

## ◆ 21世紀の新技術特集 ◆

## 超高性能ゲーム機時代の橋梁設計

西川和廣\* 中谷昌一\*\* 小野 潔\*\*\* 中洲啓太\*\*\*\*

### 1. IT革命がもたらす橋梁設計の飛躍<sup>1)</sup>

#### 1.1 設計ツールの進歩

現在の橋梁設計は、橋梁をはりや格子のような単純なモデルに置き換えて行っている。それは橋梁の設計が手計算を中心に行われてきた長い歴史を反映したものであり、複雑な構造をいかにして簡単に解くかに力点がおかれてきたためである。そうした過去の努力の結果として、現在、数々の数式、補正係数、図表が残されている。

その一方で、最近のコンピュータを中心とした設計のツール(計算、解析の道具)の進歩には目覚しいものがある。最近では、小型のパソコンで手軽に有限要素法(以下、FEM)による解析ができるようになっており、構造を立体的、動的に解くためのツールが安価で手に入るようになっている。かつて、橋梁の設計において最大の敵であった記憶容量や計算時間といった問題は、既に解消されていると言っても過言ではない。

#### 1.2 何が新しいのか

もちろん、これまでの橋梁設計がすべて手計算で行われてきたわけではない。コンピュータを多用することにより、解析(設計)可能な橋梁形式の範囲は広げられてきた。実際、時代による橋梁形式の流行がそれを物語っている。しかしながら、

コンピュータを多用しているといつても、これらは手計算をベースとした設計を補助する手段として使われてきたにすぎない。

実用上、容量、速度に制約のないハードに加え、何でもできるソフトを手にした今、こうした万能なツールの存在を前提とした、全く新しい設計の体系の確立が夢ではなくなくなった。そうなると、対象物を簡易にモデル化する必要はなく、あるがままに計算し、実際に近い現象をそっくりそのまま再現することが可能である。

#### 1.3 設計はどう変わるのが

このように、実際の現象があるがままに再現する設計が可能になると、モデル化の誤りや誤差が解消されることになる。また、どんな形の橋でも計算できるようになり、けたかアーチかという形式に縛られない、自由度の高い設計が可能となる。さらに、デッサンがそのまま構造解析の対象になりうるので、景観設計も自在に行えるようになる。

IT革命がもたらす恩恵は、解析(設計)に限った話ではない。橋梁の計画、設計、発注、製作、架設、維持管理に至る一連の膨大な情報を電子情報として取り扱うことにより、情報の共通使用や視覚化が容易となり、作業効率の大幅な改善を図ることができる。

近年の家庭用ゲーム機の中には、いわゆるスーパーコンピュータに肉薄する動画の表現能力を有するものもあると言われている。ということは、我々の家庭にあるような小さな機器でも、橋梁全体系の動的解析による耐震設計や車両の走行による疲労設計において、現象をありのままに再現することが可能なのである。その際、構造の最適化は、精巧な画面を見ながらゲーム感覚で行うことができる。

ここでは、このような革命的な状況の変化によって、橋の設計や姿がどのように変わるのが。このような設計手法を完成させるには、どのような研究が必要とされるのかについて述べることにする。

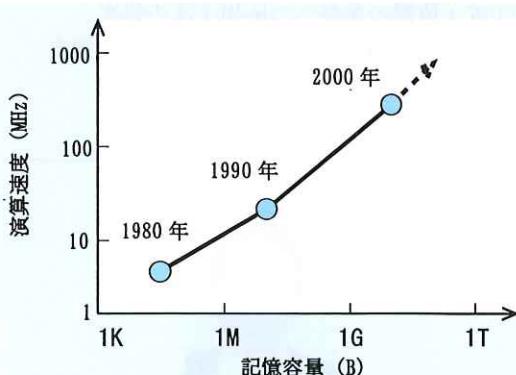


図-1 コンピュータの容量及び速度の変化

## 2. 手計算とFEMの本質的な違い

### 2.1 手計算

現在の橋梁設計は、貧弱なツールでも設計できるよう単純なモデルを用いており、一般に以下の(1)～(4)に示した手順で行われている。なお、最近では、コンピュータが多用されるようになっており、手計算を補助する手段として使われているに過ぎないため、ここでは、現在の設計計算は手計算の部類に入るものとして扱うこととした。

#### (1) 部材のモデル化

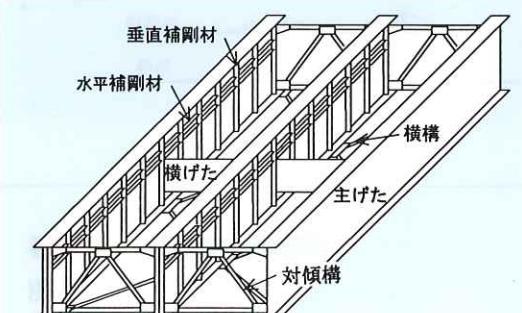
手計算では、複雑な構造を解くことができないため、橋梁を床版や主げたといったパートに分け、単純なモデルを用いて設計される。図-2(a)に示した主げた部の設計を例にすると、主げた部は図-2(b)のようなごく簡単なモデルに置き換えられる。

#### (2) 荷重のモデル化

部材自身の重さである死荷重、車両や人の重さである活荷重、風荷重、地震荷重などをモデル化して載荷する。図-3には、G1 げた設計用の活荷重モデル(L荷重)を示す。

#### (3) 断面力の計算

部材および荷重がモデル化されると、曲げモーメント、せん断力といった断面に働く力(断面力)を求める。図-4には、G1 げたの曲げモーメント図を示す。



(a) 主げたの構成

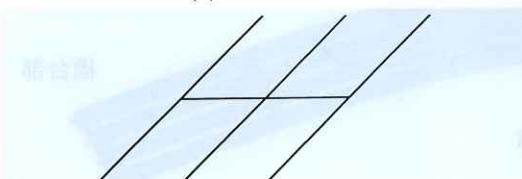


図-2 手計算のためのモデル化

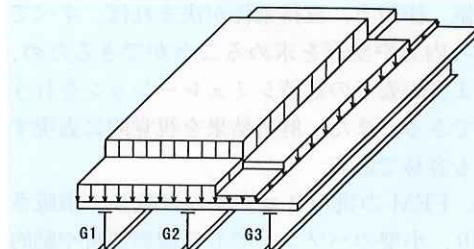


図-3 活荷重のモデル化

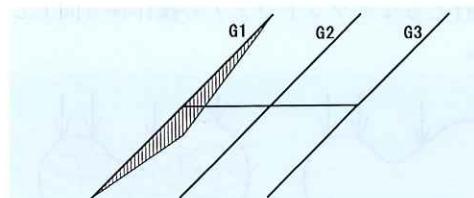
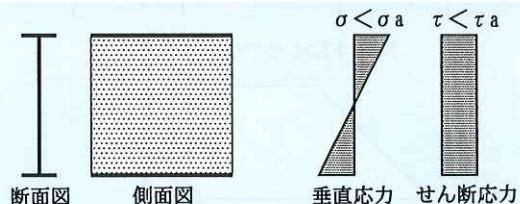


図-4 G1 げたの曲げモーメント図



#### (4) 応力の計算と照査

断面力が求まると、I型や箱形といった断面を仮定して、平面保持の仮定に基づいて断面内の応力を計算し、それが許容応力度以内に収まるように断面を設計する。図-5には、曲げを受けた場合の主げた断面内の応力分布を示す。図中のaはそれぞれの許容値を表す。

以上が、現在の橋梁設計の基本的な流れであるが、このように簡易なモデルを用いた設計では、I形などの断面形状を考慮することはできるが、補剛材や対傾構のような副次的な部材を考慮することは困難であり、これらの部材は示方書に規定された通りに配置するしかない。また、応力の計算においては、断面係数で割った平均的な値しか求めることができないため、3次元的に分布している実際の応力状態を厳密に反映することはできない。

### 2.2 FEM

FEMとは、物体を有限個の微小な要素に分割し、要素ごとに方程式を作成してから、要素ごとの方程式を重ね合わせて、最終的に連立方程式を解く手法である。どのような形状の物体でも材料

の物性値、作用力、支持条件が決まれば、すべての要素の内力や変形を求めることができるため、あるがままの姿での数値シミュレーションを行うことができる。また、解析結果を視覚的に表現することも容易である。

現在、FEM の汎用プログラムは数多く市販されており、小型のパソコンでも非線形解析や動的解析を行うことができる。さらに、要素分割を自動的に行えるなどソフトウェアの操作性も向上している。

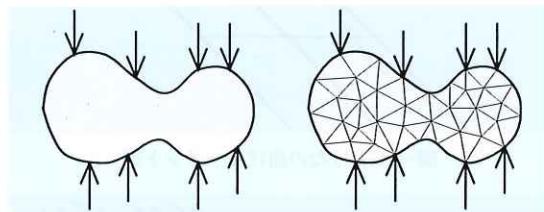


図-6 FEM モデルのイメージ

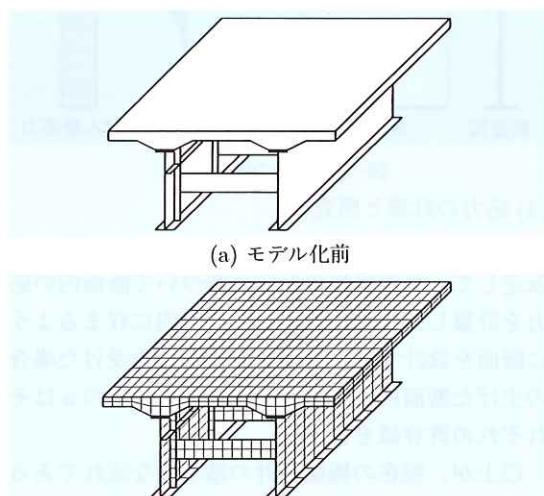


図-7 FEM における橋梁のモデル化

### 3. 橋の姿はどう変わる？

手計算と FEM の基本的な特徴を整理したところで FEM を活用すると、手計算を前提とした場合と比較して、橋の設計はどのように変わらるのか、その結果として橋の姿はどうなるのかについて考えてみる。

#### 3.1 独創的な形が可能に

単純にモデル化できない橋梁は設計できない。これが、手計算で橋梁を設計する場合の大前提である。したがって、これまでの橋梁形式は、桁やトラスなど計算しやすいものに限定されてきた。

一方、FEM で設計するとどのような形状でも解析できるため独創的な形の橋梁を設計することができる。形式ありきの発想からデザイン重視へと劇的に変わる可能性がある。

#### 3.2 どんな橋でも設計できる

手計算を前提とした設計では、I型や箱型といった部材の断面形状を考慮して、断面内の応力を平面保持の仮定に基づいて求めることは可能である。しかしながら、前述のように副次的な部材を考慮することはできない。そのため、現在の示方書では標準的な補剛材配置を規定している。示方書

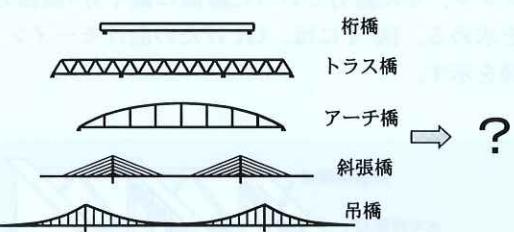


図-9 橋の姿が変わる？

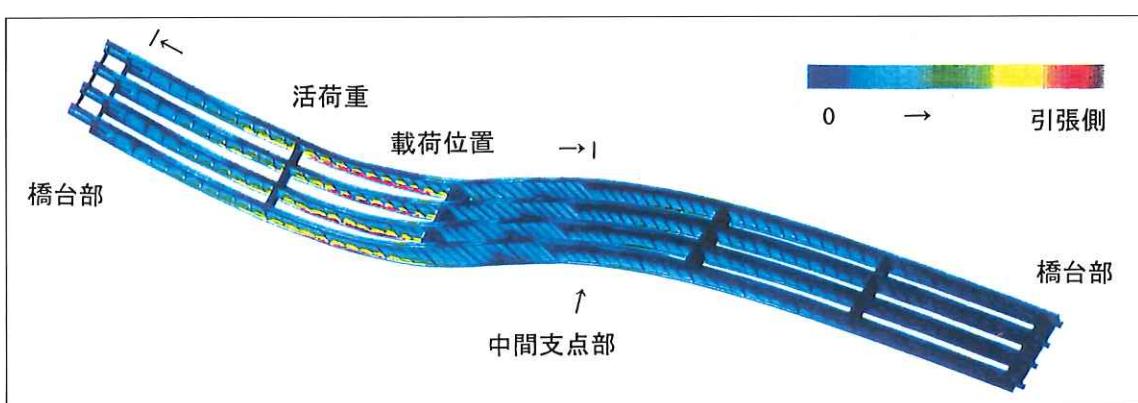


図-8 FEM による解析例 (2 径間連続げた)

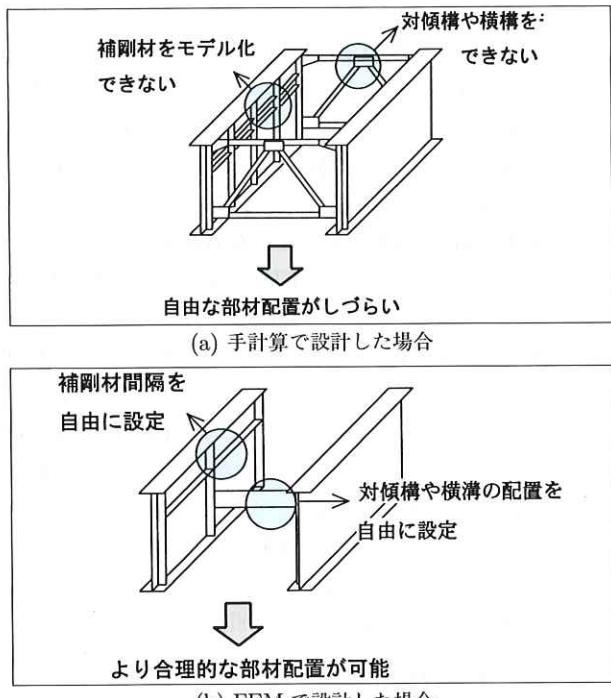


図-10 部材配置の合理化

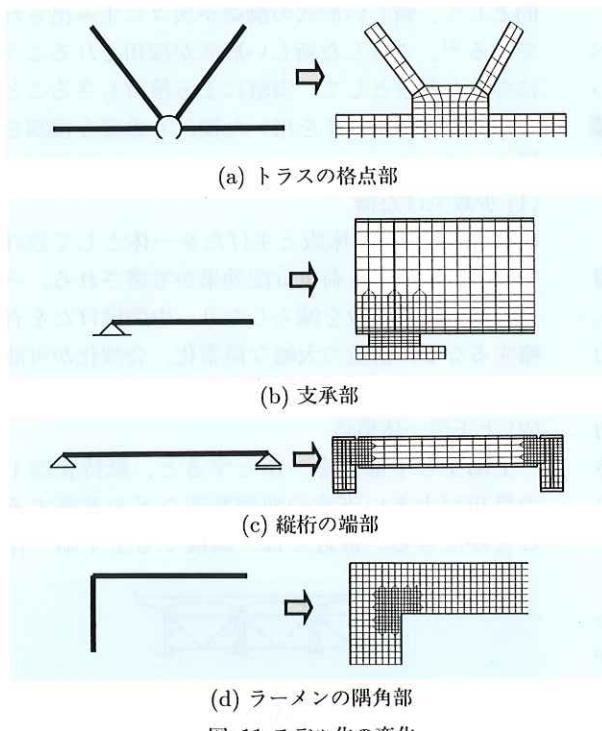


図-11 モデル化の変化

では、様々なケースを包括するように規定せざるを得ないため、補剛材の配置が橋梁によっては必ずしも最適にはならないこともあるのが現実である。一方、FEM を用いると補剛材、対傾構、横構

といった細部を考慮した解析が容易に行える。そのため、橋梁ごとに、どの位置にどの程度の間隔で配置をすれば最適になるのかを考えながら設計することが可能である。

### 3.3 応力の流れを考える設計

現在の設計では、部材力を断面定数で割った平均的な値を用いており、3次元的に分布している応力の流れを考慮することはできない。トラスの格点部、床組の端部、支承部はヒンジ条件としてモデル化されているが、厳密に見るとこれらの部分ではヒンジ条件ではなく、現実には複雑な応力状態となっている。こうした設計上の仮定と現実との相違が、最近問題となっている疲労亀裂の発生要因の一つとなっている。

FEM を用いて設計すると、これらの部位をヒンジとせず、形状や剛性をそのまま評価できるのでこうした部位での局部応力を考慮することができ、耐久性に優れた橋梁を設計することが可能となる。

### 3.4 精度の高い設計

手計算を前提として簡単なモデルを用いると、実物とモデルとの違いによる誤差が発生する。設計においては、こうした誤差に対して安全側になるように、安全率などを用いて調整するため、FEM を用いた精度の高い解析を行うことで、より合理的な設計が可能になる。

また、現在の設計では計算を簡単にするため、例えば、せん断力はウェブだけで受けているものとして計算されることがある。このように本来有効に働いている部分であっても、手間をかけて考慮するだけの効果が少ない部分は、計算上、無視されることになるが、FEM を用いると、効果の小さい部分でもあらゆる部位を有効として計算することができる。

### 3.5 全体系での設計

手計算を前提とした設計では、橋梁全体を一体として解析することが困難であるため、床版、床組、主げた、支承、橋脚などのパートに分けて設計されている。しかしながら、維持管理、耐震性などを考えると橋梁を不連続にすることが必ずしも望ましいとはいえない。FEM を

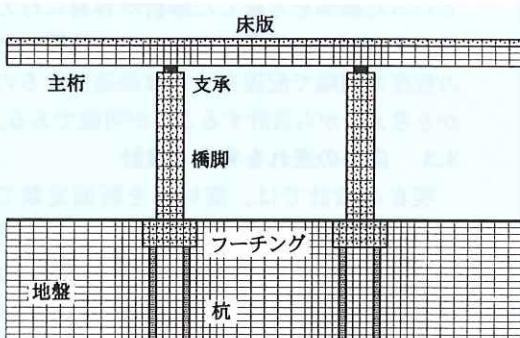


図-12 地盤から上部工までの全体系

用いると、橋梁全体系での解析を行うことができ、全体的な挙動に配慮した設計が可能となる。特に、耐震設計においては、全体系で振動モードやエネルギー吸収を考えることは重要である。部位ごとにあらゆる性能や機能を満足させようとすると、各部位が過大に設計されてしまう傾向があるが、全体として所定の性能を満足させることを考えると合理化の可能性が高まってくる。

#### 4. 研究が必要とされる事項

ここまででは、未来の新しい設計法について述べてきたが、今すぐこのような設計ができるかというとそうではない。ここでは、新しい設計法を確立するために、今後、どのような研究が必要となるのかについて述べることにする。

##### 4.1 安全性評価手法の確立

現在の橋梁設計では、部材の平均的な応力を算出し、許容応力度を用いて安全性を評価している。しかしながら、FEM を用いて解析すると、応力の分布が与えられるため同様の評価方法が必ずしも適用できない場合がある。特に、局部的な応力集中が起こるような部位では、許容応力度を大きく上回る応力が発生するため、これをどのように取り扱うかについての検討が必要になる。

##### 4.2 モデル化における留意点

FEM を用いた解析では、モデル化の方法(メッシュの切り方、拘束条件や材料特性の与え方)が解析結果に影響を及ぼすことがある。そのため、FEM の特性を調査するとともに、設計に適用するにあたっての基本的なルールを定めておく必要がある。

##### 4.3 荷重の載荷方法の確立

現在、活荷重は影響線載荷により、橋梁にとっ

て最も不利になるような載荷を行っている。しかしながら、FEM による場合、影響線載荷による方法が必ずしもベストであるとは限らない。供用期間中の活荷重シミュレーションを行うべきか、それとも、もっと簡便な方法でよいかななど、FEM に対応した荷重の載荷方法を検討する必要がある。

#### 4.4 設計を支援するシステムの開発

現在市販されている FEM の汎用プログラムは、橋梁を設計することを意図して作られていないため、設計に用いた場合、データの処理などに手間がかかることが多い。このように、一連の作業が自動化されていないことにより、FEM を用いるメリットが相殺されているのが現実である。FEM を活用した橋梁設計は、一連のシステムが完成すれば前述した様々な恩恵を知らず知らずのうちに享受できるという性質のものである。そのため、設計を支援するシステムの開発が重要である。

#### 5. 事例の紹介

近年、日本道路公団を中心に、コスト縮減を目的として、新しい形式の橋梁が次々に生み出されている<sup>2)</sup>。こうした新しい形式が採用されるようになった背景として、実験による検討もさることながら、立体 FEM を用いた検討も重要な役割を果たしている。

##### (1) 少数主げた橋

FEM を用いて床版と主げたを一体として設計すると床版による荷重分配効果が考慮される。そのため、主げた数を減らしたり、中間横げたを省略するなど、構造の大幅な簡素化、合理化が可能となる。

##### (2) 上下部一体構造

上部工と下部工を一体とすると、維持管理上の負担が大きい支承や伸縮装置などを省略することができる。最近では、鋼橋でも上下部一体

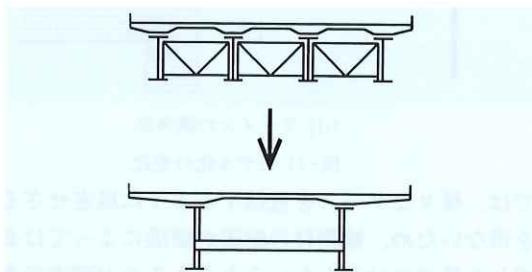
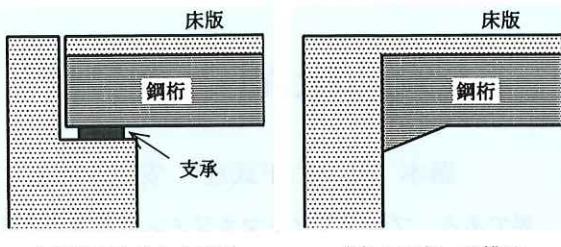


図-13 少数主げた橋



(a) 支承を介した構造 (b) 上下部一体構造  
図-14 上下部一体構造

構造が採用されているが、FEM を用いることにより、RC 橋脚と鋼げたとの接合部の挙動が明らかになったり、全体的な動的解析 (FEM とは限らないが) による耐震性の評価ができるようになつたことが、その背景にある。

### (3) 鋼・コンクリート合成構造

異種材料を適材適所に用いることにより、構造の合理化を図ることができるが、従来は、異種材料間の接合部などの挙動の把握が難しく、合成構造の採用は限定的であった。

ところが、最近では、FEM を用いることにより、異種材料間の力の伝達機構などが明らかになりつつあり、鋼・コンクリート合成構造の適用が拡大している。

## 6. 終わりに

橋梁研究室では、FEM を用いて設計する効果が大きいと考えられるコンクリート床版と鋼げたからなる橋の設計がどのように変わつてゆくかを手始めに研究をすすめるとともに、学会や民間企業の技術者の中に、研究の輪を広げてゆきたいと考えている。

橋の世界は意外に保守的であるという。海外に目を向けると、技術基準の統合化に動いているが、基準化される技術は既に一般化されたものであることが多い。我が国が設計ツールの高度化に対応した新しい時代の橋梁設計法を確立すれば、世界をリードすることも可能である。

## 参考文献

- 1) 西川和廣：国際化に向けた道路橋の設計法、橋梁と基礎, pp.75-77, 2000.8
- 2) 小川、寺田：JH 日本道路公団における複合構造橋梁、橋梁と基礎, pp.48-55, 1997.8

西川和廣\*



建設省土木研究所  
構造橋梁部  
橋梁研究室長  
Kazuhiro NISHIKAWA

中谷昌\*\*



同 橋梁研究室主任研究員  
Shoichi NAKATANI

小野 潔\*\*\*



大阪大学大学院助手  
(前 橋梁研究室研究員)  
Kiyoshi ONO

中洲啓太\*\*\*\*



建設省土木研究所  
構造橋梁部  
橋梁研究室研究員  
Keita NAKASU