

解析雑誌

Vol.47 2022.01

Topics

- 簡易な車載型センシングシステムを利用した道路の見守り技術
路線バスを利用した道路・橋梁変状モニタリングシステム／公用車を利用した「生活道路健康診断サービス」／高速道路の段差計測システム
- インフラ維持管理へのデジタル計測ツールの活用
NavVis VLX／デジタル画像相関法 (DIC)
- 近接施工／段階施工解析
- 地下水流動変化の周辺への影響
- 斜面安定性の評価と土砂災害シミュレーション
- 解析アラカルト
河川構造物の耐震性能照査指針の改定／道路橋の耐震性能照査解析／金属疲労解析／老朽施設の耐震補強時の解析手法の選定

Journal of Analytical Engineering



2021 年から 2022 年へ

構造計画研究所
エンジニアリング営業 2 部長
富尾 祥一

間もなく2021年が終わり、2022年が始まろうとしています。思い返せば、2021年も前年から続く新型コロナウイルス感染症に振り回された年でしたが、10月1日に政府が緊急事態宣言を解除したことで、それまでに比べ活動しやすい状況になったことは皆様も実感されているところかと思います。その一方で、諸外国では新たな変異株が流行の兆しを見せていることから、日本政府は11月30日より外国人の新規入国を停止するという判断をしました。少々厳しい判断では？と思いますが、中途半端な水際対策よりも一層効果的な対策の実行を、という判断なのだろうと思います。

この巻頭言を執筆している12月上旬から、皆様の手元で本誌をお読み頂けるまでに、状況がどう変化しているか分からない部分もありますが、このような2021年の状況を見るに、2022年も引き続き新型コロナウイルス感染症対策と隣り合わせの日常が続くことは間違いありません。ソーシャルディスタンスの確保やマスク着用、アルコール消毒など、我々は良くも悪くも、そういった感染対策が求められる環境に慣れつつありますが、それはあくまでも平時の話であり、災害時など有事の際はまた別です。地震や津波など想定される自然災害に対して、国や自治体が協力し、防災計画やそれに必要な避難計画を策定していますが、コロナ禍における計画の実効性は未だ検証の道半ばにあります。例えば、避難に必要なバス1台を考えてみても、コロナ禍において確保すべきソーシャルディスタンスに伴い、通常よりも少ない人数しか輸送できず、さらに必要な台数が増えることになります。こういった“コロナ禍仕様”の防災計画の実効性を検証する取り組みは様々なところで進められており、そこから得られる学びで実効性を高めることもまた必要です。

弊社の解析グループでは、これまで様々な自然災害を対象としたシミュレーションに取り組んできました。その中には、防災計画を策定するための被害評価に用いられたものもあります。また、発生した災害が我々の暮らしに必要なインフラ施設や構造物にどういった影響を及ぼしているのか、その実態を捉えるための計測にも力を入れてきました。本誌においても、前号（2021年10月発刊）に続き、我々の至近の取り組みを掲載させていただきました。このような取り組みが、2022年も続く不確かな世の中において、皆様が継続的に活躍されるため、あるいは有事の際の備えのため、その一助となれば幸いです。

今後とも弛まぬ努力を続けて参りますので、何卒ご支援の程、よろしくお願い申し上げます。

解析雑誌 Vol. 47 2022. 01

巻頭言 2021 年から 2022 年へ 02

エンジニアリング営業2部長 富尾 祥一

Topic 1

- 簡易な車載型センシングシステムを利用した道路の見守り技術 04
路線バスを利用した道路・橋梁変状モニタリングシステム／
公用車を利用した「生活道路健康診断サービス」／
高速道路の段差計測システム(J-DAnswer)

Topic 2

- インフラ維持管理へのデジタル計測ツールの活用 08
NavVis VLX／デジタル画像相関法 (DIC)

Topic 3

- 近接施工／段階施工解析 10

Topic 4

- 地下水流動変化の周辺への影響 12

Topic 5

- 斜面安定性の評価と土砂災害シミュレーション 16

Topic 6

- 解析アラカルト 20
河川構造物の耐震性能照査指針の改定／道路橋の耐震性能照査解析／
金属疲労解析／老朽施設の耐震補強時の解析手法の選定

Kaiseki Portal / From Editors 27

簡易な車載型センシングシステムを利用した道路の見守り技術

物流や人流を支え、経済、文化、生活の礎となっている道路。高度にかつ複雑に張り巡らされたネットワークの規模は膨大で、今なお整備拡張が進んでいます。供用中の道路には、高度成長期時代に建設された橋梁、トンネル、盛土、切土、擁壁、舗装、付属物などの莫大な数の構造物が存在し、それらの中には供用年数の経過とともに補修・補強が必要な状況にあるものもあります。また、想定を超える過積載車両の通行や、多発甚大化する自然災害などによりダメージを受け、予想以上に劣化が進行し、ある日突然に崩壊、崩落事故を起こす事例も報告されています。

『道路の見守り』は、そのような事故による被害を未然に防ぎながら、道路網の機能を健全に維持しつつ、Life Cycle Cost軽減につながる道路保全活動の一つです。弊社でも様々な道路の保全活動に資するセンシング技術、データ分析技術を応用したソリューションを提供していますが、今回は、簡易な車載型センシングシステムを紹介します。

● 車載型センシング

車載型センシングとは、管理対象の構造物にセンサ類を固定するのではなく、計測装置を車両に搭載して、走行中に対象物を計測し、その状態を診断できるセンシングシステムのことで、専用車両を用いたものでは新幹線の軌道架線、高速道路では路面性状を計測診断する車両が以前から運用されています。今回ご紹介するシステムは、専用車両を用いずに、路線バスといった公共交通車両や自治体の所有する公用車、日常の道路点検で使用する巡回車などを使った車載型センシングシステムです。専用車両を製作せずに、計測装置を搭載した公共の車両を使って、通常業務のオペレーションを行いながら道路保全に必要な様々な情報を収集・分析・診断ができるため、専用車両によるセンシングに比べて経済的で人手もかからず、かつ診断や経年変化を捉えるために必要な定量データを高頻度に蓄積できるメリットがあります。

● 路線バスを利用した道路・橋梁変状モニタリングシステム

日常生活や防災上重要な道路網を走り、市民の足として定期運行されている路線バス。バスは人を運ぶために特有な構造をした大型車両で、走行中のバスの車軸は車体とは絶縁され、道路の凹凸や橋梁などの構造物の動きに追従します（図1）。

その特性を利用し、バスの後輪車軸の上下振動を加速度センサで捉え、その直下の道路の状態、また橋梁の変状をモニタリングすることができるシステムを開発しました。（特許第5384166号）

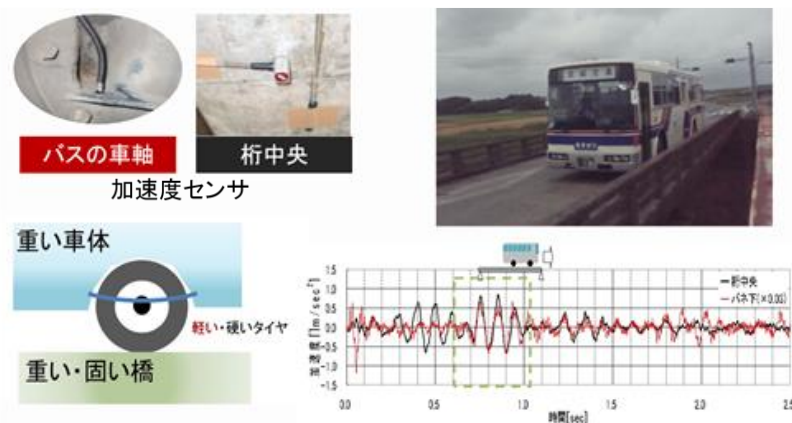


図1 走行中のバスの車軸が桁と追従して動く様子を捉えた実験

このシステムは路線バスが日々収集するデータを使って、路線上の道路や橋梁がひどく傷んだ状態で放置されていないかどうか監視し、定期目視点検を補完する目的で運用します。路面の状態は定量的に評価し、地図上に可視化することが可能です（図2）。

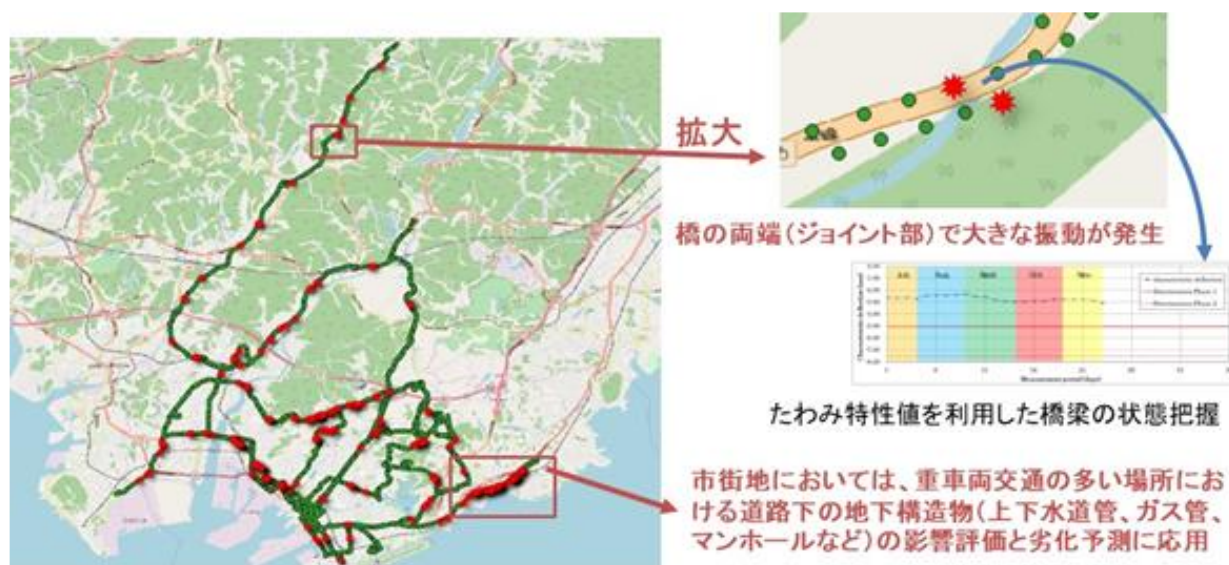


図2 宇部市営バスを用いたモニタリング結果の一例

2010年から山口県宇部市営バスを用いて、単純梁構造を有する橋梁の加速期から劣化期に至る変状を捉える実証実験を続けています。過去、ポルトガル、フィンランドで実証実験が行われた他、Joint Research Centre (European Commission)では、Indirect Structural Health Monitoring(i-SHM)という概念を提唱し、将来の自動運転車両の普及を見据えた車載型センシングに関する調査研究が行われていて、その調査報告で紹介されるなど海外からも注目されている技術です。

現在、路線バスを使ったモニタリングシステムの運用開始を見据へ、ワイヤレスデータ通信網を使い、路線バスに搭載したモニタリングシステムの遠隔操作および、遠隔データ収集の実現に向けて開発を進めています。

● 公用車を利用した「生活道路健康診断サービス」

全 122 万 k m にもおよぶ日本の道路のうち 8 割以上が市民生活に密着した生活道路で、交通量が少なくダメージを受けにくいことから、その多くが不具合に対して都度修繕を行う、いわゆる「事後保全」で対処されています。今後、長期供用を続ける中で、経年劣化の進行に伴い非常に多くの場所で不具合が発生することも予想されています。

そういう事情もあって、生活道路でも定量的なデータに基いて、健全性を診断し予防保全的な処置を行うことが必要になってくると考えられていますが、交通量の多い幹線道路で実施しているような点検を定期的に行うことは財政的にも負担が大きく現実的ではないため、より簡易に安価で持続可能な診断方法が求められています。

そこで弊社は、(株)ゼンリンデータコムと共同で、生活道路を管理する市町村が保有している公用車を使って、日々の業務の“ついで”に道路の状態を簡易に安価で診断できるサービスの提供を開始しました。(NETIS 登録技術 KE-170106-VR)

図3のように、使用する公用車にスマートフォンを設置して、日常の業務を行いながら走ると、走行中の車両の振動の大きさと位置情報が紐づいたデータが専用サーバーに集まって、一定程度データがたまると凹凸の大きなところや、凹凸の進展の早い場所が地図上にわかりやすくプロットされます。

図4は2015年～2017年に実施した藤沢市における実証実験の診断結果です。現在、複数の地方自治体で運用しています。

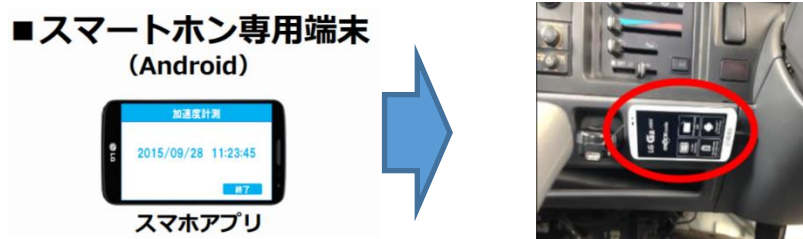


図3 車両へのスマートフォン設置

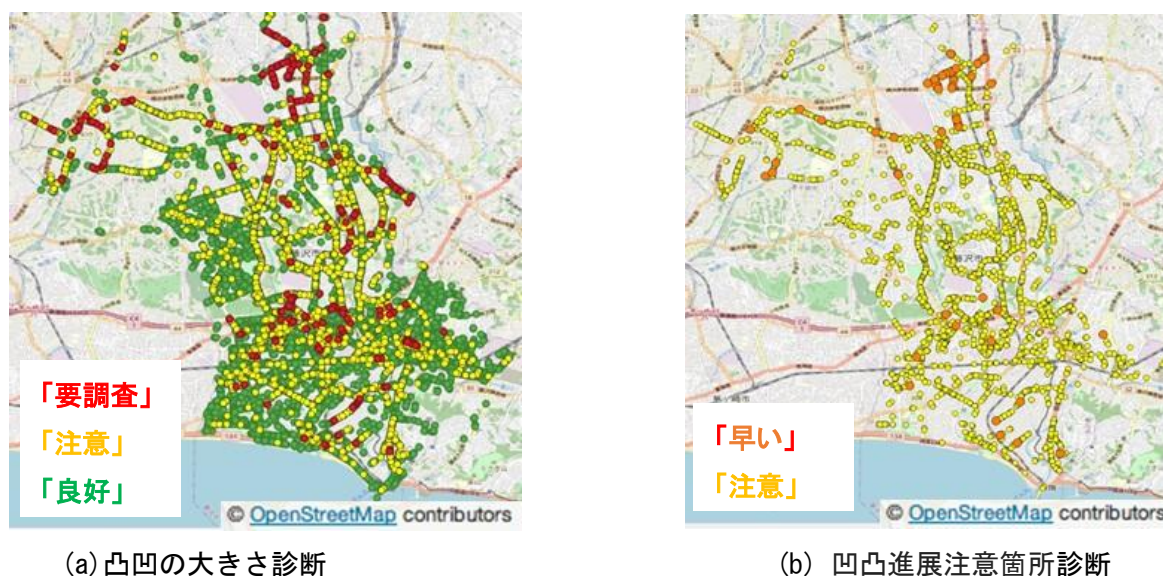


図4 道路健康診断事例

● 高速道路の段差計測システム(J-DAnswer)

最後にご紹介するのは、東日本高速道路(株)、中日本高速道路(株)、西日本高速道路(株)および(株)高速道路総合技術研究所と共同開発した、道路巡回車にレーザー変位計を取り付けて、日常点検中に通行規制を行うことなく80km/hで走行しながら高速道路上の路面の段差量計測を行うことができるシステムです(図5)。(特許第6666207号)

レーザー変位計で収集した段差を含む凹凸を特許技術によりデータクレンジングし、2m水系法段差計測と同じ方法で、管理基準を超える段差や進展の早い段差を図6のようにキロポスト単位で集計します。後で詳細な位置を特定することも可能です。

現在、車軸に設置した加速度センサを使ってジョイント部材の変状を捉える実証実験を進めていて、今後、ジョイントの破損が検知できる機能を追加する予定です。



図5 高速道路の段差計測システム J-DAnswer

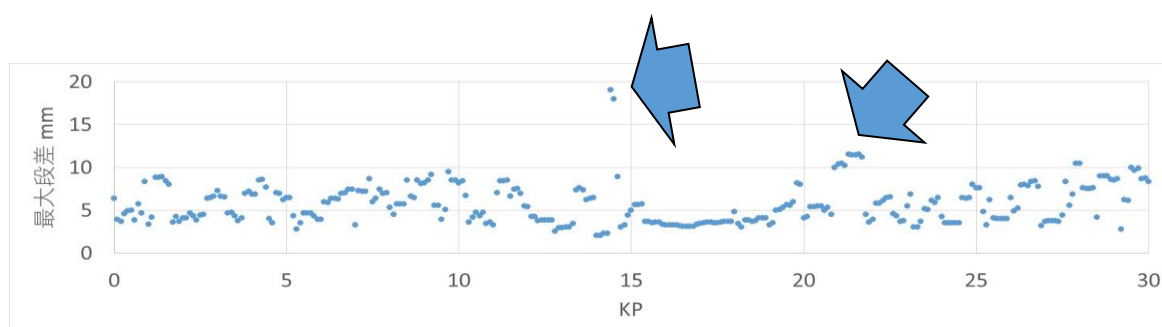


図6 管理基準を超える段差および進展の早い段差の位置特定例

● まとめ

今後、目視点検を基本とした「Time Based Maintenance」のみではなく、「Condition Based Maintenance」を併用し、保全活動における効率化と費用の軽減が進むものと考えられます。その実現には、センシングやデータ分析技術を活用した保全技術の高度化が必要で、ご紹介した車載型センシングシステムは一つのカギとなります。これからも、社会のニーズに寄り添いユニークで新しい保全技術の発展と普及に貢献してまいります。

参考文献

- ・矢部明人, 宮本文穂, 磯田聡史, 谷信幸: 路線バスによる中小橋梁モニタリング手法の開発, 土木学会論文集 69 巻 (2013) 2 号 p.102-120, 2013.6
- ・The Way Forward for Indirect Structural Health Monitoring (iSHM) Using Connected and Automated Vehicles in Europe : Joint Research Centre
- ・はたらく車プロジェクト ～公用車等の徹底活用によるビッグデータ利活用モデルの構築～、https://www.nict.go.jp/collabo/commission/k_178a07.html
- ・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.
- ・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.
- ・Hiroshi Iwabuki, Akito Yabe, Shuichi Ono, Shunsuke Tanaka: A study on fabrications and vibration characteristics of steel finger joints simulating damage stages, IABMAS2020

J-DAnswer

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



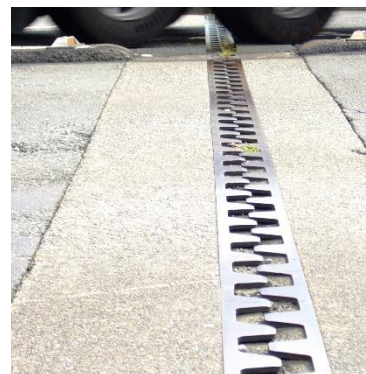
GPSで
段差位置を測定



簡単操作で、業務中の操作は必要なし
タブレットに路面の測定データを保存



車体下に
レーザー変位計を設置

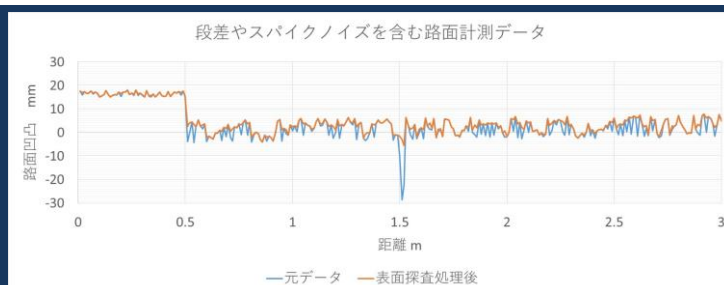


道路巡回車に取り付けて、路面の段差計測を日常
点検で行うことができるシステムです。

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

インフラ維持管理へのデジタル計測ツールの活用

構造計画研究所（KKE）では、J-DAnwser の他にもインフラ維持管理に活用可能な別タイプのデジタル計測ツールをご提供しています。

● NavVis VLX による空間計測

NavVis VLX は点検現場等の対象空間の 360 度パノラマ画像と点群データを、人が歩行しながら高速・高品質に 3 次元計測するウェアラブルツールです（ドイツ NavVis 社、図 1）。これにより作成したバーチャル空間は Web 上で簡単に閲覧可能なので、現場に赴いていない技術者も高い臨場感で正確に状況を把握出来ることとなり、点検品質の向上と維持管理業務の効率化を図ることが出来ます。点検の他、災害や事故、建設工事現場の状況保存と共有、取得情報からの解析モデルやシミュレーション空間の作成等、様々な目的で利用されています。

この技術をベースにした橋梁の点検・調査・診断・設計の情報共有プラットフォーム

Bridge Studio（構造計画研究所、川田テクノロジー、川田建設の共同開発、図 2）もそれぞれの現場関係者間で活用されています。



図 1 NavVis による空間の計測と参照



図 2 Bridge Studio®

● デジタル画像相関法（DIC）による歪み・変形計測

ステレオカメラ画像からコンクリートや鋼材表面の歪みや変形を非接触で計測するデジタル画像相関法（Digital Image Correlation, DIC, 図 3）は、主に実験室内で試験体を対象に活用されてきた手法ですが、短期間の計測であれば、近年フィールドの実構造物にも適用され始めています。

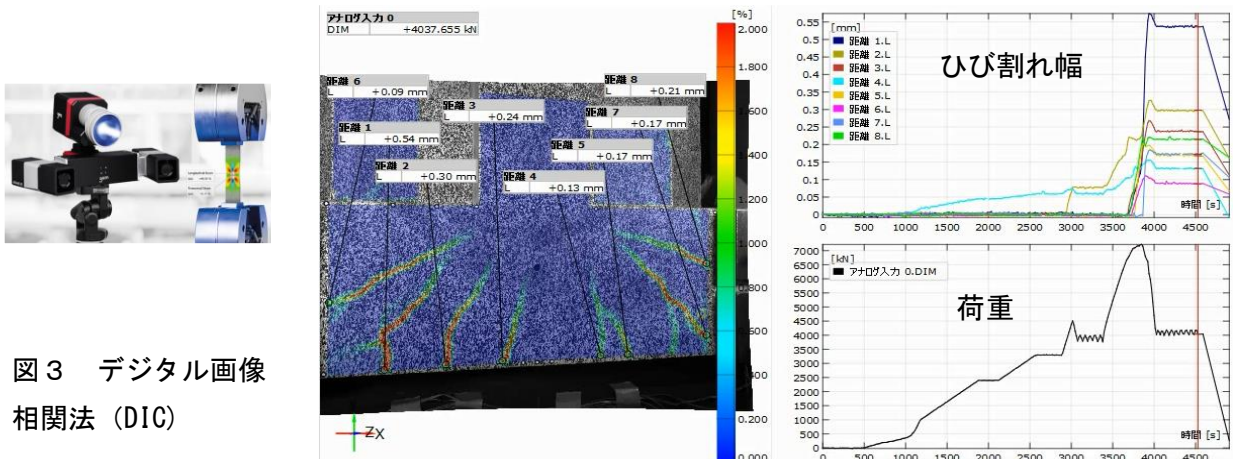


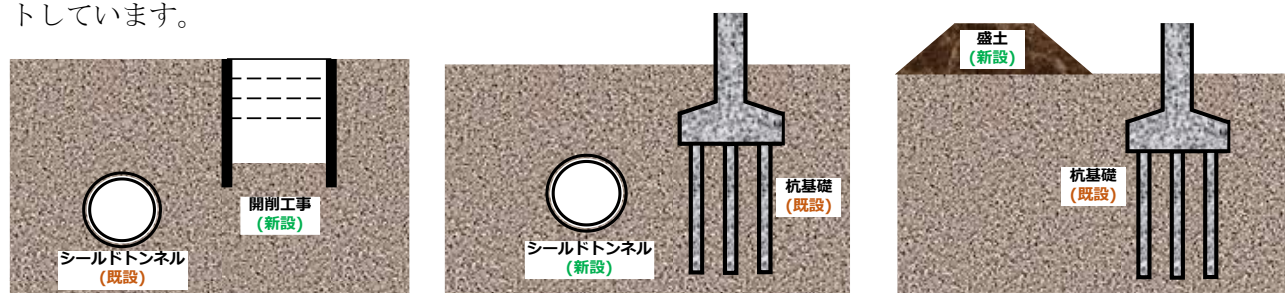
図 3 デジタル画像相関法（DIC）

近接施工／段階施工解析

地下工事の進展に伴う周辺への影響変化や、劣化や補強を経過した構造物の状態を評価する場合は、遷移する事象ステップ毎にモデルの形状や状態を一部変更しながら、応力や変形を引き継いでいく段階的な解析が必要になります。

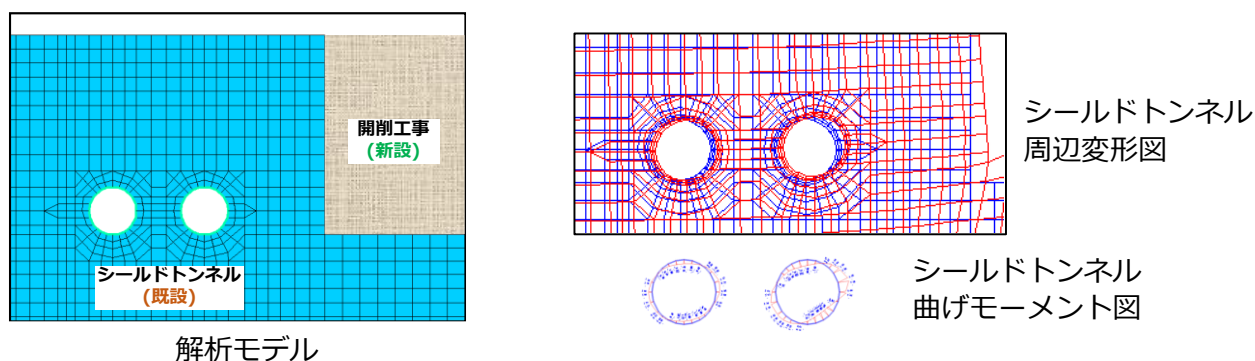
● 近接施工解析

既存の構造物に近接した位置における開削工、基礎工、トンネル、盛土等の施工時に、それらの工事中の地盤変形が近接構造物に及ぼす影響を解析的に評価し、周辺に配慮した工事計画立案をサポートしています。



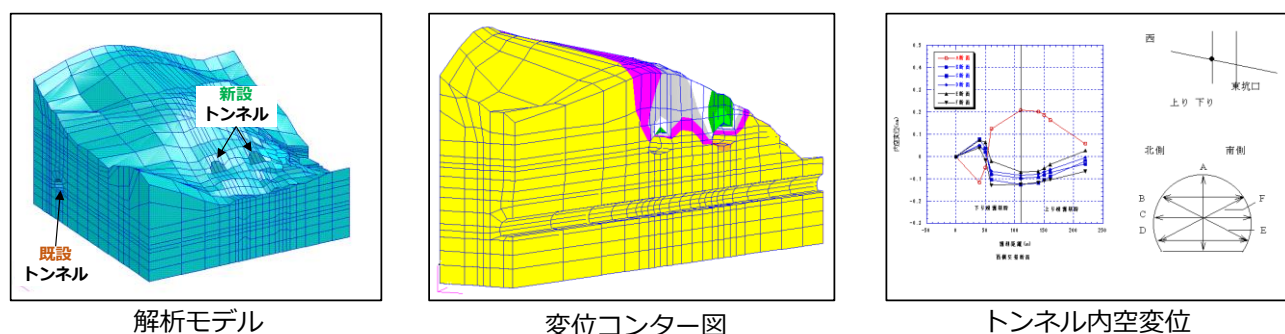
(1) 開削工事の影響検討

開削工事に伴う既設シールドトンネルへの影響を、施工ステップ（シールド掘削→セグメント設置など）を考慮した2次元FEM解析により検討しました。



(2) トンネルの交差影響検討

既設トンネルの上部に新設トンネル2本が施工される場合の既設トンネルに及ぼす影響を検討した事例です。トンネルが斜交しているため3次元FEM解析を用いました。

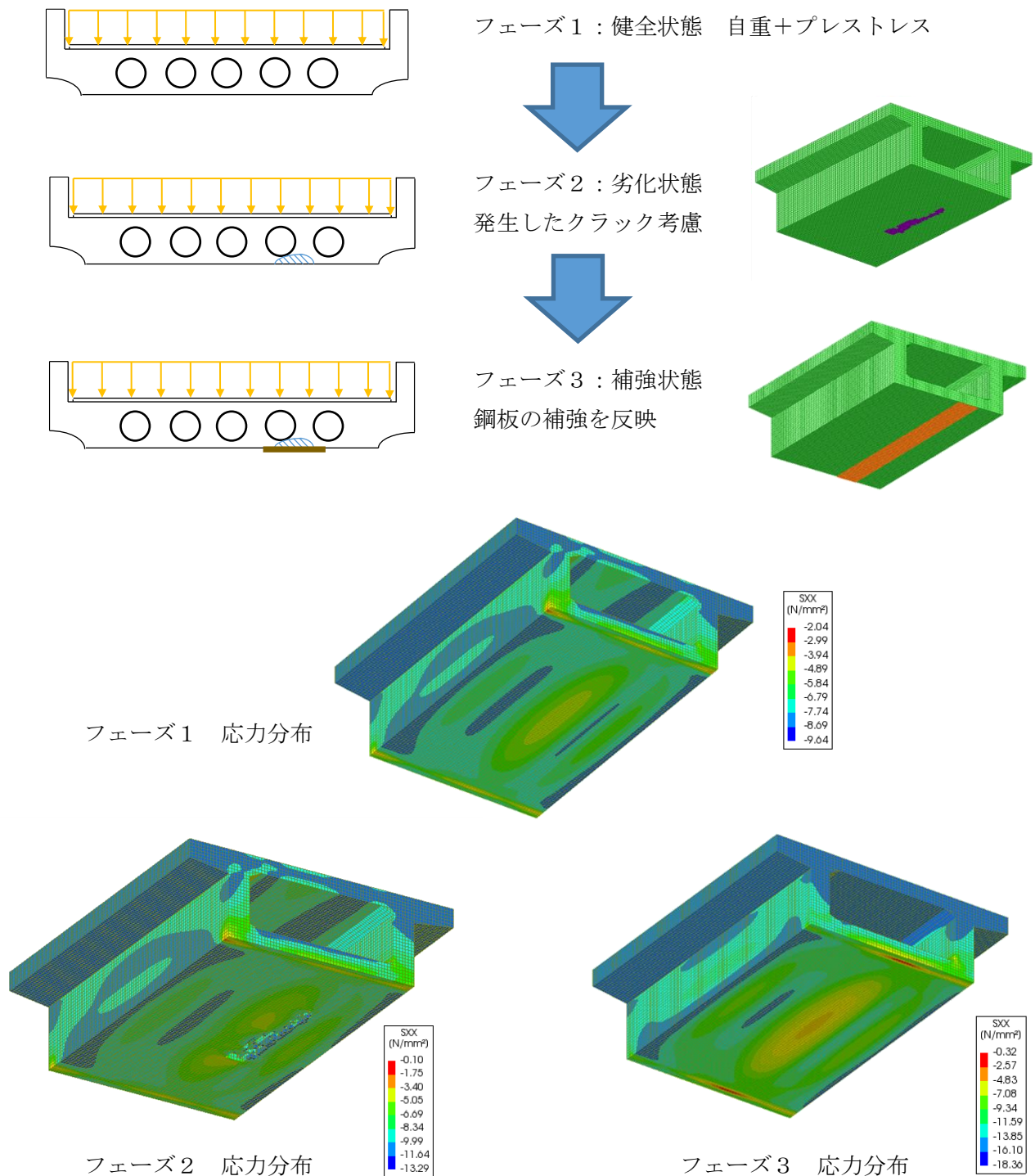


以上の他にも、下記のような事例があります。

道路トンネルの近接施工検討	盛土圧密沈下の影響検討
河川堤防が鉄道盛土に及ぼす影響検討	橋台設置に伴う近接施工影響検討
送電鉄塔への近接施工影響検討	近接施工地震時影響検討

● 構造物の段階施工解析

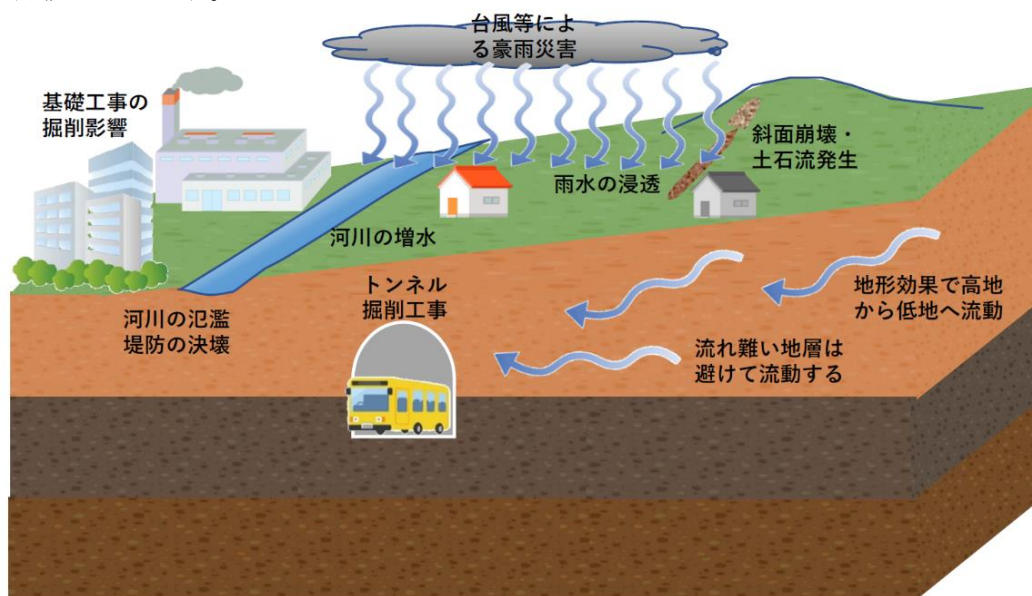
老朽化したPC橋梁主桁の補強効果検討のため、下記の3フェーズの段階解析を実施しました。



地下水流動変化の周辺への影響評価

基礎構造物の建設やトンネル工事の周辺影響に関連するトピックスをもう一つ。

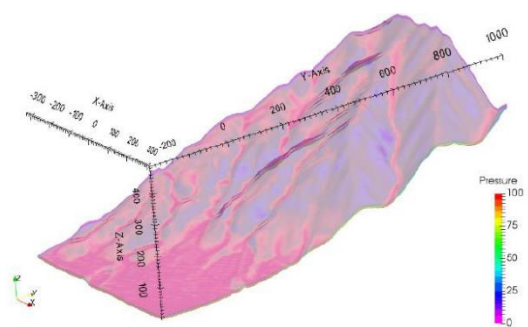
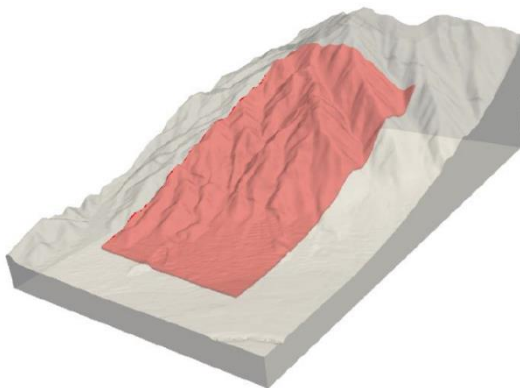
地圏環境域で水は循環しており、大気中や海・河川だけでなく、地下水として地盤内部を流動しています。この流れは気象や地形、地盤物性が安定していればおおむね定常的ですが、台風や地下工事等により変化を強いられた場合には、周辺の構造物に（特に大深度において）大きな水圧が作用する等、無視できない影響が現れることがあります。このような現象を浸透流－地盤－構造物の相互作用解析により評価しています。



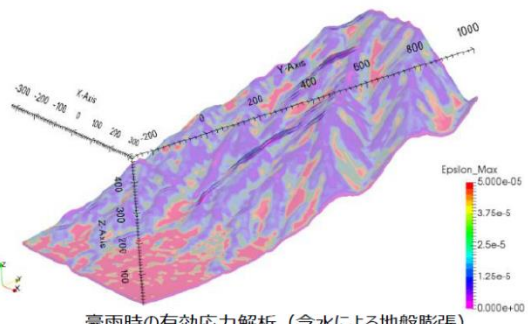
地圏環境域での水の循環と周辺への影響

● 解析の初期設定

浸透流や有効応力解析の初期条件の設定のために地形効果や地盤物性を考慮して地下水流動場を推定します。



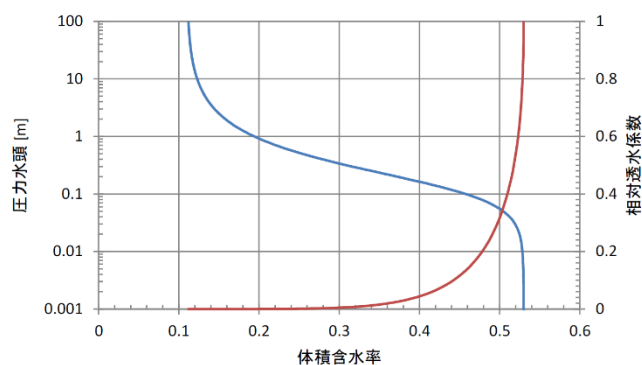
豪雨時の有効応力解析（表層の間隙水圧分布）



豪雨時の有効応力解析（含水による地盤膨張）

また、透水試験から土中の水の流れやすさを示す透水係数を求めるには長時間を要し、不飽和（土中の間隙が

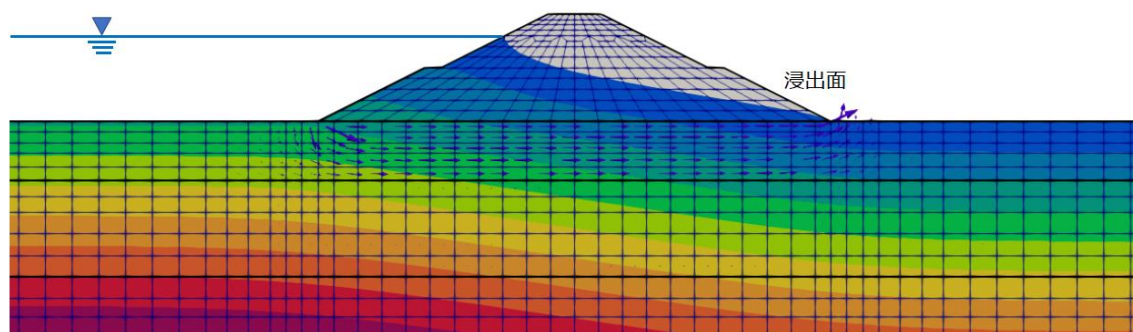
水で満たされていない) 条件における水分特性曲線など水理特性の推定は非常に困難なため、これらの物性値は、供試体レベルの要素試験結果や現場で得られた観測記録に対し数値解析による合わせこみを行うことで推定しています。飽和流れを評価する場合には透水係数の推定が、不飽和流れを評価する場合には水分特性曲線 (VGモデル) や相対透水係数が必要です。



水分特性曲線と相対透水係数

● 構造物を対象とした浸透流・有効応力解析

有効応力解析により、浸透流による地盤変形を考慮し、堤防やダム、矢板等の止水性能や構造変形を評価しています。

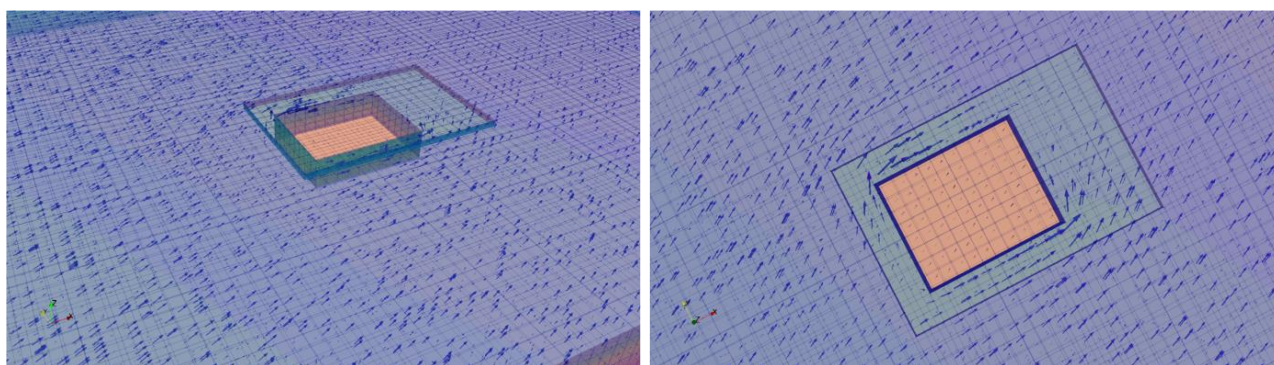


手法：二次元／三次元有限要素法による浸透流・有効応力解析

条件：流入出、浸出面、構造物を考慮した定常・非定常解析

● 地盤掘削の影響評価

地盤掘削や構造物施工に伴う地下水流動場の変化や構造変形を、段階施工による境界条件の変化を順次適切に与えて評価しています。



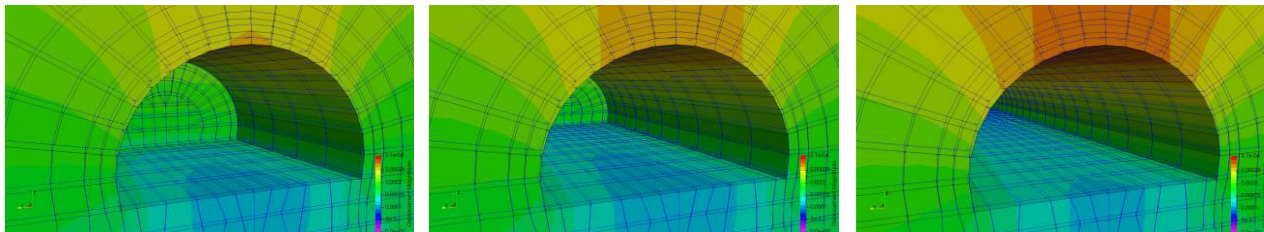
掘削工事による地下水流動場の変化

手法：二次元／三次元有限要素法による浸透流・有効応力解析

建物のモデル化：ソリッド要素／シェル要素／ビーム要素

● 地下水流動場を考慮したトンネル掘削解析

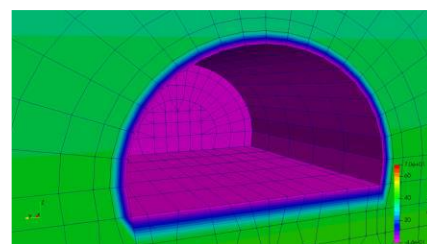
建設箇所が大深度になると大きな間隙水圧の作用があります。下図は常時応力場、地下水流動場を計算し、段階施工を考慮した有効応力解析でトンネル施工を検討した例です。段階施工ではトンネル掘削に伴い生じる解放面に対し、適切な境界条件を順次設定します。



岩盤掘削と支保工、トンネル構造物の設置を順に繰り返しながら実施する段階施工の検討例（有効応力解析）

二次元解析による検討であっても、応力解放率を設定することで三次元的な効果を考慮した検討が可能です。

手 法：二次元／三次元有限要素法による有効応力解析
構造物のモデル化：ソリッド要素、シェル要素、ビーム要素

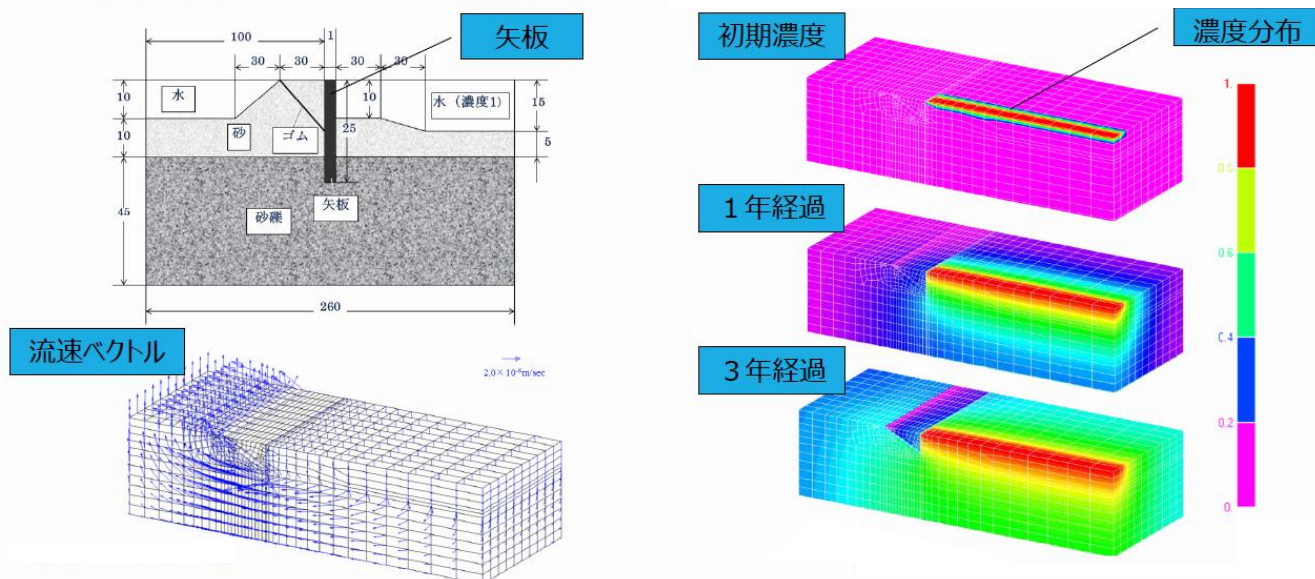


地下水流動場の考慮と掘削による水圧変化

浸透流評価解析コンサルティング

- 地質構造を考慮した土壌内の浸透流解析
- 地下水流動、土壌汚染拡散などに適用可能
- 矢板などの対策効果の予測も可能

【浸透流解析例】 汚染物質の土壌拡散予測



地盤と構造物の2次元動的相互作用解析プログラム

SuperFLUSH/2D for Windows Ver6.2

特長

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

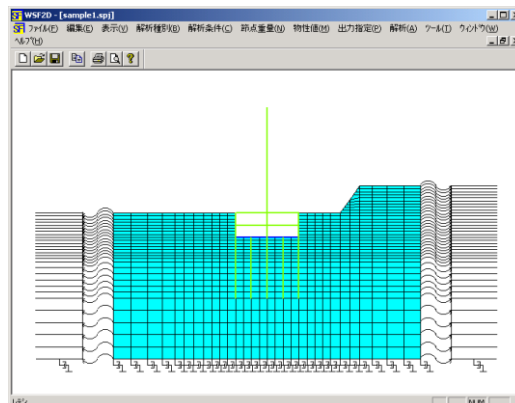
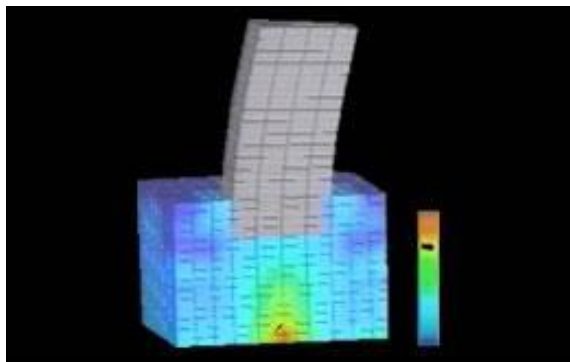
機能概要

- ・複素剛性を用いた振動数領域における複素応答解析
- ・等価線形法により地盤の非線形性を考慮
- ・要素タイプ
平面歪要素、ビーム要素、剛体ビーム要素、平面応力要素、
並進ばね要素、ジョイント要素、ダッシュポット要素
- ・側方境界条件
エネルギー伝達境界、粘性境界
- ・底面境界条件
粘性境界、固定境界
- ・外乱条件
鉛直伝播波動(水平方向、鉛直方向同時入力可能)、
進行波、点加振
※液体要素、回転ばね要素を用いた解析、擬似3次元解析も、
支援ツールを利用して解析可能

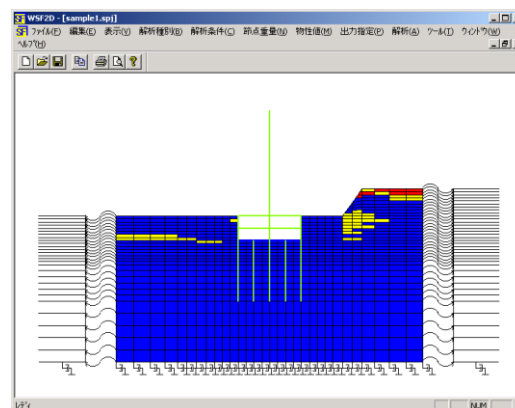
出力項目

以下のファイル形式で解析結果を出力する事が可能です。

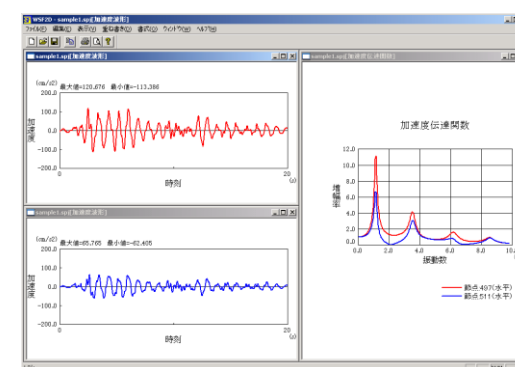
- ・CSV形式(時刻歴、伝達関数、応答スペクトル)
加速度、速度、相対変位、応力、歪、ビーム断面力
- ・MSC.NASTRAN解析結果ファイル形式
加速度、速度、相対変位、応力、歪、
ビーム断面力の最大値出力



基本画面



収束誤差の出力



解析結果の表示例

SuperFLUSH/3D

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

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

表記の社名及び製品名等は、各社の登録商標または商標です。

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

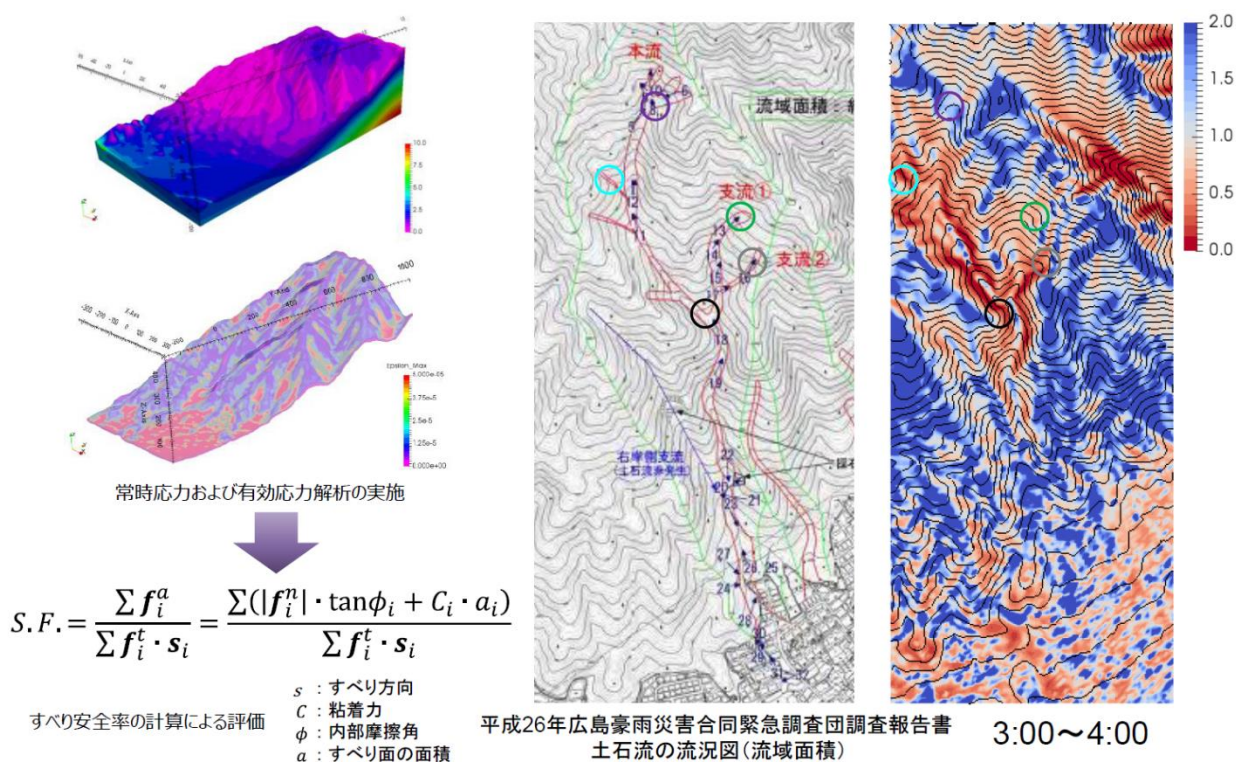
斜面安定性の評価と土砂災害シミュレーション

前トピックスと一部共通の解析手法を用いる問題として、斜面の安定性評価があります。

斜面崩壊（土砂崩れ、土石流など）には、豪雨をきっかけにして発生するものと、地震をきっかけにして発生するものがありますが、それらが発生する危険性が高い場所の評価や、発生した場合の下流域の被害範囲の想定などを行っています。

● すべり安全率の算定

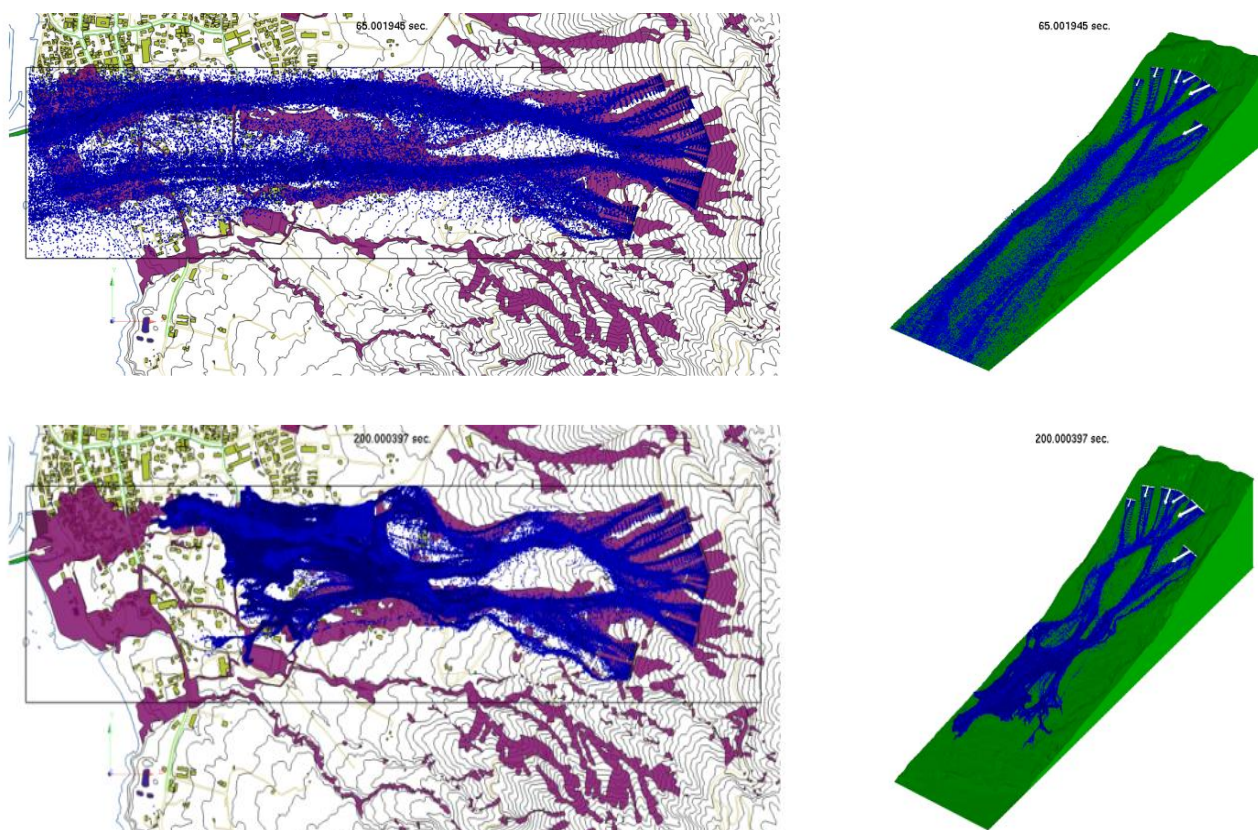
豪雨時や地震時に発生する斜面崩壊に対する安全性の検討手法として、従来からすべり安全率の算定による評価が用いられています。有効応力解析結果から想定する面上のすべり安全率の計算を行うことで、より精緻な斜面崩壊・土石流発生の危険度の評価やハザードマップの作製を行うことができます。



上記の平成26年8月豪雨による広島市安佐北区・南区の斜面表層崩壊では、現地調査結果（実際の崩壊箇所）と解析結果（すべり安全率が低い箇所）が概ね一致しました。

● 土砂災害シミュレーション

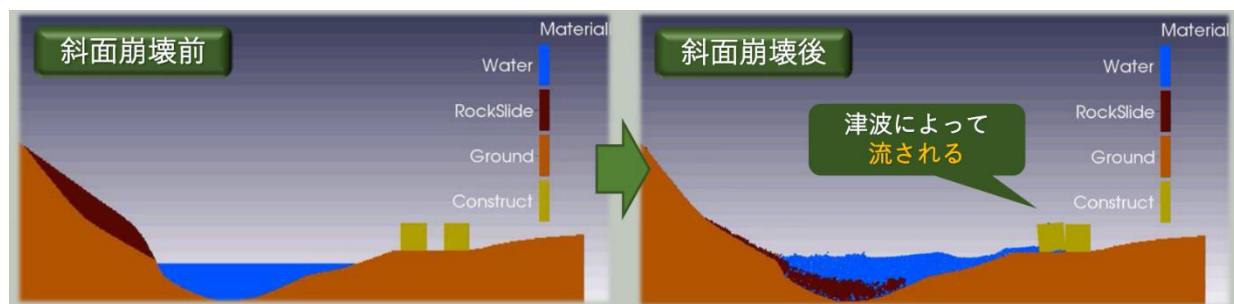
斜面崩壊後、土砂が下流域に到達する範囲やその際に押し寄せる土砂の量・速度は、土砂自体の粘度の他、流下経路上の障害物や途中で流れに加わる物の影響により変化します。また土砂が川や池に流れ込むことで、対岸に津波に似た現象が発生することもあります。不確定要素が多い土砂災害シミュレーションは想定条件を変えて複数パターン実施しています。その結果は斜面の補強や砂防ダムを設置位置、高さ、規模などの検討、あるいは地域防災計画に活用されています。



土石流シミュレーション（土砂粘度の違いによる到達エリアの比較）



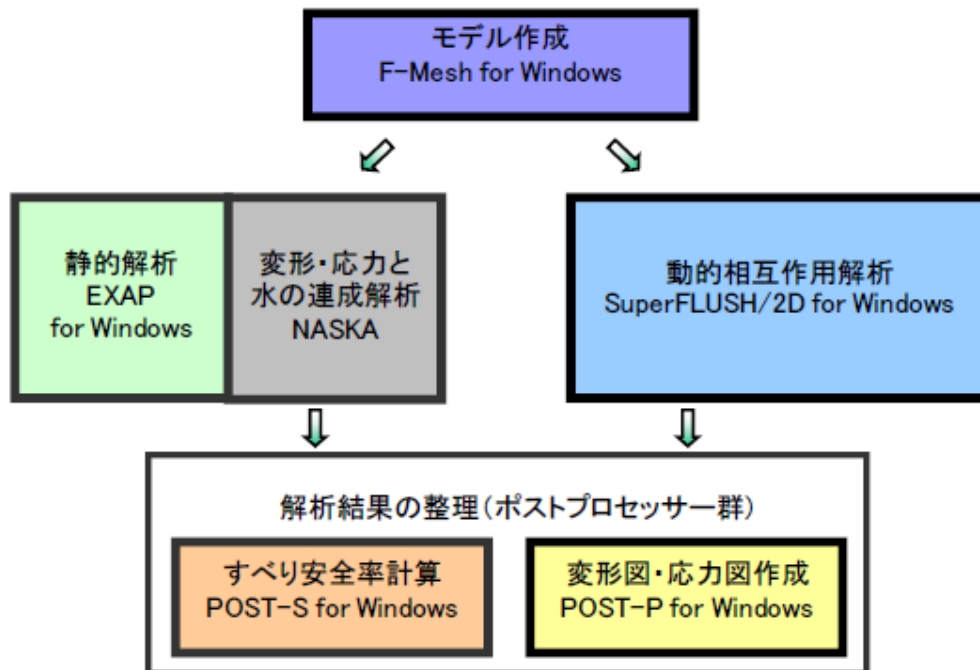
着目施設への土砂到達の可能性と到達する際の外力評価



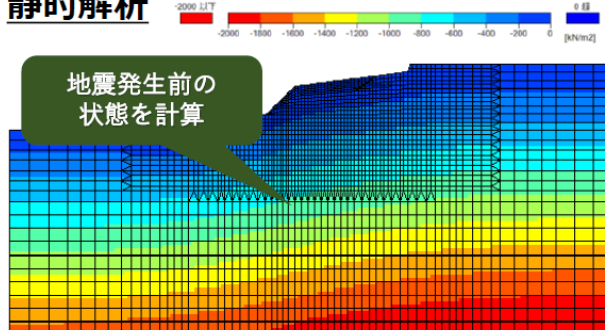
土砂流入により発生する津波被害

販売ソフトウェアによる斜面の安定性評価

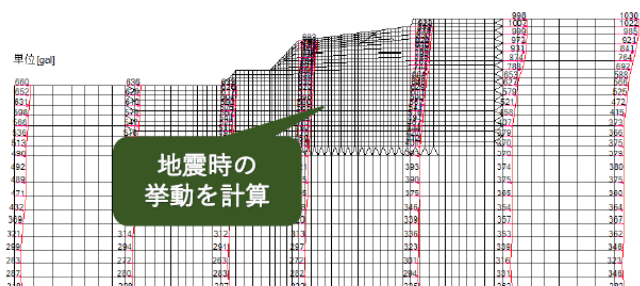
-FRONT for Windows のご紹介-



静的解析

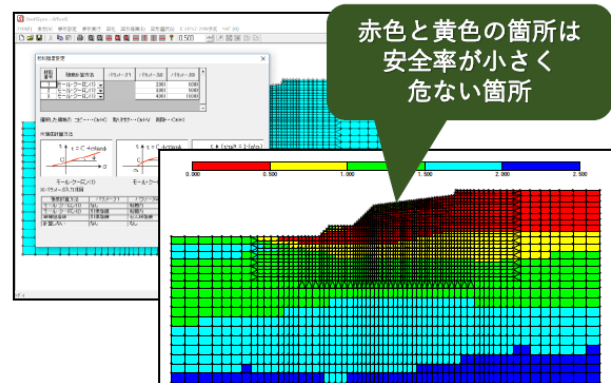
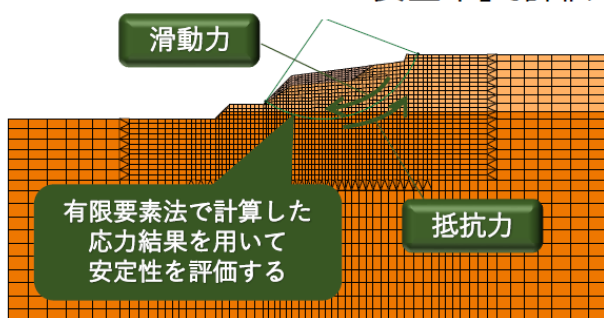


動的相互作用解析



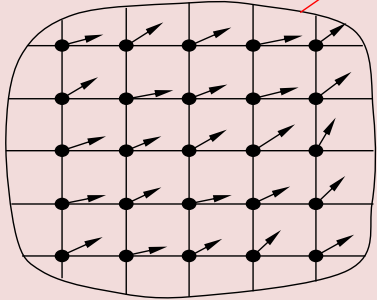
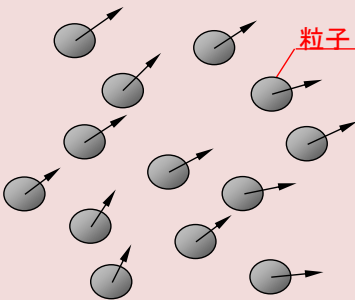
斜面の安定性評価

⇒「安全率」で評価

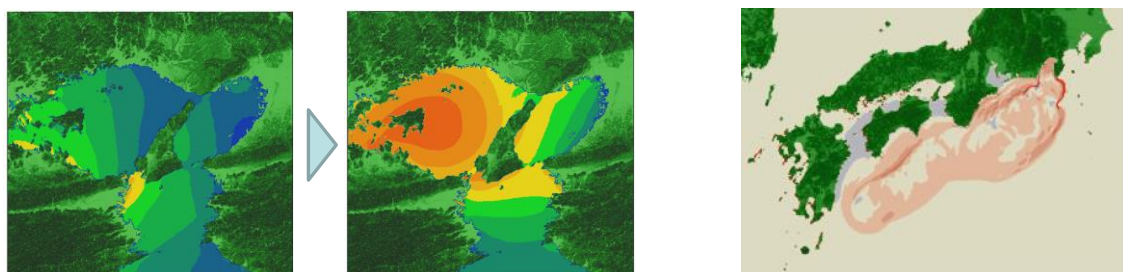


流体解析，流体－構造連成解析 コンサルティング

水や風の流れ、あるいはそれらと固体との関りをシミュレートする際には、複数の手法を適切に使い分けてご提案しています。

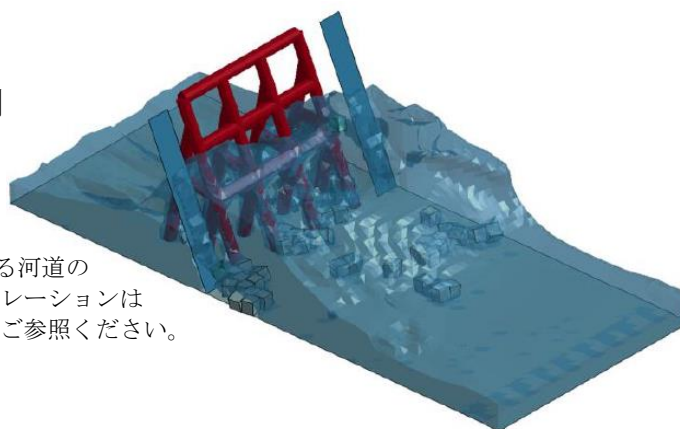
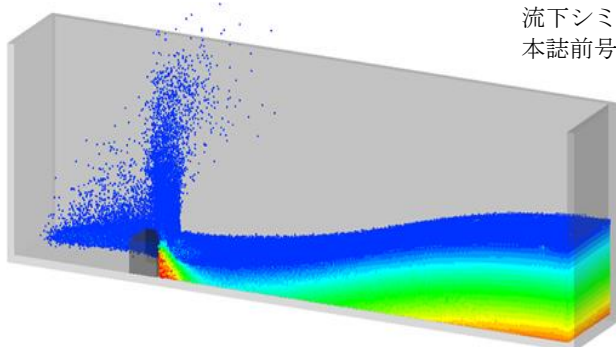
手法	差分法／有限要素法	粒子法
ここが 違う	格子を用いる 計算結果によって格子は変形しない 	格子を用いない 計算結果をもとに粒子が移動する 
	自由表面流れには 不適	自由表面流れには 最適

■ 広域の高潮・津波シミュレーションには差分法を用いています。



■ 構造－流体連成問題には ALE 法など有限要素法を用いる場合（主に構造側の応力や変形に着目）と粒子法を用いる場合（主に流体挙動に着目）があります。

ALE 法による河道の
流下シミュレーションは
本誌前号をご参照ください。



■ 飛沫が舞い上がるような激しい水流や、現象前後の流入出量が問題となる場合は（解析中の総質量が保存される）粒子法を用いています。

解析アラカルト

ここまでにご紹介した以外にも、お伝えしておきたい解析関連の情報が 있습니다。実施機会が多い各種の耐震設計指針に沿った耐震性能照査解析についてもいくつか触れておきたいと思います。

● 河川構造物の耐震性能照査指針の改定

河川構造物の耐震性能照査指針は令和2年に改定になりました。改定の主なポイントは下記の4点です。

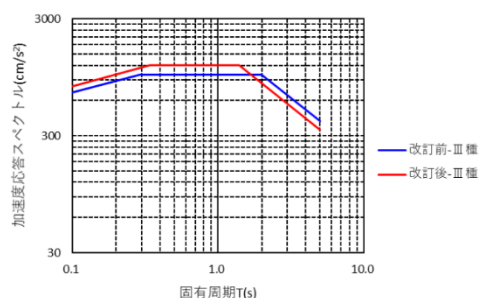
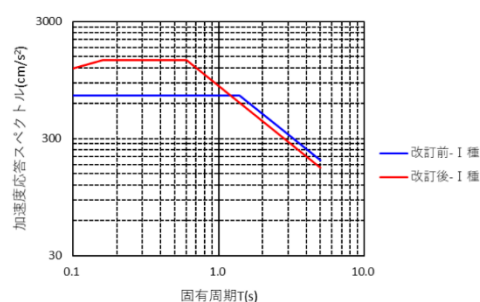
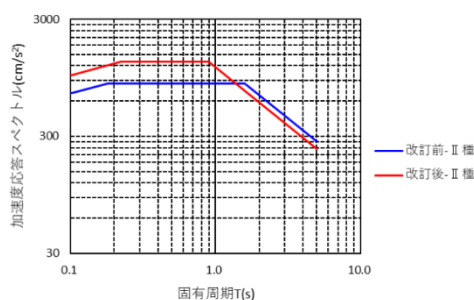
(1) 入力地震動 L2-1 の見直し

最新の研究成果を踏まえ、L2-1 標準加速度応答スペクトル、地表面水平震度、地域別補正係数の見直しが行われました。この結果、入力地震動は基本的に大きくなります。

地域別補正係数は区分けが増えます

地域別補正係数
A,B,C

地域別補正係数
A1,A2,B1,B2,C



(2) 曲げ許容曲率の見直し

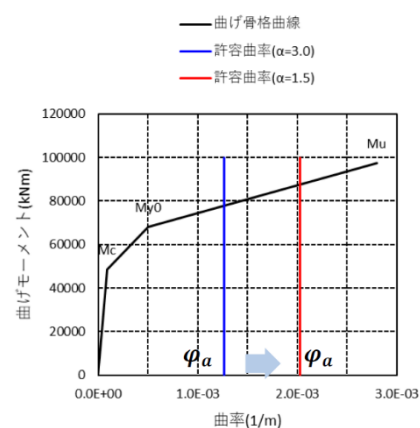
曲げ破壊型と判定された門柱・堰柱の許容曲率を算出する際の安全係数 α については、最新の知見から L2-1, L2-2 とともに同じ値を採用することになりました。この結果 L2-1 の許容曲率は大きくなります。

改訂前 安全係数 α

	レベル2-1	レベル2-2
耐震性能2	3.0	1.5
耐震性能3	2.4	1.2

改訂後 安全係数 α

	レベル2-1	レベル2-2
耐震性能2	1.5	1.5
耐震性能3	1.2	1.2



(3) 固有値解析実施の標準化

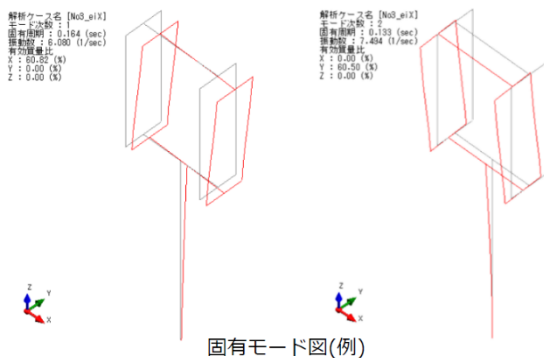
静的照査法とするか、動的照査法とするかを選定する判断手順が明確化され、固有値解析の実施が必須となりました。

固有値解析

静的照査法

動的照査法

剛性や質量が極端に異なる部材で構成された複雑な施設の場合や施設形状が左右非対称である場合、必ずしも1次振動モードが卓越しません。構造物全体を1自由度系を置き換えることが困難な場合は動的照査法を用いる必要があります。



固有値解析結果(例)

モード 次数	固有周期 (sec)	振動数 (1/sec)	有効質量比		
			X	Y	Z
1	0.164	6.08	61%	0%	0%
2	0.133	7.49	0%	60%	0%
3	0.064	15.58	25%	0%	0%
4	0.041	24.64	0%	0%	4%
5	0.037	26.68	0%	14%	0%
6	0.034	29.80	0%	0%	0%
7	0.032	31.01	12%	0%	0%
8	0.027	37.03	0%	0%	16%
9	0.026	38.53	0%	0%	0%
10	0.025	39.39	0%	0%	0%

(4) 液状化判定の見直し

液状化判定に用いる地盤面の水平震度は旧指針では、L2地震動のみを対象に規定されていましたが、L1地震動に対しても新たに規定され、L2-1地震動は水平震度の標準値が見直されました。

改訂前

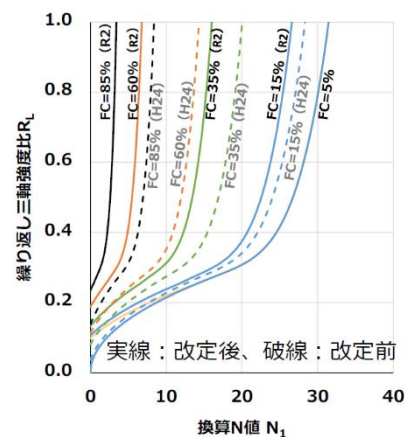
	I 種	II 種	III 種
レベル1	規定なし		
レベル2-1	0.30	0.35	0.40
レベル2-2	0.80	0.70	0.60

改訂後

	I 種	II 種	III 種
レベル1	0.12	0.15	0.18
レベル2-1	0.50	0.45	0.40
レベル2-2	0.80	0.70	0.60

また東北地方太平洋沖地震における事例分析の結果に基づき、繰り返し三軸強度比 R_L の算出式が見直されました。

この改定により、細粒分を比較的多く含む土の液状化強度を大きく評価することで、適切な沈下量を算定することができるようになりました。

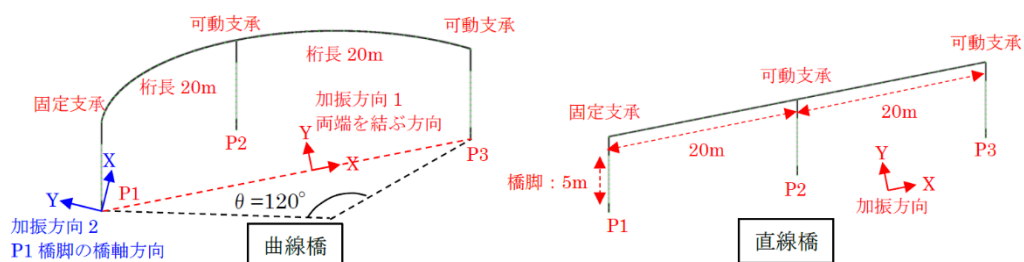


● 道路橋の耐震性能照査解析

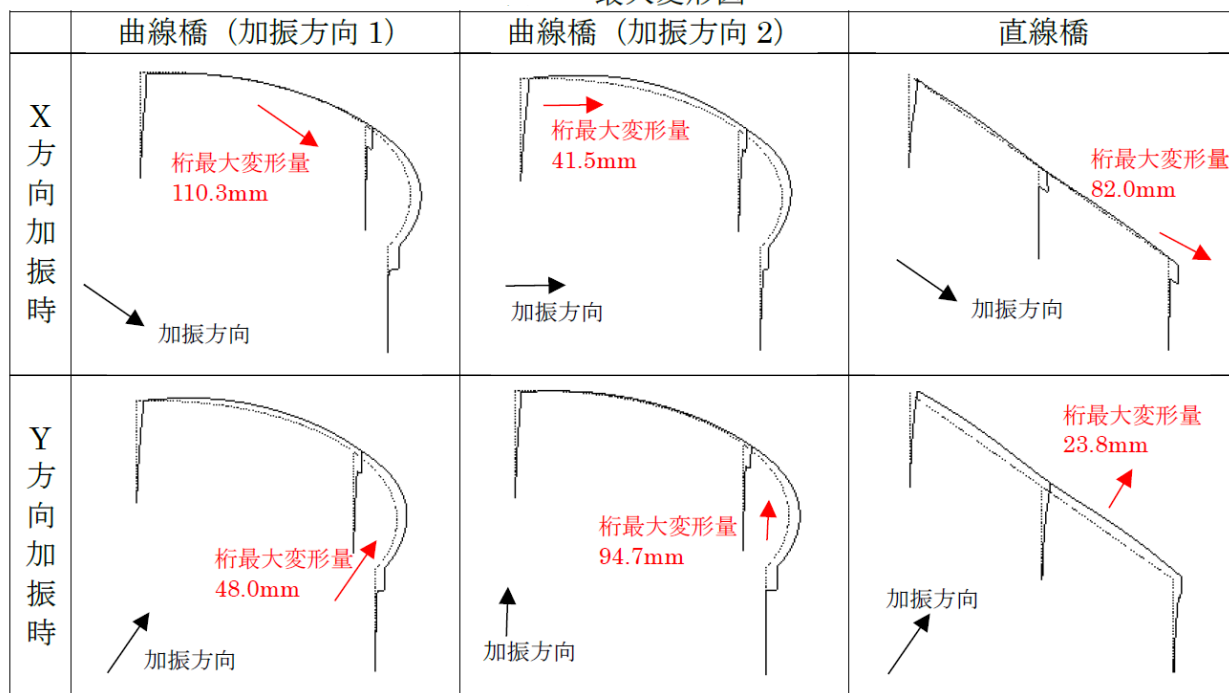
事例が多いとかえって、あらためてご紹介するきっかけがありませんでしたが、KKEでは曲線部や吊橋、アーチ橋など様々な形式の橋梁についてフレーム解析やFEM解析による耐震性能評価を実施し、新設設計や耐震補強を数多くサポートしています。

以下はファイバー要素を用いた曲線橋の動的解析結果を同断面の直線橋と比較した事例です。

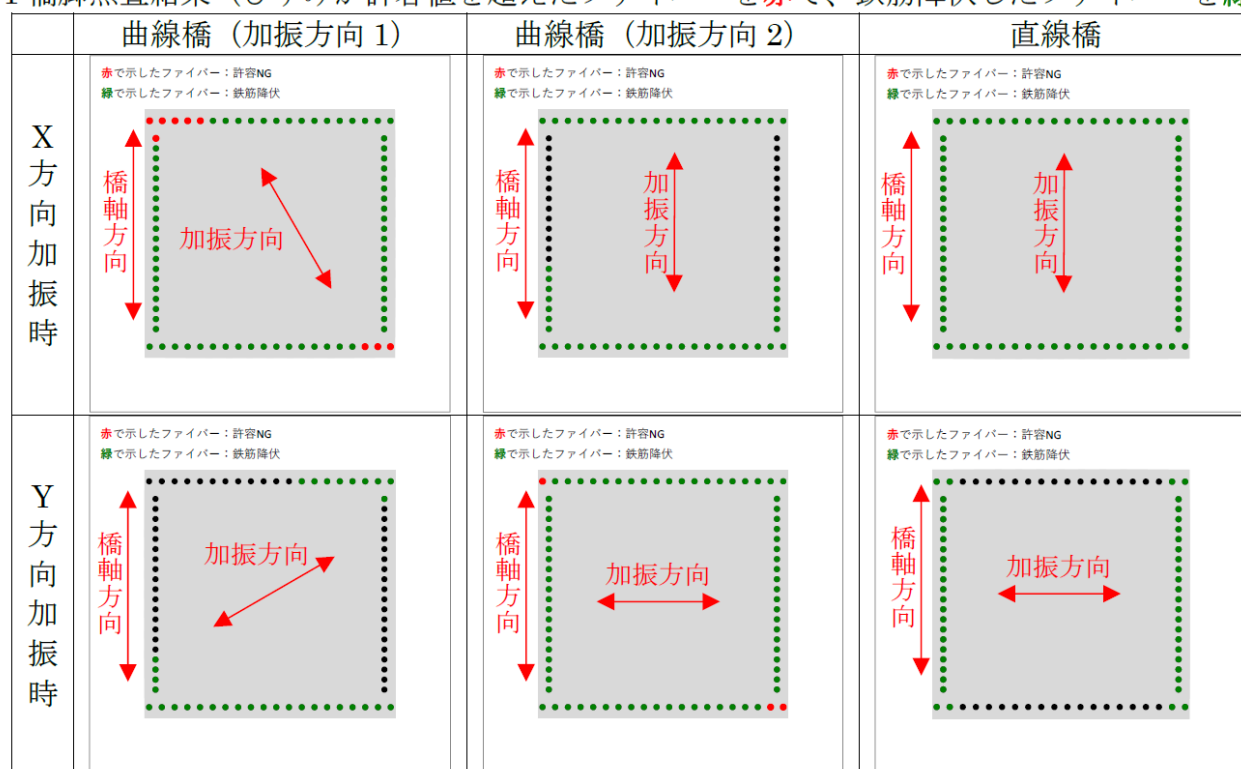
桁長	20 m	橋脚断面	3m×3m (矩形)
橋脚高	5 m	橋桁断面	高さ1m×幅5m (矩形)
フーチング高	1 m	橋脚配筋	72-D22



最大変形図



P1 橋脚照査結果（ひずみが許容値を超えたファイバーを赤で、鉄筋降伏したファイバーを緑で示す）



加振方向の最外縁部のファイバーにおいてひずみが許容値を超える結果となった。ひずみが許容値を超えた箇所は、直線橋解析時には見られず、二軸曲げの影響と言える。

また、曲線橋の加振方向1,2 において照査結果は異なるものとなった。加振方向2 のY 方向加振時は橋脚の主軸方向に加振しているにも関わらず、上部工が曲線になっている影響で振動方向に偏りが生じ、ひずみが大きくなる箇所が加振方向とは一致しない。曲線橋解析時の加振方向の決定の際には注意する必要がある。

● 金属疲労解析

本誌前号で、建築と土木の指針で設計しなければならない箇所が混在している構造物の耐震補強検討に、KKE内の建築の構造設計チームと土木の解析チームが共同で対応しているとご紹介しましたが、ここではまた別の、KKE内の異なるノウハウを持ったチームの協働例をご紹介します。

建築基準法上の鋼製工作物や土木・建築構造物に付帯する鋼製設備の構造検討時、風や設置機器、走行車両等により日常的に振動すると想定される場合、「金属疲労」が問題視されることがあります。例えば高さ数m程度のトップヘビーの鋼製柱状設備では最近複数の該当ケースがありました。このような場合、常時・風・地震荷重に関する検討は土木・建築チームが担当しますが、金属疲労検討については、この問題に接する機会がより多い機械系CAEチームが担当しています。

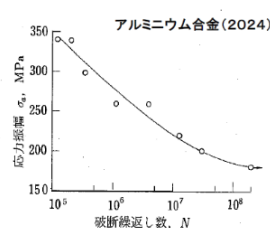
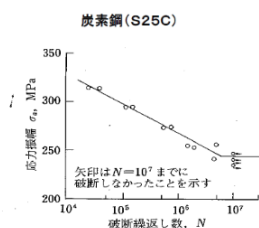


疲労限度設計(Safe Life Design)

使用期間中に疲労破壊を起こさないように十分な強度を持たせる(交換出来ない主要部品で疲労破壊が発生すると脆性破壊を引き起こす)

S-N曲線

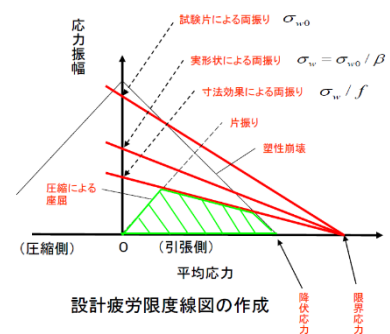
疲労破壊確率50%のラインと考える。



代表的なS-N曲線

(「疲労設計便覧」日本材料学会編より抜粋)

疲労設計の考え方



設計疲労限度線図の作成

降伏応力

限界応力

● 老朽施設の耐震補強時の解析手法の選定

2021年10月、地震により都内複数個所の水道管が破損し、一部地域で数日に渡る断水を余儀なくされたのは記憶に新しいところです。上下水道構造物の耐震補強や老朽化対策の必要性を改めて認識させられた出来事の一つでしたが、こうした問題は上下水道のみならず多くの社会インフラに当てはまることで、道路、鉄道、河川、エネルギー関連等の各種構造物でも耐震補強が進められています。

耐震補強設計において、実施可能な工事に制限がある等の理由で「必要最小限」を厳密に絞り込む必要がある場合、その検討のための解析は、2次元よりは3次元、線形よりは非線形、ばね・骨組みモデルよりはFEMモデル、サブストラクチャーに分離するよりは一体型モデル、静的解析よりは動的解析といったように精密化・大型化する傾向があります。

実際の状態に近づける方向で、有利に働く可能性がある条件（3次元効果、付帯設備や周辺地盤による補剛効果、塑性化によるエネルギー吸収……）を出来るだけ多く加味するためですが、手間と時間をかけてもどれがどの程度効くのか予想し難い場合は、解析の手法やモデルの選定も難しくなります。比較的簡便な解析手法やモデルから始めて、徐々にグレードアップさせ、照査のやり直しを繰り返した事例もあります。前述の河川構造物の耐震設計指針のように、指針内に適切な解析手法の選定方法がある程度は示されていることもあります。これらを参考にし、また独自の経験も踏まえ、検討が出来るだけ合理的に進められるようご提案しています。

成層地盤の地震応答解析プログラム

k-SHAKE+ for Windows

■解析機能

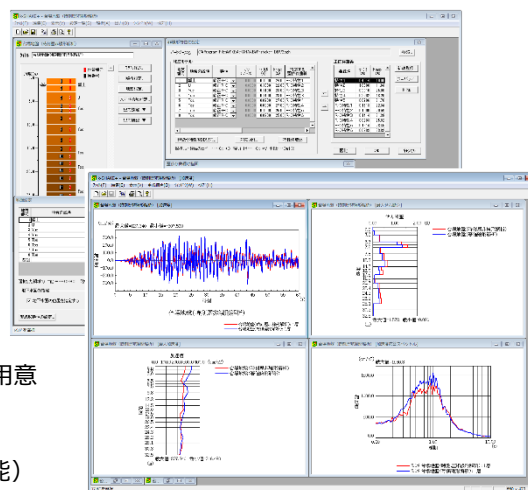
- ・一次元地震応答解析の手法として、以下をサポート
 - 重複反射理論による**等価線形解析**（基本機能）
 - 直接積分法による**時刻歴非線形解析**（非線形解析オプション）

■データベース機能

- ・ひずみ依存特性をデータベースとして管理

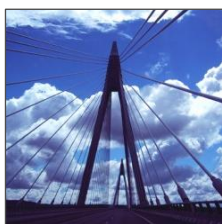
■豊富な図化機能

- ・応答時刻歴波形、最大加速度分布、履歴曲線など種々の出力を用意
- ・出力図は文書ファイルへの貼り付けが可能（クリップボード機能）
- ・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）



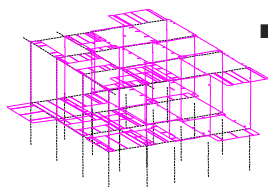
RESP-T

3次元汎用静的・動的複合非線形解析プログラム

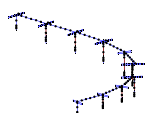


橋梁の耐震解析

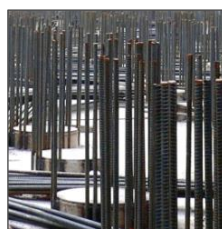
- 荷重増分解析による
橋脚の地震時保有水平耐力の計算
- 曲線橋の動的な非線形解析
- 各種免震／制震装置による補強検討
- ラーメン橋／ラーメン橋脚／鉄道ラーメン
高架橋の軸力変動を考慮した解析
- アーチ橋・斜張橋の動的複合非線形解析



不整形ラーメン高架橋解析モデル
(ねじりモーメント図)

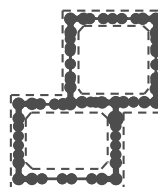


曲線橋動的解析モデル

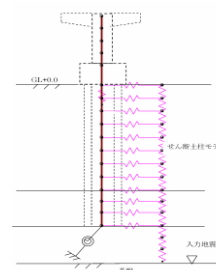


地中構造物

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



カルバート解析モデル

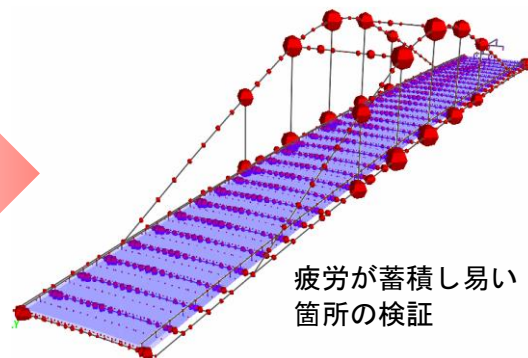
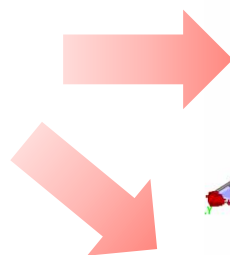
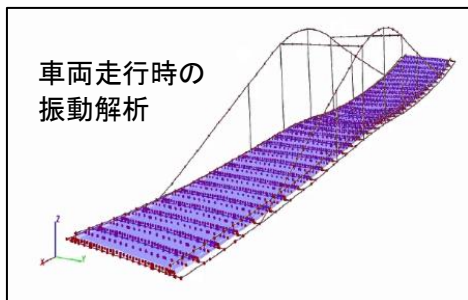


上部構造－基礎一体モデル
(動的相互作用考慮)

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。

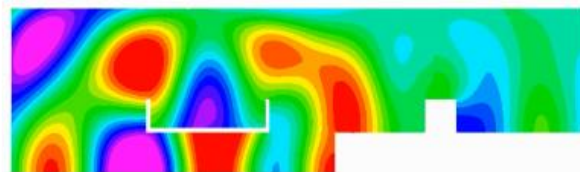
交通振動や低周波騒音問題への対策、橋梁の疲労評価、車両の乗り心地評価などを目的とした振動予測シミュレーションを行います。



■主な適用事例

主に道路または鉄道橋を対象とした

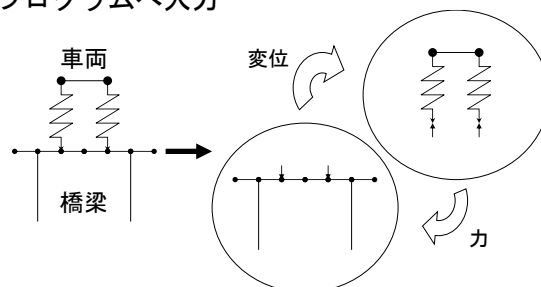
- ・車両走行時の安全性評価
- ・車両走行時の乗り心地評価
- ・車両走行時の運行計画
- ・環境振動問題
- ・繰り返し活荷重による疲労問題
- ・振動抑制デバイス設置計画
- ・モニタリングセンサー設置計画



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。



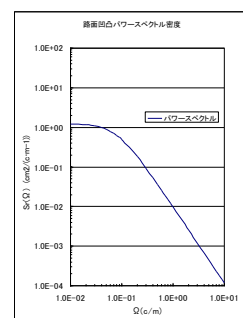
サブストラクチャー法による相互作用

■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

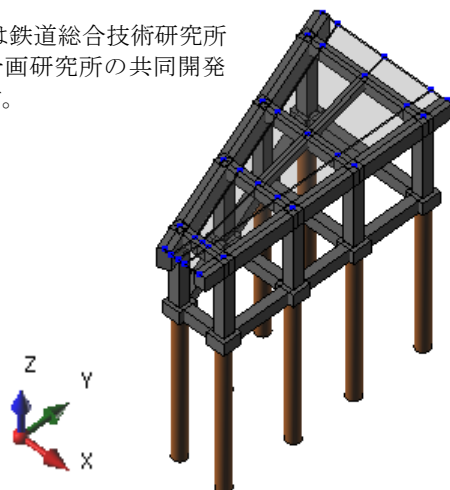


■出力・表示機能

- ・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。

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
- 時刻歴動的非線形応答解析による応答解析
- 固有値解析

断面DB

スクリプト

アウトライン作成

断面の配置

荷重ケース追加

解析ケース追加

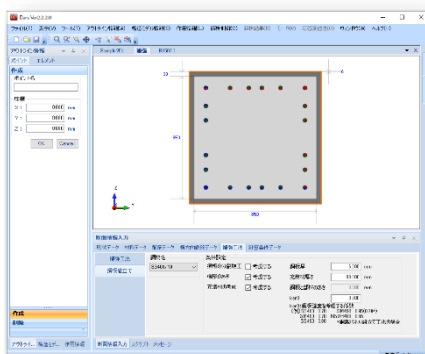
破壊モード推定解析
（静的非線形解析）

時刻歴動的非線形解析
による応答値の算定

所要降伏震度スペクトル
による応答値の算定

耐震性能照査
（応答値と照査指標の比較）

耐震補強設定画面



New !

■ 耐震補強オプション

「既存鉄道コンクリート高架橋柱の耐震補強設計指針」に準拠した耐震補強工法に対応した応答解析と照査が可能になりました。（DARS 本体とは別の有償オプションです）

Kaiseki Portal

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

しばらく音沙汰がないと思ったら立て続けに現れるという不定期刊行ぶりが、すっかり板についてしまいました。お伝えしたいことが溜まったら、またお目にかかるかもしれません。情報発信の形は昨今多様にありますが、これにもなかなか捨てがたいものがあります。

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.47 2022.01*

発行日 2022 年 1 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