

2013年12月6日

# 鋼橋の耐震設計の現状と 想定外の被害の軽減に向けて

後藤 芳顯  
名古屋工業大学 社会学専攻



西宮港大橋 (1995.1)  
兵庫県南部地震

## 講演の内容と視点

- 耐震設計の歴史と阪神大震災以後の設計法(現行)
- 今の耐震設計の妥当性は東日本大震災で検証されたか?
- 今の耐震設計は今後の大地震に対応できるか?
- 耐震設計の課題と名工大での取組の紹介

## 地震被害とともに変遷する耐震設計法

### 大正12年1923 関東大震災(過去最大の被害)

- 大正15年1926 道路構造に関する細則案に耐震設計導入(静的な照査=震度法)

### 昭和39年1964 新潟地震(液状化, 落橋)

- 昭和46年1971 道路橋耐震設計指針(修正震度法、落橋防止、液状化の影響考慮)

### 平成7年1995 阪神大震災(耐震構造に過去最大の被害)

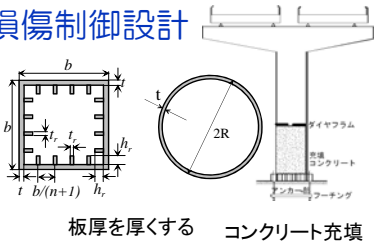
- 平成8年1996 道路橋示方書V耐震設計編(現在の耐震設計の考え方のもとになる大幅な変革)

## 阪神大震災を契機とした耐震設計の変革

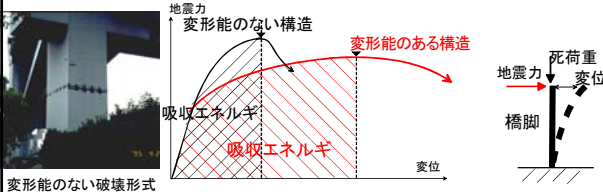
- 海溝型と直下型のレベル2地震動(極大地震)の考慮(設計用地震動の応答加速度は300galから最大2000galへ大幅な上昇)
- 動的照査法の導入  
=橋の地震時の動的挙動に基づく耐震性能の検証(より実情に即した照査法)
- 損傷制御設計, 制震設計, 免震設計の積極的な導入(設計地震動の大幅上昇に対応するため)

## 1. 鋼製橋脚の損傷制御設計

- 損傷の許容
- 変形能の向上
- ↓
- 耐力上昇防止
- エネルギー吸収能向上



板厚を厚くする コンクリート充填



## 2. 制震設計(ダンパーの使用)

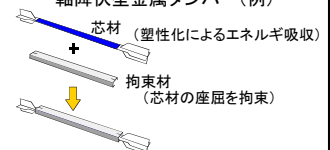


(能見橋)

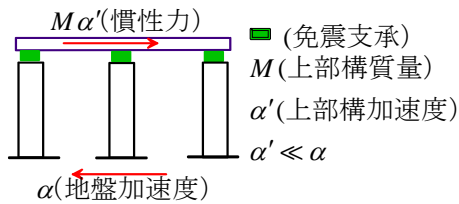
(名古屋高速)

軸降伏型金属ダンパー(例)

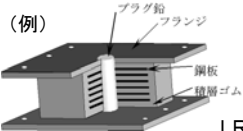
- 損傷はダンパーに集中
- ダンパーでエネルギー吸収
- 主に既設構造の耐震補強



### 3. 免震設計(ゴム支承・免震支承の使用)



・長周期化+エネルギー吸収 → 地震動の入力低減+減衰

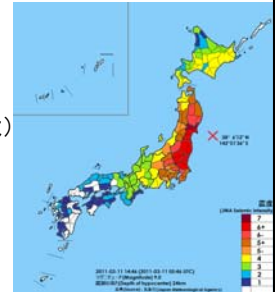


損傷を最小限にとどめ  
地震直後の使用性確保

LRB(鉛プラグ入り免震支承)

### 東日本大震災と耐震設計

- ・規模: 9.0(マグニチュード)  
(日本での観測史上最大)
- ・最大震度(気象庁): 7  
(計測震度6.67は観測史上最大)
- ・激しい揺れ: 約2分
- ・仙台など市街震度6強  
(阪神以降の高架橋が存在)



(気象庁)

### 東北地方太平洋沖地震での橋の被害1

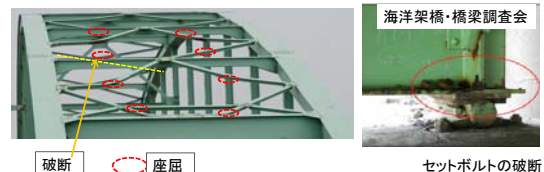
- \* 津波による被害は衝撃的
- 耐津波設計がなかった



(石巻市職員撮影)  
・新北上大橋  
連続トラス橋  
橋長: 566m  
主径間: 84.8m  
完工年: 1975年

### 東北地方太平洋沖地震での被害2

- \* 橋のゆれによる被害は大きくはない
- 被害は昭和55年以前の耐震設計の橋に見られた損傷



- ・上横構の2次部材の座屈・破断
- ・鋼製支承の被害(従来と同様)

天王橋(石巻市)  
ランガー桁、ガルバー桁橋  
橋長: 367.7m  
完工年: 1959年

### 東北地方太平洋沖地震での橋の被害3

- ・ゴム支承破断, 橋脚無損傷



東部高架橋(2001)  
仙台宮城野区(震度6強)  
その他  
利府高架橋(2002)  
宮城県宮城郡利府町  
(震度6弱)

劣化?  
設計法?

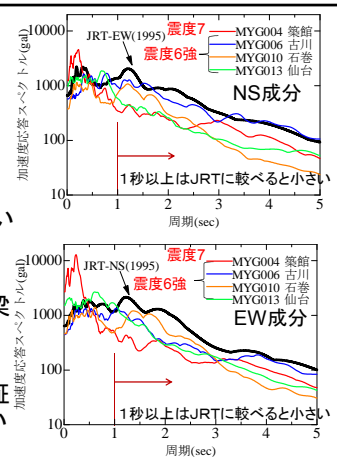
橋脚損傷以前の  
ゴム支承の破断  
↓  
設計コンセプト  
の破綻

### 東北地方太平洋沖地震の加速度応答スペクトル

加速度応答スペクトル:  
0.5秒以下: 非常に大きい  
1.0秒以上: 小さい

兵庫県南部地震より橋梁に与える影響は小さい

現行の耐震設計法の検証には必ずしもなっていない

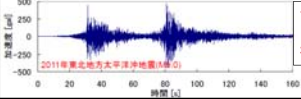


## 東日本大震災以後の 示方書の改訂（平成24年）

- ・津波被害を考慮した構造計画（具体性はまだない）
  - \* 津波高さに対する桁下空間の確保
  - \* 津波の影響を受けない構造的工夫
  - \* 上部構造が流出しても復旧が容易  
**（下部構造を守る）**
- ・観測された継続時間の長い海溝型地震動考慮



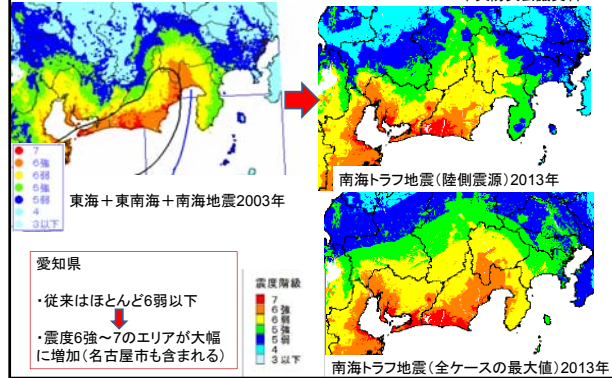
（レベル2タイプ1地震動として）（最大240秒）（約4倍）



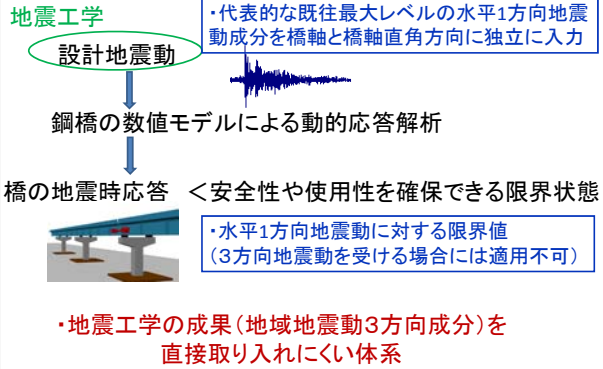
耐震設計の考え方の変化は  
基本的にはほとんどない

## 東日本大震災を境とした震度予測の変化

中央防災会議資料



## 鋼橋の耐震性能照査の現状



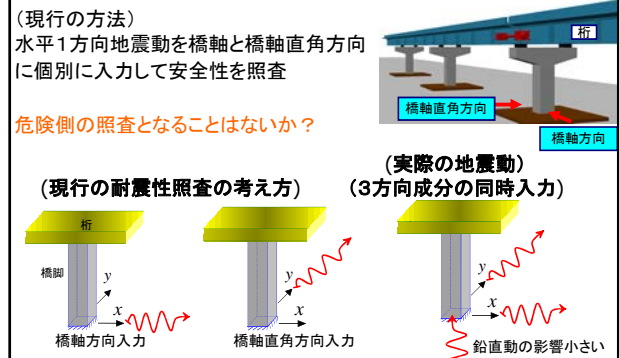
## 現行の耐震設計における問題点

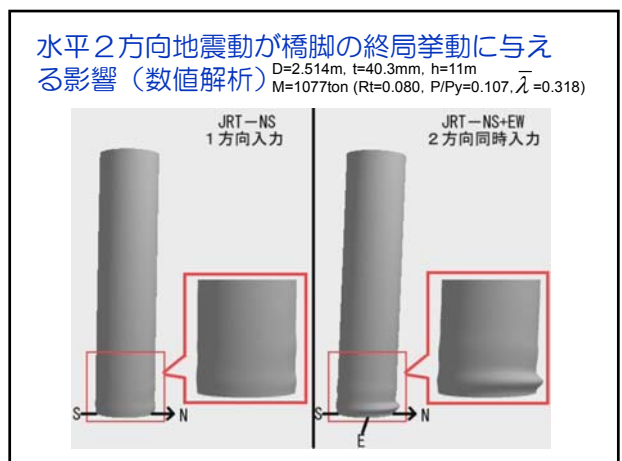
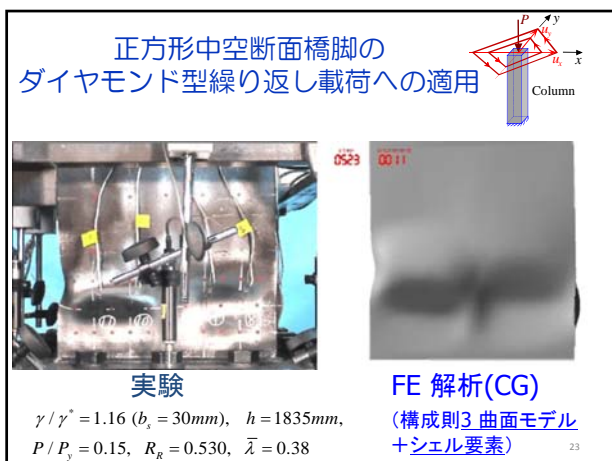
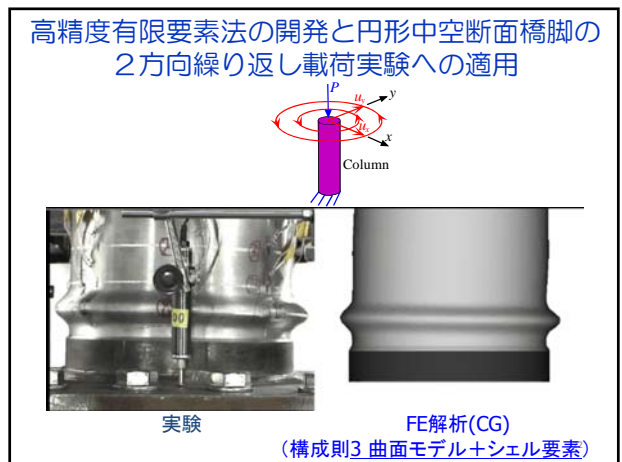
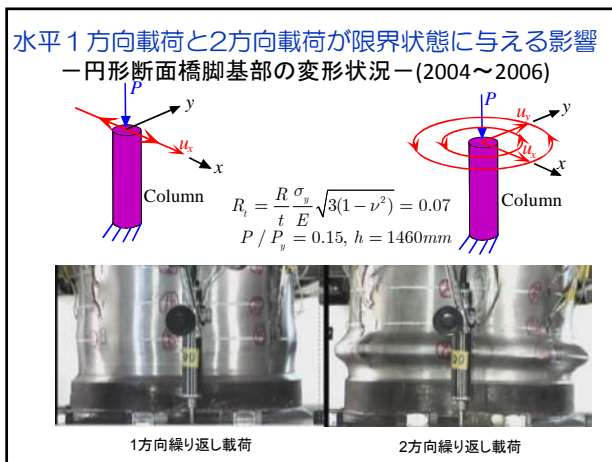
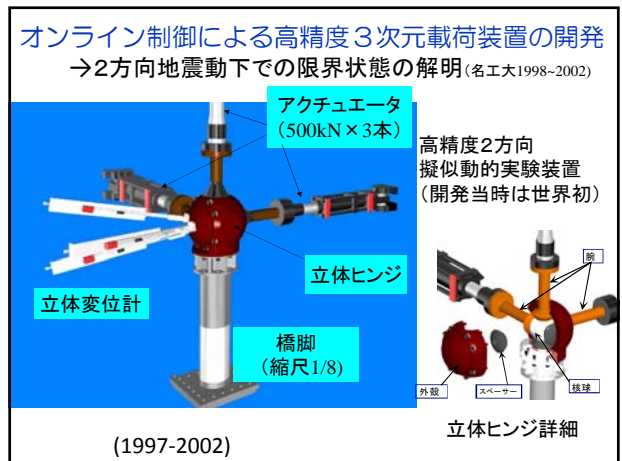
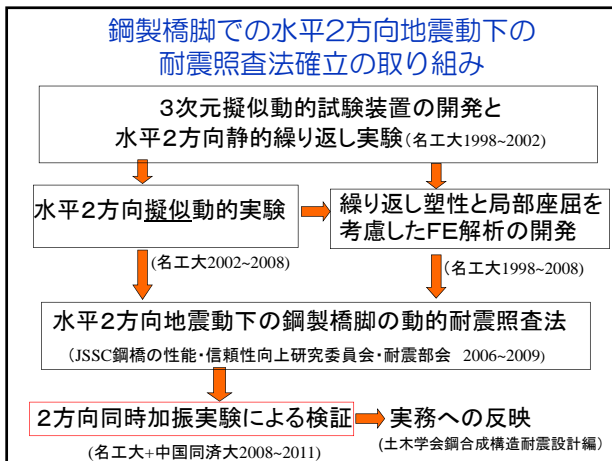
- ・過去最大レベルの水平1方向地震動成分による照査枠組み
    - 想定された地域地震動（サイト波、3方向成分（NS+EW+UD））に対応した照査ができない
  - ・設計地震動を超える地震動が作用する場合に対する考慮がない
    - 南海トラフ地震の極大地震動（中央防災会議2013）は設計地震動を超える場合がある？
- ↓
- 想定外の被害の発生

## 現行の耐震設計の課題への取組（名工大）

- ・水平2方向地震動成分（NS+EW）の同時入力を考慮した耐震照査法の検討（鉛直地震動の影響小）  
（鋼製橋脚、CFT橋脚対象）
- ・想定を超える地震動が作用した場合を崩壊制御設計の観点から検討  
（防災の観点ではなく減災の観点から致命的な崩壊の防止）

## 水平2方向地震動の連成を考慮した 鋼製橋脚の耐震照査法の検討





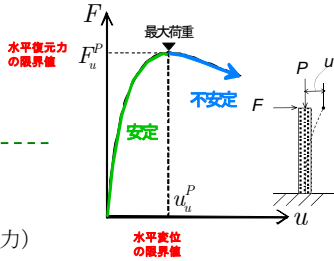


## 鋼製橋脚の安全性照査のための 限界状態

「道路橋示方書」での許容限界と照査法  
(水平1方向地震動成分入力条件下)

<変位照査法>

(応答値)  
 $u \leq u_u^P$  (限界変位)



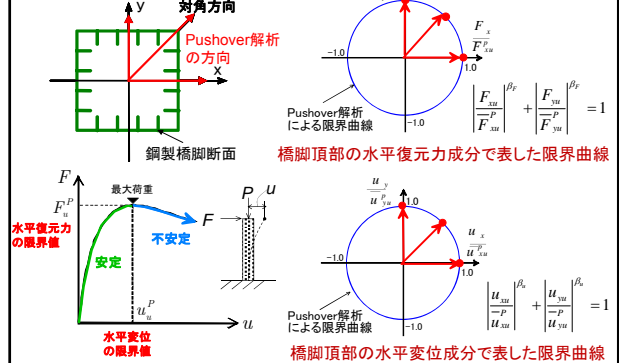
<耐力照査法>

(応答値)  
 $F \leq F_u^P$  (限界復元力)

道路橋示方書での許容限界

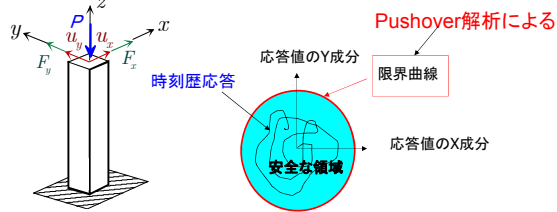
## 2方向成分を考慮した鋼製橋脚の限界曲線

各水平方向への橋脚のPushover解析



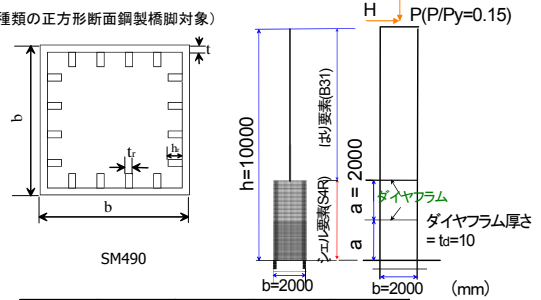
## 限界曲線を用いた水平2方向地震動下の 鋼製橋脚の動的安全性照査法

- **変位照査法:** 水平変位成分の限界曲線の内部に橋脚頂部変位応答が存在することを検証。
- **耐力照査法:** 水平復元力成分の限界曲線の内部に橋脚頂部の復元力応答が存在することを検証。



## 動的応答解析による妥当性の検証

(2種類の正方形断面鋼製橋脚対象)



橋脚	$R_g$	$\gamma/\gamma^*$	$R_d$	$\bar{\lambda}$
No.1	0.50	1.24	0.66	0.31
No.2	0.65	1.24	0.66	0.31

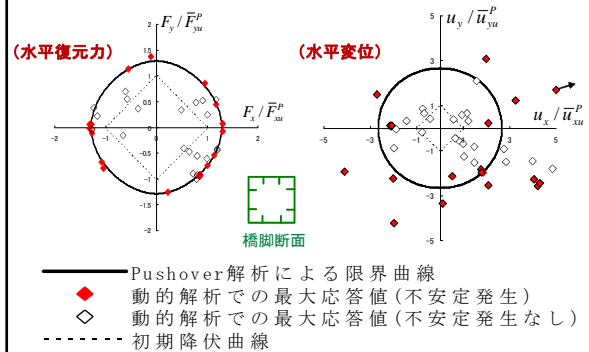
## 検証に用いた地震波

地震		観測点	ID
発生年	名称		
1983	日本海中部地震	津軽大橋周辺地盤上	tsugaru
1995	兵庫県南部地震	神戸海洋気象台地盤上	JMA
		JR西日本鷹取駅構内地盤上	JRT
	東神戸大橋周辺地盤上	HKB	
1999	ChiChi地震 (台湾)	PEER 草嶺	CHY080
2003	十勝沖地震	K-Net 直別	HKD086
2004	新潟県中越地震	K-Net 小千谷	NIG019

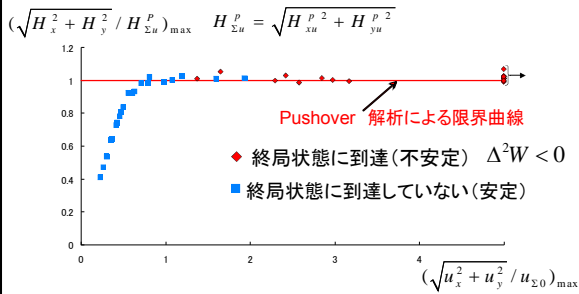
各種海溝型、直下型

加速度振幅の増幅: 0.2~3.0

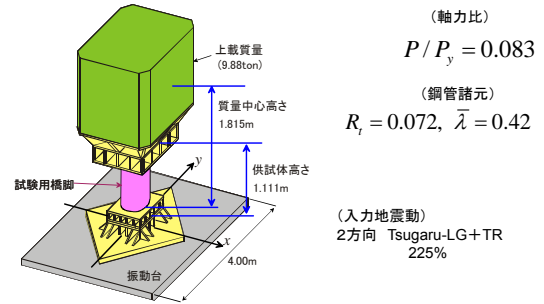
## 正方形断面橋脚の限界曲線と 水平2方向地震動下の最大応答値



### 水平復元力が限界曲線近傍での橋脚の応答



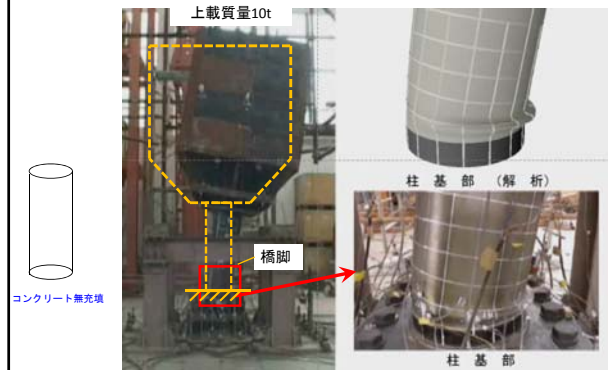
### 単一橋脚の3次元加振試験によるFE解析と限界曲線の検証



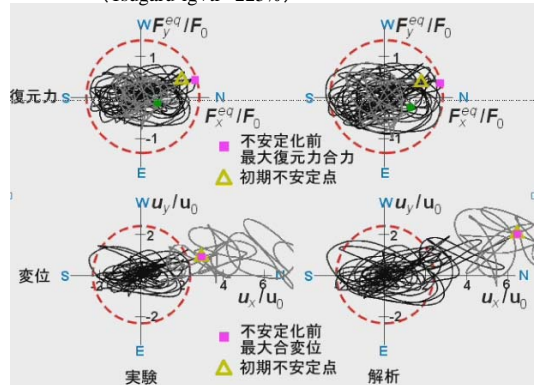
### 3次元6自由度振動台による橋脚の加振実験のセットアップ状況(同済大学)



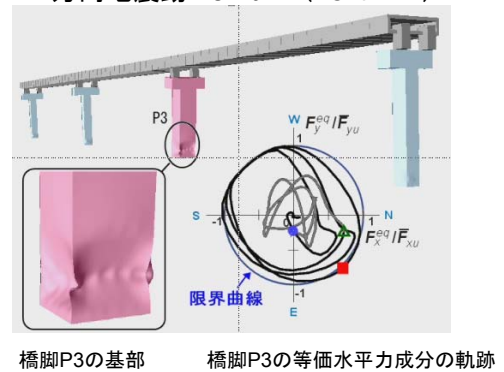
### 中空円形橋脚の水平2方向加振実験とFE解析の比較 E2 供試体 (Tsugaru-lg+tr 225%)



### 復元力成分による限界曲線の妥当性の検討 円形中空断面橋脚 水平2方向入力 (Tsugaru-lg+tr 225%)



### 高架橋全体系と橋脚 P3 の終局挙動 2方向地震動1.0 x JRT (NS + EW)

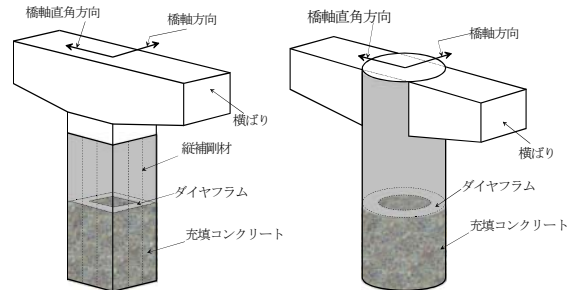


## 水平2方向地震動の同時入力を考慮した鋼製橋脚の動的安全性照査法のまとめ

- 高架橋の場合は鉛直地震動の影響は小さい
- 構成則に3曲面モデルを用いたシェル要素によるFE解析は橋脚の終局挙動を精度よく解析可能
- 橋脚頂部の2方向復元力成分で表した限界曲線を用いた照査により耐震安全性の照査が可能

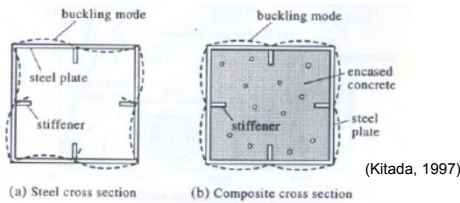
## コンクリート充填による耐震性能向上とそのメカニズム

コンクリート部分充填橋脚=CFT橋脚

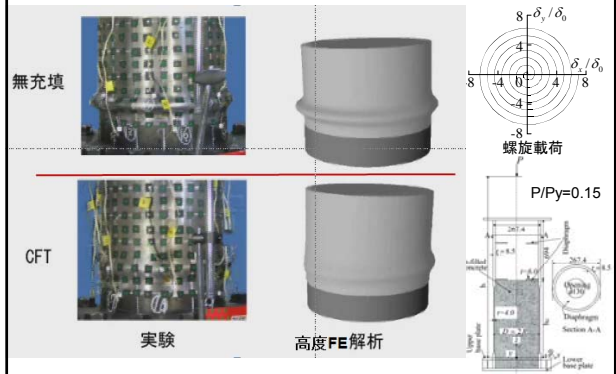


## 従来の考え方

- 鋼・コンクリートの合成効果による強度・剛性の向上
  - 鋼管+ダイヤモンドの拘束効果で充填コンクリートの強度向上
  - 鋼管の局部座屈変形の防止効果による変形能の向上
- 充填コンクリートによる内側への変形防止  
外側への変形は防止されない！



## 水平2方向繰り返し荷重による局部座屈挙動



## 局部座屈変形の抑制・自己修復メカニズム

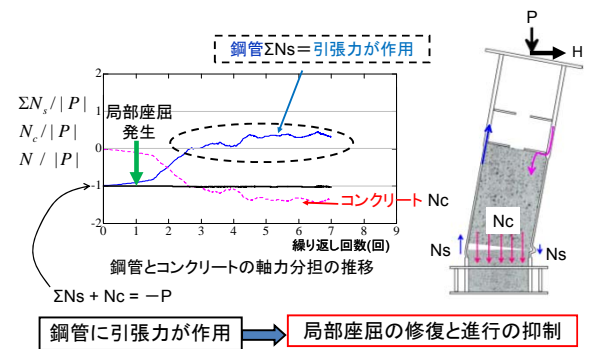
(後藤ら, 2013)

<鋼管の局部座屈発生後>

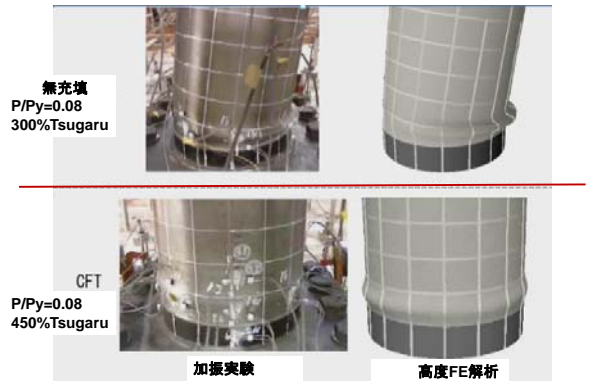
鋼管: 局部座屈後は圧縮力はほとんど負担できない。引張力が作用し局部座屈変形を修復・進展抑制。

充填コンクリート: 圧縮力の大部分を支持、引張り力は負担しない

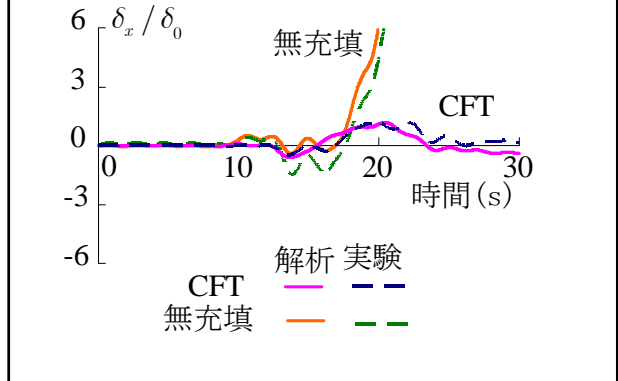
## CFT橋脚に作用する軸力Pがコンクリートと鋼管にどのように分担されているか？



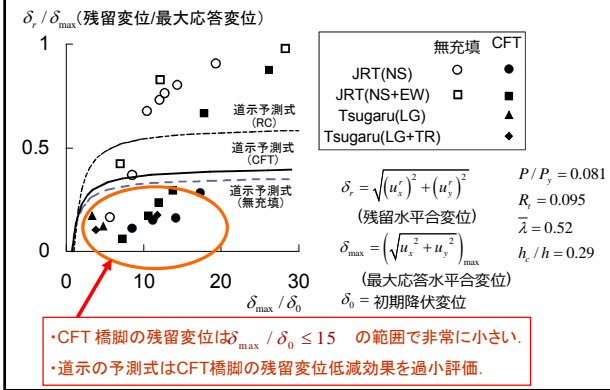
### 加振実験での局部座屈挙動



### 加振実験での橋脚頂部の振動中心(≈残留変位)の推移



### CFT橋脚の大幅な残留変位低減効果



### 想定を越える地震動が作用した場合に対応する崩壊制御設計の検討

地震動が設計地震動上回る場合

↓

現在の設計では正確な崩壊パターンが未知

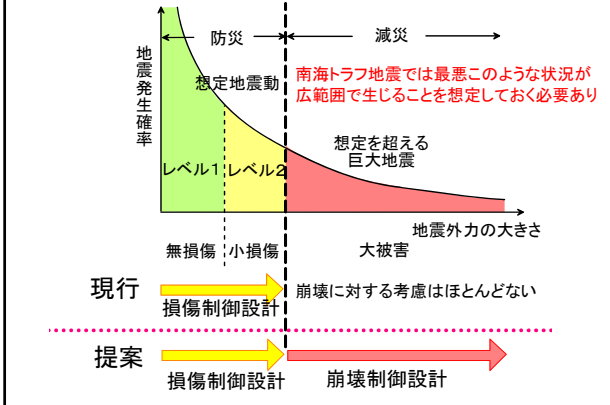
\* 大規模な崩壊(進行性破壊)      \* 比較的小規模な損傷

差が大きい

\* 大規模な破壊や致命的な破壊の防止(崩壊制御)が必要

RCのビルツ橋

### 現行の耐震設計への崩壊制御設計の導入

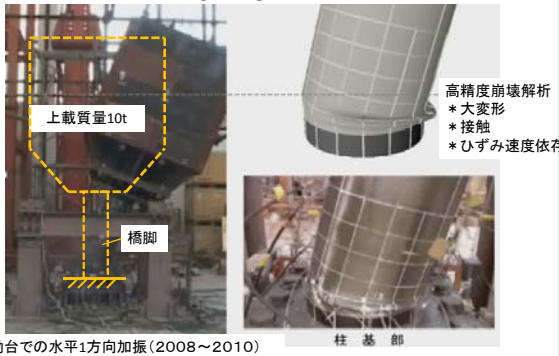


### 崩壊制御設計での課題

- 崩壊挙動の予測解析の開発と整備
  - 動的な大変形挙動を伴うほとんど扱われたことのない領域の解析
- 崩壊挙動の実態解明
  - 橋梁の倒壊現象がほとんど観察されていない、実験も容易でない。



振動台での単一橋脚の倒壊実験と予測解析の開発  
(Tsugaru-Ig 300%)



振動台での水平1方向加振(2008~2010)

部材破断に起因したトラス橋の進行性破壊の予測解析

今後急増する腐食した老朽化橋梁が主な対象

単一部材の破断が全体系の崩壊への動的伝播

(地震時にはより発生しやすい)



鋼トラス橋の斜材破断  
(木曾川大橋・2007)



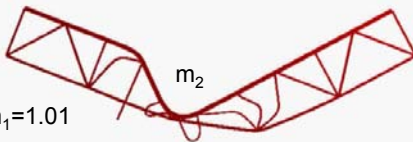
鋼トラス橋の崩壊事故  
(米国ミネソタ州・2007)

上路式トラス橋の進行性破壊解析

崩壊しないケース(崩壊制御ではこのような設計が必要)



崩壊するケース



$m_2/m_1=1.01$

都市内高架橋の進行性破壊を解明する実験研究

鋼製橋脚とCFT橋脚単柱の崩壊挙動の解明

(1998~2011)



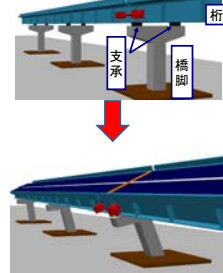
ゴム支承の破壊挙動の解明

(2012~)



高架橋システムの崩壊挙動解明  
(橋脚、支承、上部構造の相互作用)

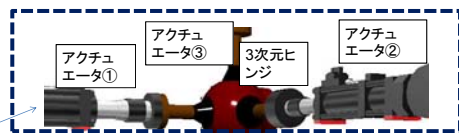
(2012~2014)



進行性破壊

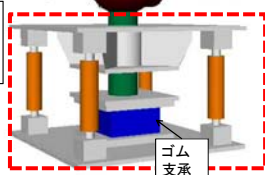
ゴム系支承の水平2方向荷重実験装置の開発

ゴム支承単体の多方向荷重下での破壊挙動の検討

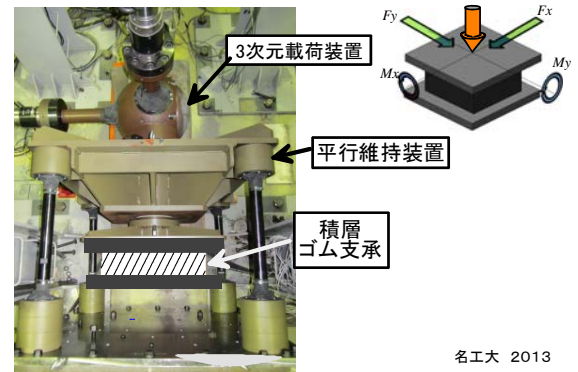


既存の3次元  
荷重装置  
(名工大導入 2004年)

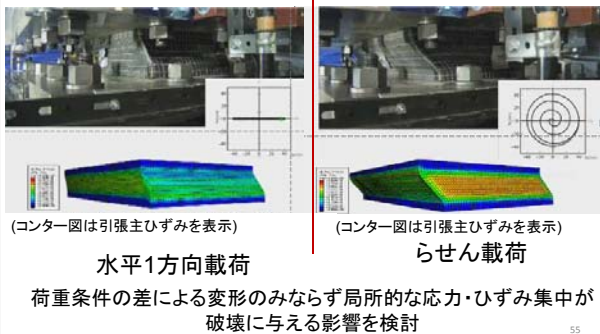
水平維持装置  
(名工大導入 2012年)



ゴム系支承の水平2方向荷重実験装置



## ゴム支承の実験結果と超弾性モデルによるFE解析



## 2径間連続高架橋模型(1/7)の加振実験概要

＜マルチ振動台(同済大)を用いた水平2方向同時加振実験＞

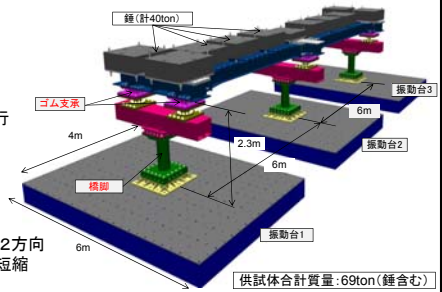
### \* 軸力比

中央橋脚 20%  
端部橋脚 12%

中央橋脚の損傷先行

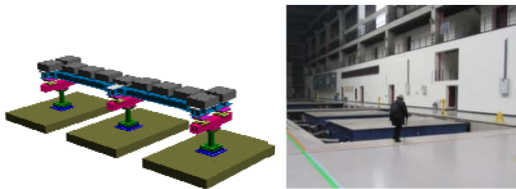
### \* 地震動

Tsugaru (増幅) 水平2方向  
相似則により時間軸短縮



## 2径間連続高架橋模型の加振実験の目的

1. 橋脚の進行性破壊現象の再現と解明
2. 終局→倒壊時の橋脚、支承、桁などの連成挙動解明
3. 高架橋内でのゴム支承の挙動解明
4. 高架橋の解析モデルの高精度化のためのデータ収集



4機の振動台からなるマルチ振動台MTS(同済大)

## 2径間連続高架橋模型の加振実験ケース

- 橋脚(5種類)
  - a) 無充填(円形断面, 正方形断面)
  - b) コンクリート充填(CFT)(円形断面, 正方形断面)
- ゴム支承  
各橋脚の種類ごとに準備
- 上部構造+橋脚横ばり  
共通

## 高架橋模型の仮組み立て(国内) (2013・4~5)



ベースの設置



橋脚・支承・  
6分力計の設置



上部構造の設置

## 同済大学マルチ振動台での現在の作業風景 2013/11



上部構造の組み立て



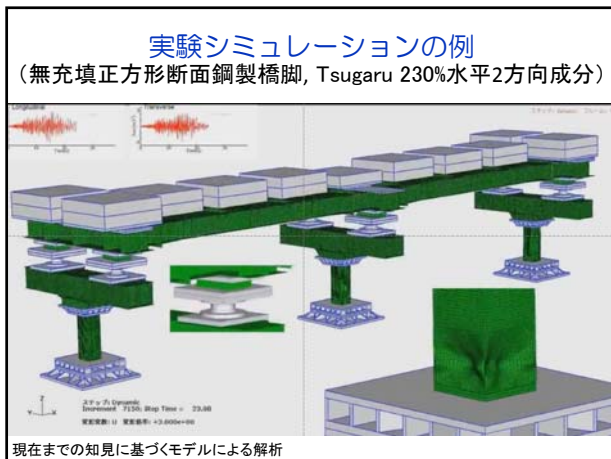
マルチ振動台



マルチ振動台上の測量



基準橋脚設置



## 今後の予定(2013年度)

- 4種類の橋脚を持つ連続高架橋の加振実験・崩壊実験  
2013年 10月中旬～2014年 2月末

以下のサイトで実験内容と結果の概要逐次公開  
(名工大の耐震工学・構造工学研究室)

<http://kozo4.ace.nitech.ac.jp/Shaking-Table-Test/>

## まとめ

- 過去の大震災を教訓にしたわが国の耐震設計は高いレベルにあるが、将来の極大地震に対応するための課題は多く残っている。
- 想定された3方向地震動成分(サイト波)の同時入力に直接対応できる耐震性照査の枠組が必要である。
- 過去最大級の地震動に基づく現行の耐震設計(防災の観点からの損傷制御設計)のみではまた想定外の被害が発生する可能性がある。

➡ 減災の観点からの崩壊制御設計も必要