

第19章 変形性能

名古屋大学大学院

宇佐美 勉

内容

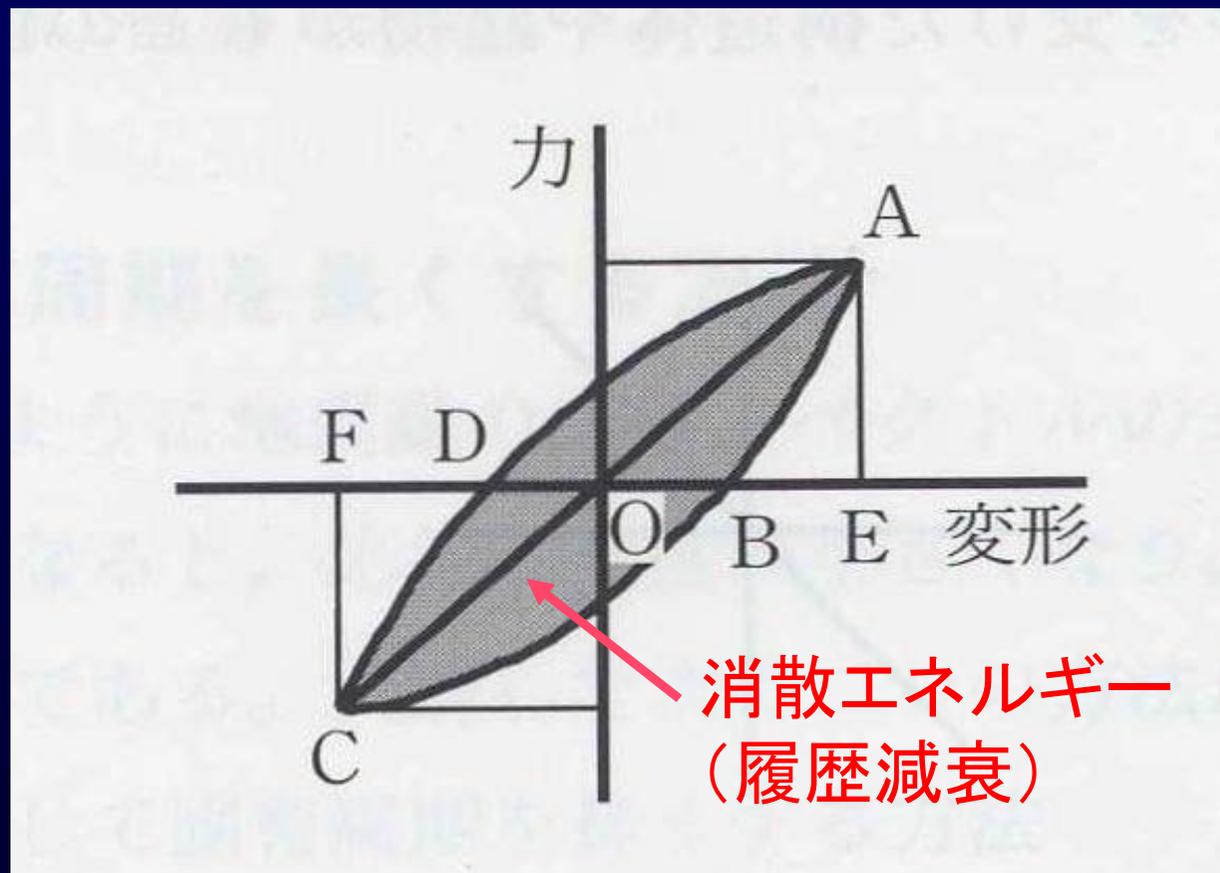
- 19.1 概説
- 19.2 耐震要求性能と照査法
- 19.3 単柱式鋼製橋脚の限界値の推定式
- 19.4 板要素および短柱の変形性能評価
- 19.5 せん断を受ける板要素およびはりの変形性能評価
- 19.6 構造物の変形性能評価法－Pushover解析
- 20.7 まとめと将来展望

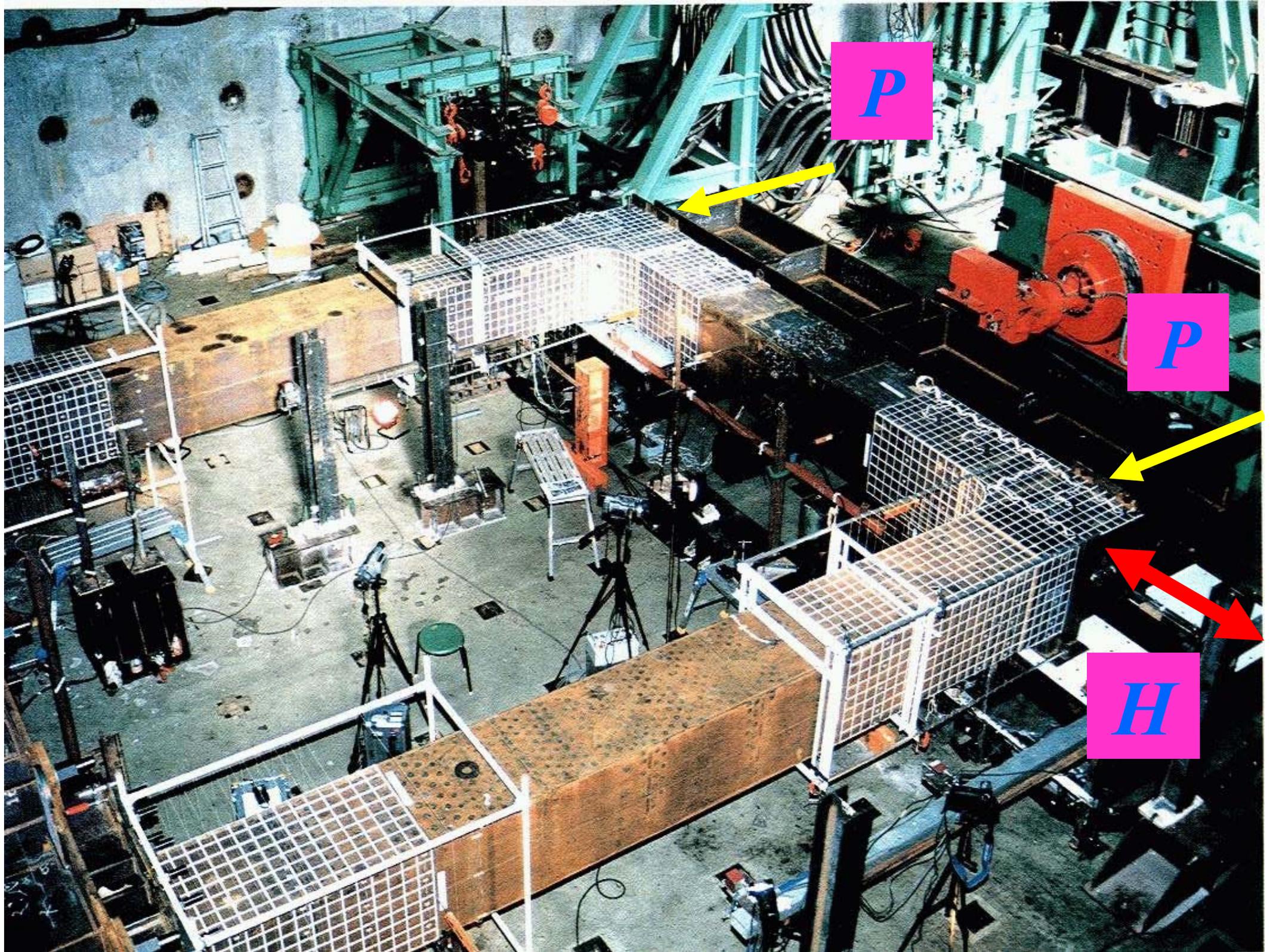
内容

1. なぜ変形性能？
2. 耐震照査法
3. 限界値の算定法
4. まとめと将来展望

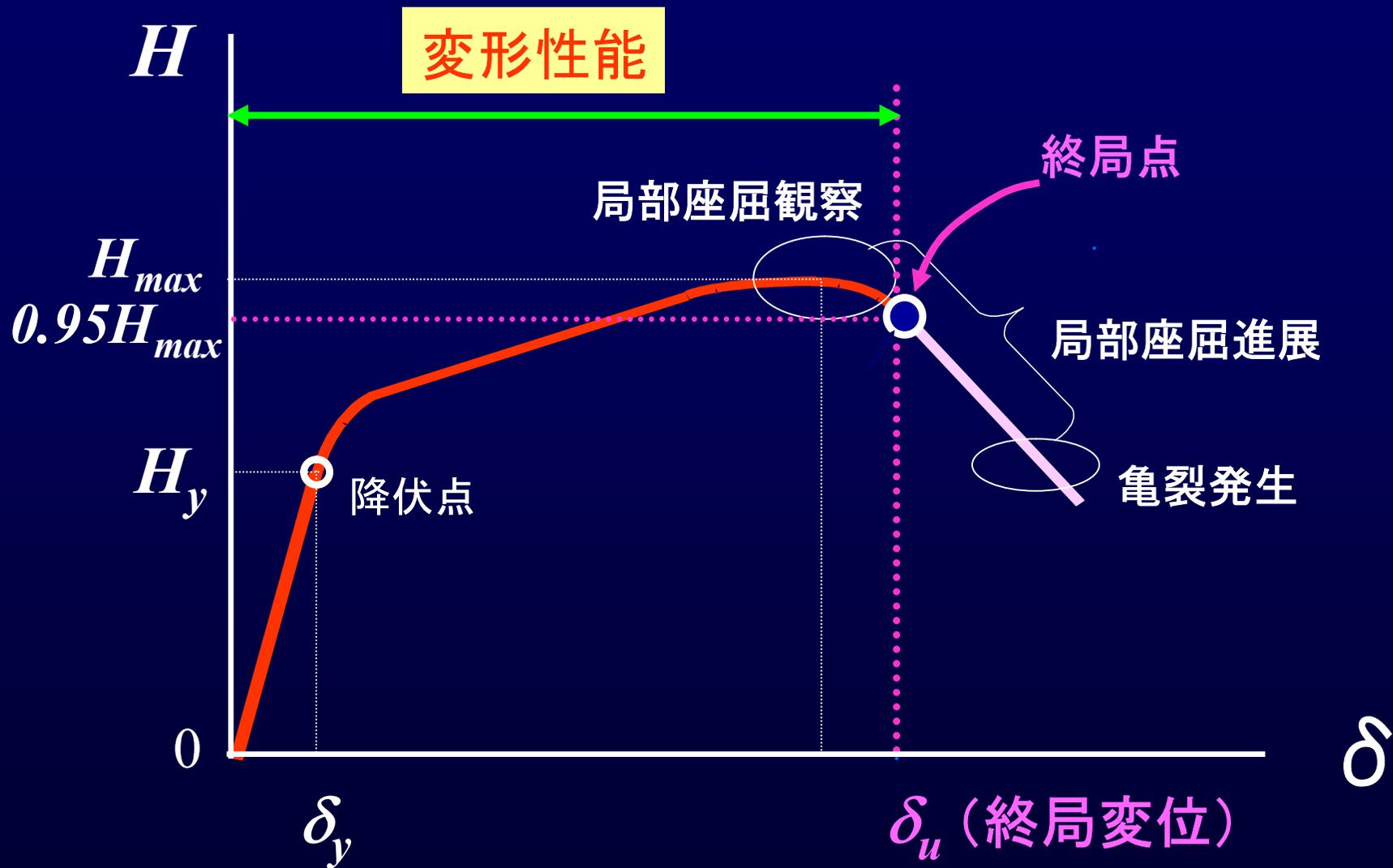
1. なぜ変形性能？

大地震に対しては、塑性変形による履歴減衰を期待する耐震設計が経済的→終局点までの変形性能の利用





繰返し荷重を受ける鋼構造物の H - δ 関係の包絡線

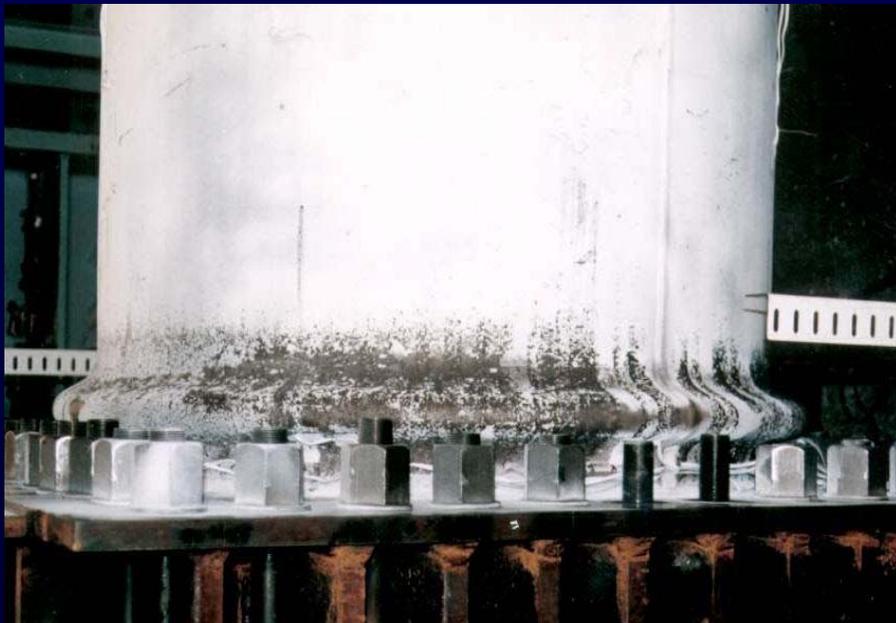




Box: Strong stiffeners



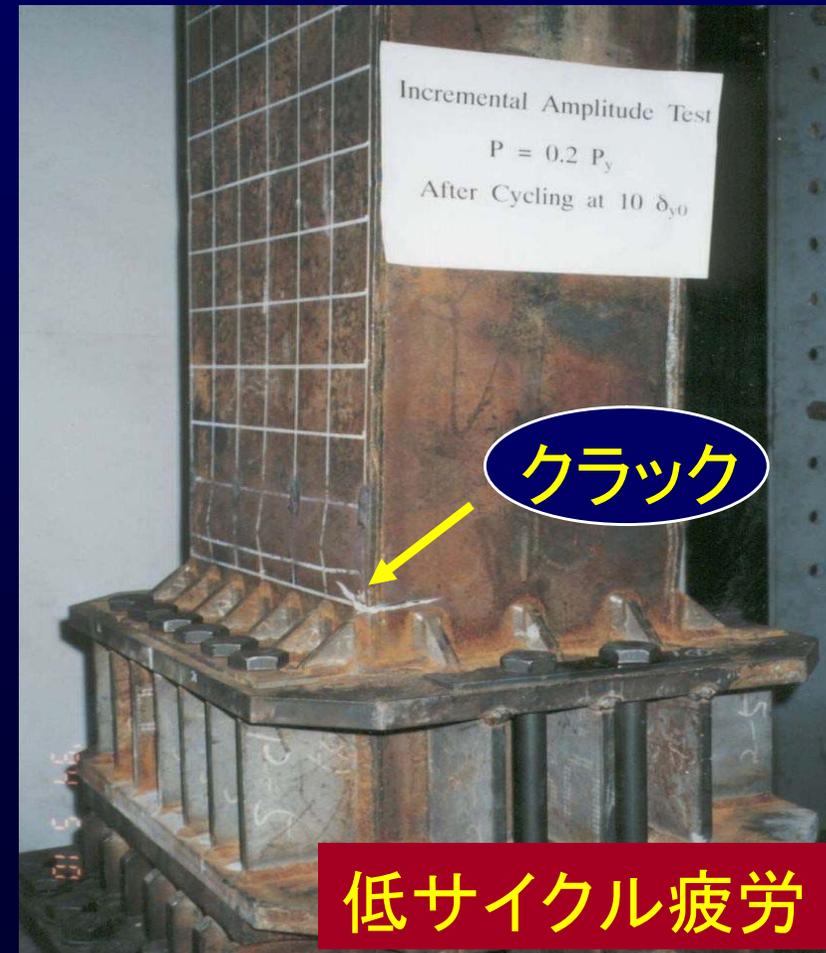
Box: Weak stiffeners



Pipe: Thin-walled

(まとめ)大地震時の鋼構造物の終局限界

1. 塑性域での局部座屈と全体座屈の連成座屈
2. 低サイクル疲労: 研究途上(終局ひずみに制限)



2. 耐震照査法

基本

- 限界状態を設定し、それを適切に照査できる手法
- レベル2地震動に対する鋼構造物の限界状態

終局限界： (1) 局部座屈と部材座屈の連成
(2) 低サイクル疲労

損傷限界： 塑性変形による損傷度(健全度)

- 照査

終局限界に対する照査 ← **安全性照査**

損傷限界に対する照査 ← **(地震後の)使用性照査**

耐震安全性照査法のメニュー

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自由度系の複合非線形動的解析 δ_{\max}	構造全体の <i>Pushover</i> 解析 δ_u	変位	基本モード卓越
ひずみ照査法	構造全体の複合非線形動的解析 $\epsilon_a)_{\max}$	終局ひずみ (経験式) ϵ_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。

3. 限界値の算定法

- 変位照査法→*Pushover*解析による終局変位
- ひずみ照査法→終局ひずみ(経験式)

Pushover 解析

- ・はり要素を用いた複合非線形静的解析
- ・局部座屈無視(終局の判定に終局ひずみを利用)

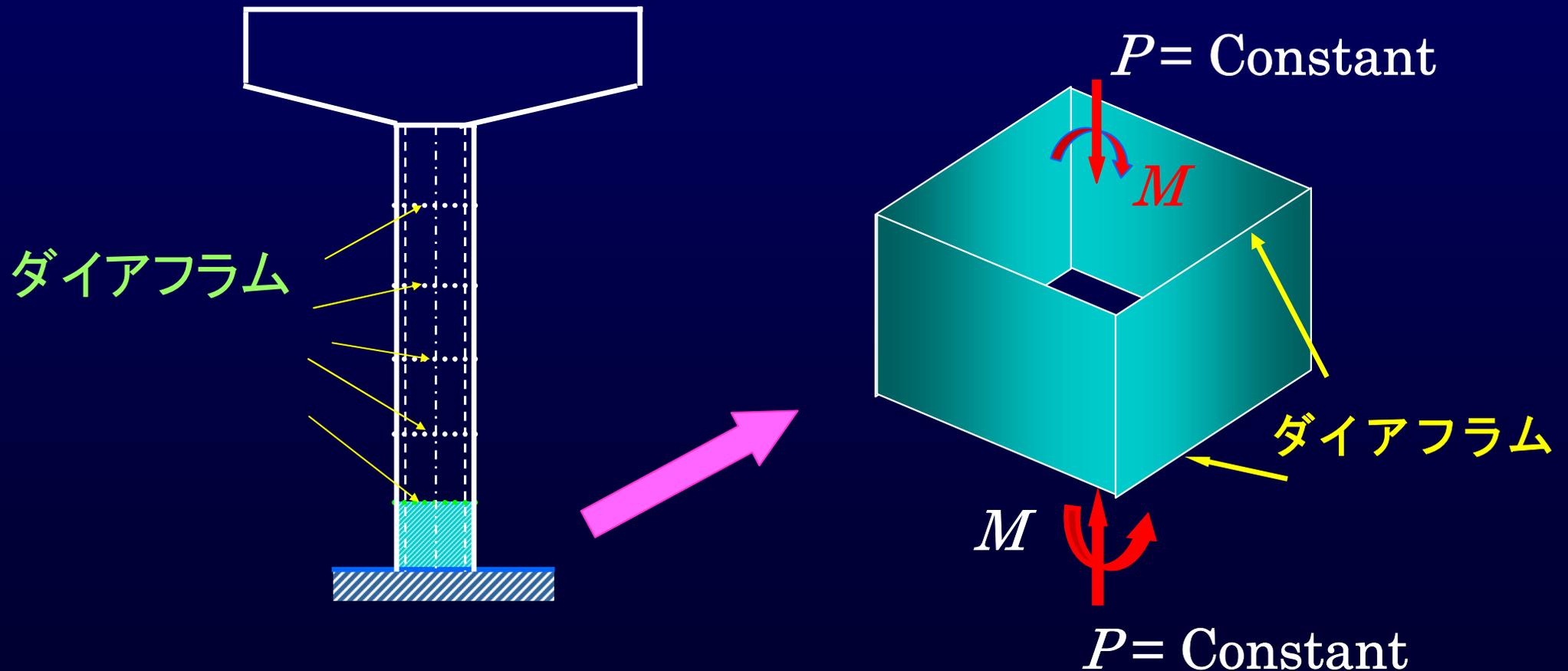
終局ひずみ

- ・部材セグメントが局部座屈により変形能を失う限界に対応する平均最外縁ひずみ: ϵ_u

終局ひずみの計算 (1)

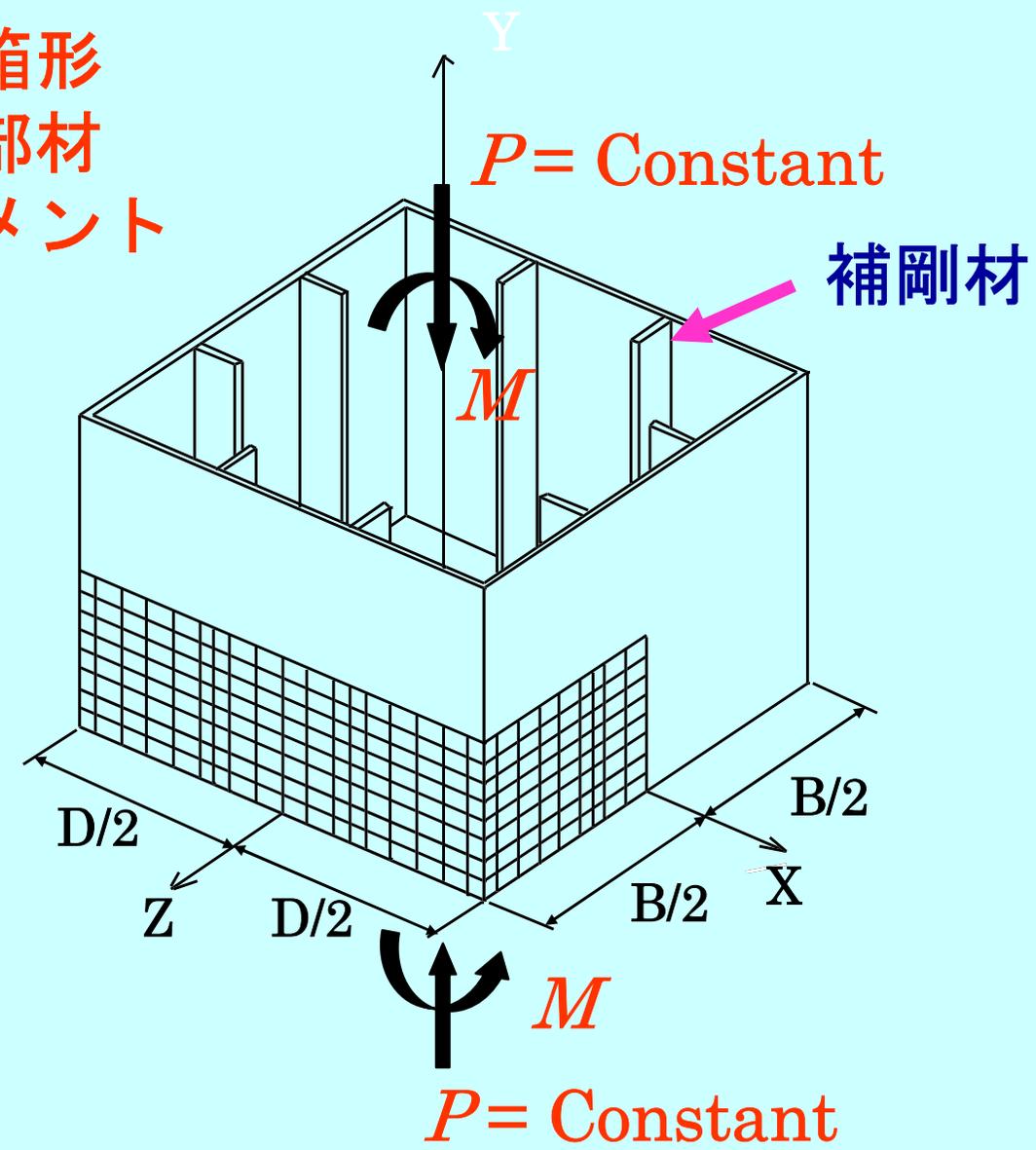
橋脚

部材セグメント

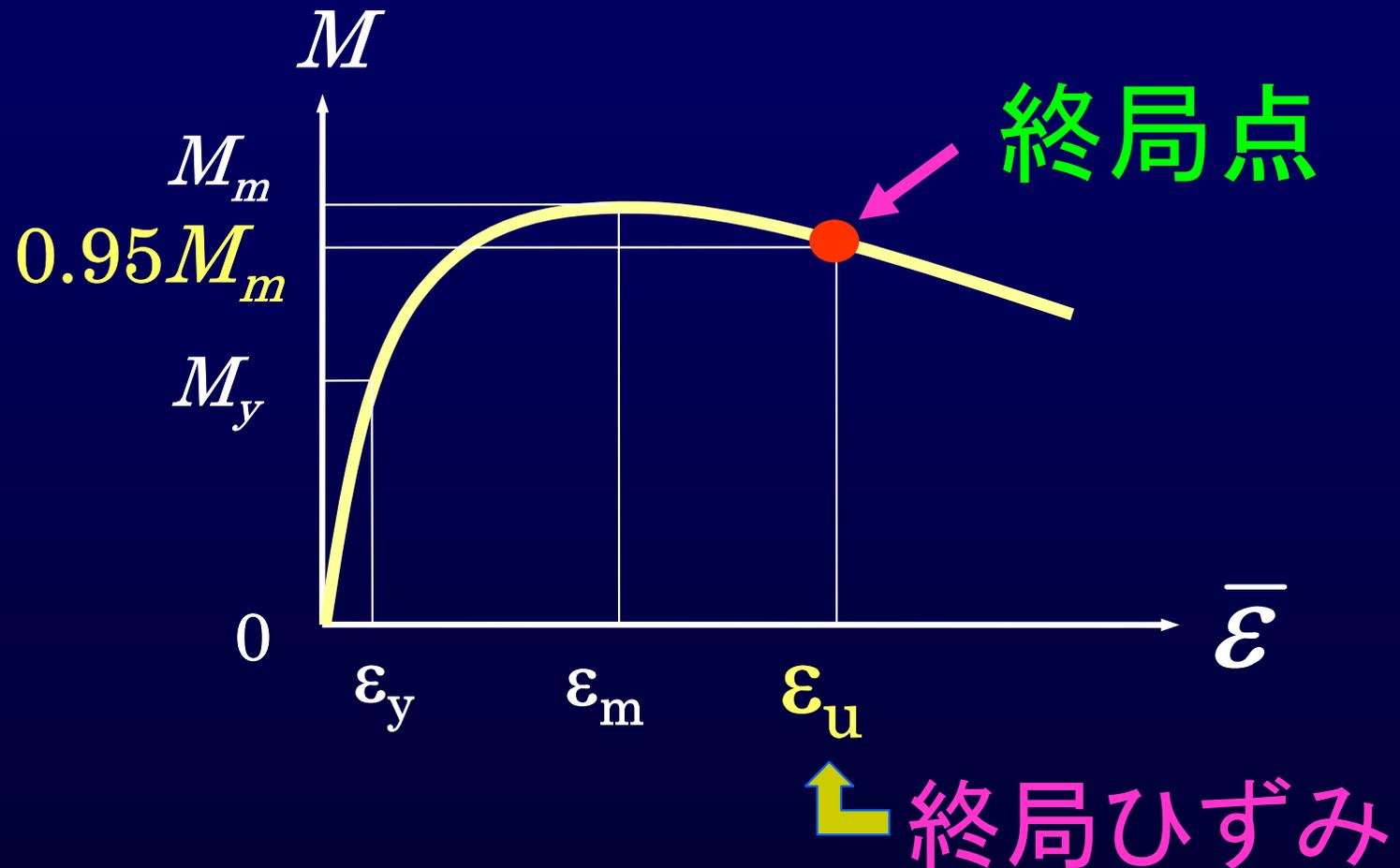


終局ひずみの計算 (2)

補剛箱形
断面部材
セグメント



終局ひずみの計算 (3)



$\bar{\epsilon}$ = 圧縮最外縁の平均ひずみ

終局ひずみ算定式(表19.4.1)

無補剛箱形

$$\frac{\varepsilon_u}{\varepsilon_y} = f(R_f, P/P_y) \leq 20.0$$

補剛箱形

$$\frac{\varepsilon_u}{\varepsilon_y} = f(R_f, \bar{\lambda}_s, P/P_y) \leq 20.0$$

パイプ

$$\frac{\varepsilon_u}{\varepsilon_y} = f(R_t, P/P_y) \leq 20.0$$

R_f = フランジ幅厚比パラメータ

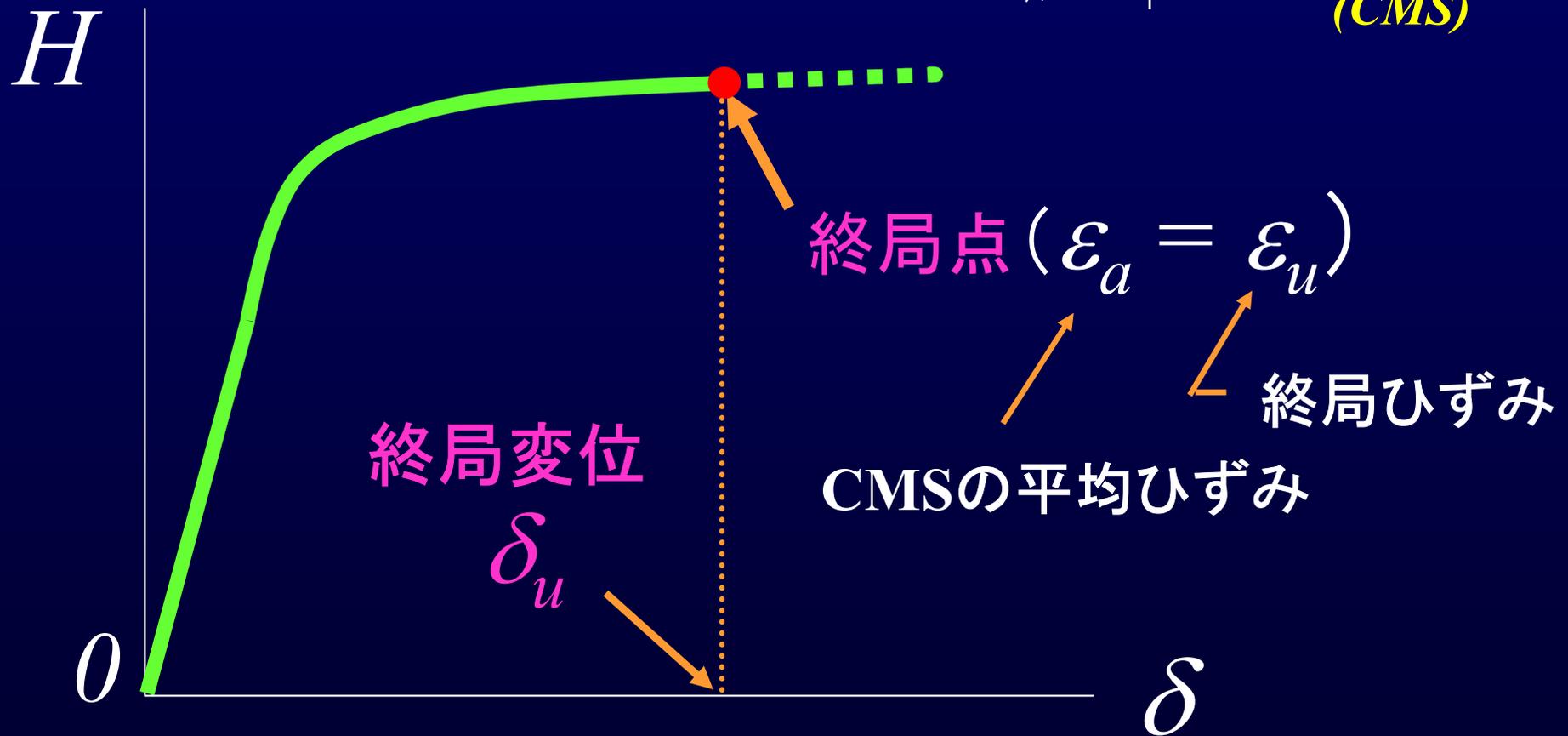
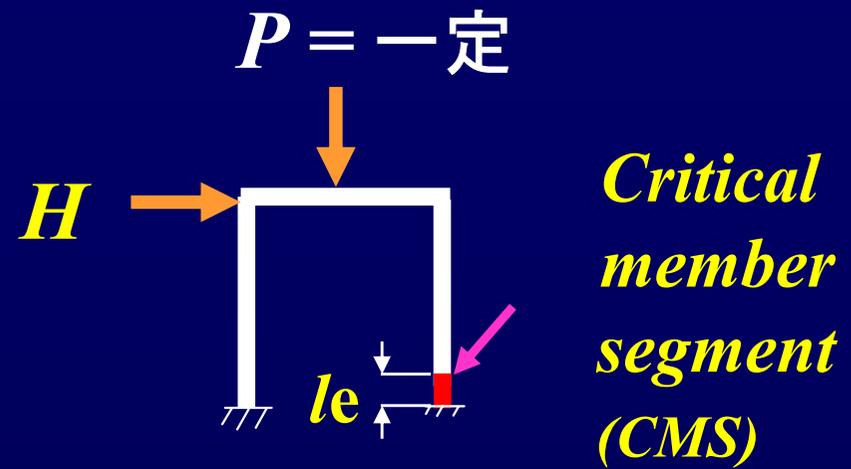
R_t = パイプ断面の径厚比パラメータ

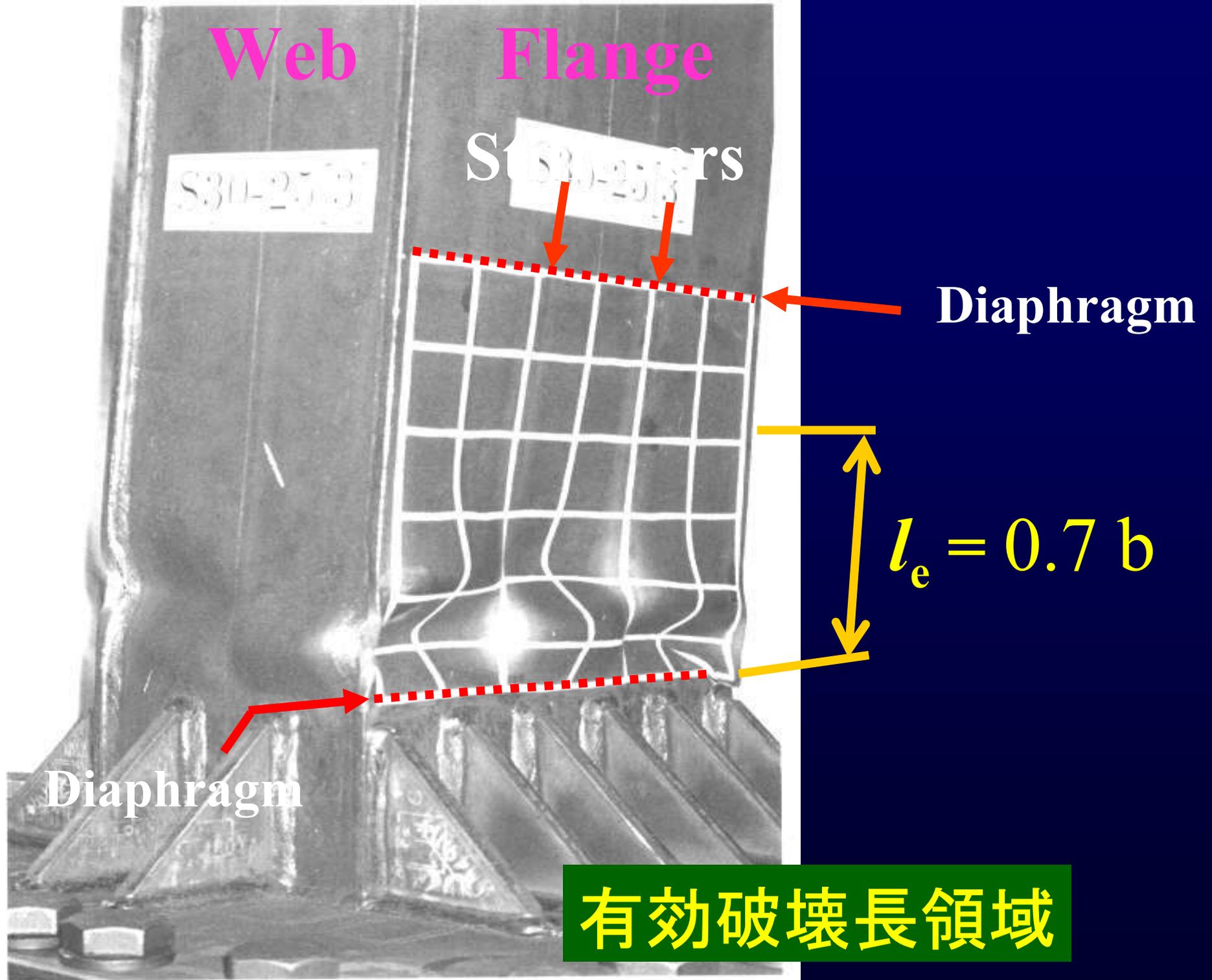
P/P_y = 軸力比

$\bar{\lambda}_s$ = 補剛材細長比パラメータ

低サイクル疲労防止

Pushover解析による終局変位の算定





Web

Flange

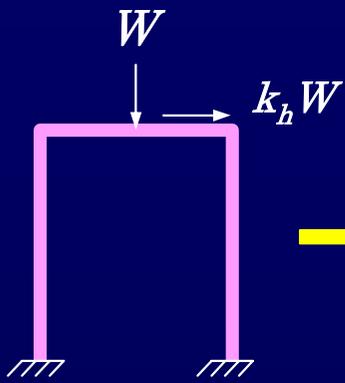
Stiffeners

Diaphragm

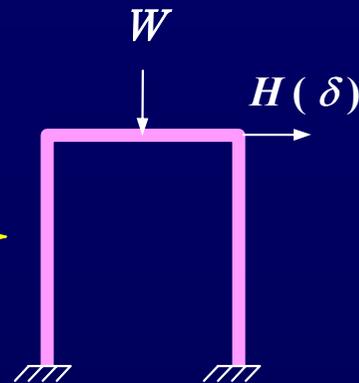
Diaphragm

$$l_e = 0.7 b$$

有效破壞長領域



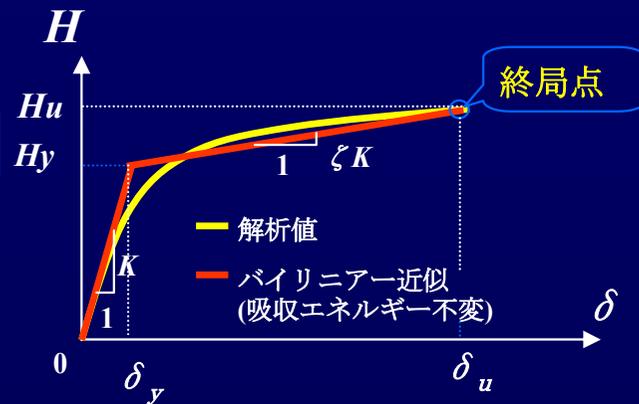
①与えられた構造物の1次設計



②Pushover 解析モデル

Pushover 解析

破壊基準

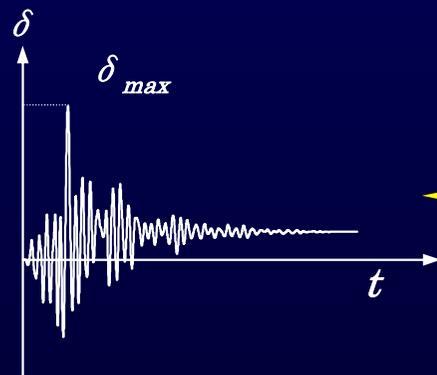


③H-δ 関係および終局変位 δ_u の算定

$$\delta_{\max} \leq \delta_u$$

$$\delta_R \leq \delta_{R\text{lim}}$$

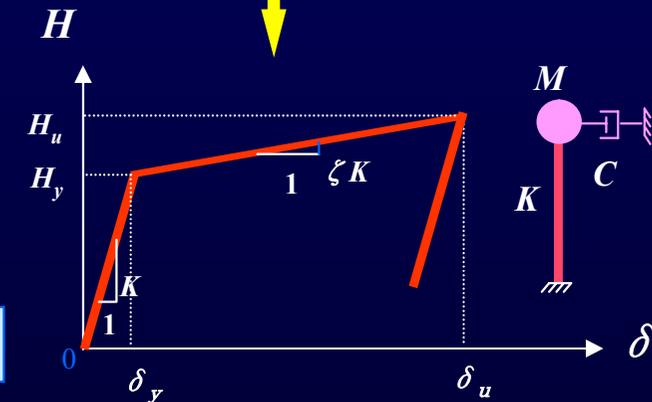
残留変位推定式



⑤応答量の計算

SDOFの地震応答解析

入力地震動

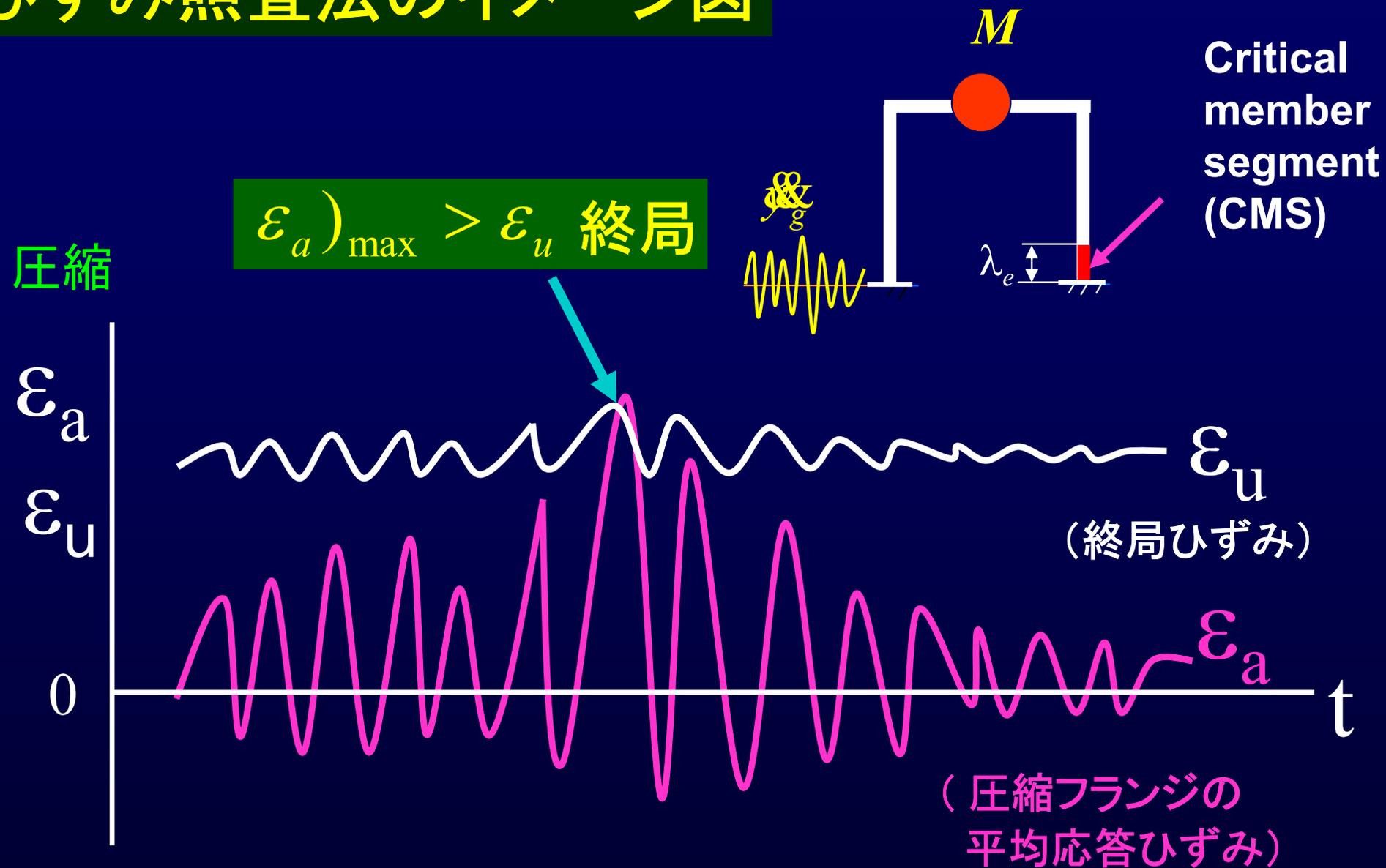


④ ④ 1 自由度(SDOF)モデルと復元力特性 (移動硬化則)

⑥耐震照査

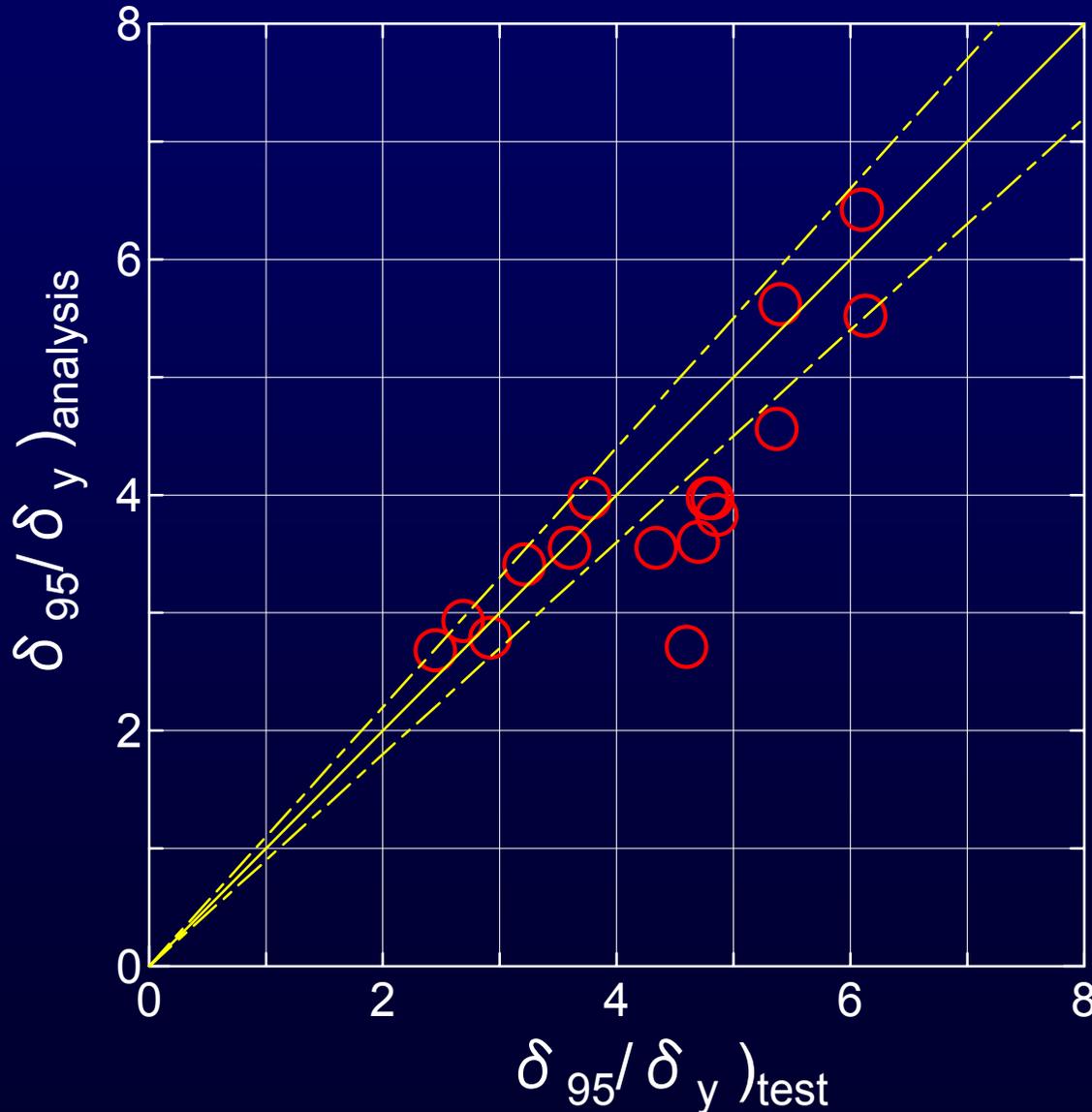
変位照査法の流れ(1自由度系構造物)

ひずみ照査法のイメージ図



解析結果と実験結果の比較 (全供試体)

破壊点 ε_u (95%耐力点)



実験: 土木研究所等の
大型供試体16体

変位照査法に関するコメント

●構造全体の耐震性能を直接照査

部材座屈：はり要素による複合非線形解析 (Pushover解析)

局部座屈：Pushover解析の終点の算定

●適用可能条件

基本モード卓越：有効質量比 > 0.75 (十分条件)

●適用可能橋梁の例

- 単柱式橋脚 (含：免震橋脚)
- 1, 2層ラーメン橋脚 (含：免震橋脚)
- 連続橋 (○橋軸方向, △橋軸直角方向)
- アーチ橋 (○橋軸直角方向, X橋軸方向)

ひずみ照査法に関するコメント

- 部材・部品の損傷度の照査で、構造全体の耐震性能との関連がやや希薄
- 部材座屈：はり要素を用いた複合非線形動的解析
局部座屈：終局ひずみ
- 現行設計示方書との整合性が採りやすい。
- 汎用性があり、ほとんどの構造物に適用可能。

「鋼構造物の耐震設計
ガイドライン(JSSC)」
作成中



2003年

(4)まとめと将来展望

- 耐震設計においては、塑性変形による履歴減衰を期待するため、強度のみならず変形性能が重要.
- 大地震時の鋼構造物の限界状態は (1)局部座屈と全体座屈の連成, (2)低サイクル疲労, によって決まる場合が多い.
- 座屈に対しては研究がかなり進み照査法も確立されているが, 低サイクル疲労の照査法は研究途上. → Research need
- 耐震照査法として変位照査法とひずみ照査法がある.
- 変位照査法は静的解析と1自由度系の動的解析ですむため, 計算は楽であるが基本モード卓越という制約がある.
- ひずみ照査法は, あらゆる構造物に適用出来るが, 多自由度系の動的解析が必要.
- いずれの照査法でも, 部材セグメントの変形能の限界を表す終局ひずみの算定式が必要 (ガイドラインに公式が与えられている).
- 将来的には耐震構造から制震構造へ. → Research need

Application of BRBs to Steel Arch Bridge (completed in 2004)



Hiroshima Prefecture in Japan



BRB



BRB

BRBによる高架橋落橋防止装置



(名古屋高速道路公社)

第20章 鋼製橋脚

名古屋大学大学院

葛 漢彬

大阪大学大学院

小野 潔

名古屋高速道路公社

前野 裕文

内容

- 20.1 概説
- 20.2 鋼製橋脚の被災例
- 20.3 鋼製橋脚の準静的および動的性状
- 20.4 鋼製橋脚の耐震性能を支配するパラメータ
- 20.5 耐震設計法および耐震解析法の考え方
- 20.6 耐震補強の考え方
- 20.7 まとめと今後の展望

内容

鋼製橋脚の破壊パターン

局部座屈

低サイクル疲労に伴う破壊

鋼製橋脚の変形性能の支配パラメータ

幅厚比（径厚比），細長比，軸力比，

固有周期，補剛材剛比，補剛材細長比

コンクリート充填高さ，角溶接方法

繰り返し回数，偏心率など

限界値(Capacity)算定

多くの単柱式鋼製橋脚, 1, 2層のラーメン式鋼製橋脚は変位照査法が適用出来る.

- 単柱式橋脚(逆L型橋脚を含む)

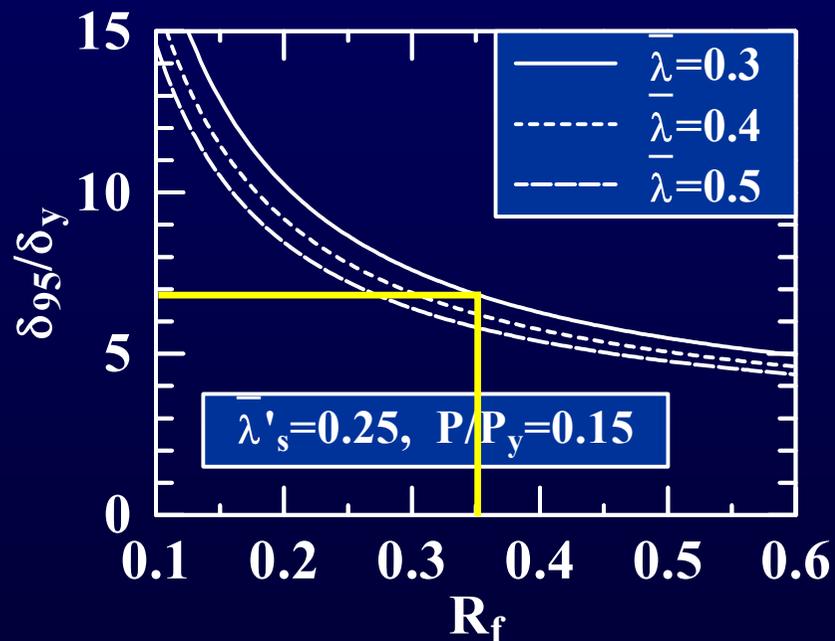
経験式がある. 断面形は無補剛箱形, 補剛箱形, パイプ
(表19.3.1~19.3.3)

- コンクリート部分充填橋脚, ラーメン式橋脚

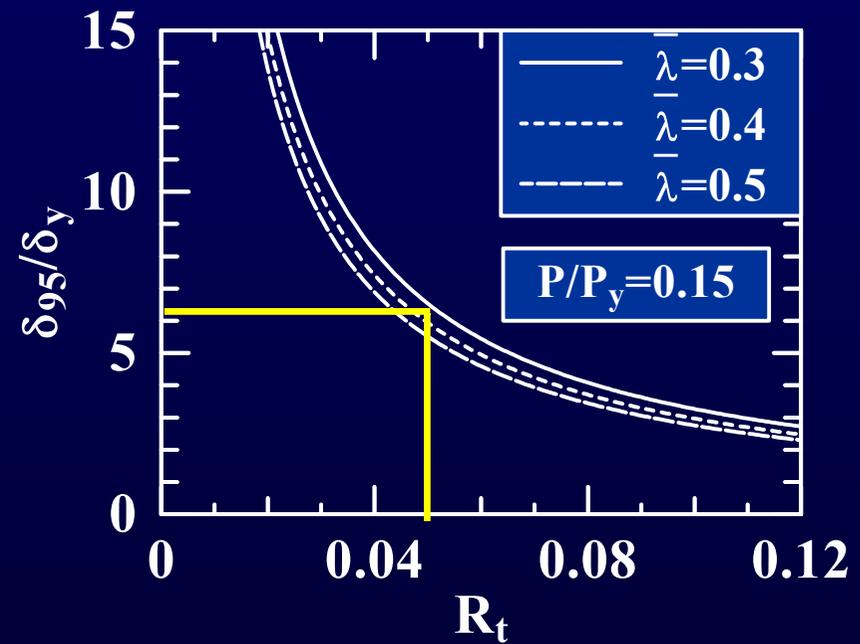
Pushover 解析によって求める.

支配パラメータの影響（経験式）

幅厚比 or 径厚比パラメータ



補剛箱形断面



パイプ断面

目標塑性率と細長比パラメータの最大値

補剛箱形断面

目標塑性率 μ		4	5	6	7	8
$\bar{\lambda}$ の 最大値	M	∞	0.58	0.36	0.28	0.24
	M-S	0.46	0.32	0.26	0.23	0.20

($P/P_y=0.2$, $R_f=0.35$)

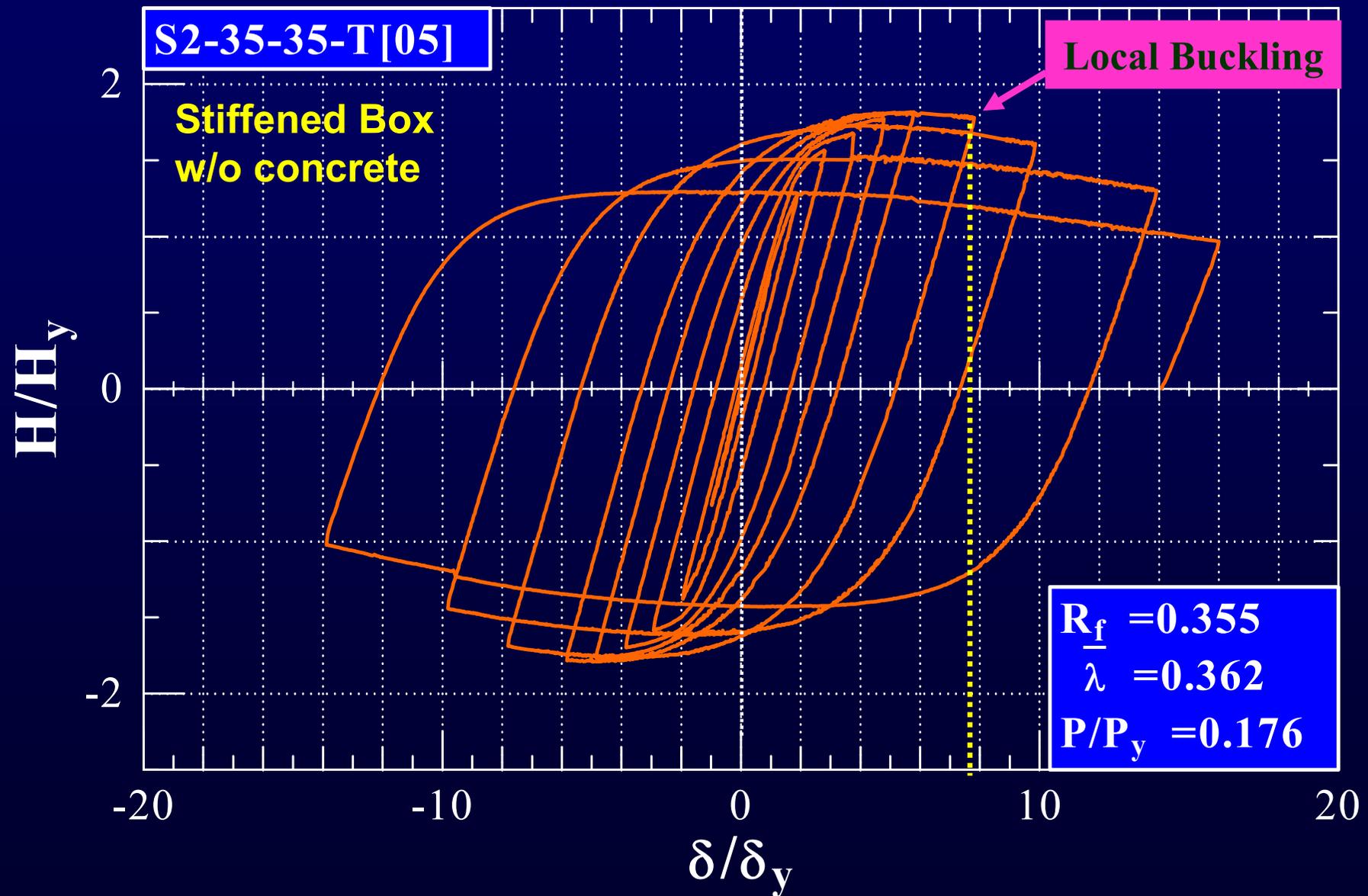
目標塑性率と細長比パラメータの最大値

パイプ断面

目標塑性率 μ	4	5	6	7	8
$\bar{\lambda}$ の最大値	1.2	0.61	0.36	0.22	0.15

($P/P_y=0.2$, $R_t=0.05$)

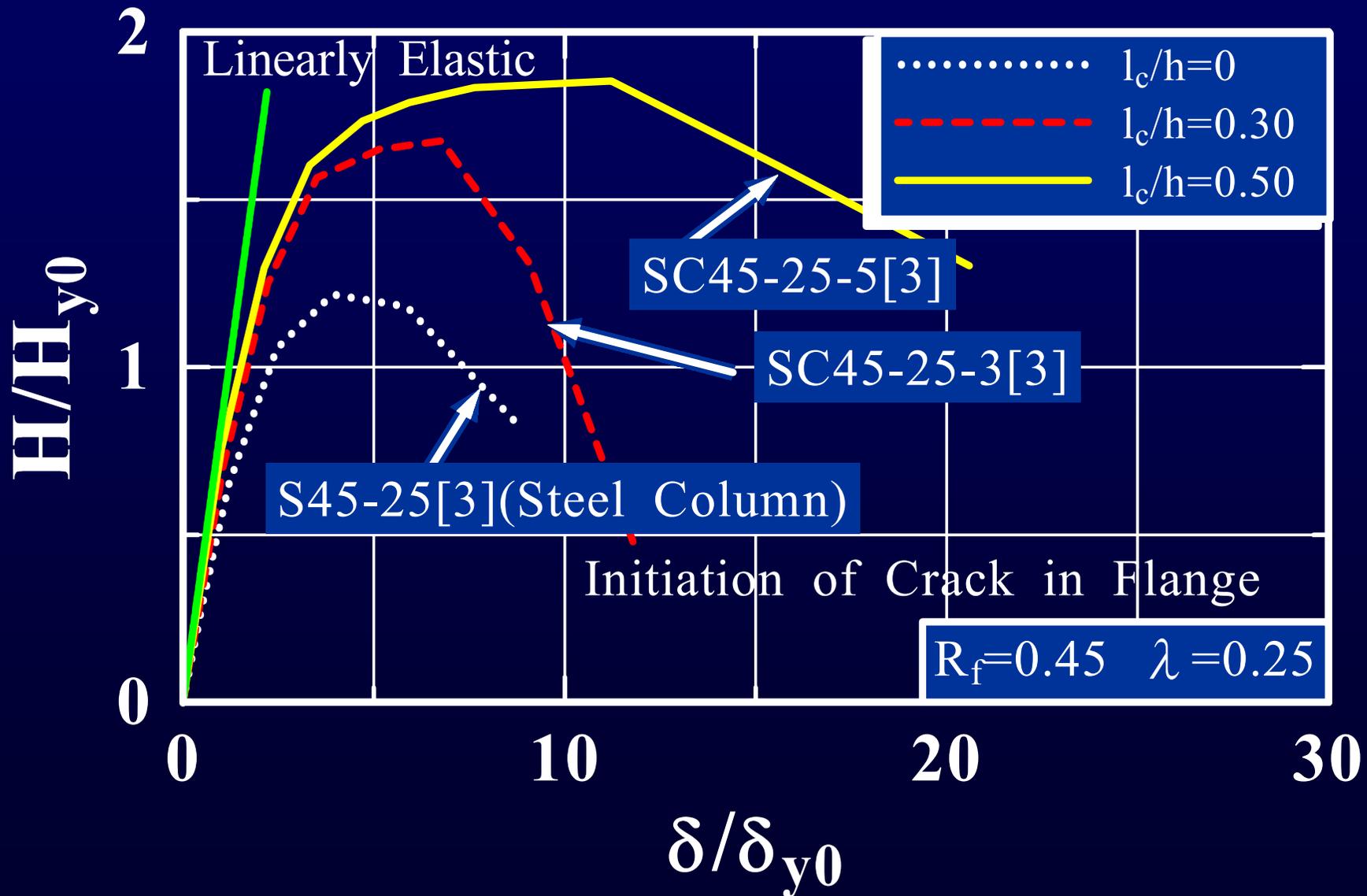
変形性能の高い鋼製橋脚の 繰り返し载荷実験結果

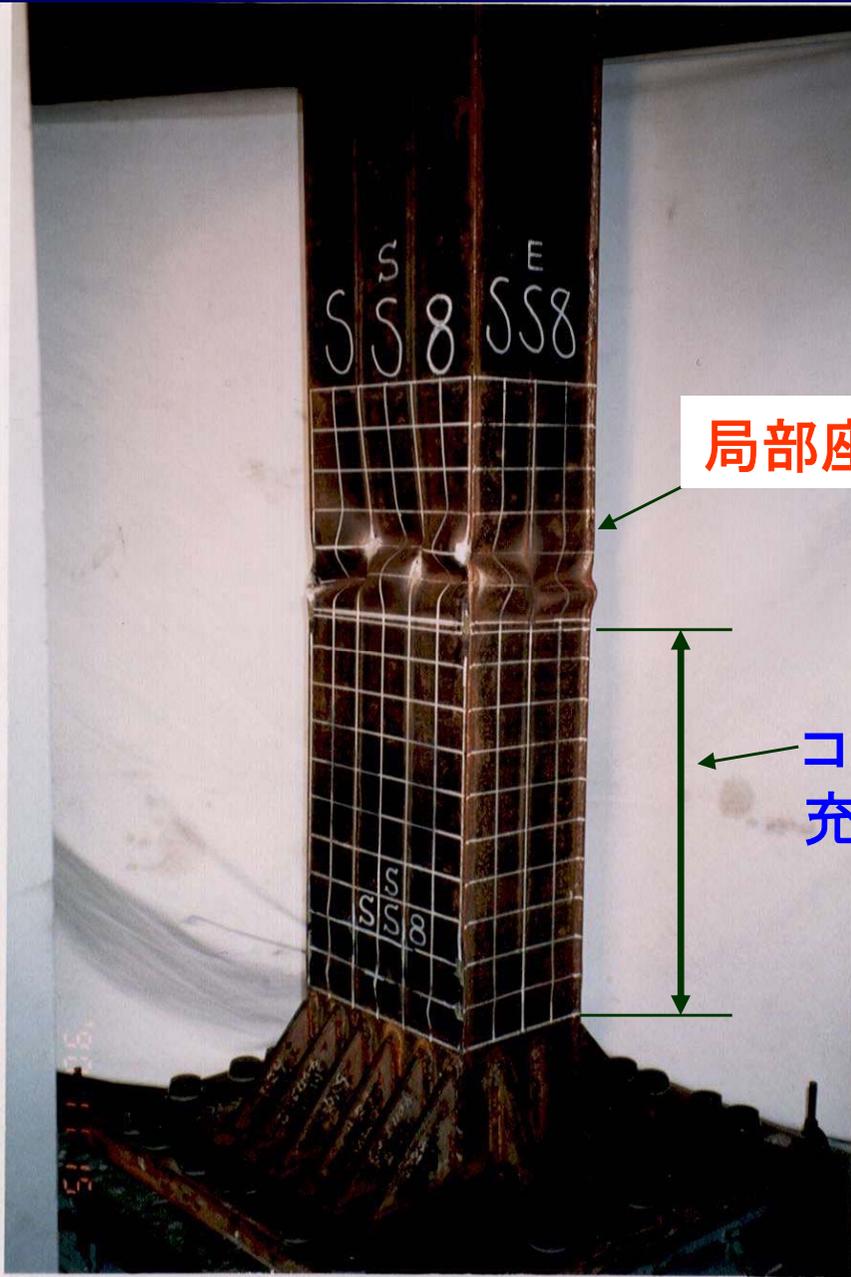


支配パラメータの影響 (実験結果)

コンクリート充填高さ

補剛箱形断面
(繰り返し载荷実験)

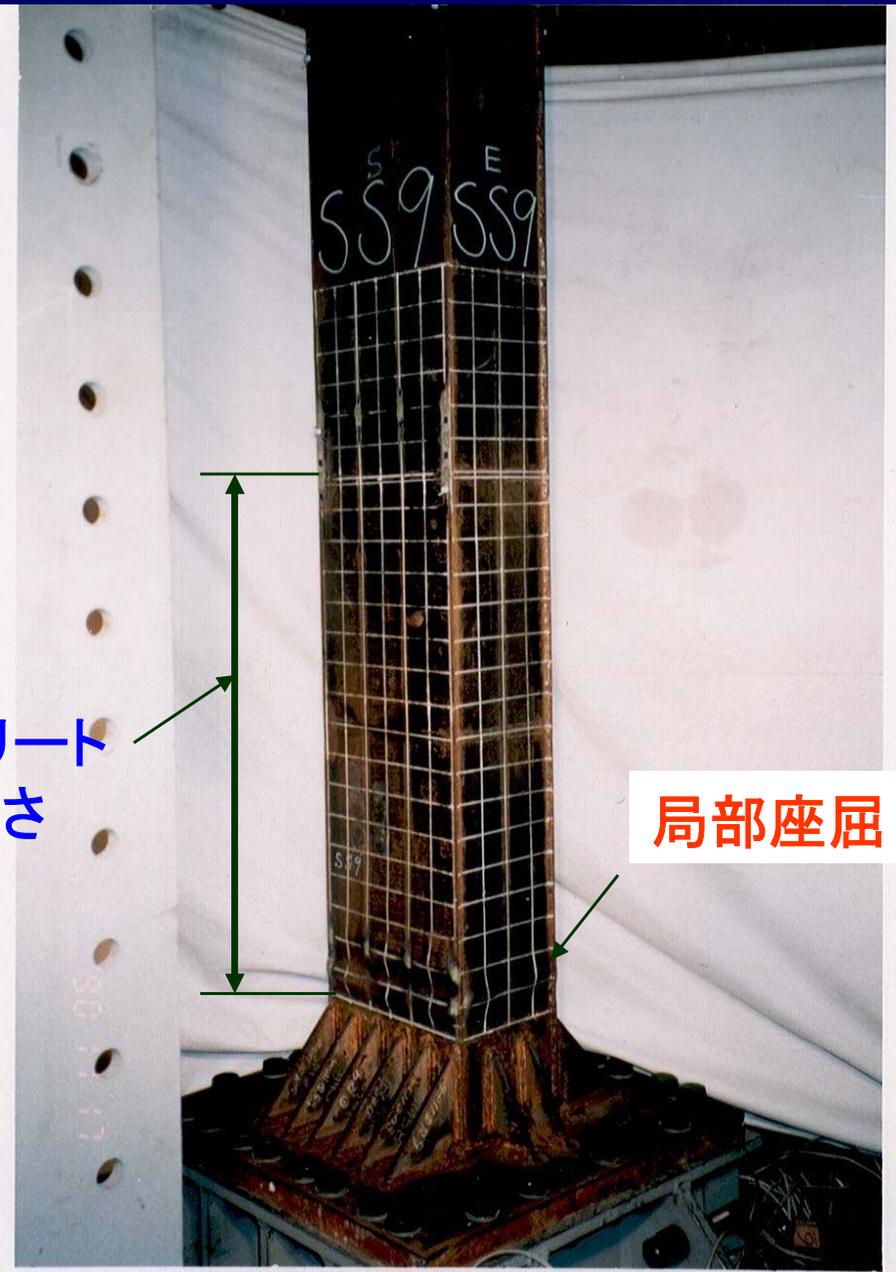




局部座屈

コンクリート
充填高さ

30%充填

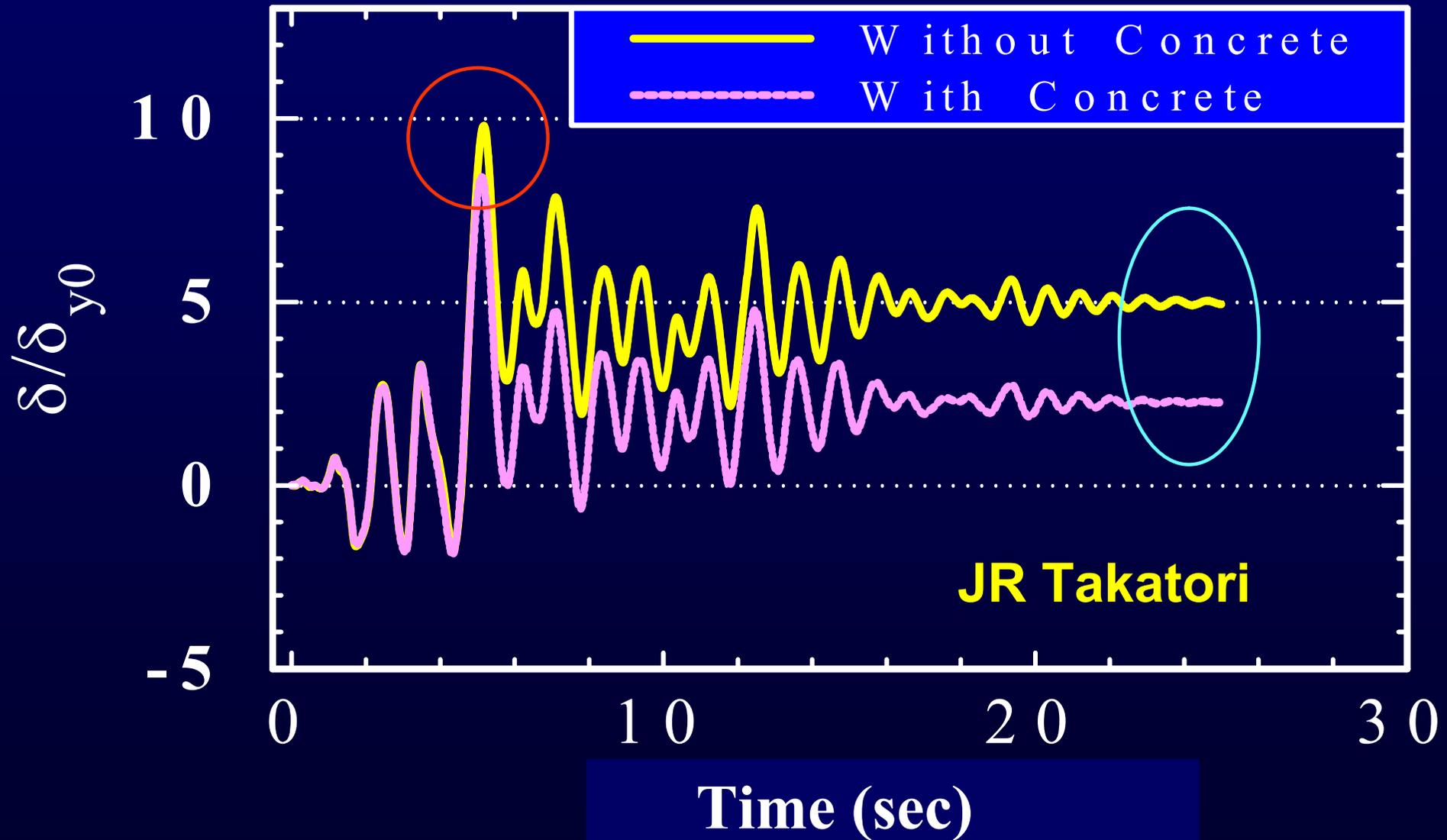


局部座屈

50%充填

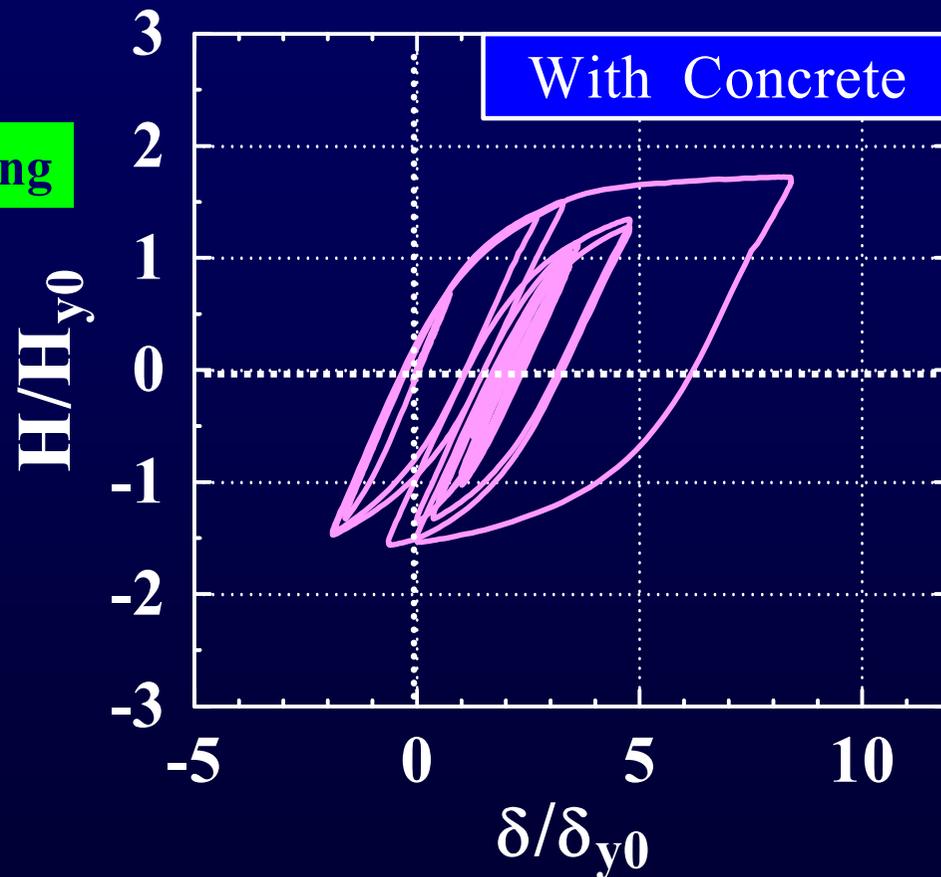
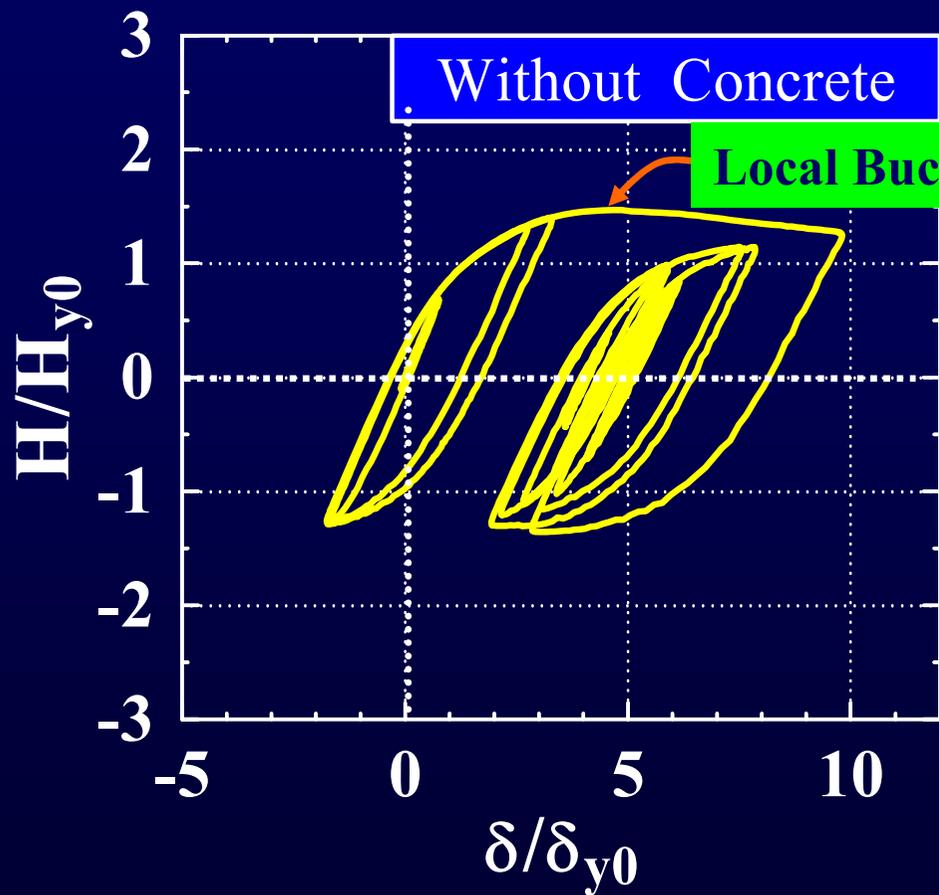
ハイブリッド地震応答実験結果

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



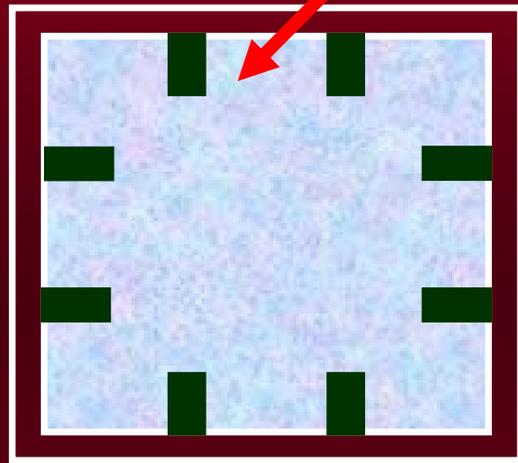
ハイブリッド地震応答実験結果

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



(まとめ) 変形性能の高い鋼製橋脚

コンクリート

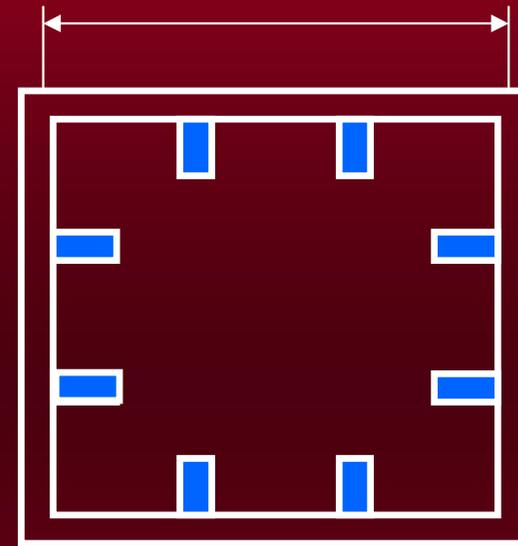


(a) コンクリート部分充填

単柱式橋脚の場合

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

b



板厚: t

(b) 小壁厚比断面, 高剛性補剛材

$$R_f \cong 0.35 \quad \gamma / \gamma^* \geq 3.0$$

$$a \cong b \quad a = \text{ダイヤフラム間隔}$$

鋼製橋脚の耐震設計法

新技術小委員会(土木学会, 1996)

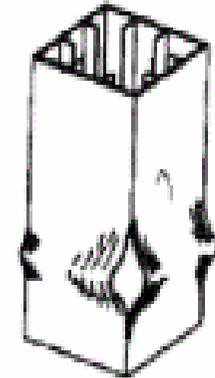
- コンクリート部分充填鋼製橋脚の地震時保有水平耐力照査法
 - ・Pushover解析
 - ・破壊基準(平均圧縮ひずみが終局ひずみに達する状態)

次世代土木鋼構造委員会(JSSC, 2000)

- 保有水平耐力照査法に代わり, 変位照査法またはひずみ照査法が提案された.

道路橋示方書・V耐震設計編 (日本道路協会, 2002)

- ・動的照査法による耐震性能の照査
- ・ぜい性的破壊を防ぎ, じん性(変形能)を確保できる構造の採用
- ・残留変形の制限
- ・アンカー一部の設計(塑性化させない)



(a) 矩形断面橋脚における角割れ



(b) 円形断面鋼製橋脚における変形の集中, 進展に伴う傾斜, 割れ

ぜい性的破壊モード

鋼製橋脚の耐震補強

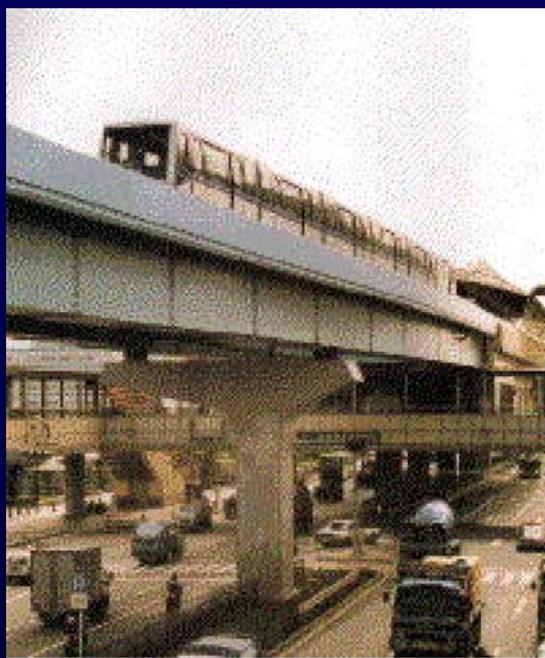
(日本道路協会参考資料)

基本的な考え方

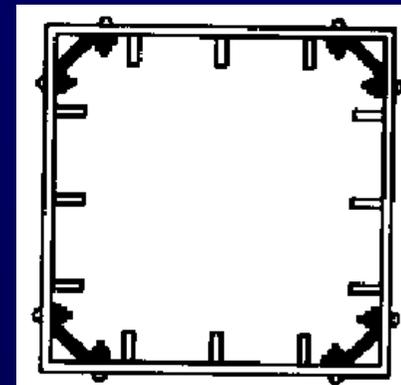
- 基礎、アンカー部への負担を小さくするため、橋脚の変形能を向上させ、水平耐力が過度に上がらないような補強工法の採用
- 橋脚各断面の耐力とアンカー部の耐力の大小関係に応じて、塑性ヒンジの位置および補強手法を検討
- 耐震補強設計手法として、コンクリート充填による方法、角補強による方法を例示

鋼製橋脚の耐震補強例

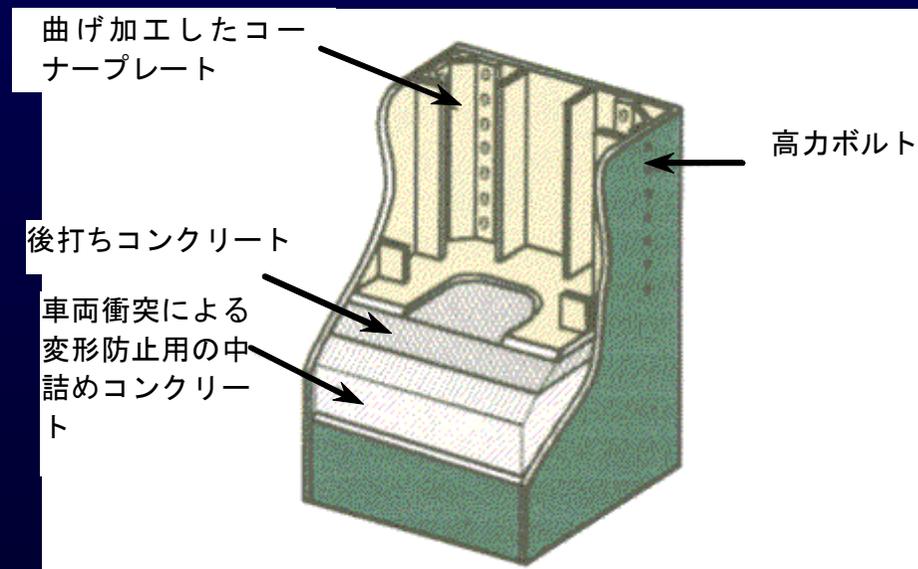
(ゆりかもめの例)



ゆりかもめ

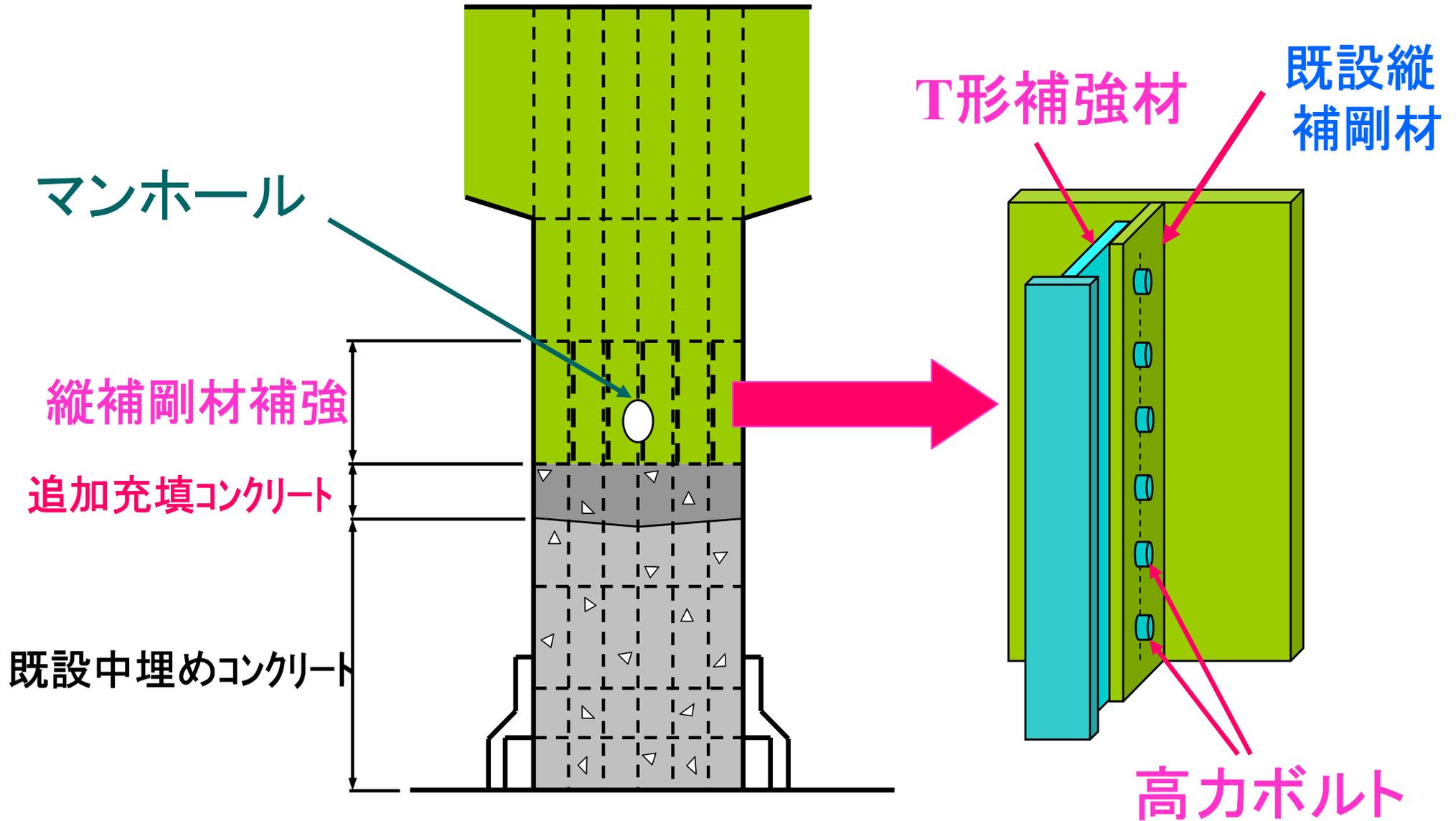


高力ボルトによる角補強



高力ボルトによる角補強の適用

耐震補強例(名古屋高速道路公社)



まとめ

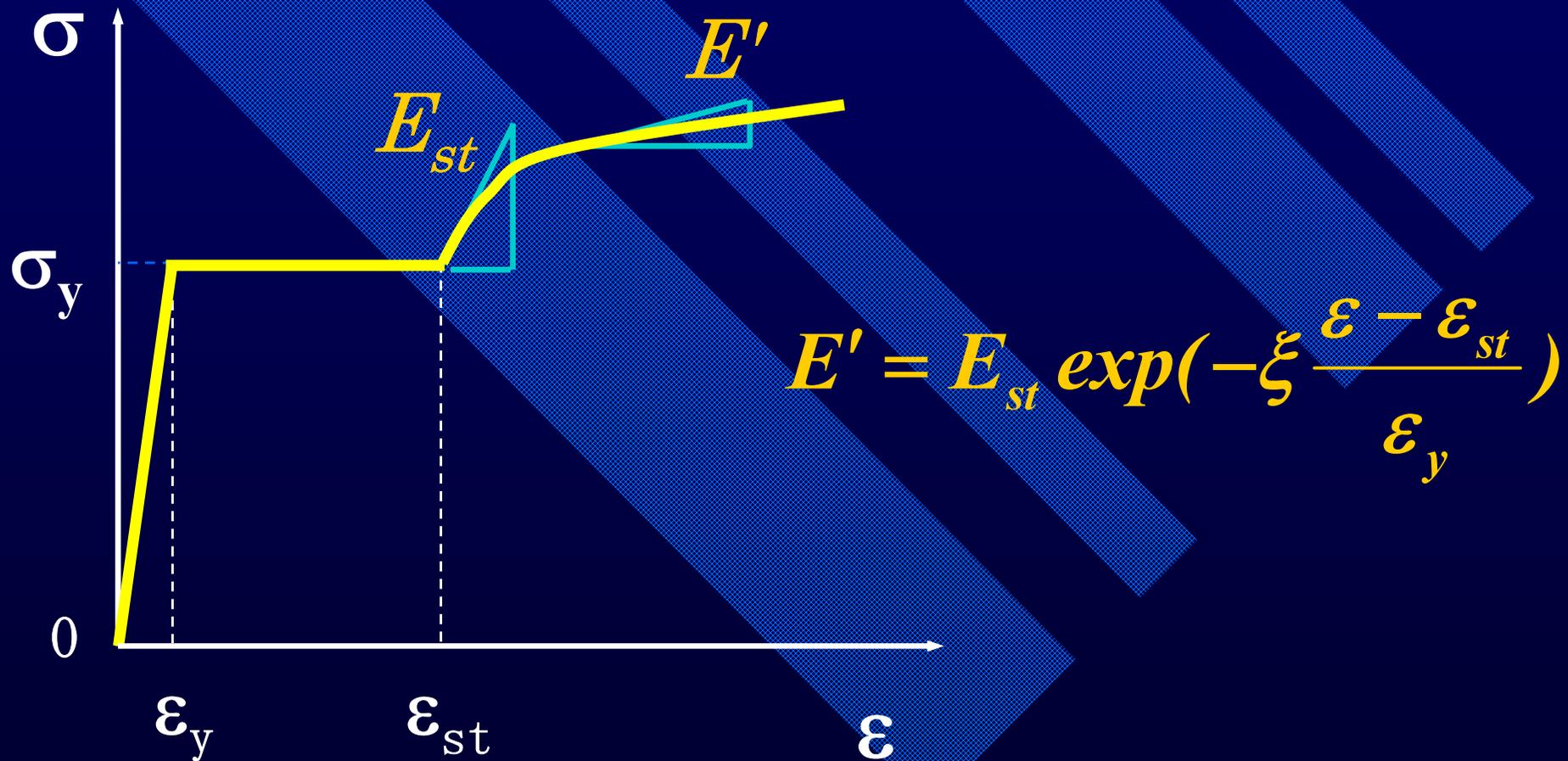
- ・ 局部座屈に対する耐震性能照査はほぼ確立されている。
- ・ 耐震性能の向上・補強策：
コンクリート充填，小幅厚比（小径厚比），高剛性補剛材，角補強など

今後の展望

- 低サイクル疲労に伴う脆性的破壊評価法の確立
- ラーメン隅角部のひずみ集中低減構造
- 高靱性鋼の応用
- 残留変位低減構造の開発
- 多方向地震動の影響
- 制震構造による耐震性向上
- 大型震動台による破壊シナリオの検証

Pushover解析

鋼材の応力-ひずみ関係



兵庫県南部地震における鋼製橋脚の被災例



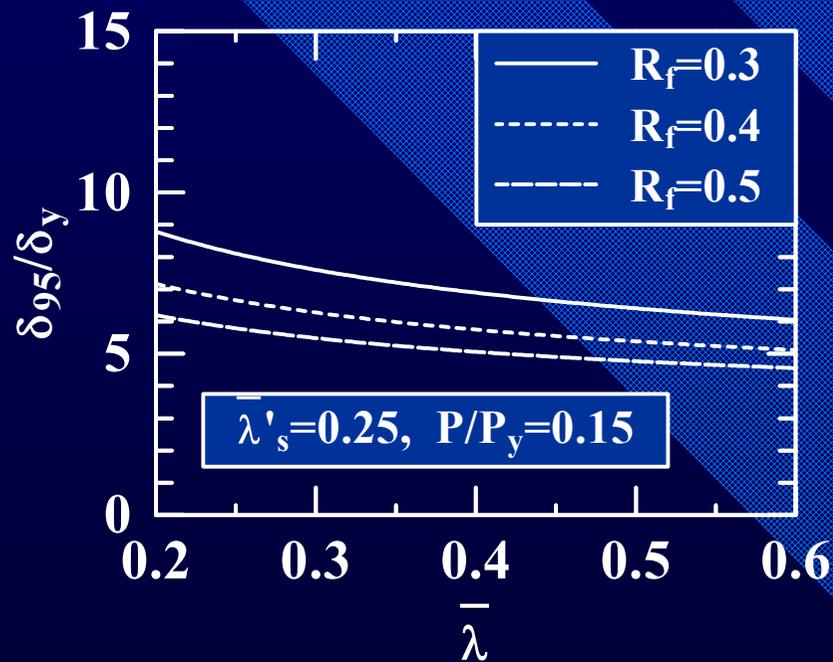
・倒壊した鋼製橋脚



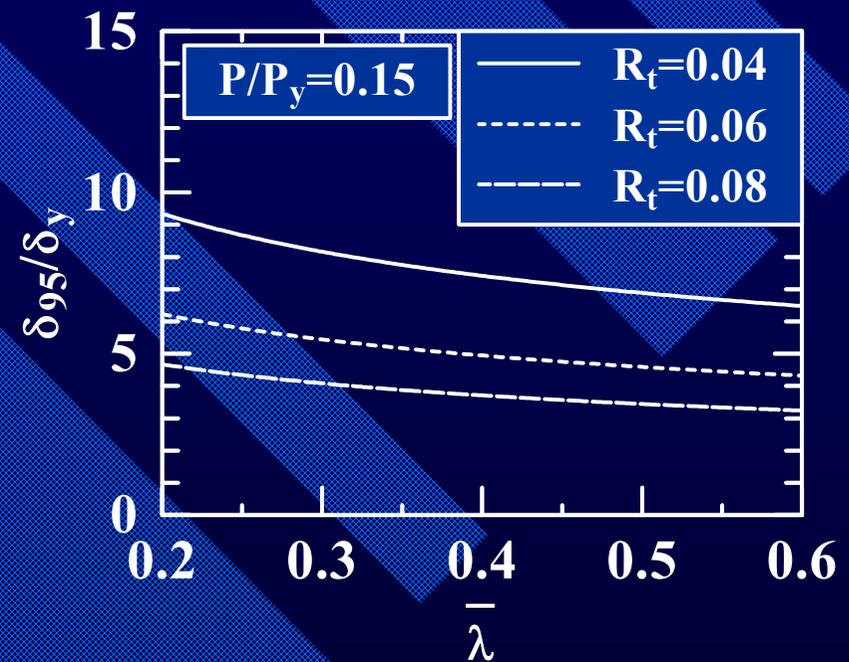
・大きく傾いた鋼製橋脚

支配パラメータの影響

細長比パラメータ



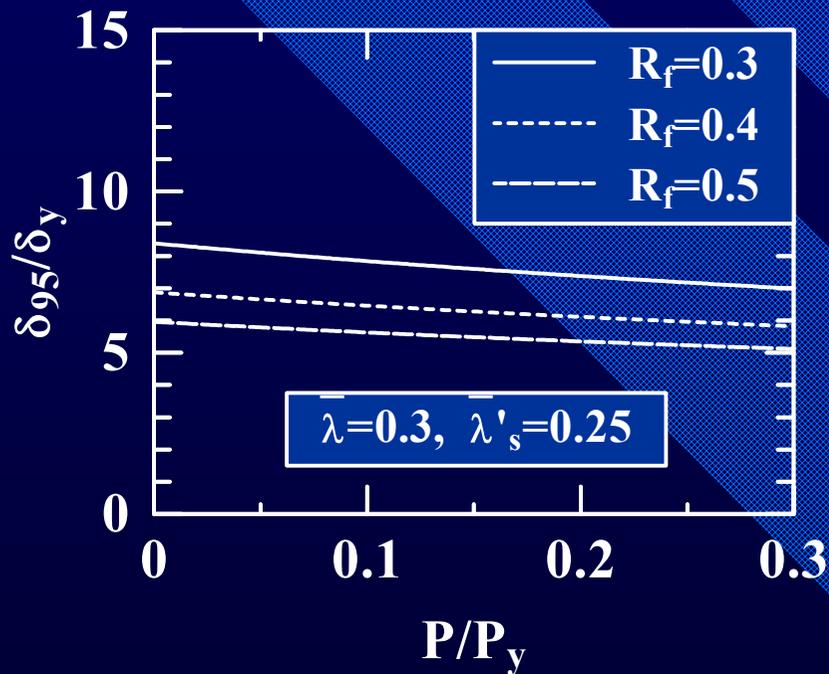
補剛箱形断面



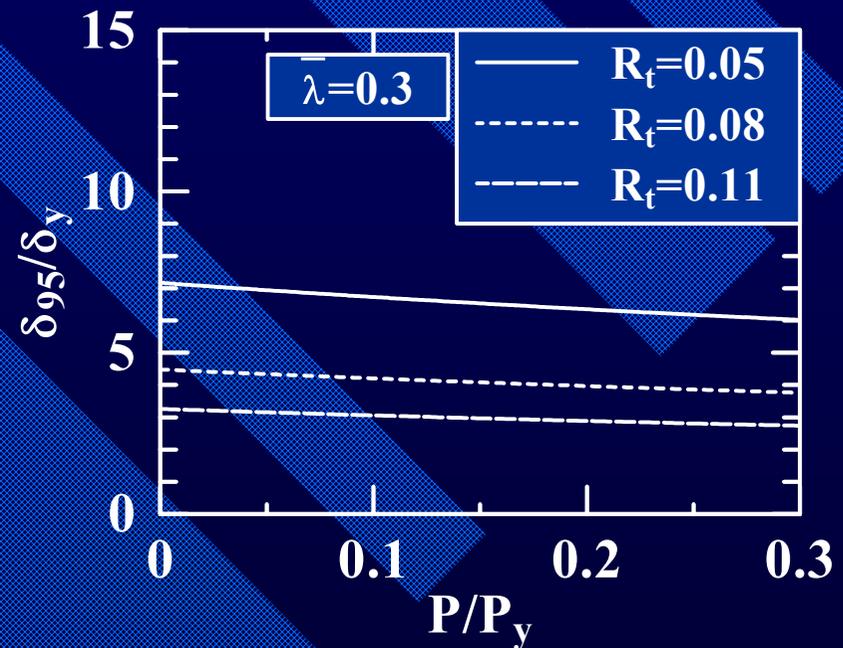
パイプ断面

支配パラメータの影響

軸圧縮力



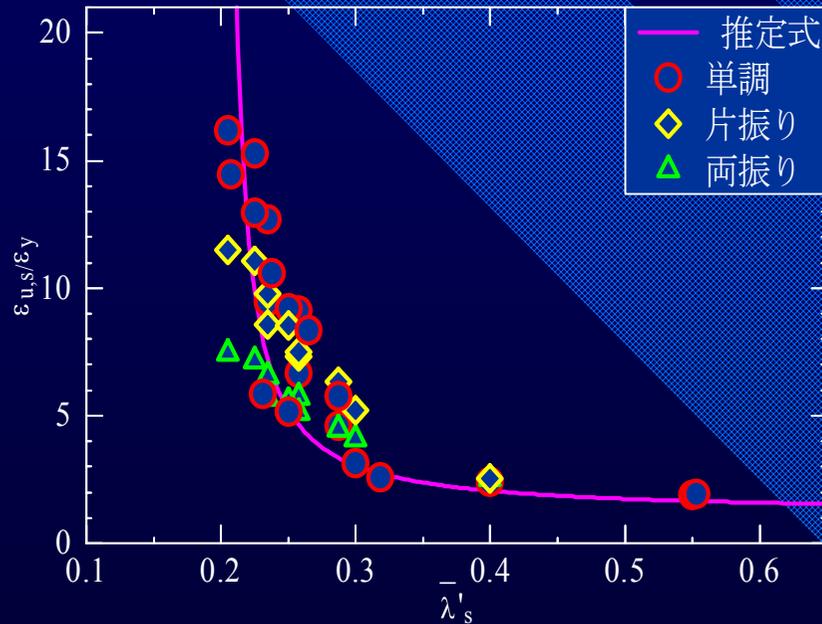
補剛箱形断面



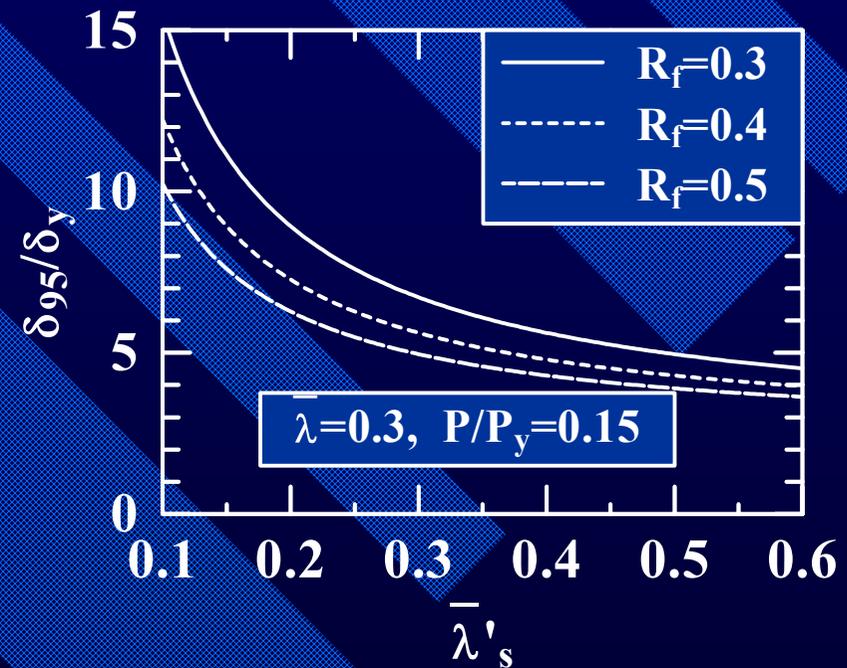
パイプ断面

支配パラメータの影響

補正補剛材細長比パラメータ



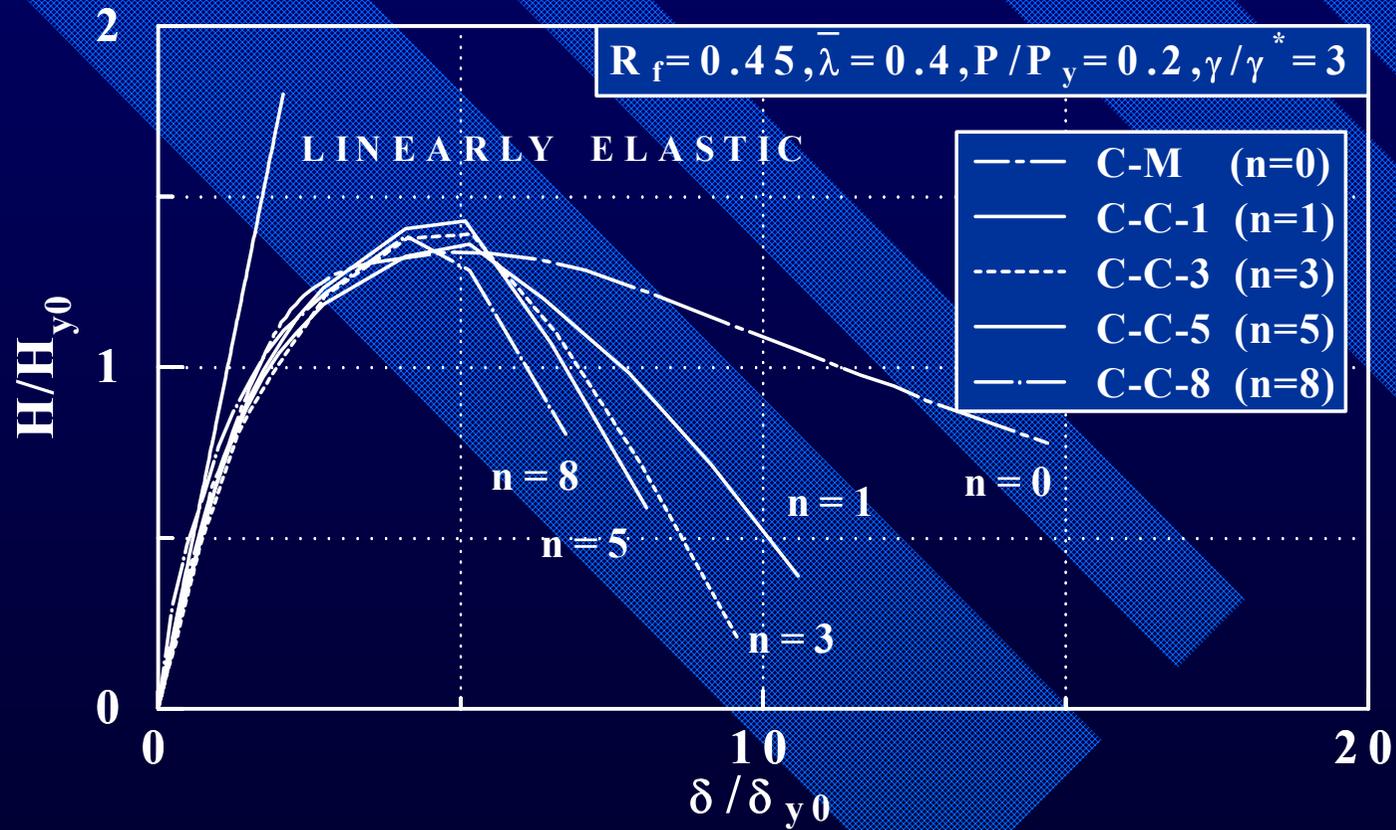
補剛板



補剛箱形断面

支配パラメータの影響

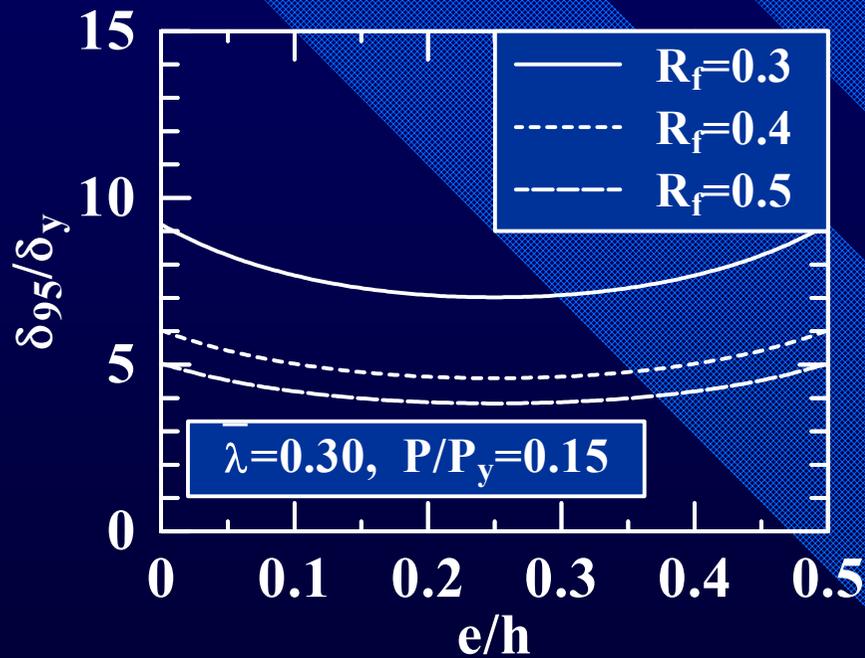
繰り返し回数



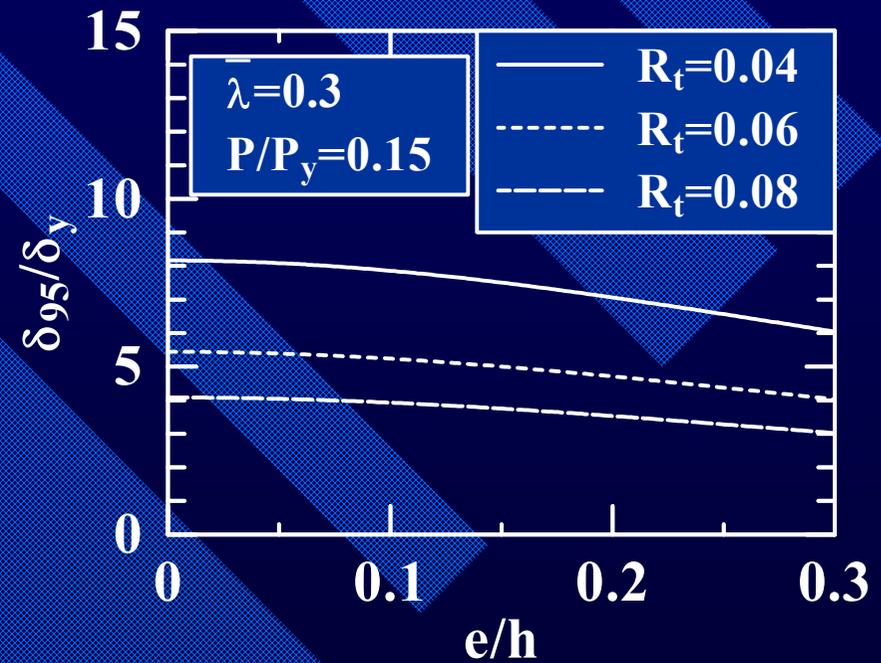
補剛箱形断面

支配パラメータの影響

偏心率



補剛箱形断面



パイプ断面