

第14章 トラス

第15章 ラーメン

第16章 アーチ

第17章 吊構造(新規)

第18章 複合構造(新規)

第14章 トラス

横河ブリッジ 尾下 里治

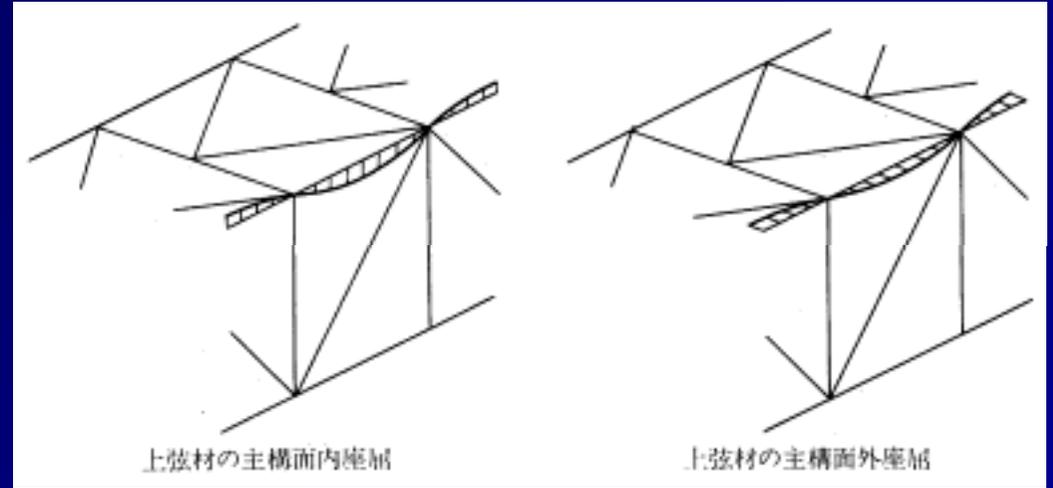
内容

- 14.1 概説
- 14.2 トラス圧縮部材の極限強度と設計法
- 14.3 たわみを弾性拘束された圧縮弦材
- 14.4 トラス桁の全体横ねじれ座屈
- 14.5 ガセットの座屈
- 14.6 今後の展望

内容

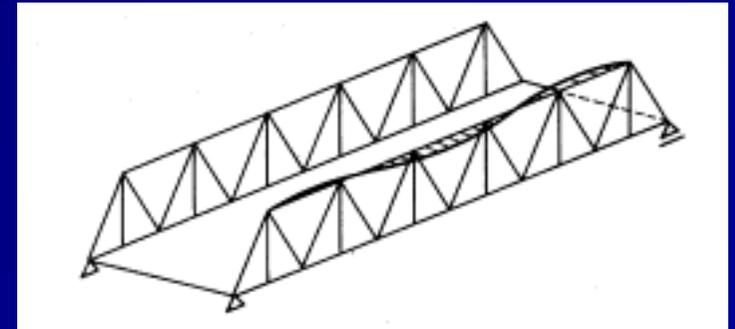
圧縮部材の極限強度と設計法

- ・設計法の現状
- ・極限状態における挙動
- ・ストラットモデル
- ・有効座屈長法



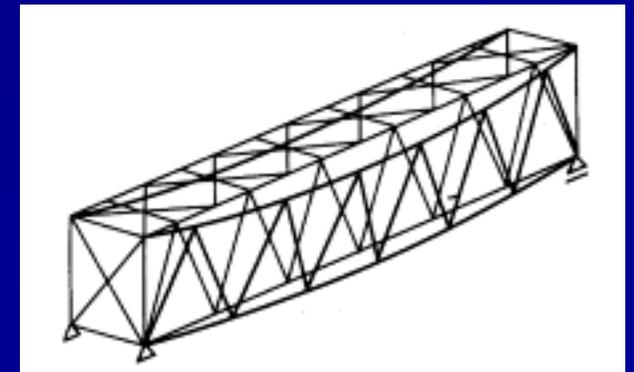
弾性拘束された圧縮弦材

- ・ポニートラス上弦材の設計



全体横ねじれ座屈

- ・側道トラス橋の極限強度



ガセットの座屈（新規追加）

- ・自由辺長の制限

圧縮部材の挙動と極限強度

・トラス全体構造の弾塑性有限変位解析結果

1) 静定トラスの軸力は極限状態に至るまで荷重と線形関係にあり部材の塑性化による軸力の再配分は生じない。

2) 格点の側方変位が拘束されたトラスの極限強度はその荷重状態において最も安全率が小さい1本の部材の崩壊によって引き起こされる。

3) 圧縮部材の極限強度は隣接部材の拘束効果や2次曲げモーメントに関して定まる。拘束効果や2次曲げモーメントは荷重状態の影響を受ける。

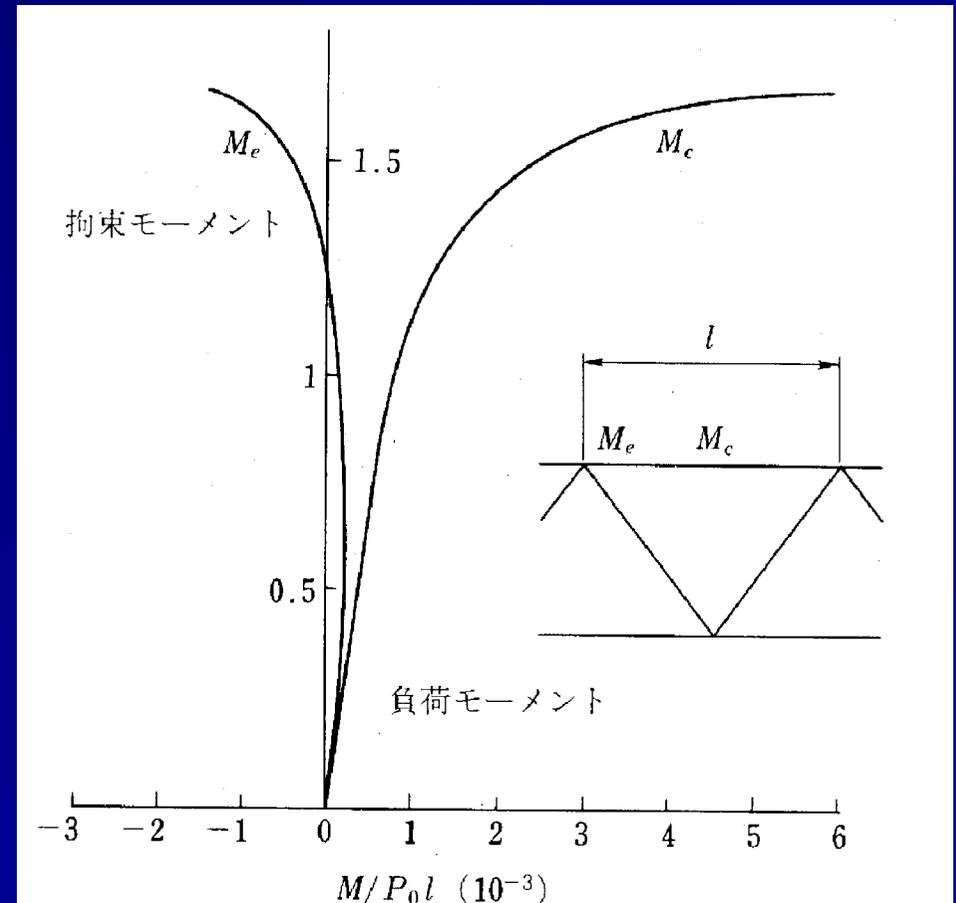


図 14. 2. 5 スパン中央上弦材の曲げモーメント

偏心圧縮を受ける弾性拘束柱

・弾性拘束柱モデル(ストラットモデル)

着目部材の材端モーメントと隣接部材の拘束度を適切に評価できる

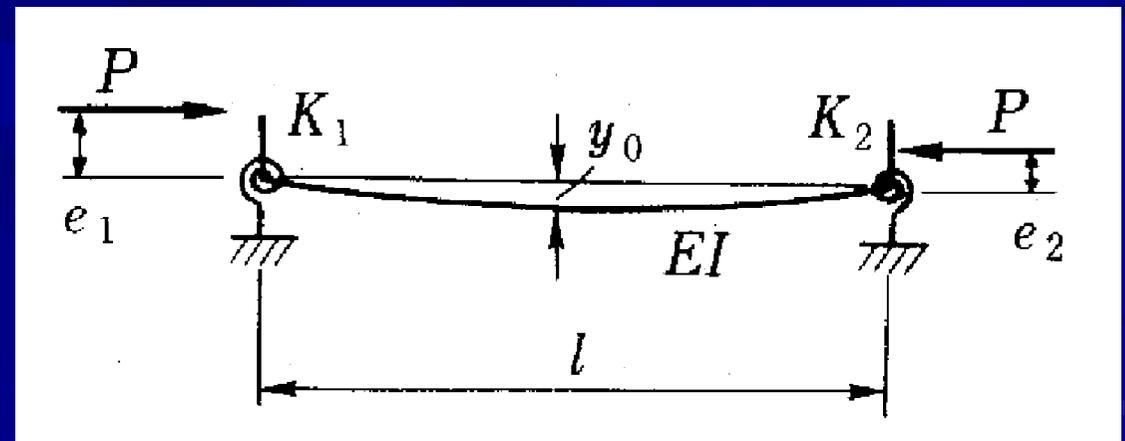
回転バネ剛性

$$\kappa_i = \sum_{j=1}^n \frac{3EI_j}{\lambda_j} \frac{1}{\phi(\alpha)} \bigg/ \frac{EI}{\lambda} \quad (i=1,2)$$

等価偏心量

$$\frac{\bar{e}_1}{\lambda} = \left(1 + \frac{\kappa_1}{3}\right) \frac{e_1}{\lambda} - \frac{\kappa_1}{6} \frac{e_2}{\lambda}$$

$$\frac{\bar{e}_2}{\lambda} = \left(1 + \frac{\kappa_2}{3}\right) \frac{e_2}{\lambda} - \frac{\kappa_2}{6} \frac{e_1}{\lambda}$$



トラス圧縮部材の極限強度と設計法

設計法の現状

・極限強度の評価法

1) 隣接部材の拘束効果を適切に評価し、弾性分岐座屈理論により着目部材の有効座屈長を求め、柱の基本強度式に関係つけて極限強度を算出する。

2) トラスの全体モデルないしは弾性拘束柱の弾塑性有限変位解析により、圧縮部材の極限強度を直接評価する。

→ (現状)

有効座屈長さ係数を規定した有効座屈長さ法が基本

しかし、1)の方法では、()部材の初期変位および残留応力、()着目部材および隣接部材の塑性化、()剛節トラスとしての2次曲げモーメントなどの極限強度に及ぼす影響を直接考慮できないので、実用的な設計法として有効座屈長さ法を用いるとしても2)の方法による極限強度特性の広範な検討が要求されている。

圧縮部材の有効座屈長法

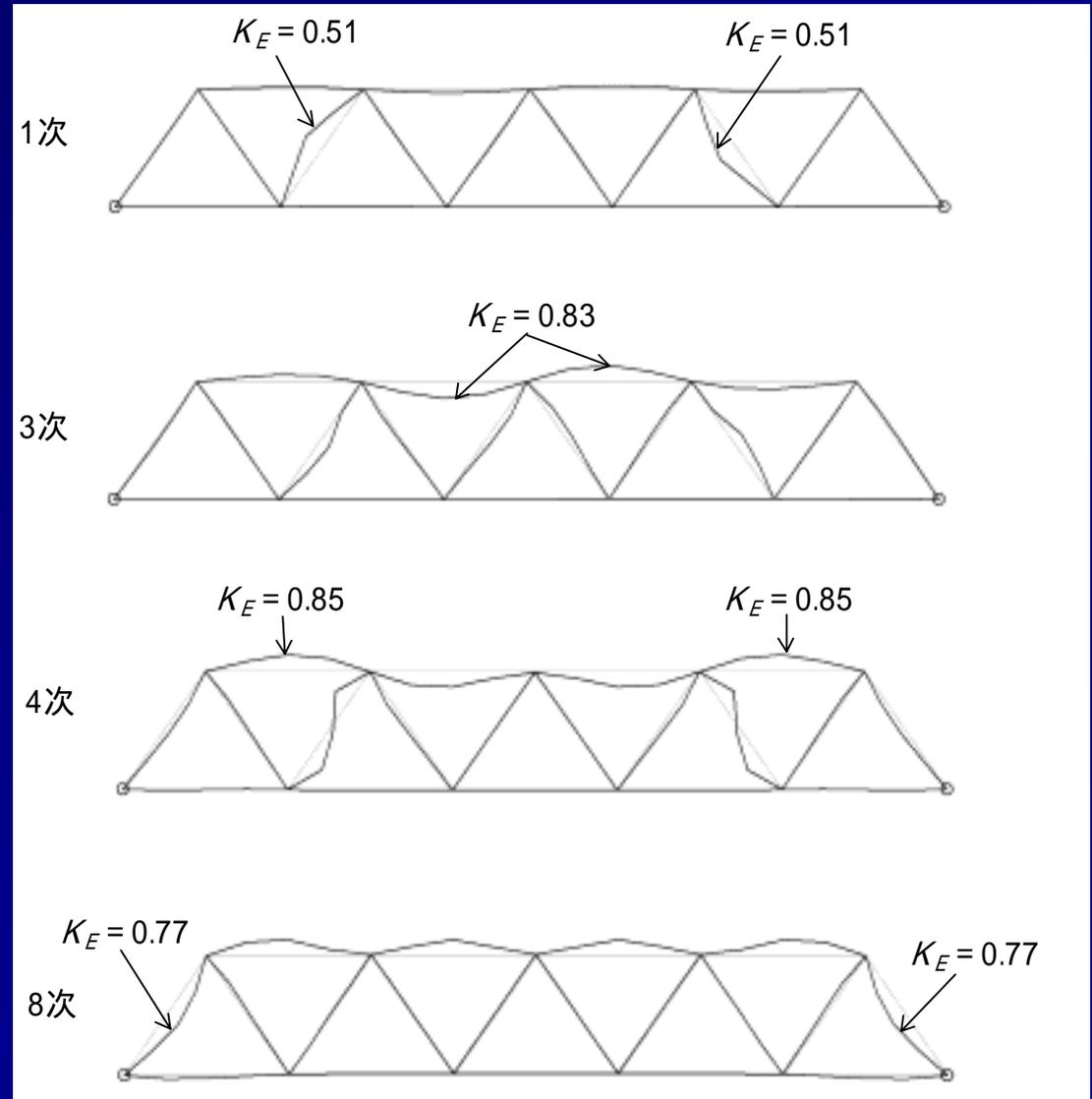
・弾性分岐座屈解析法

- 1) 全体構造に対する座屈解析により固有値を求める方法
- 2) Goyetの近似分岐座屈法
- 3) Donnellの公式

汎用性が高く、解析技術の進歩により一般化しつつある

有効座屈長さ係数の決定

$$K_E = \frac{\pi}{\lambda} \sqrt{\frac{EI}{P_{cr}}}$$



各国規定値より短めの値を得る

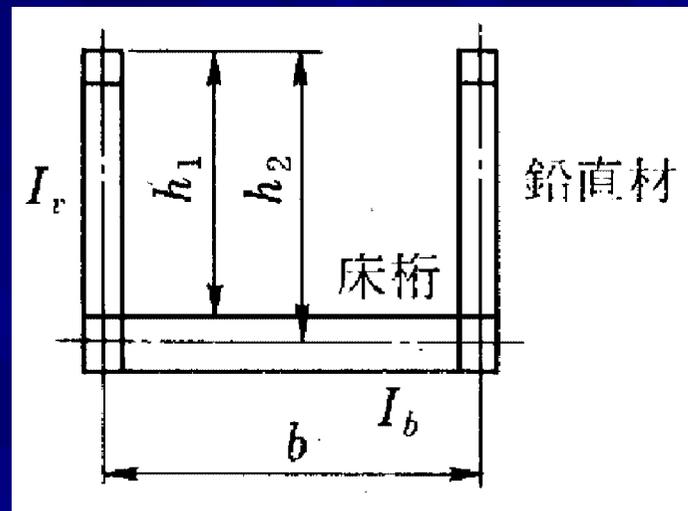
線形固有値解析による座屈モード

たわみを弾性拘束された圧縮弦材

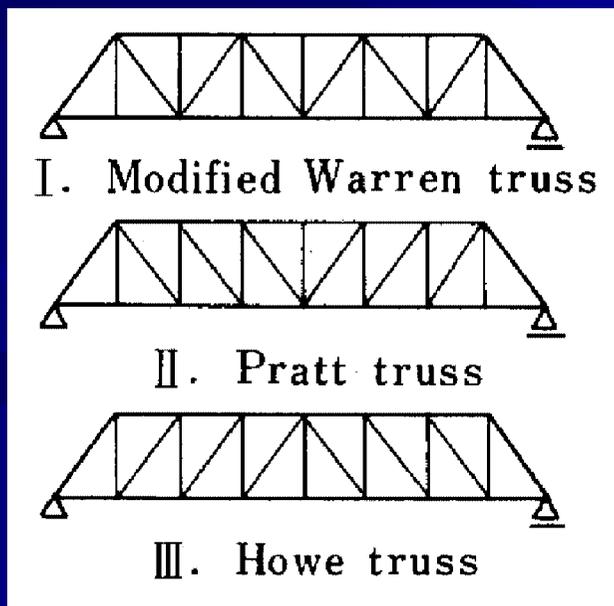
ポニートラス上弦材の力学モデル

・横ラーメンの剛性

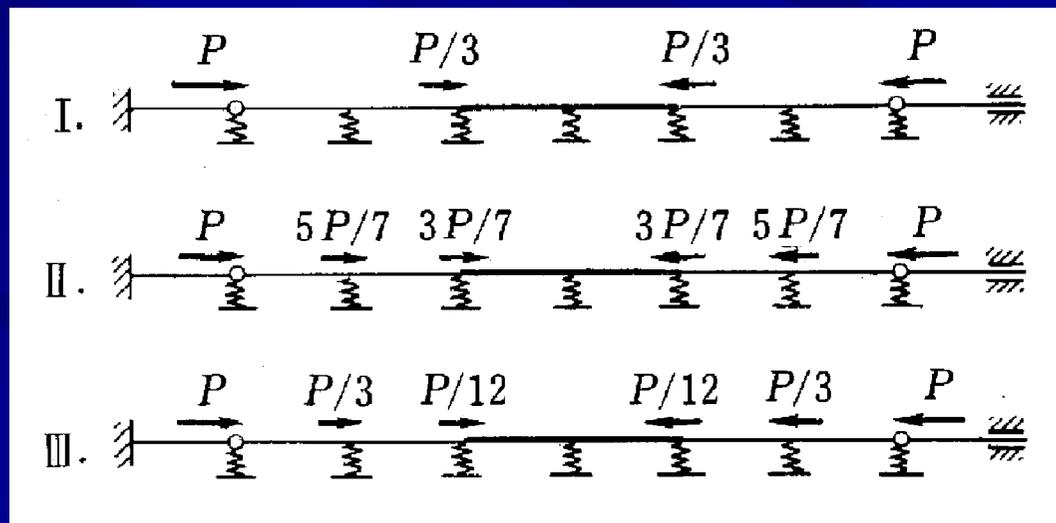
$$K_v = \frac{1}{\frac{h_1^3}{3EI_v} + \frac{bh_2^2}{2EI_b} + f}$$



・Holtモデル



力学パラメータ $\kappa_v = K_v \alpha^3 / EI_c$



トラス桁の全体横ねじれ座屈 (スパン長と主構間隔比)

- 上路式の単純支持側道トラス橋の解析例
- 鉛直分布荷重に対して λ/b が大きくなっても安全性が極度に低下しない
- 死荷重と風荷重の組合わせに対して λ/b が40以上では横繋ぎ材の座屈および降伏が問題となる

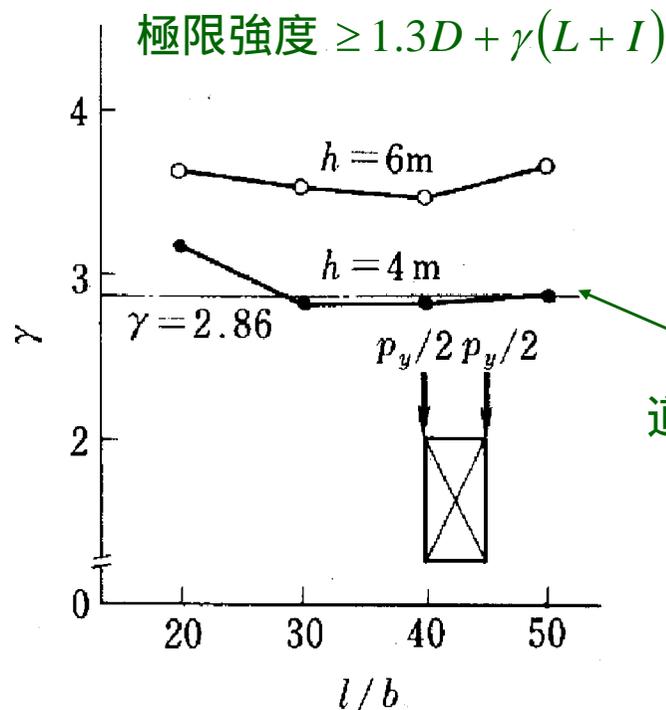


図 14.4.1 鉛直荷重を受ける側道トラス橋の極限強度

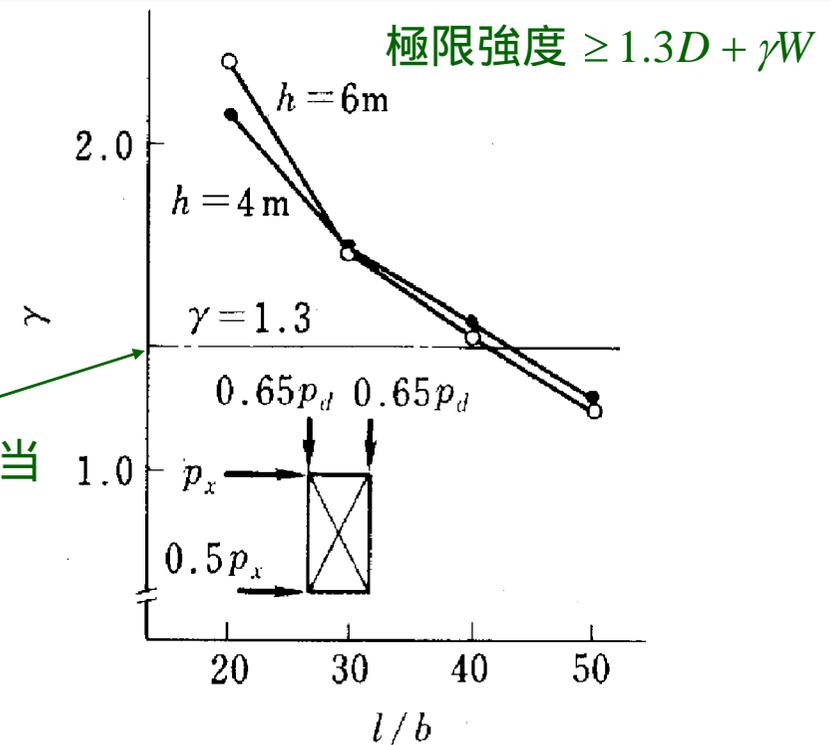


図 14.4.2 組合せ荷重を受ける側道トラス橋の極限強度

ガセットの座屈

・実際のトラブル例に鑑み、ガセットプレートの座屈照査規定を追加

・自由辺長 λ の制限 $\frac{\lambda}{t} \leq 50 \sqrt{\frac{355}{\sigma_Y}}$ **制限を超える場合はリブ補強**

・差込箇所での離れ量 λ' の制限 $\frac{\lambda'}{t} \leq \sqrt{\frac{\pi^2 E}{12\sigma_Y}}$ **局部座屈に注意**

表 14.5.1 補剛材を必要としない l/t の上限値および弦材と腹材連結ボルトとの離れ量 l' の制限値

鋼種	l/t	l'/t
SM400	60	27
SM490	52	23
SM490Y	49	22
SM570	43	19
SM690	38	17
SM780	35	16

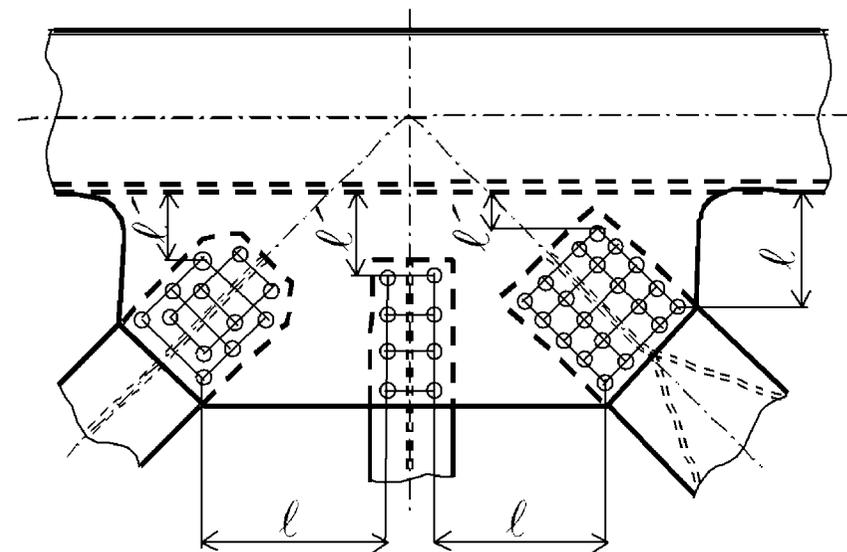


図 14.5.1 ガセットの自由辺長 l と、弦材と腹材との離れ量 l' のとり方

まとめと今後の展望

- 鋼構造の設計法において、限界状態設計法の合理性をより高めるには構造物および部材の極限強度の適切な評価法を確立することが急務である。
- 部材の極限強度は、隣接部材の拘束効果や全体変形の効果を考慮した評価法の確立が望まれる。
- 本章の極限強度に関する研究成果を各種トラス構造の設計に反映するには、以下の項目に関する調査研究の蓄積が必要である。
 - 1) 死荷重と風荷重などの組合せ荷重状態において、2軸回りの2次曲げを受ける圧縮部材の極限強度
 - 2) 上路トラス橋の床組を兼ねる圧縮弦材の極限強度
 - 3) 横繋ぎ材として用いられる偏心結合された開断面圧縮部材の極限強度
 - 4) トラス格点の強度特性と局部変形の評価法

第15章 ラーメン

名古屋工業大学
室蘭工業大学
灌上工業(株)
首都大学東京

後藤 芳顯
岸 徳光
織田 博孝
野上 邦栄

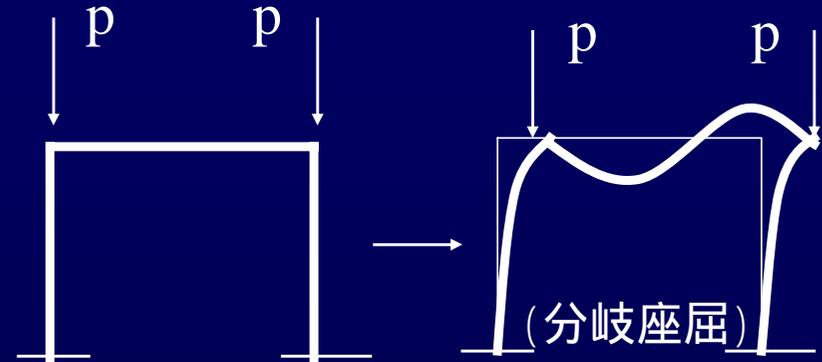
内容

- 15.1 概説
- 15.2 弾性座屈
- 15.3 弾塑性不安定
- 15.4 ラーメン構造の座屈設計
- 15.5 半剛結骨組
- 15.6 まとめと今後の展望

ラーメンの弾性座屈

・柱上に荷重が作用する場合:

座屈前の変形微小
→ 座屈前変形無視できる



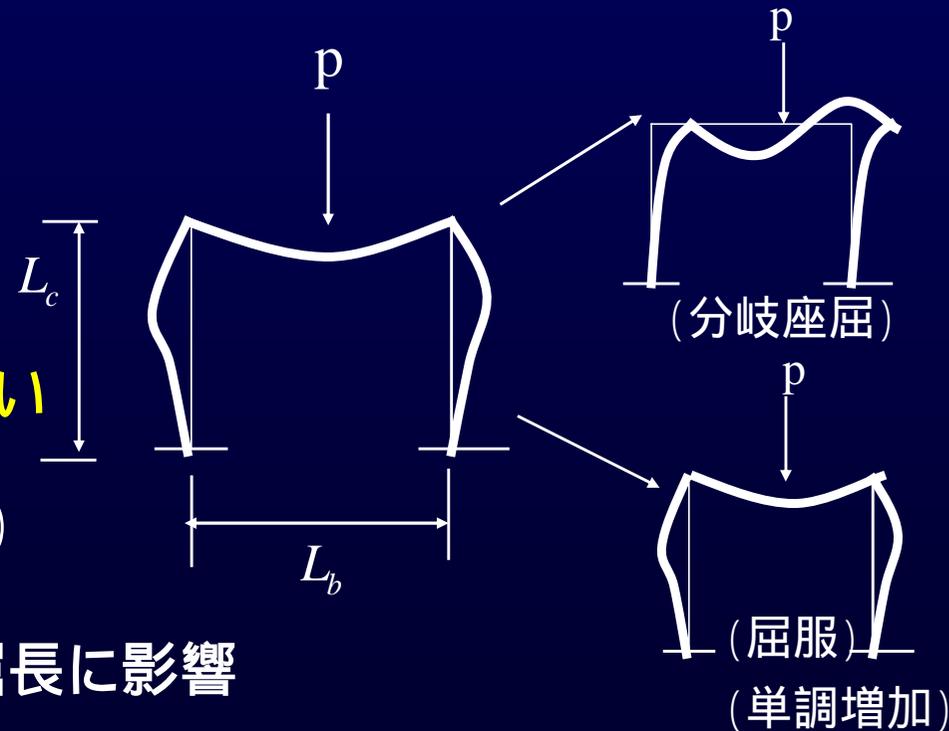
・はり上に荷重が作用する場合:

曲げを受けるラーメン

座屈前の変形の影響が無視できない

$$k = \frac{I_b L_c}{I_c L_b}, \quad \mu = \frac{L_b}{L_c} \quad (\text{支配パラメータ})$$

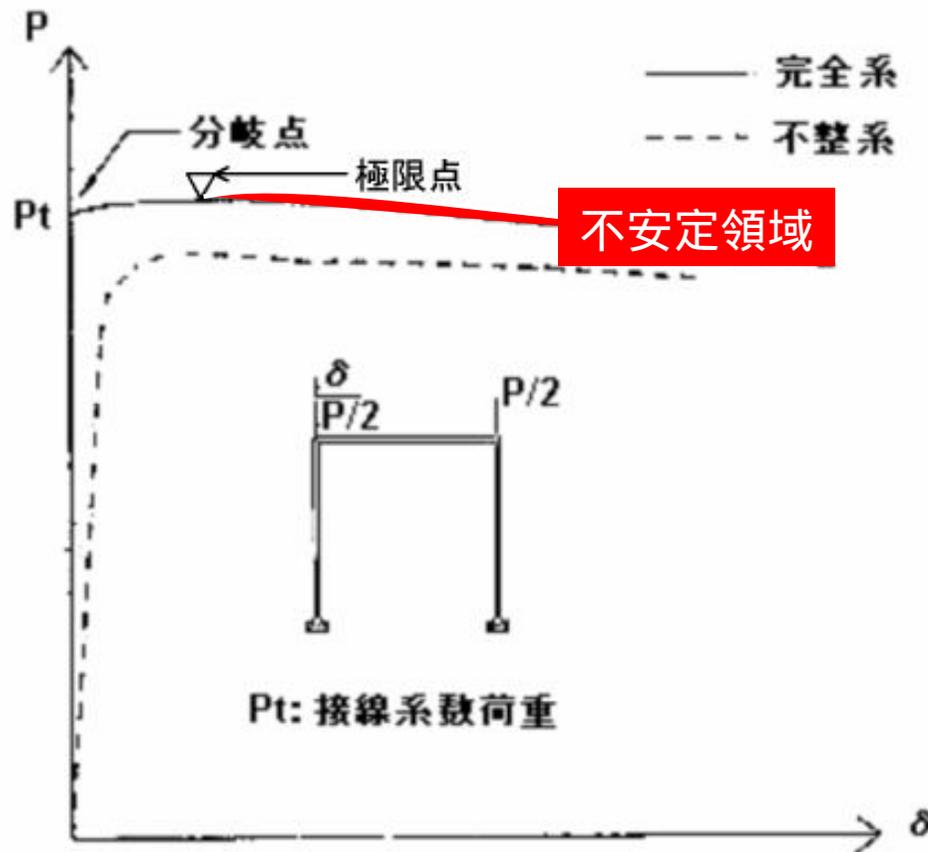
座屈モードが異なる → 有効座屈長に影響



= 非弾性では屈服

15.3 弾塑性不安定

15.3.1 骨組の弾塑性分岐挙動

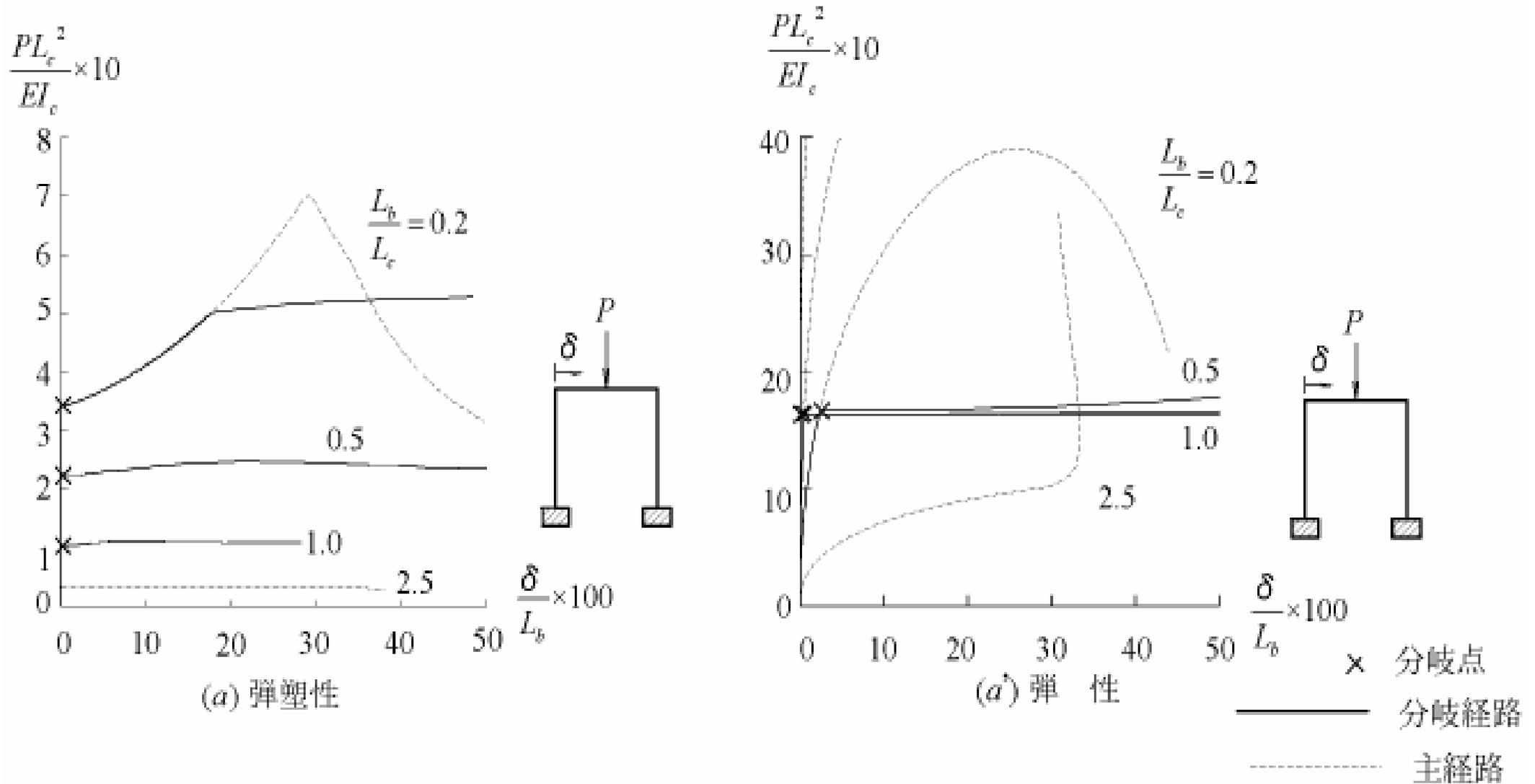


完全系 = 初期不整無し
不整系 = 初期不整有り
(実際の構造)

(塑性分岐の特徴)

・分岐後除荷挙動によりいったん荷重上昇後不安定になる

弾塑性分岐挙動と弾性分岐挙動の比較



・弾塑性分岐の場合，分岐後主経路と分岐経路の差が小さい

15.4 ラーメン構造の座屈設計

15.4.2 有効座屈長法

- 許容応力度設計法に基づく部材単位の設計
- 微小変位、線形弾性骨組構造解析による断面力
- 有効座屈長から評価される強度を用いた安全性照査
- 部材強度への非線形性の影響は照査式の強度側に考慮

15.4.1 有効座屈長の実用的算出法

■ 部分構造解析法

- 構造部分系の特性方程式を解く方法
- 近似式
- 図表

■ 全体構造解析法

- 弾性固有値解析

$$(K_E + K_G)du - dP = d\psi$$

$$|K_E + \kappa K_G| = 0$$

- 非弾性固有値解析

$$|K_E(E_f) + K_G| = 0$$

現行算出法の利点と問題点

■ 部分構造解析法

- 軸力に依存しない
- 得られる有効座屈長は安全側な値
- ✖ 適用範囲に限界がある
- ✖ 複雑な構造に適用困難

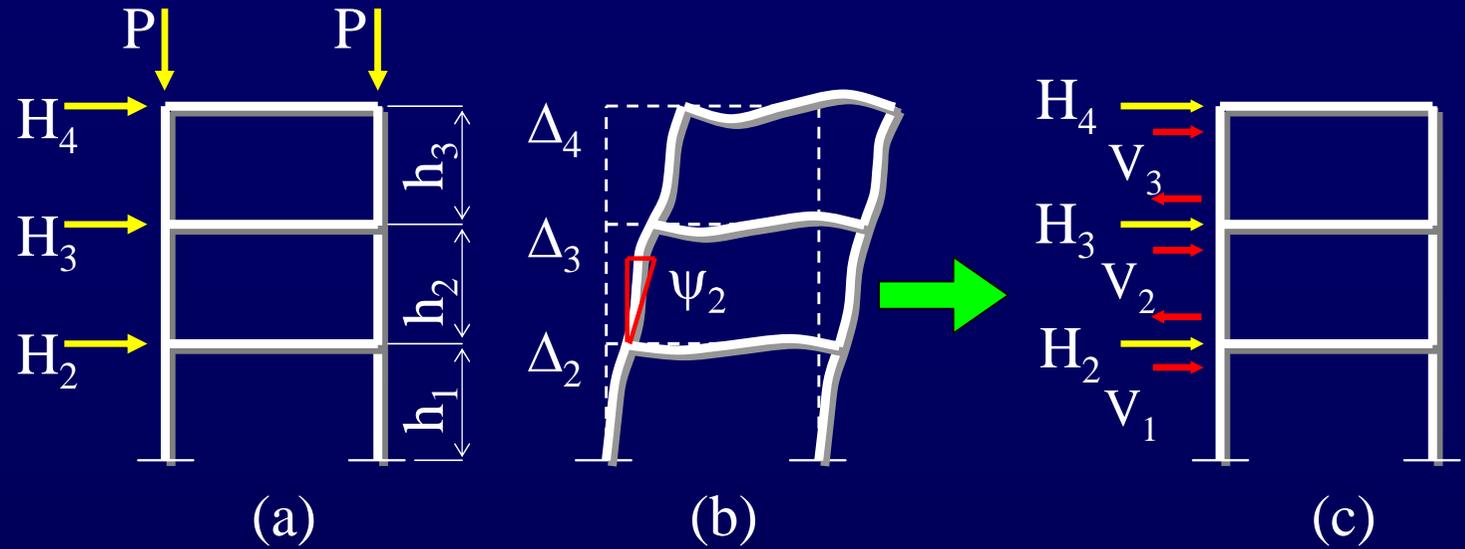
■ 全体構造解析法

- 構造形式、断面変化、拘束条件、および荷重点を容易に考慮
- 全体として伝統的方法に比較して、有利な有効座屈長を評価
- ✖ 物理的な現象の不明確さ

設計上の対策

- 曲げ部材として断面設計
- 適切な数値による有効座屈長の頭切り
- 変断面部材を一様断面に換算した圧縮部材として断面設計
- 変化する軸圧縮力を一様軸圧縮力に換算した圧縮部材として断面設計
- 高次固有値あるいは固有モードの適用

15.4.3 P- Δ 法



P- Δ 効果を換算層せん断力 V_i により考慮して、幾何学的非線形の影響を微小変位解析で近似

初期不整，塑性化が耐荷力へ及ぼす影響を考慮するために，初期部材回転角 ψ_0 を導入

解析が容易，しかし適用は門型ラーメンに限定

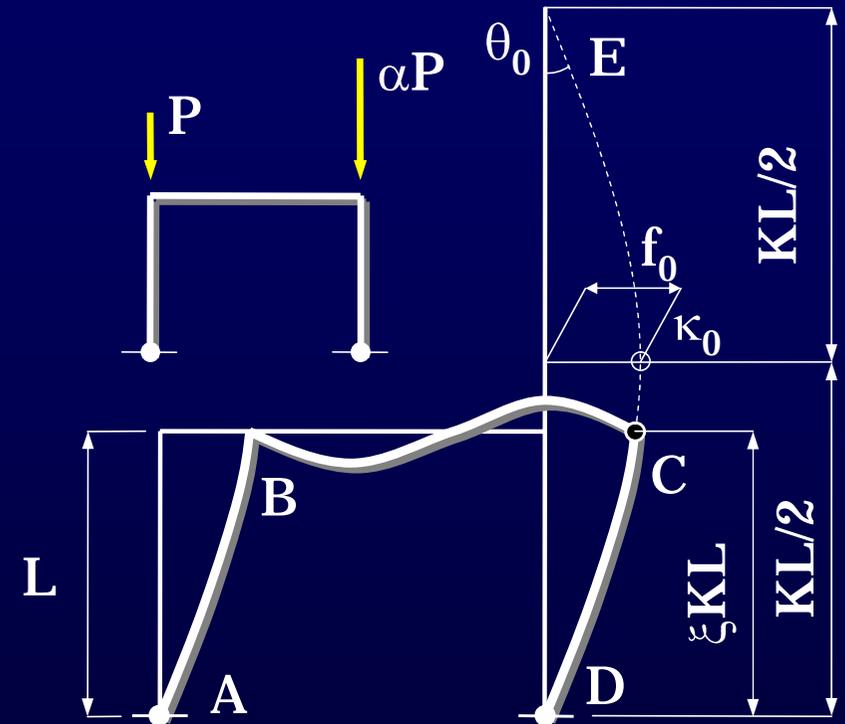
照査は断面強度に対して行う(有効座屈長不要)

15.4.4 線形化有限変位解析に基づく設計

幾何学的非線形の影響を線形化有限変位理論に基づくマトリックス法で解析(任意の骨組構造物に適用可能)

初期不整, 塑性化が耐荷力へ及ぼす影響を考慮するために, 等価初期たわみを導入

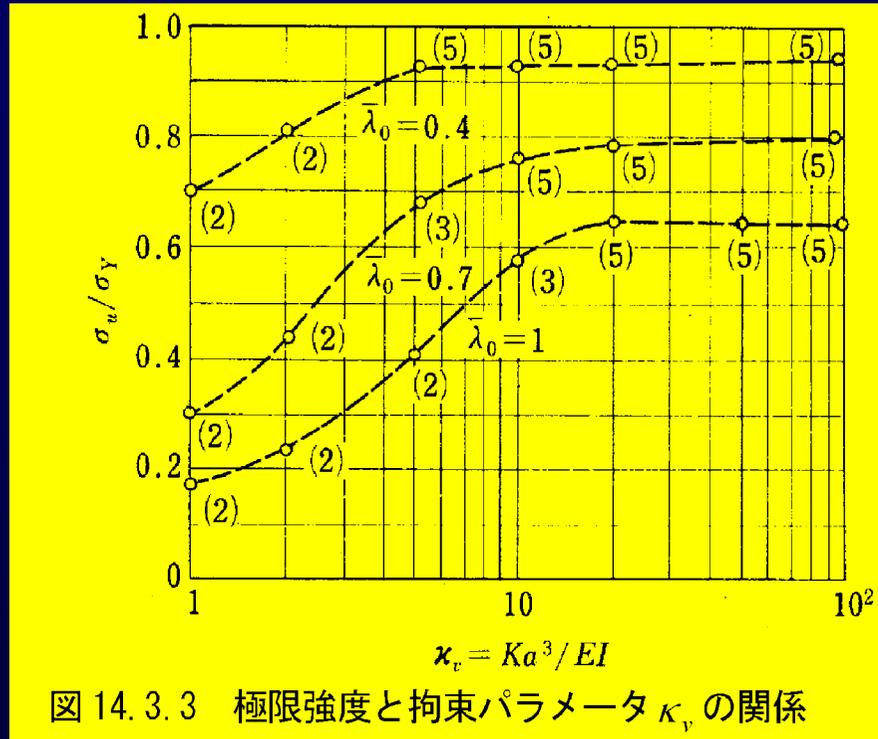
照査は断面強度に対して行う(有効座屈長不要)



任意形状骨組の
等価初期たわみ

極限強度特性

- 上弦材の基本細長比パラメータ λ_0 を仮定した場合の極限強度と κ_v の関係



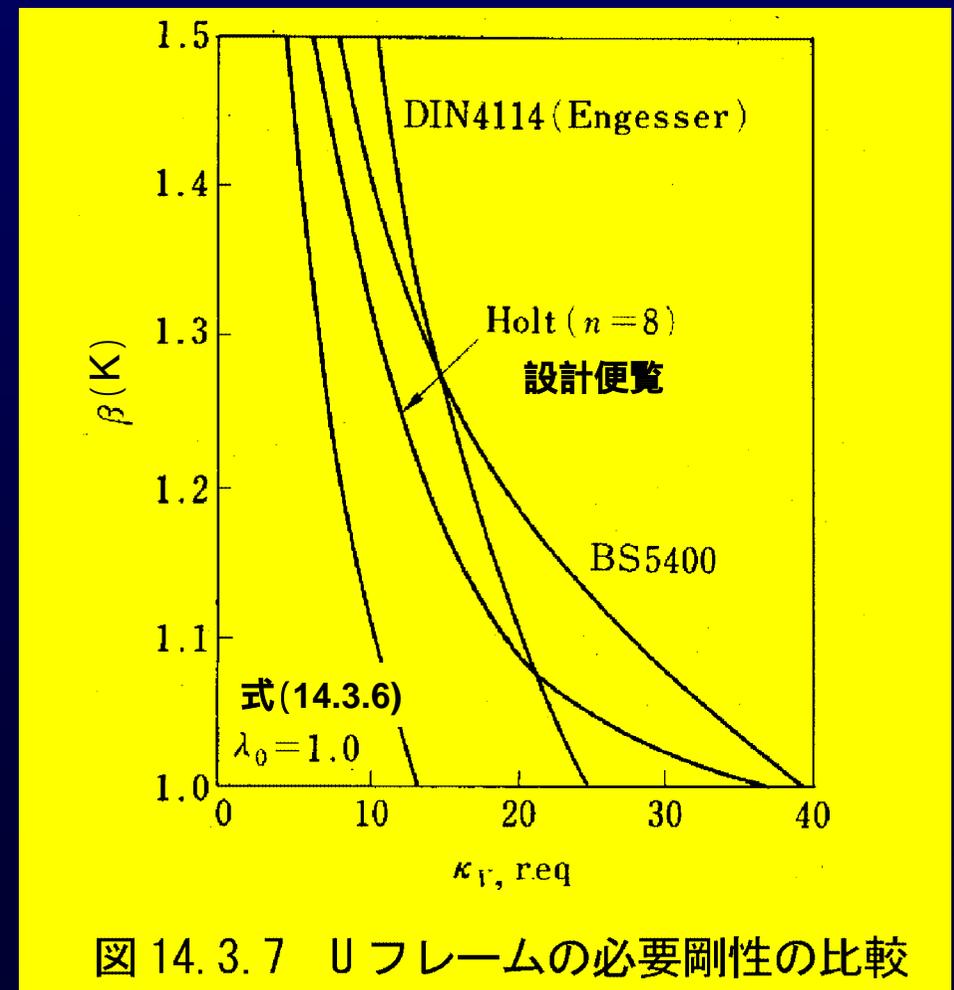
有効座屈長さ係数

- 弾塑性有限変位解析より

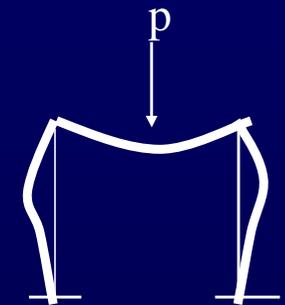
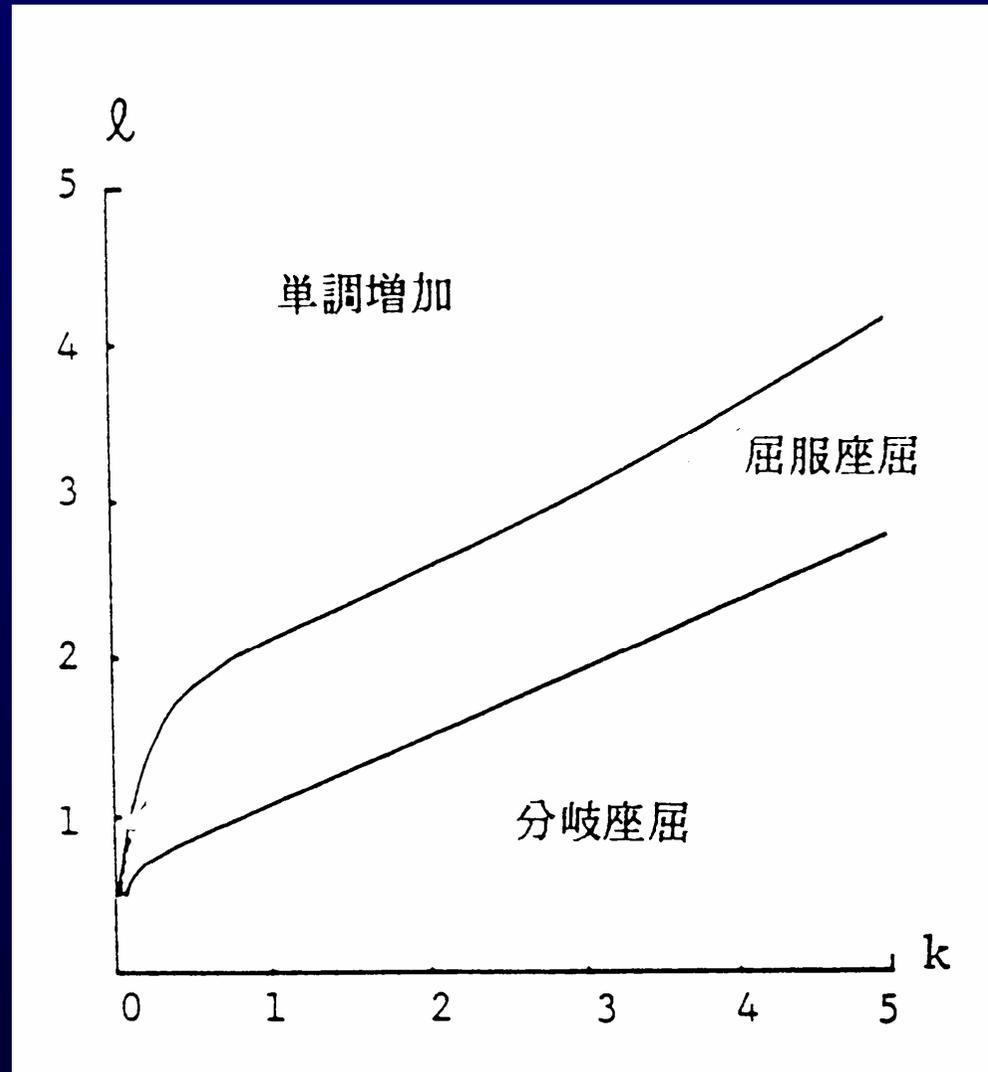
$$K = (\bar{\lambda}_0 + 1.8) / \kappa_v^{0.4}$$

横ラームンの限界剛性

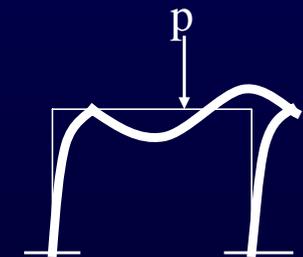
- 弾塑性有限変位解析によって求めた必要剛性は、弾性座屈理論による他の方法に比べてかなり小さい。



基部固定門型骨組のパラメータによる座屈挙動の分類



(単調増加)
(屈服)



(分岐座屈)

$$k = \frac{I_b L_c}{I_c L_b}, \quad l = \frac{L_b}{L_c}$$

ラーメン橋脚
($k = 0.3 \sim 2, l = 1 \sim 5$)

曲げを受けるラーメンの座屈解析

通常の線形化有限変位理論に基づく座屈解析
では座屈前の変形は考慮できない



・Bowling を考慮した2次増分理論による座屈
解析

Bowling: 曲げによる圧縮変形

・増分法による有限変位解析の接線剛性行列
の行列式 = ゼロの条件 (非線形汎用プログラ
ムで解析可能)

耐荷力の算出法

■ ラーメンの耐荷力

(1) 圧縮材の耐荷力曲線を用いる方法

弾性座屈解析によって得られる有効座屈長から柱の細長比を求め、圧縮材の耐荷力曲線を用いて非弾性荷重を求める

(2) 見かけの接線弾性係数を用いた固有値解析による方法

弾性座屈解析において、弾性係数 E の代わりに見かけの接線弾性係数 E_f を用いて通常の固有値問題として求める

(3) 弾塑性有限変位解析を用いる方法

ひずみ増分理論による複合非線形解析により、非線形挙動を逐次追跡し、分岐点および極限点を求める方法

弾塑性有限変位解析に基づく設計

幾何学非線形と材料非線形を考慮した梁要素を使う有限要素解析(局部座屈を直接考慮できないが、骨組構造物の最も精密な耐荷力解析法)

初期不整(初期たわみ, 残留応力)の導入

組合せ荷重(死荷重や活荷重など)の載荷方法
部分安全係数設計法との対応・比例載荷

限界状態の設定と照査法

部材座屈, 局部座屈 断面力, ひずみの照査
骨組全体系の耐荷力 荷重係数による照査

部材断面(寸法, 板厚など)の設計法

将来的にはひずみによる断面設計

半剛結骨組

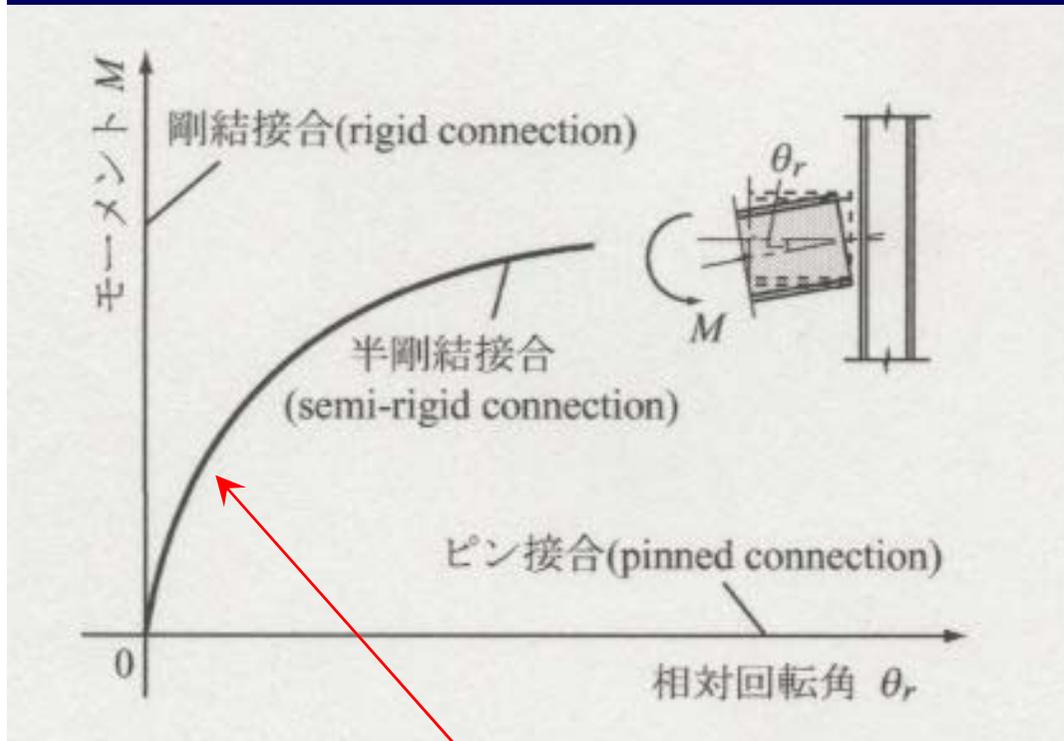
合理的な設計法

項目	現行設計法	接合部を考慮した設計法	
		部材単位設計法	構造全体設計法
設計単位	部材	部材	構造
接合部の条件	剛結あるいはピン	構造特性考慮	構造特性考慮
構造解析	線形	線形	線形あるいは非線形
安定性照査	部材の有効座屈長	接合部を考慮した有効座屈長	全体としての安定性
安全性照査	部材 接合部	部材 接合部	部材 接合部 構造全体系
接合部の照査	終局限界状態	終局限界状態 接合部剛性 使用限界状態	終局限界状態 接合部剛性 使用限界状態

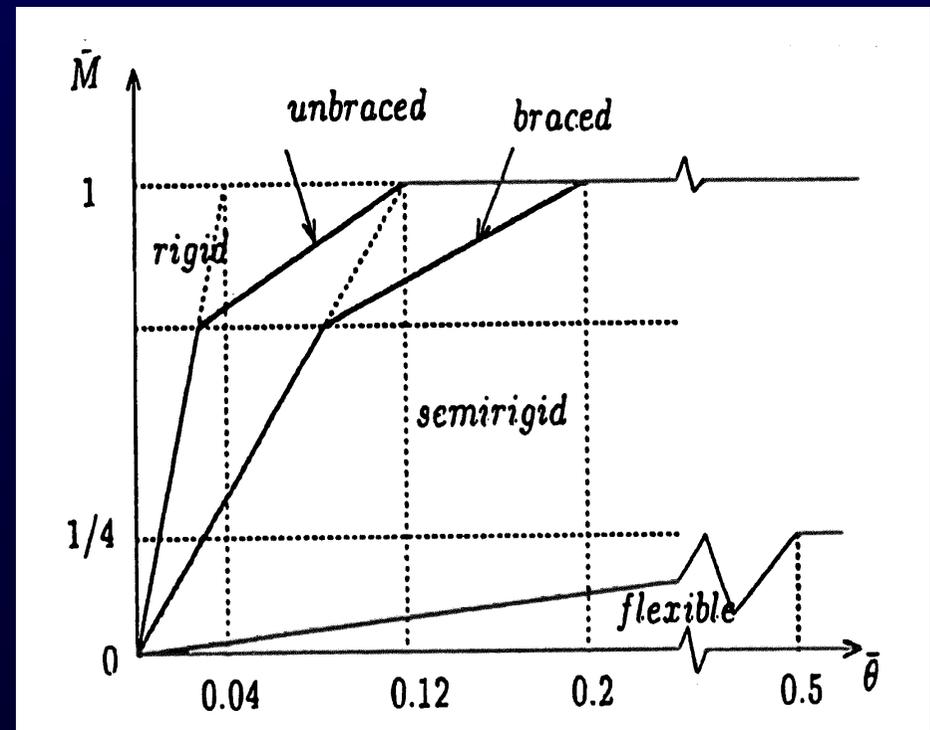
接合部のモデル化

■ 接合部と被接合部の関係に着目

- 強度、構造剛性、および変形量により接合部挙動を評価
- はり一柱接合の場合、接合部剛性は回転剛性として定義



$$R_{kt} = \frac{R_{ki}}{\left\{1 + (\theta_r / \theta_0)^n\right\}^{(n+1)/n}}$$



まとめと今後の展望

- 曲げ荷重を受ける門形ラーメンの弾性座屈
 - 座屈前の変形の考慮
- 骨組構造の弾塑性座屈、耐荷力挙動
- ラーメン構造の座屈設計
 - 有効座屈長の評価
 - 有効座屈長法
 - P- 法に基づく設計
 - 線形化有限変位解析に基づく設計
 - 弾塑性有限変位解析に基づく設計
- 半剛結骨組
- 骨組構造解析に基づく断面設計へのFEM、および非線形解析の適用

第16章 アーチ

栗鉄工事
横河ブリッジ

村山 泰男
尾下 里治

内容

- 16.1 概説
- 16.2 面内座屈強度と耐荷力
- 16.3 面外座屈強度と耐荷力
- 16.4 面内および面外荷重を受ける複弦鋼アーチの耐荷力
- 16.5 ニールセン・ローゼ橋の耐荷力
- 16.6 今後の展望

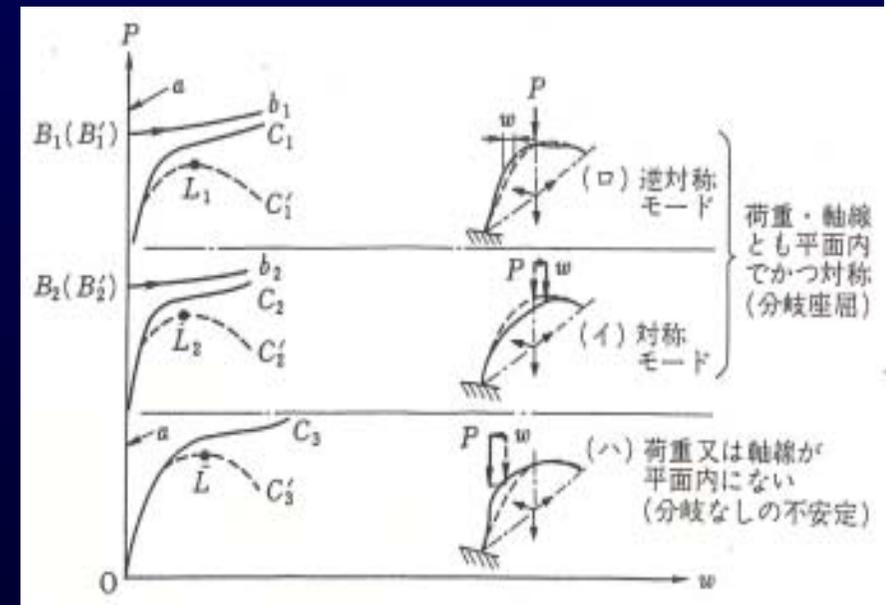
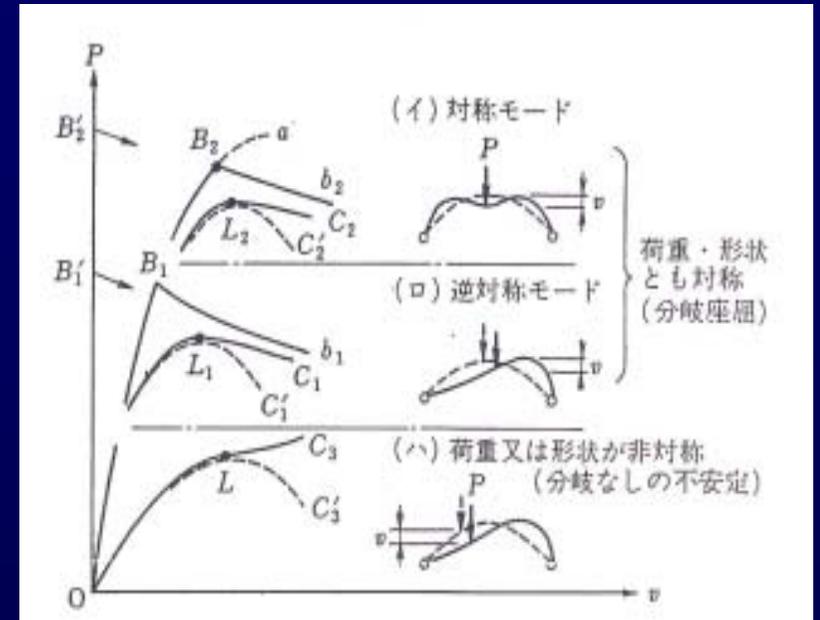
内容

アーチ橋の面内座屈
座屈変形がアーチの平面内
で生じる不安定現象

対称モード 逆対称モード
荷重または形状が非対称
の順で座屈荷重が小さい

アーチ橋の面外座屈
座屈変形がアーチの平面外
へ曲げとねじりを連成して
生じる不安定現象

逆対称モード 対称モード
荷重が平面内
にない
の順で座屈荷重が小さい



面内終局強度の評価法

代表断面の終局軸力を用いて照査する方法

$$N_q / A \leq \sigma_a$$

$$\sigma_a = \Phi \sigma_{u,o} / \nu$$

軸力と曲げに対する許容値で照査する方法

$$\bullet \sigma_n^{1st} / \sigma_a^{1st} + k \sigma_m^{1st} \leq \nu$$

$$\bullet \sigma_c^{2nd} + \sigma_b^{2nd} \leq \sigma_Y = \nu \sigma_{ta} \text{ or } 0.9 \sigma_Y$$

$$\bullet \sigma_c^{2nd} / \sigma_{c,cr} + \sigma_b^{2nd} / \sigma_{b,cr} \leq 1.0$$

$$\bullet \sigma_c^{2nd} + \sigma_b^{2nd} \leq 1.7 \sigma_{ta} \text{ or } 1.7 \sigma_{cal} \text{ (道示)}$$

アーチの非線形性

微小変位理論を用いて良い限界値

(補剛桁に軸力が生じる場合は無条件)

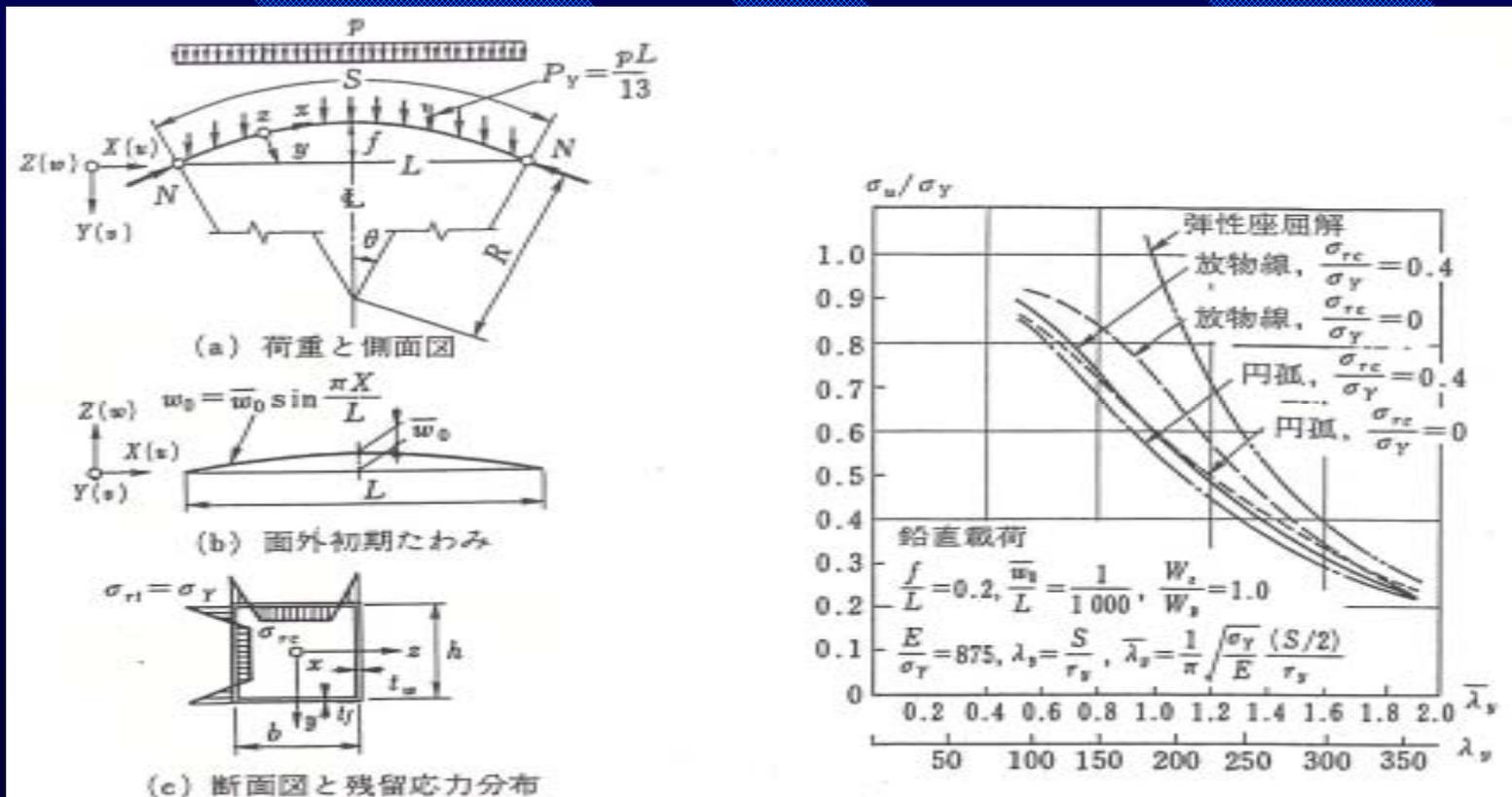
$$\text{無補剛アーチ: } w / w_o + p / w < 1$$

$$\text{補剛アーチ: } 1.3w / w_o + p / w < 1$$

面外座屈強度と耐荷力

単一アーチの座屈強度

- ・細長比が小さいほど強度は増加
- ・初期不整により15～20%程度、強度が低下
- ・ライズ支間比の影響は実橋の範囲では小さい



単弦アーチの数値モデル 単弦アーチの終局強度曲線

面外座屈強度の評価法

- ・等分布荷重満載の左右対称モードの座屈
- ・直柱の基準耐荷力式より終局強度 σ_u を求める

座屈強度解析結果から定めた
等価細長比による算定法

$$N_s / A_a \leq \sigma_a = \sigma_u / \nu \quad (\text{道示では } \nu = 2.0)$$

$$\bar{\lambda}_y = (1 / \pi) \sqrt{\sigma_Y / EK_e K_\beta K_g K_l S / r_y}$$

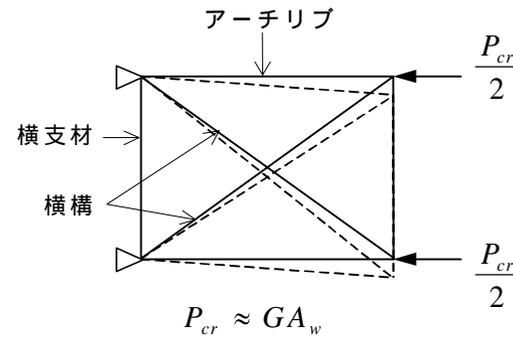
弾性座屈の固有値解析を用いて定めた
等価細長比による算定法

$$l_e = \pi \sqrt{EI / N_{cr}} = \pi S / \sqrt{\alpha_s}$$

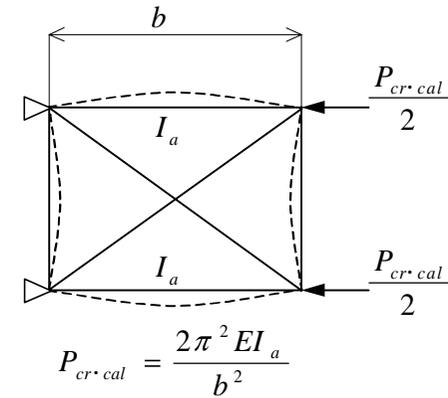
または、
$$l_e = \pi \sqrt{EI / H_{cr}} = \pi L / \sqrt{\alpha_L}$$

横構形式のアーチ面外座屈に対する設計

$$A_{d,req} \geq \frac{8\pi^2 I_a d^3}{a^2 b^3}$$



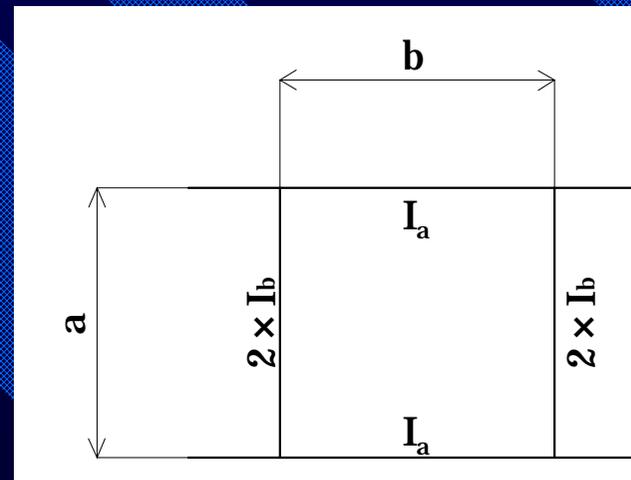
(a) パネル間のせん断座屈



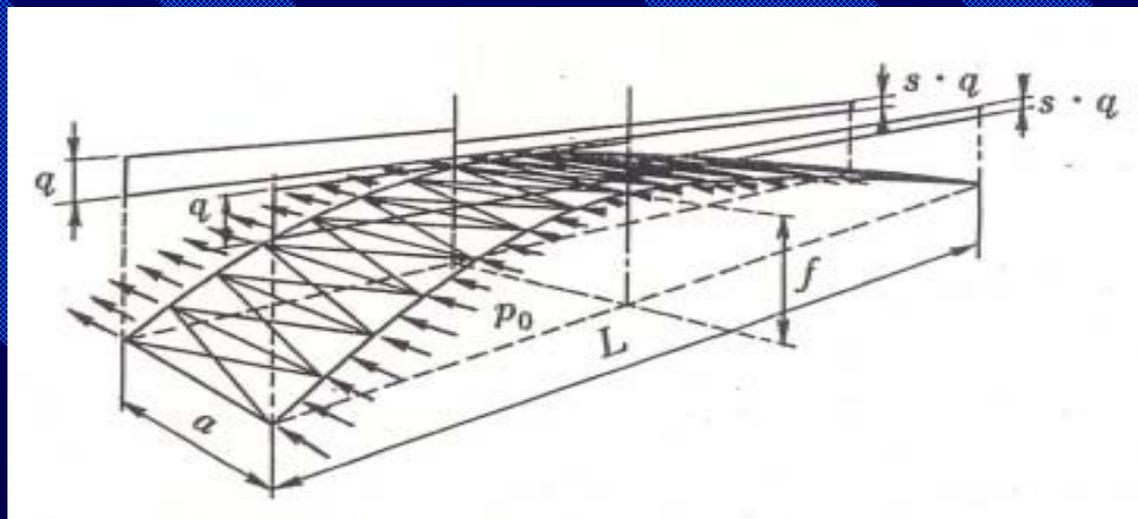
(b) アーチリブ単材の局部座屈

ラーメン形式横支材のアーチ面外座屈に対する設計

$$I_{b,req} \geq \frac{abI_a}{\frac{12}{\pi^2} l_e^2 - b^2}$$



面内および面外荷重を受ける 複弦鋼アーチの耐荷力



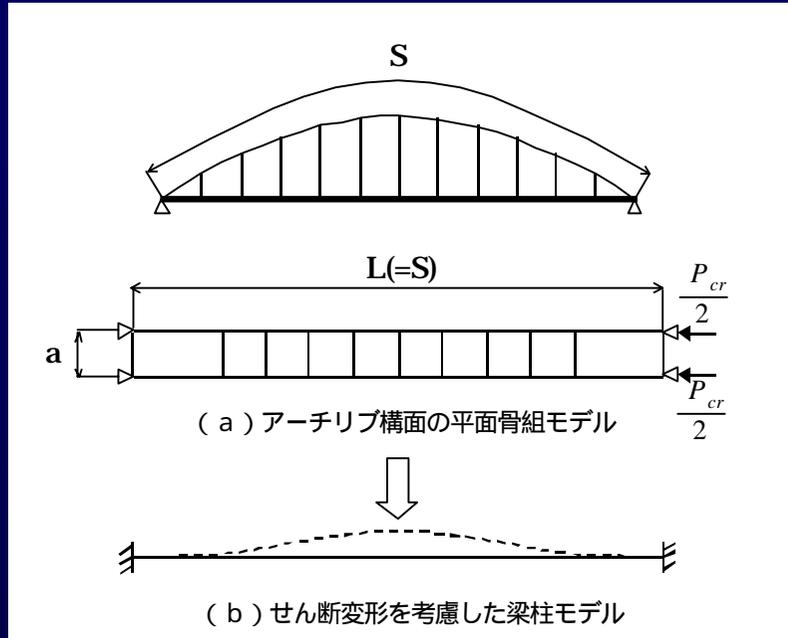
軸方向力と面外曲げに対する耐荷力相関式

$$N_s / N_u + (M_s / M_Y) / \{1 - (N_s / N_E)\} \leq 1.0$$

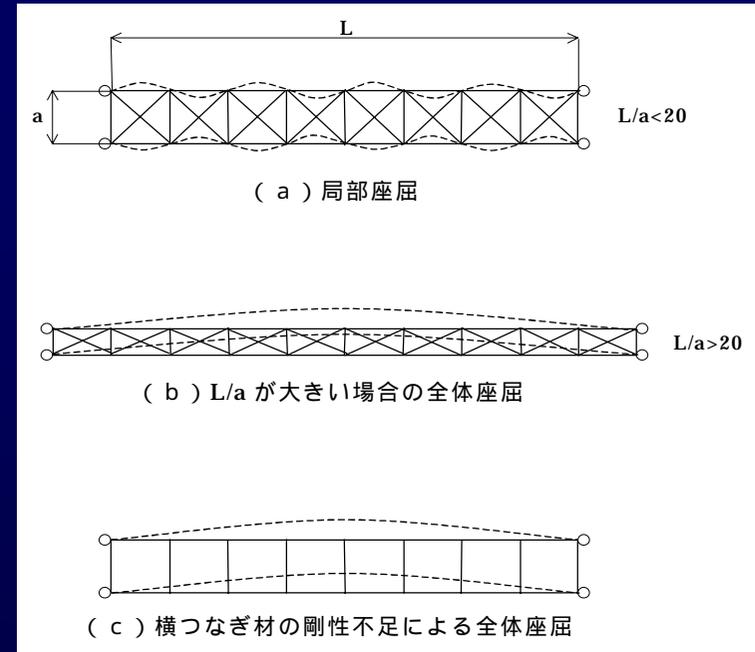
$$\sigma_n / \sigma_u + \sigma_b / \sigma_Y \leq 1.0$$

アーチリブ横つなぎ材の座屈設計法

組立柱としてモデル化する近似計算法



アーチリブ構面の面外座屈モデル



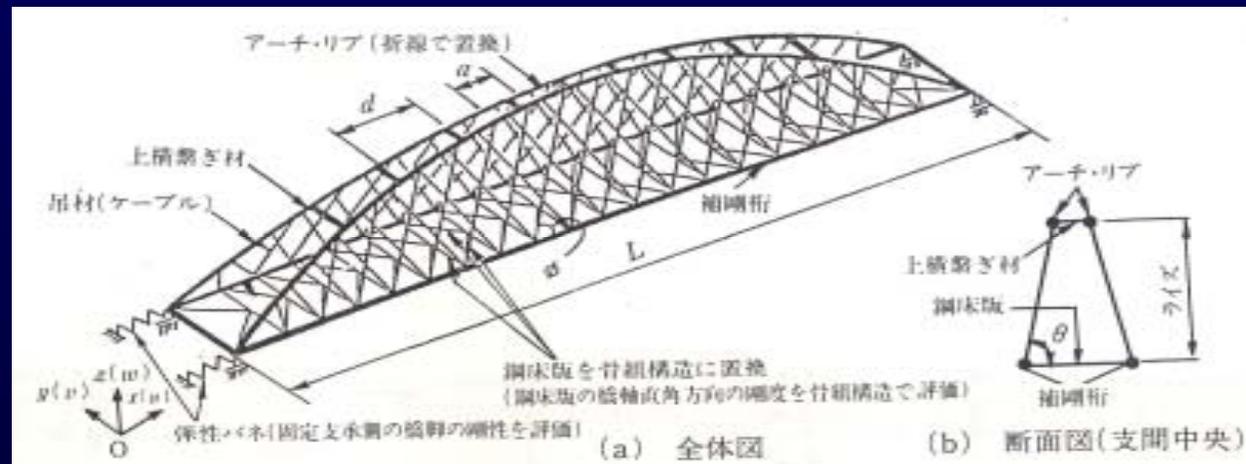
アーチリブの面外座屈の形態

横つなぎ材の剛性

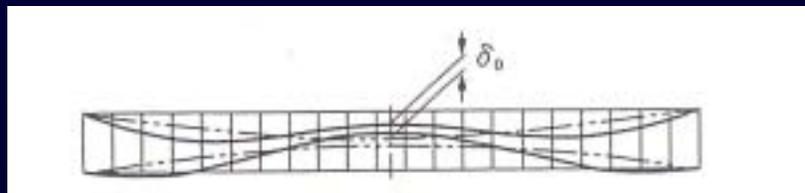
- ・全体座屈が生じないような剛性を確保する設計
- ・パネル間のせん断座屈荷重が、アーチリブ単材の局部座屈を下回らない設計

ニールセン・ローゼ橋の耐荷力

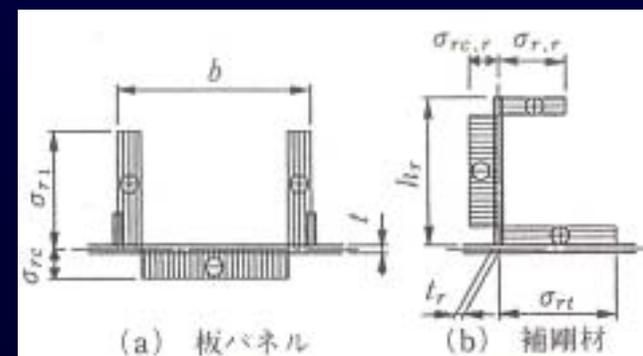
弾性有限変位解析による耐荷力照査、
局部・全体座屈の連成を考慮しない弾塑性有限変位解析
による耐荷力照査、
局部・全体座屈の連成を考慮した弾塑性有限変位解析に
よる耐荷力照査



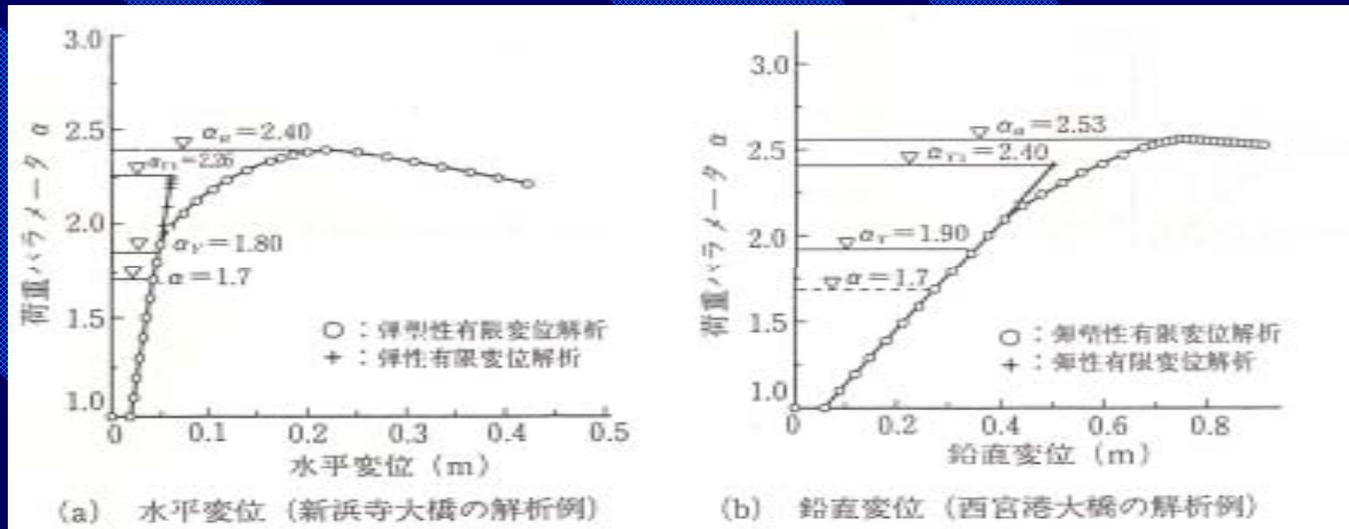
解析モデルの一例



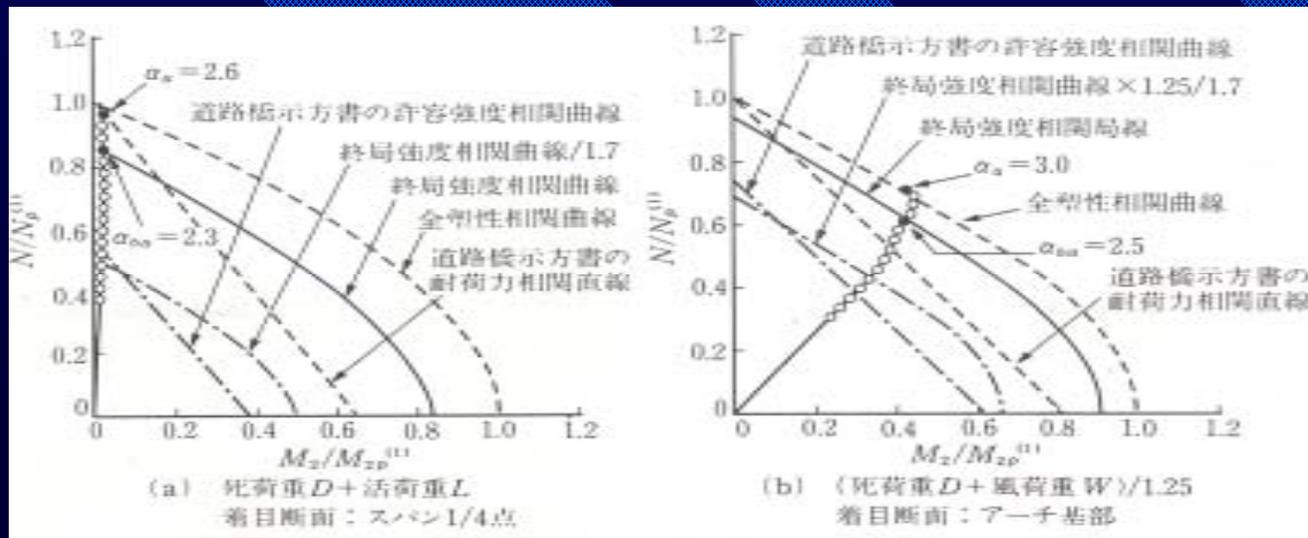
解析に導入した初期たわみ波形の例



ニールセン・ローゼ橋の耐荷力解析の一例



荷重パラメータと橋軸直角方向水平変位、及び鉛直変位の関係



終局限界状態に至るまでの断面力の経路と終局強度相関

今後の展望

多様なアーチ構造の強度は、

- ・断面構成板の強度、
- ・横つなぎ材の強度、
- ・格間部材としての強度、
- ・アーチ全体の面内強度、
- ・アーチ全体の面外強度、

など個々の強度問題の相関を考慮するとともに、
アーチ構造全体の耐荷力の観点から最適設計
の考え方を導入することが望まれる。

第17章 吊構造(新規)

長岡技術科学大学
首都大学東京

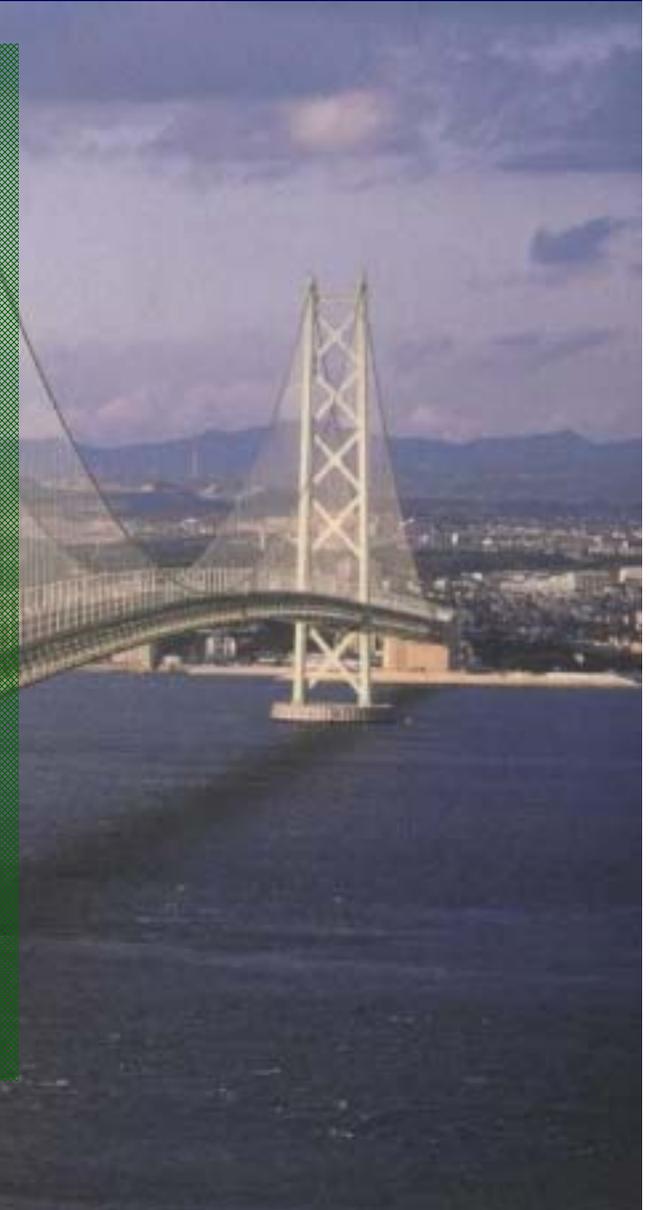
長井 正嗣
野上 邦栄

内容

- 17.1 概説
- 17.2 主塔の座屈
- 17.3 主桁の座屈
- 17.4 構造全体系の耐荷力
- 17.5 今後の展望

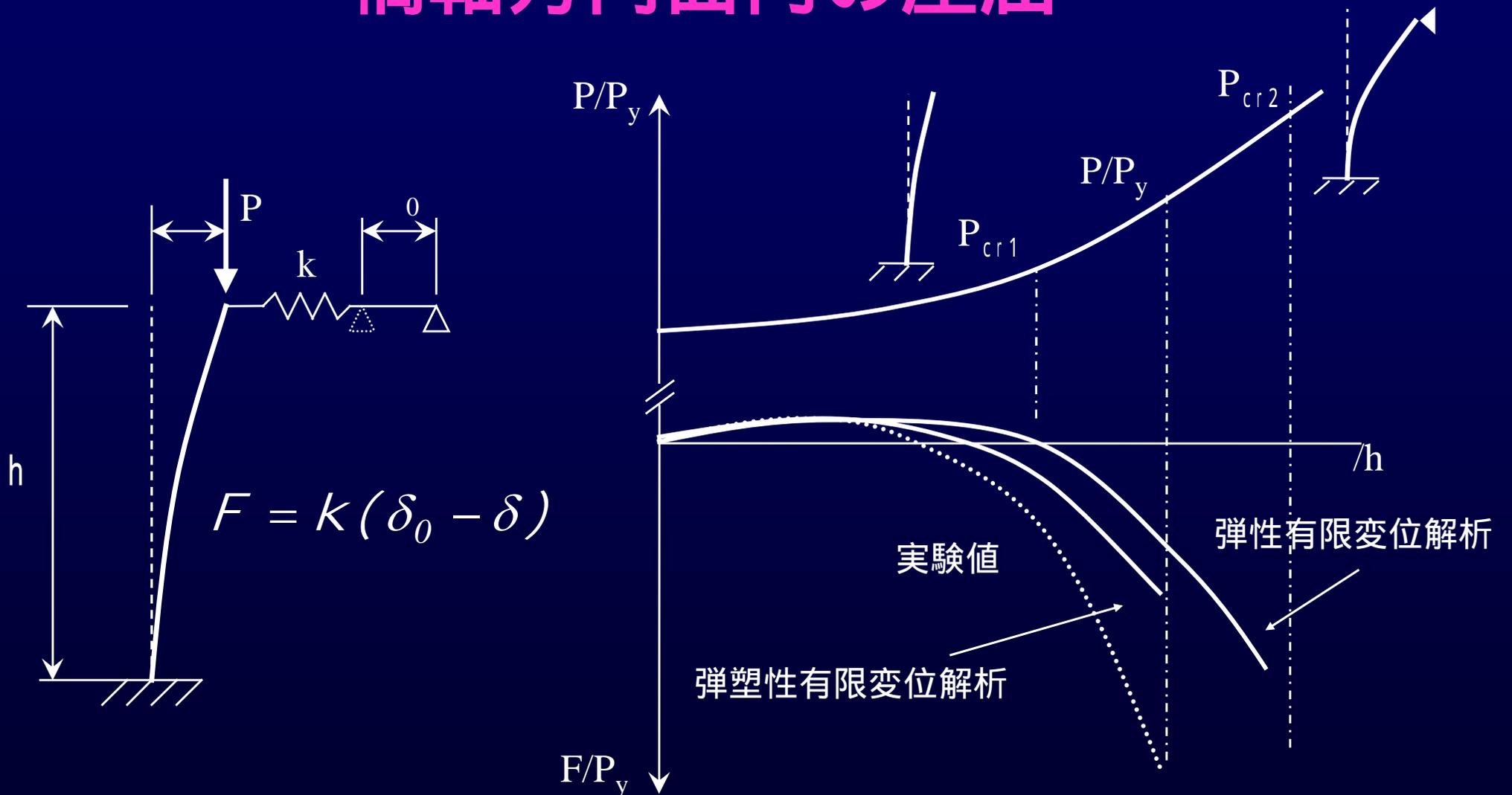
内容

- 吊構造として吊形式橋梁を対象
吊橋と斜張橋
- 吊橋の主塔の座屈・耐荷力
主塔の設計法
- 斜張橋の補剛桁の座屈・耐荷力
補剛桁の設計法
- 構造全体系の耐荷力



主塔の座屈

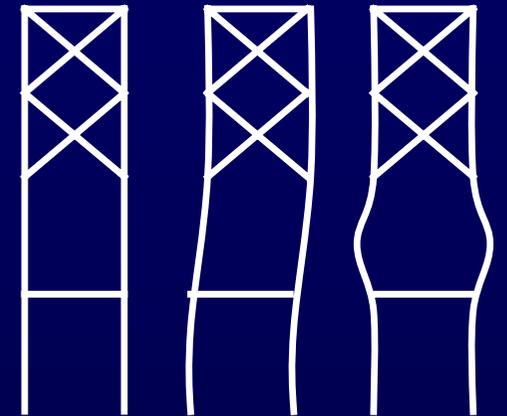
橋軸方向面内の座屈



橋軸直角方向面内の座屈

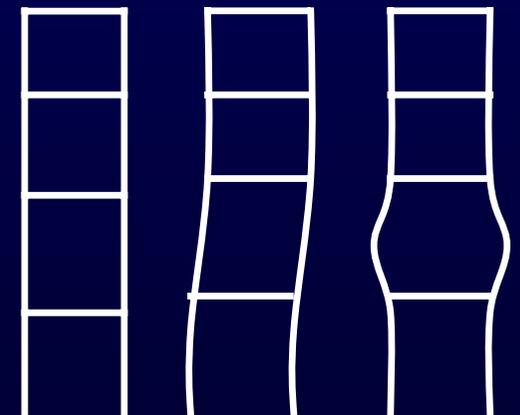
■ 橋軸直角方向面内の座屈形式

- トラス形式
 - » トラス部分の座屈
 - » 開口部分の座屈
- ラーメン形式
 - » 水平材間の塔柱の座屈



■ 座屈解析

- 近似解法
 - せん断力を無視
 - 節点の水平移動を無視
 - モーメントの分配は曲げ剛度に比例
 - パネル間に着目するため、全体系としての安定性を照査できない
- 弾性座屈解析
- 非弾性固有値解析(E_f 法)



主塔の設計

■ 吊橋

- 橋軸直角方向座屈強度 $>$ 橋軸方向強度
 - » 両者の甚だしい連成作用の影響を避ける
 - » 橋軸直角方向の座屈耐荷力を構造上高めることが可能

■ 斜張橋

- 吊橋主塔の設計法を準用
- 橋軸直角方向座屈強度 $<$ 橋軸方向強度
 - » 橋軸直角方向の座屈耐荷力を構造上高め難い

- 橋軸方向の設計は、頂端ヒンジ、基礎固定の曲げと軸力を受けるはり一柱として有限変位解析による応力照査
- 橋軸直角方向の設計は、骨組構造としての有限変位解析による安定照査と応力度照査を原則としている。

主塔の設計

■ 吊橋

- 橋軸直角方向座屈強度 $>$ 橋軸方向強度
 - » 両者の甚だしい連成作用の影響を避ける
 - » 橋軸直角方向の座屈耐荷力を構造上高めることが可能

■ 斜張橋

- 吊橋主塔の設計法を準用
- 橋軸直角方向座屈強度 $<$ 橋軸方向強度
 - » 橋軸直角方向の座屈耐荷力を構造上高め難い

- 橋軸方向の設計は、頂端ヒンジ、基礎固定の曲げと軸力を受けるはり一柱として有限変位解析による応力照査
- 橋軸直角方向の設計は、骨組構造としての有限変位解析による安定照査と応力度照査を原則としている。

主桁の座屈

- 標準的な安全性照査
 - 安定照査を必要としない最小桁高
 - 有効座屈長 (弾性座屈解析、 E_f 法など)
 - 軸力と1軸曲げを受ける部材の照査
 - 軸力と2軸曲げを受ける部材の照査
- 桁全体系としての安定照査

ケーブルの塑性化を考慮しない場合	E_f 法	$\frac{cal}{ca0} >$
	弾性有限変位解析	$y > req$
	弾塑性有限変位解析	$> req$
ケーブルの塑性化を考慮する場合	$f_1 = \frac{cy}{c,max}, \quad f_2 = \frac{cal}{g,max}$	

主桁の座屈と設計

■ 吊橋

– 曲げ部材

- 構成板要素の局部座屈の安定照査
- トラス構造の場合、圧縮部材の座屈安定照査あり
- 桁全体の座屈安定照査は不要

■ 斜張橋

– 圧縮部材

- 圧縮軸力は、スパンの長大化とともに大きくなるため、桁断面の大型化が避けられない
 - 主桁の座屈先行する可能性高い
 - 桁の安定性の合理的照査法の確立

構造全体系の耐荷力

■ 吊形式橋梁

- 現行基準では、全体系の耐荷力照査および全体座屈照査は必要ない
- 大規模橋梁では、実施

→ 荷重倍率 > 所要荷重倍率_{req}

● 吊橋

- » 弾塑性有限変位解析
- » 主塔における塔頂の変形限界、その耐荷力、局部座屈、サドル部のケーブルすべり

● 斜張橋

- » 弾塑性有限変位解析、弾性有限変位解析、弾性固有値解析、Ef法
- » 座屈実験

今後の展望

- 基準耐荷力曲線の提示(吊形式橋梁として)
- 主塔、主桁、ケーブルなどの構成部材および構造全体系としての限界状態の明確化
- 弾塑性有限変位解析に対する精度、計算の効率化
- 鋼斜張橋、合成斜張橋、PC斜張橋の力学特性を考慮した合理的安全率の設定

第18章 複合構造(新規)

京都大学

杉浦 邦征

内容

- 18.1 概説
- 18.2 鉄骨・鉄筋コンクリート構造の座屈問題
- 18.3 充填型鋼管構造における座屈問題
- 18.4 サンドイッチ型合成板構造における座屈問題
- 18.5 まとめと今後の展望

内容

- 複合構造物（主に，鋼とコンクリートによる合成構造を対象として）に用いられる鋼要素の力学条項を，座屈安定現象の視点で取りまとめている．

代表的な構造形式として，

鉄骨・鉄筋コンクリート構造（SRC構造）

充填コンクリート鋼管構造（CFT構造）

鋼・コンクリートサンドイッチ合成板構造

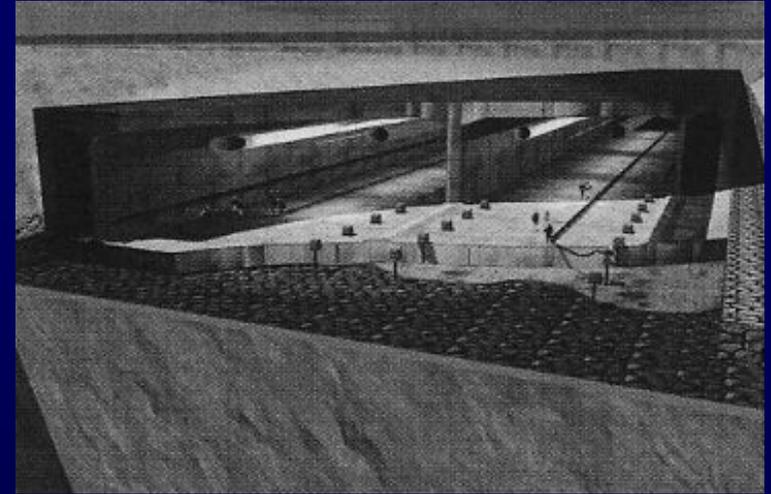
を取り上げている．また，繊維強化プラスチック

（FRP），アルミニウム合金による構造の座屈安定問題についても最近の話題を紹介している．

複合構造の事例



連続合成桁橋



鋼コンクリートサンドイッチ構造による沈埋函



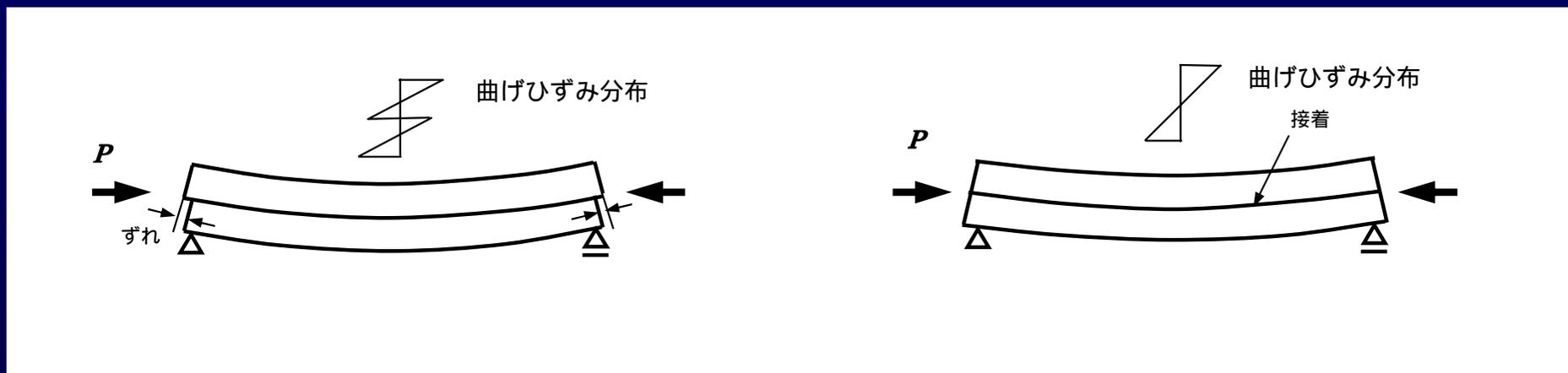
波形鋼ウェブPC橋

複合化による効果の分類例

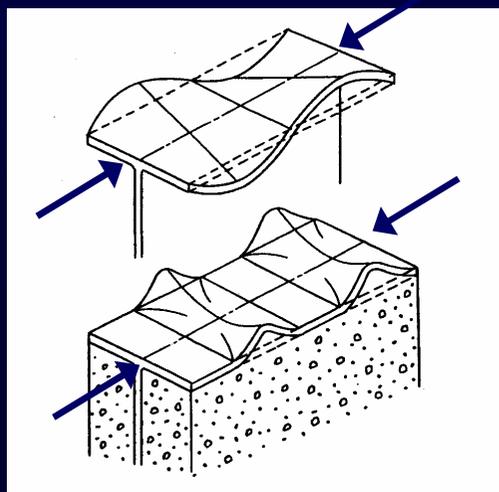
特徴	効果
長所の組合わせによる補完	強度，剛性，じん性，耐久性，耐火性，遮音性
合成作用	断面二次モーメント，強度
鋼部材の架設への適用	支保工，架設工の軽量化，急速組み立て / 解体
鋼部材の架設と躯体への適用	支保工として用い，躯体要素（本体構造）としても活用
急速施工	鋼部材の導入およびコンクリートの使用減による工期の短縮
重量の軽減，重量のつり合い	コンクリートを比強度の大きい鋼と置き換える
高品質化	じん性，拘束効果，塗装工の省略
補修，補強	劣化回復，耐震補強

座屈に関連した照査項目

■ 合成断面の曲げ剛性評価 (全体座屈)



■ 断面内での荷重伝達機構の評価 (局部座屈)

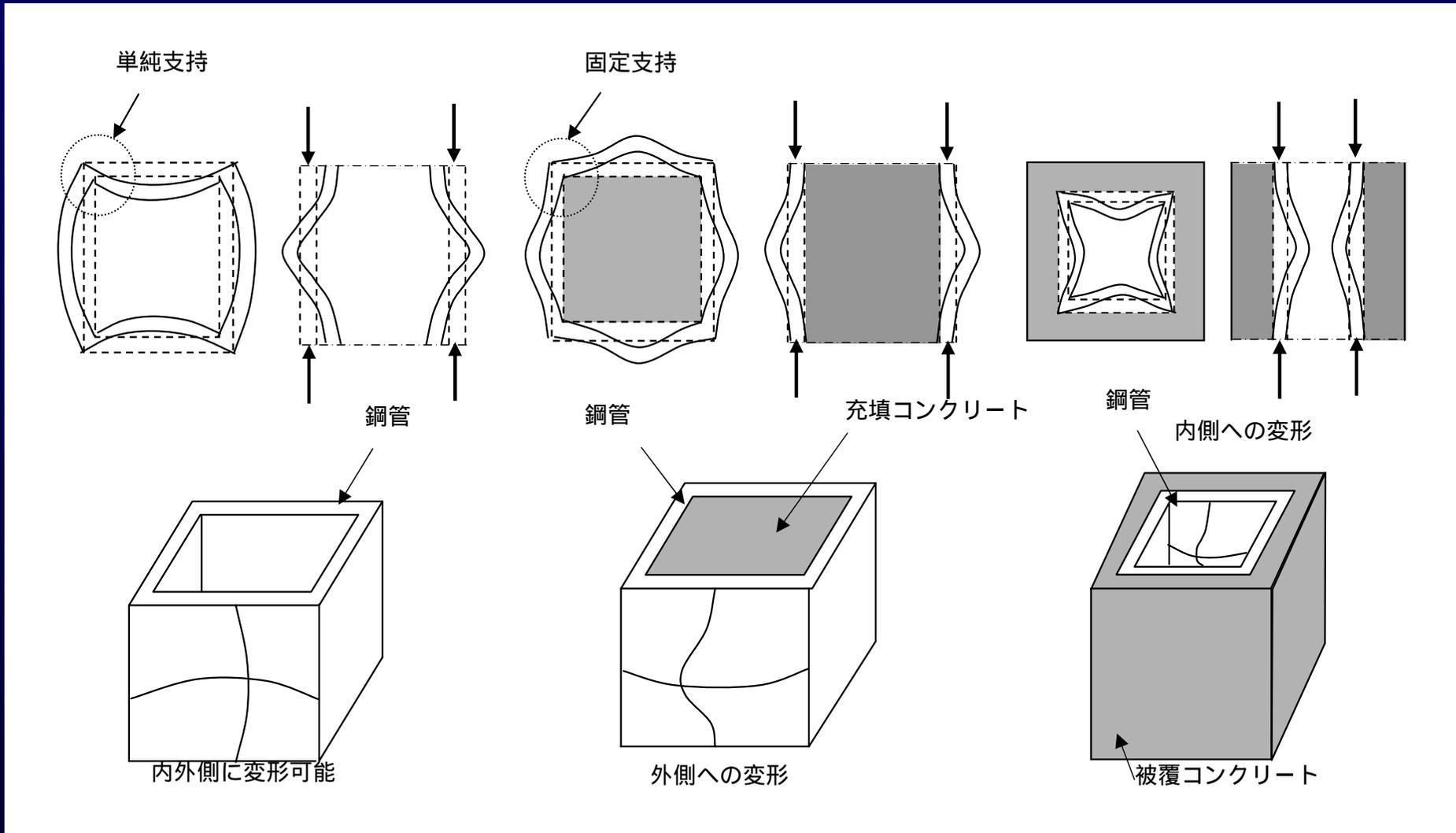


応力分担

支持条件 (拘束条件)

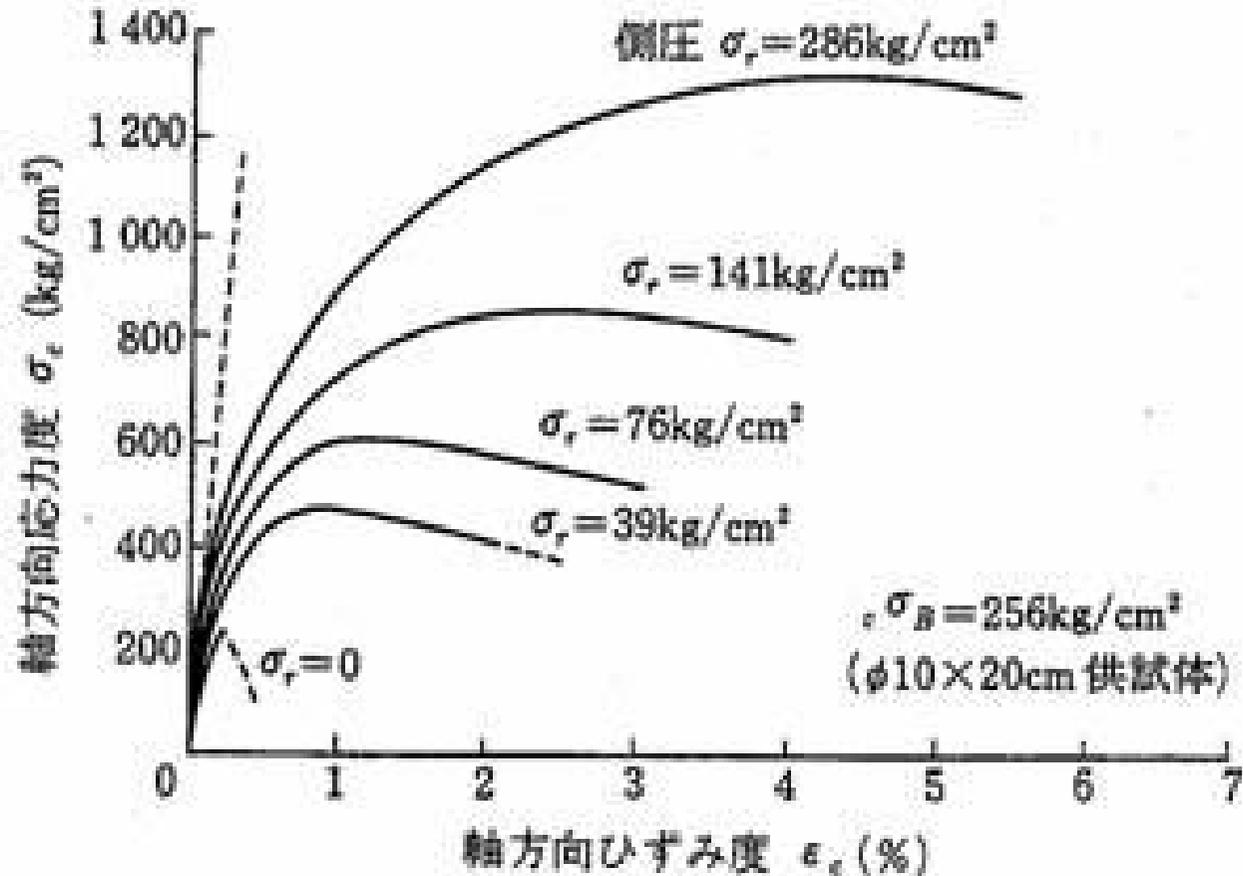
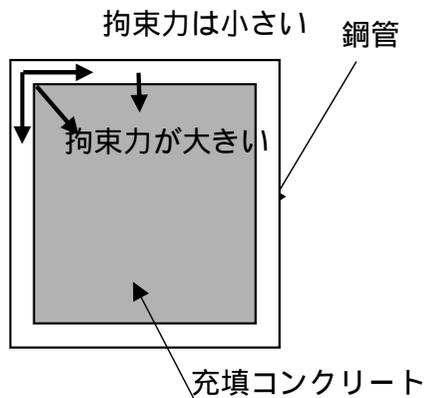
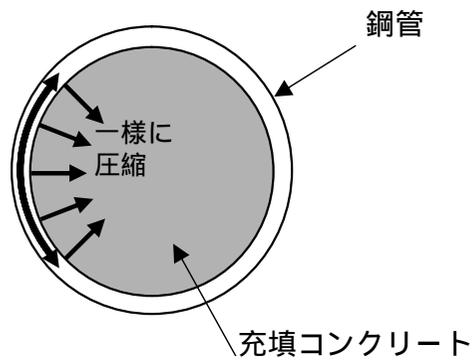
複合形態による終局状態の違いの例

局部座屈モード

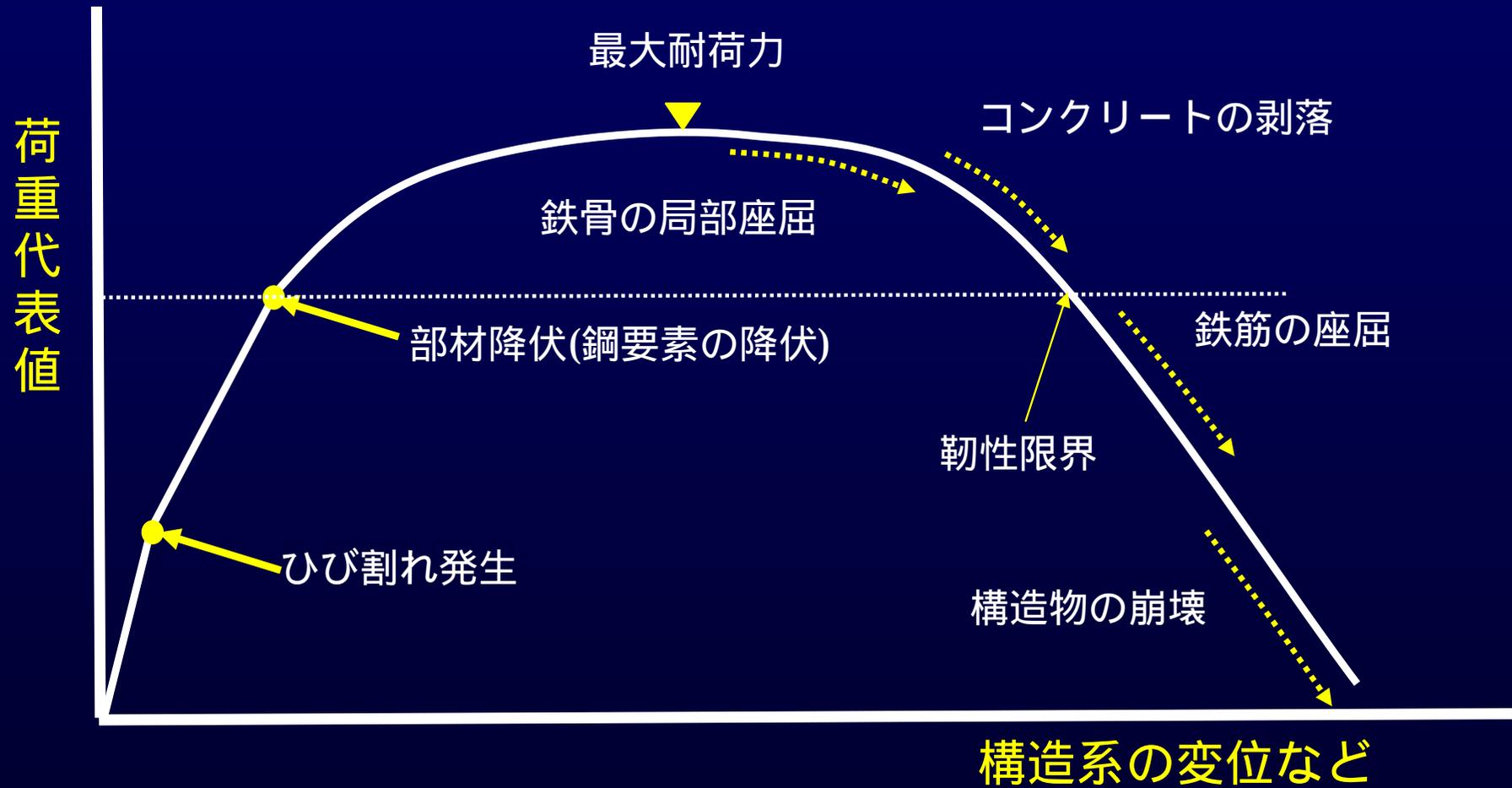


複合化による相乗効果の例

側方拘束による充填コンクリートの強度向上



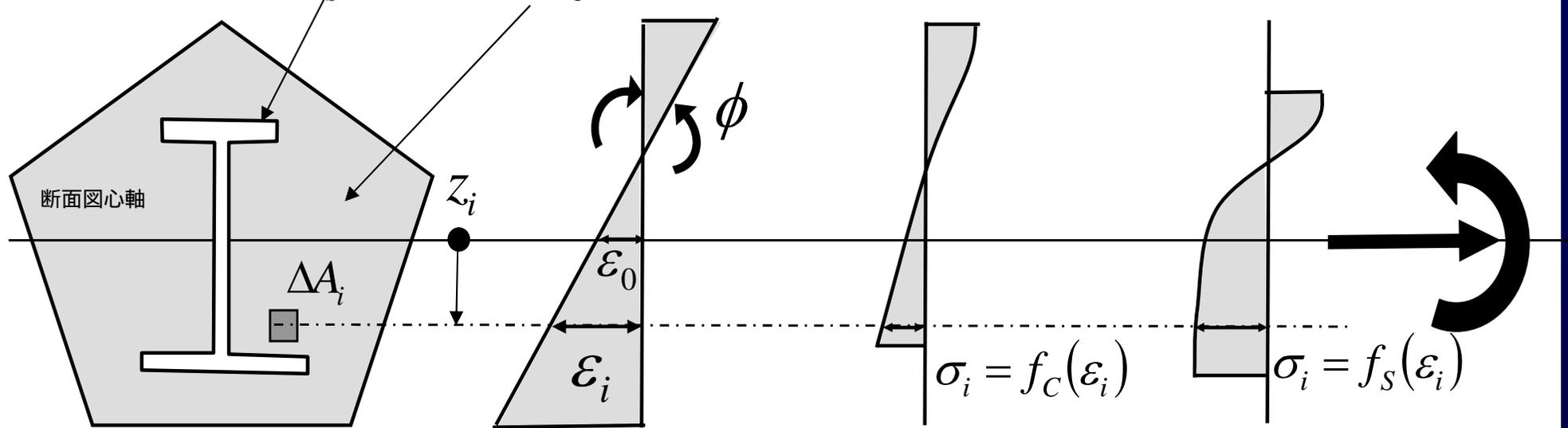
複合構造の荷重 - 変位関係の特徴



鋼とコンクリートが完全付着の場合

- 曲げ・軸方向力を受ける場合の断面挙動 -

$$A (\text{全断面}) = A_s (\text{鋼要素}) + A_c (\text{コンクリート要素})$$



(a) 断面

(b) ひずみ分布

(c) コンクリート応力分布

(d) 鋼応力分布

$$\varepsilon_i = \varepsilon_0 + \phi \cdot z_i$$

$$\sigma_i = f_s(\varepsilon_i) \text{ もしくは } f_c(\varepsilon_i)$$

$$P = \int \sigma dA = \int \sigma dA_s + \int \sigma dA_c = \sum \sigma_i \cdot \Delta A_{Si} + \sum \sigma_i \cdot \Delta A_{Ci}$$

$$M = \int \sigma z dA_s + \int \sigma z dA_c = \sum \sigma_i \cdot z_i \cdot \Delta A_{Si} + \sum \sigma_i \cdot z_i \cdot \Delta A_{Ci}$$

断面/部材寸法における建築と土木の違い

・ **建築：** 局部座屈は発生させないように
鋼薄板要素に寸法制限 (下表参照)

ただし, 鋼単独の場合に対して1.5倍まで緩和

・ **土木：** 鋼要素の局部座屈も含め, 強度評価

鋼種	b/t	d/t (はり)	d/t (一般)	d/t (角形鋼管)	D_s/t (円形鋼管)
SS400, SM400, SMA400, STK400, STKR400	23	107	96	72	150
SS490	21	99	88	66	129
SM490, SM490Y, SMA490, STK490, STKR490,	20	91	81	61	109
SCW490-CF	19	87	78	59	100
SM520, SCW520-CF					
注1) ユーロコードにおける板厚比制限値 (最大値) f_y : 鋼の基準設計応力度(N/mm ²)	$22\sqrt{\frac{235}{f_y}}$			$52\sqrt{\frac{235}{f_y}}$	$90\frac{235}{f_y}$
注2) AASHTOにおける板厚比制限値 (最大値) f_y : 鋼の基準設計応力度(N/mm ²), E : 弾性係数				$\sqrt{3}\sqrt{\frac{E}{f_y}}$	$\sqrt{8}\sqrt{\frac{E}{f_y}}$

土木：鋼要素の圧縮強度評価の例 －降伏応力の低減－

- 箱断面における無補剛板の場合（周辺固定圧縮板と仮定）

$$\chi = \begin{cases} 1.0 & (R_f \leq 0.5) \\ 0.433(R_f - 0.5)^2 - 0.831(R_f - 1) + 1 & (0.5 < R_f \leq 1.3) \end{cases}$$

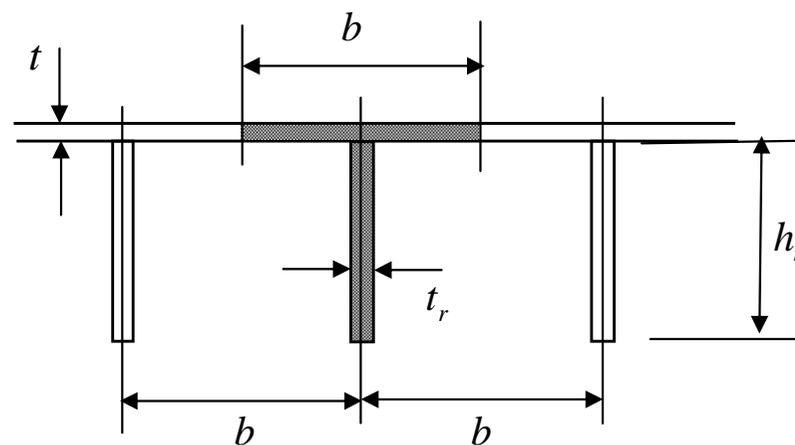
- 箱断面における補剛板の場合（両端固定のT断面柱と仮定）

$$\chi = \begin{cases} 1.0 & (\bar{\lambda} \leq 0.2) \\ \beta - \sqrt{\beta^2 - 1/\bar{\lambda}^2} & (\bar{\lambda} > 0.2) \end{cases}$$

$$R_f = 0.323 \sqrt{\frac{F}{E_s} \frac{b}{t}}$$

$$\beta = \frac{1}{2} \left\{ \frac{1 + 0.49(\bar{\lambda} - 0.2)}{\bar{\lambda}^2} + 1 \right\}$$

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{F}{E} \frac{L}{r}} \quad (\text{ただし, } \bar{\lambda} > 0.2)$$

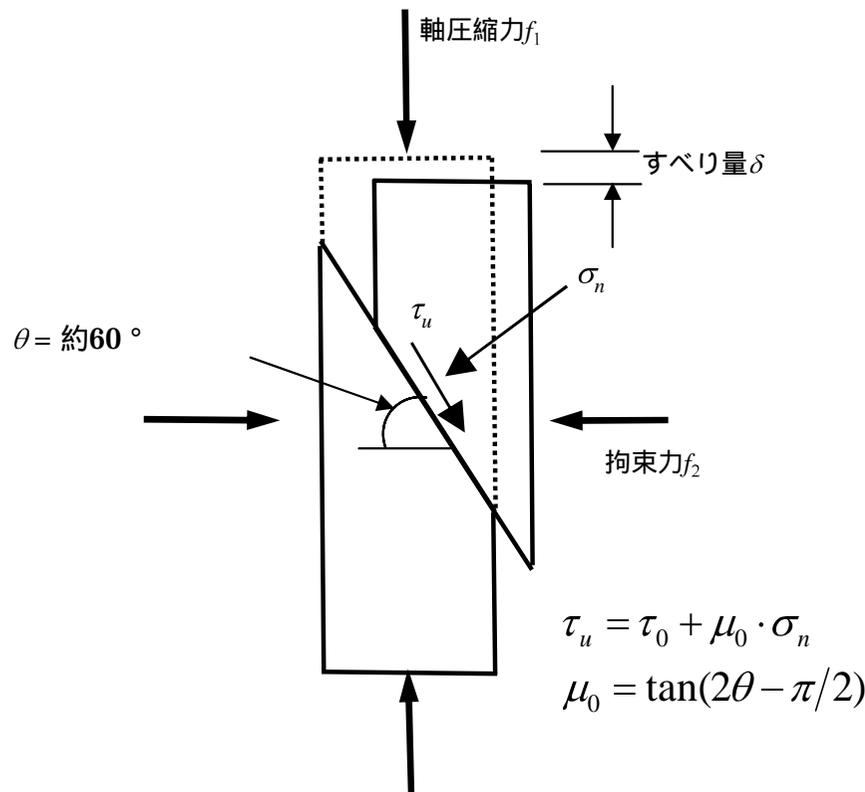


充填コンクリートの破壊と強度評価

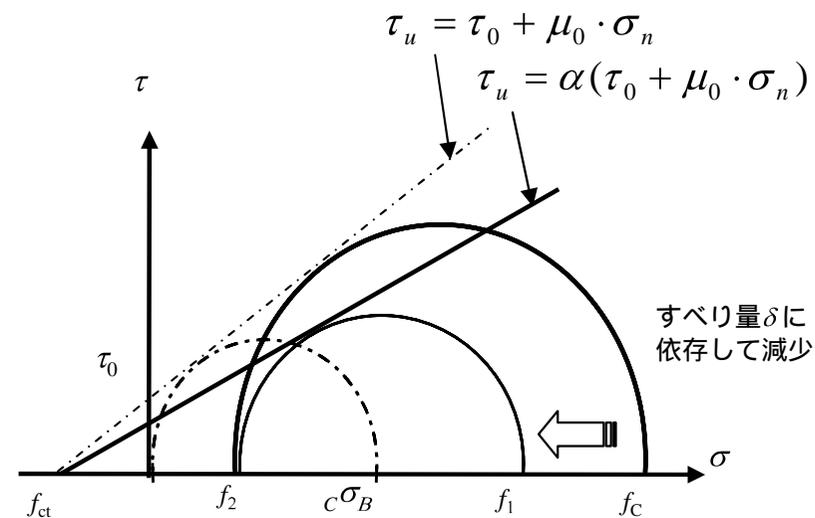
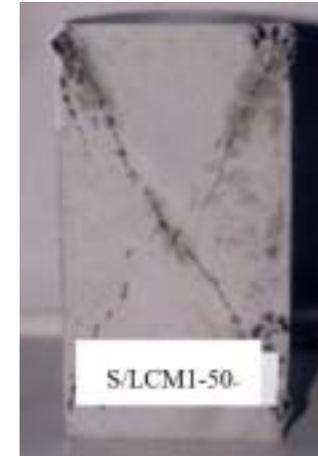
合成柱の圧縮耐力評価の例

$$P_{uv} = \phi_b \kappa (0.85 f'_{cd} \cdot A_c + \sigma_{cuo}^* \cdot A_s)$$

拘束度 (3軸応力状態) に依存

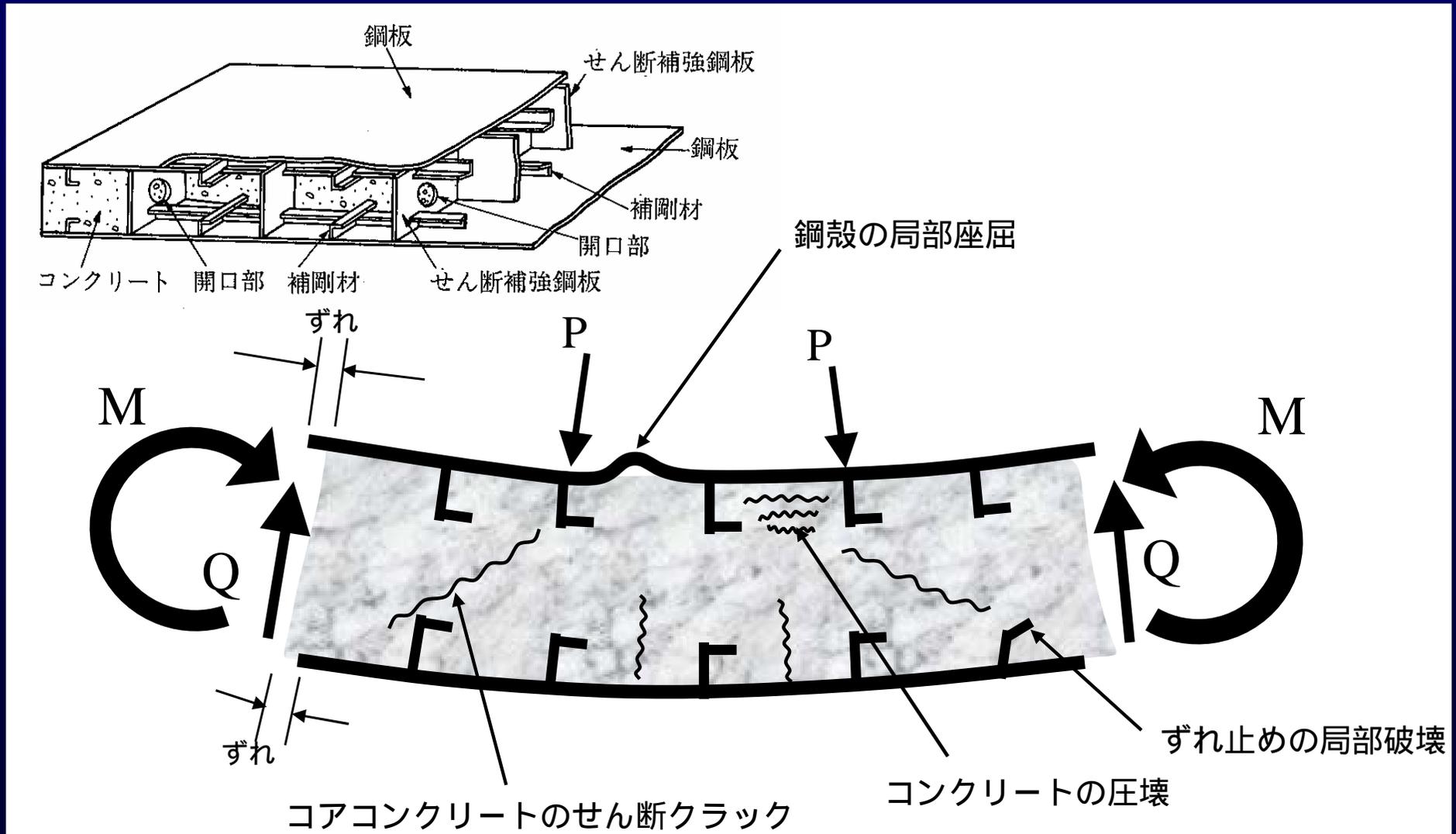


- τ_0 : 付着強度
- μ_0 : 摩擦係数
- σ_n : すべり面に垂直な力
- α : すべり量(δ)に応じた低下率
- f_c : 充填コンクリートの最大圧縮耐力
- f_{ct} : 充填コンクリートの引張耐力
- $c\sigma_B$: コンクリート強度



サンドイッチ構造の破壊形態の分類

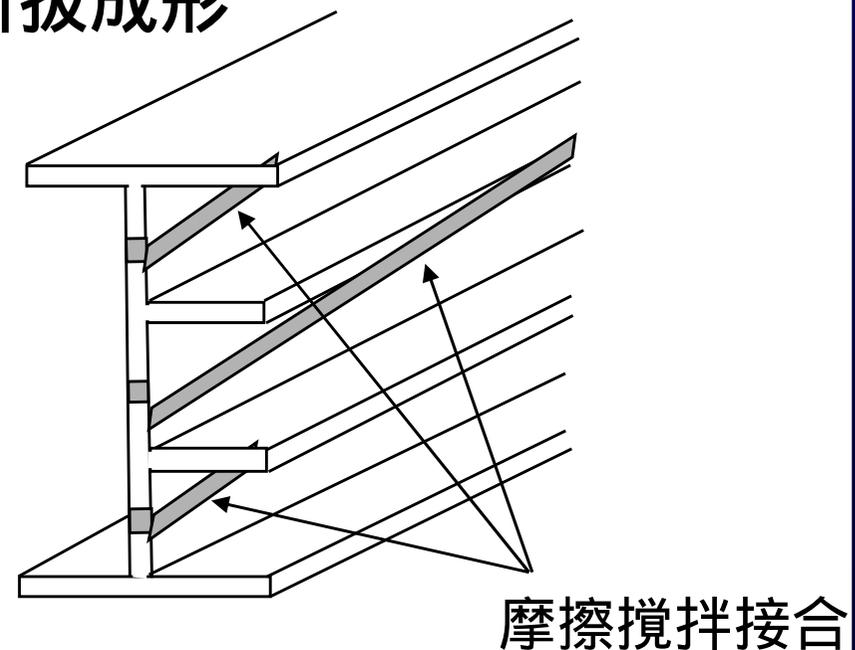
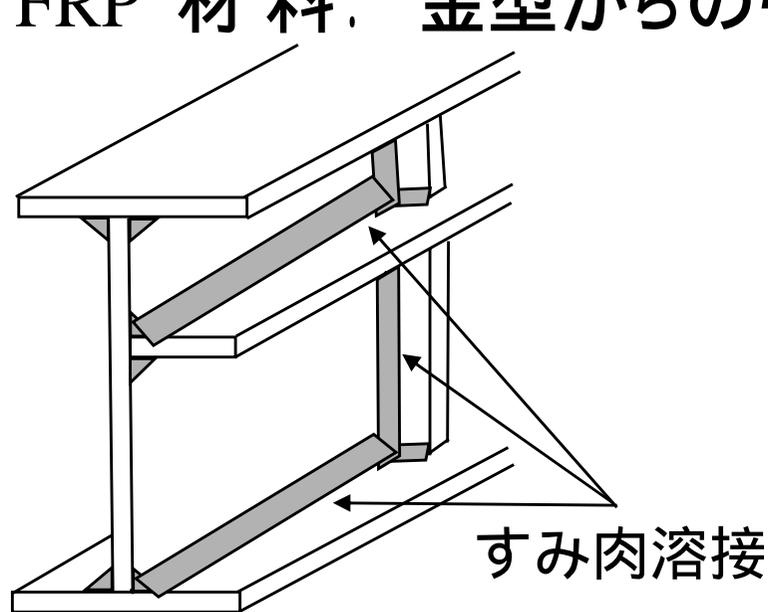
—各構造要素の役割, 破壊過程への影響—



新素材の活用における展望

- 異方性材料の物性値の最適設計
- 断面成形方法と補剛方法

鋼 部 材： 圧延もしくは板材からの溶接組立
アルミ合金： 金型からの押し出し成形
FRP 材 料： 金型からの引抜成形



まとめと今後の展望

- ・弾性物性, 塑性状態における物性値が大きく異なる材料を複合化する場合, 各種限界状態における個々の材料の役割を明確にした構造設計が必要.
- ・複合化の最適な形態は, 荷重組み合わせに依存し, その一般化は困難であるので, 個々の材料結合度合いならびにその相互作用の把握が不可欠.

性能照査型設計への課題としては,

鋼 - コンクリート境界面での力学性状の数理モデル化
コンクリート構造および鋼構造の解析精度の整合性改善
鋼構造, 複合構造, コンクリート構造間での設計思想
(限界状態)の整合性の向上
などが挙げられる.



ご清聴ありがとうございました

