

第4章 鋼橋設計の現状と課題

WG4

目 次

第4章 鋼橋設計の現状と今後	4-1
4.1 はじめに	4-1
4.2 橋梁の計画から管理まで	4-2
4.2.1 はじめに	4-2
4.2.2 橋梁設計における IT	4-2
4.2.3 活用と効果	4-3
4.2.4 課題	4-7
4.2.5 まとめ	4-8
4.3 2次元 FEM と 3次元 FEM による桁橋設計に関する一考察	4-9
4.3.1 はじめに	4-9
4.3.2 モデル化に関する検討結果	4-10
4.3.3 3次元挙動や設計計算に関する検討結果	4-13
4.3.4 考察と 3次元 FEM の実設計への導入に関する今後について	4-19
4.4 3次元ビジュアル化と設計	4-22
4.4.1 はじめに	4-22
4.4.2 他分野での 3次元設計例	4-22
4.4.3 鋼橋への 3次元設計およびビジュアル化の現状と提言	4-24
4.5 まとめ	4-27
付録 4A 3次元 FEM 結果にもとづく梁応力設計	4A-1
4A.1 単純合成 I 桁橋における FEM 解析に基づく設計法の検討事例	4A-1
4A.1.1 対象橋梁	4A-1
4A.1.2 解析概要	4A-2
4A.1.3 メッシュ分割の影響	4A-6
4A.1.4 格子解析との相違	4A-10
4A.1.5 応力集中度の把握	4A-16
4A.1.6 ホットスポット応力の算出	4A-20
4A.1.7 FEM 解析を用いた応力照査方法の検討	4A-21
4A.2 連続合成曲線少数鈹桁橋の力学特性の FEM 解析的検証	4A-23
4A.2.1 検討対象橋梁と荷重車載荷試験	4A-23
4A.2.2 FEM モデルと梁モデル	4A-24
4A.2.3 計測および解析結果の比較	4A-25
4A.2.4 まとめ	4A-32
付録 4B 大型車両走行時の挙動解析	4B-1

第4章 鋼橋設計の現状と今後

4.1 はじめに

数値解析技術の進歩，とりわけ有限要素解析技術の進歩，あわせて計算環境の飛躍的な進歩にともない，実際の橋設計において，3次元 FEM 導入の期待は高まりつつある．コンピュータディスプレイの前で，クリック一つでさまざまな橋の形態変更や形状，寸法変更が行われ，3次元 FEM をベースとした静的，動的応答をみつつ，要求性能に対する最適解を探索し，提案していく姿は，理想的と言えよう．

現在の橋設計における構造解析，計算は梁理論をベースとした有限要素解析，すなわち梁要素 (Beam Element) を用いた 1 次元または 2 次元の FEM である．その意味で，「有限要素法を用いて設計する」というのは，新しい概念でも新しい手法でもないが，橋を，ソリッドやシェル要素などの有限要素を用い，あるがままに 3 次元的に離散化，モデル化して計算しよう，したい，というのが，今話題としている 3 次元 FEM による橋設計であることを理解しておく必要がある．しかしながら，ソリッド，シェル要素による 3 次元 FEM の導入にあたり，現在の設計手法に対して得られるメリットとも大きなものがある反面，得られた結果の判断が難しい面もあること理解しておく必要がある(4.3 参照)．

通常，橋は断面寸法に比べて長さ（スパン）が長い線状の構造物で，梁理論でもって，その特性を把握することが可能となるケースが多い．そのため，梁理論は極めて重宝な理論といえる．計算環境が今日と大きく異なる過去においても，多くの橋梁を設計，建設してきた．この背景として，橋の力学挙動を明らかにする上で，変位場の平面保持を仮定し，3次元問題を巧みに 1 次元場の問題に帰着させている梁理論の恩恵が大きいと言える．一方，橋形状が複雑になる場合，複数の鋼板が複雑に組み合わせられる場合，あるいは大きな集中力が局所的に作用する場合等々，明らかに梁理論ではその力学挙動が把握できない場合，弾性論や数値解析を用いた計算を行い，安全性の照査が行われる．その際，最もパワフルなツールがソリッドやシェル要素を用いた 3 次元 FEM である．事実，これまでも，斜張橋のケーブル定着部，アーチの起こう部，ラーメン隅角部等々，数え切れないほどの細部構造を対象とした計算が実務設計の中で行われてきた．しかし，最近の計算環境の進歩は目をみはるものがあり，また，橋構造としてシンプルな横補剛部材をもつ 2 主桁橋が出現したことで相俟って，橋全体の構造計算が行われる例が多くなってきた．このことから，橋全体を 3 次元 FEM で設計しようという声があがってくる．一方で，2 主桁のように，梁理論でほぼ明解に全体挙動(支点近傍の局所応力を除いて)を把握できる構造を対象に，相対的に高価な 3 次元 FEM を適用する事例がみられるが，闇雲な適用には注意を要する．

とはいえ，この流れを契機に 3 次元 FEM の適用性を検討しておくことは重要と言える．次世代の橋設計にあたり，3 次元 FEM の導入は「夢」であり，将来に向け，適用に関する可能性，発展性，問題点を整理しておくことは重要と考える．本章では，「橋の計画から管理」，「2 次元 FEM と 3 次元 FEM による桁橋設計」，「3 次元ビジュアル化と設計」の 3 つのタイトルで，それぞれの問題点や発展性を纏めた結果を紹介する．

4.2 橋梁の計画から管理まで

4.2.1 はじめに

今、世間では IT（情報技術）革命の風が吹いている。右も左も、猫も杓子も、老若男女問わず IT の時代である。もちろん我々土木業界においても他人事ではない。何故ここまで、各社会に浸透し発展してきたのか。それはもちろん「良いもの」であるからに違いない。

また、パソコンという近年急速に発達した機械を用いるということが大きな要因になっている。「より良いものを造る過程として、よりわかりやすく、より効率的にするため、有効利用すること」を目指し、橋梁設計における IT の活用と効果、そして現在抱えている課題について述べるものである。

4.2.2 橋梁設計における IT

橋梁設計における IT といえば CAD（Computer Aided Design）、CG（Computer Graphics）や FEM などの技術を示す。最近、これらの技術はもちろんのこと、ソフトやハード（コンピュータ、特にパソコン）の性能向上が、我々の理想をかなり現実に近いものになっている。

(1) 測量技術の進歩

10 年前の地形測量（地形図や平面図の作成）は、一般に平板測量により行われ 2 次元の紙の原図を作成していた。その紙の製図を設計会社に渡し設計が進められていた。ところが、近年測量技術が進歩し、GPS（Global Positioning System）とトータルステーションを組合せ 3 次元の地形図などを作成している。また、空中写真測量を基に図化し原図を作成する場合もある。こちらも、図化の段階で地図情報をデジタルデータとして取得を行い、体系的に整理された数値地形図を作成出来るまでになっている。

(2) CAD による設計

CAD は、コンピュータの支援を受けながら設計することを意味している。現在、設計の多くには CAD が用いられている。道路関係のコンサルタントでは、約 7 割が CAD を使用しているというデータもある。

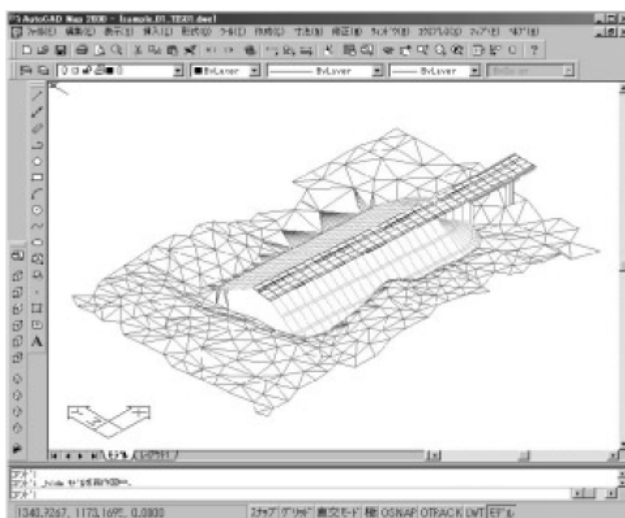


図 4.2.1 CAD による 3 次元モデルデータ
（線で立体を造ったモデル）

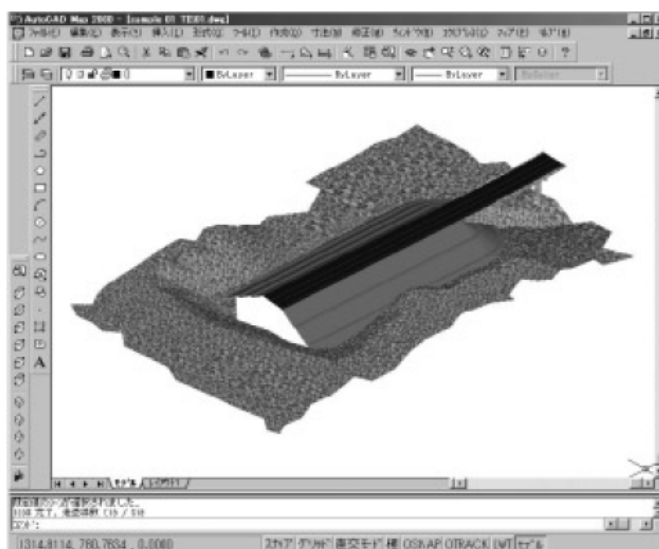


図 4.2.2 CAD による 3 次元モデルデータ
（図 4.2.1 をもとに面を貼ったモデル）

CAD というと、2次元の平面図や縦横断面図をコンピューターできれいに描く「単なるお絵かきソフト」だと思われているかもしれないが、実際はかなり正確かつ容易に設計できるために多種多様な機能を持ったソフトである。

現在、市場に出回っているいくつかのCADソフトでは、2次元設計以外に図4.2.1、4.2.2のような3次元立体モデルを作成することが可能になっている。更にこれら立体モデルデータを用い、容易に簡易的なCGを作成したり、VR（図4.2.3、4.2.4参照）を作成し、走行シミュレーションなどを行うソフトも販売されている。

(3) FEM 技術

数年前までは、FEM解析をパソコン上で行うには、2次元、3次元にかかわらず、かなりの労力と時間を要していた。そのため、ほとんどの場合は大型コンピュータで行っていた。しかし近年、技術革新やコンピュータの性能向上により、格段の進歩を遂げるまでになった。

現在の環境等については、先の1章に記載されているので参照するとよい。

なお、上述のCADによるデータを用いることにより簡易に3次元立体モデルを作成でき、作業は容易になりコストや作業の短縮につながると考えられる。



図 4.2.3 VR 画像
(道路上に視点をのせたもの)



図 4.2.4 VR 画像
(図 4.2.3 と同位置で視点を上空においたもの)

4.2.3 活用と効果

IT は、図 4.2.5 に示すように計画から管理までの各業務に何らかの関連性を持っている。

3次元CAD、CG・VR、3次元FEMはそれぞれ表1に示すように、用途別に有効性が挙げられる。作成の目的上、3次元CADによる設計は正確さや精密さの面で優れている。CG・VRは視認性や時間効果を用いた評価の面において優れているため、構造物の全体的な把握、渋滞予測や交差点における交通流シミュレーションなどに有効である。

FEM解析は細部構造の把握などに有効で

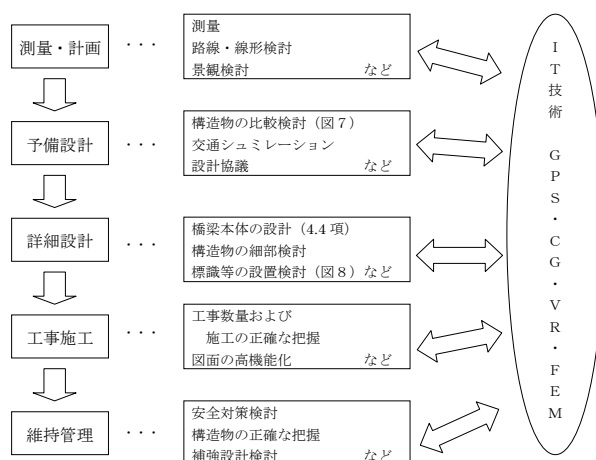


図 4.2.5 各業務の流れ

あったり，橋梁全体の応力の把握が可能となるため，工事施工はもちろんのこと，維持管理における補強検討に有効である．特に鋼橋はコンクリート橋と異なり，面外方向の挙動も重要となることから，3次元 FEM 解析を行うことで，正確な挙動を把握できる．

(1) CAD の活用例

CAD による設計の有効性は先述したもの以外にもいくつか挙げられる．例えば，CAD による設計に加えインターネットなどを利用した場合，発注者と設計業者が互いのパソコン上に共有データを立ち上げることによって，遠距離でも打合せを行うことが可能となる．もちろん CAD を用いているため，リアルタイムでの図面修正が可能となり効率化も図られる．

また，3次元 CAD による設計であれば簡易的な立体表示を用いることが可能となるため，お互いの理解力の向上が図られる（図 4.2.6）．

表 4.2.1 各技術の有効活用

	3次元CAD	CG・VR	3次元FEM
内(外)部構造の正確な把握	◎	○	○
視認性を追求した資料作成	○	◎	
設計不具合を顕在化	◎	○	○
時間効果の評価		○	
実挙動の把握			◎
維持管理における活用	◎		◎

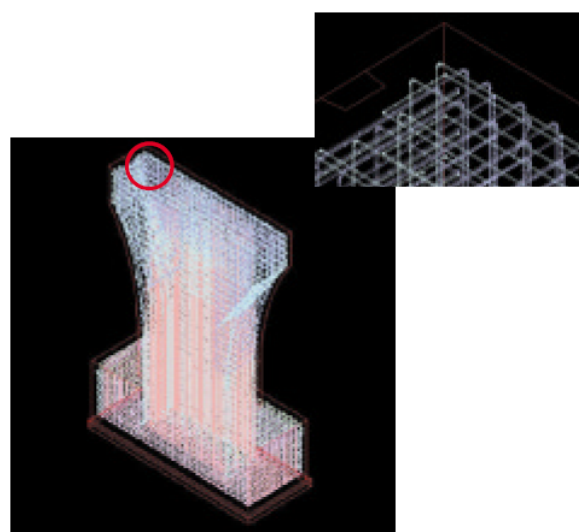


図 4.2.6 内部構造の正確な把握

(2) FEM の活用例

3次元 FEM 解析の有効性は先述のとおりである．最近では，2章や3章で取り上げられるように，工事設計時に鋼橋のコスト削減や合理的な設計を行うべく検討されている．特に，実際の応力計測が不可能な，「疲労設計を行う場合の溶接部の局所応力」や「合成構造の接合部の局所応力」などの検討に3次元 FEM 解析を実施している．

また，供用中の橋梁において，損傷が発生している鋼部材や床版の原因究明や補修補強設計などでも解析を実施している．例えば「鋼製橋脚隅角部対策」，「鋼床版の対策」や「耐震補強検討」などに実施している（図 4.2.7～4.2.9 参照）．

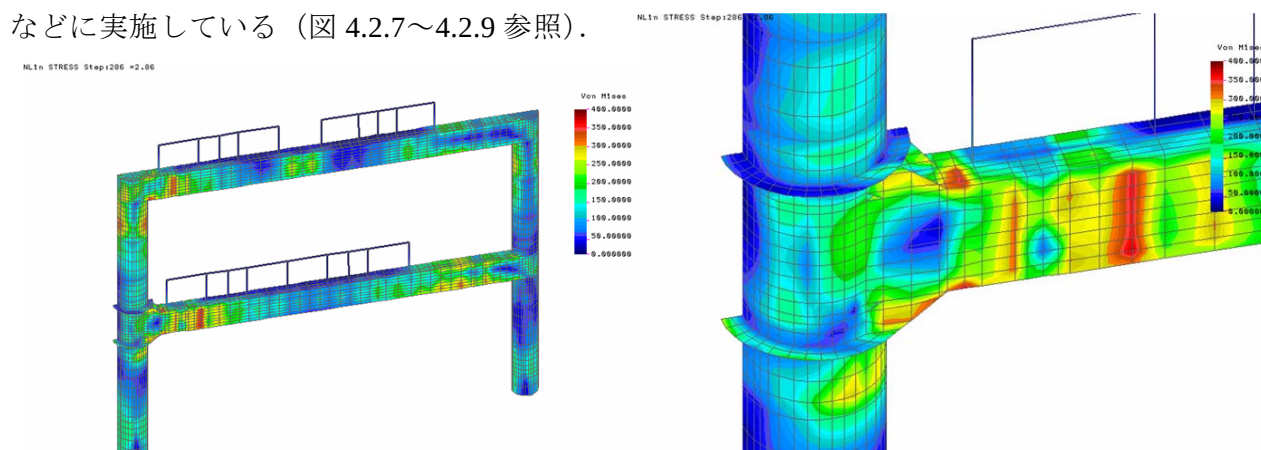
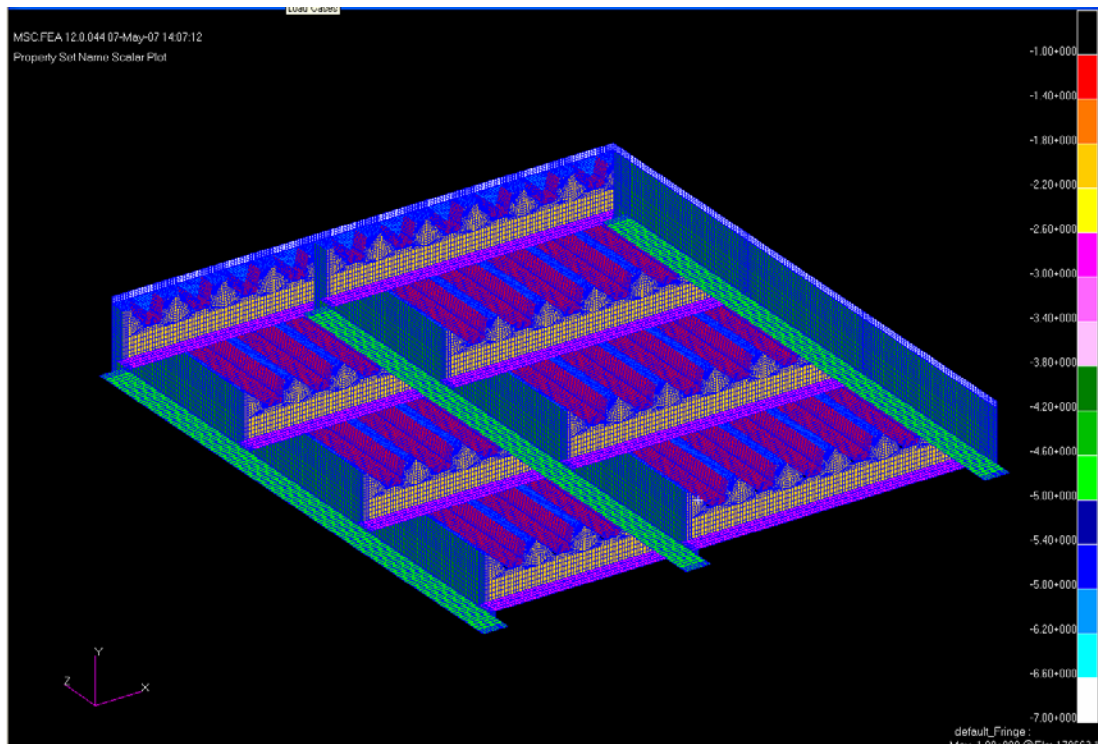
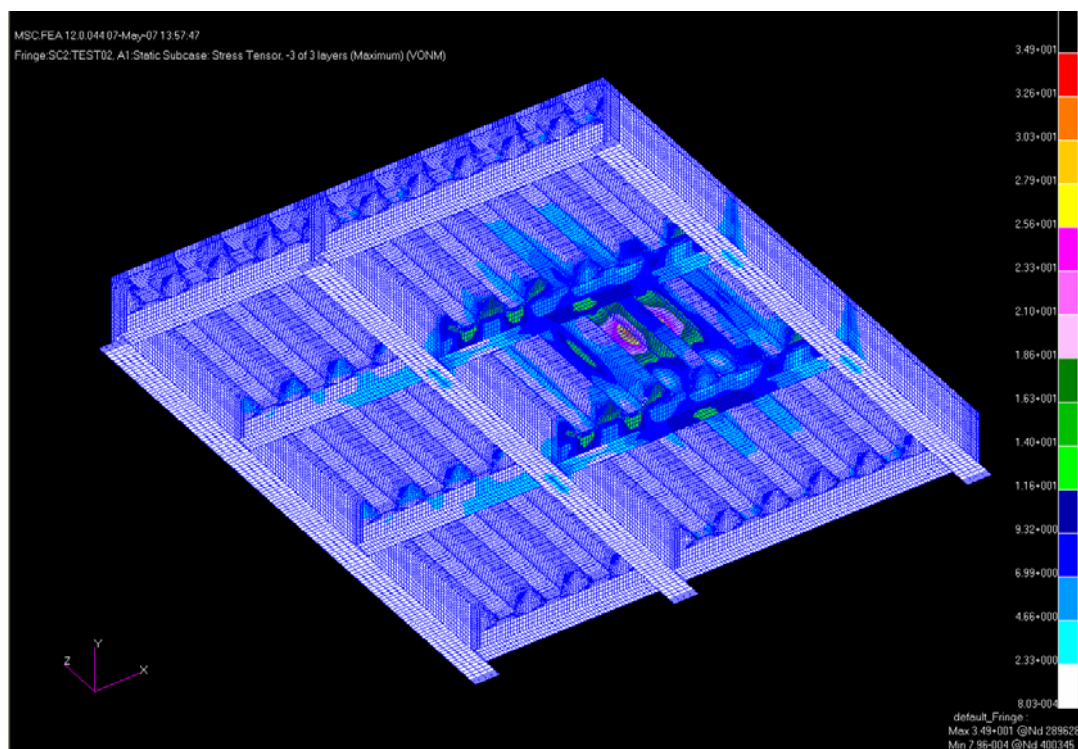


図 4.2.7 鋼製橋脚隅各部解析例

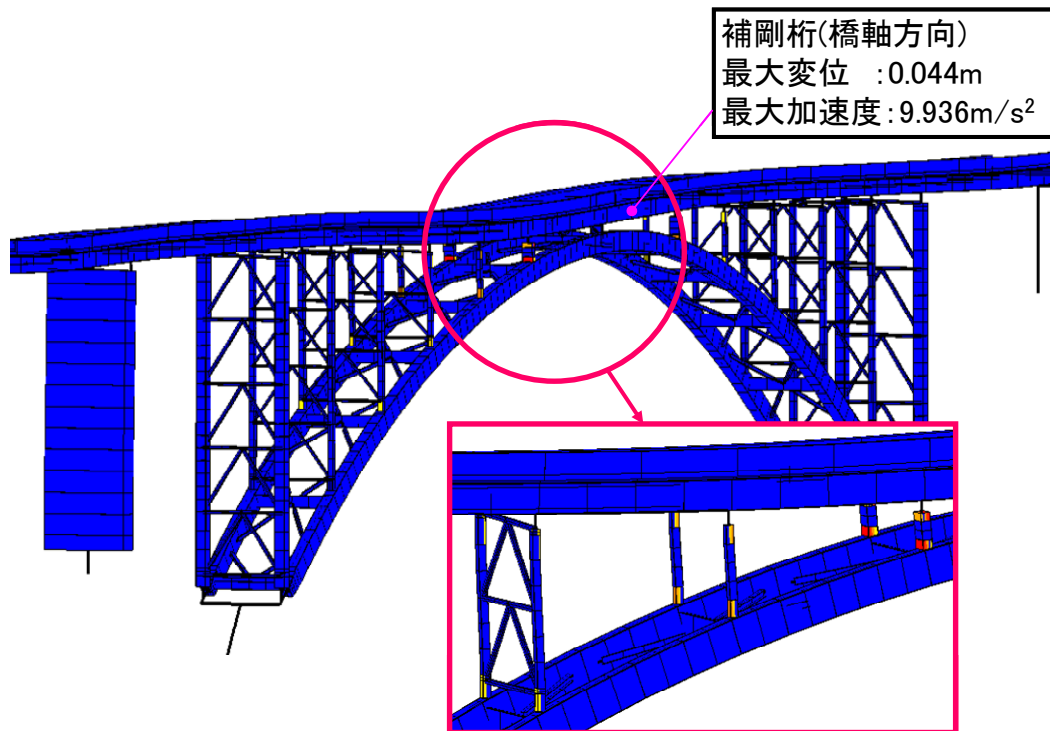


(a) モデル図

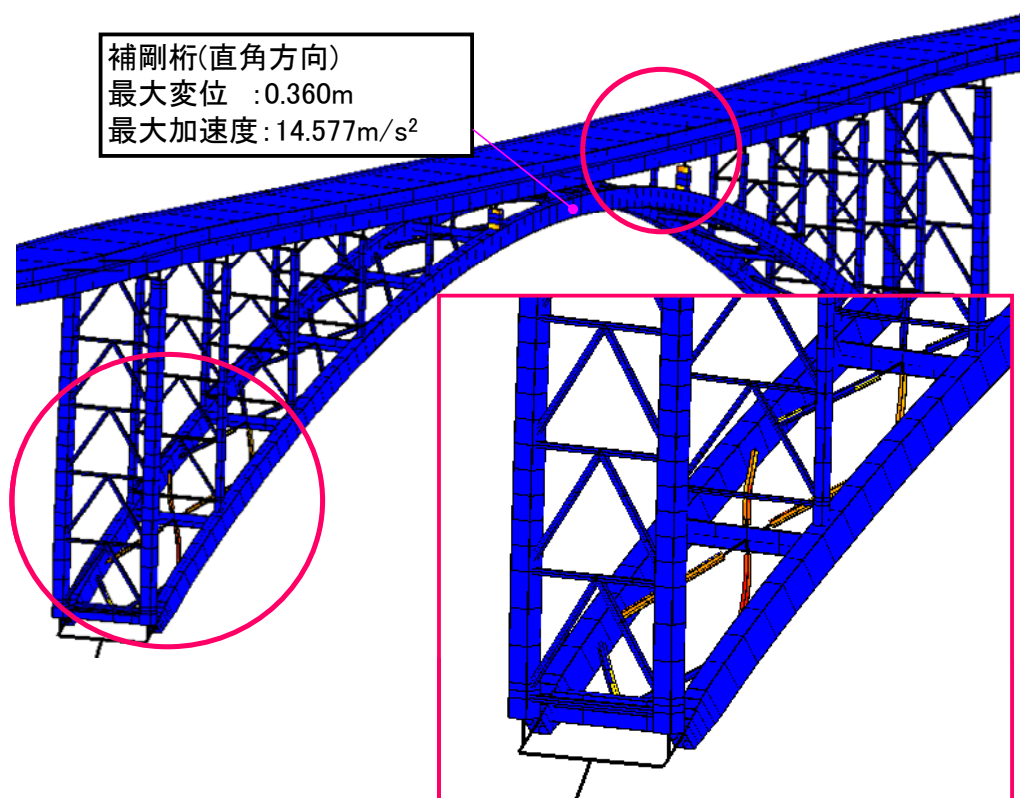


(b) 応力コンター図

図 4.2.8 鋼床版対策解析例



(a)橋軸方向の照査



(b)橋軸直角方向の照査

図 4.2.9 アーチ橋の耐震補強解析例

4.2.4 課題

(1) データの互換

IT の根本的な革新を目指す構想としてスタートし、国土交通省が中心となり進めているのが CALS/EC[1]である。CALS は Continuous Acquisition and Life-cycle Support の略で、直訳すると「継続的な調達とライフサイクルの支援」である。また EC は Electronic Commerce の略で、「電子商取引」と訳される。簡単にいうと「各業務を電子データ化し、効率良く行っていく」といった意味がある。

また、各整備局が中心となり、都道府県・政令指定都市等の公共発注機関を含めた協議会を立ち上げ、実施に向け各地方版のアクションプログラム作成や各機関の情報交換を行っている。

CALS/EC で実施されるものの中の一つに情報の電子化・標準化というものがある。既に、国土交通省では標準化のルールとして、表 4.3.2 に示す電子納品に関するいくつかの要領（案）が提示されている。しかし、異なる CAD 同士のデータの互換に関しては、2次元データを交換する標準フォーマットが開発されただけであり、3次元データの互換（交換）に関しては未だ整理されていない。

表 4.3.2 電子納品に関する要領（案）

要領案	制定
デジタル写真管理情報基準（案）	1999. 3
土木設計業務等の電子納品要領（案）	2000. 3
工事完成図書の電子納品要領（案）	2000. 3
CAD 製図基準（案）	2000. 3
地質調査資料整理要領（案）	2000. 6

(2) 要領の作成

CALS/EC の実施に向け、国土交通省はいくつかの要領（案）を作成したが、上述で示した通り 3次元設計を意識したものとはなっていない。

3次元設計は、周辺地形等を含める場合には測量において、また、地下の情報（土質性状）なども含める場合には土質・地質調査において、3次元電子データの納品が必要となるなど、今までとは異なるものが新たに加わる。したがって、今後もこれらを効率良く使用するためには、3次元データの標準化および納品に関する要領を早急に整理する必要がある。

また、データ交換と同じく 3次元設計を効率良く進めていくためには、3次元数値地形図、3次元 CAD、3次元 FEM などの仕様書を決める必要がある。

(3) 維持管理段階でのプロダクトモデルの導入

今後、鋼橋をどのようにマネジメントしていくかに大きく関わる部分である。マネジメントは、精緻な点検結果を基に、ライフサイクルコストの概念を導入して最適な補修・補強工法や時期を決定し、それを実行するとともに、詳細な履歴情報管理を行っていくことである。これらの業務を支援する情報システムへのプロダクトモデルの導入が重要であり、3次元 FEM もその1つと考えられる。

プロダクトモデル：工業製品を設計・製造するための 3 次元データに製品のライフサイクル上で必要な多くの情報を統合的に盛り込んだもの。飛行機・自動車などのメーカーにとっては、これが既に根幹の技術となっている。

4.2.5 まとめ

橋梁設計に IT を活用することは、より良いものを造る過程として、よりわかりやすく、より効率的になるといった効果が得られることは間違いないといえる。しかし今後の活用を考えるといくつかのハードルを超える必要がある。

近い将来、データの互換については、ソフトやハードの急速な進歩によって解決される可能性は高い。また、各要領（仕様書）等についても CALS/EC の実施や引き続きこのような検討が進むことで整理が可能であると考えている。

もちろんそれは、今後これらを使う人間の能力（技術力）の向上や「IT 風」の風向きを見極める力が必要であるというのは言うまでもない。

参考文献

[1] 建設省．IT による公共事業の革新 建設 CALS/EC.2000 年

4.3 2次元 FEM と 3次元 FEM による桁橋設計に関する一考察

4.3.1 はじめに

現在、橋設計における断面力やたわみの計算には、初等梁理論に基づく梁要素(**beam element**)の有限要素解析を用いるのが一般的である。その際、主部材のモデルに当たり、合成桁や鋼床版桁では有効幅の概念を用いて有効幅分の床版が主桁作用に考慮される。言うまでもなく、断面寸法に比べて部材長さが十分長い構造物や構造物の力学挙動を把握する上では極めて有効な理論であり、とくに橋構造のような細長い部材の挙動把握には効力を発揮する。勿論、断面寸法に比べて部材長さが短くなる場合には、せん断変形を考慮した棒要素を用いる場合もあり、あるいは、完全にこの手法を採用できないケースも生じる。例えば、厚肉のエンジン、車両や自動車のボデーなどを梁理論で解こうとする技術者はいない。どのようなモデル化を行うか、また計算手法を採用するか判断は、より正しく実挙動を把握することと大きく関係し、設計者の力学的素養や解析、計算に関する技量が問われる問題と言える。「梁理論には仮定が多くて、実体を把握できないため問題だと」とする意見を聞くが、梁理論が悪いのではなく、適用できない構造物に適用する方が、適否の判断ができない、判断能力のない方に問題があると言える。

さて、桁橋の計算では、主桁や横繫ぎ材を梁要素でモデル化するが、モデルの形状が格子状となることから格子モデルと呼ばれ、その解析を格子解析(梁要素を用いた2次元 FEM)という。その他、トラスやアーチ等の各部材も梁要素でモデル化され、断面力やたわみが計算される。このとき、車が走行する鋼やコンクリートの床版(連続体)のモデル化が問題となるが、通常は連続性が無視された扱いとなる。例えば、合成桁橋の場合、床版(有効幅)は主桁の曲げ剛性には考慮されるが、その荷重分配機能、性能などは無視される。つまり連続体としての特性は無視される。その理由は、格子モデルでもって連続体を扱うのが困難なためである。そのため、この影響を考慮し、より実体に近い挙動を再現させようという立場から、シェルやソリッド(ブリック)要素を用いた3次元有限要素解析(3次元 FEM)による設計が提案される。また、3次元 FEM の導入により、先に説明した有効幅の概念の導入が不要とできる。つまり、床版内で見られる応力分布の不均一、せん断変形の影響が考慮できることになる。この背景には、今日の計算環境の飛躍的な進歩が挙げられるが、依然として相対的には高価な解析のため、そのコストメリット、パフォーマンスを明らかにしていくことも、現状では重要と言える。

橋構造を梁要素でなく、シェル要素や、あるいはソリッド要素を用いて離散化して計算しようとする理由はどこにあるのか。これは、前述のように、より実体に近い挙動を把握し、それを設計に反映させる点にあると考える。また、実体が把握できて、応答が小さくなることが明らかになれば、経済設計に繋がり、対費用効果があると言える。具体的には、床版を連続体として扱うことで、荷重分配性能の向上を取り込むことができ、経済設計への可能性が期待できる。では、ソリッドやシェル要素を用いる FEM で完全に実体が把握できるのか、「夢の手法」なのか、そのような点を挙げると以下の点が挙げられる。

1) FEM で用いる要素の誘導過程から明らかなように、2、3次元弾性論の正解を用いるのではなく、一般には変位を多項式で近似している。したがって、この時点で既に正解、「**reality**」では無く、要素の分割数や分割状況他に応じて異なった結果が得られる。設計者は、要素種の選定、要素分割をどの

ように行うかについて、対象構造の形態、荷重条件その他に応じて適切に判断する必要がある。現在でも多用されている複雑な構造形態をもつ鋼橋では、多数の部材に着目し、それぞれの部材に対して要素分解と精度の関係を明らかにした上での計算には困難が伴う。実体として、責任技術者の判断に委ねられる事項であり、構造物の挙動に対する洞察力、力学素養や計算能力に対して高い見識が要求される。第1章に、その辺りの解答が見出せると思われる。

2) 我が国のコンクリート床版を有する桁橋または桁構造の設計では、床版との合成効果を期待しない、非合成設計と言われるユニークな設計が主流である。これは、主桁作用に対してはコンクリート床版を無視し、鋼桁のみが唯一の耐荷部材とする設計である。ところが、車両走行時の実際の挙動は、合成構造として挙動していると判断するのが一般的である。これは、床版が鋼桁から外れるのを防ぐために設けられる「ずれ止め(スラブアンカー)」やコンクリート、鋼桁間の摩擦作用が合成効果に寄与しているためと考えられる。机上の設計では、床版を用いない鋼桁のみを対象としたモデル化を行い、断面力、たわみの計算を行う。この実体をシェル、ソリッド要素でモデル化した FEM で再現するには、接合部の扱いが重要となる。第2章に、その辺の記載があり、こちらについても解答が見出せるかもしれない。

3) 連続合成桁では、中間支点位置で床版にひび割れが発生し、コンクリートの剛性が変化する。しかも、荷重の大きさ(載荷状態)に応じて変化する。いわゆる非線形挙動を示す。現行設計で採用される影響線解析は、いうまでもなく線形挙動、解析がベースにあり本質的な矛盾が生じる。果たして「reality」を再現できるのか。勿論、格子モデルでも同様の問題を抱えるが、この場合は、割り切った(エンジニアリングジャッジメントに基づく)剛性の設定を行っている。

4) これまで数多く建設され、また今後も一般的な形式とされている I 桁橋の構造形態は複雑と言える。とくに横補剛構造は複雑である(横桁、対傾構、下横構、ガセット、垂直・水平補剛材)。これら 2 次部材をどこまで正しくモデル化できるのか、特に、支杳構造は、実際構造やその動きを再現できるモデル化が必須であるが、正しいモデル化と解析が可能であるかの検討が欠かせない。

5) 床版はシェル要素でモデル化すべきか、それともソリッド要素でモデル化すべきか。

等々である。なお、以上の疑問点は、3次元 FEM の橋設計への適用を否定する立場で述べているのではない。適用を推進する上での解決すべき課題、問題提起と理解して頂きたい。

本報告は、I 桁橋を対象に、まずモデル化の問題を扱う。次に、現行設計で多用される格子解析(梁要素を用いた 2 次元 FEM)とシェル、ソリッド要素を用いた 3 次元 FEM で、どのような差異が生じるのか、3 次元 FEM のメリットは何かに着目し、関連する論文を整理した結果を簡単に紹介する。また、本編最後に付録として、4A.1 に格子解析と 3 次元 FEM と比較計算事例を、4A.2 に 3 次元 FEM と実橋の発生応力との比較事例を掲載しているので参考にして頂きたい。最後に、3 次元 FEM 導入にあたっての検討すべき課題、今後の期待を纏める。

4.3.2 モデル化に関する検討結果(文献[1]の検討内容と結果)

文献[1]では、図 4.3.1 に示す、対傾構、横桁、下横構をもつ標準的な実橋梁(スパン 39m、単純合成 3 主桁橋)を対象に、とくに 2 次部材の部材力同定を主眼とした FEM モデル化の検討が行われている。本論文以前にも、実橋を FEM モデル化し、2 次部材の計算を行った例は報告されているが、この論文は要素分割と精度について詳細に検討した我が国最初の論文であり、その後の橋梁の FEM モデル化

と計算論文に多く引用されている。

図 4.3.2 に FEM 分割状況(R-A : 橋軸方向 1/2 モデルと幅員方向 1/2 モデル)を示す。R (Reality Model) モデルは、床版を 20 節点ソリッド要素で、鋼部材すべてを 8 節点要素でモデル化したものである。図 4.3.3 は、中間対傾構と分配横桁の要素分割の状況である。モデル S (Simplified Model)は、対傾構などの 2 次部材を棒要素でモデル化したもので、図 4.3.4 に要素分割状況を示す。R モデルは、モデル化にあたり、当時の計算環境(FACOM VP-2000 : 主メモリー128MB, 記憶用ハードディスク 10GB 使用)で可能な最大限、細かく要素分割したモデルである。記号 A,B,C は以下の通りである。

- A : L 形鋼(水平材や斜材)とガセットプレート(材軸の偏心, 重ね継手(垂直補剛材とガセット)の板厚差による偏心などを考慮したモデル
- B : A における重ね継手の板厚による偏心を省略したモデル
- C : 部材取り合い部の偏心を一切考慮しないモデル
- である。

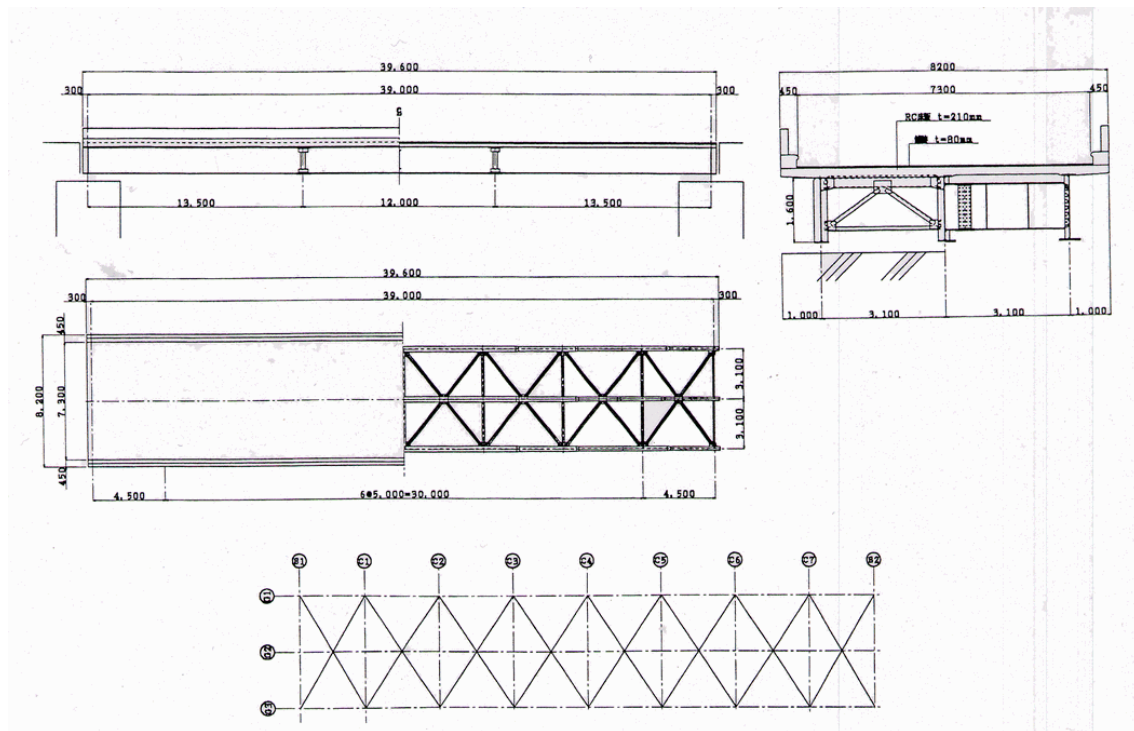
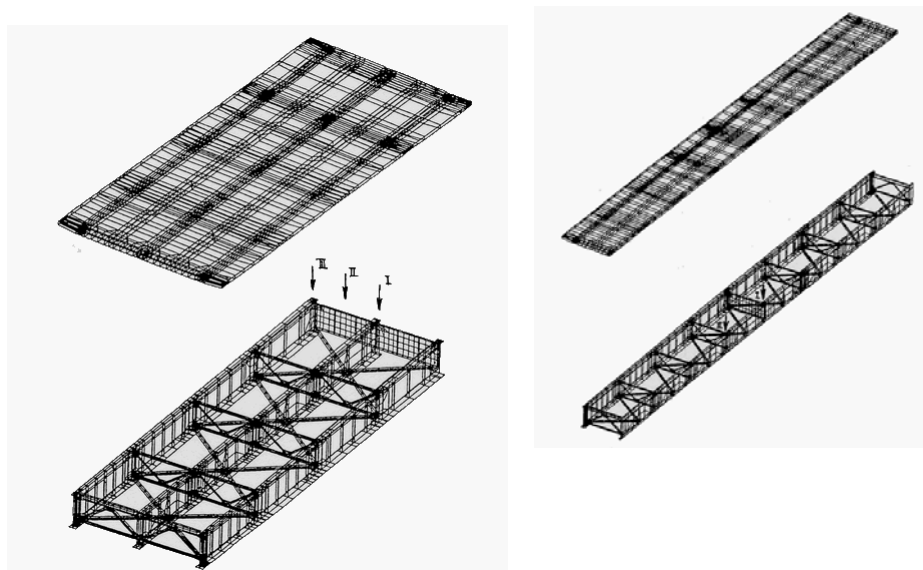


図 4.3.1 解析対象とした単純活荷重合成桁橋 [1]



(a)橋軸方向 1/2 モデル

(b)復員方向 1/2 モデル

図 4.3.2 モデル R-A の要素分割 [1]



(a)中間対傾構部

(b)分配横桁部

図 4.3.3 R-A 橋軸方向 1/2 モデルの対傾構と横桁の要素分割 [1]

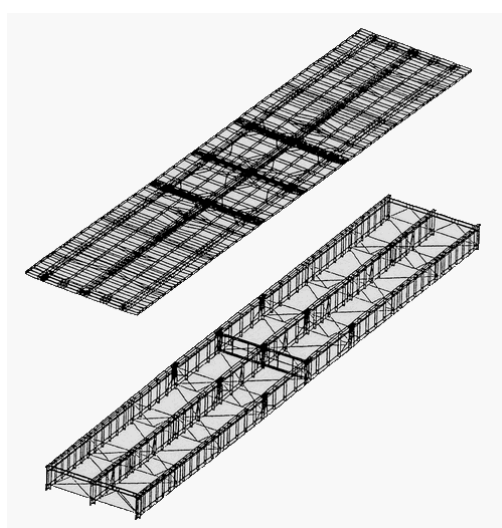


図 4.3.4 簡易モデル S-A の要素分割 [1]

検討結果を纏めると以下ようになる。

- 1) 偏心荷重(例えば, 図 4.3.1 の G1,C4 に集中荷重載荷)が作用する場合, R-A モデルが最も柔な挙動, 大きな変形を示し, 発生する 2 次部材の部材力の差異に関係する。

- 2) 2次部材の部材力の評価には、部材の偏心量を考慮する必要がある。
 - 3) 対傾構や横構部材を棒部材でモデル化した場合、偏心取り付けを考慮したモデル化を行っても、シェル要素で詳細にモデル化した場合とでは、部材力に約30%の差異が生じる。
 - 4) 上記で部材偏心を無視したS-Cモデルの場合、R-Aモデルとの差異は50%に達する。
 - 5) 2次部材の部材力に着目したFEモデル化については、3)、4)で示したように注意が必要といえる。
- 以上、現行多用される我が国の標準的なI桁橋における2次部材の部材力の同定は極めて困難となることがわかる。

4.3.3 3次元挙動や設計計算に関する検討結果

(1) 文献[2]の検討内容と結果

文献[2]では、図4.3.5に示す断面をもつ単純合成桁を対象に、力学特性の検討を行っている。これまでにない、シンプルな横補剛システムの橋梁の実現可能性を明らかにするために、特性の解明を行っている。

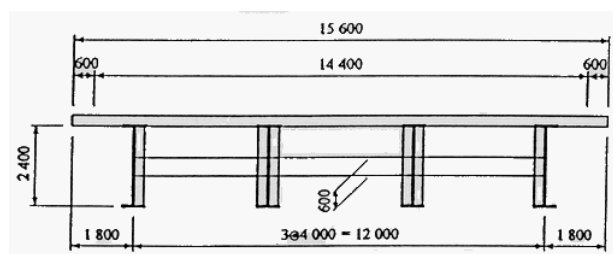


図 4.3.5 橋モデルの横断面 [2]

図4.3.6、4.3.7に橋全体の要素分割状況と横桁の要素分割状況を示す。床版をソリッド要素、その他鋼部材をシェル要素で分割している。

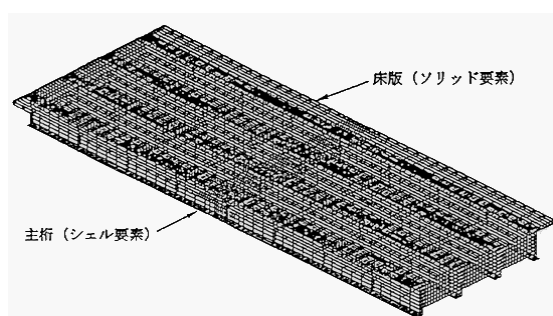


図 4.3.6 橋全体の要素分割 [2]

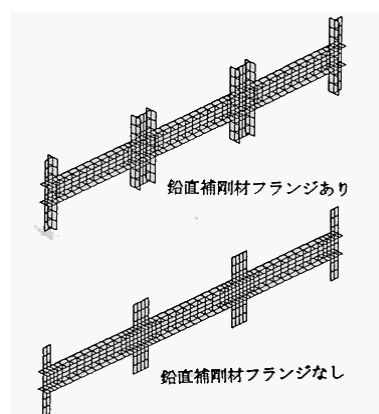
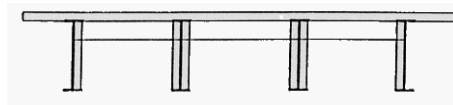


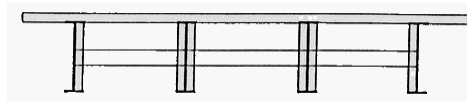
図 4.3.7 横桁の要素分割 [2]

構造に関するパラメータとして、中間横桁(間隔5,10mの2ケース)の取り付け位置(図4.3.8参照)と床版厚(200,250,300mm)が選ばれている。なお、この論文では、従来タイプの横補剛システム(分配横

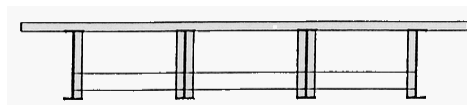
桁＋対傾構＋下横構「但し、対傾構、下横構部材は梁要素でモデル化し、またガセットや補剛材のモデル化は行っていない」)の計算もあわせ行われている。



(a)上段配置図



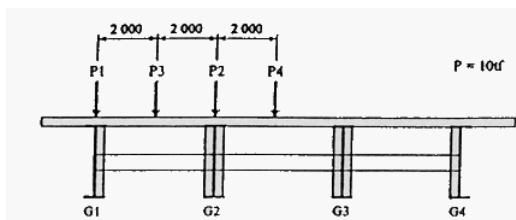
(b)中段配置図



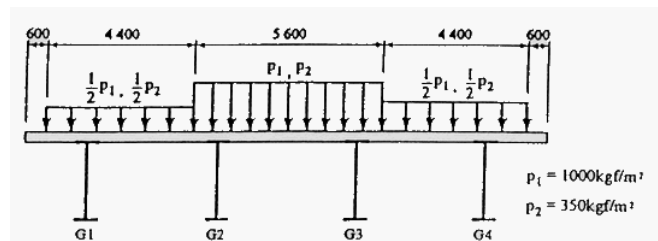
(c)下段配置図

図 4.3.8 横桁取付位置 [2]

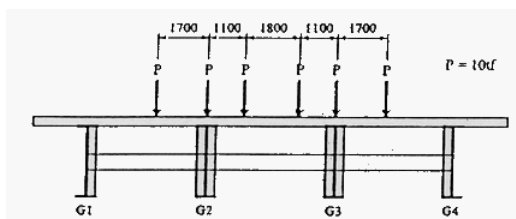
荷重は、図 4.3.9 に示す集中およびT荷重、また、図 4.3.10 示すL荷重が扱われている。この他に、風荷重（風荷重のほとんどが床版⇒端横桁⇒支承に流れ、下横構を省略しても問題ない）が扱われている。



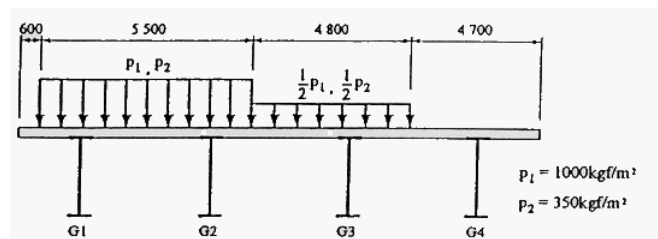
(a)集中荷重



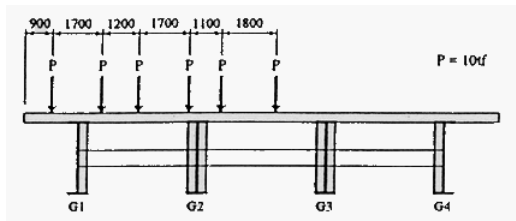
(a)L 荷重対称載荷



(b)T 荷重対称載荷



(b)L 荷重偏載載荷



(c)T 荷重偏載荷

図 4.3.9 集中, T 荷重 [2]

図 4.3.10 L 荷重 [2]

図 4.3.11 に G1,G2 桁の荷重分配係数を示す. 係数は横桁取り付け位置の影響を受けないことがわかる. また, 床版厚の影響も 200~300mm の範囲では小さい.

図 4.3.12 に構造システム(床版無し, 横桁あり: 非合成設計), (床版あり, 横桁無し), (床版あり, 横桁あり)の影響を示す. 床版の有無が分配係数に大きな影響を与え, 床版が有る場合, 荷重分配性能がよくなる. このことから, 床版を考慮した設計を行うことで, 断面力の差異が生じ, 経済設計の可能性が生じる.

図 4.3.13 に従来補剛システムとの差異(シンプルシステムは横桁を中段配置した結果)を示すが, シンプルシステムの分配性能が多少悪くなるものの, わずかと言える. この理由として, 床版の効果が大きい点が挙げられる.

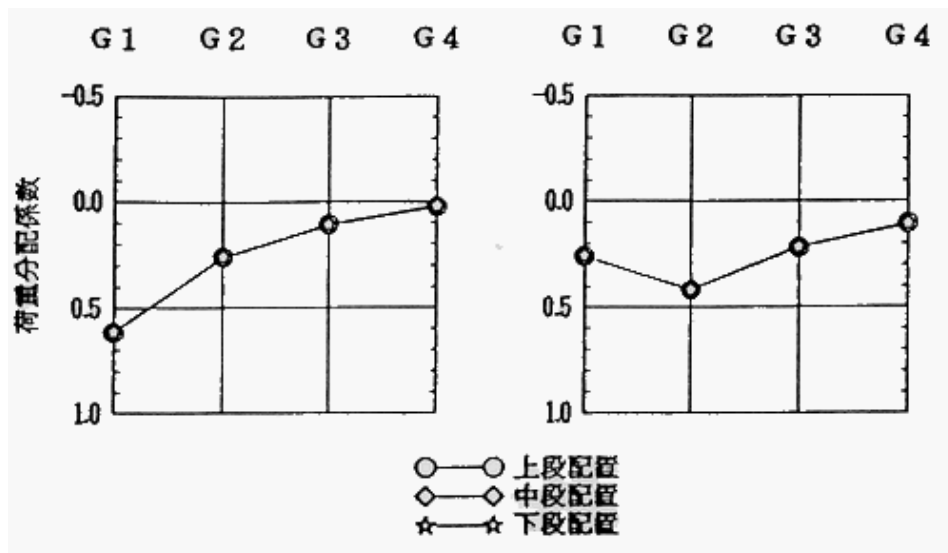


図 4.3.11 横桁取付位置による荷重分配 [2]

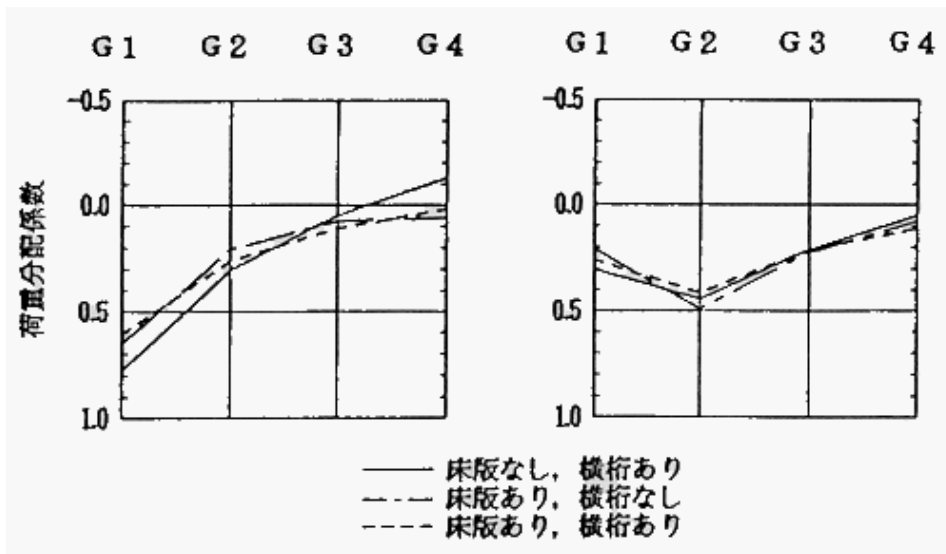


図 4.3.12 床版の有無による荷重分配 [2]

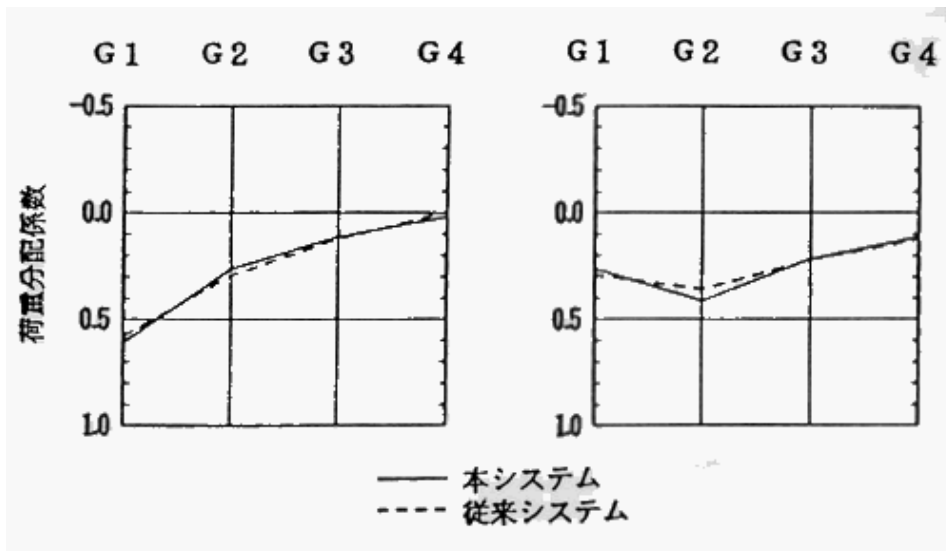


図 4.3.13 補剛システムによる荷重分配 [2]

この他に、床版の T 荷重による主鉄筋方向、配力筋方向応力の比較を行われている。従来補剛システムとシンプルシステムでほとんど差異が生じないことが示されている(但し、計算にあたり、床版のひび割れは考慮されていない)。

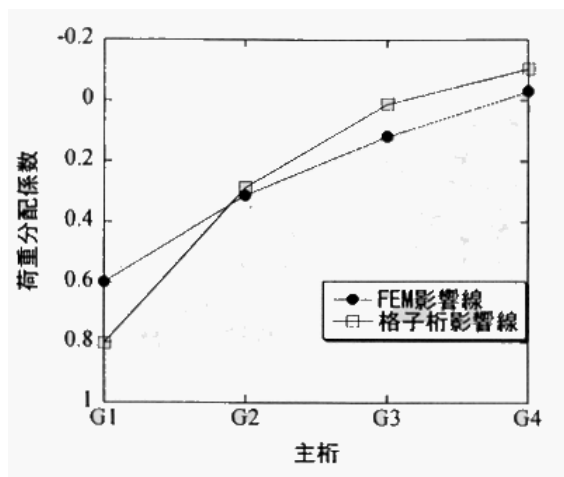
(2) 文献[4]の検討内容と結果

文献[2]とほぼ同じモデルを用いた検討を行っている。有限要素モデル化も床版はソリッド要素、鋼桁はシェル要素で同じである。なお、荷重は L 荷重のみを扱っている。

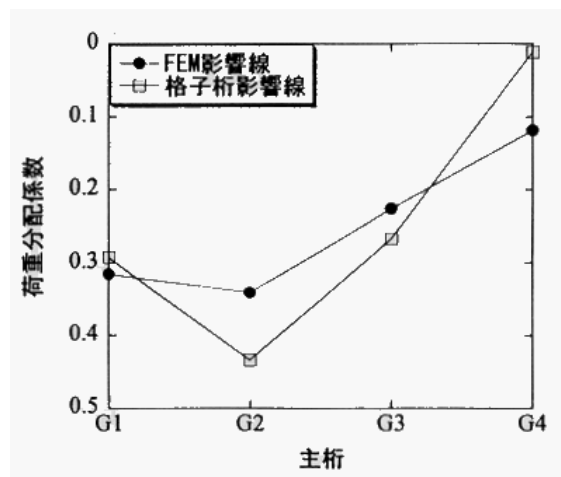
基本的な力学特性を検討するとともに、荷重分配係数に着目し、格子解析の結果を補正する補正係数を提案している。この理由として、「立体 FEM 解析は入力データの作成(橋梁のモデル化、要素分割)に多大な時間を要するなど、通常の鋼橋設計業務で気軽に使える状況にない」点を挙げている。

荷重分配係数に与える床版の影響が大きいことが強調されている。図 4.3.14 に、FEM と格子解析に

よる荷重分配係数の比較が示されるが、文献[2]と同様の傾向が得られている。図 4.3.15 は、FEM 解析において、床版厚を 25mm にした場合(床版の効果を小さくする)の結果を格子解析結果(床版無視)と比較している。両者が良い一致を示すことから、荷重分配に与える床版の効果が大きいことを証明している。

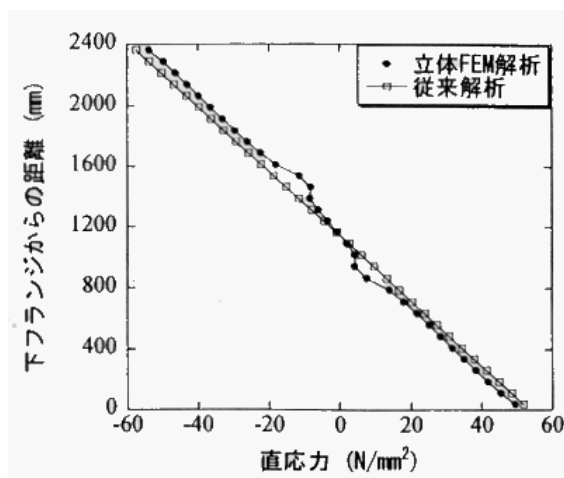


(a)G1 桁影響線

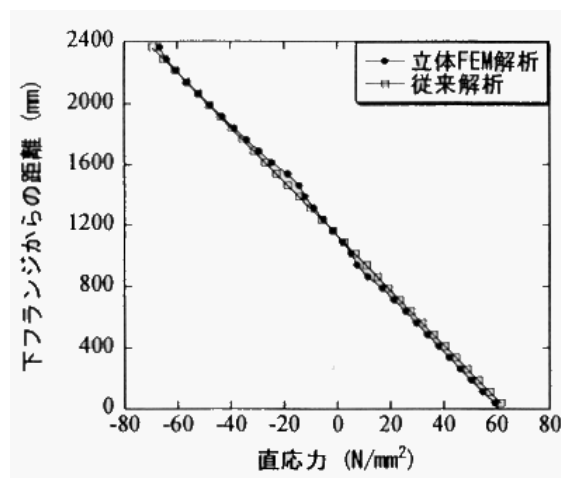


(b)G2 桁影響線

図 4.3.14 荷重分配影響線 [4]



(a)G2 桁(対称載荷)



(b)G1 桁(偏心載荷)

図 4.3.15 腹板内の橋軸方向直応力分布(床版厚 2.5cm) [4]

論文では、格子解析で得られる荷重分配性能を補正する補正係数を提案し、これを、従来補剛タイプの橋に適用し、FEM の結果(床版あり)と近い係数が得られることを示している。

(3) 文献[3]の検討内容と結果

文献[3]は FEM(シェル要素)をベースとした、最初の影響線解析であり、極めて貴重な情報を与えている。

図 4.3.16 に示す 2 径間連続活荷重合成桁を対象に、FEM による影響線解析を行っている。但し、床版は先の文献[1], [2], [3]と異なり、シェル要素活荷重を用いている。要素分割の程度については、要

素分割数を種々変化させたモデルを用い、ほぼ収束した結果が得られているかの検討が行われている。また、中間支点位置であるが、一旦、コンクリート床版がひび割れないとして、床版応力を対象とした FEM 影響線解析を行う。発生応力がコンクリートの引張強度を超える領域について、鉄筋のみの剛性に変換する。この状態で、再度 FEM 影響線解析を行って、応力を算出する。したがって、剛性に関する収束計算は行っていない。現実問題として、この収束計算は困難と想像される。

なお、要素分割関係(図 4.3.16 参照)では、床版(シェル要素)と鋼桁(シェル要素)を剛棒で連結することで挙動が正しく把握できているか、また、中間支点位置で、支承構造を立体トラスでモデル化してよいか、が疑問点として挙げられる。事実、後者については、応力の補正が行われており、橋全体をモデル化することの困難さが伺える。

以上より、床版をシェル要素でモデル化しなければならない、また、分割数を決めるためのトライアルが必要となり、かつ細部構造のモデル化が十分にできない問題がクローズアップされる。とはいえ、最初に言及したように、貴重な検討と言える。

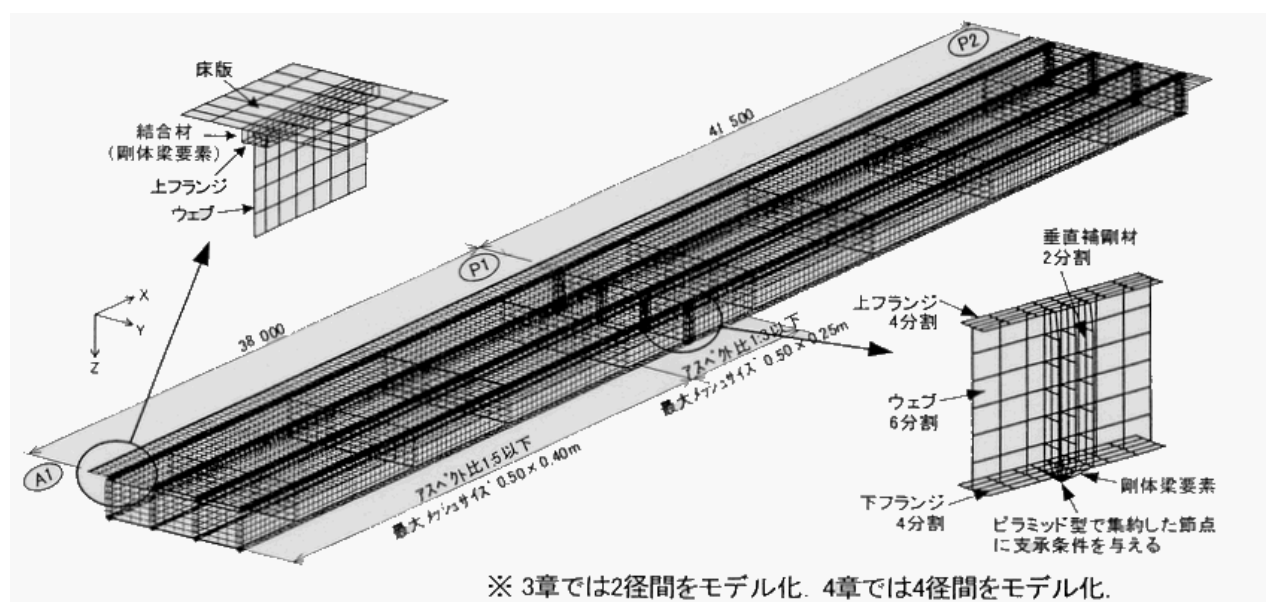


図 4.3.16 設計で使用する FEM 解析モデル [3]

以上の検討結果から、以下の知見が得られている。

- 1)活荷重応力は、FEM 解析、格子解析で大きな差異が生じなかった。この理由として、影響線のピーク値は小さくなるが(先の、床版の存在による荷重分配性能の向上に起因する)、影響線載荷面積が広がったためと記述されている。
- 2)FEM、格子解析で設計した橋梁(本計算モデル)の鋼重量は変わらない結果となった。この検討結果からは、より高価な FEM の導入によるコストメリットが見えてこない。一方で、なぜこのような結果になったのかの考察が強く望まれる。

4.3.4 考察と3次元FEMの実設計への導入に関する今後について

現在、標準的とされる対傾構、横桁、横構(2次部材と呼ばれる)を有するI桁橋のFEMにあたり、これら2次部材の部材力をより正しく評価するためには、2次部材の偏心取り付け状態の再現を含め、実体通りにシェル要素等でモデル化したFEMモデル化と計算が欠かせない。将来の計算環境の更なる飛躍的な向上によって可能となる期待はあるが、現状では、全ての2次部材、補剛材、ガセットや取付けボルトまで含めて正確に考慮したモデルでのFEMによる評価には困難が伴うと言える。

紹介した文献の結果からは、床版の荷重分配効果が期待できることは明らかと言える。したがって、この効果を設計に組み込むことにより経済設計に繋がることが期待できる。また、構造システムとしても、文献[2]で示したシンプルな補剛システムを採用しても問題のないことがわかる。LCCミニマム化の観点からも、このようなシンプルシステムの積極的な採用を薦めたい。

文献[3]では、貴重な試みが行われたわけであるが、幾つかの問題提起を行ったことになる。つまり、依然高価な計算手法であるシェル要素を用いた3次元FEMを実際の設計に導入しても、現状の格子解析との差異が見られない。もし、このことが事実であれば、文献[4]の荷重分配係数に対する補正係数の導入は、逆効果で、実体から離れた設計を行うことになりかねない。更なる検討が欠かせない。

以上の調査結果を踏まえ、シェル要素ベースの3次元FEMによる橋設計への期待、問題点を列挙すると以下ようになる。

- 1) 橋構造を対象に、要素種の選択方法や要素分割数に関する目安、またはガイドラインを作成する必要がある。このようなガイドラインが無い場合、実橋梁では何ケースかの要素分割を行い、ほぼ収束した値を確認することになる[3]。
- 2) 端支点、中間支点位置において、金属やゴム支承(ソリッド要素)、これらの鋼桁への接合方法、あわせて垂直補剛材(シェル要素)の忠実なモデル化手法の開発。これまで、剛な棒部材をトラス組みして支承構造をモデル化する手法を多く見かける。実挙動との大きな乖離が予想される。このようなモデル化でもって、中間支点位置の曲げモーメント分布や値を議論すべきでない。
- 3) 2次部材(対傾構や横構の水平材や斜材)の部材力の同定を対象とする場合は、実構造をシェル要素でモデル化する必要がある[1]。このようなモデル化を橋全体の計算モデルに導入すると膨大な自由度が予想され、非現実的と考える。2次部材をトラス要素でモデル化するのが現実的であるが、全体挙動(桁の応力や変位)には大きな影響を与えないことを確認しておく必要がある。
- 4) 3)の問題の対応方法として、文献[2]で計算対象としたシンプルな補剛システムの採用、移行を推奨したい。これにより、シェル要素を用い、補剛部材を含めた3次元FEMが現実的となる。
- 5) 我が国の現状では、非合成設計の桁橋がほとんどである(桁橋の約95%)。実体を明らかにする立場からは、約1mピッチで配置されるスラブアンカーやコンクリート、鋼桁間の摩擦を適切にモデル化する必要がある。すなわち、要素種や構成則を開発する必要がある。
- 6) 連続合成桁の中間支点位置の挙動は、4.3.1 まえがき、で紹介した通りである。より正確に挙動を再現する上では、ひび割れ挙動、すなわち非線形挙動を扱う必要がある。シェル要素あるいはソリッド要素を用いた3次元FEMの収束計算はタイトな計算となり、非現実的と言わざるを得ない。また、我が国の設計のベースとなっている影響線解析にはそぐわない。例えば、文献[3]では、まず、最初にコンクリート床版がひび割れないとした影響線解析から断面力、応力を算出し、ひび割れ領域を定義する。この状態で剛性がセットされ、その後の変化するひび割れ状態や剛性変化の同定作業、あるいは

は収束計算は行わない．実体を再現できるモデル化は極めて困難と言える．設計では，剛性の仮定方法とそれによる誤差の同定が欠かせない．この同定作業を今後実施しておく必要がある．
等である．

シェルやソリッド要素の 3 次元 FEM を橋設計に導入し「reality」を再現するという場合，以上説明した項目は避けられない検討課題といえる．これらの項目をまず謙虚に検討する必要性を強調したい．一方で，文献[3]の結果をみると，3 次元 FEM と現行採用されている格子解析(2 次元 FEM)から得られる鋼重量に大きな差異が見られない．そのため，3 次元 FEM 導入によるコストメリットに大きな疑問が生じる．この意味からも，差異が生じなかった^[3]理由に関する考察が強く望まれる．このままでは，橋の最も経済的な設計，外形，寸法を決定する上での 3 次元 FEM の導入の必要性がはっきりしない．

シェル要素を用いる FEM は古くから利用され，設計に援用されている．FEM を用いる理由やメリットは，

- 1) 梁理論では明らかにできない応力の不均一，応力集中のレベルを把握する上で有益である．例えば，アーチ橋の弦材とアーチ部材が交差する起こう部，斜張橋のケーブル定着部等を対象とした部分モデルの FEM が行われてきた．最近の計算環境の飛躍的な向上を受け，形態の複雑さに関係なく，橋全体をモデル化した FEM 解析が行われている．このことにより，梁理論で対応できない応力の把握ができ，設計への反映が行われている．但し，応力集中の絶対値の評価については検討を要する．
- 2) 橋に限定しない，複雑な形態をもつ構造あるいは構造の全体挙動を明らかにする上で有益である．あわせて，細部構造の応力性状の把握である．
- 3) 最近のシンプルな形態の少数主桁橋に見られるような，これまでに経験のない新しい構造形態の開発に当たり，構造系として成り立つことの証明や，梁理論では対応できない 2 次応力のレベルの把握と設計への反映．
- 4) 荷重分配挙動をより正確に把握できることから，疲労照査用の公称応力をより正しく(実体に近い状態を)評価する上で有益である．

さて，設計(形状や寸法決定)という観点では，既に説明したように，3 次元 FEM の導入にメリットが見出せない[3]．この理由として，影響線解析が挙げられている．床版の挙動を評価することで，荷重分配性能がより正しく評価できて，影響値の低下が見られる．一方で，3 次元 FEM の結果は，2 次元 FEM に比べてより広い影響面(平面)を与えているようである．これは，荷重の載荷領域が広くなることを意味している．結果，相殺される形で，影響線解析による応力(2 次元 FEM では断面力を求め，応力を計算する)の大きな差異が生じないとのことである．この考察の妥当性を検討する必要がある．この解明なくして，3 次元 FEM の導入は今後ありえないと言える．

この他に，FEM による設計では，これまで親しんできた断面力の概念がなくなる．また，構造の全体的な挙動に対する見通しを悪くする可能性もある．このような点についても今後議論する必要があると考える．

最後に，本文中での各種の評価にあたっては筆者の勘違いを恐れます．ご指摘を頂けるとありがたい．

参考文献

- [1]黒田充紀，長井正嗣，藤野陽三，柄川伸一，川井豊：並列 I 桁の有限要素モデル化に関する検討，構造工学論文集，土木学会，Vol.42A, pp.1073-1080, 1996.
- [2]長井正嗣，吉田康治，藤野陽三：シンプルな横補剛システムをもつ鋼多主 I 桁橋の立体力学挙動，構造工学論文集，土木学会，Vol.43A, pp.1141-1151, 1997.
- [3]村越潤，高橋実，吉岡勉，野中哲也，加藤修：FEM 解析を用いた鋼多主桁橋の設計合理化の検討，鋼構造論文集，第 11 巻，第 43 号，pp.131-145, 2004.
- [4]山口栄輝，山本悟，村越潤，高橋実，山下健二：鋼 4 主 I 桁橋の設計計算に関する一考察，構造工学論文集，土木学会，Vol.52A, pp.893-900, 2006.

4.4 3次元ビジュアル化と設計

4.4.1 はじめに

3次元ビジュアル化は、コンピュータの発展に伴い急速に進化し続けている。身近なものとしては、テレビゲームの3D化である。従来の2次元的な平面の画面から立体的な画像での世界へ進化し、迫力のあるバーチャルリアリティを楽しめる環境になっている。これらの環境で育った若者達に橋梁の2次元の設計図面を与えて、それらを理解し新しい創造を生み出すことを期待するのは難しくなる。これからの世代の人達に鋼橋への理解と関心を深め、優秀な技術者を育成するためには、この分野でもバーチャルリアリティに基づく3次元設計に移行する必要があると考えられる。

4.4.2 他分野での3次元設計例

3次元CADを導入し、かつコンピュータシミュレーションのよる設計が進んでいるのは、自動車業界である。また、電気・電子メーカーなど最先端技術分野の中でも積極的に導入が開始されている。ここでは、その1例として建機メーカーの例を紹介する。図4.4.1は、画面上に開発機種の3次元モデルを構築して、設計検討をしている例である。図4.4.2は、本体の内部のエンジン、配管などの配置を示した3次元モデリングである。全ての部品から全体構造までが、バーチャルな世界で組立から完成までをシミュレート出来ている。

図4.4.3はキャブの中に居るオペレータの視線で、掘削時のショベルの視界性確認を行っている例である。図4.4.4は油圧ショベルの掘削－持上げ－旋回－廃土の一連のサイクルを電気－油圧－構造の連成解析により操作性やエネルギー効率を求めたものである。

これらの設計に関する作業は、3次元CAD＋コンピュータシミュレーションの世界（バーチャルリアリティ）で行われる。このように実体に近いモデルの中で、高い解析精度を確保した数値シミュレーションを実施することにより、安全裕度の高い合理的な設計を探索することが出来る。

自動車、家電、建機メーカーが、設計図面から3次元化し、かつFEMによる詳細解析を行うメリットは、以下の理由がある。同業種では、3年から5年という短いサイクルで新製品（フルモデルチェンジ）を市場に投入している。このため、開発期間の短縮と開発コストの削減は大きな課題となる。新製品開発のプロセ



図 4.4.1 3次元 CAD

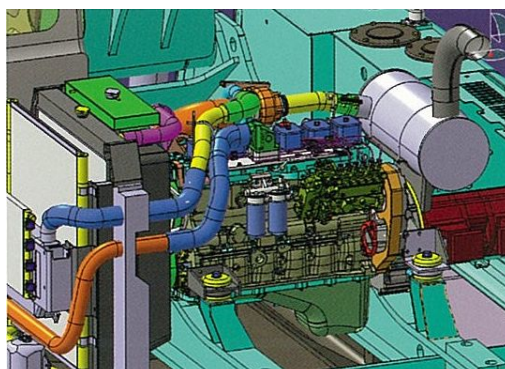


図 4.4.2 内部の 3D モデリング

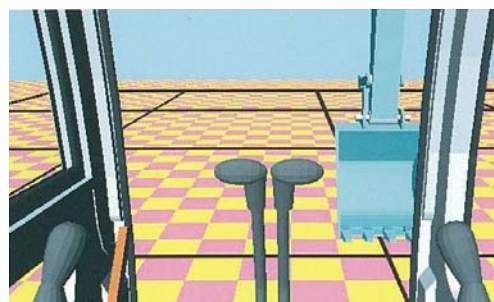


図 4.4.3 視界性の検討

スを示したのが、図 4.4.5 である。従来の開発プロセスでは、評価試験の段階で NG が発生した場合は、再度設計解析－試作－評価試験のループを繰り返すため、期間／コストともに増大する。最近のプロセスでは、最新の数値解析技術（CAE）を駆使して、試作前に NG を無くしてしまうことにより、開発期間・コストの削減に大いに貢献している。後者の開発プロセスをフロントローディングと読んでいる。すなわち、開発の初期段階では、従来よりも負荷が大きくなるが、試作や試験などの期間と費用の大きな後半段階での負荷を軽減する。その設計開発段階で、コンピュータ上に製品を具現化するデジタルモックアップが活用されている。

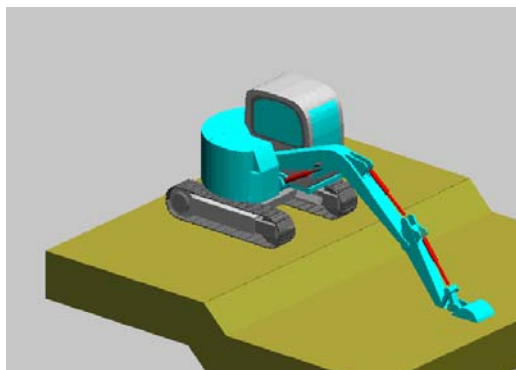
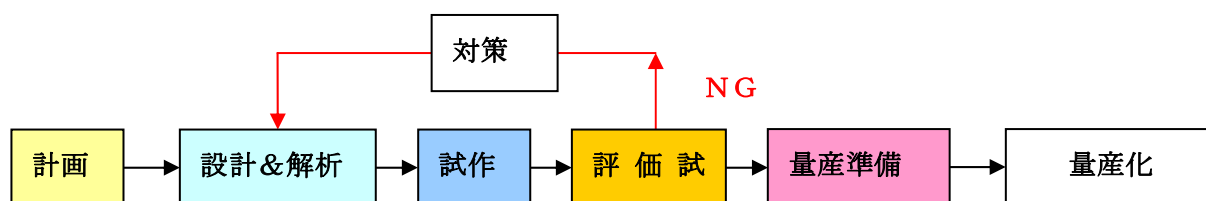


図 4.4.4 掘削挙動のシミュレーション

従来の開発プロセス



近年の開発プロセス

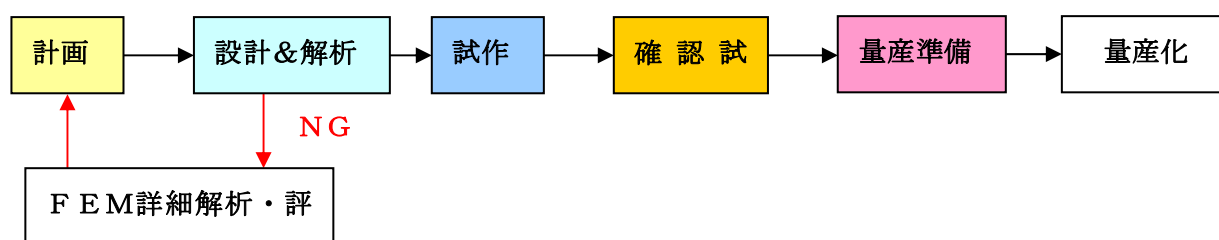


図 4.4.5 新製品開発プロセス

注）図 4.4.1～4.4.4 は（株）コベルコ建機の製品カタログから引用

4.4.3 鋼橋への3次元設計およびビジュアル化の現状と提言

橋梁の分野でのビジュアル化をインターネットで探索すると多くのものが引っかかってくる。その中で分類すると

- ・ 景観設計に関するもの
- ・ 施工に関するもの
- ・ 設計に関するもの
- ・ 強度解析に関するもの

等の適用例が見受けられる。

図 4.4.6 に示す様に景観設計でも実際に近いものが、ビジュアルに表現されるようになっている。図 4.4.7 は、2 主桁橋に大型建設機械が走行した時の橋梁の挙動を解析し、その解析結果をアニメーション化した例である。すなわち、ビジュアル化のためのハードおよびソフトの環境は充分整備されつつある。これらが、他の分野（自動車、家電製品）に比べて製品開発のツールとして一般化していない理由は、
一方は、量産品に対し、橋梁はオーダーメイドの一品生産である。
一方はメーカー独自の基準に対し、橋梁は公的な設計基準が確立している。
一方は疲労が損傷の主要因に対し、風地震などの短期荷重が主要因
等が上げられる。

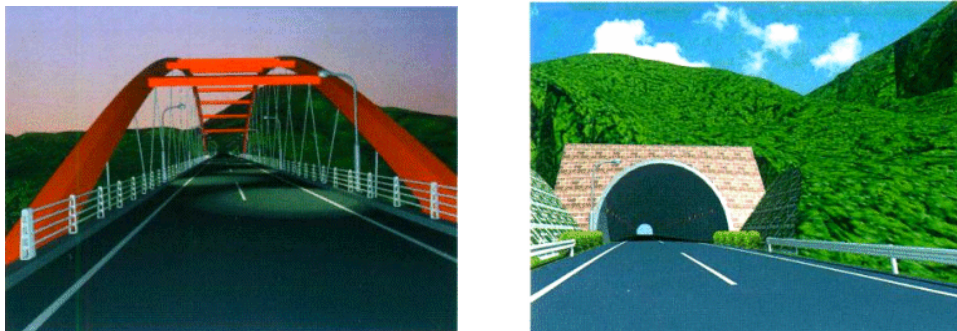


図 4.4.6 景観線形における適用例

図 4.4.6 は（株）横河技術情報のインターネットホームページ 道路 CG システムから引用

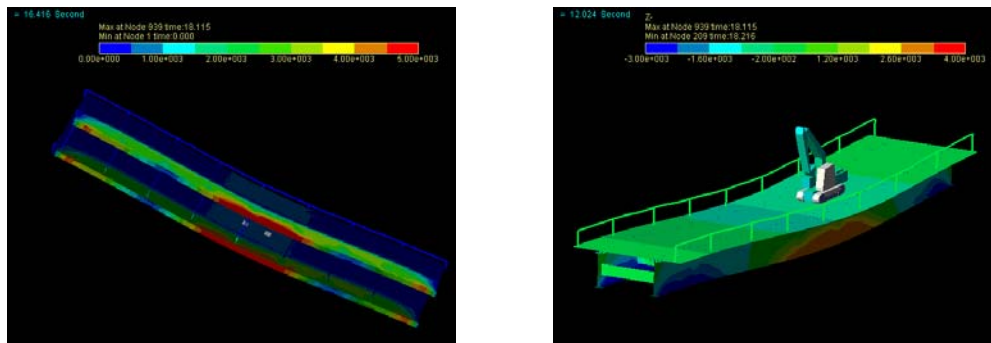


図 4.4.7 大型車輛の走行時の挙動解析例

橋梁の設計は、鋼橋の設計示方書に基づいた設計コードが完備されているために誰が設計しても安全な、しかしそれほど差違のない橋梁が出来てくる。完成度の高い仕様設計法が確立されたことから、誰でもが安全な橋梁を設計出来る。このような環境の中で3次元 CAD を用いたビジュアル化や3次元 FEM 解析による詳細設計を実施しても設計コストの増大のみで、費用対効果が生み出せない可能性が高い。しかし、近い将来、設計法が仕様設計から性能設計に移行するとより自由な発想での橋梁が生まれてくる。その時は、3次元設計とビジュアル化は大きな役割を担うものと期待される。

他分野のデジタルモックアップの概念を橋梁に適用した場合を図 4.4.8 に示す。この図で示すように1つの3次元 CAD データを各プロセスの段階で共有することになる。従って、途中での形状変更は、他の全ての工程に影響を及ぼすことになりことから、実製作や施工の前段階で詳細な検討が必要となる。また、これらに関わる各種業者間のシステムの統一化や共通化などのハードやソフトの問題もある。この図に示すように橋梁では、計画－設計－製作－施工との流れの中で、後戻りはほとんど無いシステムが出来上がっているように考えられる。このシステムの中に3次元設計およびビジュアル化を導入したものが、図の右端のボックスである。

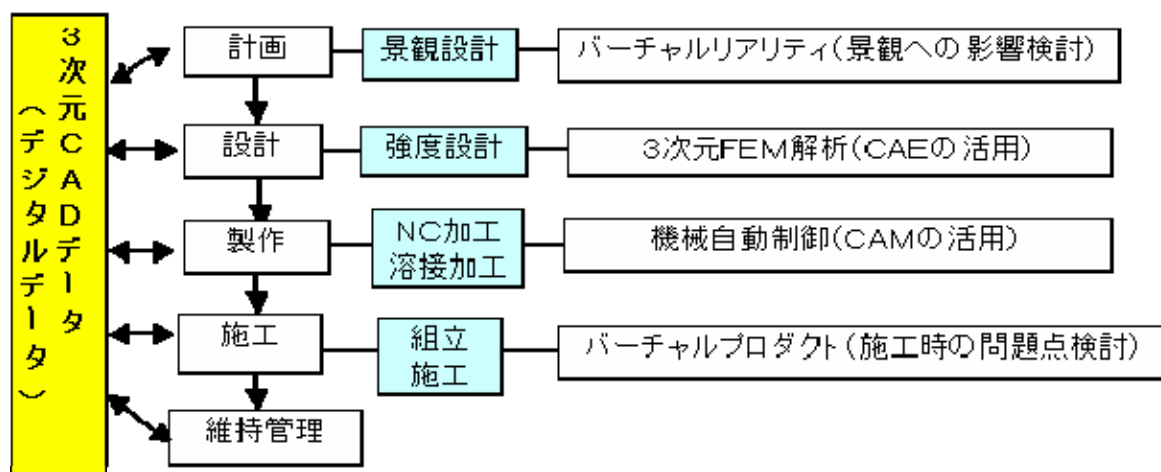


図 4.4.8 橋梁での3次元設計の適用

具体的には、景観設計では設置場所の背景に橋梁を導入し、風景を壊さないか、景観とマッチした橋梁の塗装の色は何かが良いか？製作段階では、最適な板取の決定や溶接ロボットのティーチングデータ作成に活用する。施工段階では、施工場所の確保、部材の大きさと運搬の可否、施工手順および架設時の強度計算など多くの机上検討が可能となる。設計段階では、3次元のデジタルデータを用いることにより、FEM 解析用データが容易に作成でき、各種の詳細な解析も可能となる。すなわち、よりビジュアルな形で実際の挙動を理解できる様になる。

ただし、これらから出力される応力は、前の章で記述されているように既往の設計照査に用いられる公称応力とは異なったものとなる可能性がある。そのため、メッシュサイズやモデル化などにおいてある程度の基準が必要となる。すなわち、従来の基準に代わり3次元 FEM 解析から出力される応力で評価する新たな評価基準が必要となる。この点に関しては、他の章を参照して頂くことにしてここでは割愛する。

ビジュアル化に関して述べると最も設計に必要なものは、安全性／耐久性の照査における発生

応力のビジュアル化である。これは、年次学会の報告や土木学会論文集をみれば明らかなように充分適用段階に来ている。近年では、数値解析で FEM を用いないことの方が稀であり、変形図や応力コンター図などカラフルな図表が年次学会の発表や論文集の中に掲載されている。更に動的解析（耐震解析や耐風解析など）でのアニメーションも活用されてきている。これら動画も概要集や論文集のCD化に伴い、一般的なものとなるであろう。ここでも図に橋梁上に大型車が走行した解析例を示したが、静止画では迫力がないので別途動画で見て頂きたい。（付録 4B 参照）

また、コンピュータ上で橋梁を作るコンテストも実施されており、ビジュアル化の観点からもとても良い機会であると考えられる。参考までにこの HP のアドレスを記載する。

HP : <http://bridgecontest.usma.edu/>

このように目視できない応力や変形を立体化しビジュアル化することは、現象や挙動を理解しやすくするとともに新たな創造を生み出す可能性を期待できると思われる。

コンピュータの発展と普及は、製品開発において 3 次元 CAD（図面の 3 次元化）や 3 次元 CAE（コンピュータシミュレーション）を一般的なものとしつつある。その流れの中で橋梁の設計プロセスや各種基準も変わってくる。それが、新しい橋梁の創造に繋がることを期待したい。

4.5 まとめ

橋設計における IT 事情、桁橋を対象とした 3 次元 FEM による設計、またビジュアル化について、それぞれの状況や発展性また問題点を整理した。「3 次元ビジュアル化と設計」で説明したように、橋が他業種の製品と大きく異なるのは、1) 橋設計が「100 年橋梁」に代表されるようにほぼ永久構造物の設計を行うのに対して、自動車、家電、建設機械メーカー等の製品は「3~5 年のサイクルで製品のフルモデルチェンジを行う」、2) 橋が「オーダーメイドの一品製品」であるのに対して、「量産品」、3) 橋は「すでに確立し、しかも 40 年にわたり変化のない公的設計基準をベースに設計する」のに対して、「独自の基準で設計する」、4) 橋の構造寸法が最大に近い交通荷重に対してさらに大きな安全率のもとで決定されるのに対して、「疲労が破壊の主要因となる」、等である。以上からも、橋の一層の高性能化に向けた高度な構造解析の導入が進まない実態の要因を見ることができる。とくに、大きな課題として、確立された設計基準にのっとり設計するだけでよい、「競争の原理が支配的でない」これまでの体質からの脱却が挙げられる。

さて、橋の設計にソリッドやシェル要素を用いた 3 次元 FEM を適用しようとする理由は何か、を考える必要がある。「reality」の再現と、それに伴う「コスト縮減」対応と考えられる。「reality」の再現や把握は極めて重要な課題と言える。構造解析における「un-known」ファクターを排除することで、安全係数の取り方の見直しを促すことができる。しかし、許容応力度設計をベースとし、唯一(荷重の組み合わせ次第で安全係数を変化させているが)の安全係数で設計を行う現行法では、この影響を設計で具体的に組み込むには困難を伴う。また、得られた局所的な応力集中を設計でどのように評価するかも明確でない。この扱いは、材料の降伏点を終局限界状態とみなす現行の許容応力度設計法にはあまりなじまない。何らかの設計パラダイムのシフトが欠かせないと言える。このように、FEM による設計の導入、効果を議論する上で、現行設計法をベースにすることも大きなネックになる。あわせて、橋のなかでも最も多く建設されている桁橋に着目した場合、複雑な橋構造を完全にモデル化して解析することは依然として困難である(4.3, 文献[1])。更に、最近提示された、もう一つの大きな問題は、2 次元 FEM と 3 次元 FEM のよる設計比較において、結果的に得られた桁橋の鋼重量の変化は皆無に等しいという報告である(4.3, 文献[3])。この問題を解決しないまま、今後の進展は期待できないと感じる。4.3 で述べた多くの課題に対して、謙虚に解決法を探っていくことが、まず肝要と言える。

とはいえ、コンピュータの今後の更なる発展、普及に伴い、3 次元 CAD、3 次元 CAE がより一般的なる。新しい橋の形態、設計、製作・施工法の創出に繋がるよう、この流れに注目し続けることが重要である。その意味でも、3 次元 FEM の導入に向けた基本的な課題を検討しておくことが重要と言える。