

## 構造設計における FEM 解析の高度化と信頼性の向上

## Improving Reliability of Advanced FEM Analysis for Structural Design

後藤芳顕\*

Yoshiaki GOTO

**ABSTRACT** Remarkable progress in computers coupled with the development of advanced FEM software has recently enabled the adoption of the performance-based design where the performance of structures is checked directly by advanced FEM analyses. However, the analysis results calculated under the same conditions often vary from person to person. This will considerably reduce the reliability of computer-based design analysis. Herein, it is investigated what causes the above variation of the numerical results. Then, possible methods are discussed to ensure the reliability of numerical analysis.

**KEYWORDS**: 高度化解析, 数値誤差, 性能照査設計

Advanced analysis, Numerical error, Performance-based design

## 1. まえがき

近年の計算機能力の急速な向上により、構造解析技術も飛躍的に進歩し、一般に普及している Windows ベースの安価なパソコンレベルでも、従来困難であった多自由度構造の終局挙動を直接的に非線形 FEM 解析により容易に解析できるようになった。また、静的のみならず動的問題を扱える多様かつ高機能な構造解析ソフトも数多く開発され、以前に較べ廉価で販売されている。このように高度な FEM 解析で構造物の終局挙動を解析し合理的な構造設計を実施するための物理的・経済的環境は従来に較べ、大幅に改善されている。その気になれば誰でも高度な FEM 解析を設計計算に利用できる状態にある。

上記のような環境を背景に、構造物の要求性能を規定し、非線形構造解析で直接照査するいわゆる性能照査型の設計が世界レベルで導入される傾向にある。我が国でも、兵庫県南部地震以後、いち早く耐震設計に性能照査型設計の考え方が導入されたため、耐震性能照査においては非線形動的解析により地震動下の鋼橋の応答を計算し、安全性、地震後の使用性・修復性を直接照査する動的照査法が広く用いられるようになってきている。耐震以外の設計計算においても、構造物全体系をそのままモデル化し、設計荷重による応力や変位を構造解析ソフトで直接求め、許容値に対して照査される場合が多い。道路橋示方書が直接適用できない補修・補強設計で、従来、実験などにより性能検証をしていたケースも、解析のみで終局挙動などを検証される場合が多くなっている。

高機能汎用解析ソフトや各種専用解析ソフトウェアには優れたインターフェイス（プリおよびポストプロセッサ）が整備されているので、高度な非線形解析に対する外見上の敷居は低くなり、初心者でも容易に利用できる環境が整ってきている。その一方で、解析プログラムの開発は基本的にはソフトメーカーなどに任されており、公的機関やユーザー側でのプログラムの妥当性に関する組織だった

---

\*工博 名古屋工業大学大学院教授 社会工学専攻 (〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)

確認作業はほとんど行われていない。したがって、プログラムの使用に際して、その妥当性や適用性の確認は使用者本人の責任で行わなければならない。また、仮にソフトが妥当なものであっても、モデル化、要素分割、収束条件等の数値解析条件と得られた結果に対する妥当性の判断は、基本的には使用者に委ねられている。このような状況から、数値解析の外見上の敷居の低さとは反対に、数値解析に対して理解の少ない技術者が使用者として不適切な判断やミスを犯す危険性はかえって高まっているのではないかと懸念される。しかしながら、実務においてどの程度信頼性のある解析が行われているかという実態はほとんど明らかになっていない。今後、構造設計での解析の高度化を目指すためには、解析の実態を把握し、解析の信頼性を確保するための方策を講じることが急務である。

ここでは、まず、高度な FEM 解析を用いた構造設計の現状について述べる。つぎに、このような解析に潜む危険性について説明し、不適切な解析が原因で生じた事故について考察する。つぎに、FEM 解析結果に含まれる可能性のある誤差を分析するとともに、これらの誤差を低減し FEM 解析の信頼性を向上するための手法を検討する。そして各分野での取り組み状況を紹介する。

## 2. 高度な FEM 解析を用いた構造設計の現状

現状では、安価で高性能の PC の普及、高機能な汎用解析や各種専用解析ソフトの開発、CG による優れたプリおよびポストプロセッサの整備により初心者でも容易に高度な FEM 解析を実施できる環境が整備されている。このような状況を背景として構造設計には性能照査型の設計法が導入される傾向にある。性能照査設計では構造物の要求性能を規定し、その性能が満足されることを FEM 解析などの高度な解析で構造物の正確な応答を予測し、直接照査することを目指している。我が国でも道路橋示方書の耐震設計編ではこのような考え方にに基づき、非線形動的解析で直接構造物の耐震性能を照査する方法が提示されている。実務においては、示方書の枠を越え、3次元複合非線形動的解析や高度な FEM モデルを用いた設計が行われる場合もある<sup>2),3)</sup>。示方書が直接対象としない既設構造物の補修・補強設計にはこのような高度な解析に基づく設計が行われる例が多い。たとえば、連続鋼床板桁橋の局所的な応力集中を評価するために、ソリッド要素、シェル要素、はり要素により図-1のように表した橋梁全体モデルを用いた総自由度 480 万の解析が行われている。従来は、局所的な応力集中の問題は部分モデルなどを用いて検討されていた。そして、この検討の過程には構造技術者の経験や判断が反映され、解析結果の妥当性を評価し、見直す余地もあった。しかしながら、全体モデルを用いた解析では機械的なモデル化がおこなわれるとともに分業化されているので、構造技術者個人の力量が発揮される余地は非常に少なくなっている。今後このような傾向はますます強まってくるものと考えられる。

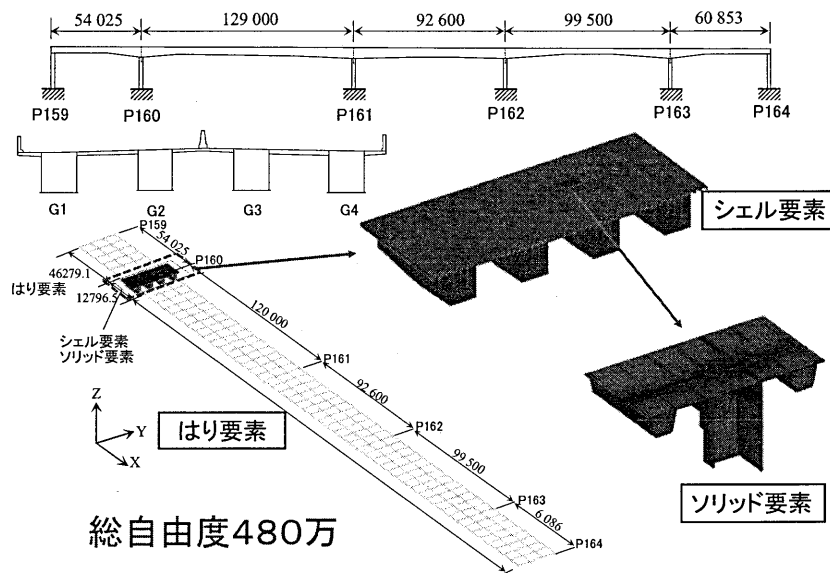


図-1 連続鋼床板桁橋の全体解析による応力集中の評価

### 3. 高機能ソフト開発と使用における現状の課題

高機能ソフトによる高度な FEM 解析の信頼性を確保し、構造設計に適用するには、まず、ソフトの妥当性、構造物のモデル化の妥当性、ソフト使用法の妥当性が検証されていなければならない。しかしながら、ソフト開発がメーカーに任されているうえに、ブラックボックス化されていること、ソフトの妥当性に対する公的機関の認証がないこと、さらに、構造設計に使用するためのガイドラインが十分でないことなどにより、高機能ソフトによる信頼性のある解析を実施するための環境が整備されているとは言い難い状況にある。このため、高機能ソフトの使用者の負担と責任が非常に大きい。

しかしながら、使用者のレベルや意識の問題からか、このような負担や責任の大きさに対する自覚が必ずしも十分でないようなケースにも遭遇する。著者がこれまでに数値解析技術者への聞き取りから明らかになった数値解析でのミスが発生理由のいくつかを表-1にまとめるが、まさに、使用者のレベルや意識の低さに起因していると言わざるを得ないような理由が挙げられている。使用者のレベルや意識を高めるには数値解析技術者の地位を高めることも重要であると考える。

表-1 数値解析でのミスの発生理由

ソフトの問題	使用者のレベルと意識の問題
<ul style="list-style-type: none"> <li>・完全なブラックボックス</li> <li>・少々の間違いでも計算可能</li> <li>・最終結果に至る途中の過程がチェックできない</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・解析理論の理解不足</li> <li>・数値解析(FEM 解析)であることの意識が薄い</li> <li>・見た目の良い CG による出力結果を信じてしまう</li> <li>・実験やベンチマークと比較しない</li> <li>・応答値が小さく出るソフトを用いる</li> <li>・解析の重要性に対する認識が薄い</li> </ul>

### 4. 数値解析のミスが構造物に与える影響

高機能ソフトを用いた数値解析による結果と実物の挙動の間には避けられない誤差が存在している。このような誤差を設計で考慮するために鋼・合成構造標準準方書<sup>4)</sup>では以下のような部分係数を用いた安全性の照査フォーマットを採用している。

$$S \leq R_a = \frac{1}{\gamma_A \gamma_B \gamma_i} R \quad (1)$$

ここに

$S$ : 応答値 (解析により計算される応力, ひずみ, 変位)

$R_a$ : 許容限界値

$R$ : 限界値 (材料特性を考慮した応力, ひずみ, 変位の限界値)

$\gamma_A$ : 構造解析係数 (1.0~1.1)

$\gamma_B$ : 部材係数 (1.1~1.3)

$\gamma_i$ : 構造物係数 (構造物の重要度) (1.0~1.2)

式(1)で構造解析係数  $\gamma_A$  が実構造の応答に対する数値解析の誤差をカバーするものであるが人為ミスなどによる大幅な誤差を想定していないので許される誤差は大きくない。このため、ミスなどにより誤差が大きくなると安全係数でカバーするのは難しくなる。したがって、数値解析の重大なミスに気づかれずに構造物が設計されると、最悪の場合、構造物の崩壊という大事故に繋がる可能性がある。

米国構造技術者協会会長も 2007 年の STRUCTURE magazine<sup>5)</sup>の論説で次のよう警告している。「ほとんどの人は気づいていないが、構造工学分野に危機が忍び寄っていると私は確信する。たとえ、この事実気づいたとしても誰もどうしたらよいかかわからないであろう。この危機はだれもが計算機に過剰依存し、構造解析が間違ってもそれに全く気づかないことによってもたらされている。最

最終的に、この危機は建造物の崩壊というとんでもない形で顕在化するであろう・・・」

構造解析のミスが建造物の崩壊をもたらした例は必ずしも多く報告されていない。これは、実際に少ないというのではなくデリケートな責任や補償問題が絡むので明らかにされていないためと考えられる。ここでは、構造解析のミスが建造物の崩壊をもたらした2つの例を挙げ問題点を考察してみる。

#### 4.1 市民会館アリーナの屋根の崩壊

米国コネチカット州の市民会館アリーナの大スパントラス構造の屋根が1978年1月18日の降雪の朝に突然崩壊した(図-2)。幸い早朝であったため人的被害はなかったが、非常に大きな事故であった。

事故は、立体トラス構造のモデル化のミスによって生じたものと報告されている。過去に前例のない複雑なトラス構造(ピラミッド型立体トラスユニットからなる構造)を採用し、計算機による構造解析結果を過信したことが大事故に繋がった。この事例は、前例のない新しい構造の安全性を構造解析のみにより照査する場合には、その妥当性をあらゆる観点から慎重に検討しなければならないという教訓を現在にも示している。

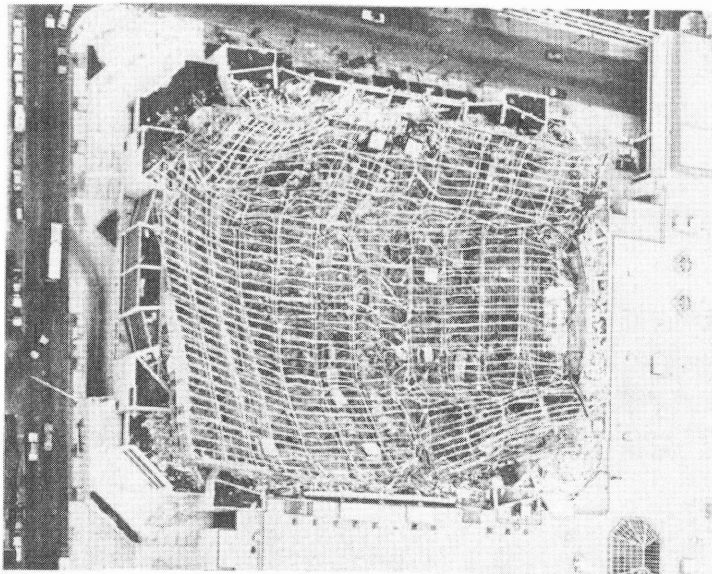
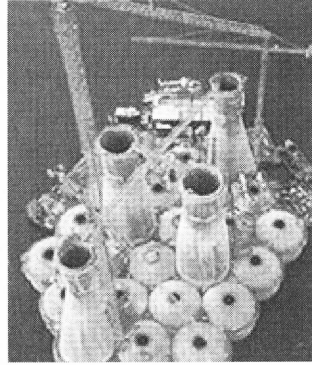
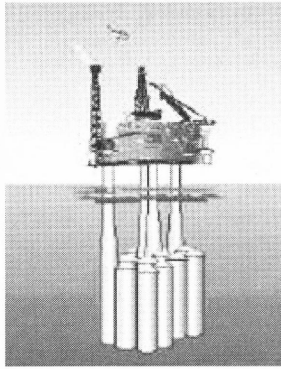


図-2 降雪により崩壊したトラス屋根

[http://failures.wikispaces.com/Hartford+Civic+Center+\(Johnson\)](http://failures.wikispaces.com/Hartford+Civic+Center+(Johnson))

#### 4.2 石油掘削プラットフォームの水漏れによる沈没

ノルウェーにおいて Condeep 型のプラットフォーム(図-3)が1991年8月23日にコンクリート製セルの水漏れにより施工時に沈没し700万ドルの大損失が生じた。事故は、コンクリート製セルの有限要素解析で不適切な要素分割を行ったため、セルに作用するせん断応力を47%過小評価したことに起因すると報告されている。この事例では、有限要素分割で極端に skew な要素を用いたことが原因であり、解析者の要素特性に関する知識が無かったことによると考えられる。高機能の FEM 解析のソフトでは極端な要素形状を用いると警告が発せられる場合もあるが、解析者の知識が不十分であると、ことの重大さに気づかず、見逃されてしまう。最近の FEM 解析ソフトでは、使用している解析技術の高度化とは反対に使用するために要求される知識のハードルは低くなっているため、このようなミスがより生じやすい環境になっていると考えられる。以前は不適当なデータや極端なデータを用いると解が得られず、データのミスに気づくことも多くあったが、最近の商用ソフトではロバスト性が高められているので数値解析が不安定になりにくく使用者がミスに気づきにくい状況にもある。



**Condeep** (abbr. *concrete deep water structure*)

図-3 Condeep 型の石油掘削プラットフォーム

<http://www.ima.umn.edu/~arnold/disasters/sleipner.html>

## 5. 数値解析の誤差と信頼性の向上

数値解析の誤差を厳密に分析すると非常に複雑になるので、構造工学のレベルで考えてみる。実構造を対象とした数値解析の誤差(**E**)は以下のように定義する。

$$\text{誤差}(\mathbf{E}) = \text{実構造} - \text{ソフト使用者が構築したモデル}$$

これをさらに細かく分けると誤差の構成が理解できよう。

$$\begin{aligned} \text{誤差}(\mathbf{E}) &= (\text{実構造} - \text{数学モデル}) + (\text{数学モデル} - \text{計算ソフトの理想モデル}) \\ &\quad + (\text{計算ソフトの理想モデル} - \text{ソフト使用者が構築したモデル}) \\ &= \mathbf{E1} + \mathbf{E2} + \mathbf{E3} \end{aligned}$$

ここに、

$$\mathbf{E1} = (\text{実構造} - \text{数学モデル}) = \text{数理モデル化による誤差}$$

$$\mathbf{E2} = (\text{数学モデル} - \text{計算ソフトの理想モデル}) = \text{離散化による誤差}$$

$$\mathbf{E3} = (\text{計算ソフトの理想モデル} - \text{ソフト使用者が構築したモデル}) = \text{使用者に起因した誤差}$$

数値解析の信頼性を向上するには上に述べた **E1**, **E2**, **E3** それぞれの誤差を低減することが重要である。**E1**, **E2** を低減するのは主に研究者やソフトの開発者の役目であり、**E3** を低減するのは主に設計計算技術者（使用者など）の責任である。誤差の構成を見ると構造実験が必要であるのは基本的には「実構造」と「数学モデル」間の誤差 **E1** を検証するためであるが、他の誤差 **E2**, **E3** の評価基準となる「数学モデル」や「計算ソフトの理想モデル」のベンチマークが無い場合には、代替として構造実験は重要である。現在においては、残念ながら、**E1**→**E2**→**E3** と下位になるほど誤差の検証がなされるケースが非常に少なくなっている。構造実験は誤差の検証だけでなく、解析モデルのキャリブレーション(校正)にも必要である。とくに、材料非線形性が支配的な場合には重要である。ソフトが高機能化した現状では、あたかも構造実験の必要性が減少しているような認識が持たれる傾向にあるが、逆に、ソフトが高度化するほど、その精度や信頼性確保のために構造実験の重要性は高まる。

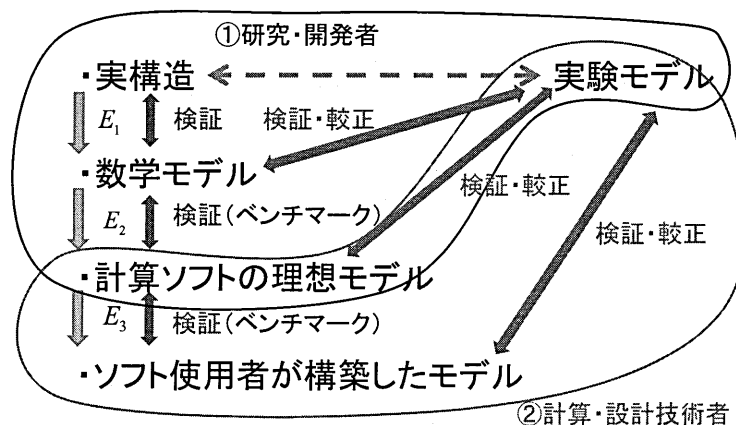


図-4 数値解析の信頼性向上

## 6. 数値解析の信頼性確保への取り組み

数値解析の信頼性を向上する取り組みは国内外、各分野で行われている。ここでは、耐震分野での高度な実験設備の整備と耐震解析の精度向上への取り組み、我が国で実施された鋼橋の耐震解析の実態調査とこれに基づく信頼性向上の取り組み、さらに、他分野や海外での取り組みについて紹介する。

### 6.1 実験による耐震解析の精度向上

耐震解析は一般に材料非線形性と幾何学的非線形性を考慮した非常に高度な動的解析であるため、実験による検証がより一層重要であるとの認識が国内外にある。しかしながら、終局状態に至るような加振能力のある実験設備は過去には少なく、耐震解析が十分に検証されることは少なかった。近年、制御技術、測定技術の進展から高度な耐震実験施設が国内外に作られており、加振実験結果に基づく数値解析の精度向上の取り組みもなされている。もっとも大規模であるのが米国で、2004年よりNSFの援助により15大学が連携してNEEDSプロジェクト<sup>6)</sup>が立ち上がり、多くの大型実験施設が建設された。さらに2009年に全体を統括するデータセンターとしてのハブ大学(Purdue大学)への予算もつき、NEEDSグループの実験データの保存・蓄積と共有・公開の取り組みも本格化している。我が国のE-defense<sup>7)</sup>の耐震実験データも、公開されているが、データが膨大で一般での利用は必ずしも容易ではないと考えられる。中国においても国家重点大学である同済大学において、全橋模型の実験も可能な世界最大クラスのマルチ振動台が2012年より稼働している<sup>8)</sup>。今後、世界レベルで貴重な実験データが得られると考えられるが、実験データの一般での利用を容易にするための動きは十分ではなく、今後の課題である。

過去に、耐震解析の精度向上に寄与した実験の例として、1995年の兵庫県南部地震直後に建設省土木研究所を中心に首都高速道路公団、阪神高速道路公団、名古屋高速道路公社、鋼材倶楽部、日本橋梁建設協会により実施された鋼製橋脚を対象とした数多くの繰り返し載荷実験や擬似動的実験を挙げることができる。実験結果は紙ベースの報告書I~VIII<sup>9)</sup>にまとめられ、デジタルデータとともに公開された。これらは多くの機関で利用され、その後、鋼製橋脚の耐震解析の精度向上に多大な貢献をしたことはよく知られている。

### 6.2 鋼橋の耐震解析の実態調査とこれに基づく信頼性向上法の提案

日本鋼構造協会の性能・信頼性向上に関する研究委員会：耐震部会(2006~2009)<sup>2)</sup>と鋼橋の合理化構造・設計法研究委員会：耐震設計法研究部会(2009~2010)<sup>3)</sup>では、実務への非線形動解の導入による耐震解析の高度化と複雑化に伴い、最も汎用的で今後も耐震解析に広く用いられる可能性の高いはり要素(ファイバー要素)を用いた耐震解析の信頼性を確保する必要があるとの観点から耐震解析の実態

調査とともにいくつかの信頼性向上策を提案した。ここでは、部会の報告書<sup>2),3)</sup>に基づきその概要を紹介する。なお、土木研究センターより先駆的な耐震解析のマニュアル「橋の動的耐震設計法マニュアル(2006)」<sup>10)</sup>が出版されている。しかしながら、主たる対象がコンクリート橋であるため  $M-\phi$  モデルを用いた耐震解析が中心であり、鋼橋を中心に実務で多く用いられている一般性のあるファイバー要素（はり要素）による解析については扱われていない。また、モデルや解析法の標準化など解析のばらつきを防止するための方策についてもほとんど触れられていない。

(1) 鋼橋の耐震解析の実態調査<sup>2),3)</sup>

最も汎用的で今後も耐震解析に広く用いられる可能性の高いファイバー要素（はり要素）による数値解析に絞り、設計技術者および専門の解析技術者5名を対象にベンチマーク問題に対するブラインド解析を実施した。ベンチマーク問題の一つとして採用したのは3径間連続高架橋（図-5）のレベル2地震動に対する非線形動的解析である。与えられた解析条件は図-5に示しているが、設計に用いる通常の耐震解析の場合に較べて細かく規定した。3種類のソフトを用いた5名の解析結果の例として、P3橋脚の水平変位と基部曲げモーメントを図-6に示す。基部モーメントのばらつきは比較的小さかったが、安全性照査に用いる水平変位には大きなばらつきが生じた。このようなばらつきが生じた原因を解析への参加者と部会委員で詳細に検討した。その結果、表-2に示すいくつかの原因項目が明らかになった。これらは、規定されていない任意の項目における選択の差異による原因と間違ったモデル化による原因に大別された。

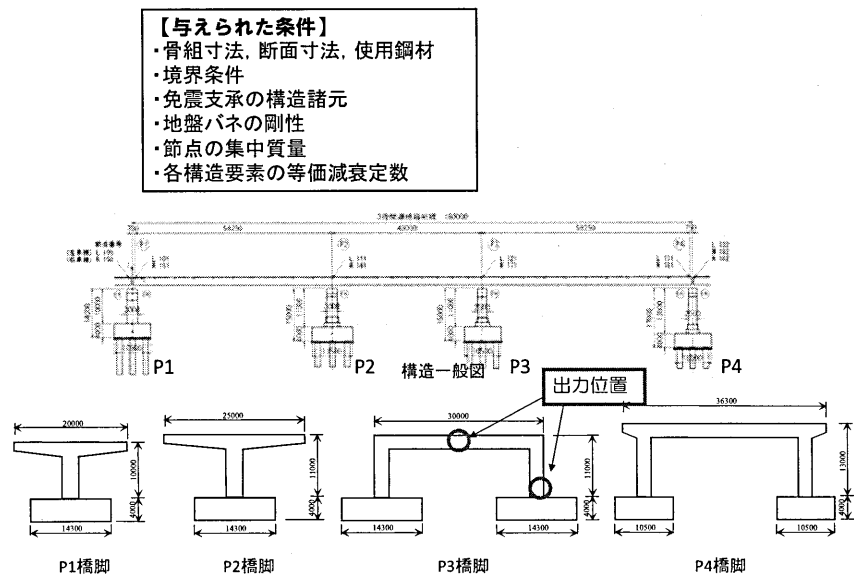


図-5 解析対象の3径間連続高架橋

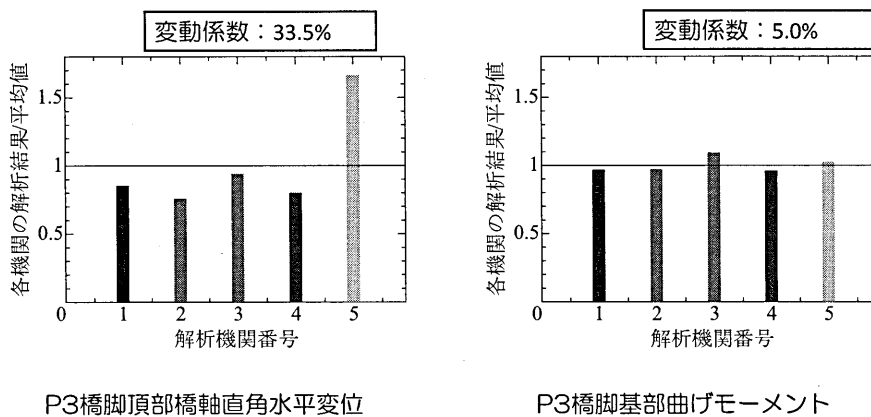


図-6 各機関の解析結果

表-2 解析結果にばらつきの生じた原因

モデル化や解析法で規定されていない項目	間違ったモデル化
<ul style="list-style-type: none"> <li>・はり要素の選択の差異（せん断変形の考慮の有無）</li> <li>・材料構成則の差異（ヤング係数 <math>E=200</math> or <math>206</math>(Gpa))</li> <li>・減衰の差異(Rayleigh 減衰の着目モードの差異)</li> <li>・要素分割, 断面分割, 時間分割の差異</li> <li>・収束計算の有無や誤差の指定の差異</li> <li>・構造のモデル化の差異（桁や支承部のモデル化など）</li> <li>・質量のモデル化の差異（分布質量 or 集中質量）</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・オフセット要素の誤使用（過剰拘束）</li> </ul>

このように、ばらつきを生む大きな要因がモデル化や解析の方法が明確に指定されていない部分、すなわち解析技術者の判断に任せられている部分の差にあることが明らかになった。したがって、このような任意性を極力排除することが解析結果の精度向上とばらつき防止につながるとの観点から、鋼橋を対象に、はり要素に基づく耐震解析の標準化法を提案した。なお、ここで行ったブラインド解析による鋼橋の耐震解析のばらつきの実体と原因の調査、ならびに、解析モデルや耐震解析手法の標準化の提案は初めての試みである。

(2) 解析の標準化

解析の標準化はモデルの標準化と解析手法の標準化からなる<sup>2),3)</sup>。モデルの標準化（図-7）では構造系全体を直接規定するのではなく、橋梁系をいくつかのブロックに分けて、まず、ブロックごとに標準的なモデルを示した。つぎに、ブロック間の結合方法、構造全体系の支持条件のモデル化を示した。このようにすることで、ブロック単位から全体系へのモデルの構築の流れに沿い、解析モデルのチェックを段階的に行うことができる。また、異なる構造系であっても共通のブロックは多くあるので、これを標準化することで、モデル化のばらつきを低減できる。さらに、代表的な連続高架橋、アーチ橋、トラス橋などについては標準化した構成ブロックにより全体系をどのように構成するかを具体的に示している。

- ・構成ブロックへ分割し、各ブロックごとのモデル化を詳述
- ・境界条件の明示  
(各ブロックの結合条件, 支持条件)

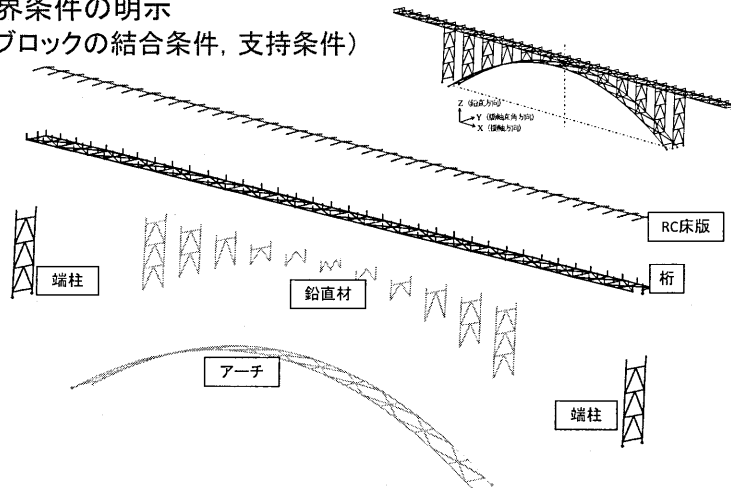


図-7 モデルの標準化（アーチ橋の例）



解析手法の標準化では、要素分割、断面分割、質量分布、構成則、座標系、減衰、地震動の入力方法、時間分割、応答値の出力法などについて標準的な方法を示している。また、解析結果の標準的な検証方法も提示した。最後に、連続高架橋を例題として、標準モデルと標準化された解析で応答値を算定する一連の耐震解析の手続きも示している。

以上のような解析モデルと解析手法の標準化では、部会<sup>3)</sup>への参加18機関（発注者4機関、コンサルタント4機関、電算（ソフトウェアの開発・販売、受託計算）5機関、橋梁メーカー1機関、大学4機関）の技術者の意見を聴取するとともに、実際に標準化手法でブラインド解析を実施する過程で遭遇した問題を考慮することで、標準化手法の改良を行った。標準化したモデルは今までの知見と経験に基づいて妥当と考え得るものを提示したが、実物の挙動に対する精度の検証は今後の課題である。

### (3) 各ソフトウェア間での耐震解析結果の差異<sup>3)</sup>

実際に耐震解析に従事している若手の技術者、研究者を中心に検討部会を組織した。さらに、構成メンバー選出にあたっては、使用するソフトウェアが鋼橋の耐震解析に用いられている専用ソフトウェア全体をほぼ網羅するように配慮した。結果として、実務に用いられているほぼ全てのソフトウェア（7種類）を検討対象とすることができた。解析対象として、図-8の単柱式橋脚、上路式アーチ橋、トラス橋を選び、解析者による任意性が入らないように標準化した耐震解析を実施した。

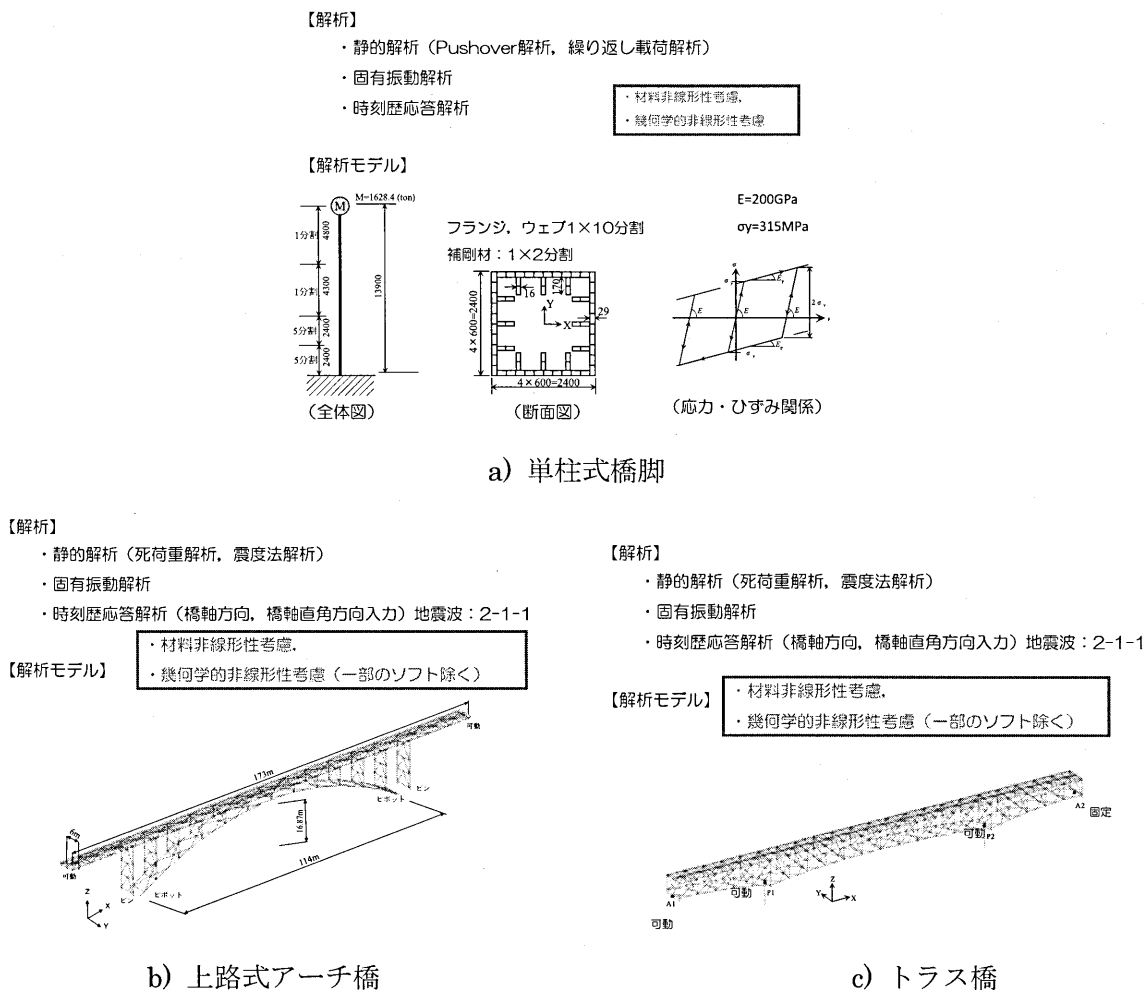


図-8 解析対象

対象とする構造物を標準化手法に従い、各ソフトウェア上で同一の解析モデルを作成し、ブラインドの耐震解析を実施した。単柱式橋脚、上路式アーチ橋、トラス橋に関する各解析者の解析結果の一

部を図-9に示す。なお、図中の解析機関名に用いているアルファベット (A~G) は使用したソフトウェア (計7種類) により区別した表記としている。

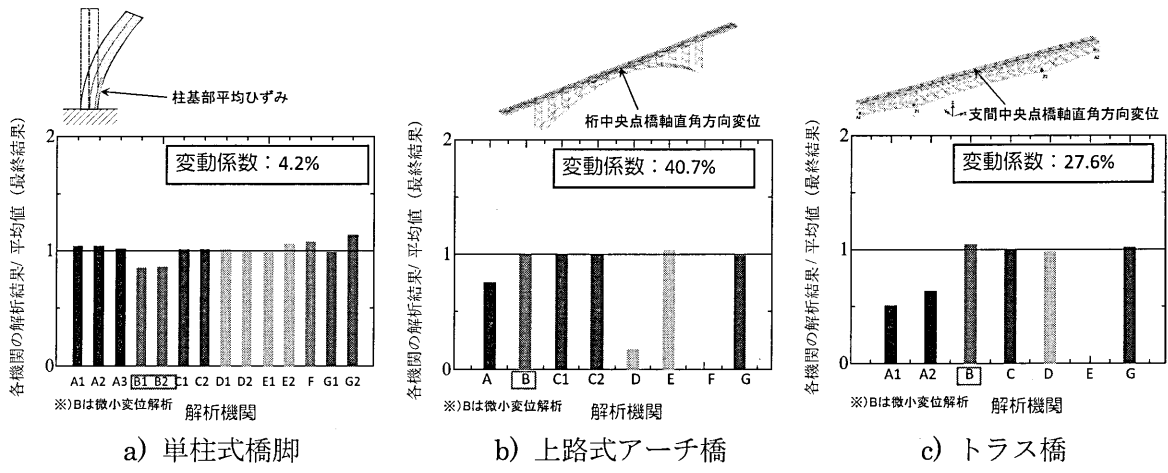


図-9 ブラインド解析結果

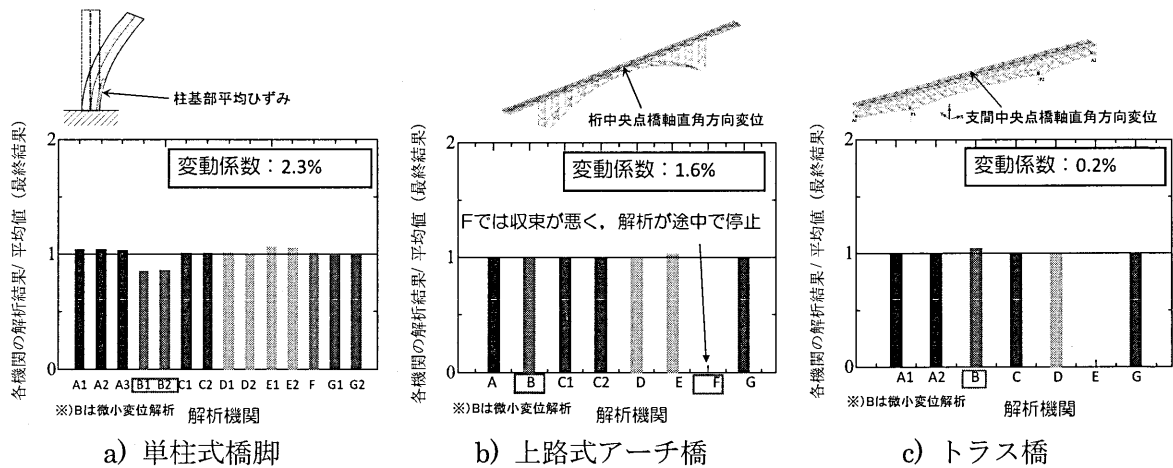


図-10 相互チェック後の解析結果

これより、単柱式橋脚を除き結果は大きくばらついた。同じソフトを用いた場合でもばらついていることから、モデル化や解析において標準化した手法が正しく用いられていないと考えられた。このようなミスはブラインド解析で完全に排除することが困難であるため、ここでは、解析担当者間で情報交換を行い、解析モデルの個人差やミスを可能な限り除去することで、相互に等価な解析モデル (標準モデル) を作成することに務めた。相互チェックにより修正された解析モデルを用いた計算結果を図-10に示す。図-9と図-10を比較してわかるように、ばらつきが大幅に低減している。このような比較をあらゆる観点から実施した結果、ソフト間のばらつきはほとんど無いことが判明した。

#### (4) 具体的に提示した技術的な信頼性向上策

標準モデルを用いたブラインド解析から、解析結果のばらつきを防止する上で最も重要であるのは解析モデルや解析法のばらつきやミスを防止することであることが明らかになった。報告書<sup>3)</sup>にはこれらを防止するための技術的な対策を具体的に示している。提示した対策をまとめると表-3のようになる。この表中には制度上の対策として提案したものも示している。対策として確実なものはないが、解析の標準化と今回行ったミスの相互チェックがかなり有効であった。制度的には2機関以上でのチェック体制を確立することが当面の対策であると言えよう。ただし、正解がわからないので、あ

らゆる観点から慎重にチェックすることが必要である。このような体制は、技術者のレベル低下により形骸化しやすいので、どのようにして緊張感を保持するか、技術者のレベルを上げるかということも併せて考えなければならない。

阪神高速道路会社では 2010 年より、重要な大規模構造物を対象に設計補助業務を発注し、異なったソフトを用いた耐震解析の相互チェックもなされている<sup>11)</sup>。今後、多くの事例が得られると考えられるので、これらをもとに、より有効な数値解析の信頼性向上策が確立されることを期待したい。

表-3 耐震解析の信頼性向上策のまとめ

技術的な対策	制度的な対策
<ul style="list-style-type: none"> <li>・耐震解析法の解説</li> <li>・モデル化手法の標準化</li> <li>・解析手法の標準化</li> <li>・ベンチマークデータの整備（解析と実験）</li> <li>・設計計算例</li> <li>・ミスの事例一覧</li> <li>・チェックポイントとチェック法</li> <li>・教育用デモソフト</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・解析ソフトの認定</li> <li>・解析ソフトの仕様の規定</li> <li>・解析者の資格認定（技術者の地位と意識向上）</li> <li>・2 機関以上でのチェック体制の確立</li> <li>・解析技術者の教育と指導者の養成</li> <li>・解析技術者間の交流（今回の部会のような）</li> </ul>

### 6.3 他分野や海外での動向

構造解析の信頼性向上に関する取り組みは土木以外の分野や海外においてもなされている。ここでは著者が知る範囲でいくつかの例を紹介する。

#### (1) 建築分野

国総研建築研究部で「建築実務の円滑化に資する構造解析プログラムの技術基準に関する研究」(2010~2013)が現在行われている<sup>12)</sup>。これは、認定プログラムの構造計算にばらつきが存在していることを背景としている。ばらつきが生じるのはモデル化に設計者の恣意的判断が入る余地があるとの観点から、研究では、ばらつきの原因の解明、構造モデルの標準化、自動計算フローの詳細規定などを行うことを目的としている。構成メンバーは国土交通省、国総研、建研、日本建築行政会議、日本構造技術者協会、建築業協会、大学、コンサルタントである。内容的には、すでに、日本鋼構造協会の性能・信頼性向上に関する研究委員会：耐震部会(2006~2009)と鋼橋の合理化構造・設計法研究委員会：耐震設計法研究部会(2009~2010)で実施した鋼橋の耐震解析の信頼性向上に関する研究<sup>2),3)</sup>に類似しているが、建築での研究体制は本格的で得られた成果の実務への確実な導入を目指していると考えられる。

#### (2) 機械分野

機械学会では 2003 年から解析技術者の資格認定と意識向上のために「計算力学技術者認定事業」の一環として上級、1 級、2 級の計算力学技術者（個体力学分野の有限要素法解析技術者）の認定事業を実施している。テキストや問題集も出版されている<sup>13)</sup>。このような取り組みは解析技術者の地位向上にも重要である。

#### (3) 米国カリフォルニア道路局

カリフォルニア道路局 Caltrans では PEER(Pacific Earthquake Engineering Research Center)に依頼し、非線形耐震解析のマニュアル”Guidelines for Nonlinear Analysis of Bridge Structures in California”が 2008 年に出版されている<sup>14)</sup>。ここでは、耐震解析の詳細、橋のモデル化、高架橋の標

準モデル (図-11), 特定のソフト(SAP2000)の使用法などを解説している。耐震解析の相互チェックは設計照査の一環として Caltrans 内でも行われる。

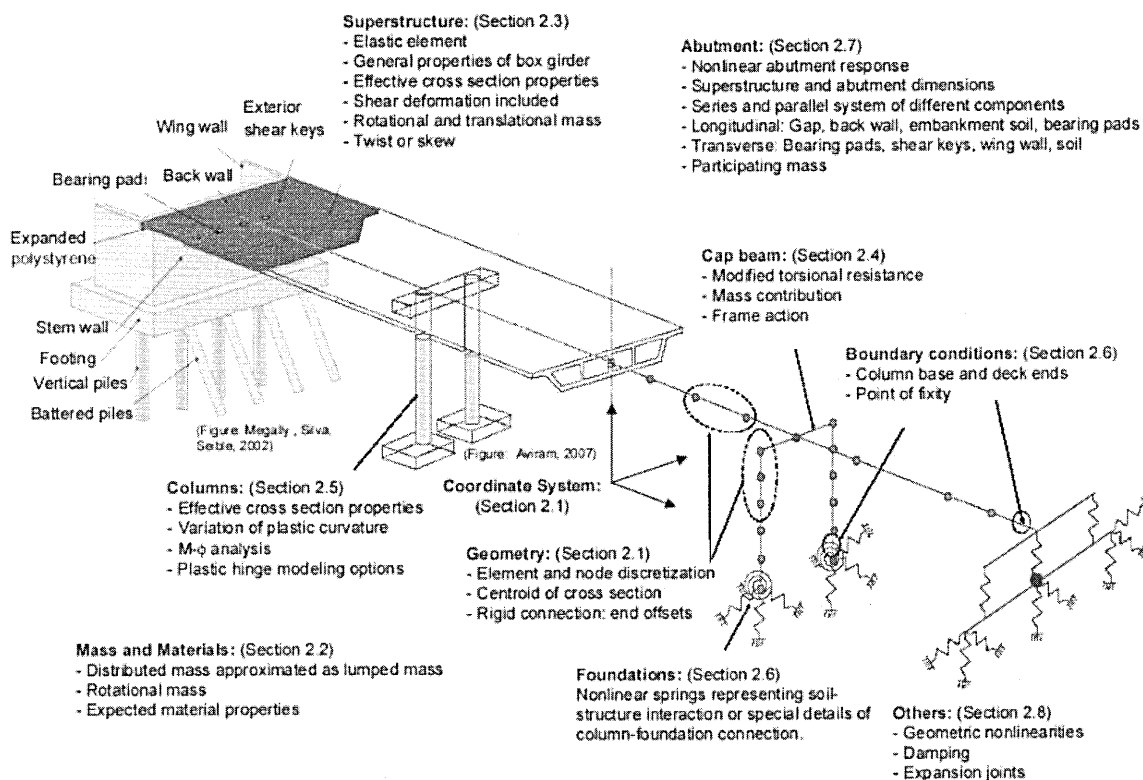


図-11 Caltrans での高架橋の標準モデル

#### (4) 米国機械学会

FEM 解析の受託業務の品質保証をするためのガイドライン<sup>15)</sup>が米国機械学会によりまとめられている。考え方を整理し、とりまとめたことは評価されるが、具体的な方法については示されておらず、実務への導入は今後の課題である。

#### 7. あとがき

ここでは、高度な FEM 解析を用いた構造設計の現状とこのような解析に潜む危険性について説明し、解析の信頼性を向上するための方法について議論した。耐震解析を対象とした調査から解析結果にばらつきの発生する主たる原因がモデル化における不適切な判断やミスにあることが判明したが、通常的设计に使われている線形の静的解析においても同様の誤差が生じることは否定できない。つまり、ここで議論したことは構造解析ソフトを用いるときには常に留意しておかなければならないことである。鋼構造・橋梁分野における解析ソフトを用いた構造設計は分業化されているため、信頼性向上への取り組みは一部を除いて必ずしも進んでいるとは言えない。解析理論からプログラム、実験、さらに設計まで一貫して経験し、全体の流れを理解できる技術者が高齢化し急速に層が薄くなっている現状を考えると、ソフトを用いた構造設計の信頼性向上は早急に取り組む必要のある重要な課題であるといえる。

## 参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，丸善，2012
- 2) 日本鋼構造協会：鋼橋の耐震設計の信頼性と耐震性能の向上，JSSC テクニカルレポート No.85，2009
- 3) 日本鋼構造協会：ファイバーモデルを用いた鋼橋の動的耐震解析の現状と信頼性向上，JSSC テクニカルレポート No.93，2011
- 4) 土木学会：鋼・合成構造標準示方書 耐震設計編，丸善，2008
- 5) Edwin T. Huston：Are We Relying Too Much on Computers?, Structure magazine, C<sup>3</sup> Ink, p.7, 2007
- 6) NEEShub - Network for Earthquake Engineering Simulation, <http://nees.org/> (参照日 2012 年 6 月 20 日)
- 7) 独立行政法人防災科学技術研究所 兵庫耐震工学研究センター E-ディフェンス，  
<http://www.bosai.go.jp/hyogo/> (参照日 2012 年 6 月 20 日)
- 8) <http://nees.org/site/resources/pdfs/MPSTL-Introduction-updated.pdf>
- 9) 建設省土木研究所，首都高速道路公団，阪神高速道路公団，名古屋高速道路公社，鋼材倶楽部，  
日本橋梁建設協会：道路橋橋脚の地震時限界状態設計法に関する共同研究報告書 I~VIII，1997
- 10) 土木研究センター：橋の動的耐震設計法マニュアル，2006
- 11) 日経コンストラクション，2012/02/13 号，pp.44~45，2012
- 12) 国土交通省 国土技術政策総合研究所 建築研究部 構造基準研究室  
<http://www.nilim.go.jp/lab/hcg/index.htm> (参照日 2012 年 6 月 20 日)
- 13) 日本機械学会：計算力学技術者 標準問題集，2011
- 14) Ady Aviram, Kevin R. Mackie, Božidar Stojadinović：Guidelines for Nonlinear Analysis of Bridge Structures in California, Pacific Earthquake Research Center , 2008
- 15) Guide for Verification and Validation in Computational Solid Mechanics, ASME V&V 10-2006, 2006