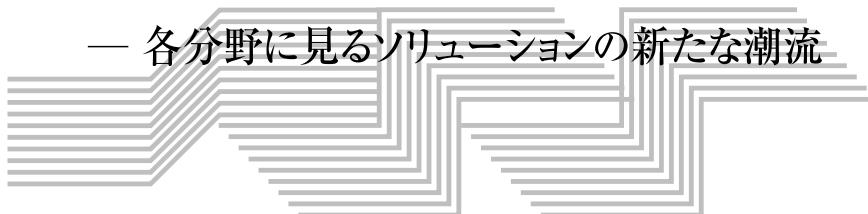


「第2回 FORUM8デザインコンファレンス」

誌上報告(1)

土木建設デザインの多様なニーズ

— 各分野に見るソリューションの新たな潮流



戦後、わが国経済の成長や国民生活の質の向上を支えてきた社会資本。公共事業縮減が言われる一方で、その蓄積された膨大な既設構造物が補修・補強あるいは新設をするサイクルを迎える中、今後は益々それらの維持管理ニーズが増大するものと想定されている。また、大規模な被害をもたらす地震や水害などの自然災害が相次いで発生しており、それらへのいっそう効果的な対応策も求められる。加えて、CALS/EC（公共事業支援統合情報システム）の浸透とともにIT（情報技術）活用の広がり・高度化も着実に進展。こうした土木建設分野のデザインをめぐる環境の変化を受けて、それを支援するツールも先進ITと融合するなど、多様かつ高度な機能や新たな活用領域を切り開きつつある。

フォーラムエイトは去る9月19日、「第2回 FORUM8デザインコンファレンス」を東京コンファレンスセンター品川で開催した。立体骨組み構造の3次元解析プログラム「UC-win/FRAME(3D)」リリース（02年）を機に翌03年から「UC-win/FRAME(3D)協議会」をスタート。07年からはこれを発展させ、「UC-win/UC-1ユーザ協議会」と併催する形で同社の設計・解析・CADソリューションを広く協議する「デザインコンファレンス」として実施している（（株）フォーラムエイト代表取締役社長伊藤裕二氏）。

年内にUC-win/FRAME(3D)を継承する3次元解析CAD「Engineer's Studio」のリリースが予定される今回は冒頭、Engineer's Studioもサポートする「前川コンクリートモデル」の開発者、東京大学工学系研究科社会基盤学専攻教授の前川宏一氏による特別講演で幕を開けた。続く技術セッションは「土木」「建築」「設計CAD」「水工」の4分野に展開。それぞれ関連するテーマを設定した講演により構成される中で、「水工」については「第2回浸水対策技術セミナー」との位置づけで行われた。

そこで本特集は、11・12月号と連載で同コンファレンスに焦点を当て、土木建設デザインをめぐるさまざまな課題とそれに対するソリューションを中心に誌上での再現に迫る。

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



（株）フォーラムエイト 代表取締役社長 伊藤 裕二 氏



「第2回 FORUM8 デザインコンファレンス」(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

第2回 FORUM8 デザインコンファレンス UC-win/UC-1ユーザ協議会／第6回UC-win/FRAME3D協議会

11:00	デザインコンファレンス特別講演 「劣化した既設RC/PC構造物の非線形解析と維持管理」東京大学 工学系研究科社会基盤学専攻 教授 前川 宏一 氏			
13:00	■技術セッション			
17:00				
	●土木セッション	●建築セッション	●設計CADセッション	●水工セッション
13:00	地盤解析 特別講演 「最近の内陸地震による中山間地土砂災害について」 群馬大学 大学院 工学研究科 社会環境デザイン工学専攻 教授 鶴飼 恵三 氏	3D建築構造解析 開発者講演 「Multiframe新バージョンの開発」 豪Formation Design Systems社 Jason Yang氏	UC-win/FRAME(3D) ユーザ特別講演 「座屈拘束プレースを用いた鋼上路式アーチ橋の耐震補強設計例」 住友金属工業（株） 建設エンジニアリング事業部 土木橋梁部 開発営業技術室 前島 稔 氏	第2回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」 主催：SWMMユーザー会 後援：NPO 水環境創生クラブ、FORUM8、XP Software社 開会挨拶 SWMMユーザー会 会長 基調講演 「都市域における氾濫解析の課題と方向性」 広島大学大学院工学研究科 教授 河原 能久 氏
14:00	環境/エネルギー 特別講演 「環境とエネルギーが進化させる土木建設情報化」 大阪大学 工学研究科 環境・エネルギー工学専攻 教授 矢吹 信喜 氏	住宅積算見積 特別講演 「新築住宅/リフォーム対応 VST5」 (株) コンピュータシステム研究所 建築企画室室長 山田 秀一 氏	下部工・基礎 特別講演 「3次元骨組解析を利用した鋼管矢板井筒基礎の設計方法について」 (株) 竹中工務店 竹中技術研究所 建設技術研究部 地盤・基礎部門 地下工法グループ 菊野 友紀 氏	技術紹介 ICUDの報告 「世界の流出解析の現状」 NPO法人水環境創生クラブ：石川 高輝 氏 「浸水氾濫からリスクマネージメントへ」 芝浦工業大学工学部土木工学科 教授 守田 優 氏
15:00	橋梁設計解析 ユーザ特別講演 「Easy Slab Bridge 設計解析事例」 朝日エンジニアリング（株） 代表取締役社長 徳野 光弘 氏	建築BIM・避難解析 特別講演 「最新BIM事情～3次元CADの行方～」 日経BP社建設局 企画編集委員 家入 龍太 氏	CALS/CAD 特別講演 「画像比較Logical Imageの開発」 阪南大学 経営情報学部 准教授 北川 悅司 氏	技術紹介および事例 「氾濫解析ソフトウェアの最新動向および海外での事例」 著XP-Software Pty Ltd. Anthony Kuch氏 「実施設計時の諸元変更に対する貯留施設の効果検証」 日本工設計（株）仲 刚彦 氏 「xpswmmによる管渠内に設置したフラッシングゲートの解析」 日本工営（株）菊池 有 氏
16:00	Engineer's Studio Ver.1 開発者講演 Engineer's Studio 新製品 発表講演 FORUM8 Director Brent Fleming ディスカッション	鋼構造CAD 特別講演 「BIM対応・3D鋼構造CAD」 仏Graitec社 Ulrich SCHULZE 氏	土工・仮設工 特別講演 「土留め工の設計とFEM解析の利活用」 群馬大学 工学部助教 萩 飛 氏	水工設計 「UC-win/Road for xpswmmの紹介と津波解析への取り組み」 UC-win/UC-1システム開発グループ
17:00	発表終了			「水工シリーズと下水道CADの機能」 UC-1サポート第1グループ

内の講演に関する記事を11月号、そのほかは12月号に掲載

● デザインコンファレンス 特別講演



劣化した既設RC/PC構造物の 非線形解析と維持管理

東京大学 工学系研究科社会基盤学専攻 教授
前川 宏一 氏

「既設構造物の性能評価ではこれまで、耐震性能が非常に大きな課題でした。今日ではそれにプラスして、劣化が生じてしまった構造物の残存強度や疲労寿命、あるいはそのままにしておいた場合、地震が起きたらそれらがどのように応答するか、などについてもエンジニアは答えを出さなければいけません」。東京大学工学系研究科社会基盤学専攻教授の前川宏一氏は、そのような際に数値解析の観点からエンジニアを支援できるのではとの考え方を、近年話題となったさまざま事例を交えて解説する。

構造物の多様な性能評価シーン

まず、コンクリート橋を例にそれらが通常、損傷・劣化する各種要因を列挙。その対応に際しては、どう補修するかもさることながら、その前段として当該構造物の現状把握が重要と説く。

その上で具体例として、構造物を構成している鋼材など材料の劣化が問題のない橋脚で行われた耐震性能照査と補強工法の選定プロセスに触れる。「これがもし余裕のない（多少の補強では不十分と見られる）場合であれば、高いコストを覚悟しつつ詳細に性能評価して更なる補強を考えることが必要になってきます」

また100年以上前に竣工して以来、地盤の不等沈下によるひび割れや過去の補強工事を経てきた鉄道高架橋が将来、直下型地震を受けた時にどうなるかなど、大方書の情報のみではなくて評価し得ないケースも現実にある。そこでは構造全体系を解析して性能が不十分ということであれば補強を行う。具体的な方法については解析に基づくシミュレーションと、それを一部検証する実験を組み合わせた検討が行われる。さらに、100年というスパンになると材料のみならず地盤の変動による影響も考えられることから、地盤とRC構造物の応答とともに考慮した性能評価を行う。あるいは、配筋の方法によっては韌性も異なってくるため、これも数値解析を使い性能を評価するテーマの一つになると

位置づける。

「ものによっては、3次元的に見て複雑な形状の構造物が厳しい変形を受けた時、どうなるかという議論もあります」。これに関しては、地盤との連成を強く受けた構造システムとして原子力発電所の海水管ダクトを例に、現行手法の制約と将来的な鋼材の腐食も考慮した評価のあり方に注目。併せて、水平方向やねじり、せん断が交番載荷する橋脚の残存性能に関する実験などを通じ、それらを評価する上で重要なことはコンクリート内部のひび割れや鉄筋の力学的性質をどのように表現するかに尽きると考えられた。耐震性を評価する目的で開発されたこうした技術自体、腐食劣化を受けた構造物の性能評価にもそのまま使えるものと期待される。

鋼材の腐食・損傷と診断時の留意点

次いで前川宏一氏は、鋼材の腐食率から得られる鉄筋の腐食の度合い、鋼材にかかる直方向に対する応力や腐食圧力などを基に数値解析することで、従来は鉄筋の軸方向の力のみを持つものとしてモデル化してきたのが、腐食の進行とともに生じる鉄筋の直方向の力も反映する形で腐食の問題を扱えるようになると語る。したがって、たとえば、鉄筋の構成則のプログラムに一部追加してプログラム化すれば鋼材の腐食のシミュレーションも可能になる。

「実際、鋼材が腐食膨張してコンクリートにひび割れが入ったら、全体の構造系がどうなるかというのは非線形解析システムに自然に反映されます。ここでは、鋼材の材料モデルを従来の2次元から3次元に格上げすることで、この問題に答えを与えることが出来ます」。そこで挙げるのが、梁のように軸方向にある鋼材が腐食し、既に腐食ひび割れが入っているケースでどれくらいの剛性低下と終極耐力になるかという解析事例だ。鋼材の腐食が全面にわたって入り、しかも定着領域がさほどひどく壊れていない場合には剛性は下がるもの

の、耐力はかえって上がることが実験により明らかになっている。同様に、熱応力で予め部材軸方向にひび割れが入っている大規模な梁にせん断を加えた別の実験では約1.5倍に耐力の上昇が認められた。これは、斜めひび割れが鉛直のクラックに到達すると、それ以上進展しなくなる、つまり、力の流れのシステムとひび割れの挙動が相互作用によって変わることによる。これらは解析によって再現が可能となる。

ただ、状況に応じて構造の応答はさまざまに変わってくるため、これらの腐食や損傷の状況を組み合わせて考えることが今後の診断では求められるとしている。これに関連して、鋼材が腐食し損傷の入った海水管ダクトが巨大地震を受けてどうなるかという研究では応答性に若干の差が見られるものの、腐食が多少入っても構造性能全体ではそれほど劣化してこない。しかし、エネルギー吸収やせん断変形能力が変わってくるため、バックチェックの時にどうなるかを定量化することが必要になるという。

また、アルカリ骨材反応が橋梁構造物に発生して鋼材の曲げ加工部が破断したという問題を受け、その構造物を撤去すべきか、あるいは補強により延命できるかが検討された事例がある。設計段階ではすべての鉄筋は十分にコンクリート内に定着するように設計し、それを前提として部材や構造の安全性を担保する。しかし、現実問題として鋼材が曲げ加工部で破断しているのであればその前提が崩れた状態で性能評価せざるを得ない。「構造細目を守っていない部材は示方書類では当然ながら想定されておらず、構造細目に従わない設計で部材や構造がどう挙動するかということは、実はよく分かっていないのです」

そこで前川宏一氏は、力学的にその箇所に鉄筋が存在しても力学的に機能しないとして単純に計算する影響評価方法、スターラップの定着が十分でない場合の耐震性能、腐食位置による構造性能への影響などに対する実験や解析による検討について紹介。たとえば、スターラップの定着不良の影響の及ぶ範囲は構造部材の寸法によっても相対的に変わるために、小型模型による実験ではスターラップの定着がない場合は耐震性能がかなり落ちるのに、大型断面を有する実構造物では影響が小さくなる。こうしたことを探していなくて小型模型による室内実験のみをベースに判断すると、非常に不経済を来しかねないと指摘する。

腐食が起こる場所によっても、構造性能への影響は相当に大きく異なる。にもかかわらず、実際に腐食や損傷があった場合、どの程度の構造性能に劣化しているかを明確に意識した補強が必ずしも施されていない

のでは、と懸念する。同程度の腐食による断面欠損や周辺コンクリートのひび割れであっても構造物の中の位置により当然、対応策は違ってこなければならないはず。「そこがまだ十分出来ていないため、補強と効果、コストが果たして適正に決まっているかどうかは、課題の一つだと思います」

その一端を示すのが、「損傷が起きている構造物を出来るだけ少いコストで補強する」というケースを想定、損傷箇所とその近傍を集中的に補強するという提案を基に行った実験だ。その結果、補強部に沿ってひび割れが生じるなど構造安全性はかえって損なわれてしまった。ところが、テープティングのように緩やかに全体を覆うことで耐力の増加を得られることが分かつてきただ。定着領域に損傷がある場合には、従来のようにひび割れを接着剤で充填、埋め直せば良いというわけでもなく、全体の力を受ける構造システムを考え、バランスの良い力の流れを達成するように対応を図っていく必要があるとしている。この中で、数値解析はさまざまな補強提案に対してその効果を事前に判定することが出来る。

動的非線形解析技術の疲労への適用と今後

「地震はランダムで交番する繰り返し力が構造物にかかりますが、交通基盤施設で問題となる疲労においては、一方対して多数サイクルの繰り返し力がかかります」。つまり、荷重の回数やレベルなどのパターンが異なるだけで、それを受けける構造物側に差はないところから、動的非線形解析技術は本来、そのまま疲労解析にも適用できるはず。ただ、その際は材料モデルが高サイクルの状況に対応できるか否かにかかってくこと、前川宏一氏は話す。

計算機の能力が上がっていることもあり、従来、耐震解析等では無視している構成材料の高サイクル疲労損傷や疲労塑性を材料構成則に追加し、多数回の繰り返し荷重を直接入力することで疲労荷重への対応が可能になると解説。各種数値解析やシミュレーション例を紹介する。

健全な状態と定着領域に予め腐食による損傷を受けた状態に対して、同じ疲労荷重をかけた場合にどう異なるかという計算を行ったところ、損傷がないケースと比べて少し損傷があるケースは明らかに急速な疲労寿命の低下が見られた。これは実験においても定性的には実証されている。ただし、一回のみの荷重とたわみでは、両者に大した差異がないという予測を得た。それが本当に正しいかどうか、第三者に実験で検証して欲しいとの狙いから、解析結果をオープンにして広く

呼びかけているという。

続いて、初期劣化を有する既設構造の性能照査、繰り返し移動荷重を受ける橋梁上部構造のたわみと疲労寿命の予測、塩分飛来と疲労を同時に受ける水上構造（羽田空港拡張滑走路）の設計確認といった現行技術の各種応用例を列挙。これらの研究を通じて得られた耐久性や寿命の結果については50年・100年に及ぶモニターを経れば必ず答えが出る。一方、地震に関して言えば長期間を費やしても検証に至らない可能性が大である。そのことを踏まえ、地震被害を受けた際にはそ

こから詳細に検討して貴重な教訓を抽出。併せて、構造物の加齢の影響についての情報を技術者にフィードバックする仕組みをつくることで関連技術のいっそうのブラッシュアップに繋がるものと期待を示す。

「これらの例には、まだ十分検証されていない面も多々あります」。当然のことながら、これらの技術を実験室内だけで鍛え込むのは不十分だ。それゆえ、実験室内で得られた予測と実物に基づく検証の組み合わせにより技術を発展させていくという考え方方が極めて重要と位置づける。

■技術セッション<土木セッション>1

地盤解析：特別講演



最近の内陸地震による 中山間地土砂災害について

群馬大学大学院 工学研究科社会環境デザイン工学専攻 教授
鵜飼 恵三 氏

近年、国内で大規模な地震災害が相次いで起きたに加え、今春には中国でも大きな被害をもたらす地震が発生。現地のショッキングな映像を目にする機会が増したことで地震による土砂災害への関心も高まりを見せている。こうした流れを背景に、群馬大学大学院工学研究科社会環境デザイン工学専攻教授の鵜飼恵三氏は「中越地震 2004～中越沖地震 2007～四川大地震 2008～岩手・宮城内陸地震 2008の調査結果と動的FEM解析の適用例」と副題を冠し、とくに中山間地の土砂災害に焦点を当てる。

国内3地震に見る土砂災害の特性

前述の中越地震、中越沖地震、岩手・宮城内陸地震といった国内の事例は、いずれもマグニチュード7前後。大きな地震とはいえ、日本では二三年の内にどこかで起きているような規模もある。これらは内陸あるいは海岸線沿いを震源とし、中山間地や丘陵地で地すべりによる被害が非常に大きいという共通した特徴を有する。

とくにわが国は、国土の70%を山地が占めるのに加え、都市化の波はそうしたエリアへも押し寄せている。さらに、新幹線や高速道路など重要なインフラは山間地を通って大都市を結んでいることから、中山間地で

起こる大地震が及ぼす影響は極めて大きくなると位置づける。

■新潟県中越地震

「4年前に起った新潟県中越地震については、旧山古志村での土砂災害が記憶に新しいところかと思います」。最大震度7という大きな揺れは、随所に深い地すべりを引き起こした。これに対し、鵜飼恵三氏らは「大規模な地すべりや表層崩壊はなぜ起きたのか」「そのメカニズムは何か」に着目、複数の崩壊箇所をピックアップして調査・研究を行っている。

その一つ、小千谷市横渡で発生した地すべりに関しては、勾配22度の比較的緩い斜面の岩盤崩壊箇所で不搅乱試料をサンプリングし、定体積繰り返し一面せん断試験を実施。「ちょうどすべり面のところに凝灰質の火山灰（砂質層）が挟まれる形で非常に緩く堆積（厚さ1cm以内）しており、これが地すべりの原因になっただろうということが分かりました」。実験を通じ、繰り返しせん断により強度が落ちる、すなわち、地震の揺れを受けて面状の火山灰の強度がほとんどゼロに近い状況となり、地震後にそのまま自重で滑っていましたというメカニズムも明らかになってきた。併せて、そのプロセスは動的弾塑性FEM解析によりシミュレーションしている。

東竹沢・寺野の砂質斜面は地下水位が高く、液状化が原因だろうということがまず予想された。ただ、斜面であるため、液状化で完全に強度がゼロになってから滑るというより、安全率が1以下になって大崩壊に至ったものと考えられた。そこでも不搅乱試料をサンプリングして振動実験およびUWLC（地盤の動的有効応力解析）を使った解析を実施した。

一方、山古志尼谷地の土質は泥岩でしかも勾配15度と緩やかな斜面であるにもかかわらず、なぜこれほど大規模な地すべりが起きたのかという疑問点があった。そこで、火山灰や砂質の場合と同様に繰り返し振動により強度が小さくなつて滑ったのではとの仮説の下、不搅乱試料を採取した実験およびシミュレーションを行つた。その結果、液状化強度は砂の場合と比べ倍以上あるものの、地震動によって間隙水圧が内部で発生し安全率が1より相当小さくなり、地すべりが起こつてそのまま大規模かつ到達距離の非常に長い地すべりへと発展したことが分かった。

これらを通じて、①大きな地震動の発生②斜面内における高い地下水位の存在③地震動による繰り返しせん断で斜面内の間隙水圧が上昇—といった条件が重なり、安全率が極めて小さくなつて崩壊に至つた。そのようなメカニズムであれば地震時大規模斜面崩壊の対策として、従来降雨などによる地すべり対策として採用されてきた地下水位低下工法が有効では一と想定。実際に動的弾塑性FEM解析によるシミュレーションなどで検証を重ねてきたとしている。

■新潟県中越沖地震

07年の新潟県中越沖地震では、地盤の液状化現象による被害が目立つた。そうした一つが刈羽村の砂丘およびその周辺地域で、地下水位が高いこともあって多くの家屋が被災している。一帯は04年の中越地震でも被害を受けており、建て直したばかりの家が再度被害を受けたケースも少なくない。そうした中でとくに、前回地震を機に地盤改良や杭基礎、排水工事など何らかの対策を講じていた家屋の被害が比較的軽微だったのに対し、そうしなかったケースでは大きな被害が見られた点に鵜飼恵三氏は注目する。

「建築の場合、基礎をしっかりとさせることができ非常に大事ということは分かりました」。そこで、ではどの方法がどの程度有効であったかを把握すべく、現在は地盤解析ソフトなどを使いシミュレーションしつつ定量化を図っているところという。

■岩手・宮城内陸地震

同じく今年6月に起きた岩手・宮城内陸地震に関しては、まず荒砥沢の大規模な地すべりにフォーカス。鵜

飼恵三氏はまだ不確かな要素もあるとしながら、火山性の堆積物から成る地盤が風化しているところへ繰り返し地震動によって強度が劣化、緩い勾配を滑る形で崩壊に至つたというメカニズムを描く。現在、不搅乱試料を基に繰り返し実験を行つてゐる。

また、駒の湯温泉を襲つた土石流については、融雪により火山性堆積物の強度が低下しているところへ地震動を受けて斜面崩壊が発生。土石流化して下流へと向かう一方、河川を挟み対岸で生じた土砂崩れに阻まれたことでその土石流が旅館へ押し寄せるという不幸な偶然が重なつて起きたものと説明する。

進む四川大地震における土砂災害の研究

「四川大地震についての分析も、これから」としつつ、鵜飼恵三氏は今回地震を機にスタートした中国・成都理工大学との共同研究に触れ、その一環として行われた現地調査を紹介する。調査は成都から車で二三時間、震央周辺の大規模な地すべりが発生した龍門山断層帯などを対象に展開。地震発生一ヶ月後から3回にわたる調査活動を通じ撮影した断層、崩壊した斜面、岩盤崩壊、土石流の発生源、河道閉塞など多くの写真を示し、説明を加えた。

四川大地震における斜面崩壊の大部分は岩盤斜面で、しかもそれら斜面は急勾配である上、亀裂が発達するなど表層の風化が見られた。また、斜面内に地下水があまりなく、日本の地震地すべりとは大きく異なる特徴が浮かび上がつた。一方、地すべり災害の規模はわが国の事例の100倍以上と想定されることもあり、岩盤斜面崩壊のメカニズムについて早急に研究する必要があるとしている。

地震地すべりの詳細なメカニズム解明へ

地震大国と形容される日本だけに、地震による大規模な土砂災害の例は数多い。鵜飼恵三氏は善光寺地震（1847年）、飛越地震（1858年）、濃尾地震（1891年）、関東大震災（1923年）、長野県西部地震（1984年）などについて解説。とくに関東大震災は都市部での人的被害の大きさが注目されがちな反面、実は中山間地での斜面崩壊や土石流などの被害も多く、その点からも留意すべきと語る。

「(その意味では) 地震地すべりのメカニズムを把握することが大事で、それが分からなければ有効な対策も打てません」。前述した近年の国内および中国における地震地すべり例から、両国における地質や勾配の違い、それに対して地震慣性力により斜面崩壊が発生、重力の作用により土砂や岩塊が長距離移動して土砂災害

へと至るメカニズムの共通性は分かってきた。そのメカニズムをさらに詳細に解明するためにはFEMなどの数値シミュレーションが不可欠。そこで、具体的に四川大地震の岩盤崩壊や土石流などについて数値シミュレーションを行っていく計画という。

また、地震災害の研究はこれまで人口が密集する平野部の都市化された地域にウェートが置かれがちだった。一方、中山間地や丘陵地でも都市化が進行、併せてインフラも建設されていることなどから、これら地域を対象とするいっそうの研究が求められると説く。

■技術セッション<土木セッション>2 環境／エネルギー：特別講演

環境とエネルギーが進化させる土木建設情報化

大阪大学大学院 工学研究科環境・エネルギー工学専攻 教授
矢吹 信喜 氏

大学の卒論研究向け実験データ処理のためのFORTRANによるプログラム作成から、続く電力会社勤務時代の大型計算機による設計計算・解析など—大阪大学大学院工学研究科環境・エネルギー工学専攻教授の矢吹信喜氏は講演の冒頭、自身が計算機と関わりを持った当時のアプローチについて振り返る。

その頃、設計の仕事は多くの時間を単純な作業に費やしており、これを自動化・効率化して本来的な、より知的な作業にウェートを置くべきではと考えられた。こうした中で、航空機や自動車の設計では既に3次元CADで作成したデータをCAMへ連携、効率化を実現していた実情に触れる。当時、アルビン・トフラーの「第三の波」に感銘を受けたこともあり、土木設計への3次元CAD導入の必要性を確信するに至った。

時代の流れもあり、ほどなく実際に3次元CADが職場に導入され、そのカスタマイズ開発や社内研修事業に携わることになる。そのうちに、「CADのことをもっと勉強したい」との思いが募り、フルブライト奨学生として米国スタンフォード大学に留学。博士論文は“An Integrated Framework for Design Standards Processing”というタイトルで、構造設計基準の自動処理システム、設計基準を表現する方法として“ObjectLogic Model”、その背後にある大量のデータやファイルを蓄え利用する方法として“HyperDocument Model”などを提案している。

電力会社に復帰して7年後、転職した室蘭工業大学では3次元プロダクトモデル、4次元CAD、バーチャルリアリティ（VR）、ICタグ、センサーネットワークなど

を研究。さらに今年4月、大阪大学へ移籍。旧環境工学科と旧原子力工学科が合併した「環境・エネルギー工学専攻」の「環境設計情報学領域」において環境デザインと情報学を融合した分野の研究・教育に取り組んでいる。

土木建設分野の情報化、広がる3次元化

「日本における土木建設分野の情報化と言えば、まず建設CALS/ECということになります」。日米貿易摩擦が激しかった80年代、米国サイドが自国の建設産業による日本市場参入を果たすためのアプローチとして着目したのが①技術士・建築士制度に対する資格更新化②紙による入札から電子入札への移行③紙図面による納品から電子納品への移行—の3点だった。これを、WTO（世界貿易機関）を通じて日本に伝えたことから、95年に建設省（当時）が建設CALS/EC研究会を発足したのを皮切りに一連のCALS/EC実現に向けた取り組みはスタートしたと矢吹信喜氏は一連の経緯について見方を述べる。（財）日本建設情報総合センター（JACIC）内にCADデータ交換標準開発コンソーシアム（SCADEC）が組織され、2000年には2次元CADデータを対象とするISO準拠のCADデータ交換標準（SXF）が開発された。さらに03年度から国土交通省直轄事業ではCADデータ交換フォーマットを原則としてSXF（P21）とすることとし、その後、地方公共団体でもそれに準じる流れとなっている。

では、そのようにして推進されてきたわが国の土木建設情報化が果たして期待通りの効果に繋がっている

かというと、懐疑的にならざるを得ない。たとえば、矢吹信喜氏は「建設業ハンドブック」((社)日本建設業団体連合会)に示される労働生産性の建設業・製造業間における90年以降の推移に注目。当初同程度だったものが90年代前半から開き始めた差は拡大の一途を辿り、06年時点で建設業は製造業の5割強(全産業の6割強)に留まると指摘する。その一因として、建設業が当初、情報化により描いた構造物のライフサイクルにわたって生成される図面をはじめ各種データを異なる組織やシステムとの間でやり取りし、有効活用しようとの狙いが実現に至っていない(データの死蔵)、あるいはデータの互換性がない(自動化の島)事態を来していることを挙げる。

「これらの問題を解決するには共通のデータモデルが必要ということになるわけです」。これは3次元のオブジェクト指向に基づいたデータモデル、つまり、プロダクトモデルで、80年代にその標準として米国ではPDES(Product Data Exchange Standard)の開発が、欧洲を中心にISO TC184/SC4によるISO 10303(STEP: Standard for the Exchange of Product Model Data)の開発がそれぞれスタート。その後、STEPがPDESを吸収し、ISO/PDESに統一されている。これを反映して他分野では3次元プロダクトモデルのスペックが開発された一方、建設分野では対応に遅れが見られた。

そこで94年、北米の建設関連企業12社がIAI(当初はIndustry Alliance for Interoperability、97年からInternational Alliance for Interoperabilityに改称)を設立。96年には日本も加入、主に建築分野のプロジェクトモデルであるIFC(Industry Foundation Classes)の開発が進められてきた。2000年代からはIFCが建築構造物における3次元プロダクトモデルの業界標準に位置づけられ、05年にはISOのPAS(公式有効仕様書)として認定されている。

また、土木分野では以前からLandXMLなどが取り組まれてきたほか、景観デザインや合意形成のためのVR向けにも3次元モデルの作成が行われている。とはいっても、情報化の当初の目的だったライフサイクルを通じたデータ共有化は依然研究段階の域を出ていない。こうした状況に対する危機意識もあって、「国土交通省CALS/ECアクションプログラム2005」では3次元データの利活用が明記されるに至ったと矢吹信喜氏は解説する。

そのような中で同氏がとくにモチベーションが高く画期的と評するのは、国交省が今年7月に策定した「情報化施工推進戦略」だ。これはまず道路土工を対象に、3次元設計データとGPSを利用した施工の自動化、TS

による出来形測量データと3次元CADデータとの比較による出来形検査の簡素化、維持管理でのデータ有効活用などを具体化していくというもの。「ようやくという気もしますが、道路土工における情報化施工が成功すれば土木の他の分野にも広がっていくことが期待されます」

環境・エネルギー問題解決に「国土基盤モデル」への期待

では、これらの土木建設情報化をいかにいっそう推進していくかという際、環境とエネルギーの問題がカギになると、矢吹信喜氏は見方を示す。

地球温暖化の原因については今なおさまざまな議論があるものの、IPCC(気候変動に関する政府間パネル)では最近の地球温暖化を人為起源の温室効果ガスの増加によるものとしている。そこで低炭素社会の構築、あるいは循環型社会の構築、地球環境の保全、大気環境の保全、環境情報といった観点から個別のターゲットに言及。その上で、これら多岐にわたる問題を解決する一つのアプローチとして、「国土基盤モデル」を位置づける。

これは、3次元プロダクトモデルを中心に各種アプリケーションシステムを配置、それらシステム間でデータの共有・相互運用が可能になるというもの。さらにITが進んでいけば、ネットワークで繋がったサイバーワールド(仮想現実の情報社会)、換言すればサイバインフラストラクチャ(電子的な情報社会基盤)が形成されてくるとする。

その際、われわれが住む現存の社会基盤とこのサイバインフラストラクチャとが繋がっていないくては意味がない。そこで両者を繋ぐ技術としてICタグ(RFID)や各種センサー類を実社会基盤に大量に設置し、それらを使って観測・取得したデータをリアルタイムにサイバインフラストラクチャに送信。それらを基に各種シミュレーションや議論をした後、アドバイスや支援あるいは機器類への指令などを再度実社会基盤へ送り返すといった仕組みが想定される。

矢吹信喜氏は自らこれまで関わってきた各種モデルや他の先進事例などを列挙。その延長上で解析やシミュレーションを通じた環境・エネルギー問題への多様な応用イメージを描く。

農業革命、産業革命に続く「第三の波」としてアルビン・トフラーは情報革命を位置づけた。コンピュータの発明から数十年。当初は単なる計算を行う機械に過ぎなかったのが、ようやくそれもICT全般の高度化

とともに情報革命の端緒に就くに至ったと、矢吹信喜氏は説く。そのインパクトは仕事や生活の仕方、価値観にも大きな変化を及ぼすはずという。

他方、環境やエネルギーを取り巻く情勢も急速に変わりつつあり、新たな技術的対応も求められる。そこでは前述の3次元プロダクトモデルを中心とした「国土基盤モデル」が重要な役割を果たすことになると見る。

「これまでの土木建設情報化は2次元の図面を中心としてきました。しかし今後、環境・エネルギー問題解決に向けた対応を契機に3次元化、データモデルによるシステム統合化、統合シミュレーションによる実世界のインテリジェント化というように大きく進化していくと考えています。しかもその速度は意外に速いかとも知れません」

■技術セッション<土木セッション>3

橋梁設計解析:ユーザ特別講演



イージースラブ橋設計解析事例

朝日エンヂニヤリング㈱ 代表取締役社長
徳野 光弘 氏

石川県に拠点を置く建設コンサルタント、朝日エンヂニヤリング㈱代表取締役社長の徳野光弘氏は、業務の約90%を橋梁設計が占めるという。

近年、既設橋梁の老朽化に関する議論が高まっている。今後は、さらに多くの橋梁で補修あるいは架け替えを迫られることが想定される。そうした中で同氏はとくに、橋梁全体の2/3～3/4に及ぶとされる支間長15m～20m、もしくはそれ以下の短支間の橋梁に着目。「小さいけれど、これらを何とかしないといけないのでは」との発想から、自身が力を入れる「イージースラブ橋」の研究・開発に繋がっていると述べる。

その一環として、2年半ほど前からフォーラムエイトと共同開発を進めているイージースラブ橋の設計支援プログラムのうち、設計計算がほぼ完成、CADも一部細部の詰めを残すのみとなってきた。そこで今回講演では、イージースラブ橋およびその工法について改めて解説。併せて、金沢港でのイージーラーメン橋（鋼管杭・鋼矢板併用基礎）の施工例を工程に沿って、現場写真を使いながら紹介した。

イージースラブ橋の2つの構造

徳野光弘氏はまず、イージースラブ橋を単純橋構造とラーメン橋構造に分け、両者の構造上の違いについてモデルを交えながら概説する。

単純橋構造として挙げるモデルは、一般的な杭基礎と逆T式橋台に土圧力が掛かっており、その上に支承

を介して上部工が載っているというもの。これに対してラーメン構造のモデルは、下部工と上部工を剛結。そのため下部工をコンパクト化でき、たとえば、基礎杭も単純橋では一つの橋台に最低2列必要となるのが、ラーメン橋では1列で済むということを対比して示す。

「分かりやすく言えば、単純橋はフーチングと基礎杭がラーメン構造になっており、そのような二つの下部工の上に支承を介して上部工を載せるという構造。一方、ラーメン橋は一つの橋台の前杭と後杭の間隔を広げ、フーチングを上に持ち上げ頂版（床版）とした格好ということです」

そのため、ラーメン構造は単純橋と比べて概算で橋台1基分少ない工事費で建設できるのが大きな特徴と言える。加えて、常時において、単純橋は橋台に作用する土圧力などの水平力を各橋台の基礎杭がそれぞれ独立して支持する構造だが、ラーメン橋は土圧力などの水平力は、左岸橋台壁～頂版～右岸橋台壁へと伝達され相殺される形となっており、基礎杭に作用する水平力が小さくなるため、杭本数の低減や下部工サイズの縮小が可能になると説明する。

02年に1橋目のイージースラブ橋が建設されて以降、既に同橋およびイージーラーメン橋の実績は60橋を超す（イージースラブ橋協会調べ）という。「最近では単純橋よりもラーメン橋の建設実績の方が増加傾向にあります」

短支間橋梁向けに注目されるイージースラブ橋

孔あけ加工したH形鋼を主桁として並べて配置。腹板を貫通させた横繋鉄筋の両端部をナットで留め、下フランジ間と外桁側部に型枠を設置し、桁上面鉄筋などを配置して桁間にコンクリートを打設。橋体を一体化して築造するSRC構造の床版橋―。徳野光弘氏は「イージースラブ橋（H鋼桁埋込RC単純床版橋）」の工法についてこう描く。

「実は、鉄道橋ではこのようなH鋼桁の埋め込みの構造は40年以上前から採用されています」。同工法はそれを道路橋に適用しやすいよう一部改良したものと位置づける。

イージースラブ橋の特徴は、まず構造的に極めて単純であるということ。そして、低桁高を低成本で実現すること。従来工法との比較では、桁高は支間長10m以下のクラスまではPC床版橋とほとんど同じか、若干低い程度に留まるものの、支間長10m以上ではイージースラブ橋の桁高が明らかに低くなってくる。したがって、鋼材量が多くなる分はコストを要するとは言え、低桁高に加えてイージースラブ橋は工法の特性によりトータルコスト面で非常に合理的なアプローチになるという。

また、現場打ちコンクリートの構造であるため、台形形状など多様な平面形状に対応。交差点近くの橋梁にも適用できる。さらに、コンクリート桁と比べて桁自重が軽いこともあって、住宅密集地や狭小箇所など道路事情の悪い場所でも比較的対応しやすい。それでいて、施工に当たって特殊な技術を要せず、「鉄筋コンクリートをきちんと施工できる程度」の技術があれば可能。施工が容易な分、工期も短くなるとしている。

その上、既設橋梁の架け替えなど現道交通を全部止めるわけにはいかないような条件のケースでは、先に既設橋を半分ほど取り壊しておいて新橋の建設に着手。その部分が出来たら交通を切り替えて、引き続き残り半分を建設。最後にこれらを接合して完成させる―といった分割施工にも対応する。「実際、桁と桁の間を一本分だけコンクリートを打たないで空けておき、接合の際に一晩だけ夜間通行止めにして超速硬コンクリートを打ち、翌日には開放した施工例もあります」

イージースラブ橋では鋼材を使うものの、露出しているのは桁の下面のみ。現在はその部分にアルミ亜鉛溶射を行うか、あるいは桁全体を溶融亜鉛めっきするといった防食対策などが採られている。徳野光弘氏は基本的に100年近い耐用期間を想定しており、海岸部など特殊なエリアを除いてミニマムメンテナンスを実現すると語る。

「支間長が短いこともあり、イージースラブ橋では基本的にジョイントレス構造（パラペットレス）をお勧めしています」。従来構造の単純橋の場合、桁の伸縮は伸縮装置幅の狭い範囲で吸収される。しかし同工法が採用されるケースは短支間のため、桁端部にそのまま背後地盤を当てて、その広範な地盤バネやアスファルトの伸縮性などで桁の伸縮を十分吸収可能として、パラペットなどを省略している。

同工法の適用対象については、最大支間長が20m程度まで、斜角45度～90度の道路橋や歩道橋などが想定されている。

これまでに金沢大学などで荷重分配試験、桁の静的破壊試験、繰り返し載荷試験などの安全性検証実験を実施、構造的に問題がないことを確認しているという。

大幅な低成本化を実現するイージーラーメン橋

イージーラーメン橋（H鋼桁埋込RC複合門形ラーメン橋）は、橋梁上部工と下部工を剛結合し、上下部一体構造とした複合門形ラーメン橋。上部工には前述のイージースラブ橋の構造をそのまま採用し、下部工は直接基礎や杭基礎といった橋台式のほか、矢板基礎などの形式にも対応する。

「ラーメン構造としているため、当然、耐震性が高まるほか、上下部を一体化することで下部工サイズが小さくなります」。すると必然的に、掘削など周辺環境に対する影響も小さくなる。また、支承伸縮装置や落橋防止装置などが不要なため、建設コストおよびメンテナンスコストも低減できると、徳野光弘氏はメリットを説明する。

適用条件は、支間長が単純橋と同様に20m程度。斜角については、90度が望ましい（徳野光弘氏）としつつ、偏土圧などの影響がさほど大きくなることを前提に75度～90度を対象としている。さらに、矢板基礎式に関しては、小さな水路など矢板護岸と兼用構造のラーメン橋の場合、掘込河道のように全体を埋め込むようなケースに適用が限定される。

徳野光弘氏がとくに重要なポイントとして挙げるのが、隅角部の応力伝達状態だ。従来のRCラーメン構造では、隅角部の応力をうまく伝達させるため隅角部の応力が最大となる箇所付近に補強鉄筋を配置しコンクリートにひび割れが入らないようにする必要がある。これに対してイージーラーメン橋では、主鉄筋がH鋼桁の上フランジ上面に定着ナットで機械式に締結されており、応力は直接、あるいはH鋼桁間の橋体コンクリートを介してH鋼桁に伝達される。したがって、補強鉄筋などは不要で、非常に簡単な構造に出来るとい

う。

次いで徳野光弘氏は従来の直接基礎式単純橋を杭基礎式門形ラーメン橋に、杭基礎式単純橋を杭基礎式門形ラーメン橋あるいは矢板基礎式門形ラーメン橋に、それぞれ置き換えることでコストや施工工期などで大幅な縮減効果があることを例示。さらに、B活荷重・橋長15m・車道幅員10m・杭長20mクラスの一般的な例に基づき、従来の単純橋（杭基礎式）からイージー

スラブ橋（杭基礎式・ジョイントレス）、イージースラブラー・メン橋（杭基礎式）、イージースラブラー・メン橋（矢板基礎式）と転換していくにつれ低減するコストを試算し、比較。たとえば、維持管理コストを100年と想定したLCCで考えた場合、従来の単純橋を「1」とすると、ジョイントレスにするだけで20%近く、ラーメン橋にすると約40%、矢板基礎式に出来れば50%程度までコストを抑えられるようなケースもあるとしている。

■技術セッション<土木セッション>4

Engineer's Studio Ver.1:開発者講演



Engineer's Studio新製品発表

(株)フォーラムエイト 開発担当取締役
Brent Fleming 氏

<土木セッション>最後の講演は、(株)フォーラムエイト開発担当取締役の Brent Fleming 氏が UC-win/FRAME(3D)を継承する製品として開発が進められている3次元解析CAD「Engineer's Studio Ver.1」の主要な機能について説明した。

同氏はまず「Engineer's Studio」の大きな機能強化として、①前川コンクリートモデルを搭載したMindlin板要素②完全にリニューアルされるユーザーインターフェースの2点を挙げる。とくに後者については、表形式の入力や3次元CADスタイルのインタラクティブな操作への対応など、UC-win/FRAME(3D)のユーザーインターフェースを大胆に見直していると語る。

その上で、材料、アウトライン、断面、フレーム要

素、ばね要素、Mindlin板要素など各エディタのさまざまな機能や特徴について解説。さらに、フレーム要素エディタに関連してM-φ要素やファイバー要素といった梁要素、あるいは各種ばね要素、剛体要素への対応、Mindlin板要素に関連して前川コンクリートモデルへの対応、そのほか各種荷重への対応、多彩な結果表示などについても言及している。

最後に開発中のプログラムを実際に操作しながら、テーブル・エディタ、コピー／ペースト、リドウ／アンドウ、データ生成などの機能をさらに具体的に紹介した。

なお、「Engineer's Studio Ver.1」は年内のリリースが予定されている。

FORUM8 <土木セッション>関連ツール情報

「第2回 FORUM8デザインコンファレンス」後半の技術セッションは4セッションに分かれ、それぞれのカテゴリごとに沿った講演と併せ、主催するフォーラムエイトの関連ツールについて各担当者が解説している。このコーナーでは、<土木セッション>関連ツールに関する講演の要点をまとめた。

■：地盤解析

従来の2次元用「GeoFEAS2D」を継承して新たにリリースする3次元弾塑性地盤解析「GeoFEAS3D」につ

いて紹介。これは有限要素法を用いた地盤の3次元応力変形解析を行うプログラムで、杭基礎を例に、杭群地盤モデルの作成・解析に向けた新製品の操作手順や機能について説明している。

■：橋梁設計解析

ポータルラーメン橋の設計計算プログラムについて、プログラム概要およびその開発状況を紹介。解析モデルに3次元モデルを採用し、専用の設計ツールとして必要な機能を実装する、といったポイントとともに、サポート範囲や対応する基本荷重・構造モデルなど主な機能や特徴について解説している。

(<建築セッション><設計CADセッション><水工セッション>については、12月号本特集（後編）に掲載します)