

# 構造設計におけるFEM解析の 高度化と信頼性の向上

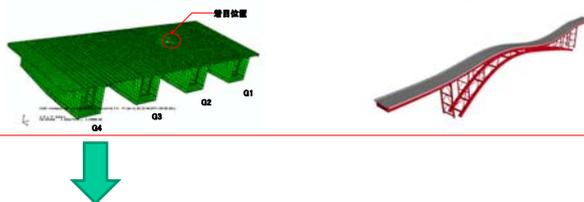
名古屋工業大学

後藤芳顯

## 高度なFEM解析の一般化の背景

- 安価で高性能なPCの普及
- 高機能・高性能な汎用解析や各種専用解析ソフトの開発
- 優れたプリおよびポストプロセッサの整備

(CGによるわかりやすい入出力)



・初心者でも容易に解析を実施できる環境

## 実務での高度なFEM解析が用いられる例

- 性能照査型耐震設計(性能を規定して直接照査)(1996)

終局挙動が予測できる非線形動的解析が必要

◎3次元複合非線形動的解析

- 補修・補強設計

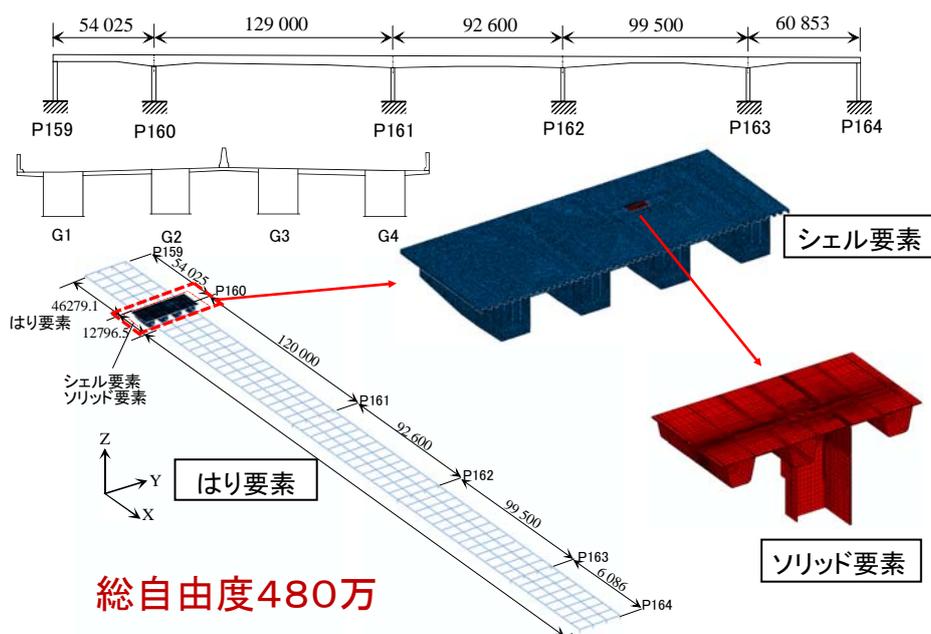
前例のない構造であることによる高精度の解析が必要

◎はり要素のみならずシェル要素やソリッド要素を用いた高度な有限要素解析

解析では現実に即した高度なモデル化が可能であるため

解析モデル検証のための構造実験が減っている。

## 連続鋼床板桁橋の全体解析による応力集中の評価



## 高度化された構造解析の影の部分

### 高機能ソフト使用における現状の問題点

- ・ソフト開発はメーカーに任されている.
- ・ソフトの高度化とブラックボックス化
- ・ソフトの妥当性に関する公的機関の認証がない.
- ・設計での使用に関するガイドラインの不足

- ・ソフトの妥当性の検証
  - ・モデル化の妥当性の検証
  - ・解析結果の検証
- } ソフト使用者の責任で実施する必要あり

## 高度化された構造解析でのミス発生理由

### (ソフトの問題)

- ・ソフトはブラックボックス
- ・少々の間違いでも計算可能
- ・最終結果の出力のみで途中のチェックができない

### (使用者のレベルと意識の問題)

- ・解析理論の理解不足
- ・数値解析(FEM解析)であることの認識が薄い
- ・見た目の良いCGによる出力結果を信じてしまう
- ・実験やベンチマークと比較しない
- ・解析の重要性に対する認識が薄い

# 構造解析の誤差と設計

照査フォーマットの例 (耐震設計の場合)

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

- $S$ : 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~)
- (荷重係数:  $\gamma_f=1.0$  死荷重, 地震荷重)

実構造の応答に対し解析の誤差が20%以上生じると構造解析係数  $\gamma_A$  でのカバーは難しい

# (米国) 「忍び寄る危機」

STRUCTURE magazine(2007)

米国構造技術者協会 会長

Editorial

Are We Relying Too Much on Computers?  
A Register  
By Edwin T. Huston, P.E., F.E., Vice President of NCS&E



「構造工学分野に危機が忍び寄っていると私は確信する。しかし、ほとんどの人は気づいていない。もし気づいたとしてもどうしたら良いかわからないであろう。

この危機は計算機に過剰依存し、構造解析が間違っても気づかないことによってもたらされている。

最終的にこの危機は**構造物の崩壊**というとんでもない形で顕在化するにちがいない・・・」

Many letters get several examples of some of the flawed designs that had been generated from some of the design tools. I have received numerous letters of complaint that "I think you need to college grade your software." One letter stated that, due to the problem, the writer's firm had initiated a policy of 100 percent in-house peer review of all designs of structural components prepared by engineers. One particularly plaintive letter was from a young engineer who clearly showed that part of the problem was in the complexity of the Building Code and Standards. He noted that his faculty's degree left him unprepared to deal with the complexity and that he had started working on a Master's degree. This type of code complexity was also echoed in a few other letters. Two other responses suggested additional education in the sciences. One thought that this education should be at the university level, the other thought that it should start there but should continue with additional training in an office. I agree that additional education in the sciences. I think we need to collect "rules of thumb", "back of the envelope methods", "practical methods from textbooks such as Klingenberg or Rank, approximate analysis techniques and so on. We could then assemble these and find an effective method of distribution. While I may not be the person who ultimately pays the register, I will endeavor to be the point of contact.

In some cases, the rules are such as "the depth of a floor beam is inches should be three-quarters of the length of the beam in feet." They can be generalized such as "the section has clear for Section Design Category 'IV' of a steel building should be 30 percent of the weight of the structure when using strength design." They can be the procedures you use to check members, whether they are checking applications or a procedure to check deflections. Whenever they are sent them to me, I'll collect them and let's see if we can prevent the collapse that has not so concerned.

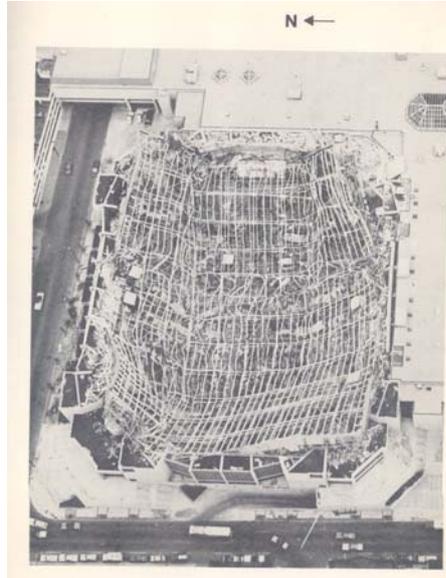
To read the original article visit STRUCTURE magazine on line at [www.STRUCTUREmag.com](http://www.STRUCTUREmag.com).  
Click Andrew's header  
February 2007  
Editorial in the California Section, and  
NCS&E News in the Organization News Section.

## 不適切な構造解析が主な原因である事故 I

市民会館アリーナの崩壊  
規模: 5000人収容  
米国コネチカット州ハートフォード市  
1978年 1月18日

**HARTFORD CIVIC CENTER**  
(Jan. 18, 1978, Hartford Connecticut USA)

降雪により  
大スパントラス構造の屋根が崩壊



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

## 立体トラス構造のモデル化のミス

計算機による構造解析の過信

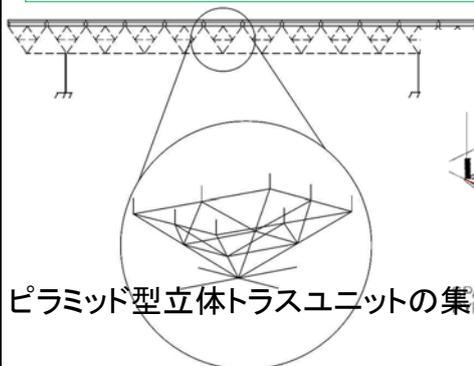
↓  
複雑な立体トラス屋根の採用

1978年当時は5000円程度の連立方程式でも解くのが容易でなかった

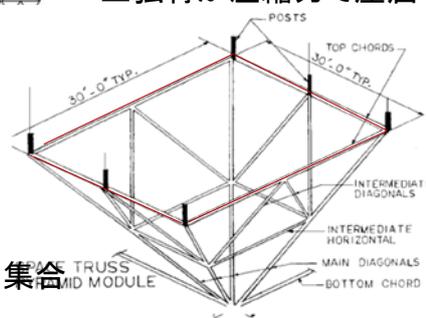
立体トラスユニット上弦材が水平方向に補剛されていると仮定

↓  
計算軸力, 座屈長さの過小評価

↓  
上弦材が圧縮力で座屈



ピラミッド型立体トラスユニットの集合



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

## 不適切な構造解析が主な原因である事故 II

石油掘削プラットフォームSleipner A(ノルウェー)  
施工時のコンクリートセルの水漏れによる沈没  
1991年8月23日  
\$700 millionの損失



Condeep (abbr. *concrete deep water structure*)

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

## 有限要素解析の要素分割のミス

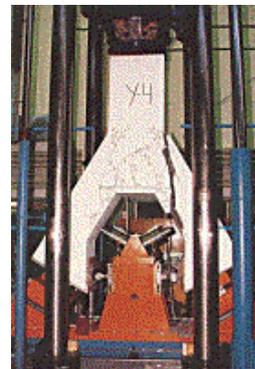
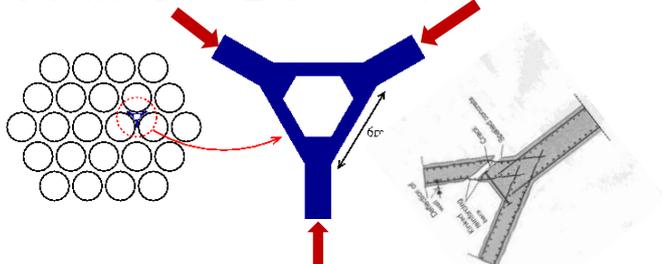
<NASTRANによる弾性有限要素解析>

- ・不適切な有限要素分割(極端なskew要素の使用)



- ・3角形セルのせん断応力を47%過小評価

- ・コンクリート製セル壁厚不足によるひび割れ発生に起因した水漏れ



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

# 構造解析の誤差の内容

実構造 - ソフト使用者が構築したモデル = 誤差 ( $E$ )



誤差の分析

(実構造 - 数学モデル) + (数学モデル - 計算ソフトの理想モデル)

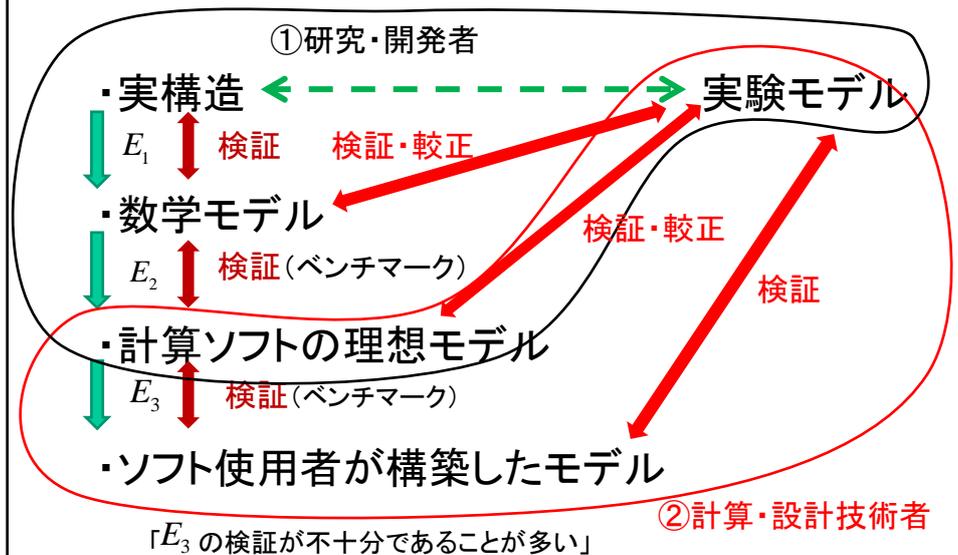
( $E_1$ : 数理モデル化誤差) ( $E_2$ : 離散モデル化誤差)

+ (計算ソフトの理想モデル - ソフト使用者が構築したモデル) = 誤差

( $E_3$ : ソフト使用者に起因した誤差) ( $E$ )

$$E_1 + E_2 + E_3 = E \quad E_1, E_2 < E_3$$

# 構造解析の信頼性向上のスキーム



## 構造解析の信頼性確保の取組

- I. 実験による構造解析の検証  
(耐震分野を中心として)
- II. 耐震解析の実態調査と信頼性向上に関する検討  
(日本鋼構造協会, 耐震設計法部会)
- III. 他分野や海外での取組の紹介
  - ・建築分野
  - ・日本機械学会
  - ・カリフォルニア道路局 (Caltrans)

## I. 実験による構造解析の検証 (耐震分野を中心として)

### 性能照査型耐震設計の導入



構造物の動的な終局挙動を予測できる信頼性のある高度な解析モデル構築の必要性

1. 幾何学的非線形性(動的不安定性)
2. 材料非線形性(ひずみ速度依存性)
3. 動的崩壊挙動

## 高度な3次元耐震実験施設の相次ぐ建設

1. 防災科学研究所(日本)のE-defense(実大振動台)  
(約450億円) 2005~
2. 米国の15大学によるNEESプロジェクト  
[各大学独自の実験装置(擬似動的実験装置, 振動台など多数)]  
(約440億円~) 2004~
3. 中国.同済大学  
[橋梁用2方向マルチ振動台 (約35億円~)] 2011~

## 米国NEESプロジェクト(15の実験施設) NSF(2004~)

NEEShub - Network for Earthquake Engineering Simulation, <http://nees.org/>



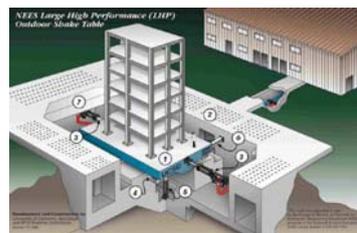
マルチ振動台(ネバダ大学)



多軸載荷試験装置(イリノイ大学)



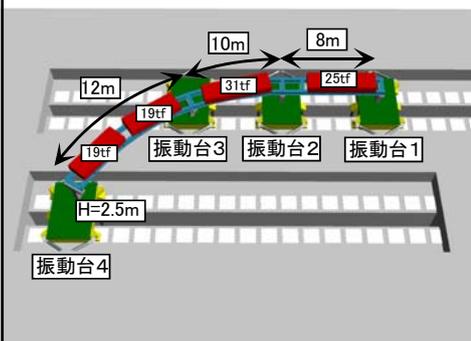
多軸載荷試験装置(ミネソタ大学)



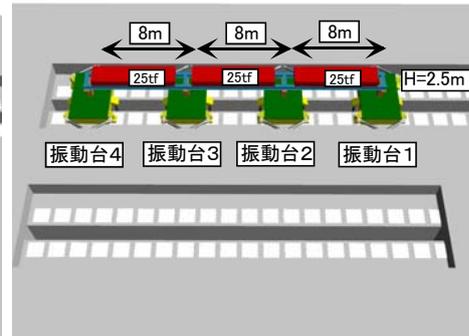
大型3次元振動台(UCSD)

## 中国同済大学のマルチ振動台 と連続高架橋の加振実験の例(1/6モデル)

高架橋システムとしての加振実験可能



3径間の曲線高架橋



3径間の直線高架橋

## 実験による構造解析の検証の 今後と課題

- 実験による検証の重要性を周知
- 実験データの組織的な保存・蓄積
- 実験データの公開方法と利用の容易化
- ソフト開発者や解析・設計技術者の利用促進

## 実験データの蓄積・公開・利用の実例

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)

—鋼製橋脚の正負交番繰返し載荷実験—

平成9年4月

建設省土木研究所  
首都高速道路公団  
阪神高速道路公社  
名古屋高速道路公社  
⑧ 鋼材倶楽部  
⑨ 日本橋梁建設協会

#鋼製橋脚の構造解析  
の検証データとして非常  
に有効であった

## 米国NEESプロジェクト



<http://nees.org/site/resources/pdfs/MPS-TL-Introduction-updated.pdf>

Purdue 大学, West Lafayette, Indiana, USA

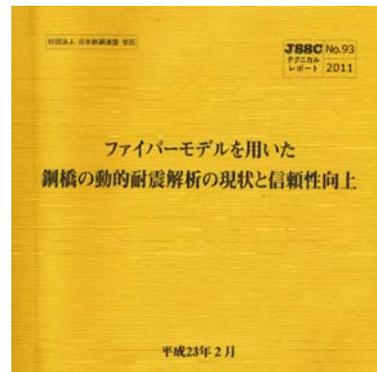
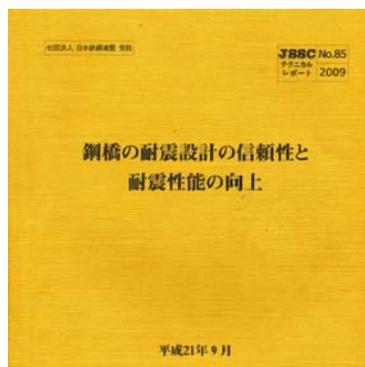
#米国NEESの耐震関係のデータセンター  
として情報基盤の整備2009年1.05億ドル

国内外からの利用促進

## II 耐震解析の実態調査と 信頼性向上に関する検討 (ファイバーモデル対象)

(日本鋼構造協会・耐震設計法部会)

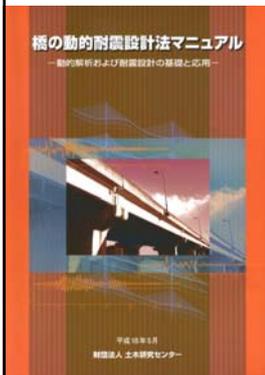
• 2006~2010年



## 経緯 I 非線形動的解析ソフトによる耐震解析の推奨

橋の動的耐震設計法マニュアル(土木研究センタ, 2006)

M-φ要素(平面問題, 微小変位解析)による耐震解析の解説



- 動的解析の解説
- コンクリート橋のモデル化中心
- 解析結果のチェック項目
- ベンチマーク解析によるソフト比較
- 教育用ソフト

先駆的な内容であるが鋼橋に関する  
下記の項目は不十分でない

- ×解析モデルの標準化
- ×解析法の標準化
- ×ファイバー要素

## 経緯 II 解析のさらなる高度化の動き

M-φ要素の軸力変動問題, 3次元問題への適用  
における制約

↓  
ファイバー要素を用いた汎用性のあるソフトウェアの  
実務への導入

↓  
複数機関によるファイバー要素を用いた鋼橋のブライ  
ンド解析結果に無視できないばらつきの存在



- モデル化の差異
- 解析ソフト間の差異
- 人為的ミス

?

## ファイバー要素を用いた耐震解析の 現状調査と信頼性向上に関する検討の流れ

(1) 現状の耐震解析でのばらつきの調査  
(現状の問題点の抽出)

(2) 耐震解析の標準化  
(解析モデルの標準化, 解析法の標準化)

(3) **標準化した耐震解析**でのばらつきの調査  
(人為ミス, ソフト間の差異, 標準モデルの問題点検討)

(4) 信頼性向上策の提案  
・技術的対策  
・制度的対策

### (1) 現状の耐震解析でのばらつきの調査 (問題点抽出のための解析)

- ・ 実務に近い解析条件を与えてブラインド解析実施
- ・ レベル2地震動下での連続高架橋の非線形動的解

【解析担当者】

コンサルタント, 橋梁メーカー 計5名 (経験年数2年以下3名)

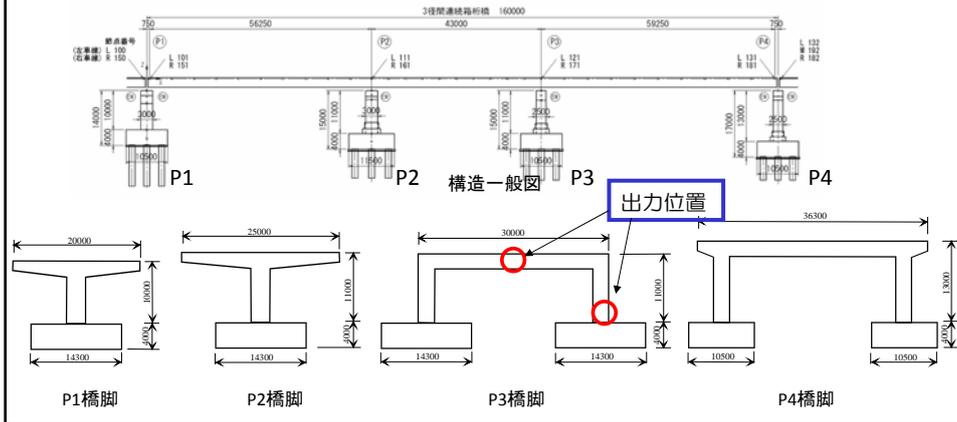
【使用ソフト】

4種類

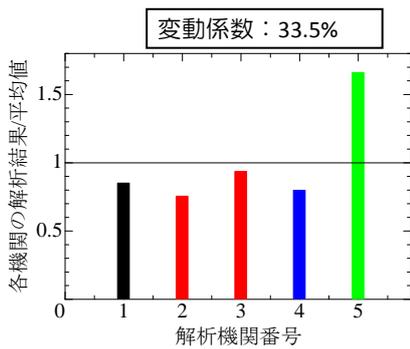
# 解析対象橋梁（3径間連続高架橋）

## 【与えられた条件】

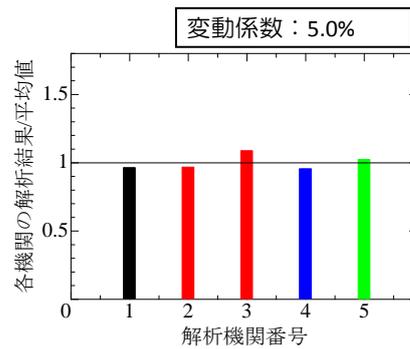
- ・骨組寸法, 断面寸法, 使用鋼種
- ・境界条件
- ・免震支承の構造諸元
- ・地盤バネの剛性
- ・節点の集中質量
- ・各構造要素の等価減衰定数



# 解析結果



P3橋脚頂部橋軸直角水平変位



P3橋脚基部曲げモーメント

※) 使用した解析ソフトごとに色分け

解析結果のばらつき大!

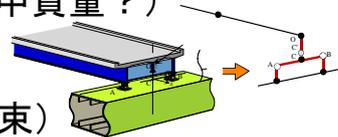
## 抽出されたばらつきの原因

### 【モデル化や解析手法の任意性】

- ・はり要素の選択（曲げせん断変形の考慮の有無）
- ・材料構成則の選択（ヤング係数:  $E=200$  or  $206(\text{Gpa})$  ?）
- ・減衰のモデル化（Rayleigh減衰を用いる際の着目モードの選定）
- ・要素分割, 断面分割, 時間積分間隔
- ・収束計算の有無, 誤差の指定
- ・構造のモデル化（桁や支承部のモデル化など）
- ・質量のモデル化（分布質量 or 集中質量?）

### 【間違ったモデル化】

- ・オフセット要素の誤使用(過剰な拘束)



**耐震解析の標準化の必要性！！**

## (2) 耐震解析の標準化

解析モデルの標準化＋解析法の標準化

### 【目標】

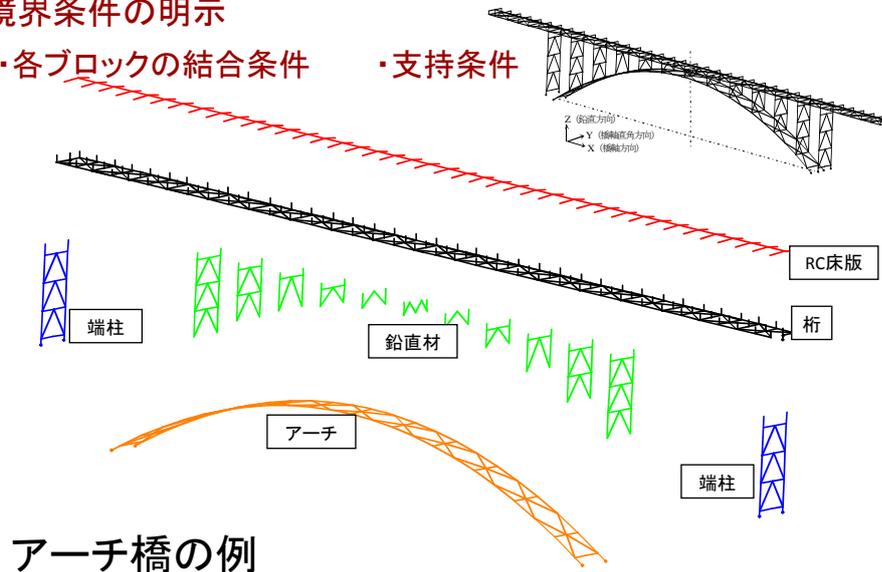
- ・モデル化や解析手法の一貫性確保(曖昧さ除く)
- ・精度確保が可能な範囲で単純化
- ・技術者が容易に理解できるモデル化と解析法

### 【今回対象とした橋梁形式】

- ・連続高架橋
- ・上路式アーチ橋
- ・トラス橋

## 標準モデルの提示法

- ・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



## (3) 標準化した耐震解析でのばらつきの調査

標準化でモデルと解析法のばらつきを除去



- ・耐震解析での人為的ミス
- ・耐震解析ソフト間の差異(ソフトのミスの有無)
- ・標準モデルと標準化した解析法の問題点検討

# 参加機関と解析ソフトウェア

## 関係機関と耐震解析ソフトをほぼ網羅

コンサルタント	4機関	} 解析ソフト 7種類 (専用ソフト6種, 汎用ソフト1種)
電算	5機関	
橋梁	1機関	
大学	4機関	

首都高速・阪神高速・名古屋高速  
高速道路総合技術研究所

26名

## 標準化した耐震解析での 人為ミスとソフト間のばらつき検討の流れ

解析対象とする橋梁の諸元の提示

- ① 単柱式橋脚      ② アーチ橋      ③ トラス橋

複数の機関（ソフト）によるブラインド解析の実施

- ・標準モデルに従い対象モデルを作成
- ・解析方法を標準化手法に統一

- ・材料非線形性考慮,
- ・幾何学的非線形性考慮

ブラインド解析の結果集計（第1回目解析結果）

解析結果の比較と再解析の実施（複数回）

ミスのチェック, 情報交換を相互に行い, 再解析を実施

.....人為ミスの検討

解析結果の集計（最終結果）

.....ソフト間の差異検討

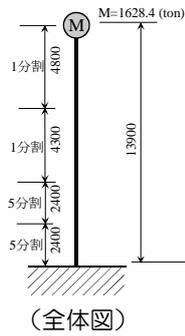
# 単柱式橋脚

## 【解析】

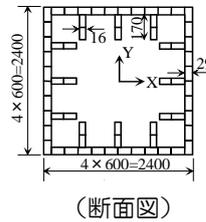
- ・静的解析（Pushover解析，繰り返し载荷解析）
- ・固有振動解析
- ・時刻歴応答解析

- ・材料非線形性考慮
- ・幾何学的非線形性考慮

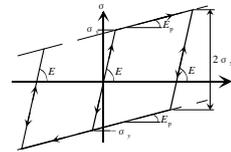
## 【標準モデル（時刻歴応答解析）】



フランジ，ウェブ1×10分割  
補剛材：1×2分割

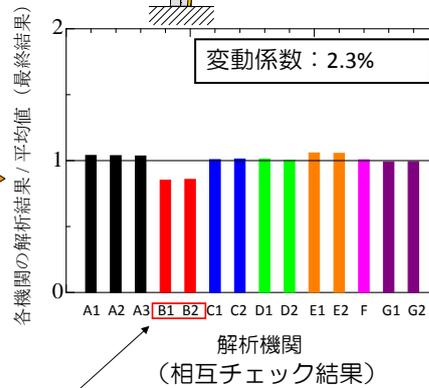
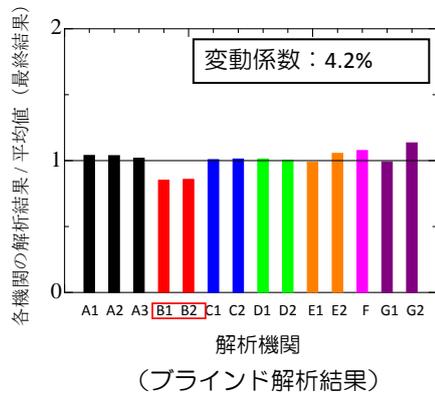


E=200GPa  
 $\sigma_y=315\text{MPa}$



# 単柱式橋脚解析結果

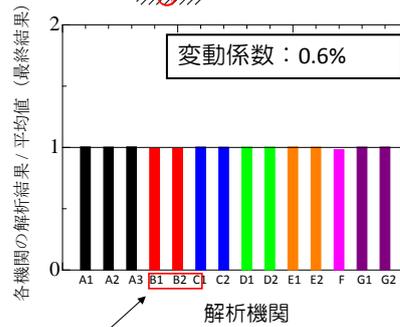
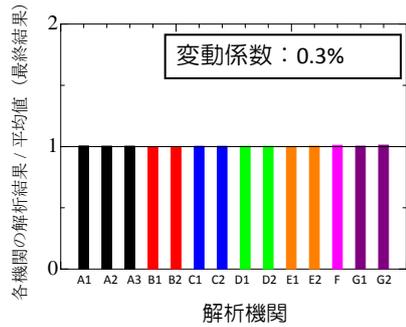
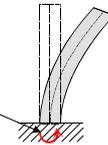
## 【柱基部平均ひずみ】



※) B1,B2は微小変位解析

# 単柱式橋脚解析結果

【柱基部曲げモーメント】



※) B1,B2は微小変位解析

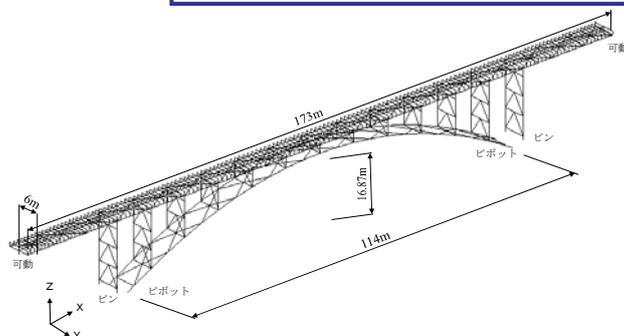
# アーチ橋

【解析】

- ・静的解析 (死荷重解析, 震度法解析)
- ・固有振動解析
- ・時刻歴応答解析 (橋軸方向, 橋軸直角方向入力) 地震波：2-1-1

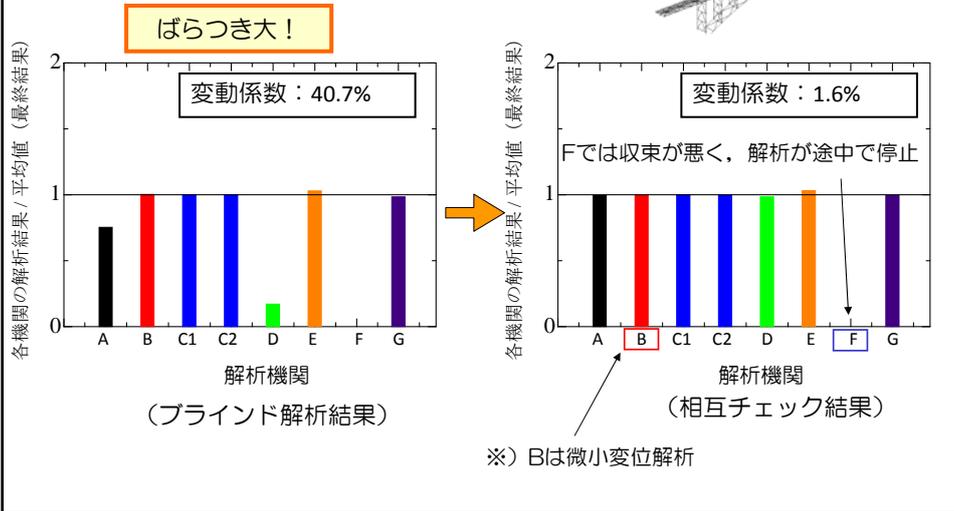
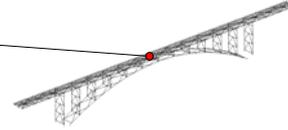
【解析モデル】

- ・材料非線形性考慮,
- ・幾何学的非線形性考慮 (一部のソフト除く)



# アーチ橋解析結果 (橋軸直角方向入力)

【桁中央点橋直方向変位】



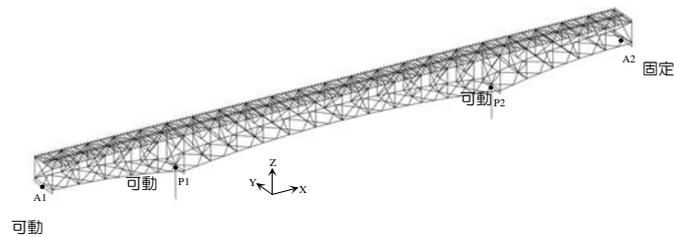
# トラス橋

【解析】

- ・静的解析 (死荷重解析, 震度法解析)
- ・固有振動解析
- ・時刻歴応答解析 (橋軸方向, 橋軸直角方向入力) 地震波：2-1-1

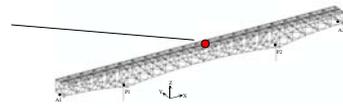
【解析モデル】

- ・材料非線形性考慮,
- ・幾何学的非線形性考慮 (一部のソフト除く)

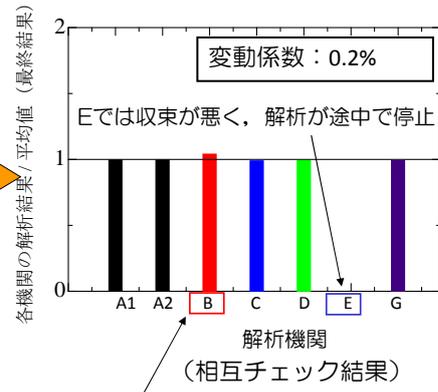
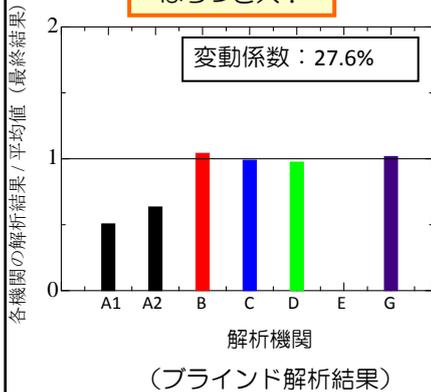


# トラス橋解析結果 (橋軸直角方向入力)

【支間中央点橋軸直角方向変位】



ばらつき大!



※) Bは微小変位解析

## 標準化した解析での主な人為ミス

- ・入力に関するミス  
(有効せん断断面積, 立体はり要素の方向余弦の誤入力)
- ・解析手法に関するミス  
(収束計算の未実施)
- ・出力に関するミス  
(積分点の位置, 断面力の正負, 平均ひずみの算定)

## ソフト間の差異

検討した7種類のソフト間のばらつきは小さい

ただし



\*減衰の扱いなどに問題があるプログラムあり  
(非線形解析での) → 修正

\*収束性に問題のあるプログラムあり → 修正

$$E_1 + E_2 + E_3 = E \quad E_1, E_2 < E_3$$

$E_1$  (数理モデル化誤差) と  $E_2$  (離散モデル化誤差) は小さい.

$E_3$  (ソフト使用者に起因した誤差) が支配的

### (4) 具体的に提示した信頼性向上策

#### 【技術的な対策】

- 耐震解析法の解説
- モデル化手法の標準化 (○)
- 解析手法の標準化 (○)
- ベンチマークデータ
- ミスの事例 (△)
- チェックポイントとチェック法 (△)
- 設計計算例
- 教育用デモソフト

## (4) 具体的に提示した信頼性向上策

### 【制度的な対策】

- プログラムの認定
- プログラムの仕様規定
- 使用者の資格認定
- 2機関以上でのチェック体制の確立 (○)
- 解析技術者の教育と指導者の養成
- 技術者間の交流 (今回の委員会のような)

**効率的で確実な決め手はない！**

## 阪神高速道路会社での耐震解析の 信頼性向上の取り組み (2010~)

照査段階での第三者のチェック強化

解析を含む照査を発注者が別発注

**大規模構造に対する2重のチェック体制**

日経コンストラクション(2012)

### III 他分野や海外での動向

- 建築分野(国土交通省)
- 日本機械学会
- カリフォルニア道路局(Caltrans)
- 米国機械学会

### 建築分野での動向

【国内】 (建築分野) 国交省 国総研建築研究部  
「建築実務の円滑化に資する構造計算プログラムの  
技術基準に関する研究」(2010~2013)

- ・認定プログラムの構造計算結果にばらつきが存在
- ・モデル化に設計者の恣意的判断の入る余地あり

↓ 検討

- ・はらつきの原因解明
- ・構造モデルの標準化
- ・自動計算フローの詳細規定

非常に類似している

# 機械分野での動向

【国内】（機械分野）機械学会  
「計算力技術者認定事業(2003～)  
上級, 一級, 二級

社団法人 日本機械学会  
計算力学技術者認定事業  
標準問題集 1

計算力学技術者 2 級  
(固体力学分野の有限要素法解析技術者)

固体力学分野

技術者の資格認定  
技術者の意識向上



# 米国) カリフォルニア道路局 (耐震)

(米国) Caltrans(カリフォルニア道路局) + PEER (Pacific Earthquake Engineering Research Center)

「Guidelines for Nonlinear Analysis of Bridge Structures in California」 (2008)



PACIFIC EARTHQUAKE ENGINEERING  
RESEARCH CENTER

類似している

Guidelines for Nonlinear Analysis of Bridge Structures  
in California

Ady Aviram  
University of California, Berkeley

Kevin R. Mackie  
University of Central Florida, Orlando

Božidar Stojadinović  
University of California, Berkeley

- ・耐震解析の解説
- ・高架橋の標準モデルの提示
- ・使用ソフト間の差異 (2種類) の検討
- ・ソフトの使用法 SAP
- ・耐震解析を行ったセクションと異なった Caltrans 内のセクションでチェック

# モデル化 (Caltrans)

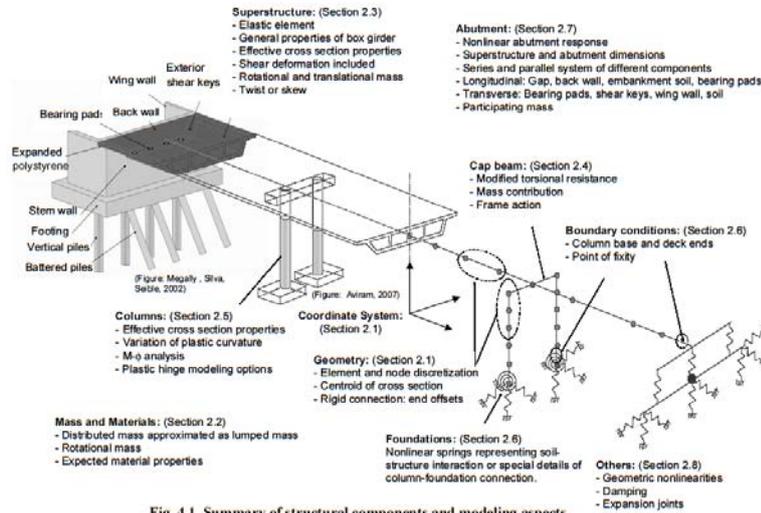


Fig. 4.1 Summary of structural components and modeling aspects.

Ady Aviram, Kevin R. Mackie, Božidar Stojadinović : Guidelines for Nonlinear Analysis of Bridge Structures in California, Pacific Earthquake Research Center , 2008

## 各機関で対応を急ぐ必要有り

- 解析理論からプログラム，さらに設計まで一貫して理解できる技術者の高齢化と層の薄さ
- 解析だけの問題ではない．コンピュータを用いた設計・製作・架設などCAE全般の問題

## 今後の予定

- 「鋼橋の耐震解析の信頼性確保のための指針」を作成したい  
（1～2年以内を目標）  
土木学会：鋼・合成構造設計標準示方書「耐震設計編」の改訂にあわせて
- 自己の解析ソフトや実験データの公開  
鋼製橋脚・充填鋼製橋脚をもつ高架橋全体系の高精度3次元解析モデルと関連する実験データ