

土木建設デザインとバーチャルリアリティ

先進のソリューションや国際的な研究アプローチから 浮かび上がる次代への展開

「FORUM8 デザインフェスティバル2009-3Days」(東京コンファレンスセンター品川、09年11月18・19・20日開催)誌上報告連載特集の第2弾は、フェスティバルを構成する3イベントのうち「第3回 デザインコンファランス」に焦点を当てる。

三日間にわたったフェスティバルの初日は、デザインコンファランスのうち、基調となる午前の特別講演を受けて、午後からは<設計・解析><建築・BIM><木工>の各分野に分かれた技術セッションにより構成。続く第2日目はその続編として、<CAD & VR>および<技術サポート>の各セッションが行われた。

そこで今回は、デザインコンファランスのセッションごとに特別講演のポイントを紹介。併せて、一部講演に着目し、その再現に迫る。

橋梁編纂委員会・編集(ライティング・ソリューションズ)池野隆

第3回 デザインコンファランス

Day 1

■設計・解析セッション

フェスティバルのオープニングを兼ねる形となった今回デザインコンファランスは、各セッション共通の講演、東京大学大学院工学系研究科教授の前川宏一氏による「劣化したRC構造の非線形解析と知識構造化の方法」から始まった(*1 同講演については本特集後半で詳述)。

各技術セッションに分かれた後、東京都市大学研究員の青戸拡起氏は「FRAME3D解析事例とEngineer's Studioの課題」と題し、鋼アーチ橋を例にUC-win/Frames(3D)を使い検討したアーチリブの初期応力状態の違い、および床版剛性が動的解析結果に与える影響について解説。Engineer's Studioの今後の開発に向けた要望など、ユーザーとしての留意点にも触れている。

群馬大学大学院工学系研究科教授の鶴飼恵三氏による「地盤解析の現状と今後の展開」(*2 同講演については本特集後半で詳述)を受けた、(株)ブルドジオテクノ代表取締役の花田俊弘氏の講演は「地盤解析ユーザ事例：設計概要と課題」。崖を含む造成宅地の全体安定問題、ため池改修の地盤変形問題、既設擁壁の耐震診断などに対しGeoFEASを使った解析例を説明した。

■建築・BIMセッション

同セッション最初の講演は、日経BP社イエイリ建設ITラボの冨田龍太氏による「世界を超えた!“和魂洋才”で進化する日本のBIM」。Build Live Tokyo 2009を通じて浮かび上がった日本におけるBIMの現状、BIMの概要と海外の活用例、BIMによるイノベーション、それらを踏まえたBIM普及への期待を述べた。

また二部構成の講演ではまず、ドイツのBIM統合ソリューション・プロバイダー、ネメチェック Allplan社のSven Elbl氏が「Allplan(Architecture)日本語版」と題し、同社およびAllplanファミリー製品の概要、BIMに対する考え方、Allplanの機能などを説明。これを受けた韓国Basis社のKim Gibom氏の講演は「Allplanの韓国における建築適用事例」。Allplanを使ったBIM適用プロジェクトを例に、さまざまな機能やメリットについて紹介している。

オーストラリアのベンダー、Formation Design Systems社のJake Hannah氏は「Multiframe Ver.12、板要素対応」と題し、まずMultiframeソフトの機能や関連製品について紹介。とくに、Multiframe Ver.12の特徴である板要素解析に焦点を当て、プレートモデルはじめ他の平板なアイテムへの利用例を説明した。



「FORUM8 デザインフェスティバル2009-3Days」(東京コンファレンスセンター 品川)

写真はすべて(株)フォーラムエイト 提供

■水工セッション

同セッションは「浸水対策技術セミナー ～浸水対策と流出解析モデルの活用最新事情～」とのテーマを掲げるxpswmmユーザー会（主催：SWMMユーザー会、後援：NPO法人 水環境創生クラブ、FORUM8、XP Software社）も兼ねて実施されている。

広島大学大学院工学研究科教授の河原能久氏がまず、「洪水氾濫解析技術の汎用化に向けた課題」と題して講演。航空レーザ測量データと非構造格子を組み合わせた解析法、建物・流体間の相互作用および計算格子より小さな現象のモデル化、河川からの氾濫流量の推定法について解説した。

また、NPO法人 水環境創生クラブの石川高輝氏は「気候変動に対応する今後の流出解析モデルの活用について」を通じ、流出解析モデルの普及経緯、気候変動による降雨の変化、効果的な設計手法への転換、1Dおよび1D/2Dモデルによる解析事例、内水ハザードマップ、今後の流出解析モデルの利用方法と求められる機能などを説明した。

芝浦工業大学工学部の守田優教授による講演は「都市雨水排水における洪水リスクの定量化と洪水リスクマネジメントへの応用」。洪水リスクマネジメントとは何か、浸水被害予測モデル、洪水リスクアセスメントの手法、洪水リスクアセスメントの応用などについて解説している。

水工分野の具体的な取り組みについては3氏がリレー形式で講演。初めに日本水工設計(株)の山田龍男氏が「水・物質循環解析ソフトウェア共通プラットフォーム（CommonMP）の動向について」と題し、国土交通省が進めるCommonMP開発の目的と特徴、その開発・運営方針とそれを受けたコンソーシアムの設立、開発メリット、開発状況とロードマップを紹介。続いて同じく日本水工設計(株)の川崎重紀氏は「地表面氾濫解析を用いた浸水リスク軽減対策」と題し、浸水常襲地区の住宅地を重点地区とした浸水対策によるリスク軽減策の考え方を提示。さらに、中日本建設コンサルタント(株)の長縄清貴氏は「XP-SWMMによる河川と地区内水路網の統合解析」と題し、トンネル部を有する二級河川および外水氾濫を受ける低平地水路網でのxpswmmを用いた水理解析を例に、浸水メカニズムの解明と浸水対策の検討について説明した。

Day 2

■CAD & VRセッション

まず、一般社団法人IAI日本代表理事の山下純一氏による講演は「建築の設計・生産に対するBIMのインパクト／仮想ライブ競技設計（Build Live Tokyo 2009）について」。IAIの

活動や組織を紹介した後、参加チームがインターネット上でコラボレーションしつつBIMを実践し、その様子をリアルタイムで公開したBuild Live Tokyo 2009について説明。BIMが求められる背景から、それが建築設計や生産プロセスに及ぼす影響にも言及した。

前日の建築・BIMセッションに続く独ネメチェック Allplan社のSven Elbl氏および韓国Basis社のKim Gibom氏による講演を受け、フランスのBIMソリューション・プロバイダー、グレイテック社最高執行責任者のAlexandre Tartas氏は「仏グレイテック社のモデリングから設計への建設統合プロセス」と題して講演。地球温暖化や自然災害など21世紀におけるさまざまな課題を視野に建設産業が求められる対応とそれに対する同社の提供するBIMソリューション、それを通じた生産性向上アプローチについて説明する。

次いで、関西大学総合情報学部教授の田中成典氏が「国産3次元CADエンジンの開発」（※3同講演については次号（2月号）で詳述）と題し、さらに東京都市大学総合研究所教授の吉川弘道氏が「エンジニア教育／大学教育におけるソフトウェアの役割と活用」と題し、それぞれ講演を行っている（※4同講演については次号（2月号）で詳述）。

同デザインコンファランス各セッションにおける講演のうち、一部（本文中で示した2講演）を以下に詳しく紹介する。
（なお、同コンファランスのプレゼンテーションおよび技術サポートセッションについては省略しています）

デザインコンファランス

「設計・解析」セッション

特別講演



劣化したRC構造の非線形解析と知識構造化の方法

東京大学大学院
工学系研究科 教授
前川 宏一 氏

「マルチスケール解析あるいは多相物理化学連成解析がこの数年、構造工学に関する国際会議をはじめ、さまざまな分野での主要なキーワードとなってきました」。目に見えるマクロな構造物と構成材料のミクロな物質世界を繋げようという学術的なアプローチはもともとなされてきた。ただ、それらを厳密に解析で考慮するには、計算機の飛躍的な性能の向上が不可欠でもあった。それが近年、計算環境は大幅に向上。そこで、さまざまな情報の有効活用に結び付けるべくそれらをうまく整理し、定量的に使っていきけるようなフレームワークの形成が目ざされるに至っている。東京大学大学院工学系研究科教授の前川宏一氏はそうした背景に触れた後、多様な事例を交えながら自身の描く知識構造化の考え方について解説する。

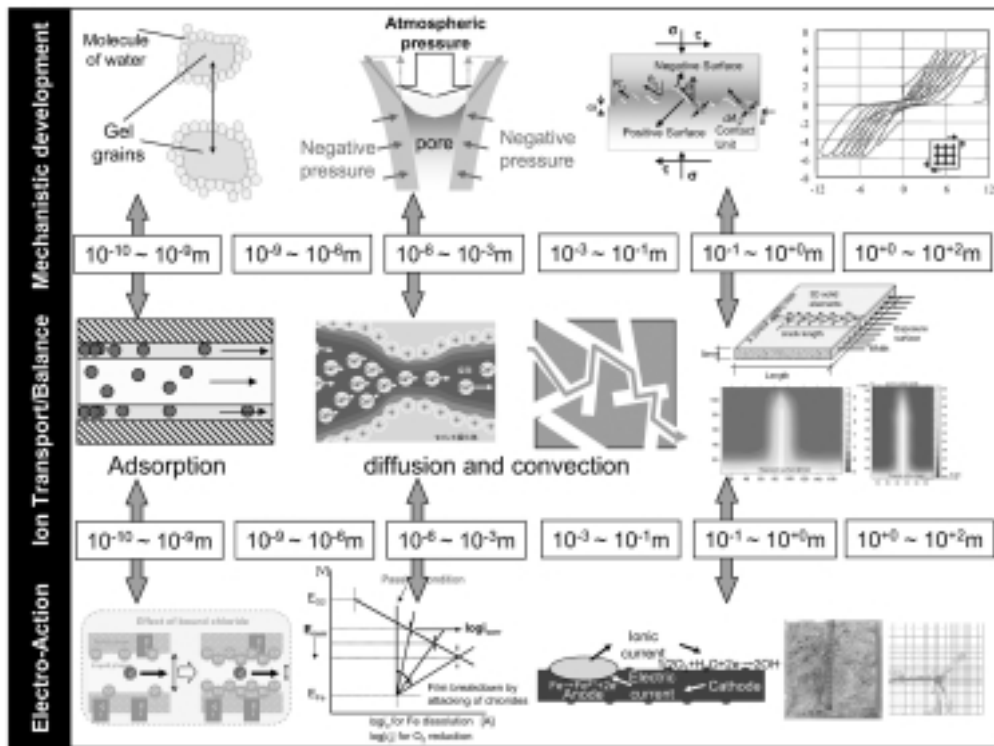
マルチスケール解析による知識の有効活用

同氏はまず、ともに同じような条件の下、半世紀以上前に建設されたコンクリート橋が、一方は健全な状態を保ち、他方は腐食損傷が顕著で一部通行規制を余儀なくされている例を挙げる。そのほか実際に崩壊し

た橋梁を含め、エンジニアとしてはそれらの事象の中から将来の有効な対策にも通じるさまざまな知識を定量的に把握し、活用していくことが重要になると位置づける。

その際、インフラ性能のシミュレーションに用いられる膨大な知識を運用するプラットフォームの概念を、さまざまなものを整理・収納する「筆筒」に例える。コンクリートの性質に限って見ても、握り拳程度の大きさの試験体、それを構成する砂粒一個レベル、毛細管空隙のレベル、といった具合にスケールによってその知識は大きく異なる。そのため、それぞれの知識はその内容やスケールに応じて入れるべき筆筒の位置が決められる。とは言え、小さなスケールの現象と大きなその集合体としての現象は当然繋がっている。小さな世界の現象は積分することで巨視的なレベルを、逆に巨視的な現象は微分することにより小さな現象を描くことが出来る。

ではなぜ、そのようなことをするのか。コンクリート構造物の挙動や寿命を考える時、耐震などの問題であれば、1～2オーダーの寸法の異なる材料と部材の



性質を知ることである程度予測可能となる。前川宏一氏はしかし、10年、50年、あるいは100年先のことになる、さらに小さなスケールの中で展開される物理化学的な事象の知識が求められると述べる。

「橋梁の場合、鉄筋とコンクリートのおよそ0.1~1m四方の要素の平均的な挙動が必要になります」。これを知るためには、より小さなレベルでのひび割れの挙動を把握しなければならない。さらにコンクリートのクリープや乾燥収縮を定量的に扱おうとすれば、層間空隙、ゲル空隙、キャピラリー空隙などセメントペースト内の構造についても分類して、熱力学的な事象の知識を持つておく必要がある。たとえば、コンクリートで体積の変化が起こる際、水が主要な役割を果たす。高強度コンクリートであれば、その多くは最も微小な相間空隙に捕捉されており、水の動きがひび割れやクリープの現象を決め、温度による影響の感受性をも決めると説く。

自身が学生の頃、勉強すればするほど分からなくなったことの一つとして同氏は、片や比較的高い温度でコンクリートを養生すると硬化体のマトリックスはポーラスになり、大きな空隙を生じて強度は下がるとしながら、別の本には高い温度で養生するとセメント硬化体は非常に緻密になり、硬くなって中に捕捉される空隙は少なくなるとされていたことを挙げる。この

一見して二律背反する命題については、高い温度で養生したコンクリートは、10ナノメートル (nm) レベルではゲル粒子が緻密化し、ゲルの中の空隙が減少。その結果、ゲルとゲルの間の空隙は大きくなり、マイクロメートル (μm) レベルでは粗くなる — という、いずれもコンクリートの正しい姿を映していると説明づける。

同様に、発生している小さな一本のクラック (0.1mm オーダー) と数多くのひび割れが集合している状態 (10cm オーダー) とに分け、伝達される平均的な力と歪を Tension-stiffness カーブおよび Tension-softening カーブにより表現。やはり、それぞれの挙動は全く異なって見えるのに、小さなスケール (前者) のケースを集合として計算すると後者の挙動と重なってくるのが分かるとする。

「これらの知識は納め方を誤ると混乱を来します」。したがって、前述の筆筒ではスケールに応じて知識を整理。それに力学的、化学的、物理化学的あるいは電気化学的な情報を入れた別の筆筒を繋げ、必要に応じ適切にカップリングをするという手法を提案する。

知識の運用に当たり、もう一つの留意ポイントとして、同氏は同じスケールのところでも連成し、関係をモデル化すべきと語る。そうすることでスケールの違いに応じた知識が直列に繋がるのと併せ、同じスケー

ルレベルの異なる領域の知識を自然な形で連携させることも可能になるという。

たとえば、ゲル空隙の中のイオン平衡の変化で水の表面張力が変わり、めぐりめぐって構造物の疲労寿命にも影響してくる。これは熱伝導有限要素解析と物質移動解析を連成させることで数値計算が可能である。また、塩化物が移動する場合も、ひび割れのような大きなスケールの空隙からゲル空隙やキャピラリー空隙のような微小連続空隙に至るまで、さまざまな知識が繋がってくる。拡散係数はあくまで特殊な条件下での移動抵抗に過ぎず、より一般的な場で扱うには、この微細なレベルまで遡らなければならない場合もある。そうした事情も含め、それぞれ異なるスケールおよび領域の知識を整理・構造化し、ニーズに応じた有限要素法の複数プログラムを用意。情報の共有を図っていく、という構図を描く。

劣化構造への応用

このようなフレームワークは実際に、新設構造物の設計あるいは性能の確認・照査のみならず、現実には損傷を受けている部材やインフラを将来どう維持していくか、あるいは現状のリスクをどう考えるかといった局面で使われ始めている。

前川宏一氏がその具体例としてまず挙げるのは、既存橋脚の耐震補強問題。そこではひび割れ、鉄筋との相互作用、付着、せん断など、数mmレベルの力学モデルと数十mレベルの構造物の応答が同時に解かれている。

続いて、フレームと壁という著しく剛性の異なる面をスラブで繋いだ既存の海水管ダクトが非常に大きな地盤変形を受け、上下床版にせん断が入るケース。そのバックチェックでは、開口部周りの面外支持力について3次元の構造解析を実施。さらに腐食があった場合の影響を考慮した評価も行われている。

また、鉄筋の腐食速度やひび割れの膨張について、どこまで信用できるかは個々のモデル化の信頼性に大きく依存するとしつつも、マクロなレベルの物質の透過性に関する知識などを基に、比較的容易に計算可能な環境にはなっているという。

そのような事例として、旧設計基準による地中ダクトに対し、強制的に腐食を導入して耐震性がどう変化したか調べる実験と、併せてそれをWCOMD(RC構造の2次元動的非線形解析)でシミュレーションした結果を挙げる。腐食の有無が破壊のモードに与える影響をはじめ、数値解析により大きな損傷については悪くないレベルで予測できそうとの見方を示す。「想定した以

上に、非静定の構造システムでは、腐食劣化が酷く進行して見かけも相当に悪い割に、構造応答は無損傷のもの比べてあまり変わらなかったことでした」

これと関連し、腐食により初期の剛性は落ちるのに耐力が上がるケース、あるいはせん断スパン内で付着に損傷が入ると構造部材としてせん断に対しては強くなるケースの研究例も紹介。そのような際には構造的な性能を担保しておき、それ以上腐食が進まないようにするといったメンテナンス戦略のあり方を語る。ただ、逆に見た目はさほどひどい損傷がないのに突然崩落した橋梁事故の例もあり、腐食によるひび割れや損傷が定着部のみに集中する状況を再現した研究にも触れる。見かけや印象と現実の性能とが随分違うというケースは少なからず経験してきており、そうした知識の有効利用はその意味からも求められるとする。

同氏は近年とくに進展してきたものとして、計算機の向上によるマルチスケール解析の実現と、実験を通じた非常に小さなスケールでの水の動きの解明に注目する。これらを駆使してマクロな実験結果を微分し、個々の変形を司る事象の特性を逆抽出することで、高強度のコンクリートから普通強度のコンクリートまでのクリープ現象を一つのロジックで解けるようになるという。「あとはそれらを多角的かつ地道に検証していく必要があります」

高サイクル疲労荷重の検討

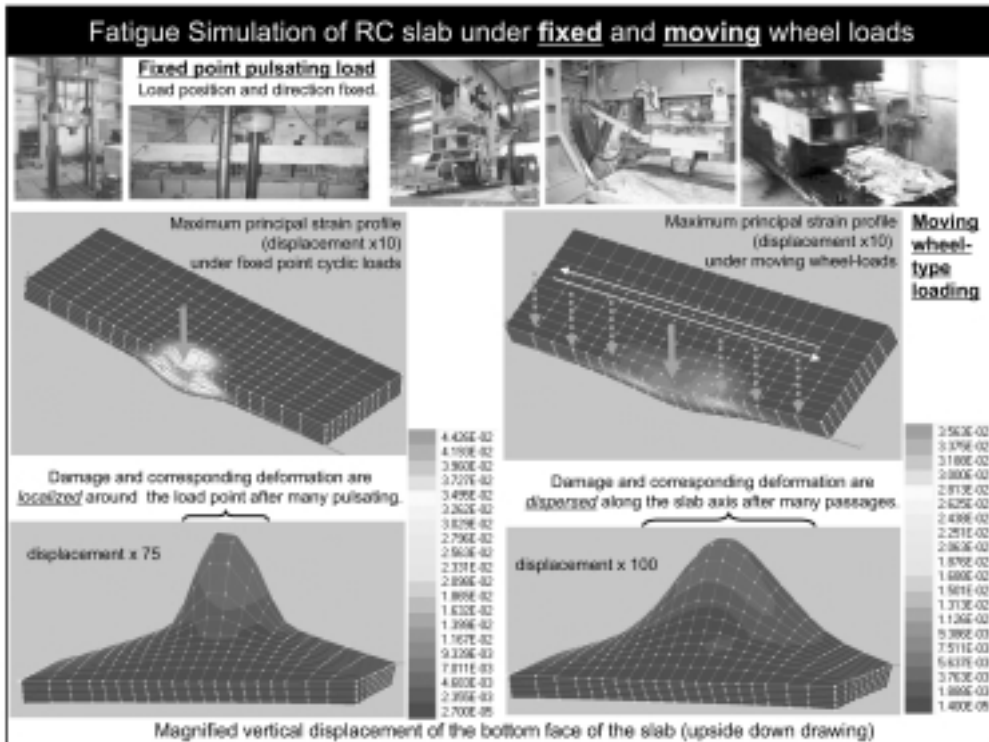
「これらの延長上で、現在は疲労の問題も扱えるようになってきています」。高サイクルの疲労を受けるといった問題に対して従来は100万回、1,000万回と詳細に計算で追っていくことは出来なかった。それが、疲労試験のスピードを超えた速さで計算が可能になりつつある、と前川宏一氏は述べる。

たとえば、橋梁の床版は最も厳しい状況に置かれ、橋梁自体の寿命にも直結する。とは言え、過剰に設計してはコストアップになってしまう上、軽量化を図りたいニーズもある。壊れた場合の社会的負担を考えればメンテナンスはさらに重要。しかし、床版への高サイクル疲労荷重を検討する際、移動する荷重が繰り返し掛かることで一点に同じ荷重が掛かるケースと比べ寿命は1/100～1/1000短くなる。材料構成則をレベルアップさせ、計算機的能力向上とともに、時間積分を高速化する数学的方法を組み合わせることで、たとえば百万回の3次元シミュレーションなら半日程度、と実際の疲労試験と比べはるかに短期間で、移動荷重による疲労損傷の計算が可能となってきた。

この手法を用いた一例として、同氏は開通前の橋梁

固定および移動交通荷重載荷時の RC スラブの疲労シミュレーション

画像は前川宏一氏 提供



で激しい収縮によりたくさんのひび割れが生じたケースに言及する。そこでは離散化のデータを揃えた上で、中に発生する水の移動や収縮の張力などを全橋（橋長約 300m）レベルで数時間かけて計算。150 トンの交通荷重を千回、一万回、十万回と掛けた時の各スパンの撓みを予測し、その後、撤去して新設すべきか、補修・補強すべきかの検討に使われている。

また羽田空港4本目の新滑走路（D滑走路）建設に当たっては、この 18,000 枚の PC パネルを海上で接合し、500ブロックから成る巨大な人工構造物に対し、設計荷重 400 トン以上で 200 万回～2,000 万回の疲労寿命が解析（100年バックチェック）された。その結果、パネル接合部の鉄筋が疲労により少しずつ引抜けることで、曲げモーメントが予めプレストレスの導入されているところに誘導される機構を説明し、長寿命が期待できる設計になっていることなどを明らかにした。

広がる可能性と今後の展開

多様な知識を連立して解くマルチスケールシステムが巨大になるに従い、計算を実行して初めてミクロとマクロの世界の繋がりが新たに発見されることもあるという。

前川宏一氏は最近の例として、長時間水に浸かっていたコンクリートからのカルシウム生成物の溶出とコ

ンクリート強度向上の関係について説明する。普通は溶け出せば微細組織が粗くなって強度は弱くなる。しかし、未水和のセメントを内包する高性能コンクリートでは、時間の経過とともに弱い結晶が選択的に溶出、退場して空隙が出来、そこに新しい強固な結晶が後になって析出してくる中で水饱和度が上がり、熱が出てきて組織がどんどん緻密化される — という計算がプログラムにより導かれた。

これに関連し、コンクリートから溶出するカルシウムが普通の土ではそこにある水に溶けることで周りのカルシウム濃度が上がり、拡散の勾配は緩やかになる。それに対して吸着性の高いペントナイトでは、出てきたカルシウムがすべて固体化されてしまい、周りのカルシウムを吸い出し続けるとの計算結果がもたらされ、後の実験で実証されている。

そのほか、コンクリート中のせん断伝達を司るサブルーチンは地盤の液状化解析モジュールと解析構造がほとんど同じで、前者のプログラムを少し書き換えるだけで後者の問題にも使えることが分かった。つまり、スケールは違うものの土とコンクリートはともに粒の集合であり、そのレベルで見れば知識もかなり構造化できるのではと考えられた。

また、原子力発電所のバックチェックを通じ、あらゆる地中構造物との関わりの中で現実の挙動を説明す

るというスタンスの重要性に着目。その面からもスケールの違いを明確にしたフレームワークの形成が求められるとする。

「東京大学地震研究所の堀教授のもとで、多様かつ膨大な GIS 情報を連携して 100 年後のシミュレーションなど、東京を丸ごと解こうという試みが進められてい

ます」。その際、それぞれのレベルでマルチスケールの解析を持っていれば、それをそのまま渡すことで全体の問題を解くことにも繋がるはず、と前川宏一氏は語る。「どういう形で使われるかは別としても、知識をうまく整理して使える形で持っておくための、(マルチスケールは) 一つの有効な方法ではと思っています」

デザインコンファランス

「設計・解析」セッション

特別講演



地盤解析の現状と今後の展開

群馬大学大学院
工学研究科 教授
鵜飼 恵三 氏

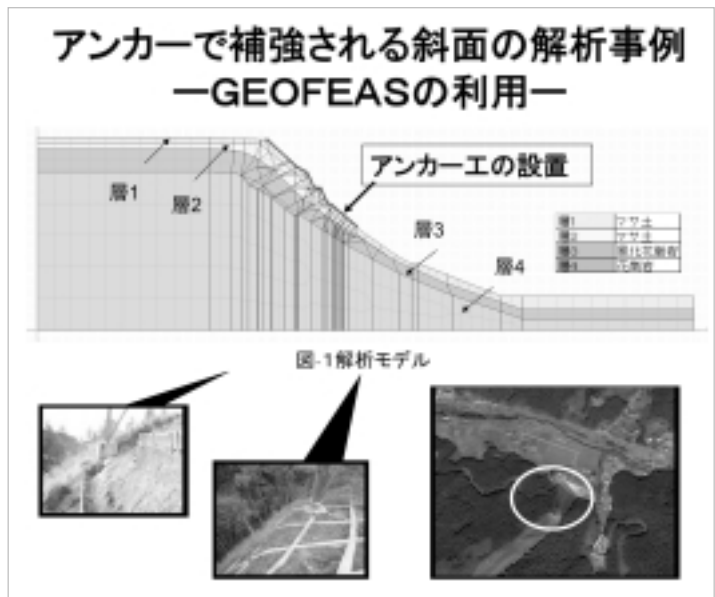
近年、土砂災害が多く発生。たとえば、09年には山口県で発生した土石流により老人施設が被害を受け、多くの犠牲者を出した。その前年、08年に起きた岩手・宮城内陸地震では大きな地すべりがもたらされた。やはり同年に中国中西部を襲った四川大地震でも土砂災害による犠牲はきわめて大きかった。これらを含め土砂災害が気候変動や地球温暖化の影響と関連づけて語られる場面も少なくない。群馬大学大学院工学研究科教授の鵜飼恵三氏はしかし、険しい地形を有し、降雨も非常に多い上、地震が多発する日本では昔から繰り返されてきた事象と位置づける。つまり、日本はもともと土砂災害の起きやすい環境にあり、それだけに発生時に備えた対応を図っていくことが非常に重要になるという。

同氏の研究室では地盤工学、とくに斜面の分野を中心に取り組んでいる。今回講演では同大准教授の若井明彦氏および同助教の蔡飛氏の協力を得て、地すべり災害のメカニズムとその対策について数値解析やシミュレーションにより表現した研究成果を報告。その過程で開発したソフトウェアの利用例にも言及している。

斜面の安全率評価

斜面の補強事例

画像は鵜飼恵三氏 提供



鵜飼恵三氏はまず、斜面の安全率を求める従来手法を整理。斜面安定解析で用いられる安全率について、任意のすべり面に沿って斜面が極限平衡状態になるよう、せん断強度定数を減少させる因数と定義づける。併せて、モール・クーロンの式 ($\tau f = c + \tan \phi$, $\tau f =$ 土のせん断強度) を基に、あるパラメータ (F) で割ってせん断強度を低減 ($\tau ff = c/F + \tan \phi / F$)。 F の値が大きくなるにつれて強度定数(斜面の強度)が小さくなっていき、斜面が破壊に至る時の F の値を斜面の安全率とするせん断強度低減法の仕組みを説明する。

これを弾塑性有限要素法（FEM）に応用、同氏は両者を合わせてソフト（3次元弾塑性地盤解析「GeoFEAS」）に組み込み、斜面の安全率を求めることにした。その際、安全率は従来の極限平衡法（LEM）で定義されるそれと同じ意味を持つとする。

そこでGeoFEASと、LEMによる方法としてフェレニウス法および簡易ビショップ法からそれぞれ計算される安全率の値の比較を行っている。

まず単純かつ均質なケース（間隙水圧 $u=0$ ）においては、FEMでは1.384という安全率だったのに対し、ビショップ法が1.369とほぼ同じ。フェレニウス法では1.292と多少小さめながらほぼ同程度の値となった。

次いで、下方に地下水があると仮定した均質なケース（間隙水圧 $u=0.5 \gamma h$ 、 h =地表面からの深さ）においては、FEMでは0.833と、ビショップ法の0.821とほぼ同程度。フェレニウス法のみが0.671と小さな値を示した。

一方、盛土をした場合などに考えられるのが軟弱層を含む、より不均質なケース。その際たとえば、円弧すべり法などの従来法で安全率を求めると異なった値が出てきてしまう。「そのため、さまざまな非線形のすべり面を想定して計算しますが、それでも従来法では難しいのです」。それがFEMであればせん断歪の大きな層を、LEMで求められるものとはほぼ同じ形で表現。しかも安全率を良い値で算出できる。つまり、FEMは一つのソフトウェアで均質な場合と不均質な場合、いずれも確実に対応できる有効な方法、と同氏は説く。

「対策工の設計でもこの方法が非常に有効で、アンカーや杭工による場合なども同じようにせん断強度低減法で計算すると、現在設計で用いられている式が出てきます」。たとえば、アンカーによる斜面の補強効果を

を3次元FEMによりモデル化。安全率とアンカー方向角、あるいはアンカー間隔の関係も高精度に求められる。対策工では多段アンカーが用いられるが、これもモデル化時に調整することで実際の効果を安全率で表現し、評価できる。

ただ、3次元FEMではまだ計算時間もかかるため、実際は2次元で解くことが多い。計算機の中で雨を降らせると雨が斜面の中にしみ込んで地下水が上昇。間隙圧が上昇するのに伴い安全率は低下してくる。そのようなケースでは安全率を弾塑性FEMおよびせん断強度低減法で、地下水の変化を浸透流解析でそれぞれ求め、ドッキングさせるとする。

そのほか、道路の盛土に対するジオテキスタイルによる斜面の補強では、弾塑性FEMを用いてその効果を解析。その有効な配置位置や長さ、強さ、あるいは土質定数や土質の種類を変えるとどうなるか、などを容易に計算。局所破壊をモデル化し、予測することも可能という。

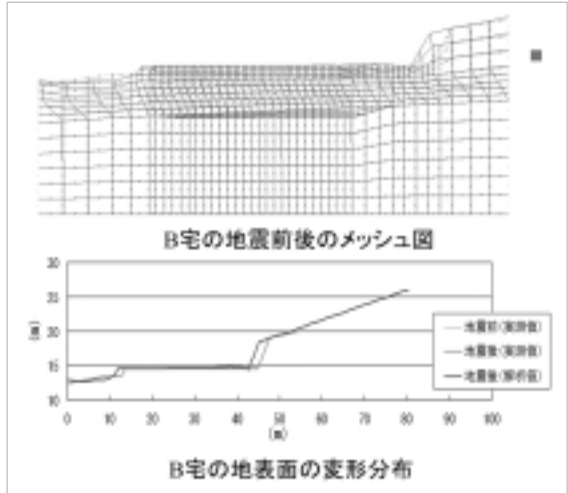
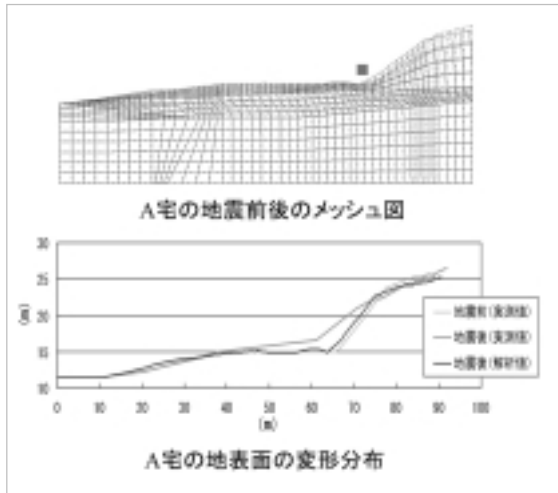
地盤の液状化予測

地盤の液状化に関しては、07年に発生した新潟県中越沖地震の際、日本海に面した柏崎刈羽原子力発電所と砂丘を隔てて隣接する集落が受けた液状化被害に着目。その中で、液状化対策の有無が被害の度合いを分けた2軒の家について行った、FEMを用いた地盤の動的有効応力解析（UWLC）による解析例を紹介している。

砂丘構造の脆い地盤に加え、地下水位がもともと高いこともあり、対策をしていなかった「A宅」では地盤が動き、段差が出来るなど液状化による被害を生じた。一方、比較的被害が軽微だった「B宅」では暗渠排水、

液状化による被害が大きかった家（A宅）と小さかった家（B宅）の解析例

画像は鶴飼恵三氏 提供



杭工、地盤改良と3種類の対策工を実施していた。そこで、これら対策工の中でそれぞれがどの程度効果があったのか、UWLCにより評価を行った。

B宅は、家屋の周囲に約1mの深さの暗渠排水を設置。排水もされているため、効果があるように見えるものの、対策工としての効果がさほどないと想定された。また、セメントを使った厚さ約1mの表層地盤改良は不同沈下を防ぐ面ではともかく、その下の液状化層までは届かず、やはり大きな効果は期待できないと見られた。これらに対して杭工は、長さ6mの杭が92本打たれ、支持層に達していることで一定の効果があるものと予測された。

まず、三軸試験によりモデルのパラメータを同定し、概ね良い結果が得られることを確認。それを基にPZ-Sandモデルを使って地震波を入力し、A宅・B宅における液状化の状況を調べた。その結果、A宅における時刻ごとの間隙水圧が上昇し、大きな被害が生じていることは予想された。また、B宅でも液状化はかなり起こっており、対策がなければ相当危険であったことも浮かび上がった。それぞれの対策効果ということでは、暗渠排水および地盤改良による効果はやはり、ほとんどなかったという。一方、杭基礎によって水平方向および鉛直方向の変位量はかなり小さくなっており、それが非常に有効な方法であることは定量的に示された。さらに、対策工の規模の評価も可能ということで、鶴飼恵三氏は実用的な液状化解析ソフトとしての機能面にも言及する。

大規模地すべりの機構解明

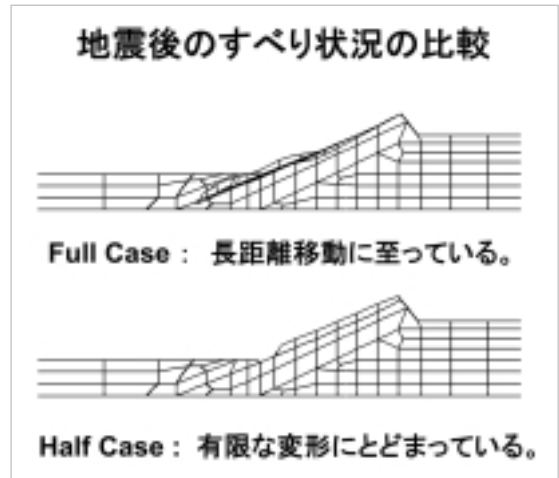
講演最後のテーマは、地震による大規模地すべりの機構解明。その対象事例となった新潟県中越地震（04年）は、比較的内地部において大規模な被害をもたらすとともに、それまでになく大規模かつ集中的な地すべりが発生したことで知られる。鶴飼恵三氏はその幅数百m・深さ数十mに及ぶ大規模地すべりのメカニズムを調査している。

そのうち、横渡にある三つの崩壊地はほぼ同じ地層構造を持ち、火山灰層の強度が落ちてすべったもの。その地震前の強度および地震中の強度低下プロセスを把握するため、まず現場で不攪乱試料を採取。それを実験室に持ち込んで小さな試験供試体をつくり、そこに地震波を与えて強度がどう低下するか、繰り返し一面せん断試験により調べた。

その結果、たとえば、地震力を一回、二回と与えると強度がガタッと落ち、三回、四回と繰り返し与えていくに従い、強度はほとんどゼロになることが分かっ

地震力と地すべりの関係

画像は鶴飼恵三氏 提供



た。このことから、地震により火山灰層の部分で強度がほとんどゼロとなってすべったことが明らかになった。

次いでそれを、動的弾塑性FEM（UWLC）を使って2次元で全応力解析している。これは、モデルに同氏らが開発した鶴飼・若井モデル、応力関係に双曲線モデル、破壊基準にモール・クーロンの破壊基準をそれぞれ採用。既に3次元化にも対応しているほか、従来の考え方に対応しつつ動的な解析にも適合するというもの。

モデル化に当たっては、実際に近い600galの地震力が加わった場合とその半分が加わった場合の2種類を設定。これにより、半分の地震力のケースでは斜面が壊れないのに対し、実際の地震力を入れると30秒程度は落ち着いているが、ある時点でスッとすべってしまう様子が示された。このモデルを基に地震力とせん断強度を単純化するため、地盤の強度と自重のすべり面方向の成分との釣り合いに着目。地震前は自重よりも地盤の強度の方が大きく、地震後は繰り返し荷重により地盤の強度が落ち、自重の方が勝って大規模地すべり（長距離移動）に繋がるというメカニズムが見出された。併せて、そこでの対策工をどうすべきか、それによってどの程度地盤や斜面が強くなるかも解析し、明らかにしている。

同氏らはそのほか、自然斜面の液状化による崩壊や粘性土の大規模地すべりなども解析し、メカニズム的には同様な結果を得たと語る。「実はいずれも地下水が大きな影響を与えています。したがって、地震時の大規模地すべりを緩和するためにも、地下水位を下げる対策工が有効であるということが分かりました」

（※3、※4の2講演は次号（2月号）へ）