

数値解析技術と建設分野への応用

Computer Simulation and its Application to Civil Engineering

長沼一洋 Kazuhiro Naganuma

1. はじめに

コンピュータの発達に伴い、数値解析技術は様々な分野で活用されており、現象の解明から未来の予測まで、あらゆる知的生産活動において、必要不可欠なものとなっている。建設分野においても、立地選定など計画段階における種々の検討を始めとして、構造物の設計・施工方法の検討、完成後の周辺環境への影響予測、既存構造物の安全性の評価など、それぞれの目的に応じた数値解析技術が用いられている。

一言で「数値解析」と言っても、構造計算や空調熱負荷計算など、既に通常業務の一環として扱われている計算から、海洋研究開発機構の「地球シミュレータ」や、神戸市に理化学研究所が建設中の「京速コンピュータ」(1秒間に1京=10¹⁶回の計算が可能)を利用した超大規模な解析まで、その意味する範囲は広い。ここでは、有限要素法、有限差分法、境界要素法などの数値解析手法を用い、物理現象の再現を行う事で、評価や予測を行う一連の解析を「数値解析」と呼ぶこととする。

1990年代前半辺りまでの数値解析はEWS(Engineering Workstation)やスーパーコンピュータに精通した一部の人間による主に研究ベースの利用が中心であった。しかし、その後は汎用CPUの高速化によって、一般的なパソコンでも10年前のスーパーコンピュータに匹敵する解析が可能となった。このことは、実務における解析の利用増加につながり、従来の研究レベルから一気に実用レベルにまで押し上げている。また、数値解析は実験では再現できない現象を自在にシミュレートすることが可能であるということも、その発展と利用機会の増加に拍車をかけている。例えば、建設分野においては、工事に先立つ地盤の変形予測や、東海・東南海地震などの巨大地震に伴う長周期地震動の伝播予測など、数値解析が唯一のツールである。

このような状況から、建設分野において、その果たすべき役割が飛躍的に高まっている数値解析技術を今回の特集として取り上げることにした。本解説では大林組における各種の数値解析技術とそれらの活用状況を紹介すると共に、今後の展望について述べる。

2. 数値解析技術の発達と役割

2.1 ハード技術の発達

コンピュータの基本性能を支配するCPUにはスカラー型とベクトル型がある。1970年代に登場したベクトル型のCPUによって、当時のスーパーコンピュータの演算性能は飛躍的に向上した。一方のスカラー型のCPUはパーソナルコンピュータ(PC)に用いられることで急速に普及した。両者共にクロック周波数を上げることで演算性能が向上してきたが、近年、クロック周波数の限界に達し、かつてほどの高速化が期待できなくなってきた。その結果、複数のCPUを接続したパラレル型の計算機が主流を占めるようになってきている。現在、ベクトル型では2002年に稼働した海洋研究開発機構が保有する地球シミュレータ(ベクトル・パラレル型)が、スカラー型では理化学研究所が建設中の京速コンピュータ(スカラー・パラレル型)が、それぞれ我が国を代表するスーパーコンピュータである。

ベクトル型とスカラー型のどちらが優れているかは、解析対象によって異なる。連続体を扱う流体や構造解析はCPUの単体性能に優れるベクトル・パラレル型に向いている。一方、互いに独立の現象を対象とした多数の解析を同時に実行する遺伝子解析やゲノム創薬などでは、一般的なCPUを多く利用したスカラー・パラレル型が有利とされている。

2.2 開発環境の推移

解析用コンピュータがEWS中心であった頃のOSは長らく各社独自のUnixに基づいていたが、多数のコミュニティによるボランティア的な開発を行うオープンソースという概念が一般化し、その中で、Unixの派生種であるLinuxが作り出された。現在は高性能PCによる数値解析に移行してきているが、Linuxベースもしくは、WindowsをOSとしている。開発プログラム言語は、過去に蓄積されたプログラム資産を利用することから依然としてFortranが主流を占め、CもしくはC++による開発はいまだ少数派である。高速演算のためにはハードウェアの進歩とともに並列計算が有効であるが、プログラム修正に多大な労力を必要とする。近年ではオリジナルのプログラムに数行ずつの並列計算用命令文を書き加えるだけで、並列計算が容易に行えるライブラリとしてOpenMPやMPIなどが開発されている。

2.3 建設分野における数値解析の役割

建物や構造物を建設する場合、数値解析技術は大きく分けて、①地震動や気象条件など外的要因の決定、②設計・施工における安全性や機能性の検討、③周辺環境に及ぼす影響予測、の3つが主要な役割と言える。また、新しい構造形式、設計法、施工法などの開発に際しては、実験による確認と共に、数値解析による検討が増えている。特に、実験では計画から実施、結果の整理までに多くの費用と時間を要するが、解析は比較的短期間に実施できる上、条件を変えてやり直すことが容易である点が大きな特長と言える。

地震力の評価においては、弾性波動論をベースとした種々の数値解析技術により、建設サイトにおける地震動シミュレーションが行われている。また、想定すべき地震動の強さと発生確率の評価や、地震による経済的な損失の評価には、データベースに基づく解析技術が利用されている。

空気や水の流れを予測する流体数値解析（CFD）は、航空・機械・気象などの分野において発達してきたが、近年、建設分野でも広く用いられている。例えば、室内空調気流の分布予測や自然換気の評価では、CFDによる評価が早くから行われ、設備設計の品質向上に寄与している。ビル風などの風環境の評価では、これまで検討の対象外だった中小規模の物件でも、CFDで事前に評価を行い、防風対策の立案まで行われるようになった。また、風荷重評価においては、建物に作用する風圧力だけでなく、台風シミュレーションによる風速の再現期間の設定や、気象シミュレーションによる小規模な突風の再現など、強風災害における気象条件や周辺地形の影響評価も行われている。

地震や風などの外力による構造安全性を確認するためには、部材の履歴特性をモデル化した骨組の増分解析や地震応答解析が行われる。特殊な形状やディテールの検討においては、有限要素法（FEM）が用いられるのが一般的である。コンクリートや鋼材の非線形性を考慮したFEMは、複雑で大規模な原子力関連構造物やLNGタンクなどのエネルギー関連施設のように、実物での実験が困難な構造物の安全性の確認には欠かせないツールとなっている。また、火災による高温や、液化天然ガスなどの極低温にさらされた場合の変形状や構造安全性の検討にも、FEMによる熱伝導解析や温度応力解析が用いられている。温度応力解析はマスコンクリート打設後の発熱によるひび割れの発生を事前に予測する手法としても有用である。

地盤や仮設構造物の安定性の検討や周辺地盤の変形予測を行う場合、地盤応力・圧密解析、工事による地下水環境への影響を評価する浸透流解析、あるいは、それらを同時に解析する土・水連成FEMなどが用いられている。また、施工の各段階における変形や応力の確認や、タワークレーンなどの施工機械による反力に対する構造安全性の検討などに骨組解析やFEMが用いられている。

長期間に亘り使用される構造物の劣化予測に関しては、まだ、解析技術が研究途上にあるが、コンクリートからのカルシウムの溶出や、ベントナイトなどの遮蔽材の変質劣化解析が行われ始めている。

2.4 結果の表示と評価

空気や水の流れはもともと目に見えにくい。地盤や構造物に生じている応力状態も目で見ることができないため、計算結果を可視化することが現象の把握や対策の検討には極めて有効である。特に3次元モデルの解析結果を様々な方向から見たり、任意の断面で切断して見たりすることは、結果の理解に欠かせないものと言える。

Fig.1はビル風などの市街地の風環境予測・評価の例である。従来の風洞実験を用いた手法では、風速計を設置したポイントでしか風の状況を知ることができない。一方、流体数値解析では、解析に用いた格子点数に応じて、高さ方向も含めた3次元の風況分布が得られることから、風環境が悪化する場所や範囲の特定が容易なだけでなく、防風対策を行う際に効果的となる場所についての情報もFig.1に示すような風向ベクトルから読み取ることができる。

Fig.2は、陸屋根に角から風が当たった状況を再現したものである。作用する気流の特性により、片方の稜線に突発的な負圧が生じている。このように屋根面に作用する風圧とその周りで生じている気流の関係を関連づけることで、例えばパラペットの立ち上がりを大きくするなどの風荷重の低減に繋がる提案が可能となる。

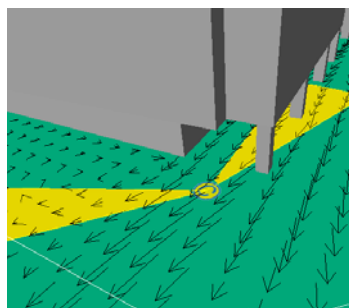
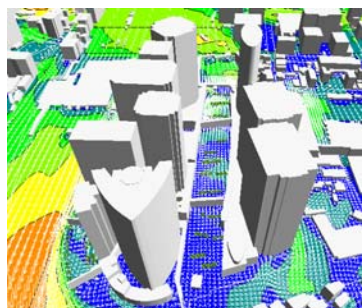


Fig.1 風環境シミュレータ Zephyrus の予測結果(左)と
風向ベクトルによる防風対策支援(右)
Prediction by CFD Code "Zephyrus" (Left) and its Suggestion for
Windbreaker Positions (Right)

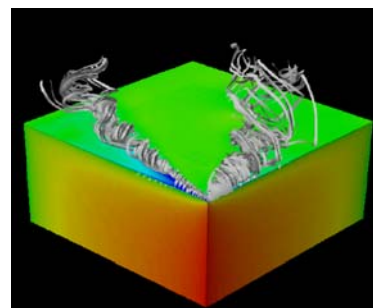


Fig.2 陸屋根に作用する風圧と気流の関係
(風向が変動すると片方に強い負圧が生じる)
Surface Pressure Distributions and Conical
Vortices over Flat Roof. (Strong Peak Suction
Pressure Emerges Along One Frontal Edge as
Wind Direction Changes.)

3. 大林組の数値解析技術

1988年6月に大林組は建設業界としては早期にスーパーコンピュータ（NEC SX-1EA）を導入し、その運用と有効活用のための専門部署として、東京本社に応用解析課、技術研究所に数値解析研究室を発足させた。計算速度は330Mflops、内部記憶容量は最大で128MBと、現在の標準的なPCにも劣るものであったが、当時としては画期的な演算性能を誇っていた。膨大な計算時間を必要とする流体解析を始めとして、地盤の圧密沈下・液状化解析、構造解析、振動解析、音響解析、粒状体解析など様々な分野における解析プログラムやシミュレーション技術の開発が精力的に行われた。そこで培われたノウハウや基盤が現在の大林組の数値解析技術を支えていると言える。ちなみに現在ではNEC SX-8R/8A（32GFlops×8CPU、64GB）が稼働しており、約20年前と比べて、計算速度は約800倍、内部記憶容量は500倍に向上している。

Table 1に大林組が独自に開発した数値解析技術を示す。特に実務で活用されているものを中心に挙げているが、これら以外にも研究ベースで利用中、あるいは開発中のものが少なくない。実務における解析のニーズは年々増加すると共に、要求レベルが高度化しており、市販のプログラムでは解析が不可能、あるいは、解析の精度が不十分などの理由から、自社開発が不可欠な分野がある。以下では分野毎に大林組独自の解析技術を紹介する。

Table 1 大林組技術研究所が開発した主な数値解析技術
Computer Simulation Programs Developed by Technical Research Institute of Obayashi Corporation

適用分野／工事	解析プログラム／システムの名称	特徴
地震危険度解析 地震動評価 地震被害予測	QuakeRanger 土木構造物の地震被害予測システム	GIS上に地盤、各種設計地震動、構造物等のデータを組み込み、インフラ施設の地震被害を予測する。
	QuakeMapper GISを利用した地震被害予測システム	地盤、活断層、歴史地震、建物等の情報に基づき、震源位置と地震規模から、液状化危険度、建物被害度を予測する。
	QuakeNavi 地震危険度・地震波策定技術の統合システム	活断層、プレート境界地震を判断し、危険度評価を行うと共に、地盤情報を考慮した設計用の入力地震動を策定する。
	地震動予測シミュレーション	深層地盤の不整形性を広域でモデル化し、FEM/FDM解析により、地震基盤から工学的基盤までの地震動を予測する。
	地震リスク評価技術	地震による建物の経済損失予測(PML)を行う。地震対策の提案、事業継続計画(BCP)の策定支援などに活用できる。
地盤・構造物 安全性評価 構造設計支援	GRASP3D 土-水連成3次元 FEM 解析プログラム	施工に伴う地盤と地中構造物(シールドトンネル・土留め構造物など)および地下水の相互挙動を予測する。
	EFECT 動的有効応力 FEM 解析プログラム	砂地盤の液状化など地盤の非線形現象を忠実に再現し、岸壁・基礎・地中構造物、堤防などの大変形挙動を予測する。
RC 構造物 安全性評価 構造設計支援	耐震予報 RC 造建物の耐震性能評価システム	地震による鉄筋コンクリート造建物の柱、梁、耐震壁のひびわれ幅や本数などの損傷状態をフレーム解析で予測する。
	FINAL コンクリート構造の非線形 FEM 解析プログラム	コンクリートのひび割れや圧壊、鉄筋降伏などの非線形現象を考慮して、構造物の静的・動的挙動を詳細に予測する。
コンクリート変質予測	多孔質媒質中のイオン・水分の拡散・移流解析	LBM(格子ボルツマン法)による移流・拡散解析を行い、コンクリートの変質を予測する。水分移動や熱拡散にも応用可能。
ヒートアイランドおよび緩和対策技術の予測	Appias(アピアス) 数値都市気候モデル	中規模気象モデルから建物周辺の気流・温度分布予測モデルまでの3種類のモデルにより、都市の熱環境を予測する。
風環境予測・評価	Zephyrus(ゼフィルス) 風環境シミュレータ	電子住宅地図データから計画建物周辺街区の3次元モデルを作成し、流体解析を行って、風環境評価結果を出力する。
設計風速評価	地形影響評価型 台風シミュレーション	地形影響の評価手法を取り入れて、建築物の耐風設計時の風速値および強風の累積作用時間を予測する。
風力発電量予測	Wind Mapper 風況予測モデル	風力発電候補地周辺の風況を予測し、発電量、建設費、発電単価など事業性評価に必要な情報を提供する。
風荷重評価	風荷重評価のための数値風洞	建物に作用する非正常な風圧力や風力を予測する。風洞実験と同様に、構造物や外装材への風荷重の評価が可能。
大空間風力換気	建物内外の気流解析	非正常気流解析により、屋根開閉式スタジアムのような大空間構造物の風力による自然換気性状を評価する。
ドラフト・すきま風対策	CVNEC ドラフト気流解析プログラム	エレベータシャフト等の煙突効果に起因するドラフトおよびすきま風をシミュレーションする。
音響設計支援 音場評価	AUVIS(オービス) 室内音響設計支援システム	コンサートホール等の音響特性を回折等の波動性を考慮して予測する。音場の可視化と、音場の試聴が可能である。
騒音診断対策支援 騒音評価	CALMAND(カルマンド) 騒音診断対策支援システム	多数の騒音源からの伝搬を、距離減衰、回折減衰、反射・吸音等を考慮して予測し、対策に必要な情報を提供する。
建築計画・設計支援	電線ジバミル 送電線発生磁界予測システム	計画地周辺の送電線から発生する磁界強度の分布を解析により予測し、可視化する。

※Table1の各技術青文字部分をクリックすると詳細情報がご覧いただけます。

3.1 地盤分野の数値解析技術

3.1.1 地震動予測と地震被害・リスク評価技術

1995年兵庫県南部地震は多大な犠牲と被害のもとに地震工学・耐震工学に貴重な教訓を与え、その後の地震動研究の発展に大きな契機となった。その一つとして防災科学技術研究所は全国に約25kmの間隔で1000ヶ所に強震計を設置し、世界的にも高密度な強震観測網(K-NET)を構築した。その後、2000年鳥取県西部地震、2003年十勝沖地震、2004年新潟県中越地震、2005年福岡県西方沖地震、2005年宮城県沖地震、2007年新潟県中越沖地震など大地震が発生しており、蓄積された強震記録のデータベースは様々な研究や実務に提供されている。地震動の特性は震源での地震波の発生、伝播経路、建設サイト地盤での増幅によって構成されることが強震観測網によって裏付けられた。

また、文部科学省に設置された地震調査研究推進本部は日本の主要な活断層、海溝型地震の活動、発生確率などの評価を行い公表している。大林組ではこれらの地盤、活断層、歴史地震データ等に基づいて、地震被害を予測する地震被害予測システム(QuakeMapper)、建築物の耐震設計に用いる設計用入力地震動策定システム(QuakeNavi)、建設サイトで想定すべき地震動強さと発生確率を評価する地震ハザード解析システム、広域な平野規模での強震動予測手法、建物、施設の地震による損失を評価する地震リスク評価システムを開発し、事業に活用している。これらによる解析結果の例をFig.3~Fig.5に示す。地震動分野では弾性波動論をベースとして、有限要素法、有限差分法、境界要素法、波数積分法など対象とする問題に適する種々の数値解析技術を駆使し、PC上で利用できる小規模なシステムから、平野規模の領域を膨大な差分メッシュで表現した大規模な数値計算を行う地震動シミュレーションまで取り組んでいる。

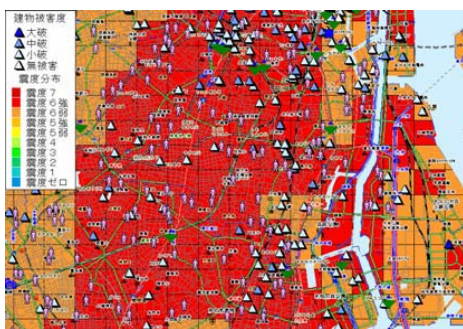


Fig.3 震度・被害予測例 (QuakeMapper)
Estimation of Seismic Intensity and Earthquake Hazard by "Quake Mapper"

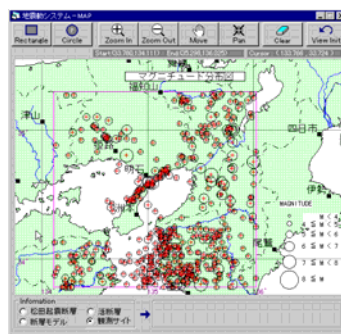


Fig.4 地震データベース(QuakeNavi)
Data Base of Earthquakes on Evaluation System "Quake Navi" for Seismic Design Purpose

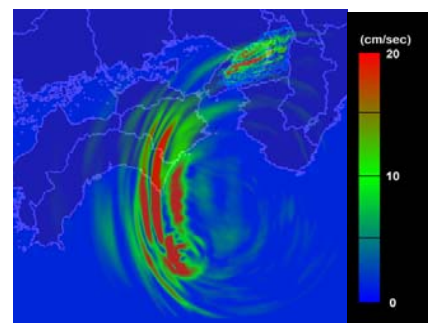


Fig.5 広域地震動シミュレーション
Simulation of Strong Ground Motion for Wide Area by 3D Finite Difference Analysis

3.1.2 液状化地盤における構造物の地震時挙動の評価

阪神・淡路大震災以降、各種土木構造物の耐震設計基準も見直されたが、その後も新潟県中越地震、中越沖地震等の被災地震の頻発や、東海・東南海地震に代表される海溝型大地震の近い将来における発生の切迫性を背景として、防災上のみならず震災下における事業継続性という新たな視点から、構造物の合理的な耐震性能評価に対する社会的な要求水準が高まっている。これは具体的には、①個々の構造物に対して予想される地震作用の合理的な評価、②構造物の地震応答と限界状態の合理的な評価、である。これらを実現するためには、地震時の地盤および構造物の動的挙動（非線形挙動）の評価、特に地震時の地盤変形挙動の評価精度の向上が重要な課題となる。

このような課題に対して、大林組では動的有効応力解析プログラム EFECT を開発し、軟弱地盤における基礎構造物や地中構造物の地震時挙動の評価に活用すると共に、実物の地震時挙動を再現できる遠心模型実験との対比により、その妥当性を検証してきた。有効応力解析は、地盤の変形挙動を土の応力-ひずみ関係と地盤中の間隙水の挙動を関連付けて評価するもので、砂地盤の地震時挙動として重要な液状化問題等を合理的に評価できる。すなわち、地盤や構造物の耐震性能を使用限界や終局変位等で規定する場合に、非常に説明性に優れており、EFECT を軟弱地盤における各種構造物の耐震設計に活用することにより、一層、合理的な耐震性能を提供できるものと考えられる。Fig.6およびFig.7にEFECTによる解析結果の例を示す。また、近年は既設構造物の高度な耐震診断と、その耐震改修方法の立案等における解析ニーズも増加しており、適用事例の蓄積および機能強化を通じて、実用性の向上を図っている。

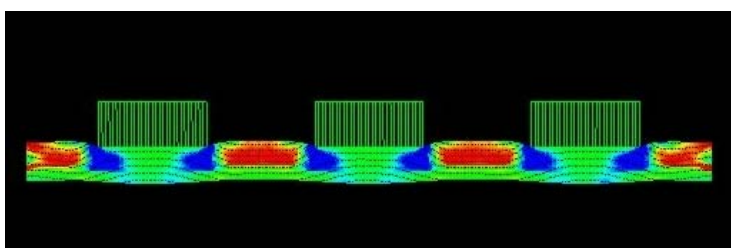


Fig.6 タンク基礎の沈下解析
Settlement of Tank Raft Due to Liquefaction

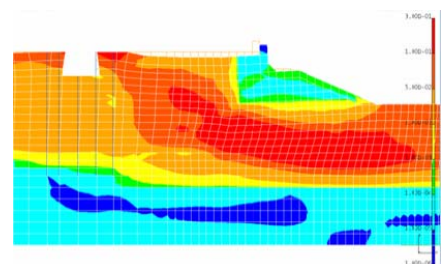


Fig.7 護岸構造物の変形解析
Deformation of Sea Wall due to Liquefaction

3.1.3 地下施工時における挙動評価

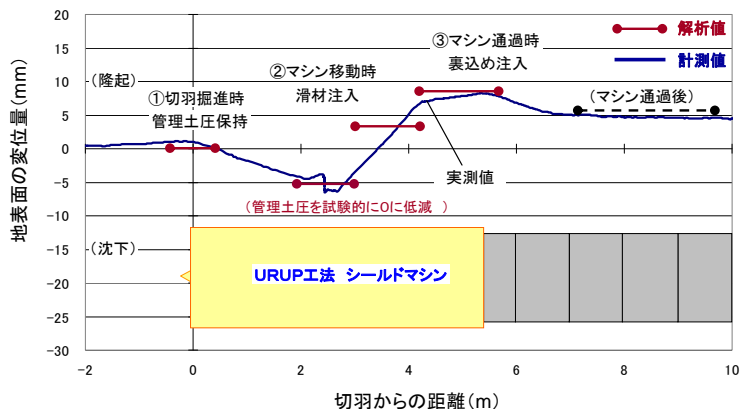
都市部の建設工事では、既設の構造物との近接施工になる場合が多い。こうした条件での地下工事では、地盤と地盤を支える仮設構造物の安定問題に加えて、周辺への影響評価とそれに基づく対策工の選定が重要な課題となる。特に軟弱地盤が対象となる場合には、工事を安全かつ効率よく進めるために、設計と施工の各段階で、地盤の変形特性と地下水の挙動を的確にとらえておく必要がある。そのための有効な数値解析技術に土・水連成 FEM がある。大林組では土・水連成 3 次元 FEM 解析プログラム GRASP3D を 1990 年代前半に他社に先駆けて開発しており、種々の建設プロジェクトの設計・計画および施工への適用を通じて機能強化 (Fig.8) を図ってきた。

この解析法は、地盤の応力・変形計算と地下水の浸透流計算とを同時に連立させて行うところに特徴がある。これにより、地盤の応力・変形の予測計算においては、工事で生じる地下水環境の変化を条件に取り込むことができ、構造物にかかる土圧・水圧や地盤の圧密変形が算定できる。地下水の挙動の予測においては、工事の進捗による地形の変化や、地下水対策工による水理条件の変化を考慮することが可能で、施工期間を通じた地下水環境の一貫した評価が可能である。

近年の都市再生事業では自動車交通の円滑化と環境保全の両立が大きな課題となっている。大林組では渋滞する交差点のアンダーパス化など、交通インフラの地下化事業に、工期の大幅短縮と周辺住民への影響軽減という点で大きく貢献できる非開削シールドトンネル工法 (URUP 工法¹⁾) を開発し、実用展開中である。同工法における事前検討、ならびに、今後の大深度地下を対象とした自動車道路の実現を目指す工法の検討・技術提案等を主なニーズとして、GRASP3D の実用性をさらに高めているところである。



(a) 到達時のシールドマシン試験機の全景¹⁾
Completion View of Shield Tunneling Excavation
by URUP Matrix Shield Machine



(b) シールドマシンの掘進と地表面沈下の発生状況¹⁾
Measured and Calculated Ground Subsidence
Occurred in Construction Process

Fig.8 地上発進・到達シールドによるアンダーパスの急速施工法「URUP工法」における周辺地盤の挙動予測
Forecasting of Ground Behavior Caused by Construction Shallow Underpass Tunnel
Using URUP (Ultra Rapid Under Pass Construction Method)

3.2 構造・材料分野の数値解析技術

3.2.1 地震・火災時を対象とした解析

鉄筋コンクリート造建物が地震時にどの程度の損傷を受けるのかをフレーム解析により予測するプログラムとして、「耐震予報」を開発している。これは、柱、梁および耐震壁に地震時荷重を載荷した実験結果に基づいて、部材の変形量と損傷度の関係を求め、Fig.9に示すように、地震時におけるコンクリートのひび割れや圧壊、鉄筋の降伏などの度合いを部材ごとに予測するものである。これらの結果は想定した地震による補修の要否や、継続使用の可能性などを判断するための有効な情報となる。予想される損傷度合いに基づき、建物が地震を経験した後の補修コストを予測することも可能である。

コンクリート系構造物を主な対象とした非線形 FEM 解析プログラム FINAL は、大林組で実施した構造実験に基づく独自の材料構成モデルを有しており、その解析の精度は、これまでに数多くの実験結果と比較することにより、検証している。静的応力解析および時刻歴応答解析では、部材や構造物が破壊に至るまでの挙動を詳細にシミュレートすることが可能である。Fig.10に解析結果の例を示す。橋梁、タンク、サイロ、原子力関連構造物など、複雑で大規模な構造物の設計において、様々な荷重に対する耐力や変形性状の予測に活用している。その解析精度は、事前予測解析などのコンペにおいて市販の解析プログラムを凌いで最優秀と評価されるなど、国内外で認知されつつある^{2),3)}。

FINAL は熱伝導解析や熱応力解析の機能も有しており、火災加熱を受ける場合の鉄筋コンクリート部材の解析では、コンクリート中の水分の蒸発潜熱や材料物性の温度依存性を考慮して、内部の温度分布や変形性状などを予測することができる。

構造物はコンクリート打設後にその発熱による部材の内外温度差により、躯体にひび割れの発生のリスクが常に付きまとっている。このため、実施工前に、温度応力解析による事前検討が欠かせない状況となっている。大林組では FEM に基づく温度応力解析プログラム ASTEA-MACS をいち早く導入し、独自の機能拡張を行い、複雑構造物にまで解析対象を広げた。これにより、精度の高い温度応力解析が可能になり、事前検討や技術提案に重要な役割を果たしている。

放射性廃棄物の遮蔽施設の設計においては、超長期的間に水に接するコンクリート構造物からのカルシウム溶出が懸念されている。そこで、格子ボルツマン法に基づくカルシウム溶出解析プログラムを開発し、1 万年単位の予測を行っている (Fig.11)。さらに解析精度を向上させるため、X 線 CT によるコンクリート微細構造データを用いて、物質移動に関する物性値の算出も行っている。

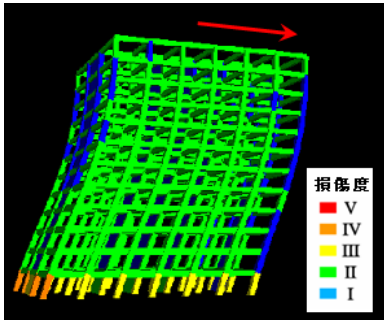


Fig.9 耐震予報による地震時の
損傷度の予測
Induced Damage Under Earthquake
Predicted by "Taishin-Yoho"

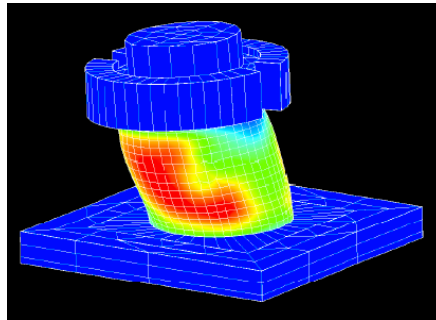


Fig.10 FINAL による原子炉格納容器
模型の時刻歴応答解析
Dynamic Response Analysis of Nuclear
Containment Vessel Model Using FINAL

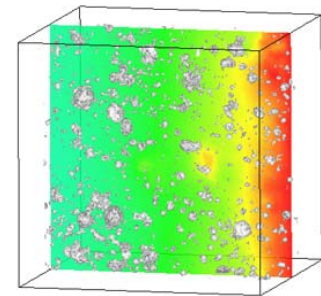


Fig.11 セメント硬化体中の
Ca イオン拡散
Calcium Ion Diffusion in
Cement Hardening

3.2.2 爆発・衝撃現象を対象とした解析

工場やプラント施設における安全対策の検討には、ガスの漏洩検知や引火要因の排除等の予防的対策のほか、爆発事故など最悪の事態に至った場合を想定し、被害を最小限に抑えるための対策を講じておくことが重要である。爆発現象の解析には衝撃解析ソフトウェア AUTODYN を導入しているが、燃焼反応速度が音速を超える、いわゆる爆轟現象の解析には、反応速度の伝播および圧縮性流体现象を高精度に再現するため、さまざまなノウハウが必要となる。

大林組では新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)からの委託業務として実施した研究の中で、米国の SRI International の協力を得て 2003 年に水素ガス爆発実験を実施した。その実験結果に基づき、爆轟パラメータや解析対象のモデル化手法に関する詳細な検討を重ね、より高精度な爆発現象の予測を可能としている (Fig.12)。また上記の水素ガス爆発実験では、爆風に伴う RC 構造物の応答特性についても多くの貴重なデータを得ており、前述の FEM 解析プログラム FINAL との組合せにより、爆風を受けた RC 構造物の応答を高精度に解析できるようになり、耐爆構造物等の設計にも利用されている (Fig.13)。

最近では、危機管理や BCM (Business Continuity Management : 事業継続管理) に関連し、建物内に爆発物を故意に持ち込まれた場合についての検討を要求されるケースも増えており、上記の解析手法が適用されている。Fig.14 はある建物に大量の爆発物が持ち込まれ、爆発した場合を想定した解析例である。このような解析結果から、建物の損傷度合いや、人的・物的な被害範囲を予測することで、具体的な対策の方向性を検討することができる。

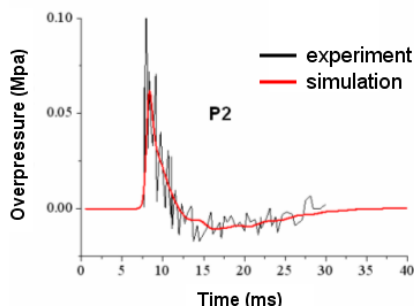


Fig.12 爆風圧の時間変化
(実験と解析との比較)
Time-dependent Change of Blast
Over-pressure (Comparison of
Simulation with Experiment)

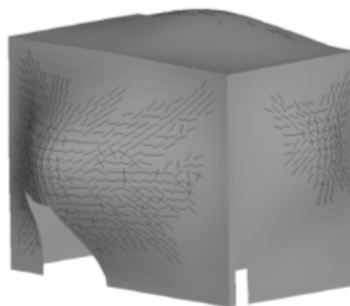


Fig.13 爆風圧を受けた RC 構造物
の変形、ひび割れ状況の解析結果
Simulated Deformation and Crack
Pattern of RC-structure Which
Received Blast Over-pressure

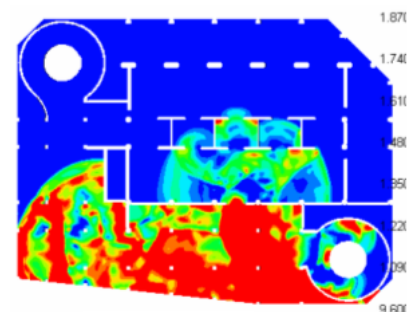


Fig.14 屋内で爆薬が爆発した時の
爆風解析結果
Simulated Distribution of Blast
Over-pressure Caused by
an Indoor Explosion

3.3 環境分野の数値解析技術

3.3.1 気象現象を対象とした解析

環境分野における気象現象を対象とした解析には、山地のウインドファームにおける風力発電量評価を対象とした大規模な地形スケールを扱う解析と、風荷重評価に必要な強風や突風現象、あるいは夏季の気温上昇といった気象的な要因を対象とした解析が挙げられる。

風力発電の適地選定に必要な年平均風速の予測を目的とした解析プログラムとして、LAWEPS と Wind Mapper がある。LAWEPS は NEDO のプロジェクトを通じて開発したもので、主に風力発電計画の概査に用いている。一方、Wind Mapper は、後述の数値気象モデルと LAWEPS の工学的計算流体モデル機能をベースに開発したもので、現地での風況観測が利用可能な場合に、それを参照データとして用い、ウインドファーム内の風速分布や計画風車の発電量などを求めるものである。さらに、Wind Mapper は電力線や道路といった工事にかかる費用算出機能も有しており、風力発電計画の事業性の具体的評価を行うことができる。

数値気象モデルは、温度成層など大気の特徴を取り入れ、1994 年に大林組で開発したモデルに改良を加えたもので、規基準で通常取り扱われないダウンバーストや地形性のおろし風などの強風の予測、山岳地の施設の耐風性検討などを行っている。Fig.15 は、2004 年の台風 23 号の通過に伴って、岡山県津山盆地に引き起こされた、地形性の強風である広戸風の解析を行ったものである。(a)は強風の最盛期における地上 10m の風速分布であり、標高 1,240m の那岐山の南山ろくに強風域が広がっている。これは現地の被害状況とよく対応している。(b)は(a)にある 3 つの直線に沿った南北一鉛直断面内の風速分布であるが、これらの風速分布にはおろし風としての特徴がよく出ている。気象解析には対象によって汎用気象モデル HOTMAC も用いるが、それはヒートアイランド循環や気温の予測などに適用している。

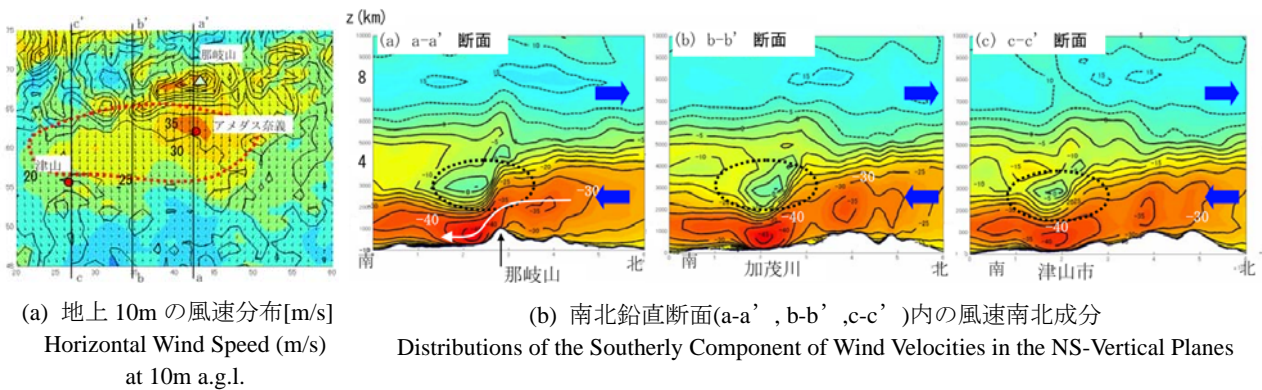


Fig.15 2004 年台風 23 号に伴う岡山県津山盆地の地形性局地強風「広戸風」のシミュレーション
Simulation of the Downslope Wind "Hiroto-Kaze" Caused by Typhoon 0423

3.3.2 屋外環境を対象とした解析

屋外環境を対象とした解析は、その対象領域の大きさによって、ヒートアイランド現象や風の道を対象とした都市スケールの解析、ビル風の予測・評価、屋外熱環境評価、大気汚染物質の拡散などの街区スケールの解析、そして風荷重や空力振動を対象とした建物スケールの解析の 3 つに区分できる。

風環境シミュレータ Zephyrus (ゼフィルス) は、ビル風等の市街地風環境を予測・評価するプログラムである。このプログラムでは GIS データを読み込むことで、計画建物周辺の街区形状が再現でき、モデル化に伴う作業を軽減している。また、風環境評価に特化することで、解析条件の設定や計算結果の後処理を全て自動化している。従来の風洞実験による評価と比べると、短期間で結果が得られ、また模型製作や実験に伴う費用が不要なことから、計画初期の段階での検討や、中小規模の物件で良く利用されている。

数値都市気候モデル Appias (アッピアス) は、屋外の温熱環境評価を目的として開発されたプログラムである。海陸風のような気象現象から、打ち水舗装や壁面緑化などのヒートアイランド対策技術の効果の確認までを解析の対象としている。Fig.16 は市街地の建物表面と地表面の温度分布を予測した例で、中央の緑地帯では地表面温度が周囲よりも低下しているのが分かる。気象モデルによる典型的な夏季の日変化を境界条件として用いることで、海陸風などの局所的な現象を考慮した屋外熱環境予測が可能である。

建物に作用する風荷重評価では、継続時間や風向数を多く取る必要がある。さらに、建物表面の格子解像度を上げて、建物の隅角からの気流の剥離や、外装材に作用するピーク風圧を捕捉する必要がある。大林組が開発した数値風洞による予測結果を Fig.17 に示す。隣接する建物による遮蔽効果により、風向によって建物の応答加速度が大きく変化する様子が捉えられている。

最近では、植物系の問題にも数値モデルが活用されるようになってきている。芝群落・光合成成長モデルはその一つである。光合成と呼吸などの植物生理過程のモデル化をコアにしており、建物などの影響を考慮した日射解析、気温・降水量などの気象データ、植物群落内の放射・熱・水伝達などのサブモデルと組み合わせて、サッカー場などのスポーツ芝の維持管理や張替え時期の決定、芝を用いる競技場の計画などに利用している。

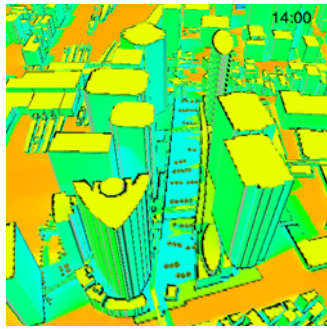
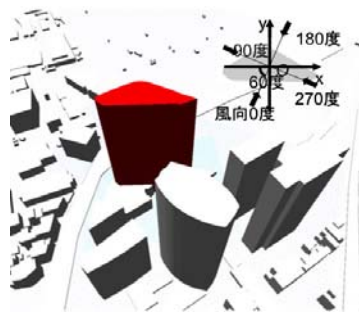
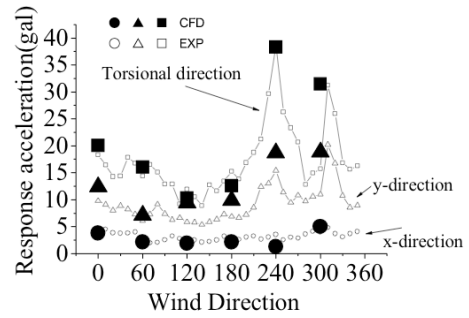


Fig.16 Appias による壁面および
地表面温度分布予測結果
Surface Temperature Distributions
Predicted by "Appias"



(a) 解析対象建物と周辺街区
Shapes for Objective and
Neighboring Buildings



(b) 建物頂部の応答加速度の比較
Comparison of Response Accelerations
Between Computed and Experimental Results

Fig.17 数値風洞による風荷重評価
Numerical Predictions of Wind Loads

3.3.3 屋内環境を対象とした解析

屋内を対象とした温熱環境、物質拡散等の解析は、環境分野の中でも、最も古くから数値解析が適用されている分野の一つである。最近では、事務所、住宅等の一般空間、工場、アトリウム、スタジアム等の大空間の他、クリーンルームやデータセンター等の特殊空間の設計にも数値解析が広く適用されるようになった。

中でも最も多く行われているのは、空調システム等の設計条件の検討に用いられる温熱環境解析である。空調により形成される室内環境は比較的定常なため、従来は時間平均乱流モデルを用いた定常解析を実施することが多かった。しかし、データセンター向けの新たな空調方式 Cool Air Capture を解析した例 (Fig.18) では、空調気流やサーバラックからの熱排気に伴う非定常な乱流変動が温度分布に大きく影響するため、Large Eddy Simulation(LES)により非定常な気流の流れを直接解く方法を用いた。最近では、屋内温熱環境の問題にもこのような非定常乱流解析の適用が必要となる場面が増えてきている。

ビル用マルチエアコンの安全設計に関連して実施した漏洩ガスの拡散解析では、漏洩ガスの噴出速度が現象を支配する。システム内の冷媒は、様々な温度・圧力の気体・液体および気液混合状態にあり、ガスの噴出速度も時々刻々変化する。Fig.19 に示す解析事例では、実験から求めたガスの漏洩速度をモデル化して解析プログラムに組み込み、非定常なガスの拡散状態を解析している。

産業用クリーンルームの分野では、気流分布と共に微粒子の個数濃度分布を定常あるいは非定常で解析することが行われている。Mini-environment の導入と自動化技術の普及に伴い、最近の半導体、電子デバイス製造用クリーンルームでは、OHT(Over Head Translator)、AGV(Auto Guided Vehicle)等が工程内を縦横無尽に走行するようになった。FPD(Flat Panel Display)製造用クリーンルームの解析例 (Fig.20) では、スライディングメッシュを用いた移動物体まわりの気流解析により、大型ストッククレーンの走行に伴う誘引気流と微粒子拡散挙動を解析している。

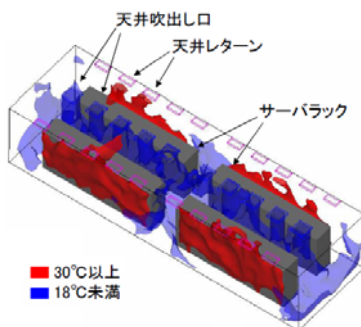


Fig.18 Cool Air Capture 方式の
温熱環境解析結果
Simulated Temperature Distribution
in a Server Room which Adopted
"Cool Air Capture" System

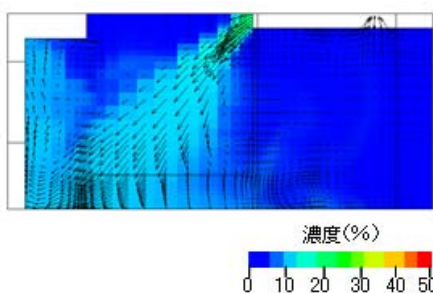


Fig.19 室内への漏洩ガス
拡散状況の解析結果
Simulated Distribution of Leaked Gas
Concentration in a Room

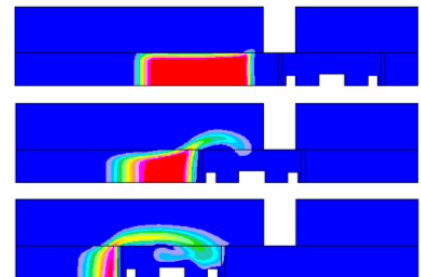


Fig.20 移動物体まわりの
気流分布の解析例
An Example of Airflow Simulation
Around a Moving Obstacle

ホール等の音響設計では、音響的にも意匠的にも優れた空間を造るため、音場の解析結果に基づく設計者との対話が頻繁に繰り返される。そのため、音場解析プログラムには高い解析精度を維持しながらの高速化が要求される。

従来より、音の伝搬経路を直線(音線)で表し、反射面では入射した角度と反射角度が同じとして、音源から受音点の幾何的経路を求め、この線で表される経路を音が伝搬するとして幾何音響に基づく手法が用いられてきた。しかしながら、幾何音響では回折等の音の波動的振る舞いを考慮できず、特に低周波数域での誤差が大きいデメリットがあった。

波面積分法による解析プログラム HARP は、波動性を考慮しつつ、幾何音響の高速演算の利点を組み合わせたハイブリッドの解析手法で、高精度化と高速化を両立している(Fig.21)。コンサートホール等の音場の予測結果の評価には、残響時間で代表されるような各種の指標値が用いられるが、これら指標値は音響特性の一断面を切り取る物であり、指標値のみから完成時の音場の様子は一般にイメージしにくい。より良い音響設計のためには、設計者等との間に現在の設計による音場と、改善・対策案に関する共通認識を確保する必要性があった。そこで、設計者等と図面段階において音場の諸特性を可視化すると共に、完成時の音場を立体的に合成する可聴化技術を開発し、これらを統合して室内音響設計支援システム AUVIS を構築している。前述の HARP は AUVIS の中核であり、数値だけでは分かりにくい音場の主観的な要因を、実際に音として合成、試聴できる。可聴化においては、人は二つの耳だけで音の方向等の音場の様々な情報を知覚していることに注目し、計算から再生まで一貫して両耳への音を直接予測・制御している点に特徴がある。これにより一般のステレオと同様の簡単な再生装置で音場の体験が可能となり、可搬型としても運用が可能である。

騒音診断対策支援システム CALMAND は、多数の騒音源が広範囲に分布する生産施設等からの騒音伝搬を予測し、対策の立案を支援するシステムである。予測は主に幾何音響的な解析手法によっているが、実績に基づく多くのノウハウによって、短時間での対策検討に十分な精度を確保している(Fig.22)。

近年、オフィス等において LAN の無線化が進んでいるが、実効的な通信速度は機器の性能だけではなく、建物内の電磁環境も影響する。そこで、建物内の電磁環境を予測するために、FDTD(有限差分時間領域法)を用いた解析プログラムを開発している(Fig.23)。マクスウェルの方程式を特殊格子上で直接解くため、非線形解析や時間領域での解析が可能で、他の手法に較べて、より実際に近い条件を設定できるという特徴がある。

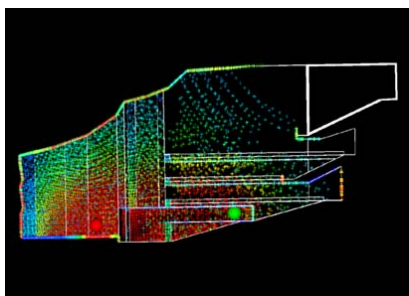


Fig.21 反射音寄与度解析
Contribution Analysis of
Reflection Sound Power

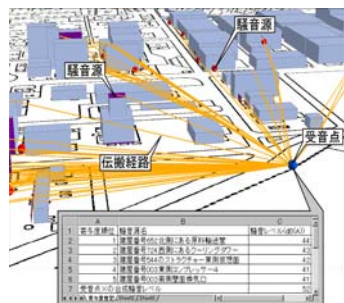


Fig.22 騒音源からの寄与度解析
Contribution Analysis of
A-Weighted Sound Pressure

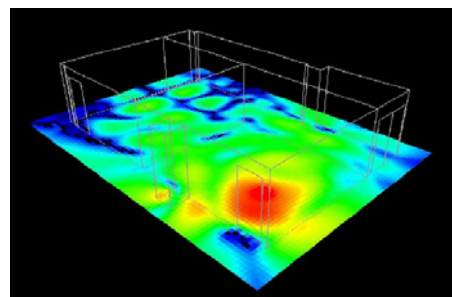


Fig.23 電界強度分布解析
Electric Field Intensity
Distribution Analysis

4. 数値解析技術の課題と展望

4.1 精度と信頼性

数値解析技術の信頼性を高めるためには、解析精度の検証が不可欠である。実現象との比較が基本となるが、数例の検証では、限られた条件下での精度が確認されたに過ぎず、様々な検証例を通して、精度と適用範囲を確認していく必要がある。そのために、基本的な検証例がベンチマークテストとして整備されている分野もある。鉄筋コンクリート構造の非線形解析に関しては、日本建築学会に設けられた研究委員会において、部材の種類や荷重条件毎に、既往の実験結果の中から検証用に適した試験体を選定しており⁴⁾、解析に必要な基本的な情報と実験結果がホームページ上で公開されている。

構造解析の分野では、実験結果を公開せずに、試験体の形状、寸法、材料特性、荷重条件などの与えられた情報を用いて、その強度や変形量、破壊形式などを予測するブラインド解析と呼ばれるコンペが行われることがある。非線形解析においては、材料構成モデルの各種パラメータを少し変えただけで、解析結果が大きく変動する場合もあり、実験結果が分からない状況下での解析では、解析プログラムの精度と、それを使う人の技量の両方が問われることになる。特に、解析対象のモデル化方法や入力条件の選定は、解析を行う人の経験や知識に負うところが大きい。ノウハウとも言われるそれらの情報を使用マニュアルとして整備したり、与えられた条件から解析プログラムが自動的に入力パラメータを選定したりするなど、解析の客観性を高め、誰が使っても精度の高い解析ができるような工夫が望まれている。

地盤の施工分野では地盤工学会の研究委員会において、各機関の解析プログラムによる道路盛土の圧密沈下の一斉解析が実施されている。この活動では、実測挙動の再現性を高めていくための地盤の非線形構成モデルの選定と入力定数値の設定についての研究がなされており、大林組も参画している。また都市部の掘削工事の分野においては、周辺地盤の変形を許容値以内に抑え、近接構造物に影響が生じない様に、現場計測と数値解析の相互検証結果を基に、慎重に工事が進められている。大林組では、各施工段階での予測モデルの修正に加えて、地盤の原位置試験に重点を置いた入力定数値の設定においてもノウハウを蓄積し、数値解析による予測評価法の実用性を高めている。

地盤の応答はその応力状態に大きく依存するため、縮小模型において実物の応力場を再現する遠心模型実験をターゲットにキャリブレーションすることが一般化しつつあり、大林組の技術研究所でも自社開発技術の検証のほか、社外か

らの依頼による遠心模型実験を実施している。液状化地盤の地震応答解析については、共通の解析ターゲットを用いた解析プログラムの検証に関する国際会議⁵⁾や、土木学会のブラインド解析⁶⁾が開催されている。

市街地の風環境評価では、建築学会の流体数値計算による風環境評価ガイドライン作成WGによる各種ベンチマークテストが行われている。風洞実験結果との比較や計算結果相互の比較から、ビル風等の強風風環境評価の予測精度に関する検証が行われ、流体数値解析の適切な使用に関するガイドブックがまとめられている。風環境シミュレータ Zephyrus も全てのベンチマーク課題に対応し、その予測精度はガイドブック内で公表されている。

風荷重評価を対象とした流体数値解析では共通のベンチマーク課題の設定までには至っておらず、各機関が保有する風洞実験結果を対象とした解析精度の検証が行われている段階である。Fig.24 は直方体状の建物壁面に作用する風圧分布の予測結果を風洞実験結果と比較した例である。平均ならびに変動風圧係数の一致は非常に良いが、ピーク風圧係数については、計算でのアンサンブル平均回数が少なく、ばらつきが見られる。

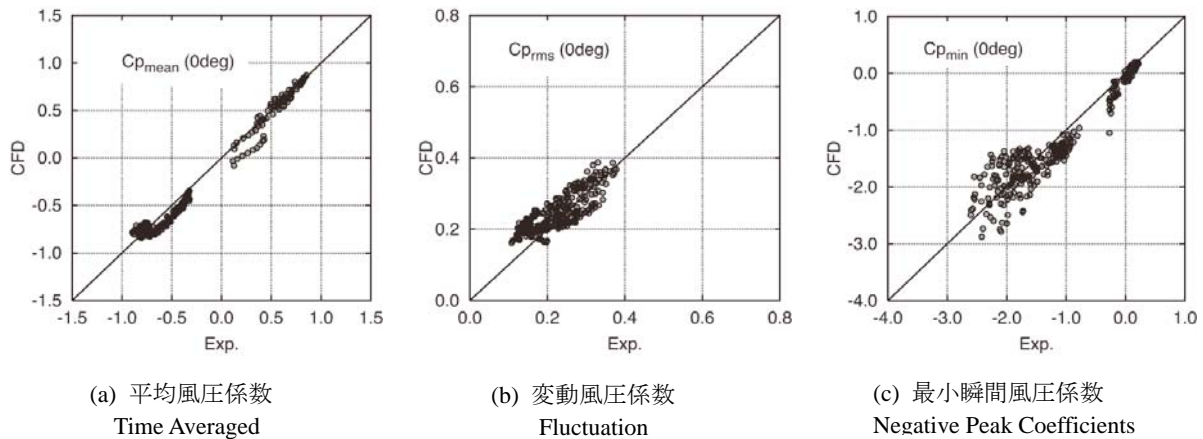


Fig.24 アスペクト比3の直方体状の建物壁面に作用する風圧係数の比較（風向0度）
横軸：風洞実験結果，縦軸：計算結果

Correlations Between Computed and Experimental Wall Surface Pressure Coefficients
Over an Aspect-Ratio-3 Square-Cylinder-Shape Building

建築音響の音の伝搬等に関しては、日本建築学会の音響解析小委員会により、数値解析ベンチマーク(AIJ-BPCA)が整備されつつある。音響に関連した数値解析手法の相互比較を行うためのプラットフォームとして、WEB上で一般公開されている⁷⁾。外部問題、内部問題、固体伝搬問題に大別されており、利用者は他の機関との解析結果や性能比較が可能である。

4.2 設計ツールとの連携

3次元建物モデルを利用して設計図の完成度を高める技術を BIM (Building Information Modeling) と呼ぶ。一般に建物の意匠設計・構造設計・設備設計は、各分野の専門の設計者によって行われる。予定通りの工期と工事費で建物を実現するには、これらの設計を統合して調整し整合性を確保することが重要である。このような設計の統合・調整には、建物の完成形だけでなく施工過程に関わる知識も求められるため、国内では「生産設計」と呼んで総合建設会社が担うことが多い。一方、海外では、設計の統合・調整が不十分なために図面間の不整合が発生し、工事の遅延や工事費の増大を招いていた。BIMでは意匠設計・構造設計・設備設計の各モデルをコンピュータ内で統合することにより、物理的な不整合の発見が容易になる。そのため、海外では、工期と工事費を安定させる技術として BIM に注目が集まっている。

このように、現時点で BIM の効果は「設計図の完成度向上」と考えられているが、今後は、設計の上流で建物の性能を解析する技術との連携や、建物の運用段階での FM (Facility Management) への応用が期待されている。例えば、Zephyrus や Appias では周辺街区の建物形状として GIS データを用いているが、計画建物の形状については CAD データの利用は極めて限定される。これは建築 CAD 図面では全て線分で表現されていて、建物ボリュームの情報が定義されていないことによる。建物の3次元モデルデータが共有されれば技術提案、設計、施工、メンテナンス、リニューアルといったライフサイクルの各段階において一元的な管理が可能となる。今後の BIM の発達・普及にとともなう、建物の3次元モデルデータの採用が待たれる。

4.3 技術の継承とメンテナンス

数値解析技術は改良の積み重ねにより、精度や適用範囲が広がるため、これで完成という明確なゴールを設定しにくい技術と言える。数値解析技術の開発や改良のためには、解析プログラムをコーディングする技術が必要であることは当然であるが、現象のモデル化に必要なデータを得るための実験の計画から実施、既往のデータの収集と分析、それらの結果から実現象を数学モデルとして表現する力、そして、精度検証のための実験に至るまで、様々な技術が要求され、

それらは全て一つの数値解析技術の中に生きていることになる。よくある問題として、解析プログラムの開発者以外は、その中身が分からず、メンテナンスや改良・高度化が行えないということが少なくない。どのような組織においても、人は必ず入れ替わっていくため、解析プログラムの中身に関する情報を第三者に分かるような形で残しておくこと、そして、修正や改良作業ができる人材を育成しておくことが重要である。

一方、如何に優れた数値解析技術を有していても、それだけでは不十分であり、それを使うユーザーが十分な知識や経験を持っているかどうか、結果を大きく左右すると言える。解析の目的に合わせて対象物をモデル化し、計算に必要な諸条件を適切に与えた上で、得られた結果の妥当性を正しく判断できることが重要であり、そのためには、人材の育成が不可欠である。企業における OJT のように、数多くの解析経験を積むことが優れたユーザーを生むためには必要であろう。

開発したプログラムを多くの人が使えるようにするためには、利用マニュアルの作成だけでなく、使いやすい環境を整備することが重要である。分厚いマニュアルを読まないと使えないプログラムではなかなか普及し難い。利用上の疑問点や問題解決のためのサポート体制が整っていることも数値解析技術を有効に活用するためには重要である。

5. おわりに

安全で高品質な構造物や快適な環境を創り出すためには、信頼性の高い数値解析技術が不可欠である。実験では見ることができない、あるいは実験が現実的に不可能な状況でも、数値解析技術を駆使すれば、必要な情報を居ながらにして得ることができるという点で非常に魅力のある技術である。現在は、まだ数値解析技術が風洞実験や構造実験などに取って代わるだけの信頼性を十分得ているとは言い難いが、究極の目標は全ての現象が数値解析により再現可能となることである。そのためには、実現象との比較、検証解析を重ねながら、精度向上のための継続的な努力が必要である。

一方で、コンピュータや解析プログラムに頼り過ぎず、技術者としてのセンスを失わないこと、結果を把握し、判断する力を持つことが大切である。数値解析技術はあくまでもツールであり、それを使う人の技術力が問われるのは、将来においても変わらないであろう。

参考文献

- 1) 国土技術研究センター：建設技術審査証明事業報告書，URUP 工法（地上発進・到達シールドによるアンダーパスの急速施工法），平成 17 年 8 月
- 2) 楠原文雄，他：ACI 春季大会（鉄筋コンクリート造柱梁接合部の共通ブラインド解析），コンクリート工学，Vol.45，No.8，pp.48-49，2007
- 3) http://www.bosai.go.jp/hyogo/project/bridge_compe.html
- 4) 日本建築学会：コンクリート系構造の部材解析モデルと設計への応用，2008 年 3 月
- 5) Arulanandan, K. and Scott, R. F.,: Verification of Numerical Procedures for the Analysis of Soil Liquefaction Problems, Balkema, 1994.
- 6) 土木学会 地震工学委員会：レベル 2 地震動による液状化研究小委員会活動成果報告書，2003 年 6 月
- 7) <http://gacoust.Hwe.oita-u.ac.jp/AIJ-BPCA/index.html>

本論文中で使用した地図データの許諾番号：Z09LD 第 111 号、Z09LD 第 112 号（ゼンリン）