連携を実施しました。今後も CIM モデルと構造解析データのシームレスな連携を目指し、データ連携可能な構造を広げたいと考えます。

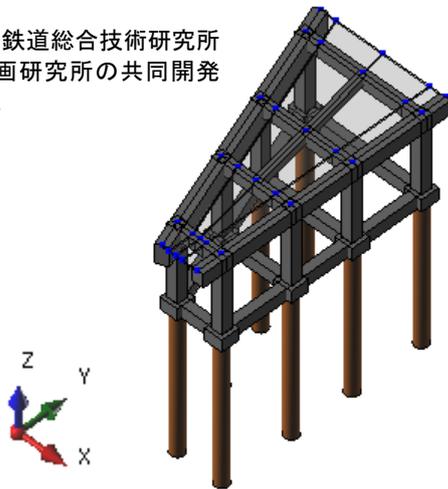
※1：トライアル版は期間限定でダウンロードが可能です。 https://kaiseki-kke.jp/activity/railway_cimtool.html

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

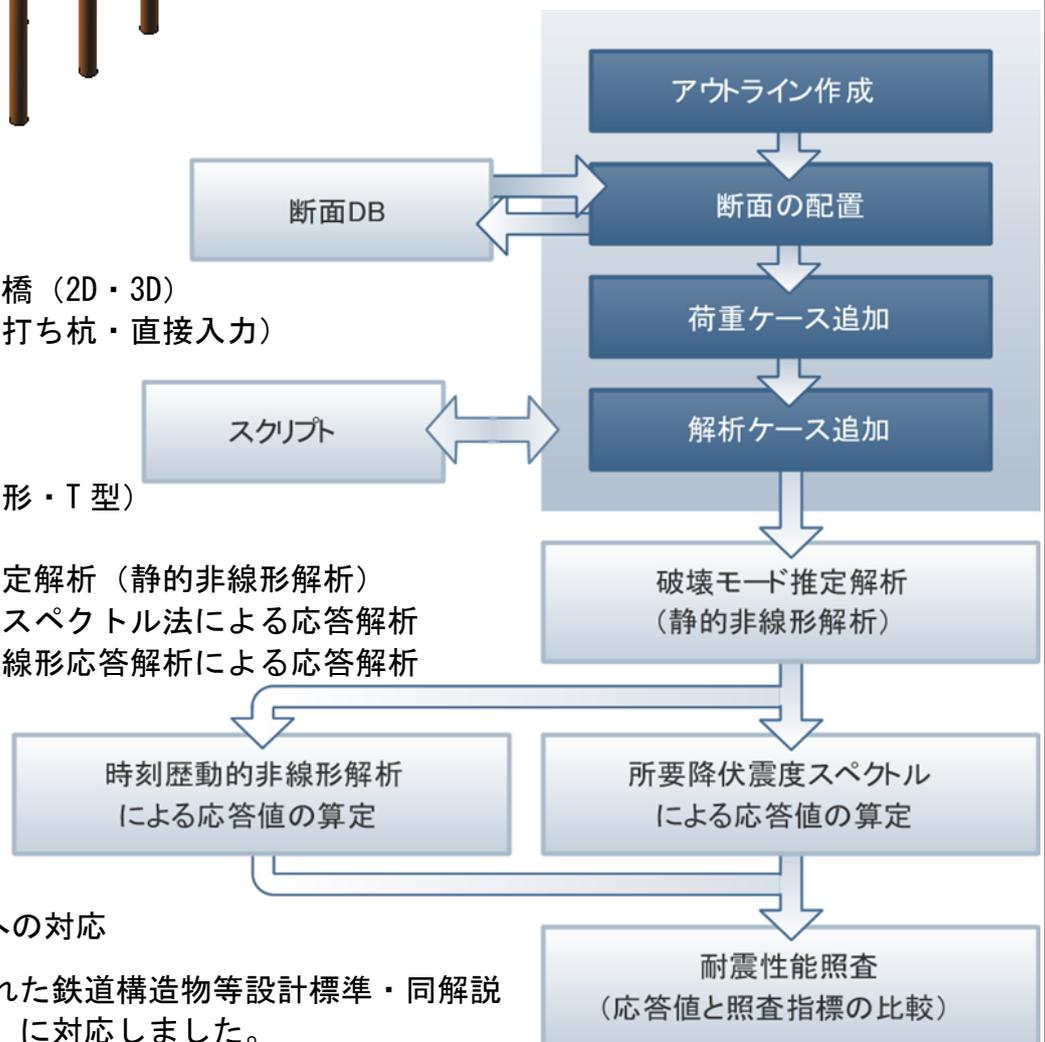
- 破壊モード推定解析 (静的非線形解析)
- 所要降伏震度スペクトル法による応答解析
- 時刻歴動的な非線形応答解析による応答解析
- 固有値解析

■ 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!



「Project PLATEAU」 ユースケース開発実証

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して社会課題の解決に取り組んでいます。2022 年度のユースケース開発では「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。本稿では、2 つのユースケース開発の概要と「雪害対策支援ツール」の要素技術である積雪による建屋の損壊リスク評価についてご紹介します。

● 「Project PLATEAU」とは

「Project PLATEAU」は、国土交通省が主導する日本全国の 3D 都市モデルの整備・オープンデータ化プロジェクトです。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、シミュレーションによる施策検証に対する期待が高まっていますが、特に都市に関するシミュレーションを実施する上では、必要なデータの整備に大きなコストがかかっていました。「Project PLATEAU」において 3D 都市モデルが整備されたことで、シミュレーション実施の障壁が大きく下がり、施策検証への活用が期待されています。

今回のユースケース開発においては、「Project PLATEAU」による 3D 都市モデル上に、KKE が有する多様なシミュレーション技術やゲームエンジン等を活用した 3D 可視化の技術を組み合わせることで、自治体やまちづくり団体の施策検証を支援し、社会インフラの整備や防災に寄与することを目指しています。



図1 3D 都市モデル

● 事例① 都市の賑わい評価のシミュレーション（対象：東京都新宿区 西新宿エリア）

大成建設株式会社様とともに、西新宿エリアにおける人流の変化を模擬するシミュレーション、およびその可視化ツールを構築しました。

西新宿では、街の賑わいを生み出すための社会実験が検討されていますが、その実施にはコストがかかるだけでなく、多くの関係者との調整や合意形成が必要です。今回、「Project PLATEAU」で整備されたモデルをベースに西新宿エリアで活動するエリアマネジメント団体が整備した 3D 都市モデルを基盤とし、KKE が運用する MAS（マルチエージェント・シミュレーション）プラットフォームである「artisoc Cloud」を用いて人流シミュレーションを行いました。さらに、人流シミュレーションによる施策検証結果をより分かりやすく表現するため、ゲームエンジンを活用し 3D 都市モデル上で人が動く様子を再現しました。

これにより、3D 都市モデル上でさまざまな施策の効果検証を行うことが可能になり、社会実験の一部を代替するツールとして、コストの削減および効果的な企画立案、合意形成の効率化が期待できます。将来的には、他のエリアにおいてもシミュレーションによる施策検証を展開する予定です。

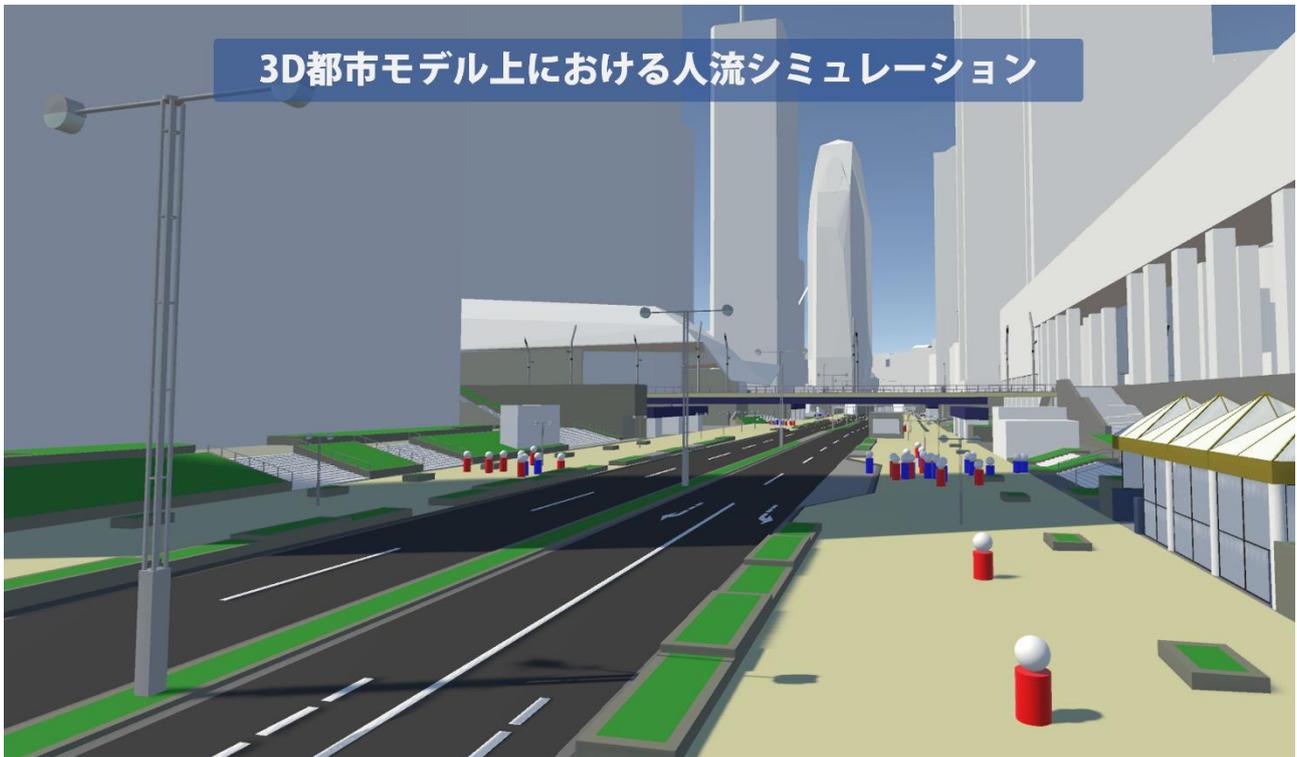


図2 3D 都市モデル上で歩行者の行動を可視化した様子

● 事例② 雪害対策支援ツール（対象：兵庫県朝来市）

3D 都市モデルの屋根形状や属性情報を活用した風雪・融雪シミュレーションを実施し、建築物の積雪荷重に対する損壊および落雪リスクの評価・可視化ツールを開発しました。さらに、シミュレーション結果および損壊リスクの評価結果について、ゲームエンジンを活用して 3D 都市モデル上で再現しました。

近年、地域の少子高齢化等に伴い豪雪による災害が顕著化しており、改めて雪害対策が社会的課題として認知されています。空家の増加も相まって地域の雪害リスクが増す中、豪雪時の屋根雪の重みによ

る建屋損壊リスクの事前把握は、雪害対策の有効な一手となり得ます。本取り組みを通じて、積雪による建築物の損壊や地域の脆弱性を広域で評価し、3次元空間上において分かりやすく可視化したことで、大雪時にさまざまな関係者との意思疎通を円滑にするリスクコミュニケーションツールや、地域防災計画・除雪計画等の検討ツールとしての活用が期待できます。

なお、本ユースケースは株式会社ウエスコ様と KKE が共同で実施し、主に「風雪・融雪シミュレーションの実施」「雪下ろし優先度評価」「道路除雪に関する評価」をウエスコ様、「建屋のリスク評価」「風雪・融雪シミュレーション及びリスク評価結果の3次元可視化」を KKE が担当しました。以降では、木造建屋を対象とした建屋損壊リスクの簡易評価手法についてご紹介します。

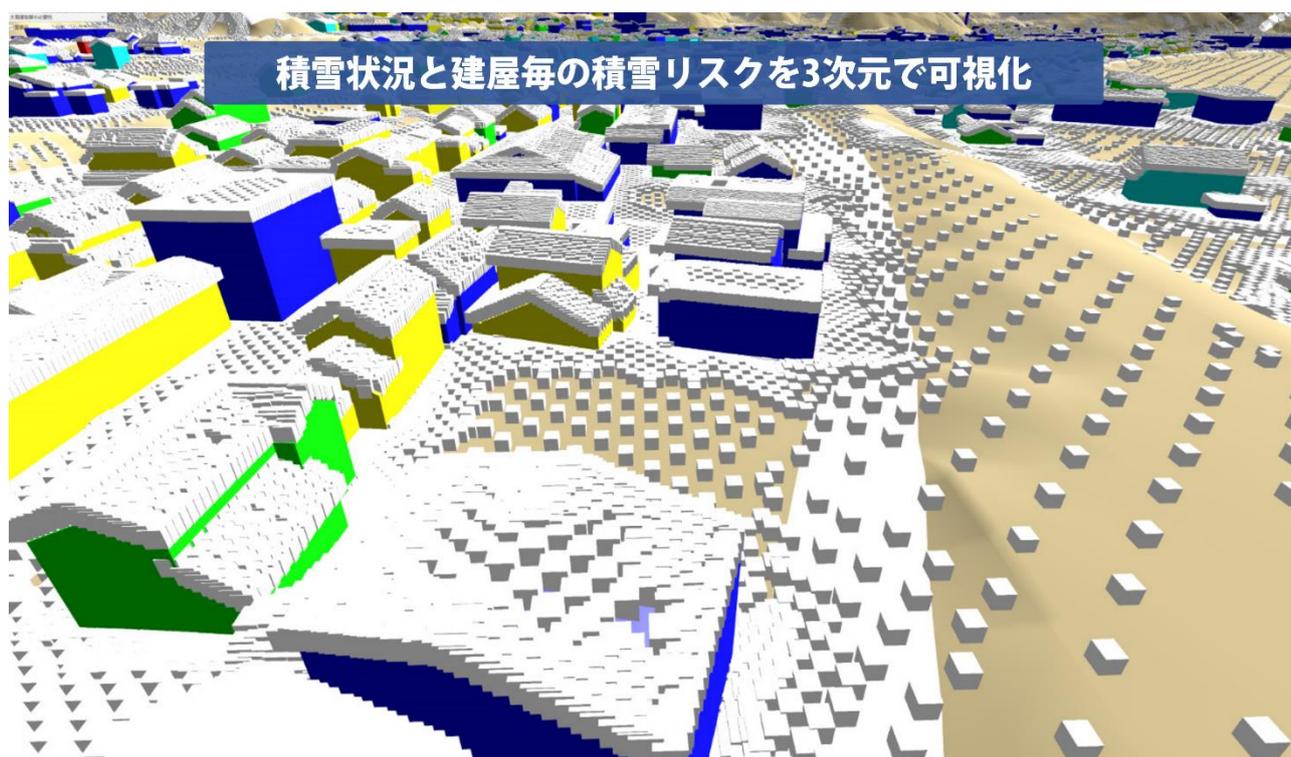


図 3 積雪による建屋ごとの損壊リスクを家屋の色分けにより表現

● 積雪による建屋の損壊リスク評価

積雪による建屋の損壊リスクには、階高・階数・柱スパン・柱の断面といった構造的な特徴が大きく影響します。戸建住宅等の木造建屋については、構造的な特徴のばらつきが小さいため、被害関数を用いた統計的な手法により建屋損壊リスクを判定することが可能です。統計的な手法を採用することにより、対象エリアの木造家屋損壊リスクを面的に評価することができます。

【リスク評価の外力となる積雪荷重の算出】

積雪による木造家屋損壊リスク評価を実施するにあたり、外力として建屋ごとに積雪荷重を付与します。積雪荷重の算出方法としては、積雪観測記録に基づき過去最大積雪重量を建屋ごとに付与する方法の他、対象エリアの地形・建築物を3次元モデル化し、風雪・融雪シミュレーションを実施する方法があります。図4に示すような風雪・融雪シミュレーションを実施することで、屋根ごとの積雪荷重を損壊リスク評価のインプットとして用いることができるため、積雪観測記録に基づく想定外力を用いる場合と比較して、精度の高いリスク評価を実施できます。

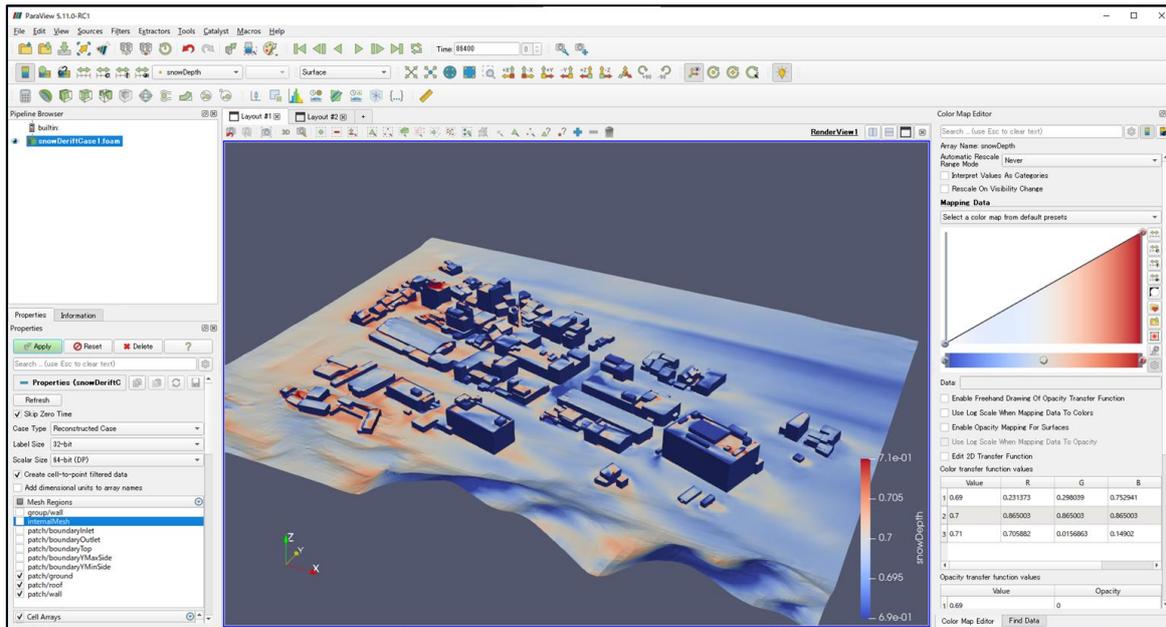


図 4 風雪・融雪シミュレーション結果の可視化イメージ

「OpenFOAM」によるシミュレーション結果の可視化画面。「Project PLATEAU」ユースケースでは、株式会社ウエスコ様にて OpenFOAM によるシミュレーション、およびフリーの後処理視覚化エンジン「ParaView」を用いた結果の可視化を行いました。

【被害関数の選定と被害評価】

積雪による木造家屋損壊リスク評価に用いる被害関数を、既往研究等を参考に選定します。「Project PLATEAU」ユースケースでは、累積対数正規分布で定義されている「屋根雪深さによる小屋梁、垂木の被害関数（千葉・他, 2015*1）」を用いました（図 5）。この関数は、北海道における 98 棟の在来軸組工法住宅の図面より、耐雪性能に関わる小屋梁および垂木を抽出し、それぞれが損傷する際の屋根上積雪深さについて、材料強度のばらつきを考慮して算定しています。ユースケースにおける実証では、上記論文に示された被害関数のうち、最も建屋損壊確率が高く評価されることが想定される、「屋根雪深さと垂木・雪庇 30cm の損傷確率」の被害率曲線(下図赤枠)を採用しました。

被害関数

$$P(x) = \Phi\left(\frac{\ln(x) - \ln\lambda}{\zeta}\right)$$

$P(x)$: 損壊確率
 x : 屋根雪の深さ(m)
 λ : 平均
 ζ : 対数標準偏差

表 垂木・雪庇30cmの被害関数パラメータ

建築年	平均 λ	対数標準偏差 ζ
1999年以前	1.16	0.80
2000年以降	1.42	0.65

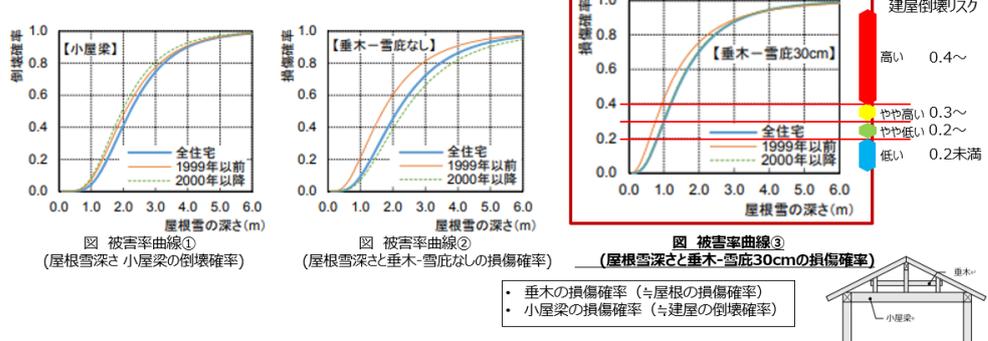


図 5 「Project PLATEAU」ユースケースにおいて採用した被害関数

*1: 千葉隆弘・堤拓哉・高橋徹・苫米地司, 2015, 北海道における在来軸組工法住宅の耐雪性能に関する研究-小屋梁および垂木の損傷リスクについて-, 北海道科学大学研究紀要, 第 39 号。

【評価結果の出力と可視化】

リスク評価結果を出力し、可視化します。WebGISなどのプラットフォーム上で結果を共有できるようにしておくことで、雪害対策の検討や、関係者間の合意形成がよりスムーズになります。さらに、3次元で可視化を行うことで、住民に対する意識啓発等、リスク評価結果の活用の幅が広がります。

図 6 は GIS フリーソフトウェア「QGIS」による 2 次元可視化、図 7 はゲーム開発プラットフォーム「Unity」を用いた 3 次元可視化の例です。いずれの図も積雪による垂木の被害確率を示しています。

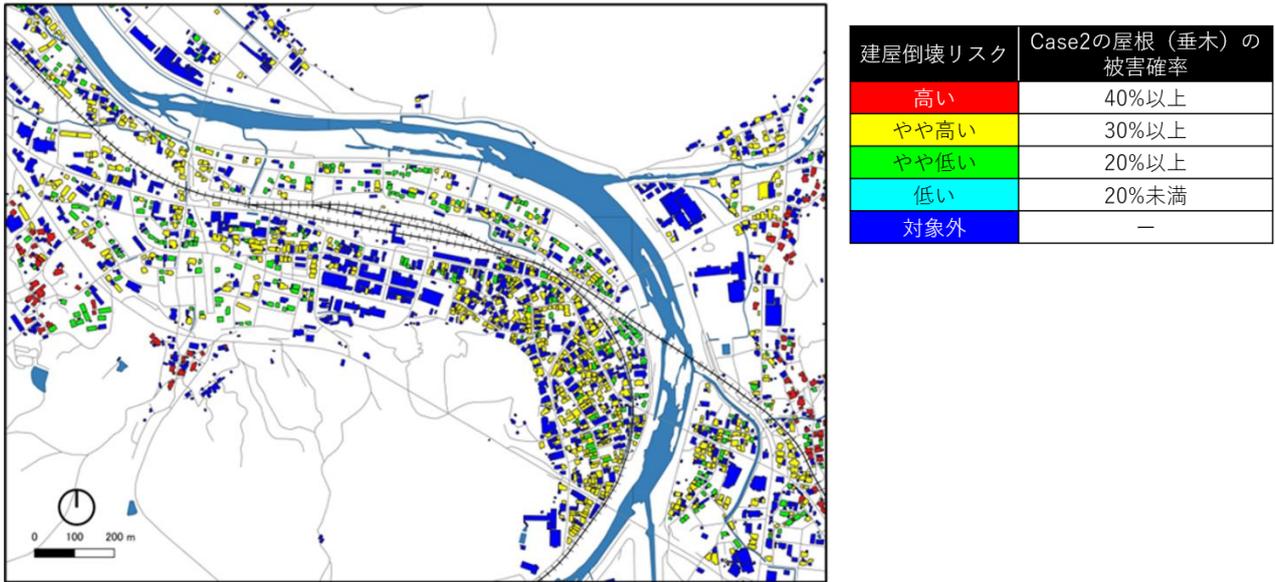


図 6 積雪による垂木の被害確率 QGIS 上の可視化例

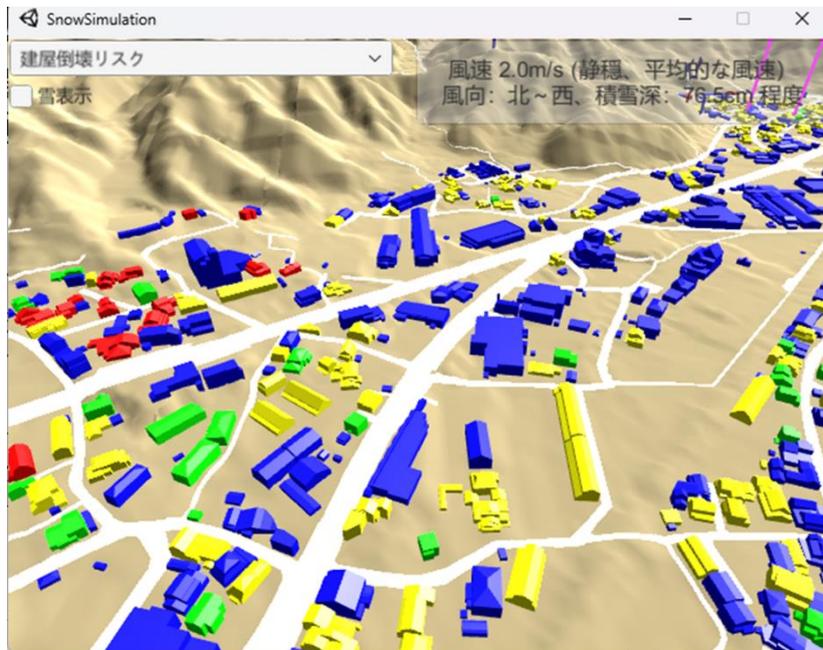


図 7 積雪による垂木の被害確率_Unity 上の可視化例(雪表示なし)

● 積雪による非住宅建屋の損壊リスク評価

非住宅建屋は構造的な特徴が建屋によって大きく異なるため、構造計算による詳細検討により、積雪に伴う損壊リスクを評価する必要があります。膨大な件数の非住宅建屋すべてを対象に詳細評価を行うことは不可能であるため、評価対象とする建屋を選定し、評価を実施します。

【非住宅建屋の評価（構造計算による建屋の耐雪性能評価）フロー】

非住宅建屋を対象とした積雪リスク評価の手順は以下の通りです（図 8）。

- ・ 評価対象とする非住宅建屋の設計図書より、建屋の構造解析モデルを作成
- ・ 作成した構造解析モデルに外力となる積雪荷重を入力し、静的応力解析を実施
- ・ 主要構造部材等に対して許容応力度確認を行い、部材損傷の恐れの有無を判断
- ・ 部材損傷による建物の継続使用や修繕に係るリスクを試算し、対策要否の閾値を設定
- ・ 構造計算の結果確認された建屋被害リスクと、対策要否の閾値を重ね合わせ、「積雪シナリオ」に対する事前対策が必要と判断される場合は、補強案を検討

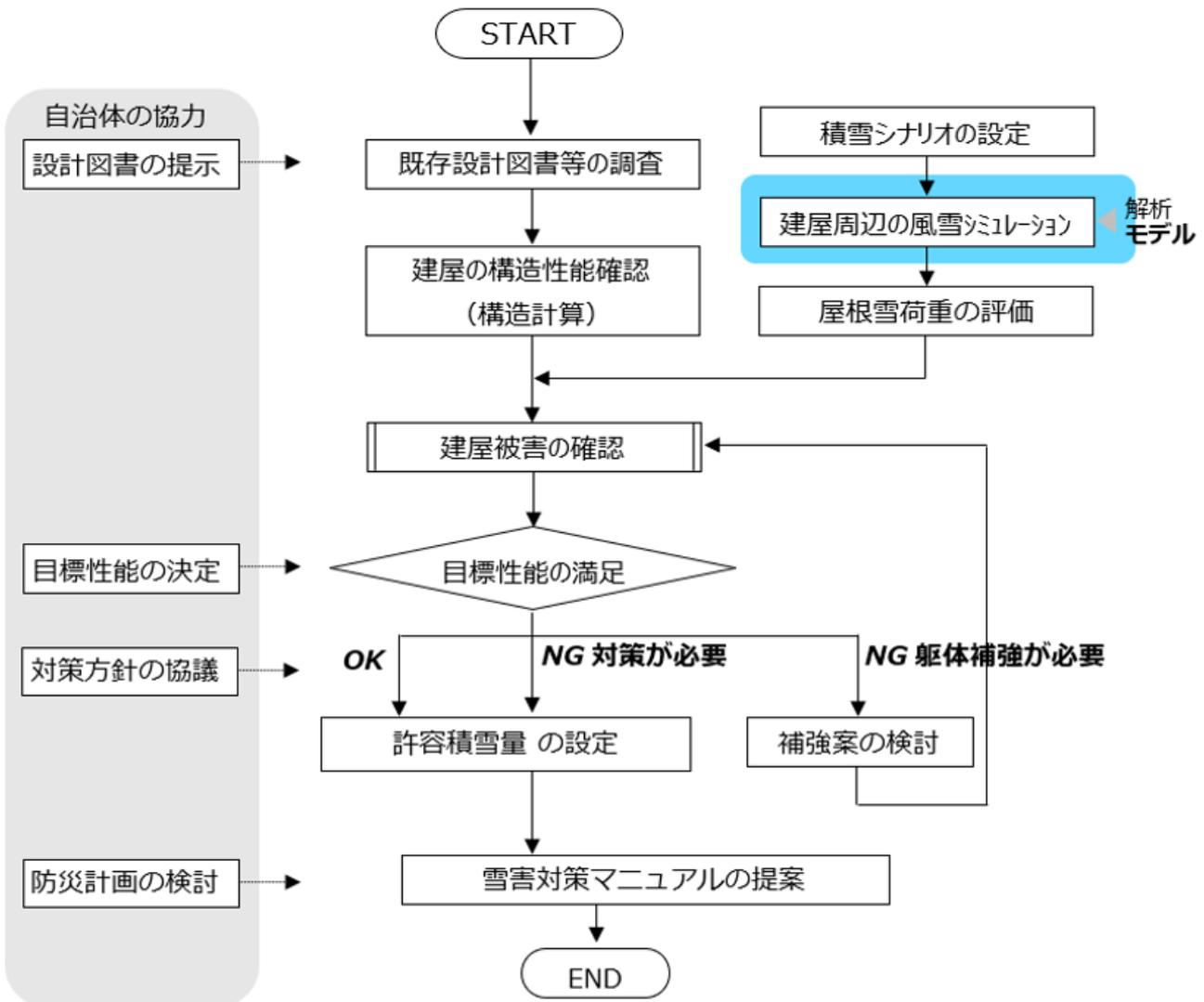


図 8 非住宅建屋の評価フロー

【非住宅建屋の評価（構造計算による建屋の耐雪性能評価）_解析イメージ】

非住宅建屋の評価では、建物性状の調査・復元、応力解析、補強設計事例の提示を行います。各工程において作成する構造モデル等のイメージをご紹介します。

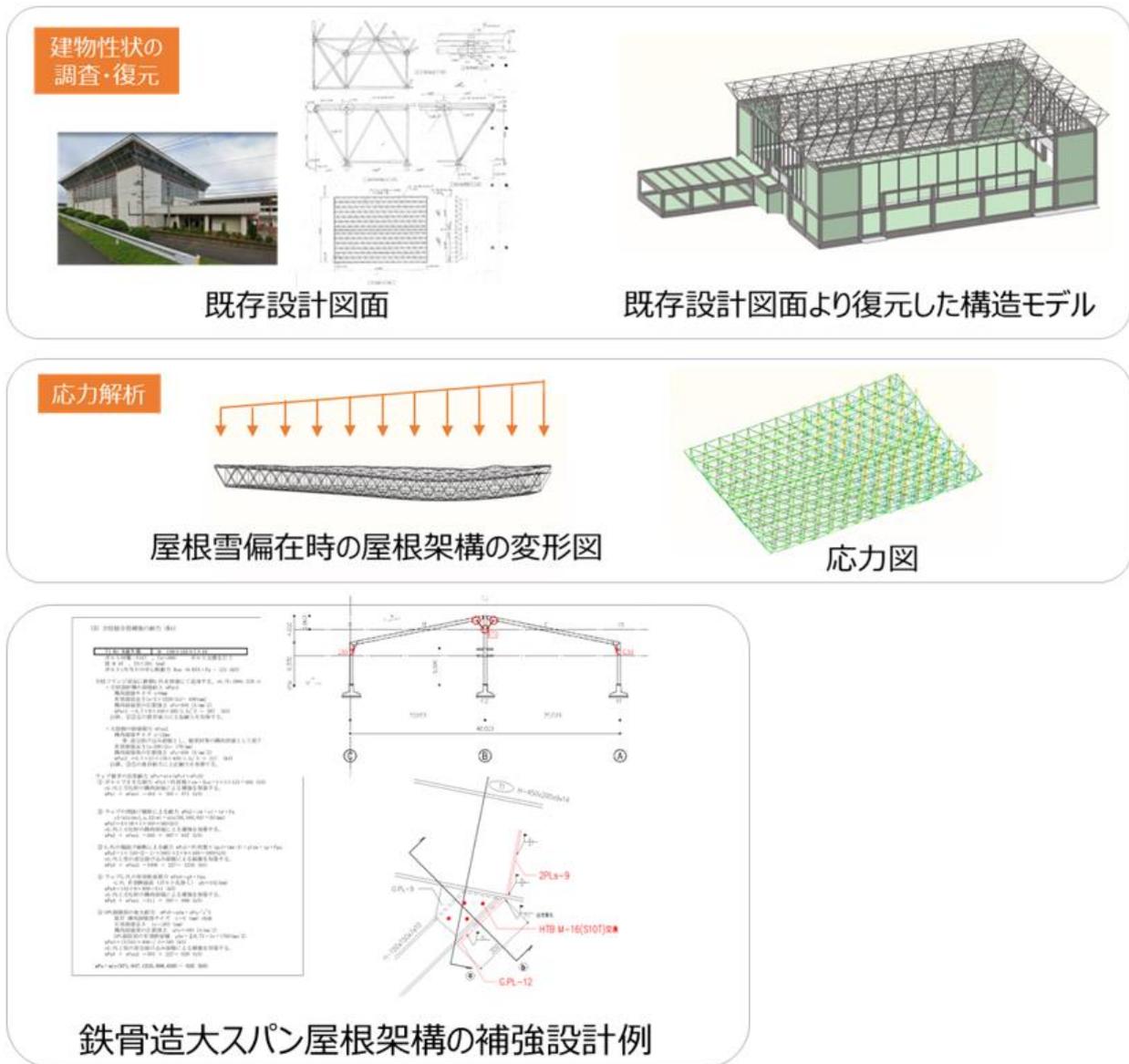


図 9 構造計算による建屋の耐雪性能評価イメージ

● 今後の展望

今回のユースケース開発の結果を自治体、ゼネコン、ディベロッパーなどに幅広く展開していくことで、シミュレーションや可視化技術を通じて、まちづくり・防災に係る計画策定を支援してまいります。

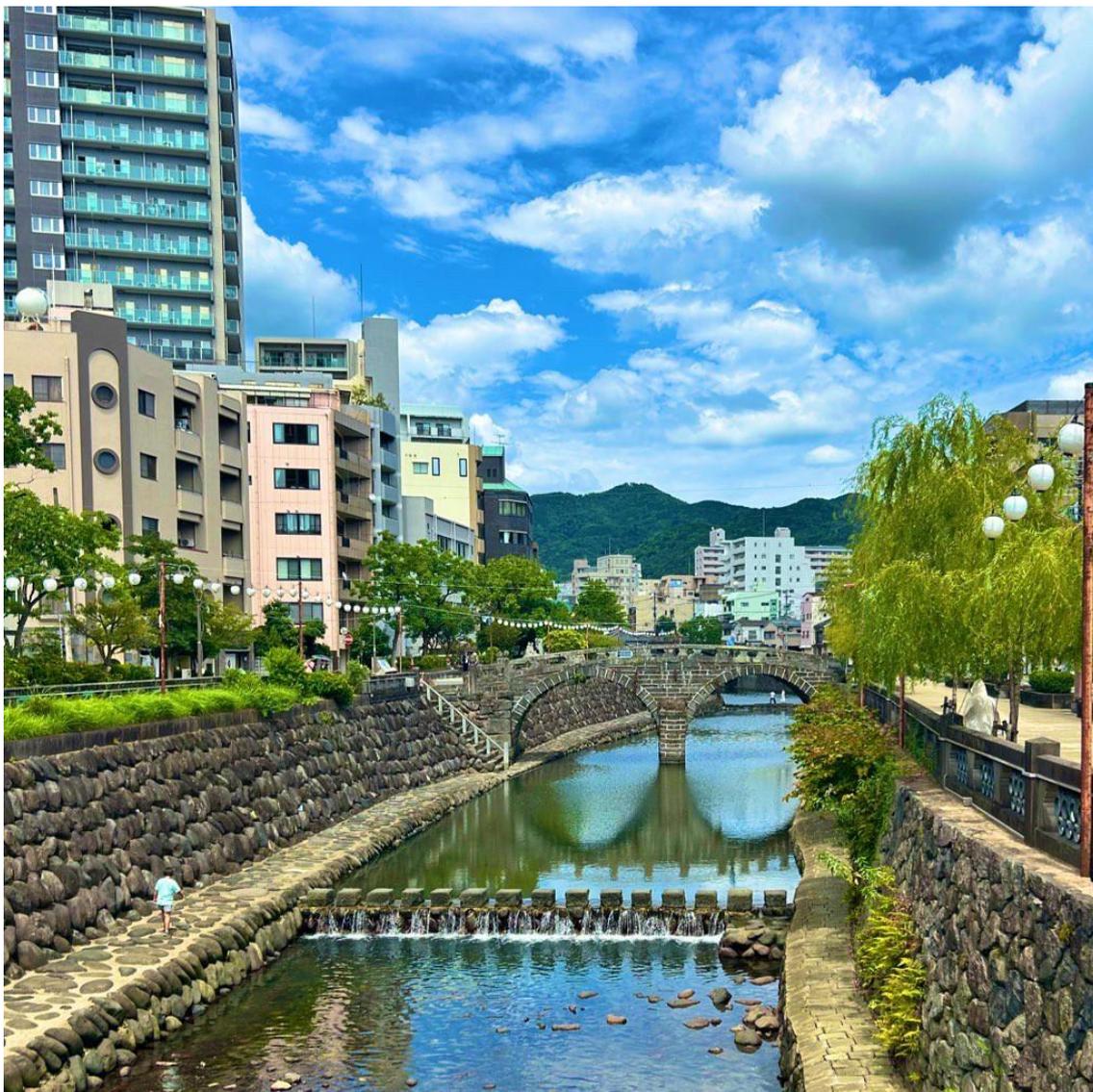
また、本ユースケース開発によって得られた 3D 都市モデルに関する知見、および KKE の建築構造に対する知見を活かし、2023 年度は株式会社ウエスコ様と KKE の共同提案体として、「Project PLATEAU」のユースケース開発実証「精緻な土砂災害シミュレーション」に取り組んでいます。今後とも、KKE が有する情報通信や環境解析、および災害リスク評価や構造設計に関わるシミュレーション技術など、幅広い知見を 3D 都市モデルと連携させることで、多様な分野での社会課題の解決に貢献することを目指します。

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

大きな自然災害に見舞われる度に想定外のことが起こり、悲惨な被害が発生していることがとても悔しいです。一度経験した被害が二度と発生しないように、事前想定に基づいて科学的に予測した被害が実際に発生しないように、対策を検討し施して「想定内」を広げていくための支援を続けていきます。

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.52 2024.04*

発行日 2024年4月1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