

第2回鋼構造イブニングセミナー  
鋼橋の耐震設計の基礎とその応用 (H16.11.4)

---

# 概 論



名古屋大学大学院工学研究科

宇佐美勉

# 内容

- ・大地震で鋼橋はどう壊れたか？
- ・どうすれば鋼橋は地震に強くなるかー 鋼製橋脚
- ・何が何処まで分かったかー 10年間の耐震技術の進展
- ・さらに勉強するために

# 大地震で鋼橋はどう壊れたか？

(阪神淡路大震災での鋼製橋脚の被災例)



**Tokyo Metropolitan Highway**

# Why Steel Bridge Piers ?

## *Advantages*

### **Compared with RC piers:**

- **Lighter** (1/5 of RC piers)
- **Shorter construction period needed**
- **Smaller area needed** (1/2 of RC piers)
- **More irregular shape**
- **Easier repairing and strengthening**
- **More reliable seismic performance**
- **Higher durability**

# Why Steel Bridge Piers ? (continued)

## *Disadvantages*

### **Compared with RC piers:**

- **More expensive initial cost**  
**(twice of RC piers)**
- **Maintenance**

# 阪神大震災での鋼製橋脚の被災のまとめ

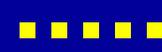
- a) 脚部の局部座屈 (写真1-1, 写真1-2)
- b) 脚部の局部座屈と全体座屈の連成 (写真1-3)
- c) ラーメン橋脚梁のせん断座屈 (写真1-4)
- d) 脚部の母材の破断 (写真1-5)
- e) 脚部の角溶接部の割れ (写真1-6)
- f) 脚基部とベースプレートの溶接部の割れ (写真1-7, 写真1-8)
- g) 不静定構造物の場合の隅角部の溶接割れ (写真1-9)
- h) 橋脚定着部のアンカーボルトの破断あるいは過度の伸び (写真1-10)
- i) フーチングの損傷
- j) 完全に圧壊した橋脚 (写真1-11)



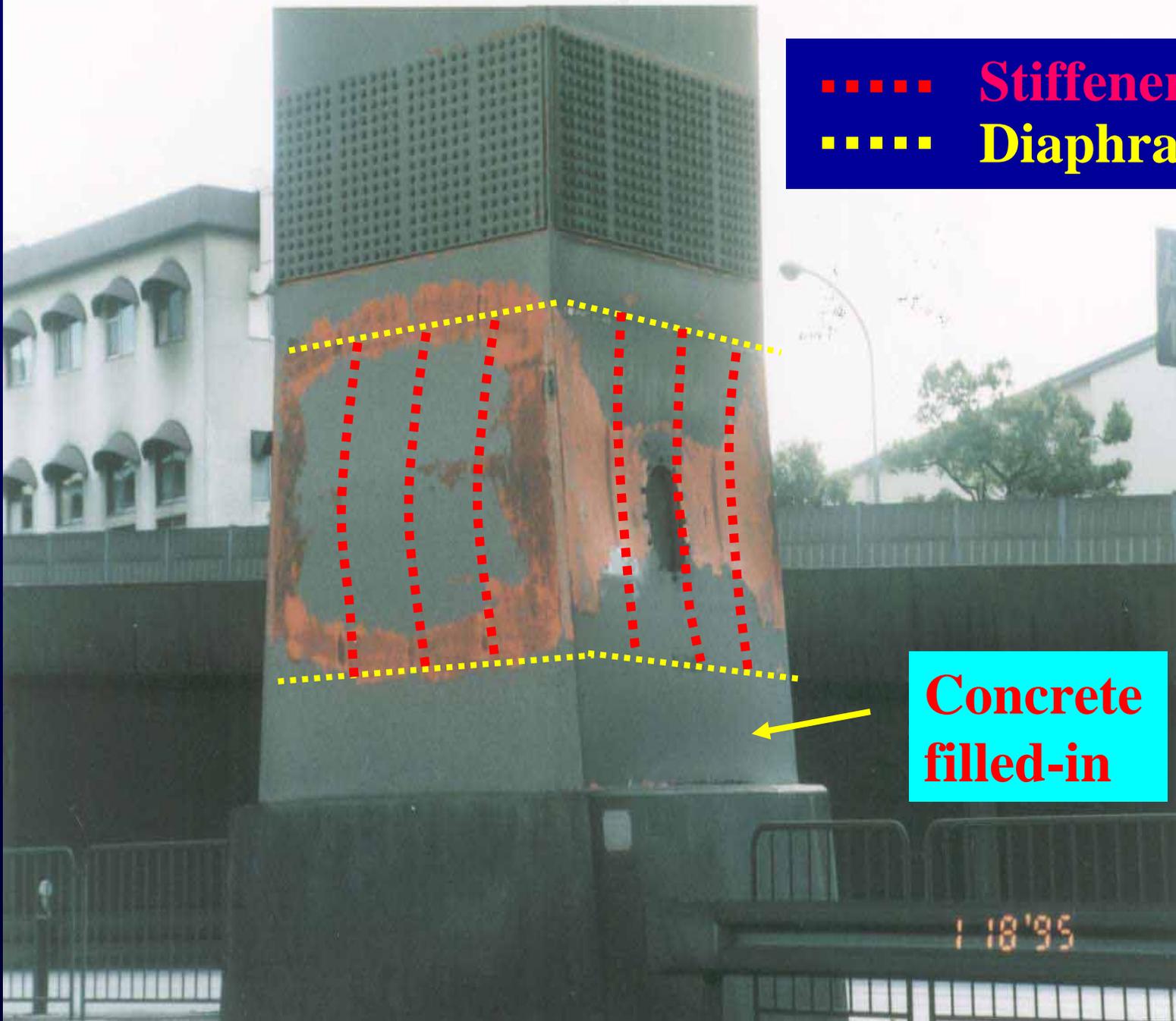
**Local Buckling  
(Stiffened Box Column  
in Frame-type Steel Pier)**



**Stiffeners**



**Diaphragms**



**Concrete  
filled-in**

1 18 '95

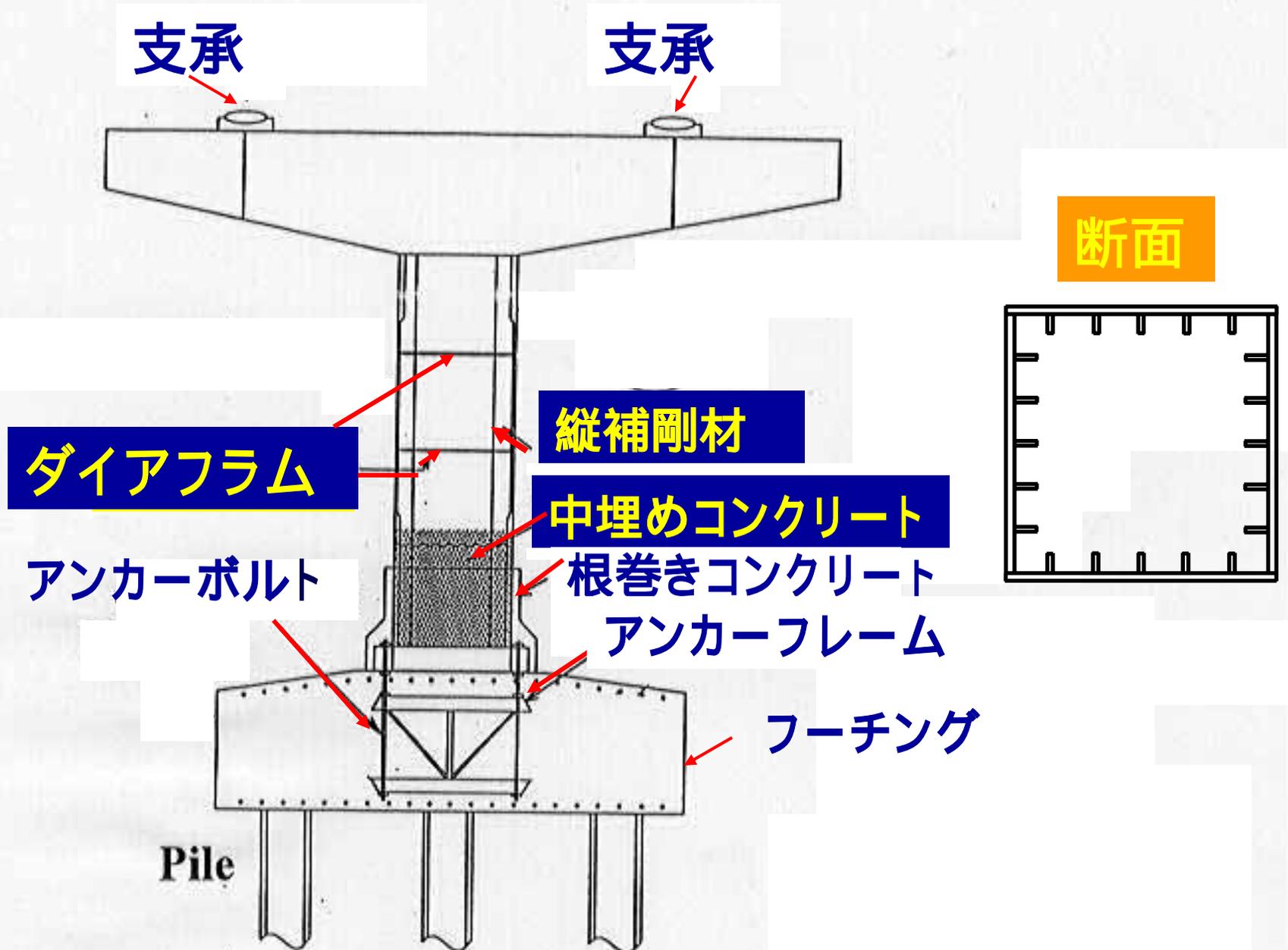


コンクリートなし



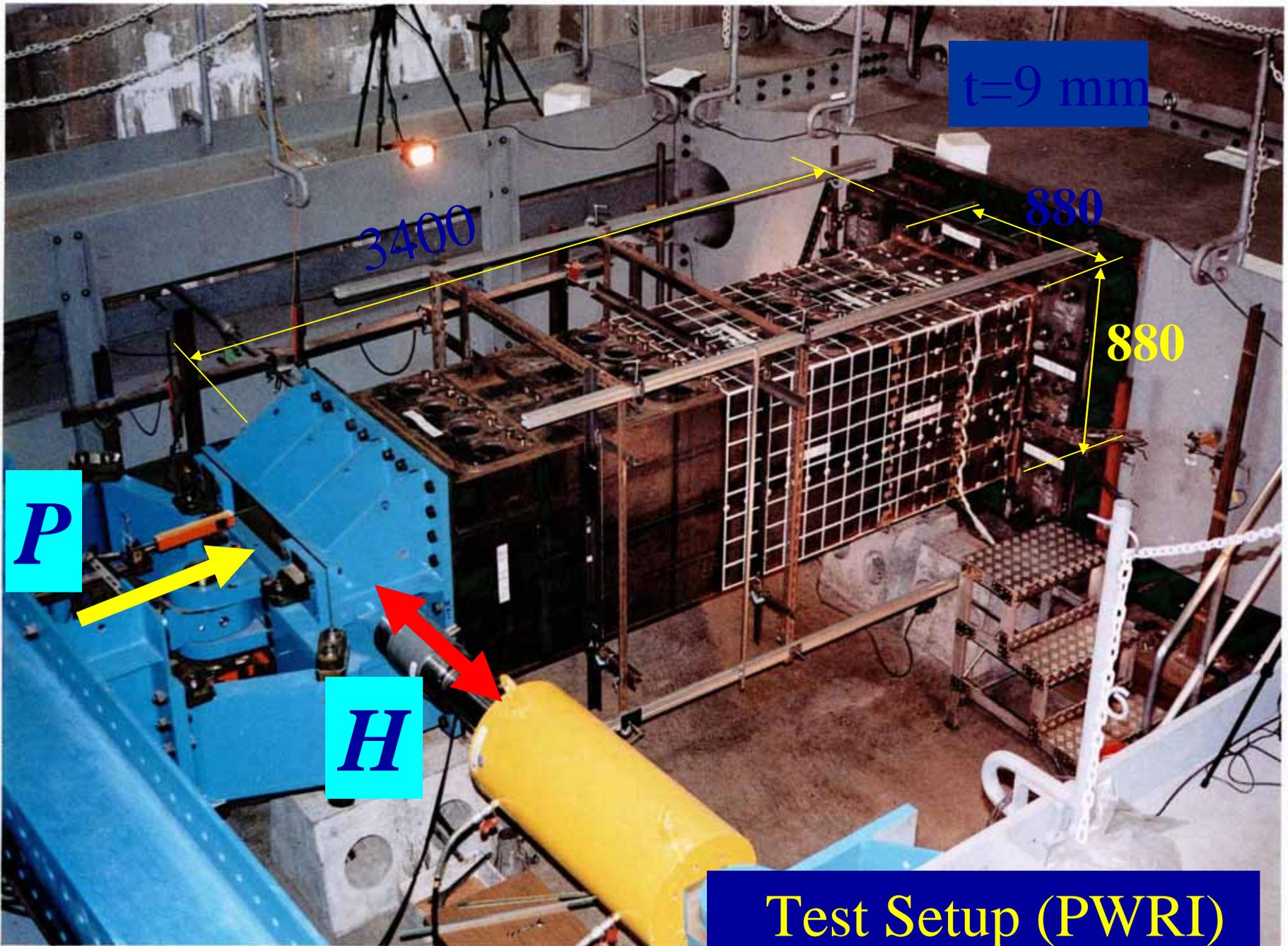
コンクリート充填

# 箱形断面鋼製橋脚

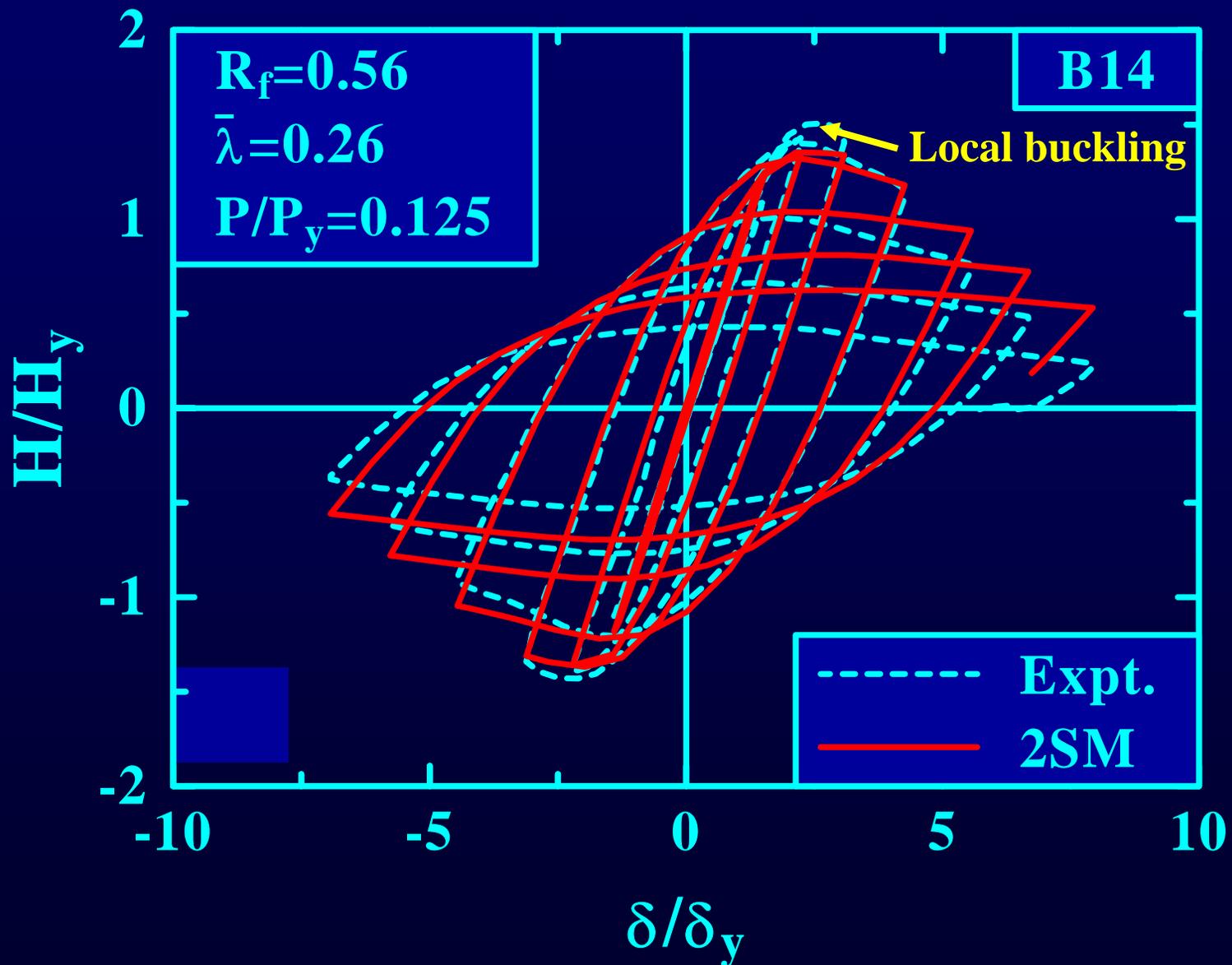


# 橋脚内部



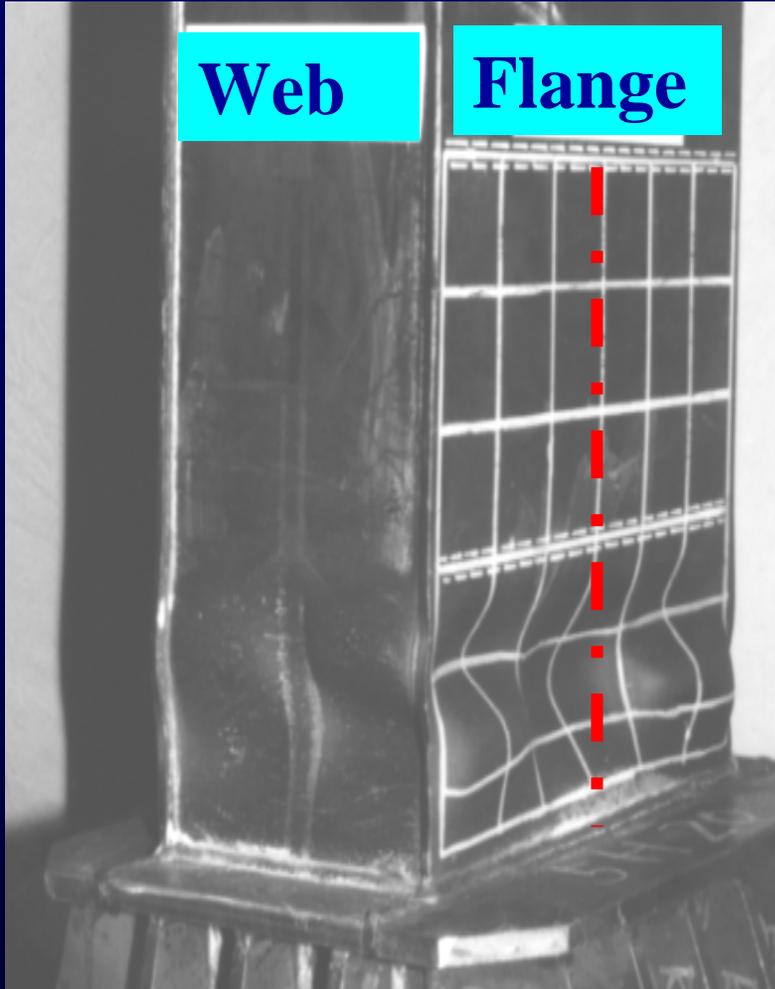


# Comparison between Test and Analysis

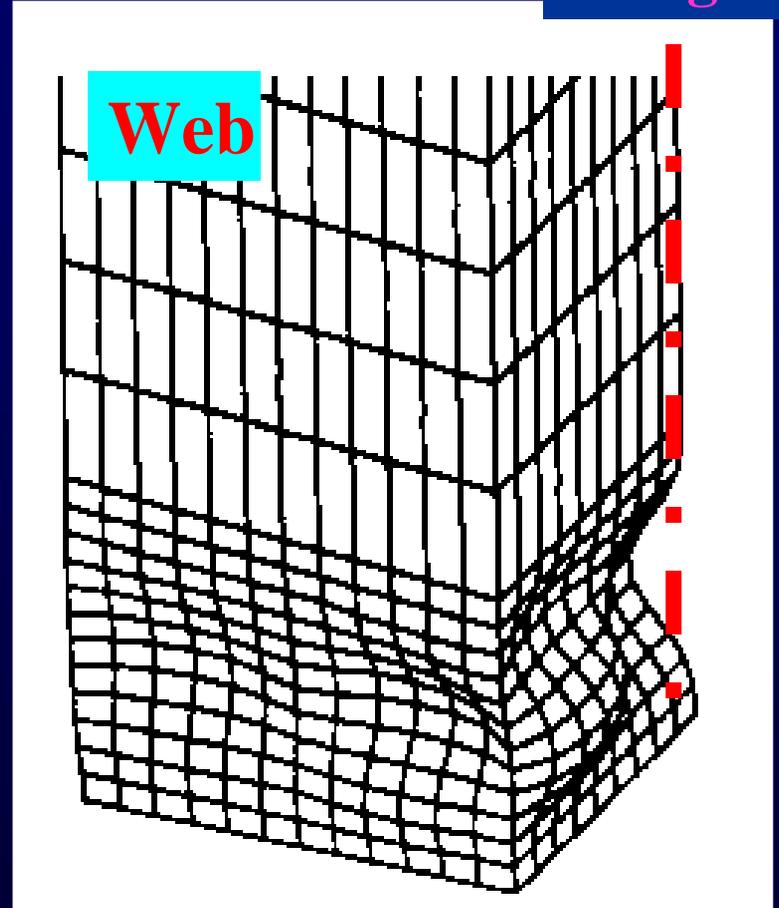


# Comparison of Buckling Modes

Flange C.L.



Test

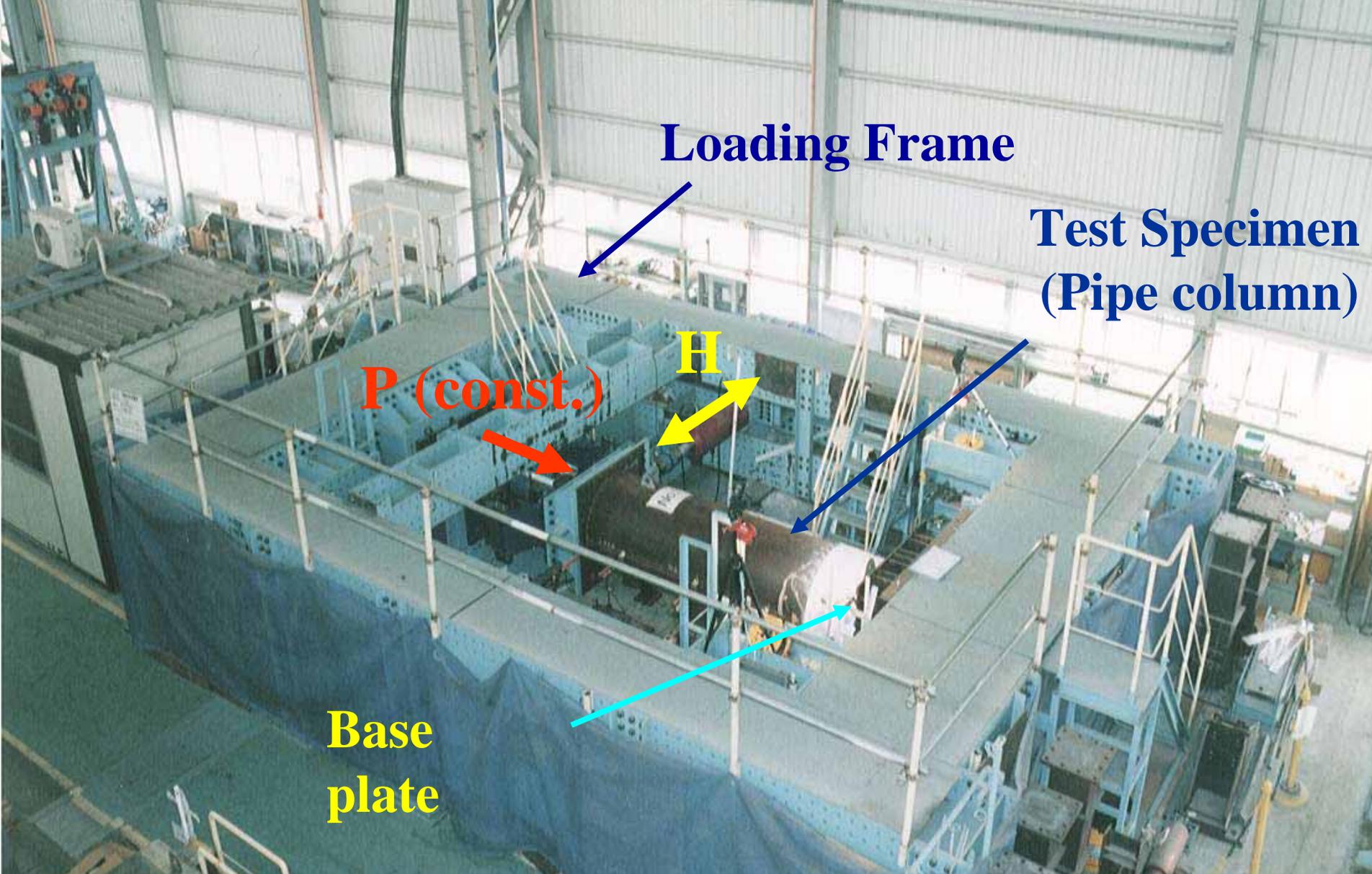


Analysis



**“Elephant-foot bulge”**

**Local Buckling  
(Cantilever Pipe  
Column)**



**Loading Frame**

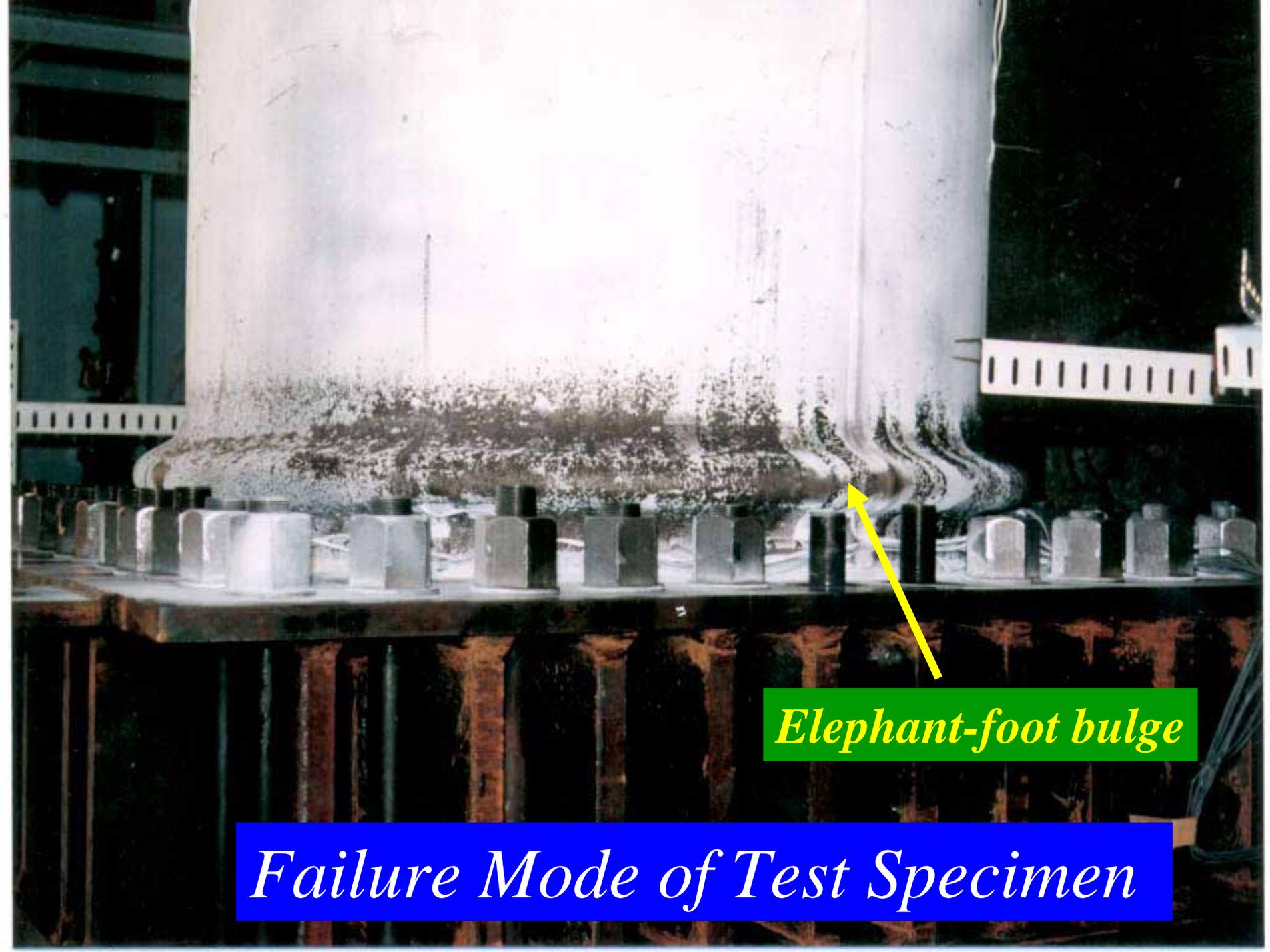
**Test Specimen  
(Pipe column)**

**P (const.)**

**H**

**Base  
plate**

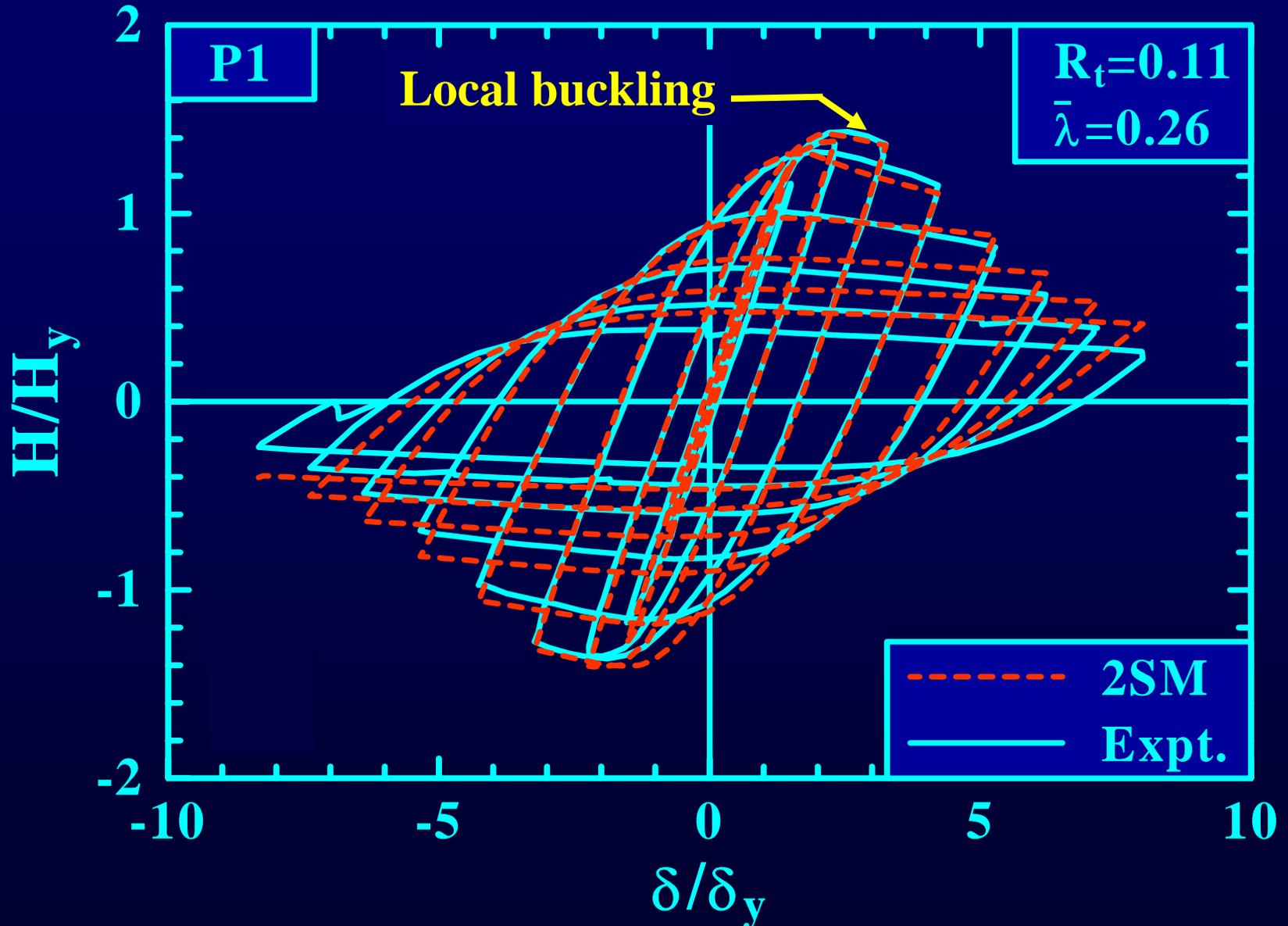
**Cyclic Loading Test of Cantilever Pipe Column  
(Nippon Steel Corporation)**



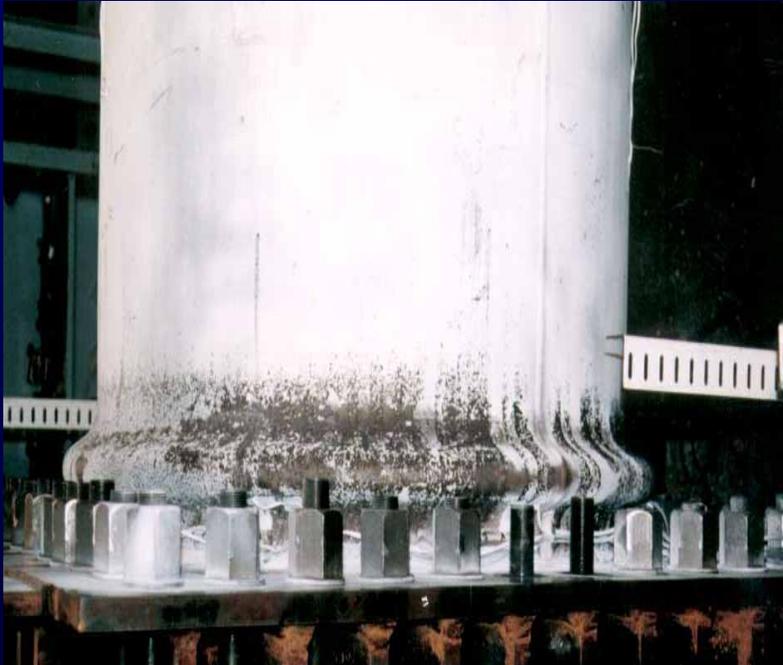
*Elephant-foot bulge*

*Failure Mode of Test Specimen*

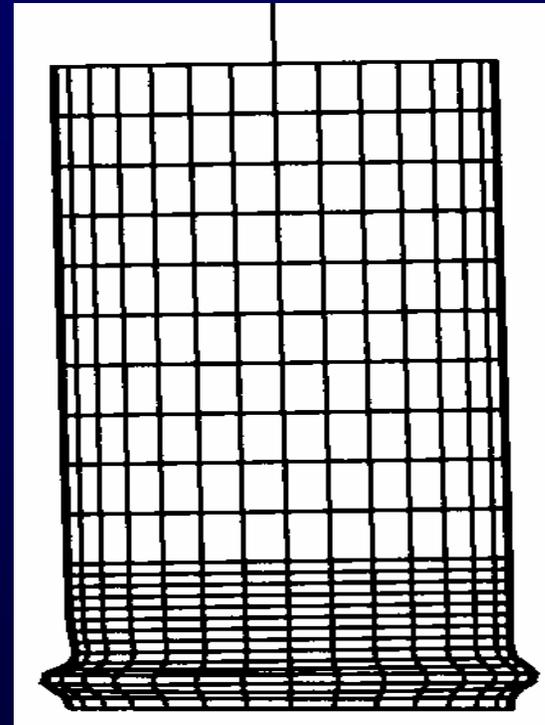
# Comparison of Hysteretic Curves



# Comparison of Buckling Modes



**Test**



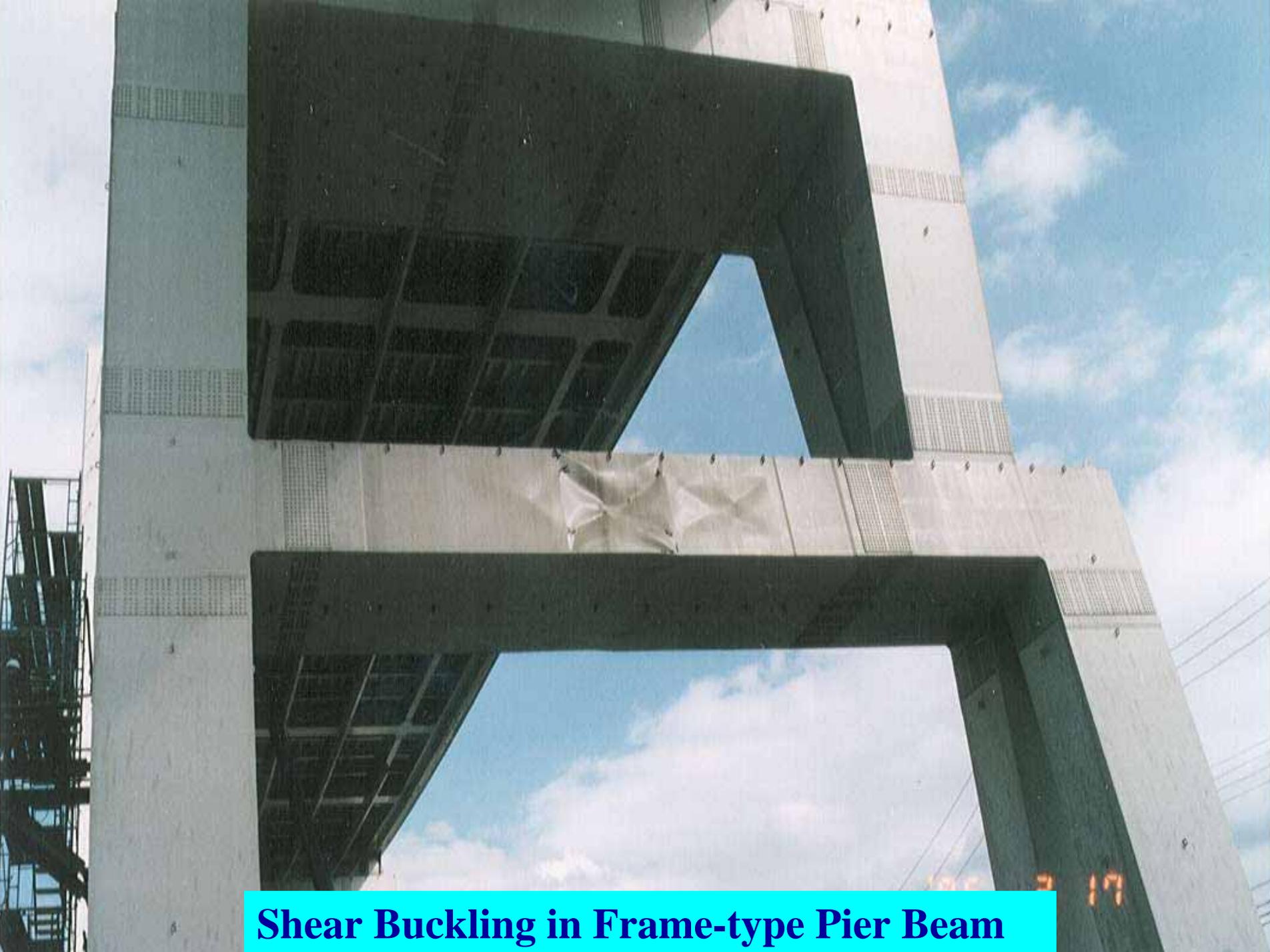
**Analysis**



*Reinforcing members*

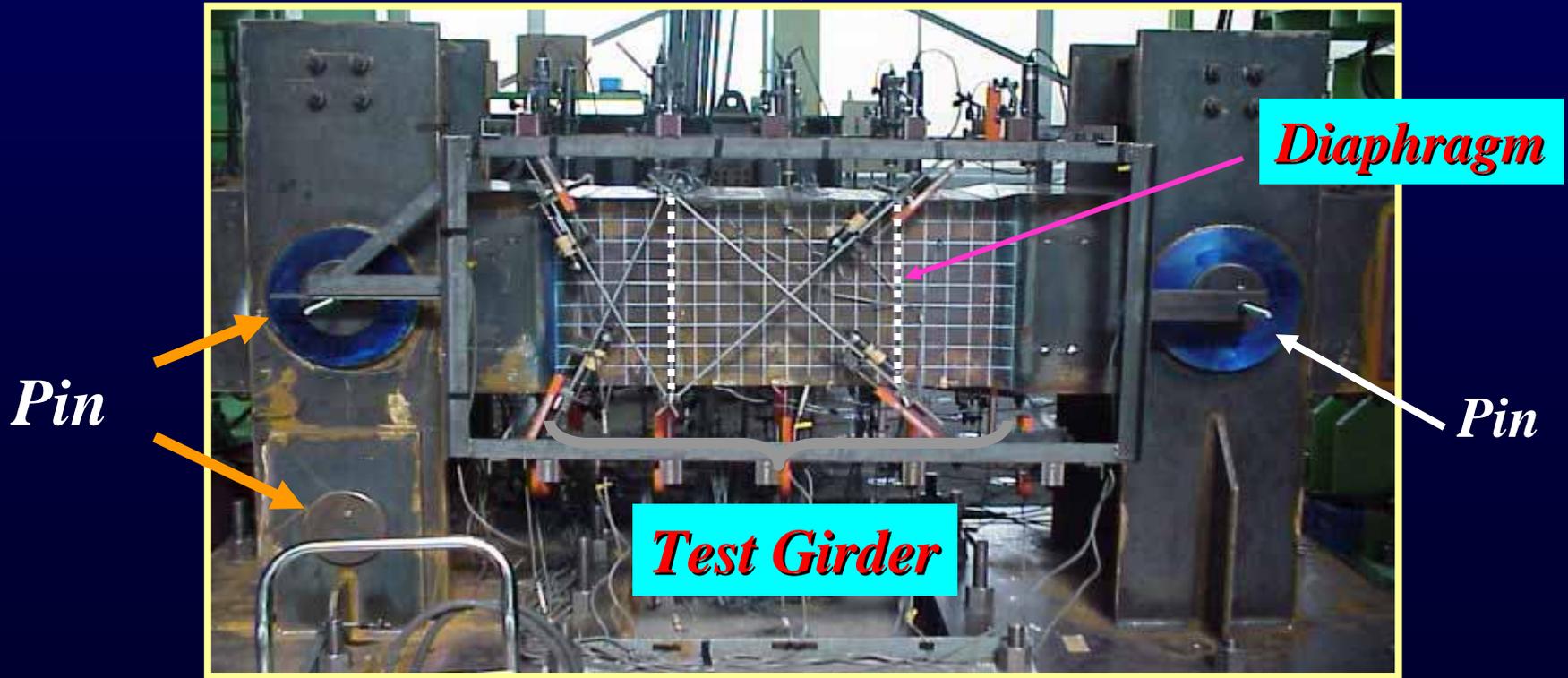
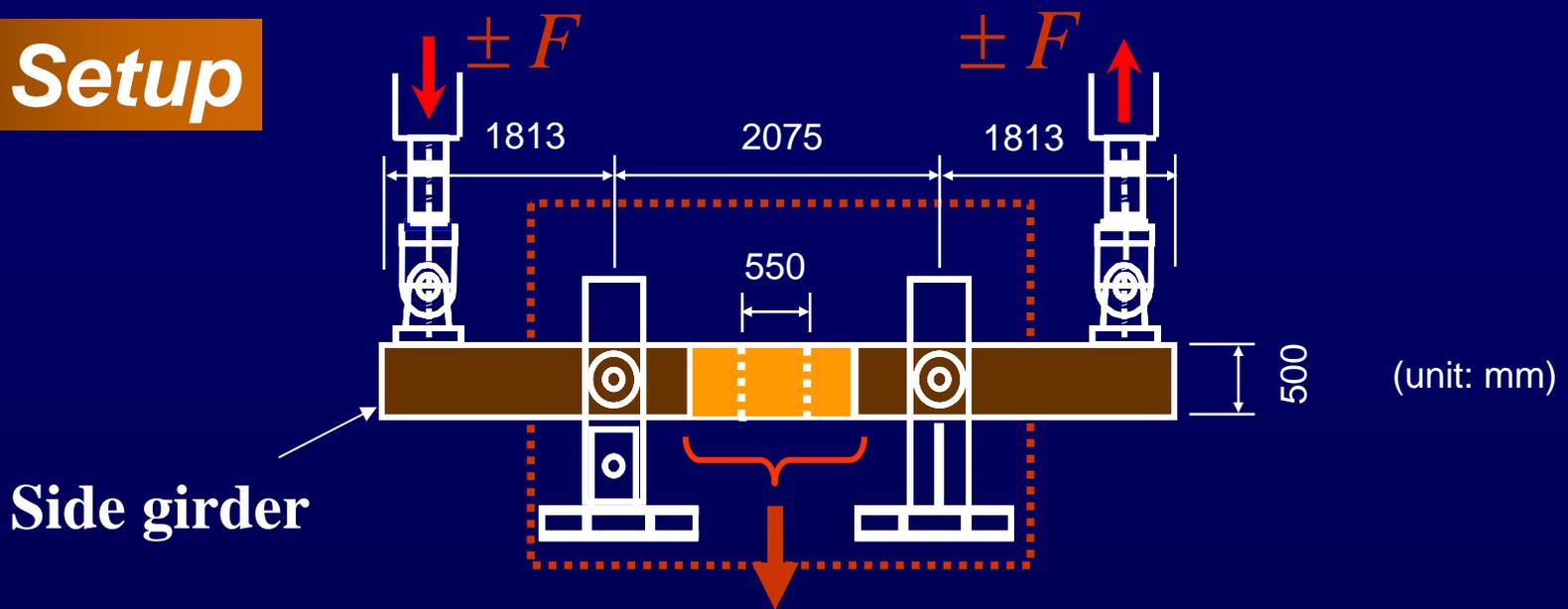
*Local buckling*

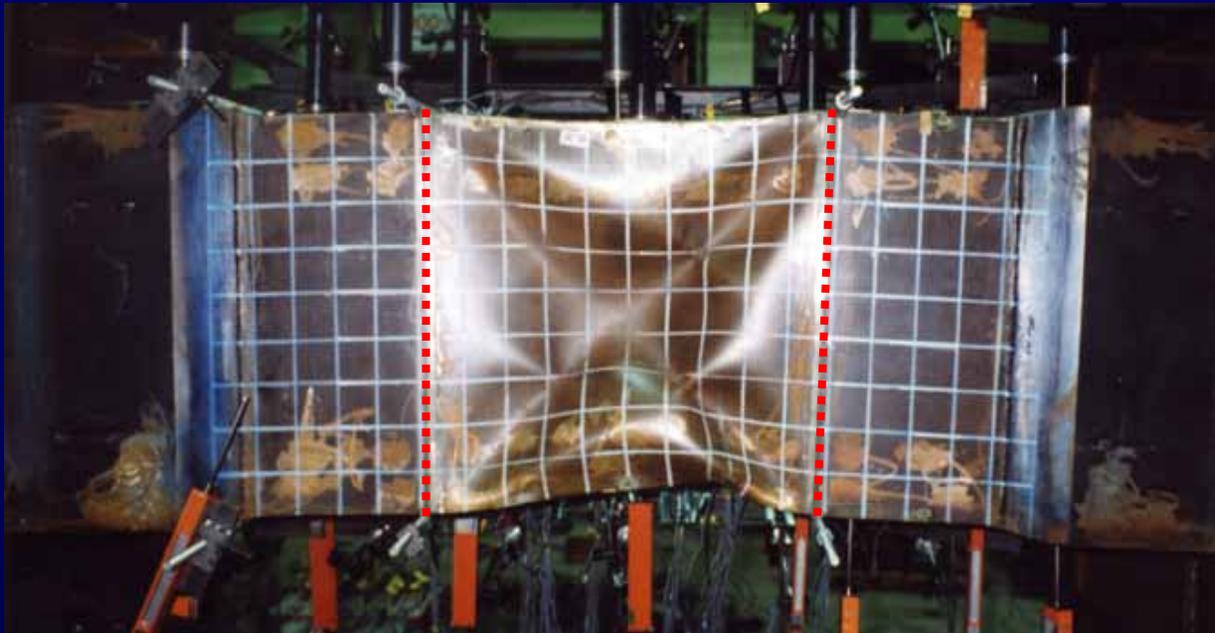
**Local and Overall  
Interaction Buckling  
(Pipe Section)**



**Shear Buckling in Frame-type Pier Beam**

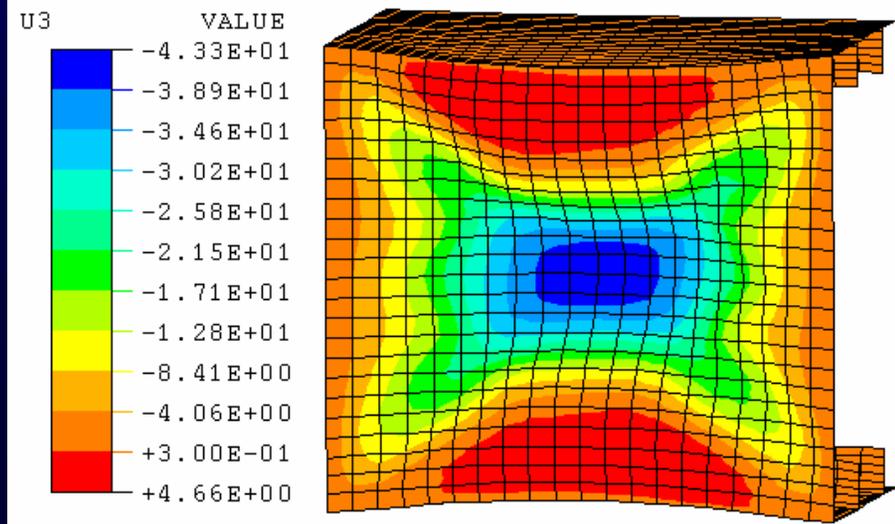
# Test Setup



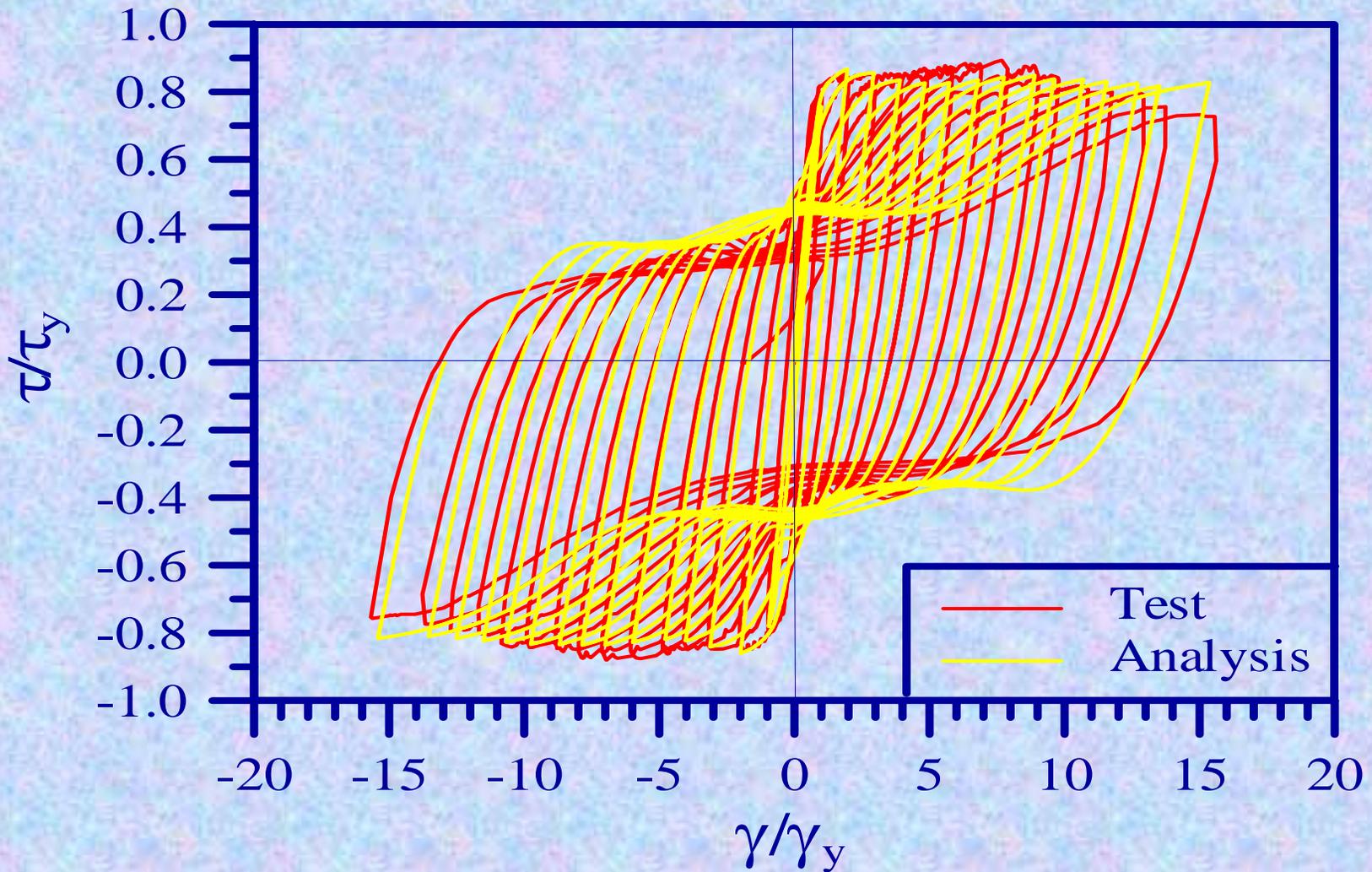


**Test**

**Analysis**



# Comparison of Hysteretic Curves



# Crack in Pipe-section Pier



UC70-25-5 [3]

**Crack**



02  
12  
18

02  
12  
18

X

SCR45-32-5BH

Incremental Amplitude Test  
R = 0.2 P<sub>u</sub>  
After Cooling to 10 P<sub>u</sub>

**Crack**



5 18  
1914

Incremental Amplitude Test

$$P = 0.2 P_y$$

After Cycling at  $10 \delta_{y0}$

**Crack**



5-1-5

**Crack**



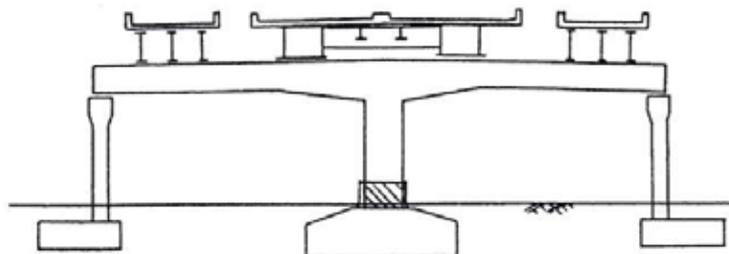
123'95



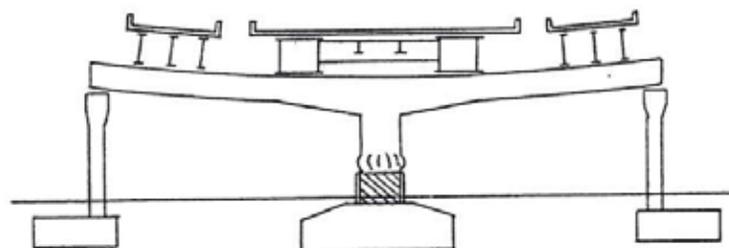


**Failure of Steel Box Pier due to Corner Weld Rapture**

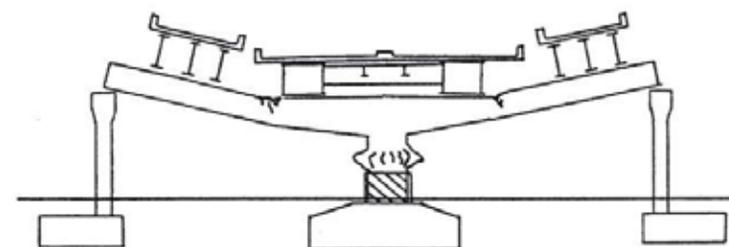
①地震前の健全な状態



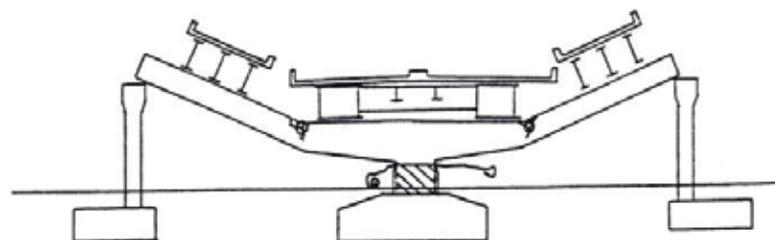
②鋼製柱の基部座屈



③鋼製柱の基部座屈、横ばり座屈



④鋼製柱の崩壊、横ばりの沈下



# まとめ

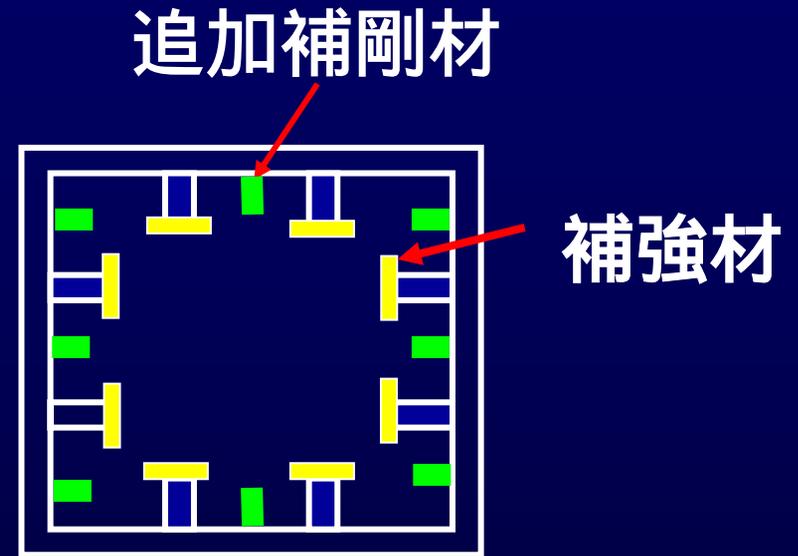
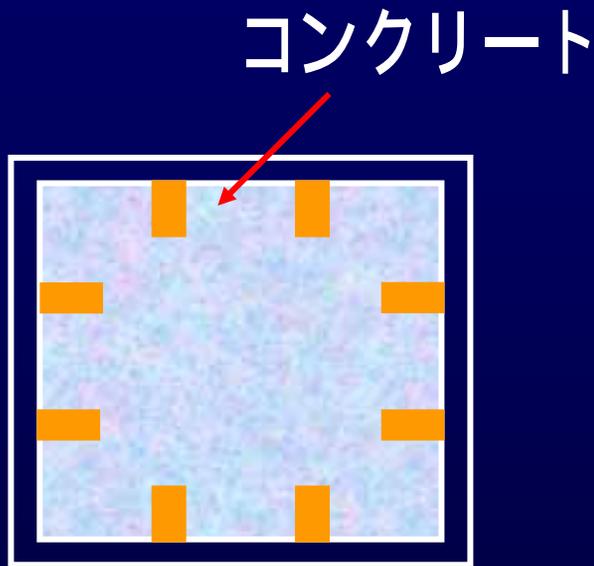
## 鋼製橋脚の損傷モードの分類

- 1) 座屈に起因する損傷
- 2) 低サイクル疲労に起因する損傷

どうすれば鋼橋は地震に強く  
なるか？

— 鋼製橋脚 —

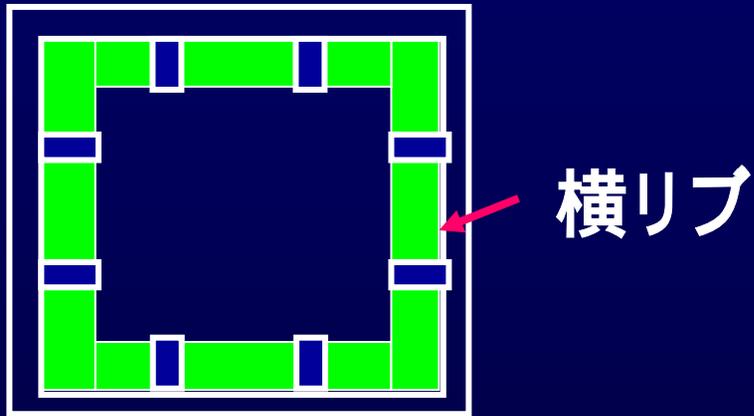
# 鋼製橋脚補強方法(1)



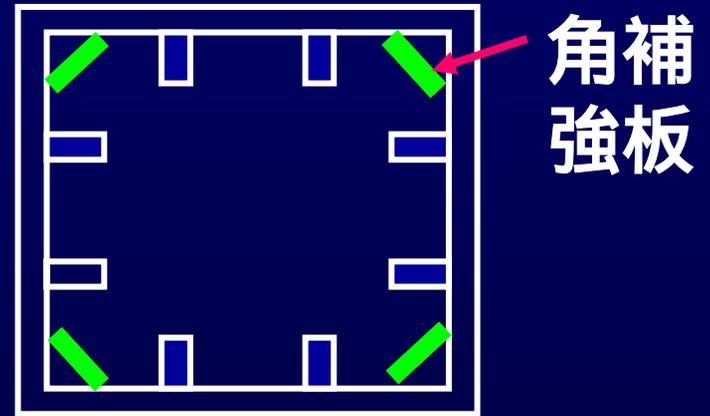
(a) コンクリート  
部分充填

(b) 縦補剛材補強  
あるいは追加

# 鋼製橋脚補強方法(2)



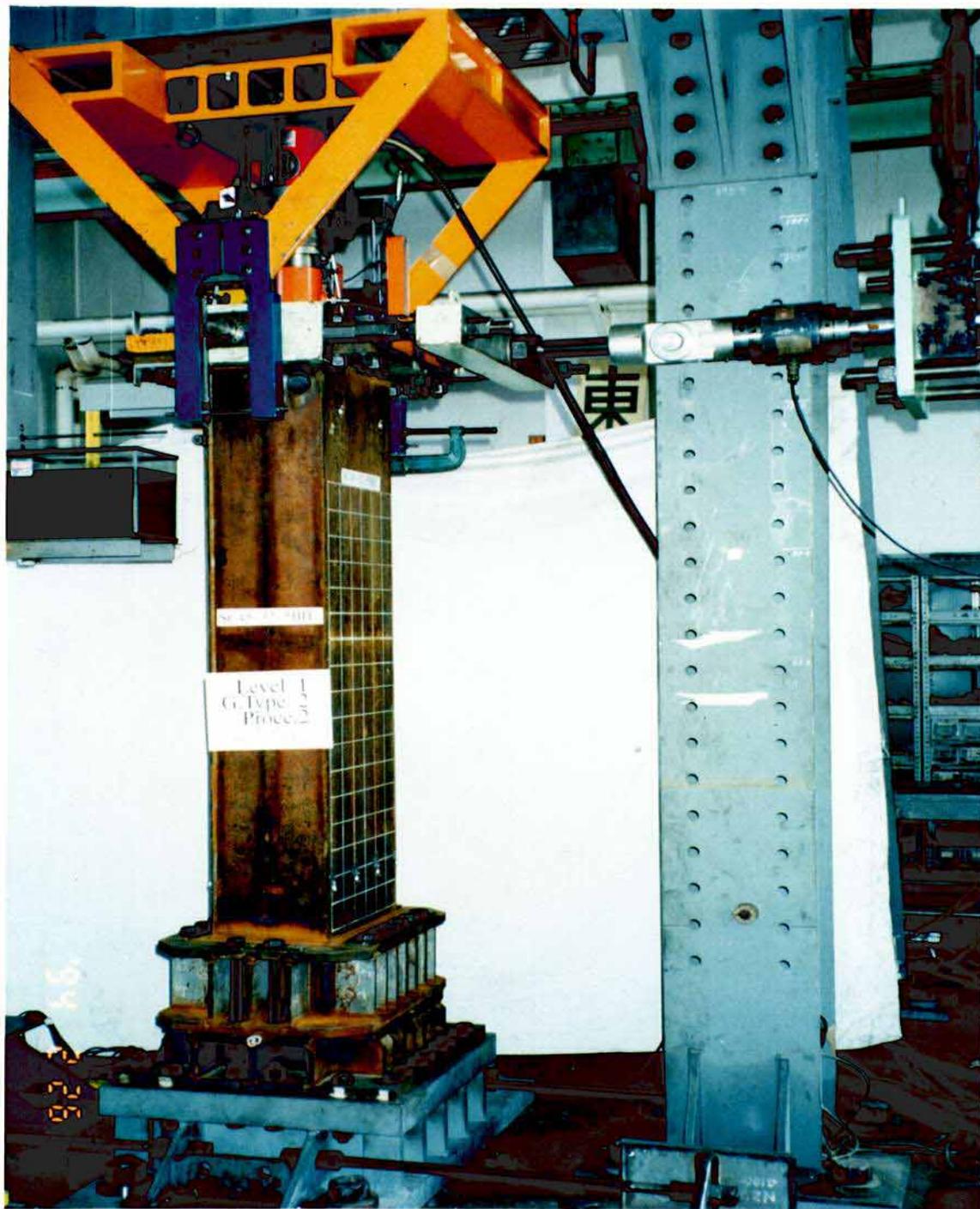
(c) ダイアフラム間に横リブ追加



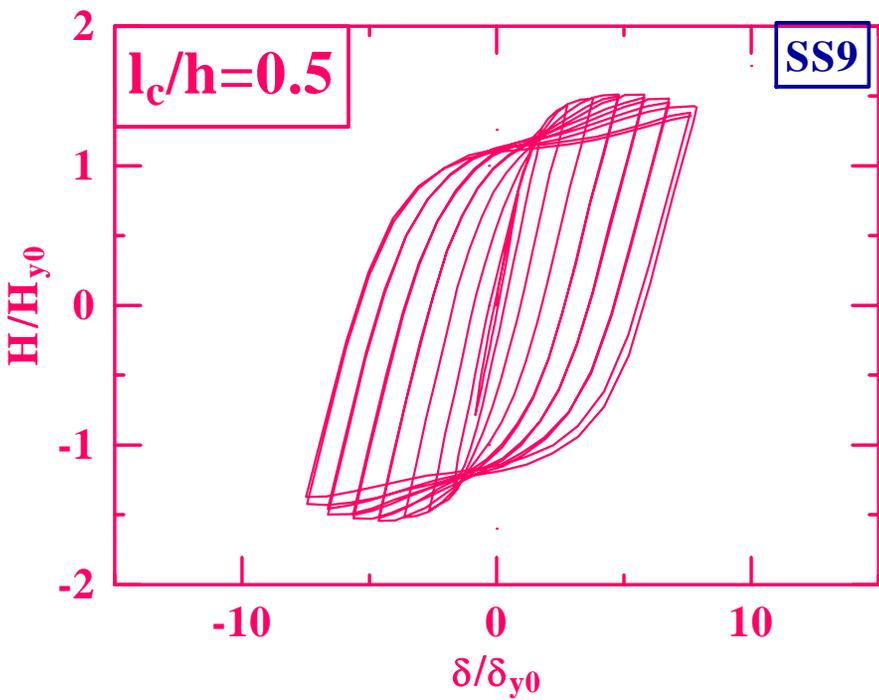
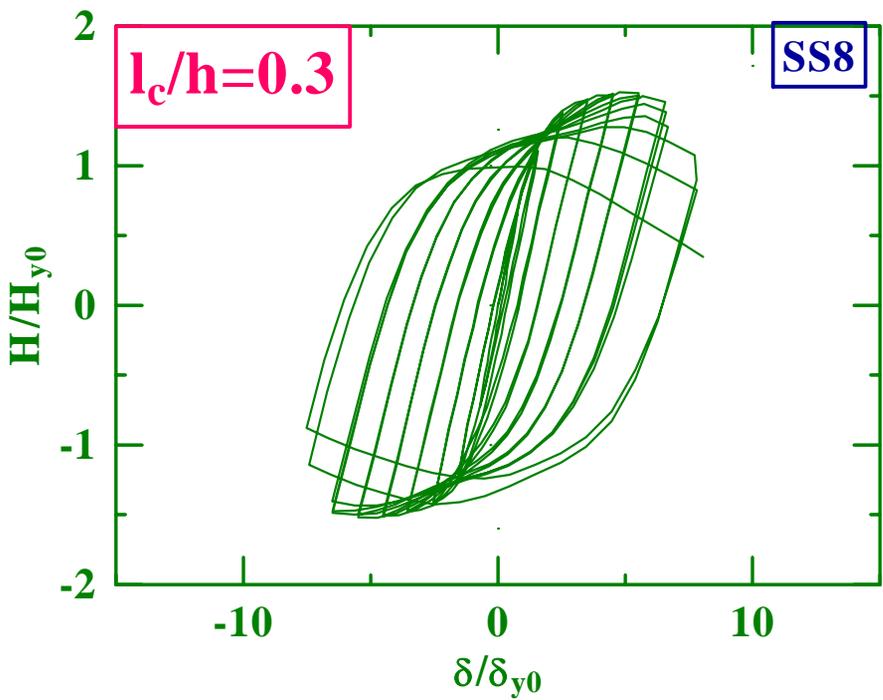
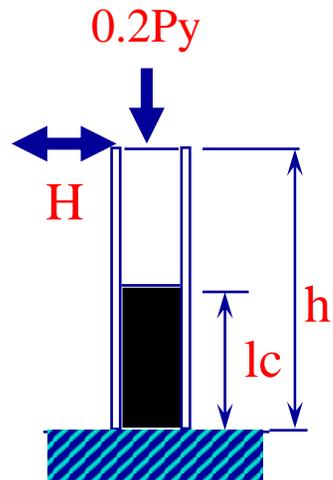
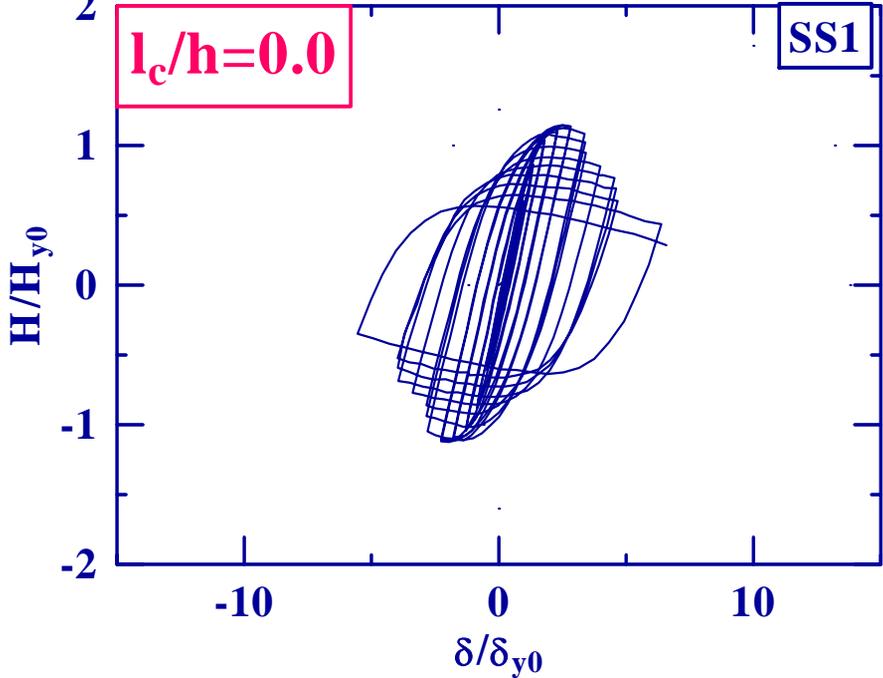
(d) 角補強

# 補強後の橋脚内部

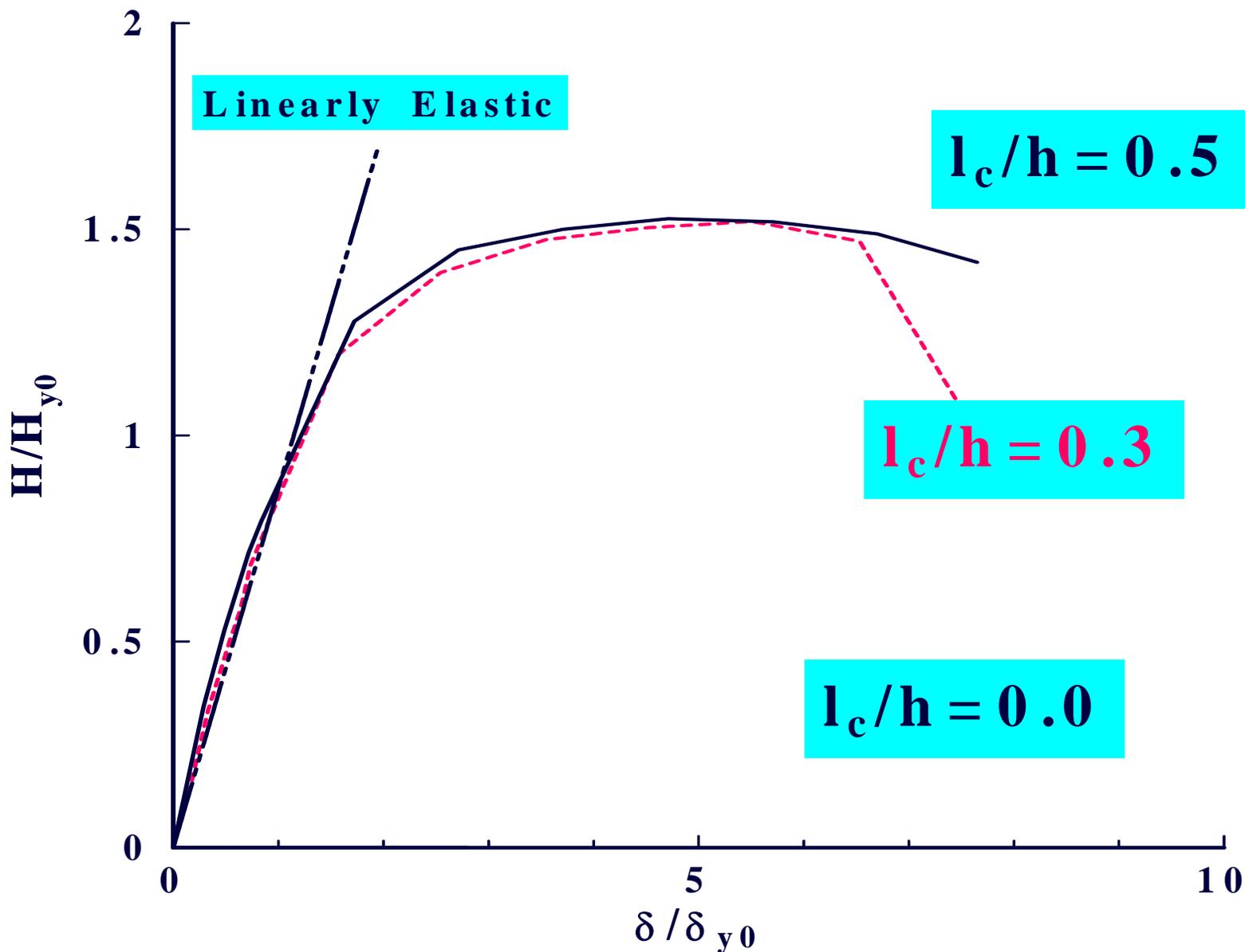




$R_f=0.45$   
 $\bar{\lambda}=0.50$

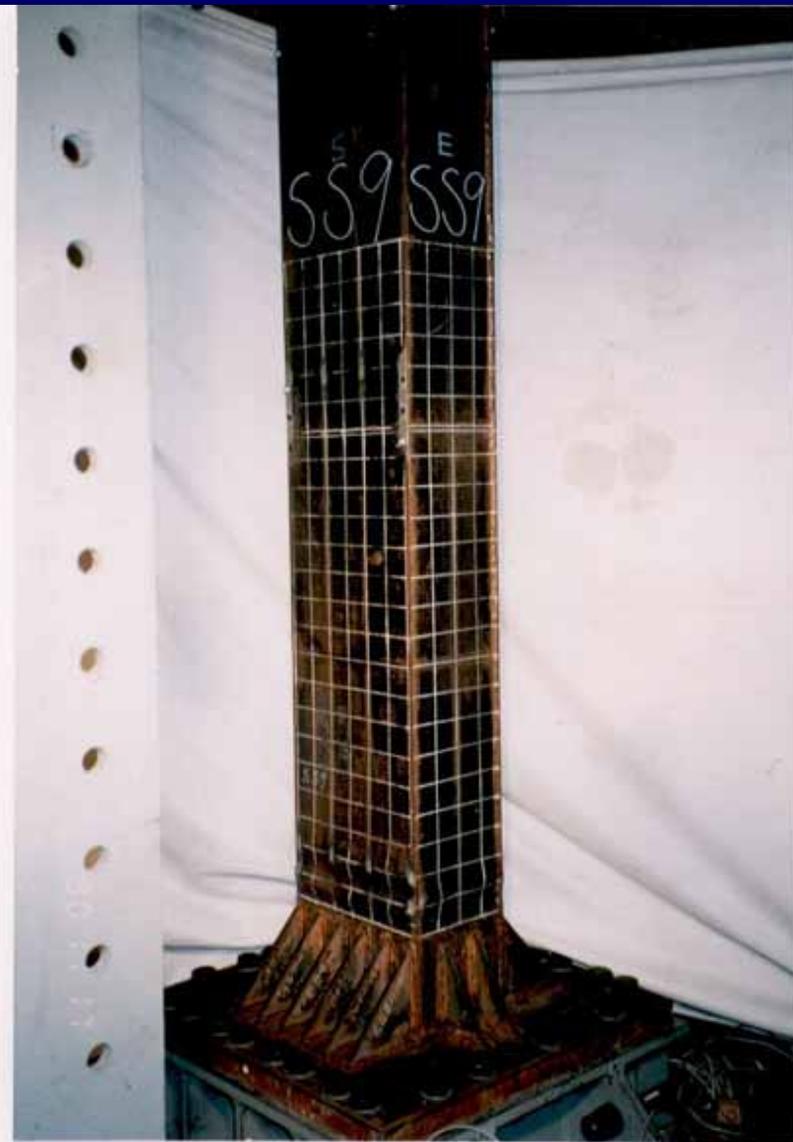


# コンクリート充填効果 (履歴曲線の包絡線)



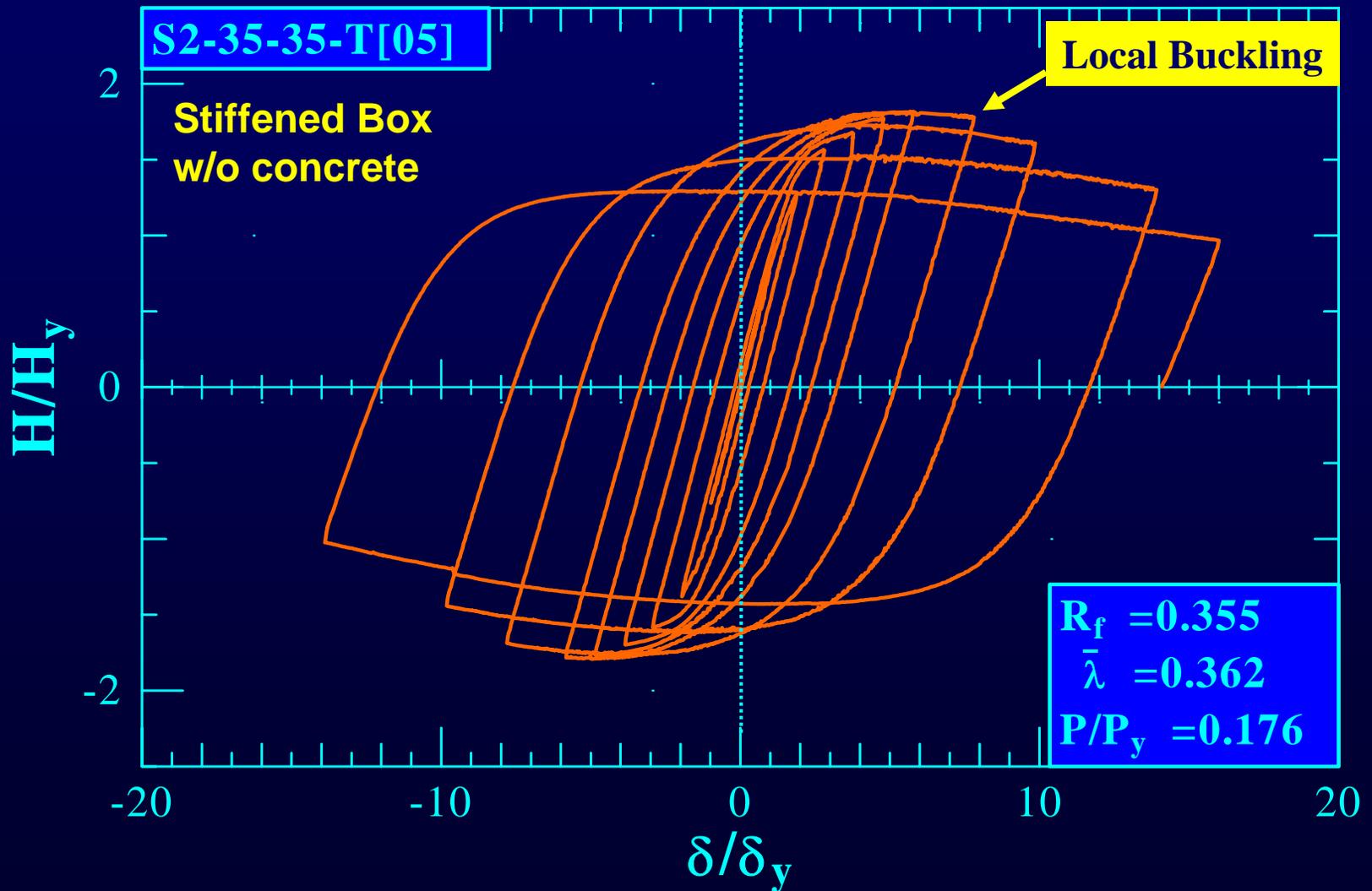


30% 充填

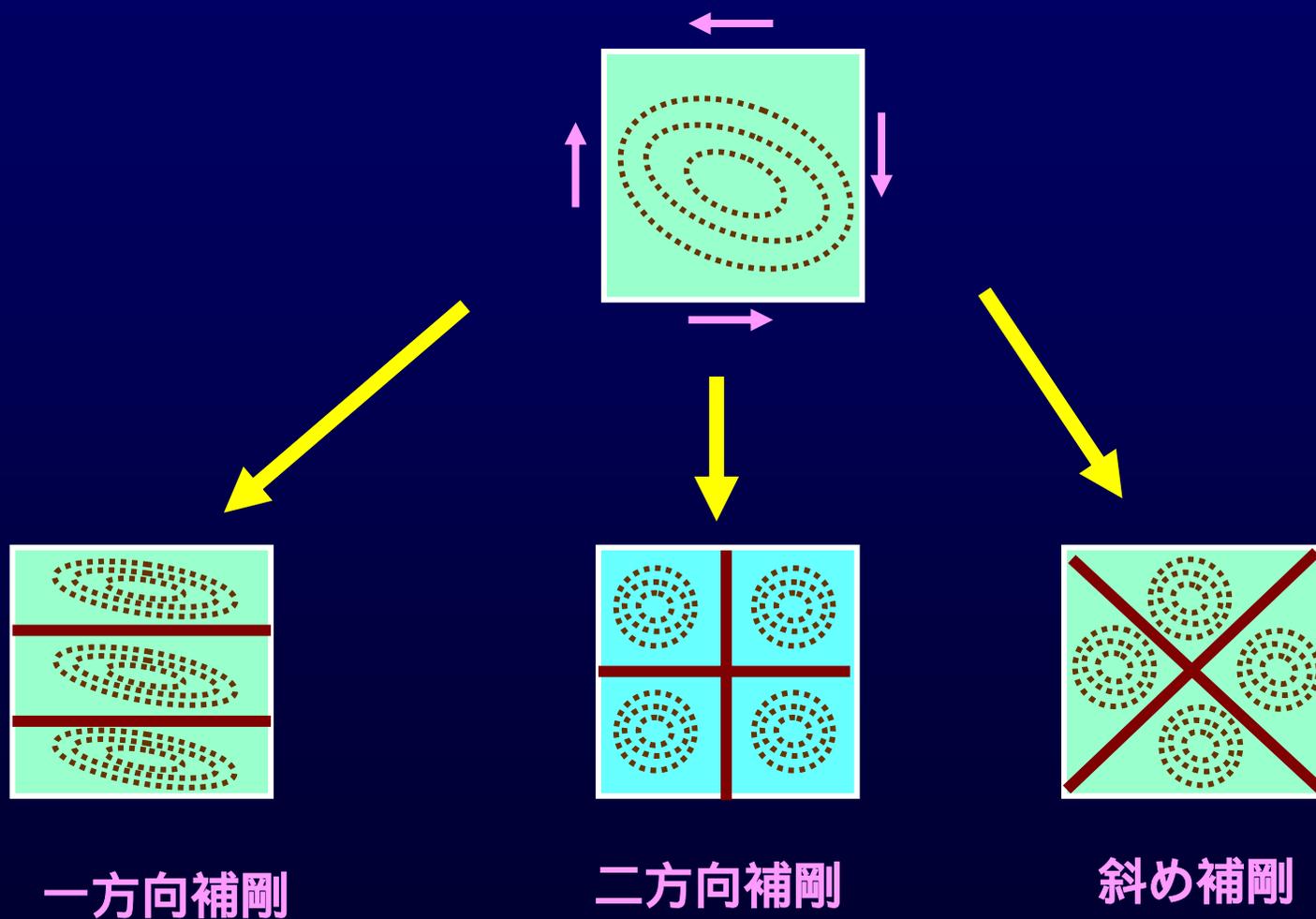


50% 充填

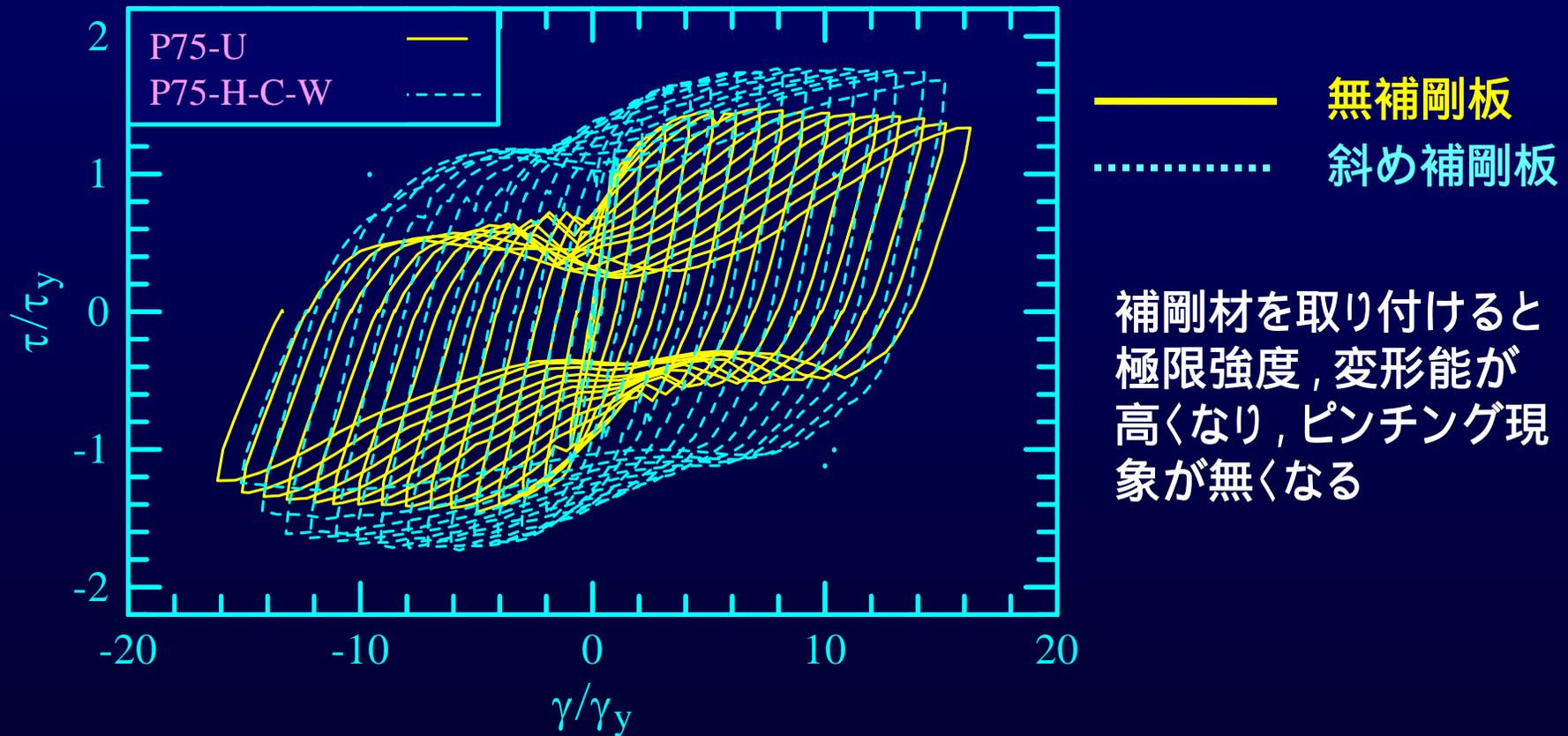
# 変形性能の高いコンクリート無充填 鋼製橋脚の繰り返し载荷実験結果



# 鋼製橋脚補強方法(2) 一せん断パネル



# 無補剛板と斜め補剛板の履歴曲線の比較



せん断応力 - せん断ひずみ履歴曲線

# まとめ

## 耐震性能の高い鋼製橋脚

### 1) 座屈に起因する損傷の低減

- ・コンクリート部分充填
- ・幅厚比(or 径厚比)を小さくし, 補剛材剛度を増す.

### 2) 低サイクル疲労に起因する損傷低減

- ・角溶接を全断面とけ込み溶接
- ・応力集中を低減した構造にする
- ・破壊靱性の高い鋼材の使用

詳細はテキスト“2.3まとめ”参照.

**何が何処まで分かったか**

**— 10年間の耐震技術の進展 —**

# 土木学会第1次(1995), 第2次提言(1996)内容

## 鋼構造物に関する項目

1. 耐震性能のランク分け
2. 耐震性能照査法の開発
3. 変形性能の高い構造の研究開発
4. 免震・制震構造の導入

# 提言の実現状況(その1)

## 1. 耐震性能のランク分け

- 1-1) 地震動のレベル(レベル1, 2)と重要度に応じて構造物に要求される耐震性能を定めること.
- 1-2) 重要な構造物および早期復旧が必要な構造物は地震後, 比較的早期に修復可能であること.
- 1-3) 上記以外の構造物に対しては構造物全体系が崩壊しないこと.

# 耐震要求性能マトリックス

耐震性能水準 (構造全体)  地震動	耐震性能 1	耐震性能 2	耐震性能 3	耐震性能 4	
	[構造安全性]				
	安全				破壊
	[地震後の使用性]				
	無損傷	小損傷	中損傷	大損傷	
レベル1	  	<div style="border: 2px solid black; padding: 5px; display: inline-block;">容認不可</div>			
レベル2	  				


 最重要構造物
 
 重要構造物
 
 普通構造物

# 提言の実現状況(その2)

## 2. 耐震性能照査法の開発

- 2-1) 鋼構造物に対しても保有耐力や変形性能の照査を行うこと。
- 2-2) 不静定次数が低い構造物は保有耐力の確認を厳格に実施すること。
- 2-3) 不静定次数が高い構造物は損傷過程を考慮した変形性能解析が望ましいこと。

# 耐震性能照査法

照査法	応答値 $S$ ( <i>Demand</i> )	限界値 $R$ ( <i>Capacity</i> )	性能 指標	適用範囲
変位 照査法	等価1自由度系 (ESDOF)の複合非線 形動的解析 $\max$	構造全体の <i>Pushover</i> 解析 (複合非線形 静的解析) $u$	変位	基本モード卓越 (有効質量比 > 0.75)
ひずみ 照査法	構造全体の 複合非線形動的解析 $a) \max$	終局ひずみ (経験式) $u$	ひずみ	制限無し

**性能照査**  $\gamma_I S_d / R_d \leq 1.0$        $S_d$  : 設計応答値       $R_d$  : 設計限界値

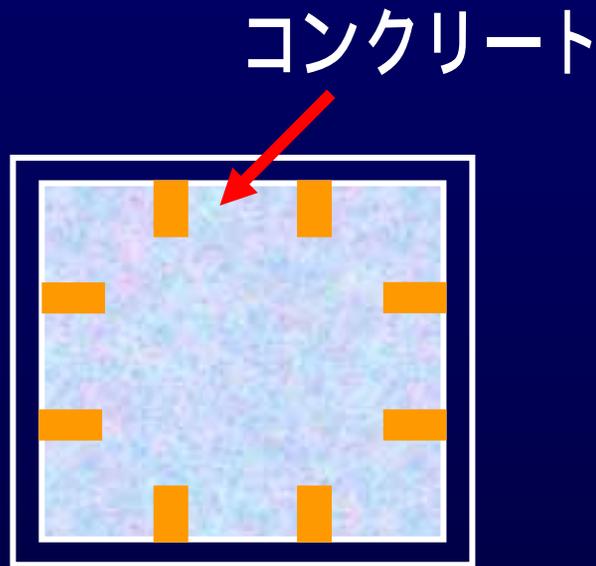
Note: 解析は、はり要素を用いて行う。局部座屈は限界値で考慮。

# 提言の実現状況(その3)

## 3. 変形性能の高い構造の研究開発

- 3-1) 変形性能を高めるための断面構成あるいは断面内応力の制限についての研究開発を行う
- 3-2) 耐震補強への適用

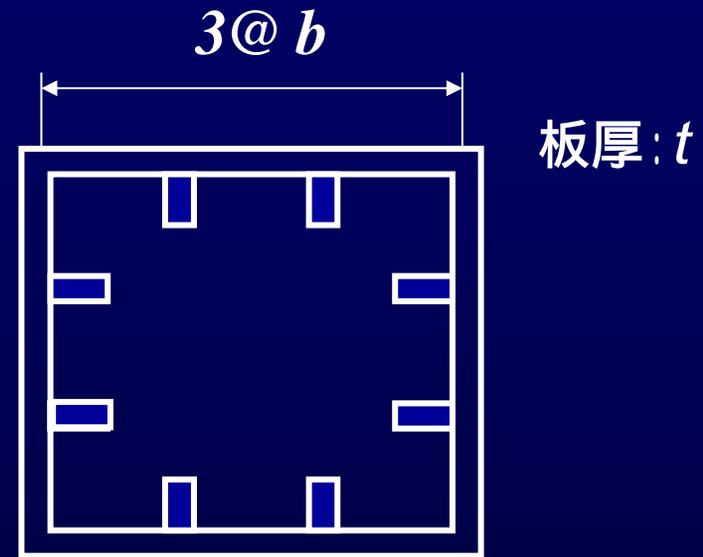
# 変形性能の高い鋼部材



(a) コンクリート部分充填

単柱式橋脚の場合

$$\ell_c / h = 0.2 \sim 0.3$$



(b) 小壁厚比・高剛性補剛材

$$b / t \approx 20, \quad \gamma / \gamma^* \geq 3.0$$

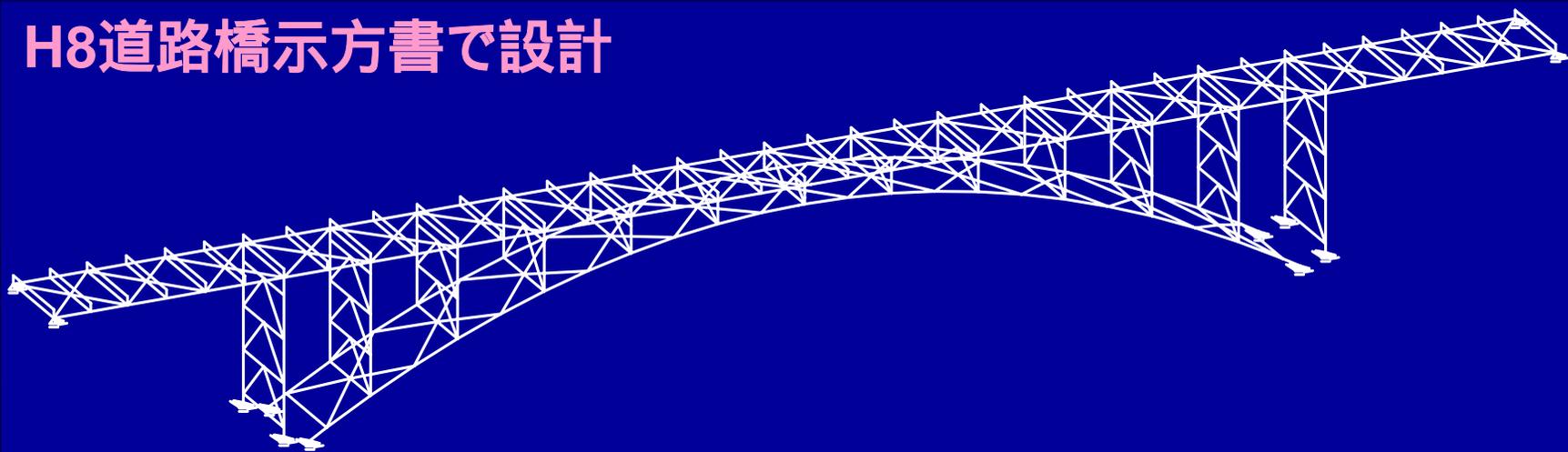
# 提言の実現状況(その4)

## 4. 免震・制震構造の導入

- 4-1) 免震・制震技術等の新技術の積極的導入を図ること.
- 4-2) 耐震補強への適用

# 上路式RC床版鋼アーチ橋

H8道路橋示方書で設計



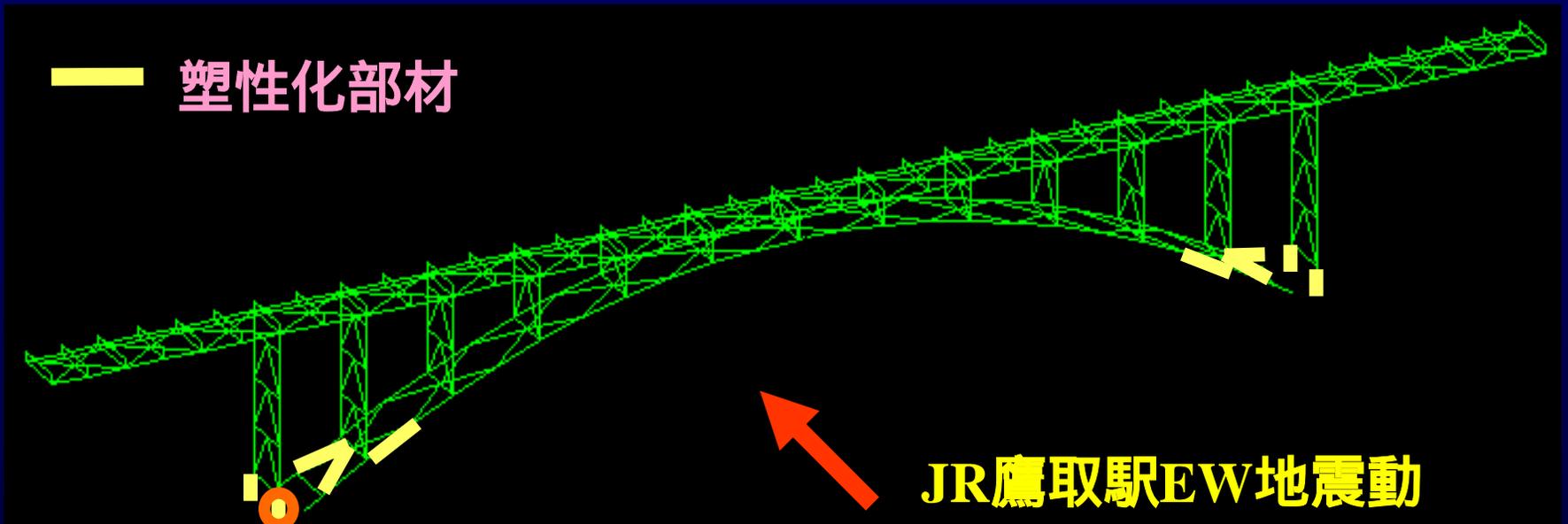
橋長: 173m (26.5m+120m+26.5m)

アーチ支間: 114m

アーチライズ: 16.9 m

総幅員: 8.2 m

# 塑性化部材

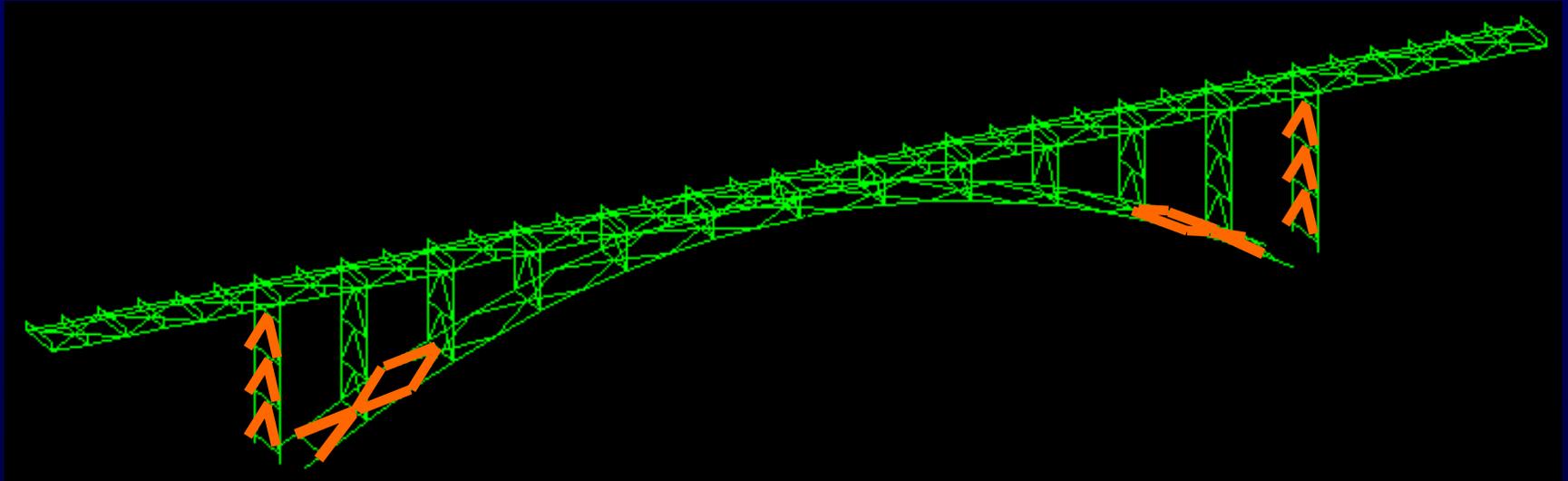


— 塑性化部材

JR鷹取駅EW地震動

最大圧縮ひずみ ( $29 \mu_y > \text{限界ひずみ}$ ) 発生箇所

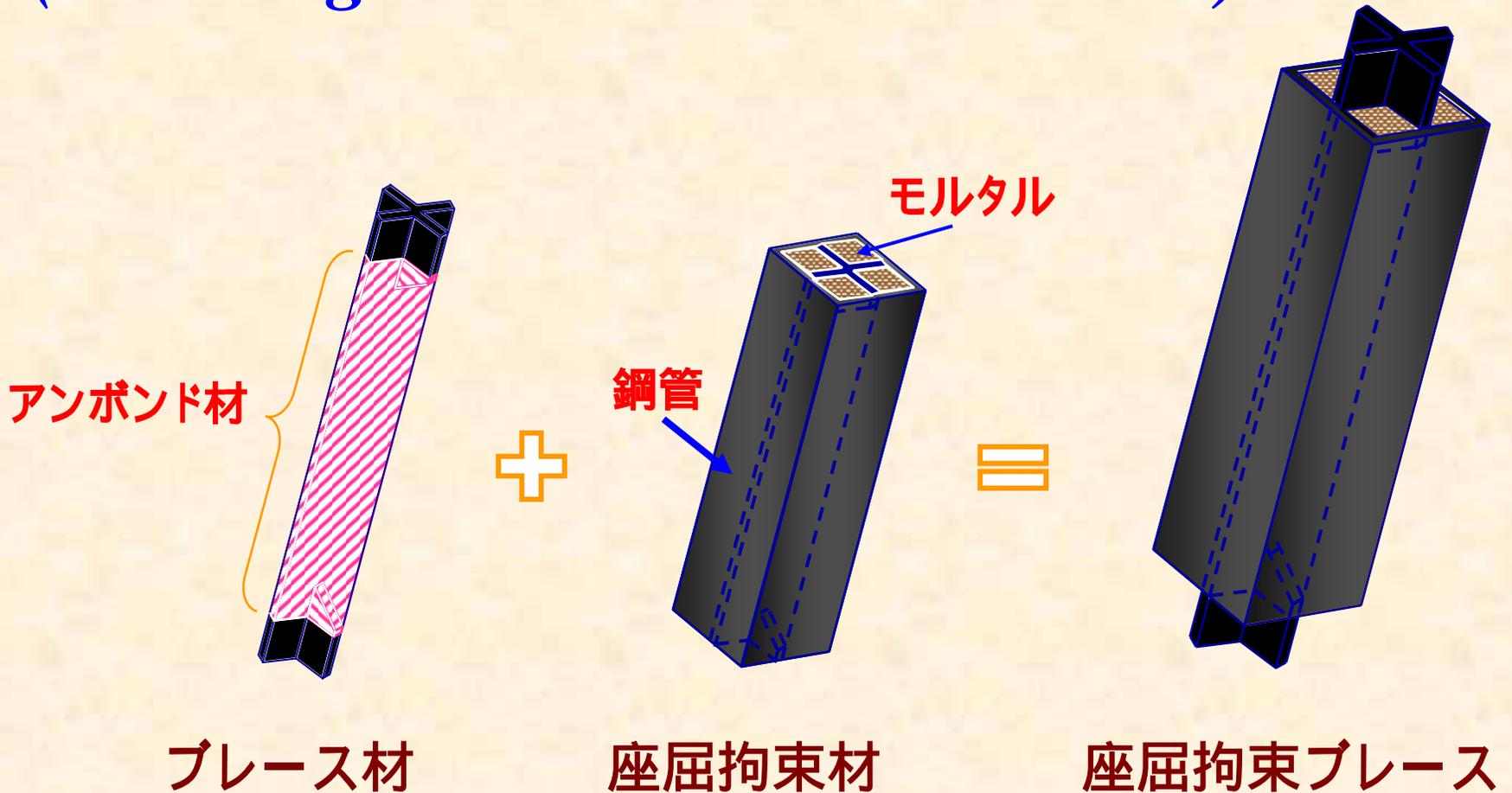
# 制震ダンパー(座屈拘束ブレース)の導入



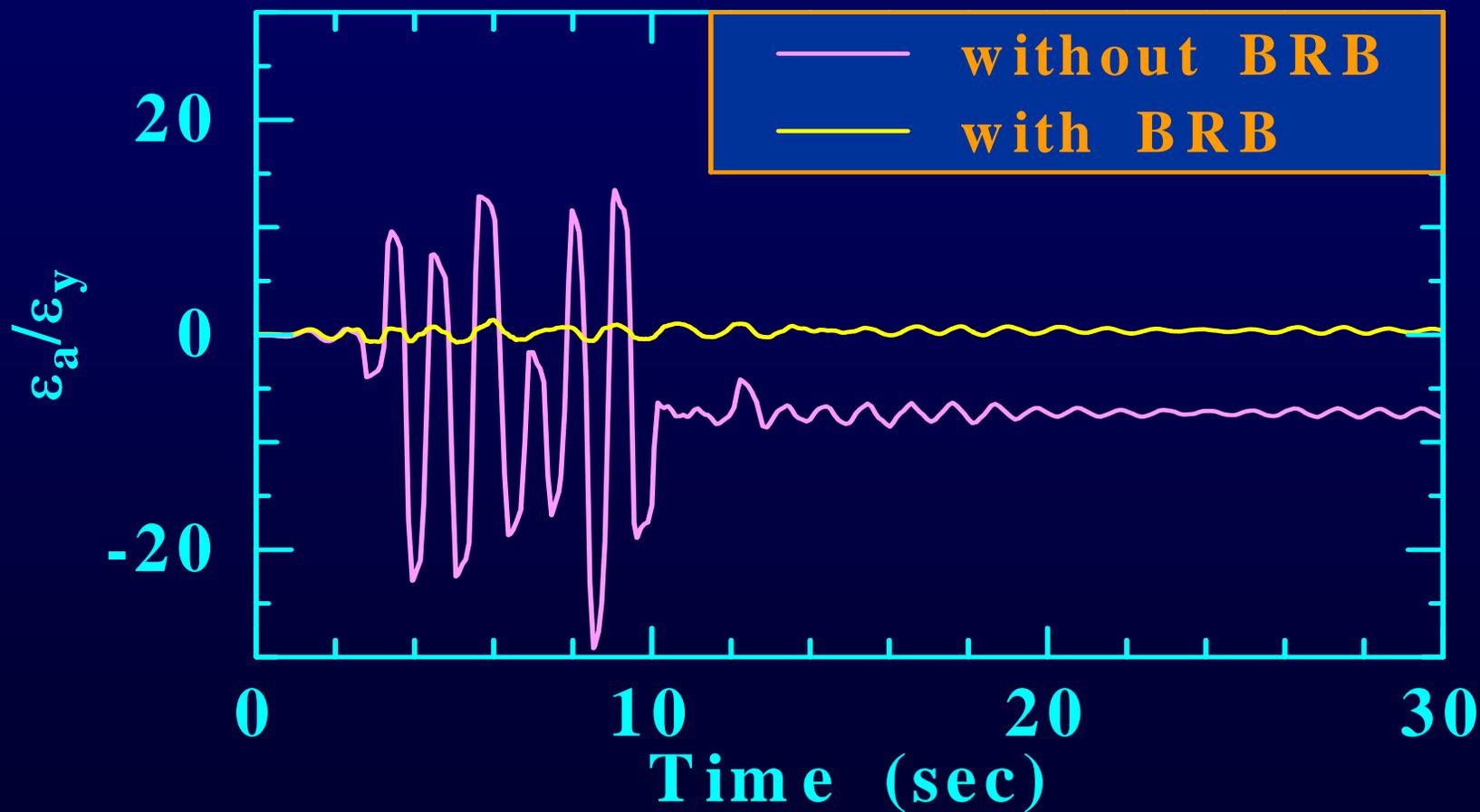
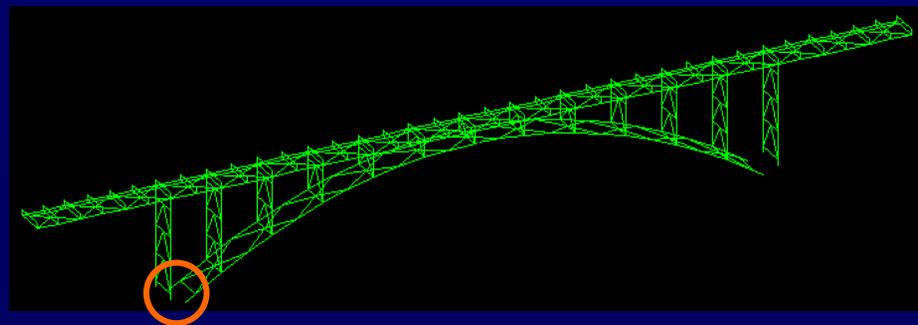
— 座屈拘束ブレース(BRB)設置部材

# 座屈拘束ブレース

(*Buckling Restrained Brace - BRB*)



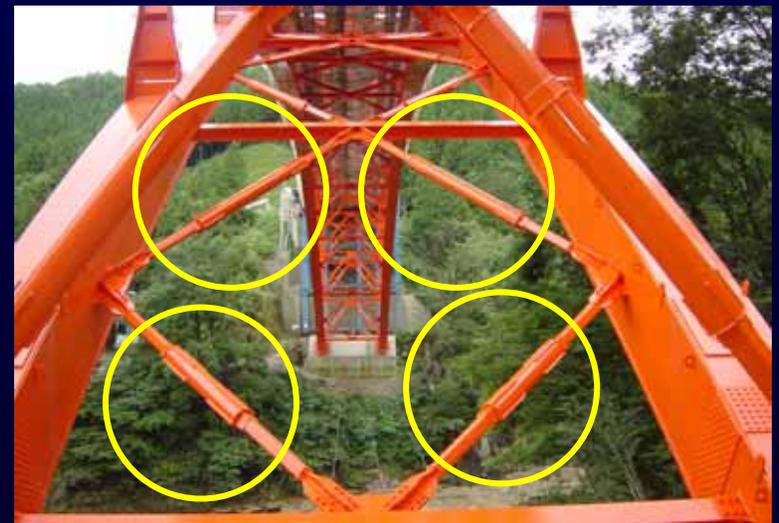
# 端柱基部の応答ひずみの の低減効果



# 座屈拘束ブレース付き鋼アーチ橋 (H16.10完成予定)



(2003年8月時点)

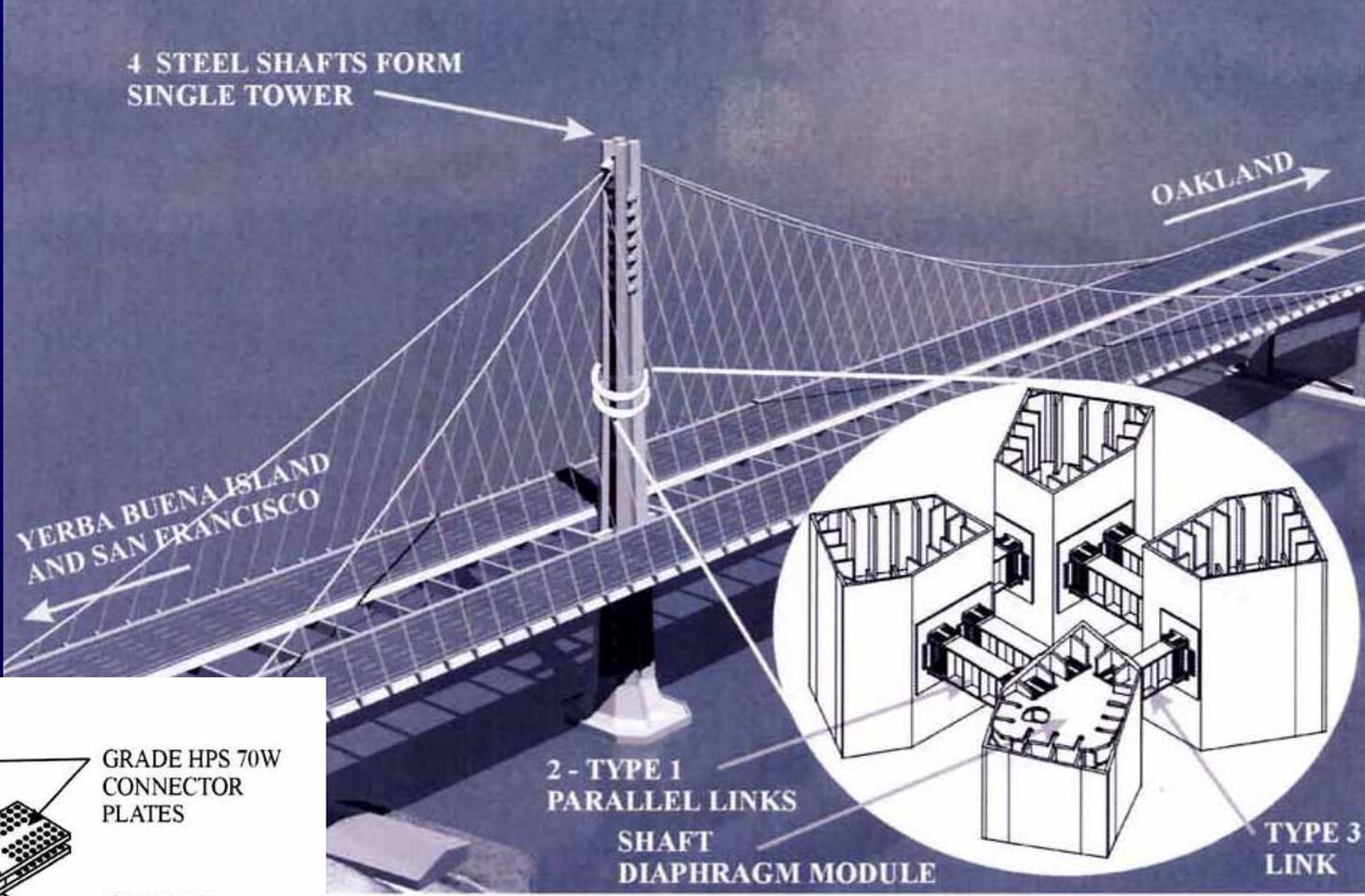


An architectural rendering of the New San Francisco-Oakland Bay Bridge. The image shows a large, modern cable-stayed bridge with a prominent white pylon on the left. The bridge deck is multi-lane and carries several cars. The bridge spans across a wide body of water, supported by multiple piers. In the background, there are hills and a clear blue sky. The text "UNVEILING THE EAST BAY BRIDGE" is overlaid in the upper right, and "New San Francisco-Oakland Bay Bridge" is in a yellow box at the bottom.

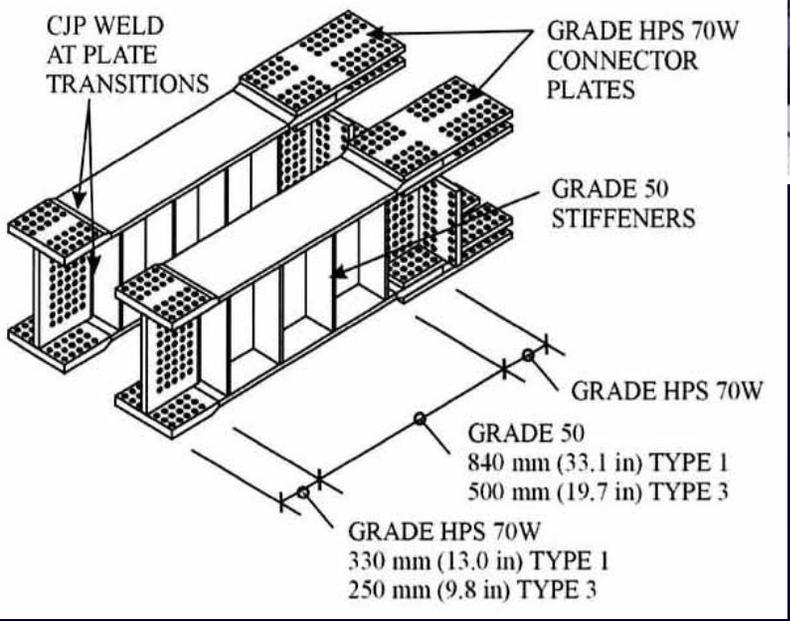
**UNVEILING  
THE EAST BAY BRIDGE**

*New San Francisco-Oakland Bay Bridge*

4 STEEL SHAFTS FORM SINGLE TOWER



### Parallel Links



2 - TYPE 1 PARALLEL LINKS

SHAFT DIAPHRAGM MODULE

TYPE 3 LINK

## New San Francisco-Oakland Bay Bridge タワーのせん断リンク

# 今後の重点研究課題

## 1. パッシブ型制震構造の開発研究

- ・中・長径間橋梁の耐震補強.
- ・制震ダンパーの配置, 強度と剛性

## 2. 低サイクル疲労に起因する脆性的破壊防止

- ・評価法
- ・応力集中を低減した構造ディテール, 靱性の高い鋼材

## 3. 耐震照査用長周期地震動の整備と耐震安全性評価

- ・長周期橋梁(斜張橋, 吊橋等)の耐震安全性評価
- ・補強法

## 4. 橋梁システムの大型震動台実験

- ・橋梁システムの破壊までのシナリオ検証
- ・E-Defense に期待

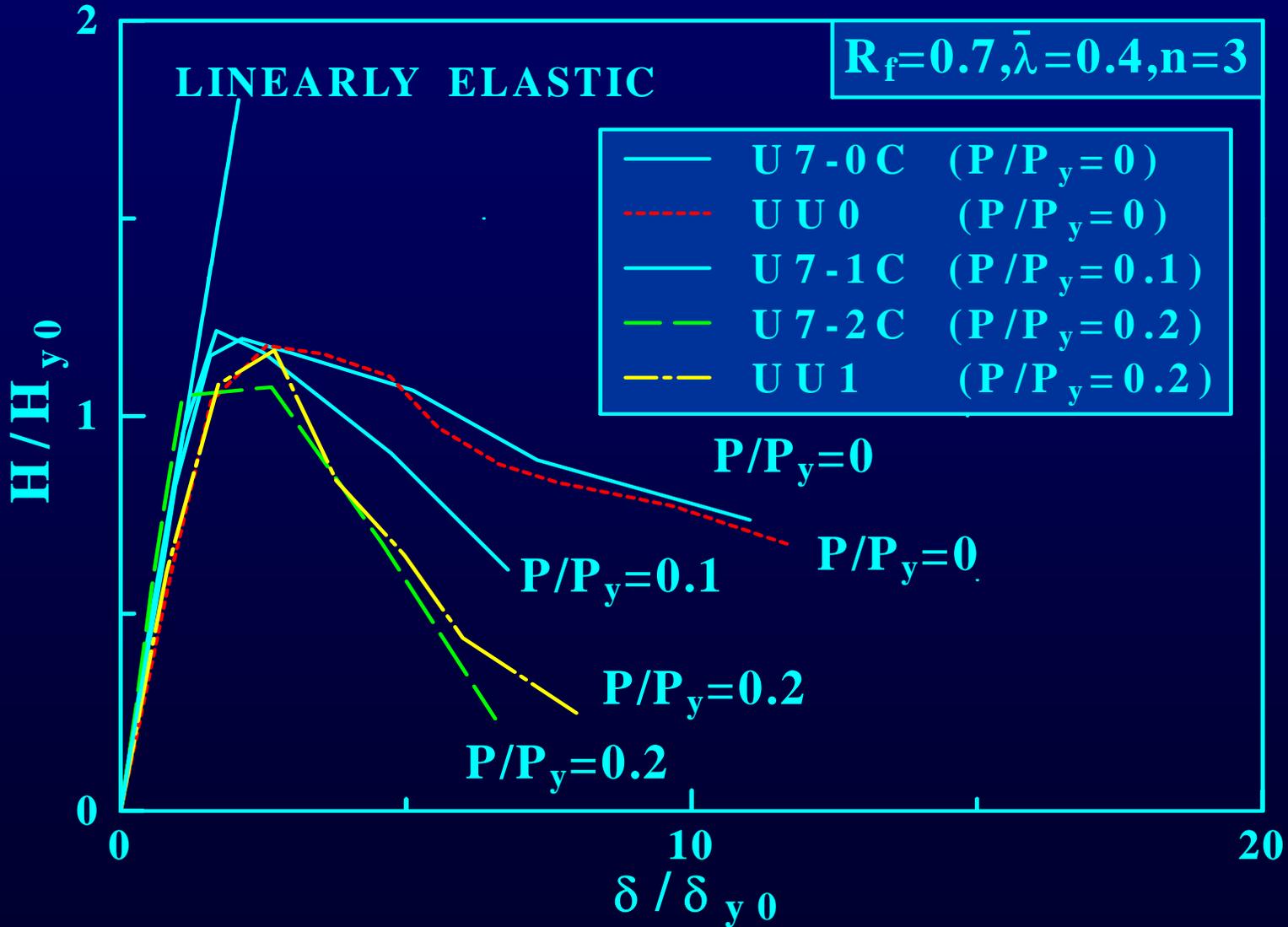
# さらに勉強するために

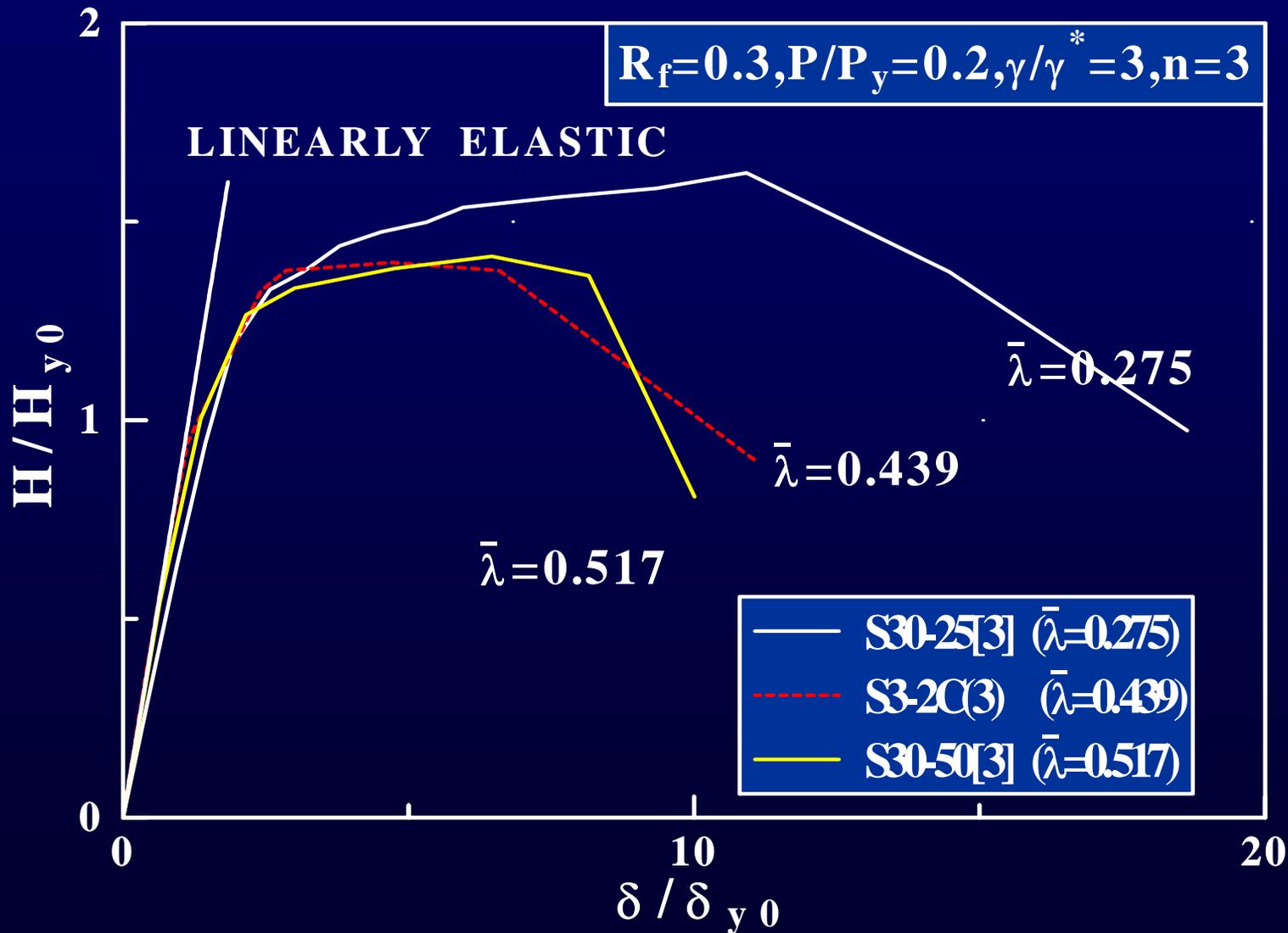
1. 柴田明德:最新耐震構造解析,第2版,森北出版,2003.5.
2. Paz, M. and Leigh, W.: *Structural Dynamics- Theory and Computation, 5th ed.*, Kluwer Academic Publishers, 2003.9 .
3. Paz , M. (木村欽一訳):パソコンで解く「振動と力」,丸善,1989,
4. 藤谷義信,藤井大地,野中哲也:パソコンで解く「骨組の静的・動的・弾塑性解析」,丸善,2000.3.
5. 土木学会:座屈設計ガイドライン,1987 (改訂中)
6. 太田孝二,深沢誠:橋と鋼,建設図書,2000.2
7. 土木学会:橋の動的耐震設計,2003.2.
8. 日本鋼構造協会:土木鋼構造物の動的耐震性能照査法と耐震性向上,  
2003.10 .
9. 和田章,岩田衛,清水敬三,安部重孝,川合廣樹:建築物の損傷制御設計,  
丸善,1998.7.

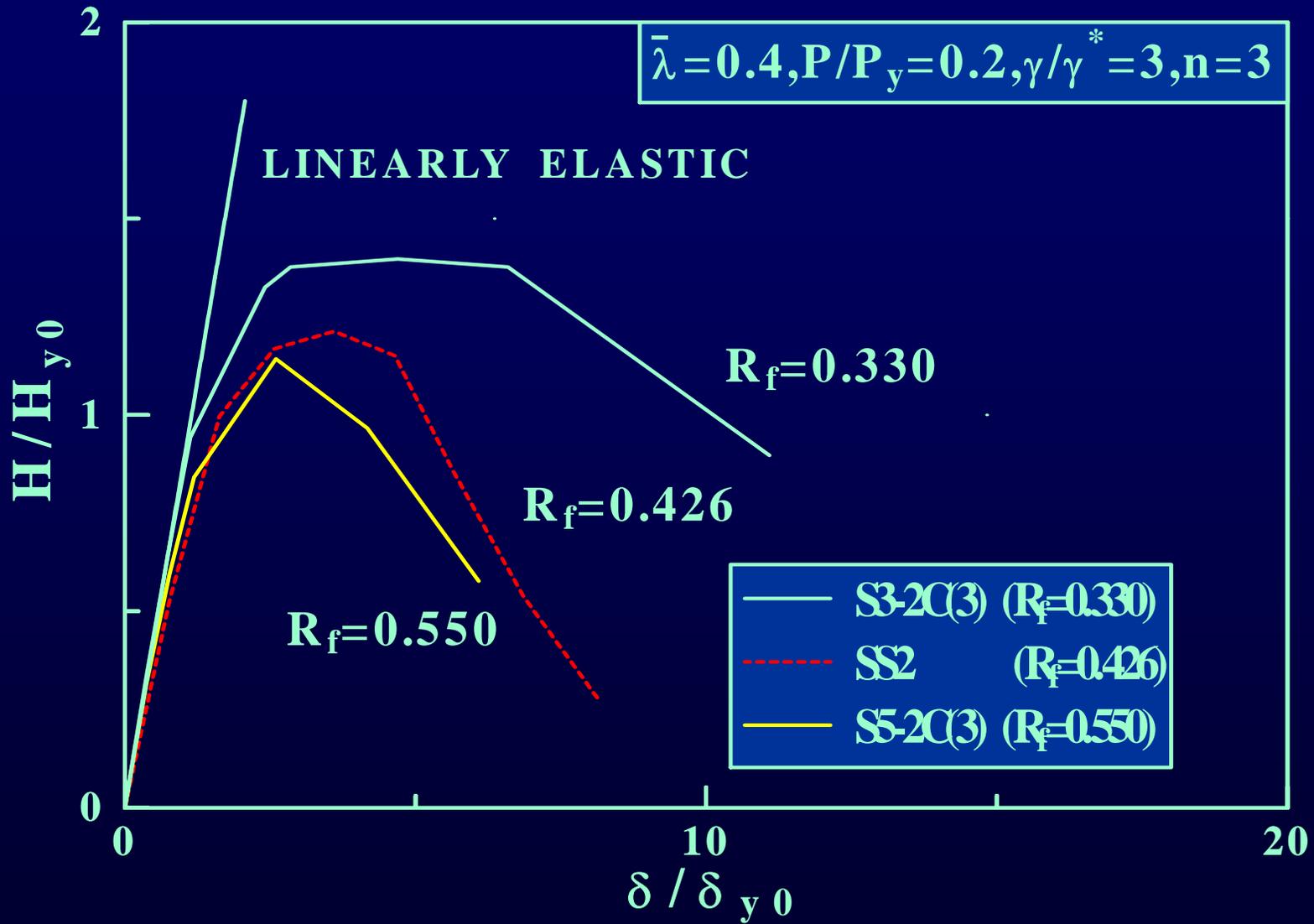
# 性能照査型耐震設計を更に深化させる課題

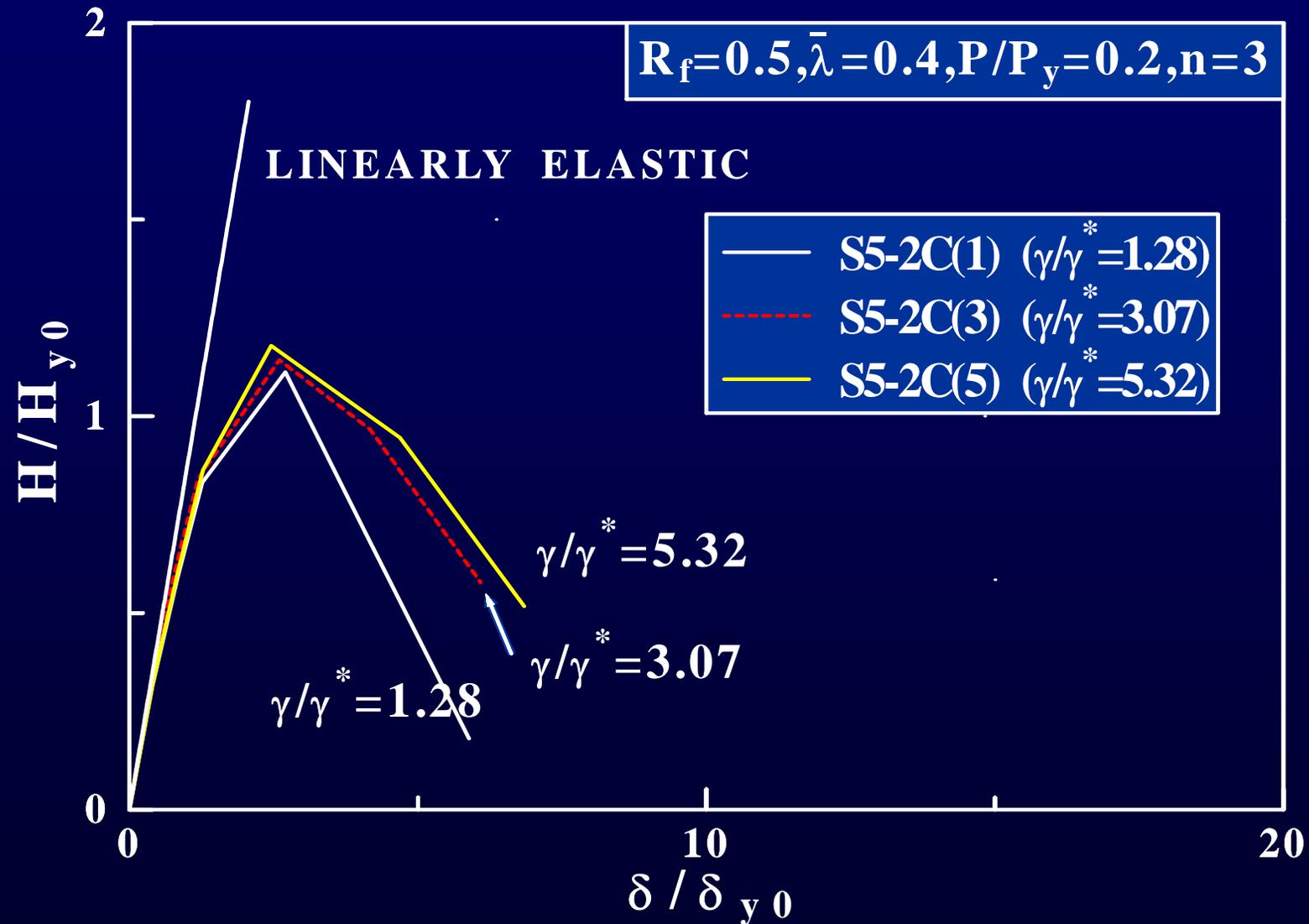
## 橋梁の例

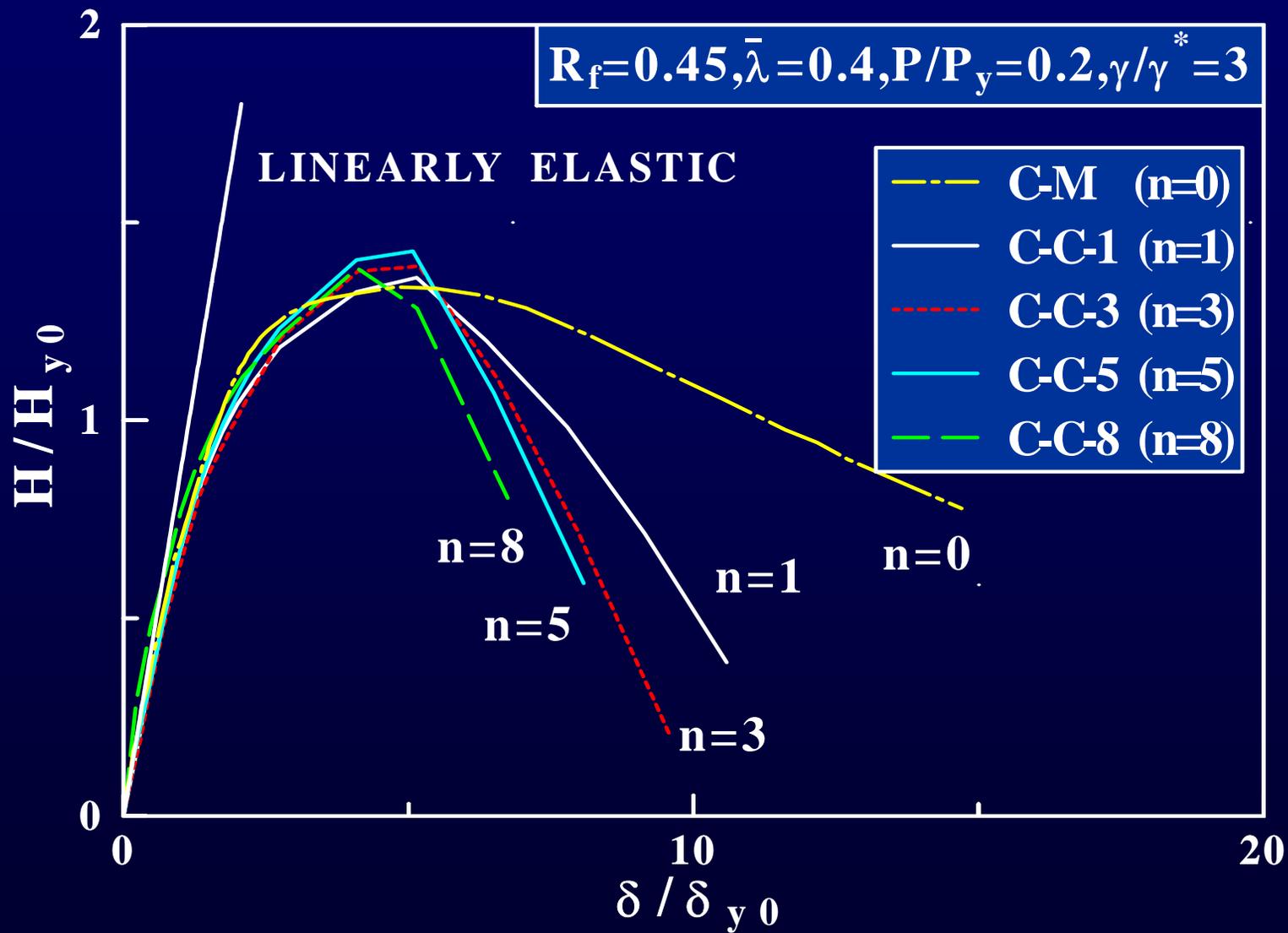
1. システムまたはネットワークとしての目標耐震性能は？
2. 構造全体の耐震性能と部材の許容損傷度の関係は？
  - ・例えば、耐震性能2 “限定的な損傷” は部材ではどの程度の損傷を許容するのか？
3. 部材の損傷度はどのように算定するのか？
  - ・変位, or ひずみ ?
  - ・限界値は何を基準に設定すべきか？
4. 数値解析・設計の検証方法は？
  - ・ベンチマーク問題
  - ・第3者機関





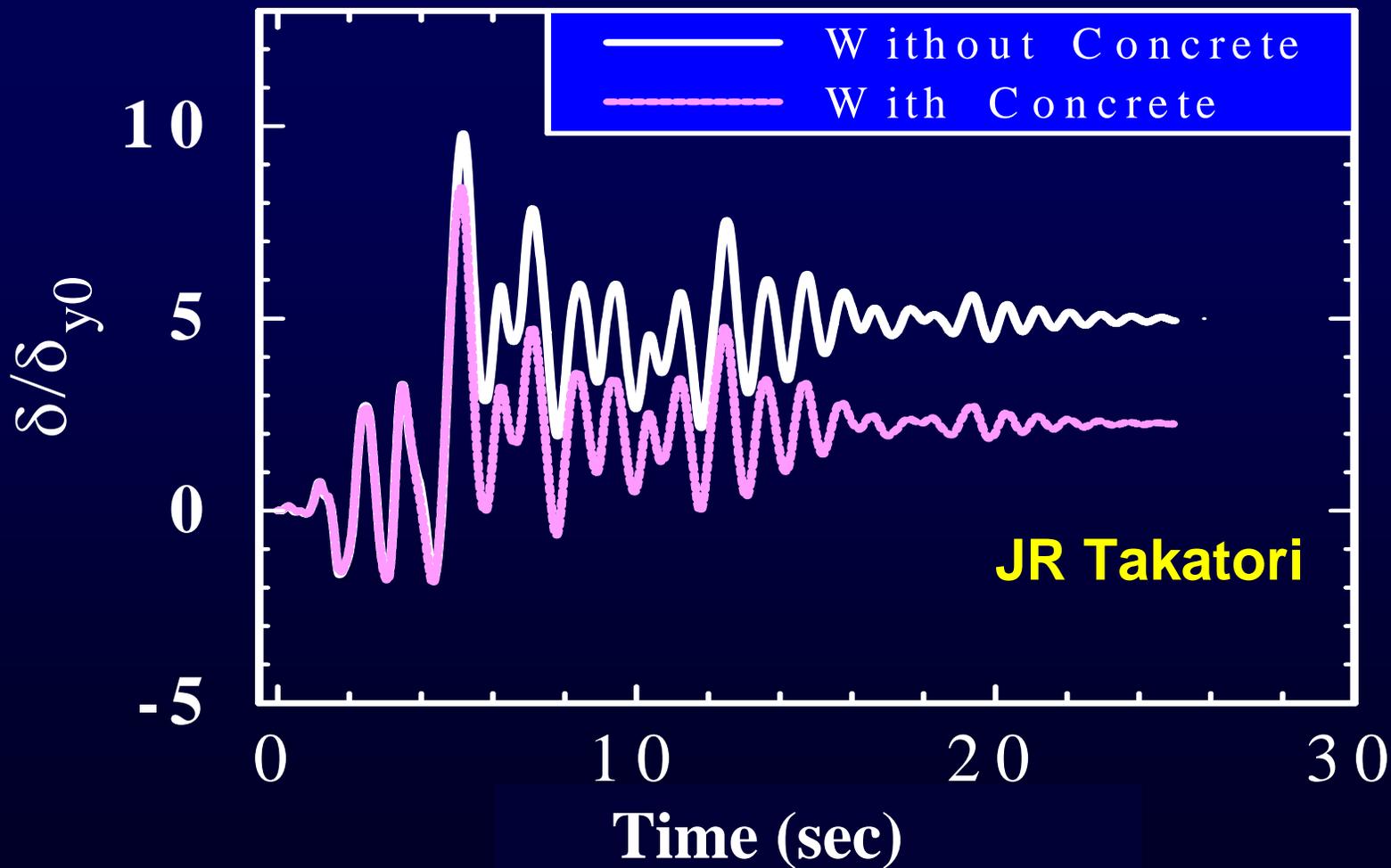






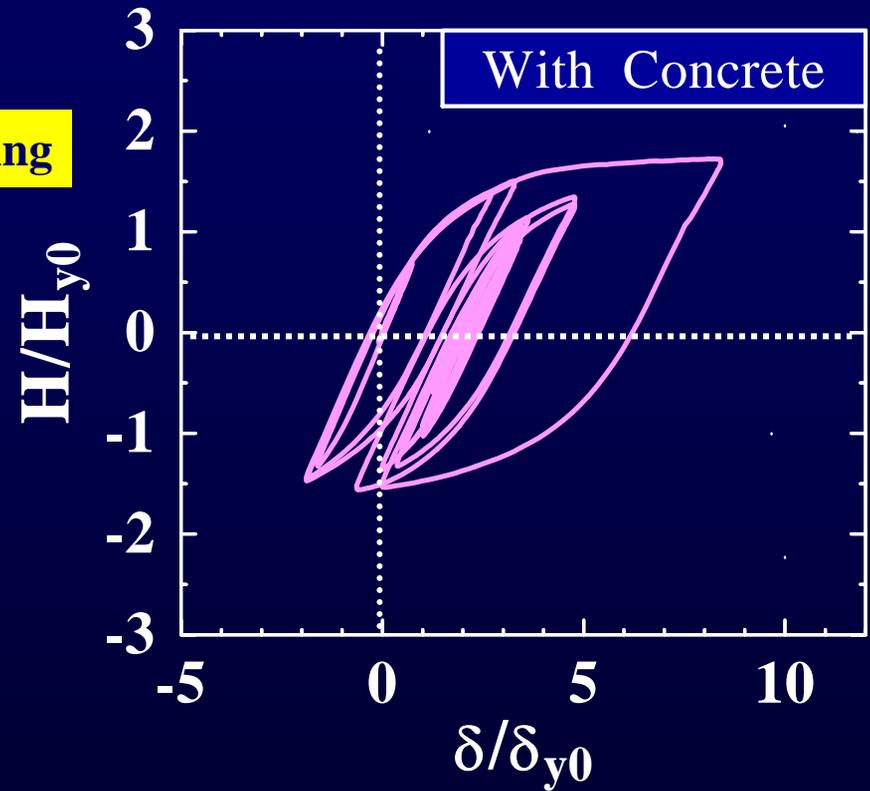
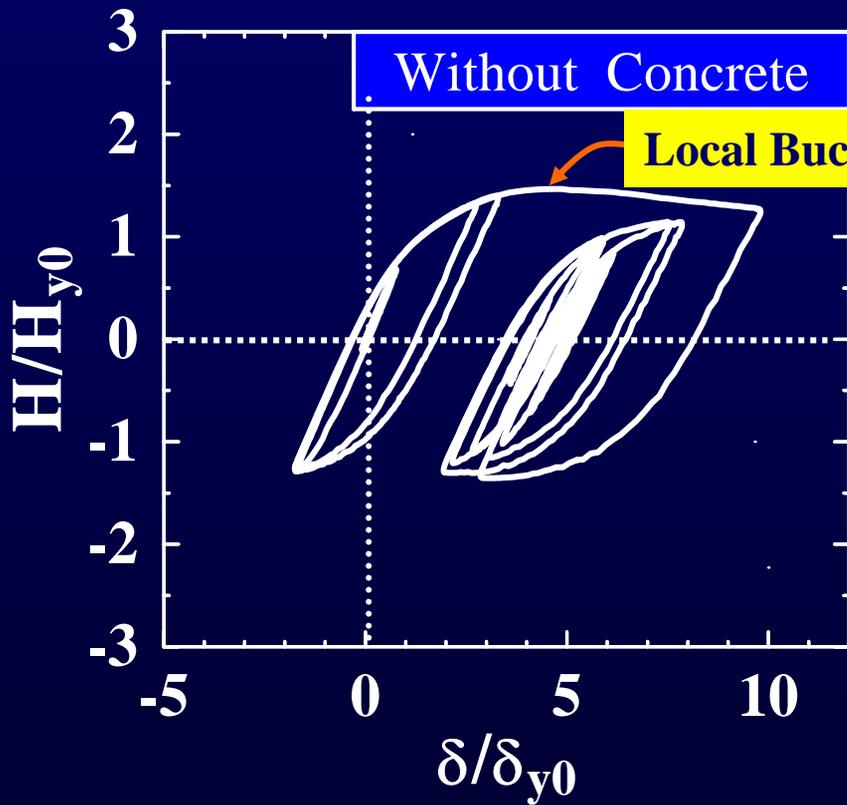
# ハイブリッド地震応答実験結果

コンクリート無充填および充填( $\ell_c/h=0.2$ )鋼製橋脚



# ハイブリッド地震応答実験結果

コンクリート無充填および充填 ( $\ell_c/h=0.2$ ) 鋼製橋脚

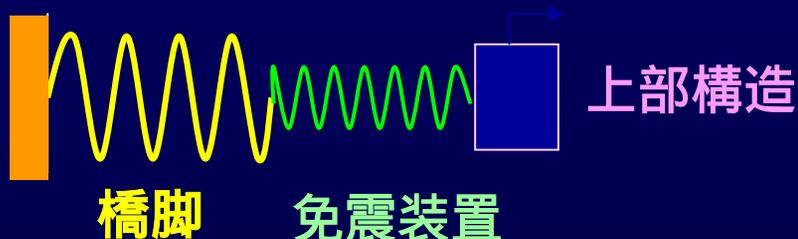


# 免震構造に比べ制震構造は何が有利か？

・免震構造 固有周期を長くし、かつ減衰を付与。

主構造(例えば橋脚)と免震装置は直列結合 変位が大きくなる。

- ・隣接桁との衝突
- ・長周期地震動に対する安全性？



・制震構造：ダンパーによる履歴減衰の付与。既存のブレースを取り替えるなら、固有周期は大きくは変わらない。

主構造とダンパーは並列結合 変位は大きくなる

