

土木学会鋼構造委員会
継続教育小委員会

座屈基礎講座

I . 座屈の基礎

大阪市立大学大学院工学研究科

北田 俊行

平成18年1月10日

於 土木学会講堂

「座屈の基礎」の内容

1. 座屈の種類
 2. 柱の曲げ座屈
 3. 桁の横ねじれ座屈
 4. 梁・柱の座屈
 5. 圧縮板の座屈
 6. 圧縮補剛板の座屈
 7. プレートガーダーの座屈
 8. シェル構造の座屈
 9. 柱と構成板パネルとの連成座屈
 10. 各種骨組構造の終局状態と至るまでの挙動
 11. 有効座屈長の概念
 12. 座屈に関する断面区分
 13. 鋼の弾塑性挙動
 14. 有限変位挙動
 15. 兵庫県南部地震による座屈損傷事例(写真)
 16. 座屈理論の歴史と事故
 17. まとめ
- 参考書および参考文献

1. 座屈の種類

表-1 構造要素, 構造部材, および構造全体の座屈の種類

(a) 構造部材

種類	作用断面力	座屈(耐荷力)現象		
		①曲げ	②ねじり	③連成
柱	圧縮	○	○	①+②
梁(桁)	曲げ,せん断, ねじり	—	○	—
梁・柱	曲げ,せん断, ねじり	● (座屈耐荷力)	○	①+②

(b) 板要素

種類	作用面内応力	座屈現象			
		①圧縮	②曲げ	③せん断	④連成
周辺支持板	圧縮,曲げ, せん断	○	○	○	①+②,①+②, ①+③,①+②+③
自由突出板	圧縮,曲げ, せん断	○	○	—	①+②

(c) 連成座屈

種類 組合せ	構造要素座屈	構造部材座屈	構造全体座屈
①	○	○	—
②	○	—	○
③	—	○	○
④	○	○	○

(d) シェルの座屈, クリップリング



十字形断面柱のねじれ座屈

2. 柱の曲げ座屈

(1) 柱の座屈挙動の概要

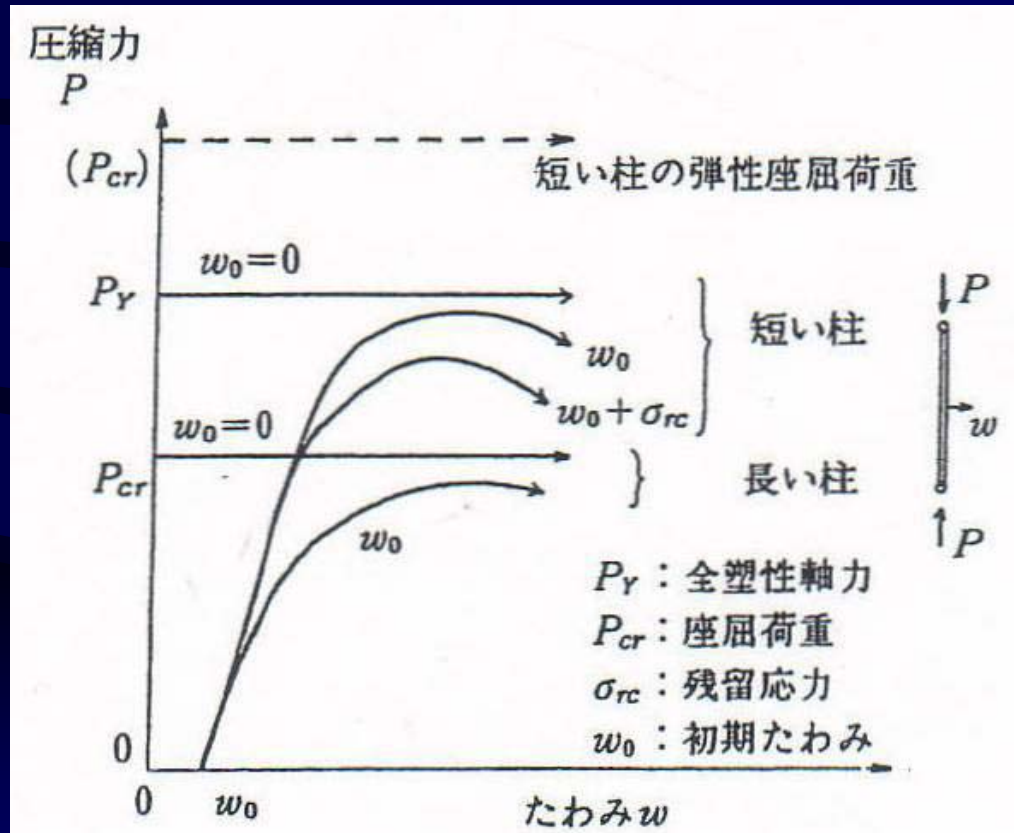


図-1 柱の座屈挙動²⁾

(2) 柱の弾性座屈(基礎式)¹⁾

座屈たわみ w に関する支配方程式は、 E をヤング係数とすると、次式で表される。

$$EI \frac{d^2 w}{dx^2} + Pw = 0 \quad (1)$$

上式のたわみ w の解は、 $w = A \sin \kappa x$ ($A \neq 0, \kappa = \sqrt{P/EI}$) で与えられる。柱部材の端 $x=L$ における境界条件 $[w]_{x=L} = 0$ から、柱部材の弾性分岐座屈荷重 $P = P_{cr}$ が求まる。

$$P_{cr} = k \frac{\pi^2 EI}{L^2} \quad (k: \text{座屈係数 } k=1) \quad (2)$$

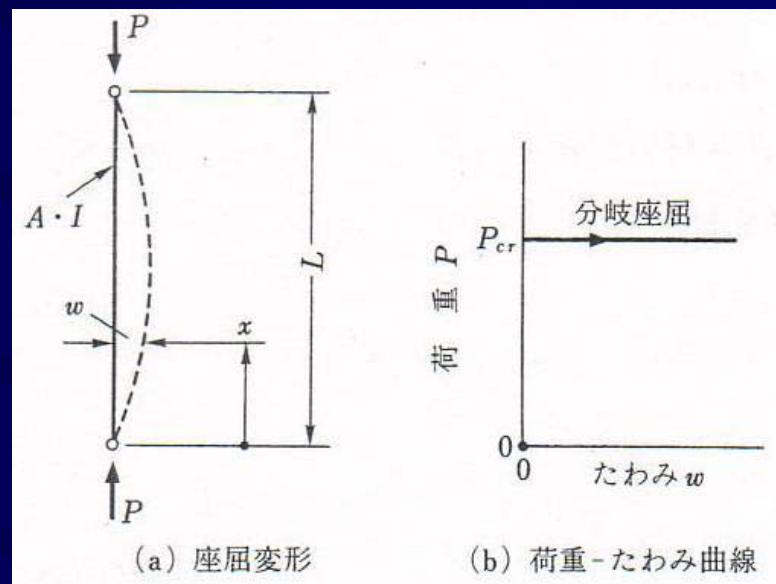


図-2 柱部材の弾性分岐座屈

(3) 種々の支持条件の柱の有効座屈長

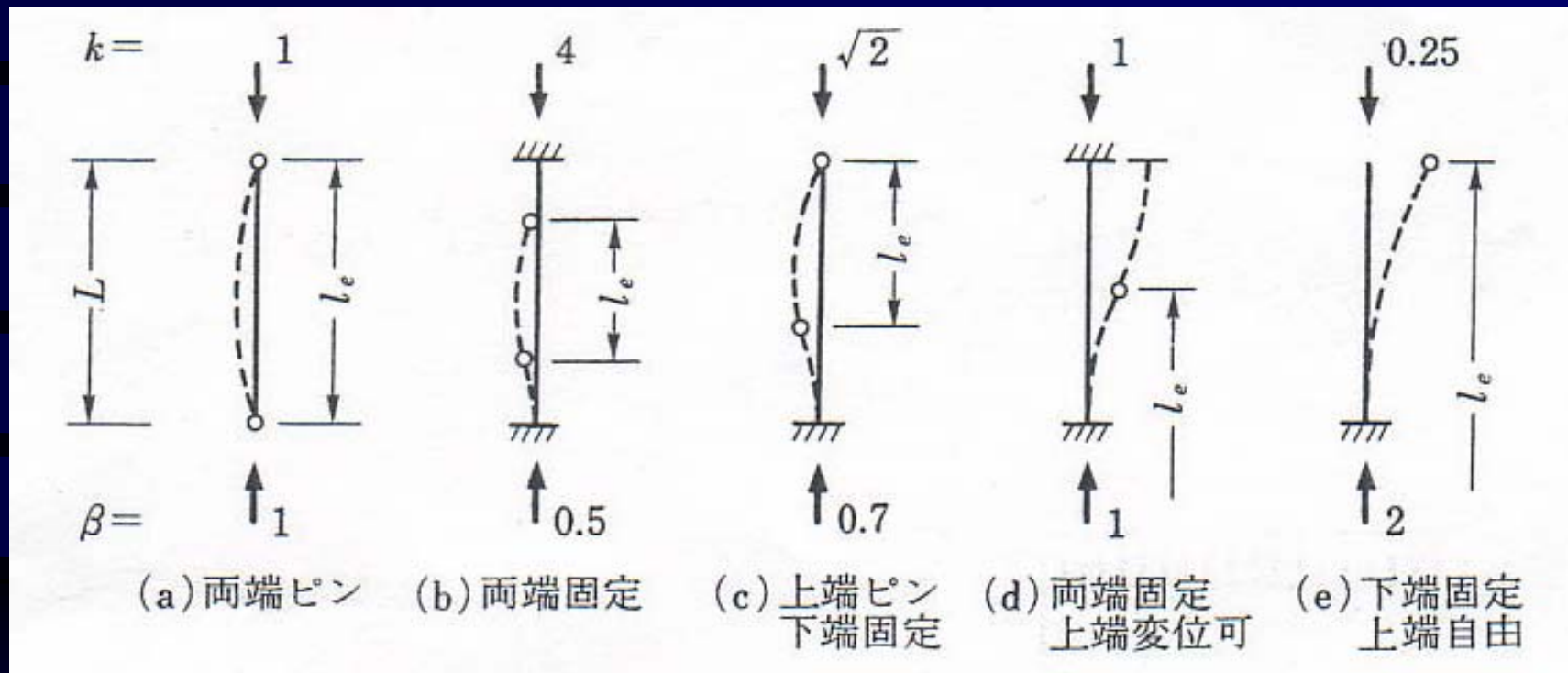


図-3 種々の境界条件を有する柱部材に対する座屈係数 k , および有効座屈長係数 β の取り方¹⁾

(4) 弾性座屈応力度

式(2)を柱部材の断面積 A で割れば、弾性座屈応力度が、次式で与えられる。

$$\sigma_{cr} = \frac{P_{cr}}{A} = k \frac{\pi^2 E}{(l_e/r)^2} = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2} \quad (3)$$

ここに、

$r = \sqrt{I/A}$: 柱部材の弱軸まわりの断面回転半径

$\lambda = l_e/r$: 柱部材の細長比

$l_e = L/\sqrt{k} = \beta L$: 柱部材の有効座屈長

(5) 柱の座屈耐荷力曲線¹⁾

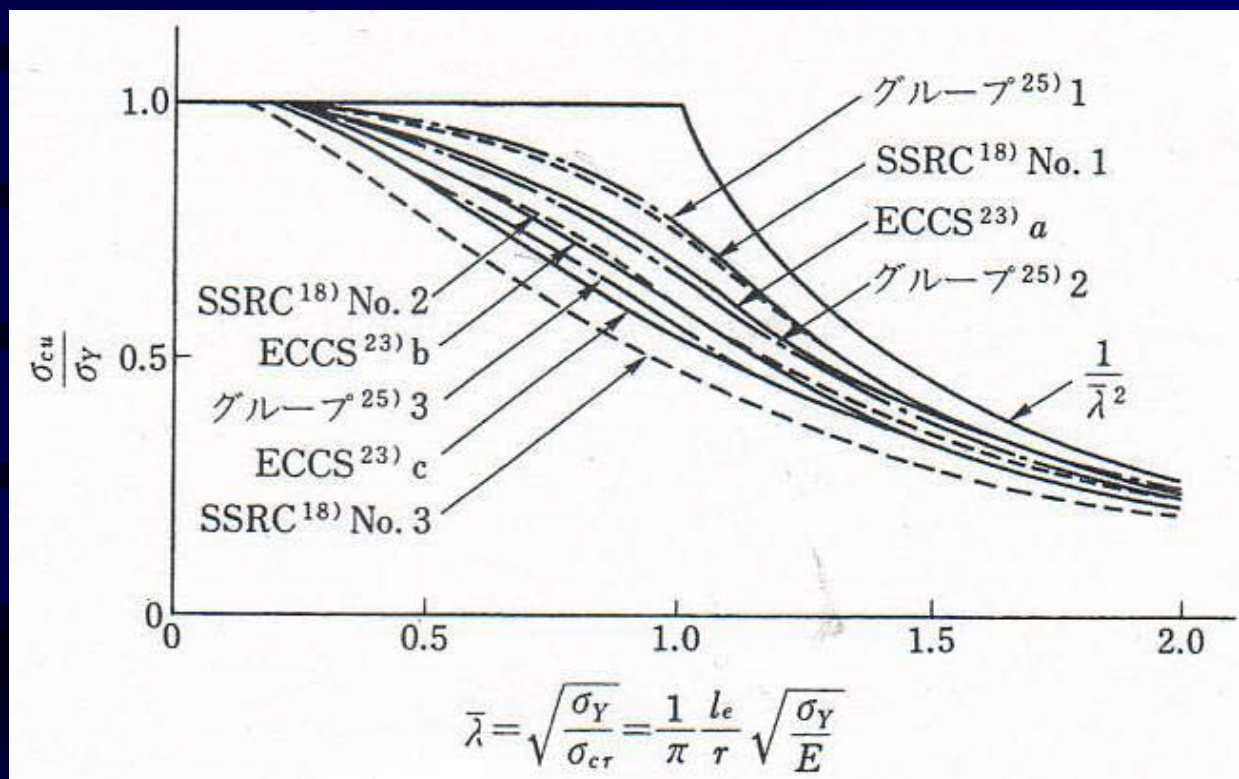


図-4 柱部材の座屈耐荷力曲線 σ_{cu} / σ_Y

(6) 部材および要素の座屈パラメータ

i) 柱部材

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{\sigma_Y}{\sigma_{cr}}} \quad (4)$$

σ_Y : 鋼材の降伏点

σ_{cr} : 柱部材の弾性座屈
応力度

ii) 梁部材

$$\alpha = \sqrt{\frac{\sigma_Y}{\sigma_{cr}}} \quad (5)$$

σ_{cr} : 梁部材の弾性横ねじり
座屈応力度

iii) 無補剛板および補剛板要素

$$R = \sqrt{\frac{\sigma_Y}{\sigma_{cr}}} \quad (6)$$

σ_{cr} : 無補剛板あるいは補剛板の弾性座屈応力度

3. 桁の横ねじれ座屈

(1) 弾性座屈(基礎式)¹⁾

$$\left. \begin{aligned} EI_z \frac{d^4 v}{dx^4} + M \frac{d^2 \theta}{dx^2} &= 0 \\ EI_w \frac{d^4 \theta}{dx^4} - GJ \frac{d^2 \theta}{dx^2} + M \frac{d^2 v}{dx^2} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

$I_z \cong A_f b^2 / 6$: I桁のz軸まわりの断面二次モーメント

$I_w \cong I_z h^2 / 4$: I桁のそりねじり定数

J : 純ねじり定数

$A_f = b t_f$: 圧縮フランジの断面積

G : せん断弾性係数

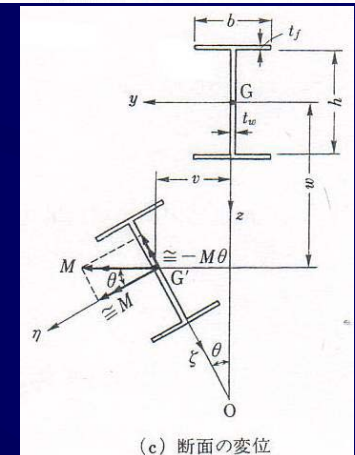
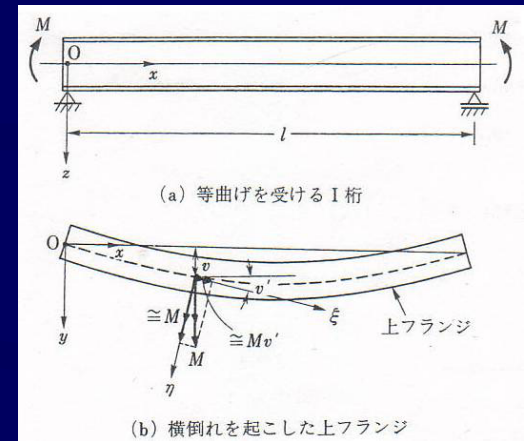


図-5 梁部材(I形断面桁)の横ねじれ座屈

水平変位 v , およびねじり角 θ は, 梁部材の両端の境界条件を満足するものとして,

$$v = A \sin \frac{\pi x}{l}, \quad \theta = B \sin \frac{\pi x}{l} \quad (8)$$

とおく. これらを式(7)に代入して, 上式の定数 A および B がともに0とならないための解より, 弾性横ねじれ座屈モーメント $M = M_{cr}$ を求めれば,

$$M_{cr} = \frac{\pi}{l} \sqrt{EI_z \cdot GJ \left\{ 1 + \frac{EI_w}{GJ} \left(\frac{\pi}{l} \right)^4 \right\}} \quad (9)$$

また,

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 E}{4 \left(K \frac{l}{b} \right)^2} \quad (10)$$

ここに,

$$K = \sqrt{3 + \frac{A_w}{2A_f}} \quad (11)$$

(2) 桁の座屈耐荷力曲線

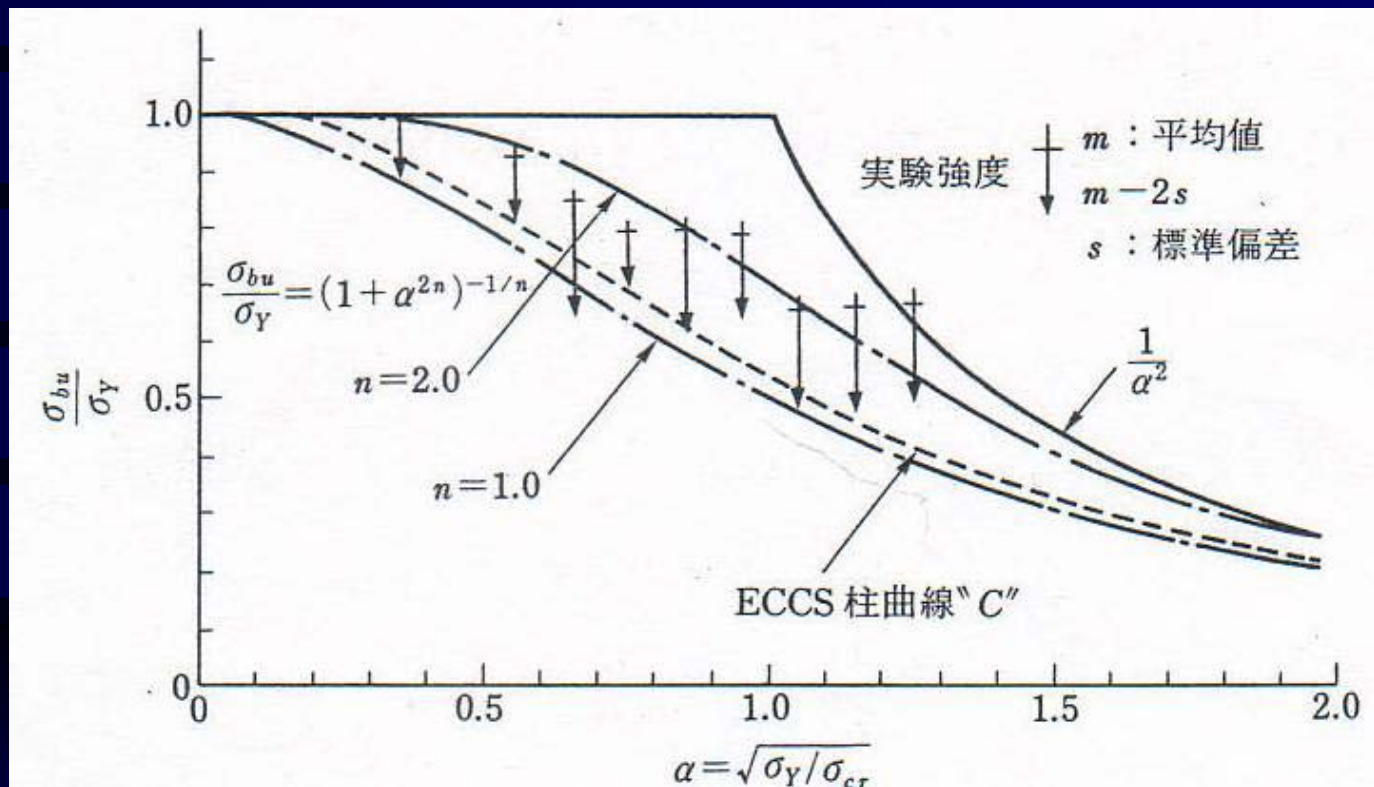


図-6 梁部材(溶接I形断面桁)の座屈耐荷力曲線 σ_{bu} / σ_Y

4. 梁・柱の座屈

(座屈耐荷力相関曲線)

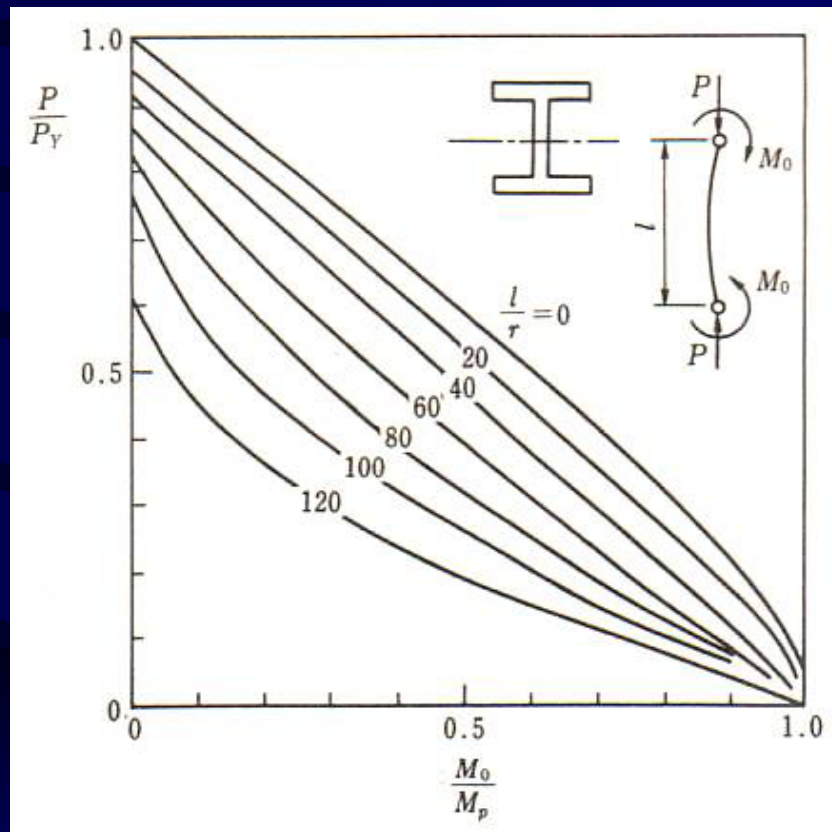


図-7 強軸曲げに対する相関曲線⁷⁾

5. 圧縮板の座屈

(1) 板の座屈の挙動の概要²⁾

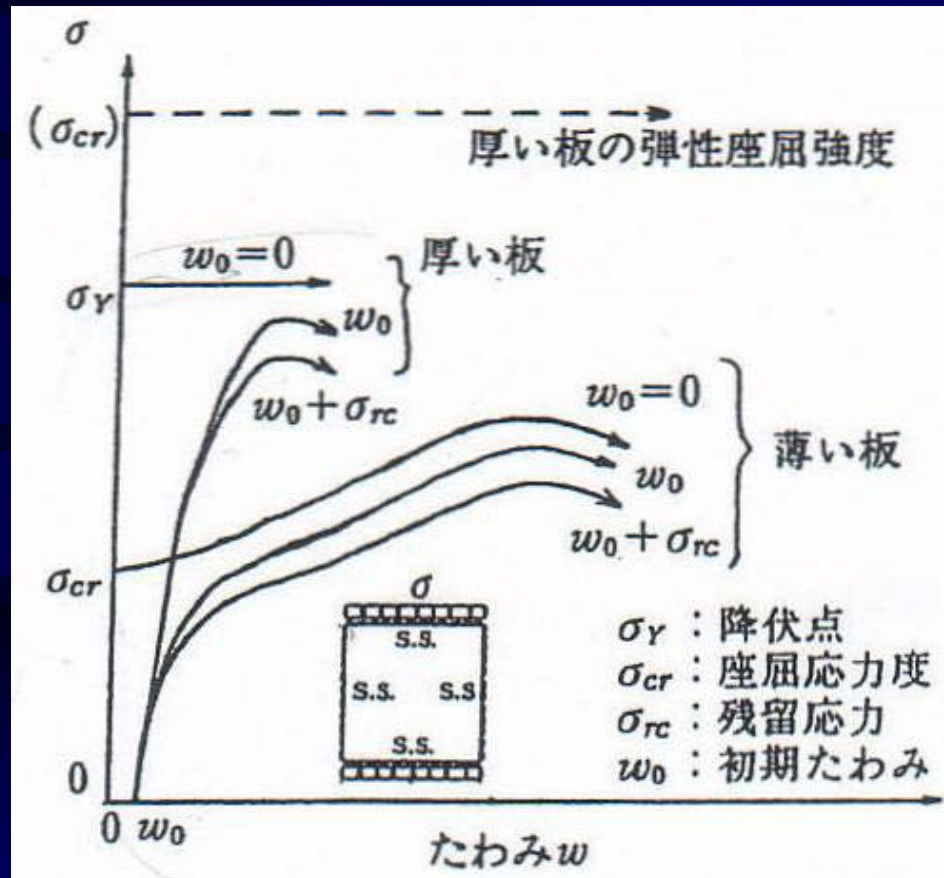


図-8 板の座屈挙動

(2) 弾性座屈(基礎理論)

座標軸(x, y)を図示のようにとり, 平板の理論に基づき, 図中に示したような座屈が起こるときのたわみ $w(x, y)$ に関する支配方程式は, 次式で表される.

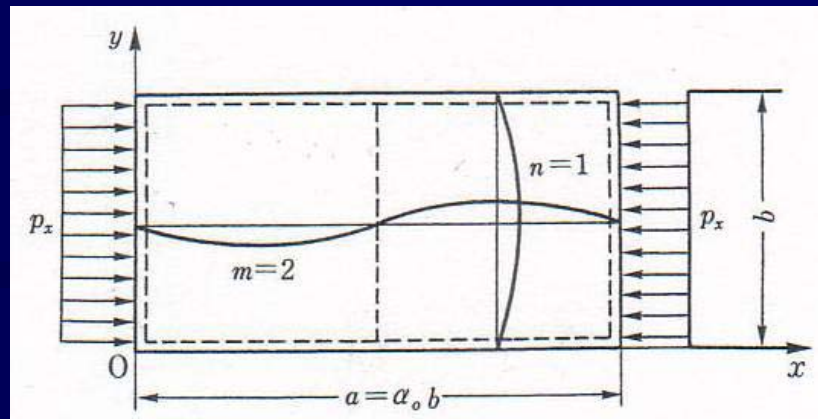


図-9 側辺に等分布圧縮力 p_x を受ける無補剛板の座屈

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} + \frac{p_x}{D} \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = 0 \quad (12)$$

ここに,

$$D = \frac{Et^3}{12(1-\mu^2)} : \text{平板の曲げ剛度} \quad (13)$$

t : 平板の板厚

μ : ポワソン比

たわみ波形 $w(x,y)$ として、次式を採用する.

$$w = A_{mn} \sin \frac{m\pi x}{a} \cdot \sin \frac{n\pi y}{b} \quad (m = 1, 2, 3, \dots, n = 1, 2, 3, \dots) \quad (14)$$

これを式(12)に代入し、圧縮荷重 $p_x = p_{cr}$ を求めれば、次のように表される.

$$p_{cr} = D\pi^2 \left\{ \left(\frac{m}{a} \right)^2 + \left(\frac{n}{b} \right)^2 \right\}^2 / \left(\frac{m}{a} \right)^2 \quad (15)$$

上式を平板の断面積 $1 \cdot t$ で割り、かつ座屈応力 σ_{cr} のできるだけ最小の値を求めるために、 y 軸方向の座屈半波数 n を $n=1$ とおけば、次式の σ_{cr} が得られる.

$$\sigma_{cr} = \frac{D\pi^2}{b^2 t} \left(\frac{m}{\alpha_0} + \frac{\alpha_0}{m} \right)^2 = k\sigma_e \quad (16)$$

k : 無補剛板の座屈係数 α_0 : アスペクト比 (縦横比, a/b)

$$\sigma_e = \frac{D\pi^2}{b^2 t} = \frac{E\pi^2}{12(1-\mu^2)} \left(\frac{t}{b} \right)^2 \quad (17)$$

σ_e : 基準となる座屈応力度 (以下, 基準座屈応力度という)

(3) 基準座屈応力度 σ_e および座屈係数 k の物理的意味

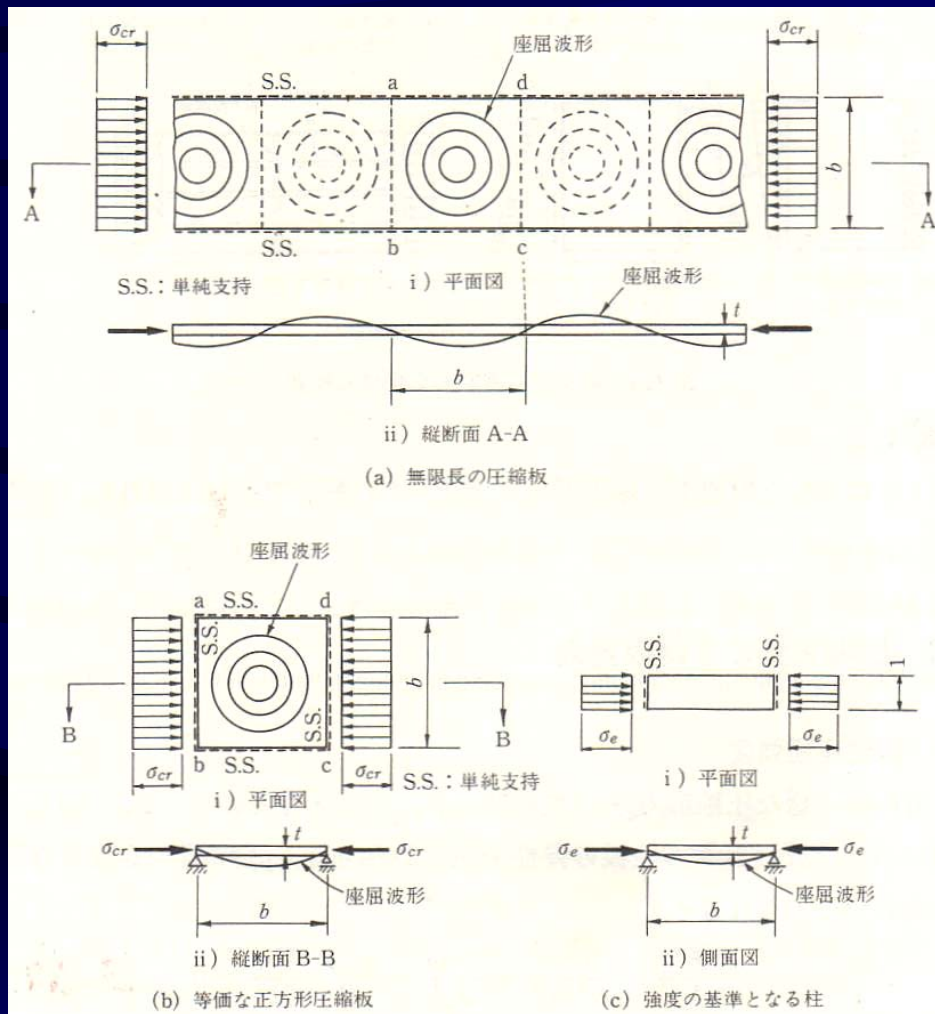


図-10 基準座屈応力度 σ_e および座屈係数 k の説明図

(4) アスペクト比 α_0 と座屈係数 k との関係

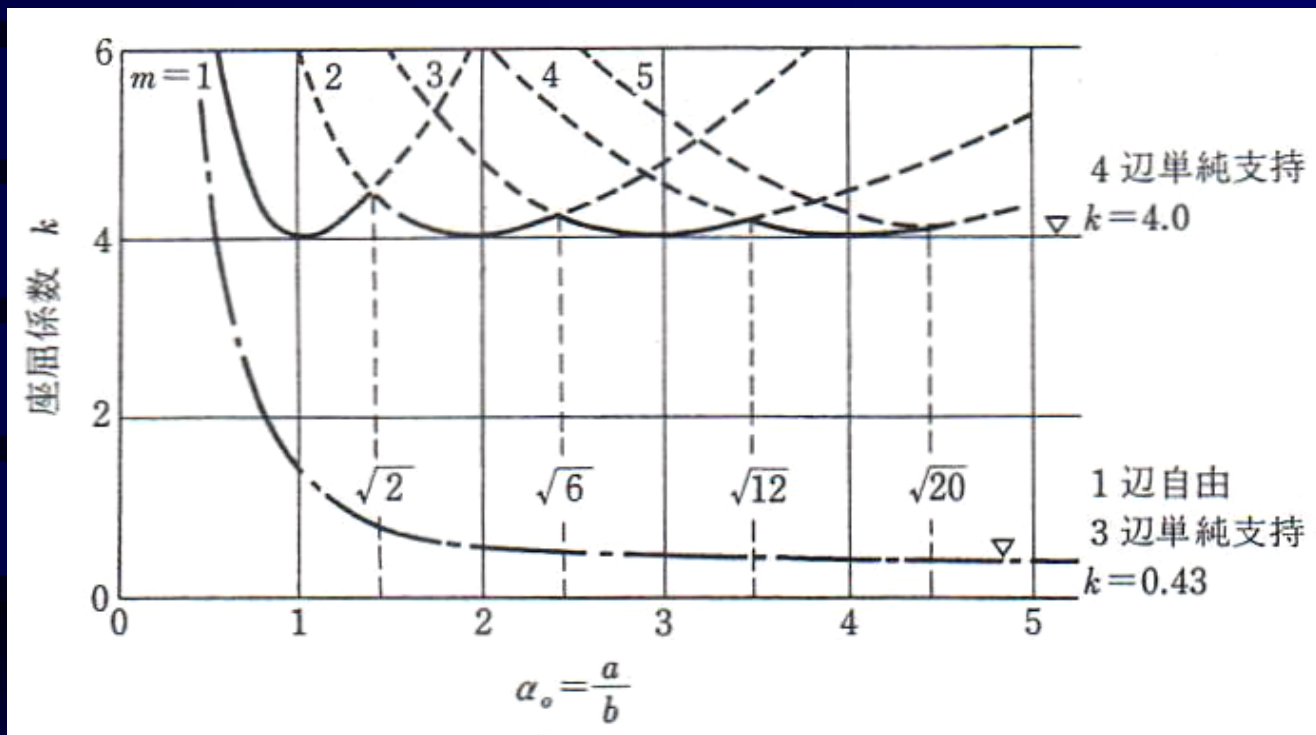
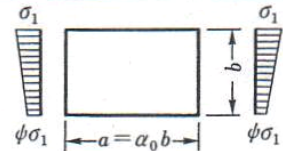
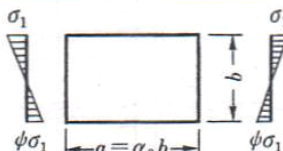
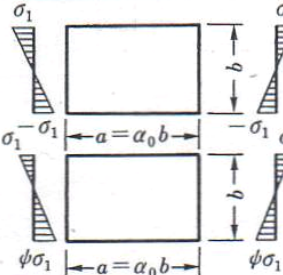
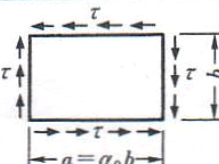


図-11 アスペクト比 α_0 および座屈半波数 m と座屈係数 k との関係

(5) 種々の応力を受ける板の座屈係数

表-2 4辺単純支持され、各種の応力を受ける平板の弾性座屈応力度 σ_{1cr} ⁷⁾

項目	荷 重	座屈応力	適用 範囲	座 屈 係 数
(1)	直線分布の圧縮応力 $0 \leq \psi \leq 1$	 $\sigma_{1cr} = k_\sigma \sigma_e$	$\alpha_0 \geq 1$	$k_\sigma = \frac{8.4}{\psi + 1.1}$
			$\alpha_0 < 1$	$k_\sigma = \left(\alpha_0 + \frac{1}{\alpha_0} \right)^2 \frac{2.1}{\psi + 1.1}$
(2)	直線分布の圧縮応力および引張応力で圧縮応力の大きい場合： $-1 < \psi < 0$	 $\sigma_{1cr} = k_\sigma \sigma_e$		$k = (1 + \psi) k' - \psi k^* + 10 \psi (1 + \psi)$. ここに、 k' は $\psi = 0$ の場合の座屈係数 (1 行欄), k^* は $\psi = -1$ の場合の座屈係数 (3 行欄).
(3)	直線分布の圧縮応力および引張応力で両者等しい場合 $\psi = -1$ または引張応力の大きい場合： $\psi < -1$	 $\sigma_{1cr} = k_\sigma \sigma_e$	$\alpha_0 \geq 2/3$	$k_\sigma = 23.9$
			$\alpha_0 < 2/3$	$k_\sigma = 15.87 + \frac{1.87}{\alpha_0^2} + 8.6 \alpha_0^2$
(4)	等分布せん断応力	 $\tau_{cr} = k_\tau \sigma_e$	$\alpha_0 \geq 1$	$k_\tau = 5.34 + \frac{4.00}{\alpha_0^2}$
			$\alpha_0 < 1$	$k_\tau = 4.00 + \frac{5.34}{\alpha_0^2}$

(6) せん断座屈の座屈係数 k の意味

$$\tau_{cr} = k\sigma_e \quad (18)$$

ここで、座屈係数 k は、次式で与えられる.

$$\left. \begin{aligned} k &= 5.34 + \frac{4}{\alpha^2}, (\alpha \geq 1) \\ &= 4.00 + \frac{5.34}{\alpha^2}, (\alpha < 1) \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

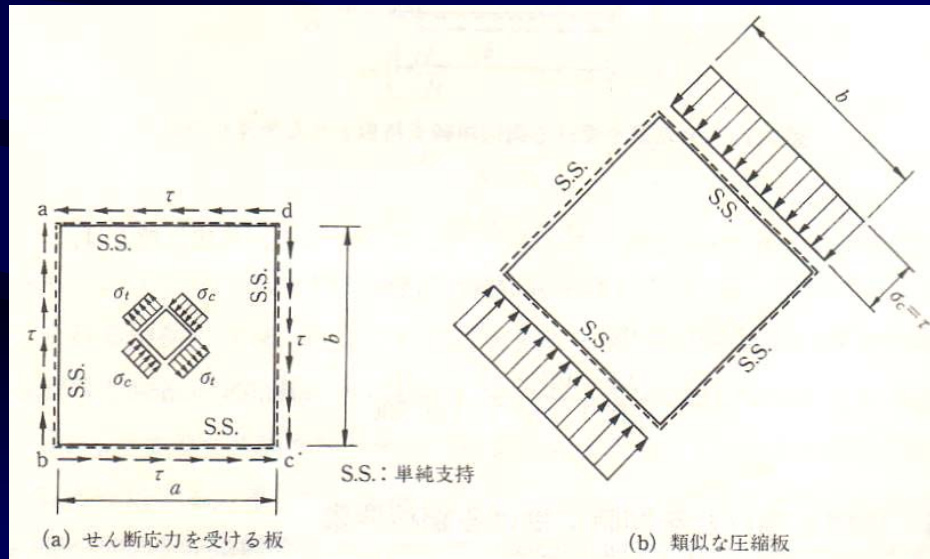


図-12 せん断を受ける板と類似な圧縮板¹⁰⁾

(7) 圧縮板の座屈耐荷力曲線

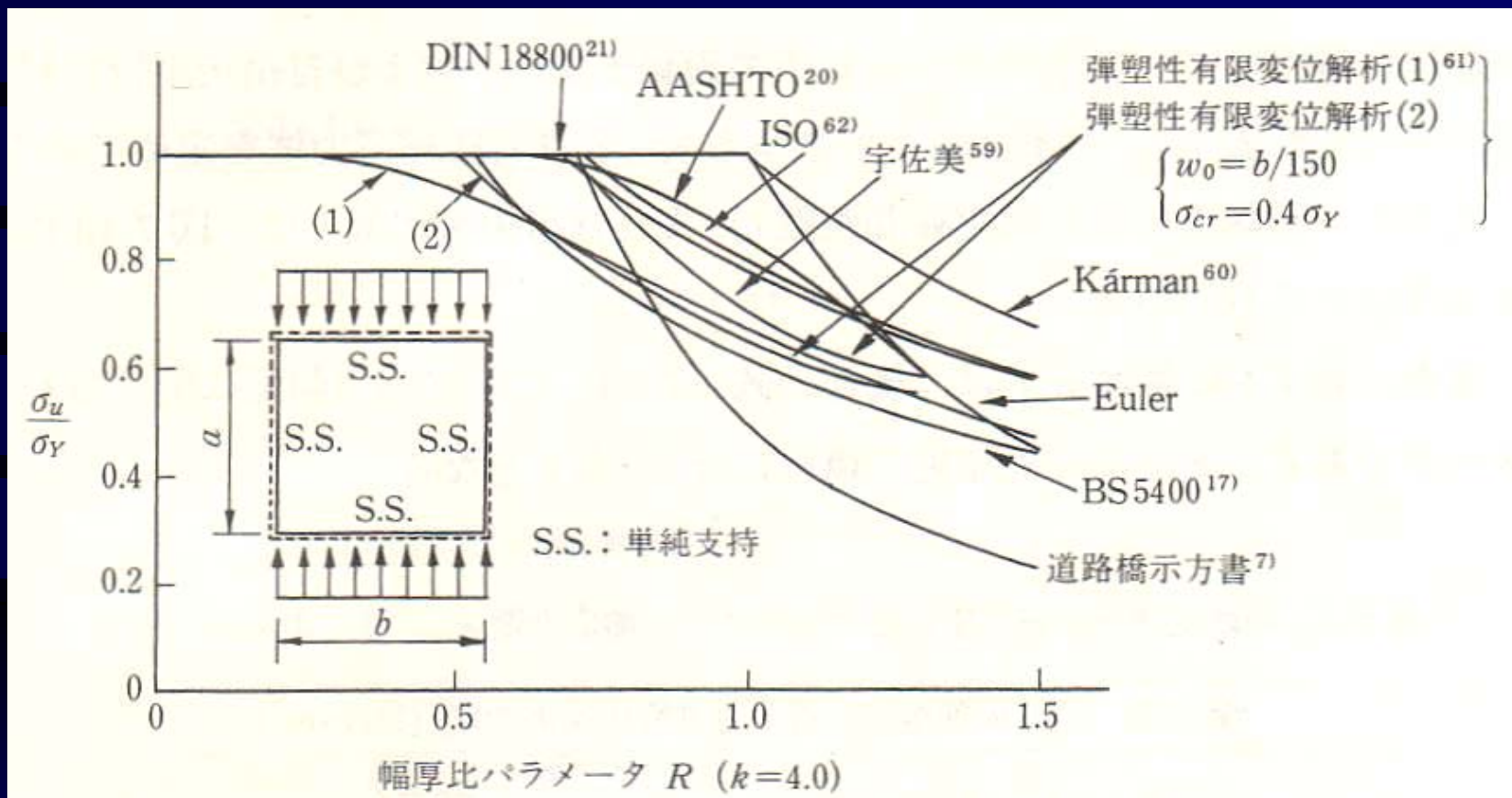


図-13 周辺単純支持板の各種座屈耐荷力曲線¹⁰⁾

6. 圧縮補剛板の座屈

(1) 弾性座屈(基礎理論)¹⁾

補剛板の弾性座屈の解析には、通常、次のようなたわみ $w(x,y)$ 波形が用いられる.

$$w = \sum_m \sum_n A_{mn} \sin \frac{m\pi x}{a} \cdot \sin \frac{n\pi y}{b} \quad (20)$$

エネルギー法を用いて、次のように弾性座屈応力度 σ_{cr} が求められる.

$$\sigma_{cr} = \frac{(1 + \alpha_0)^2 + 2\gamma}{\alpha_0(1 + 2\delta)} \sigma_e = k\sigma_e \quad (21)$$

ここに,

$$\gamma = \frac{EI_l}{bD} : \text{補剛材剛比} \quad (22) \quad \delta = \frac{F}{bt} : \text{縦補剛材の断面積比} \quad (23)$$

I_l : 縦補剛材の断面二次モーメント F : 縦補剛材の断面積

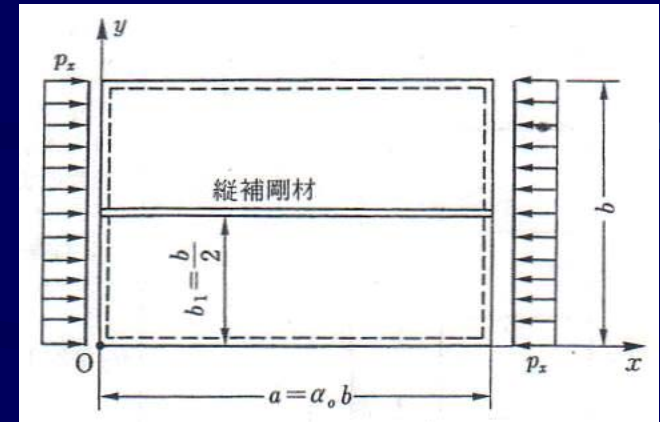


図-14 縦補剛材を有し、純圧縮を受ける補剛板

(2) アスペクト比 α_0 と座屈係数 k との関係

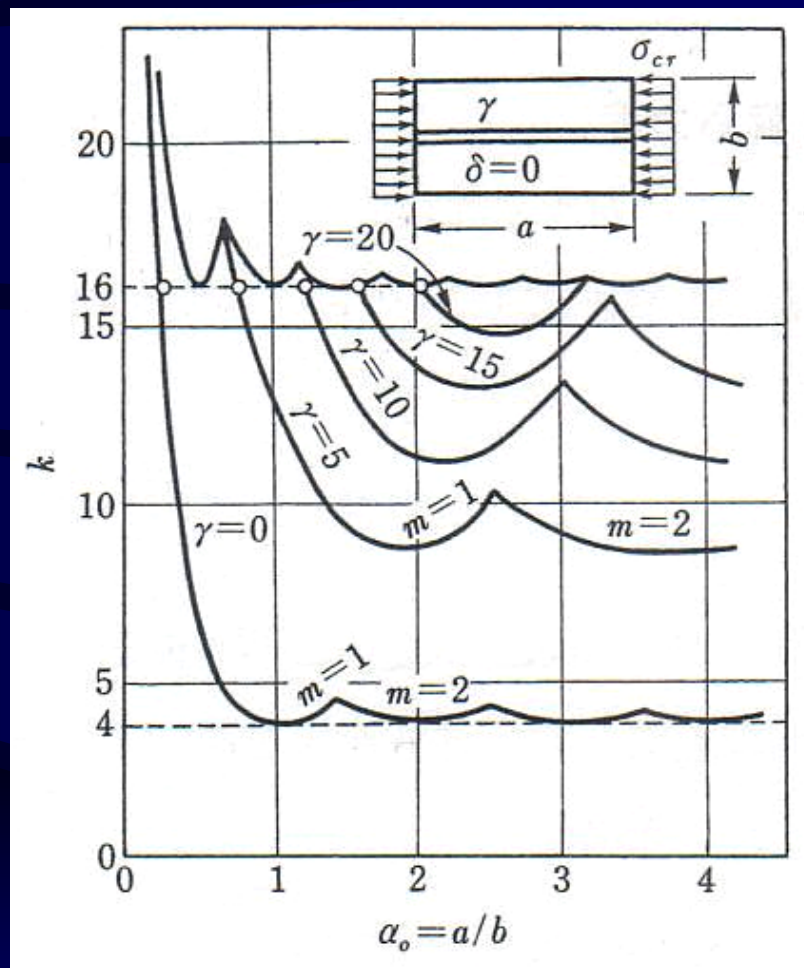
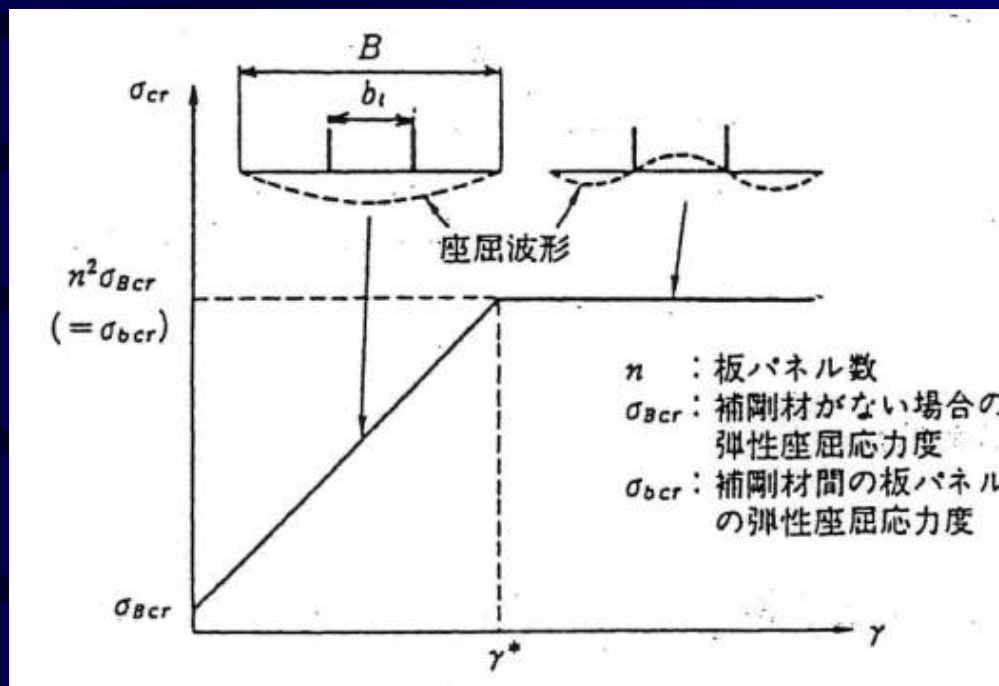


図-15 補剛板の座屈係数 k の計算結果の一例¹⁾

(3) 必要最小剛比 γ^* の意味



$$\left\{ \begin{array}{ll} \text{補剛材剛比} & \gamma = \frac{EI_t}{BD} \\ \text{必要最小剛比} & \gamma^* = 4\alpha_t^2 n \cdot (1 + n\delta_s) - \frac{(\alpha_t^2 + 1)^2}{6} \end{array} \right.$$

図-16 座屈応力度と補剛材剛比との関係

(4) 補剛材剛比と座屈後の発生圧縮応力分布

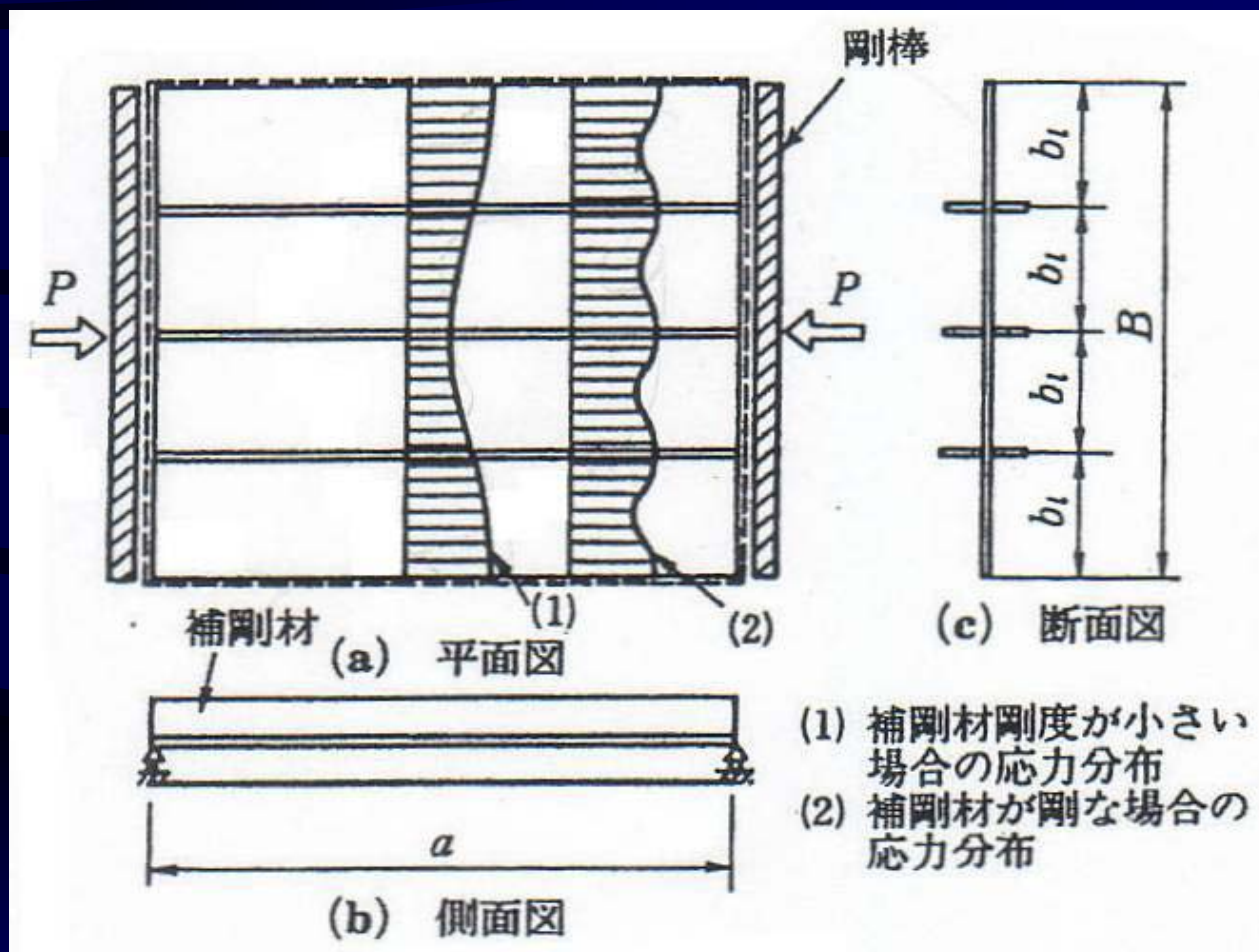


図-17 圧縮補剛板の座屈後の発生圧縮応力分布

(5) 圧縮板の座屈耐荷力曲線

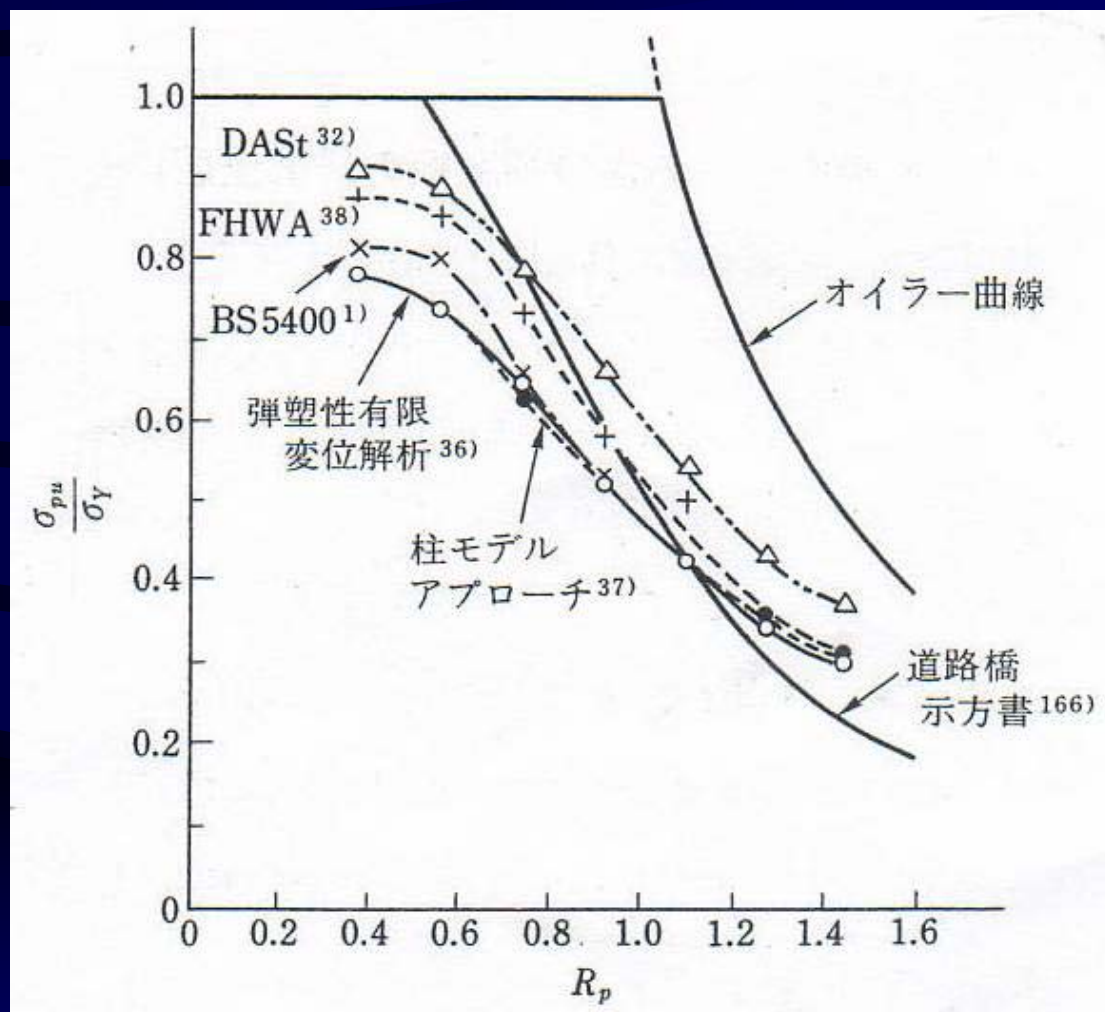


図-18 道路橋示方書で設計した補剛板の座屈耐荷力曲線 σ_{pu} / σ_Y

(6) 補剛板の残留応力

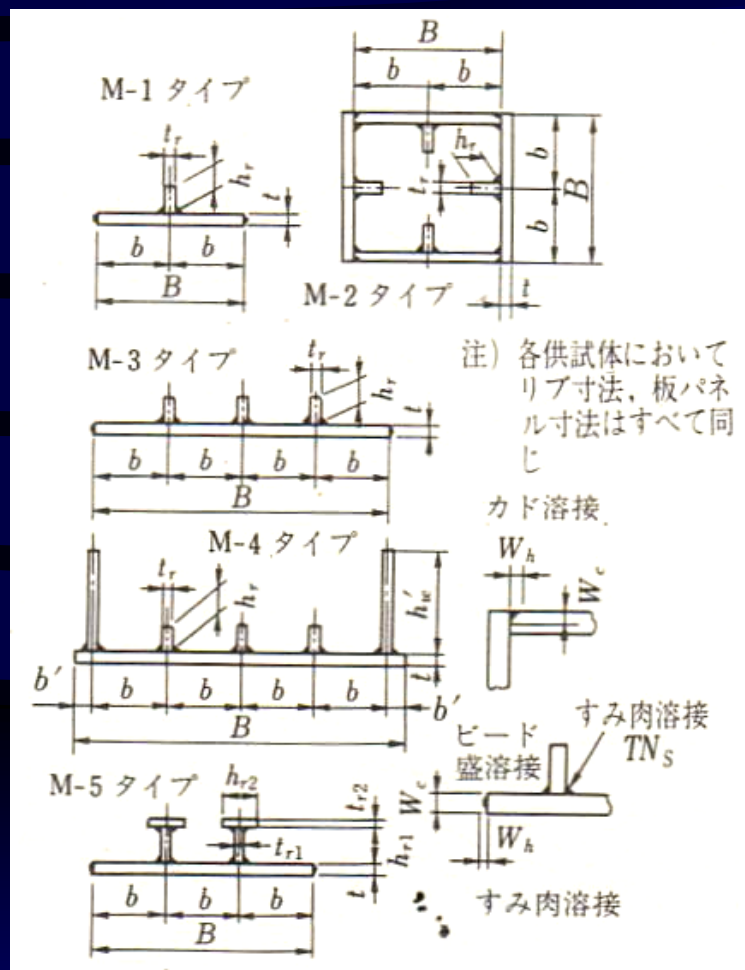


図-19 残留応力を測定した供試体の断面形状⁷⁾

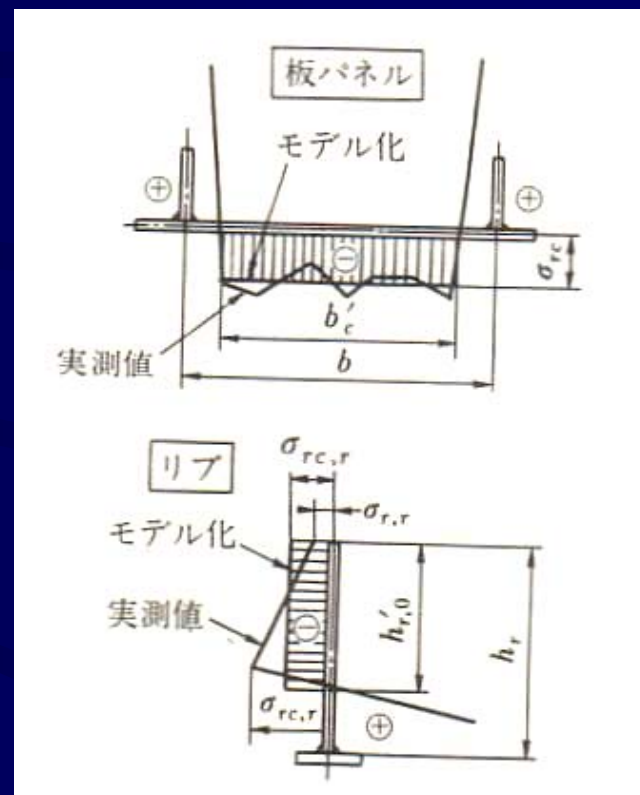


図-20 残留応力の形状および大きさのモデル化⁷⁾

(7) 補剛板の耐荷力の解析モデル

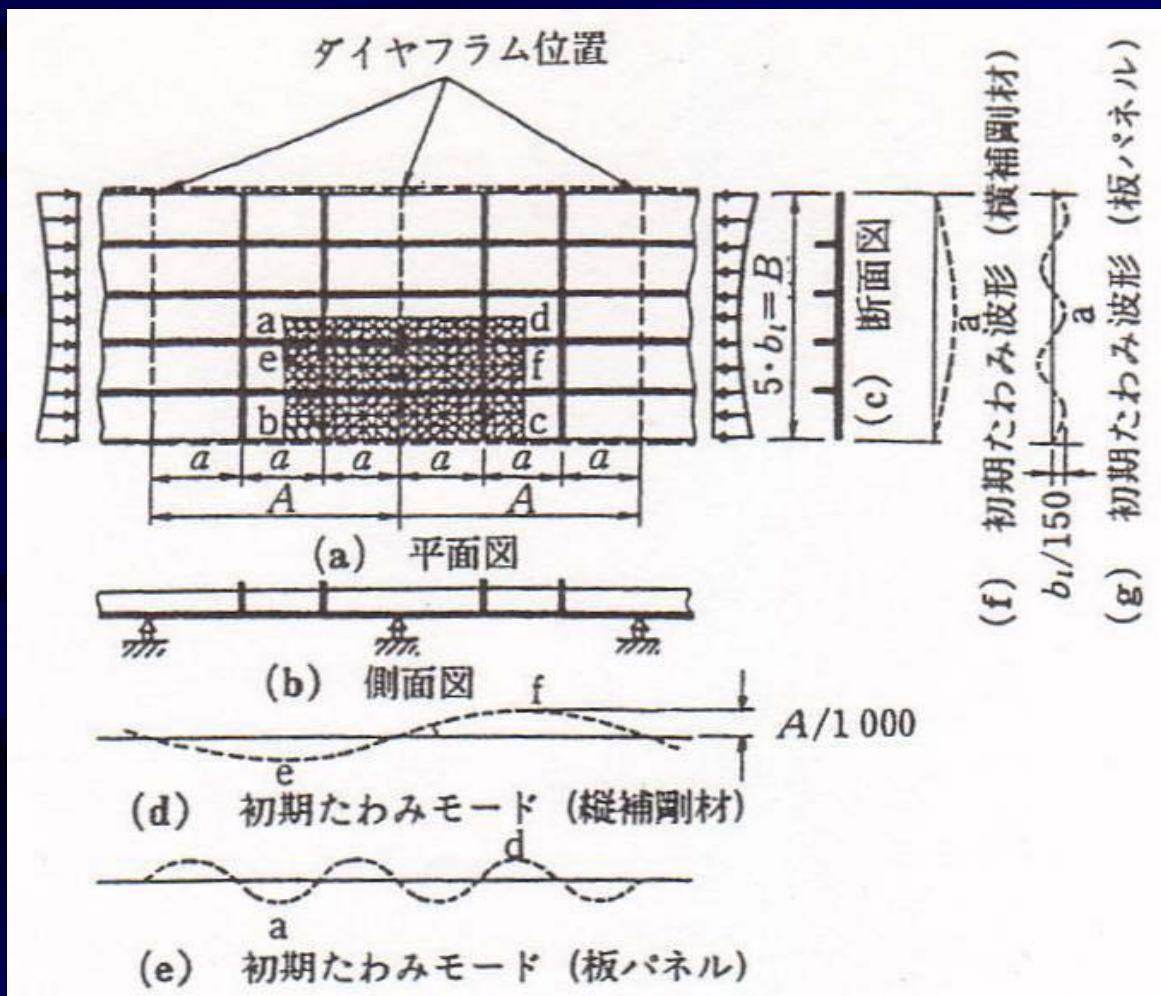


図-21 縦横に補剛された圧縮補剛板の解析モデルの例²⁾

(8) 2方向面内力を受ける補剛板の耐荷力相関曲線

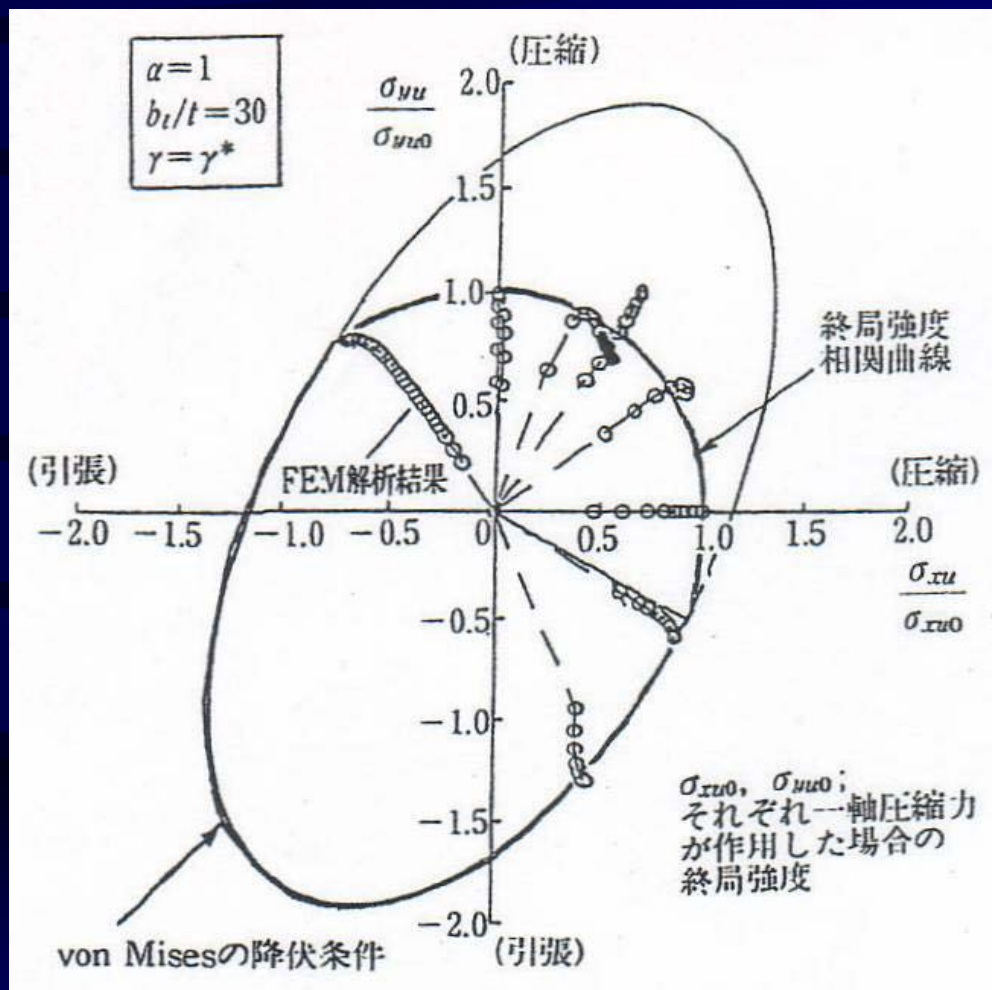
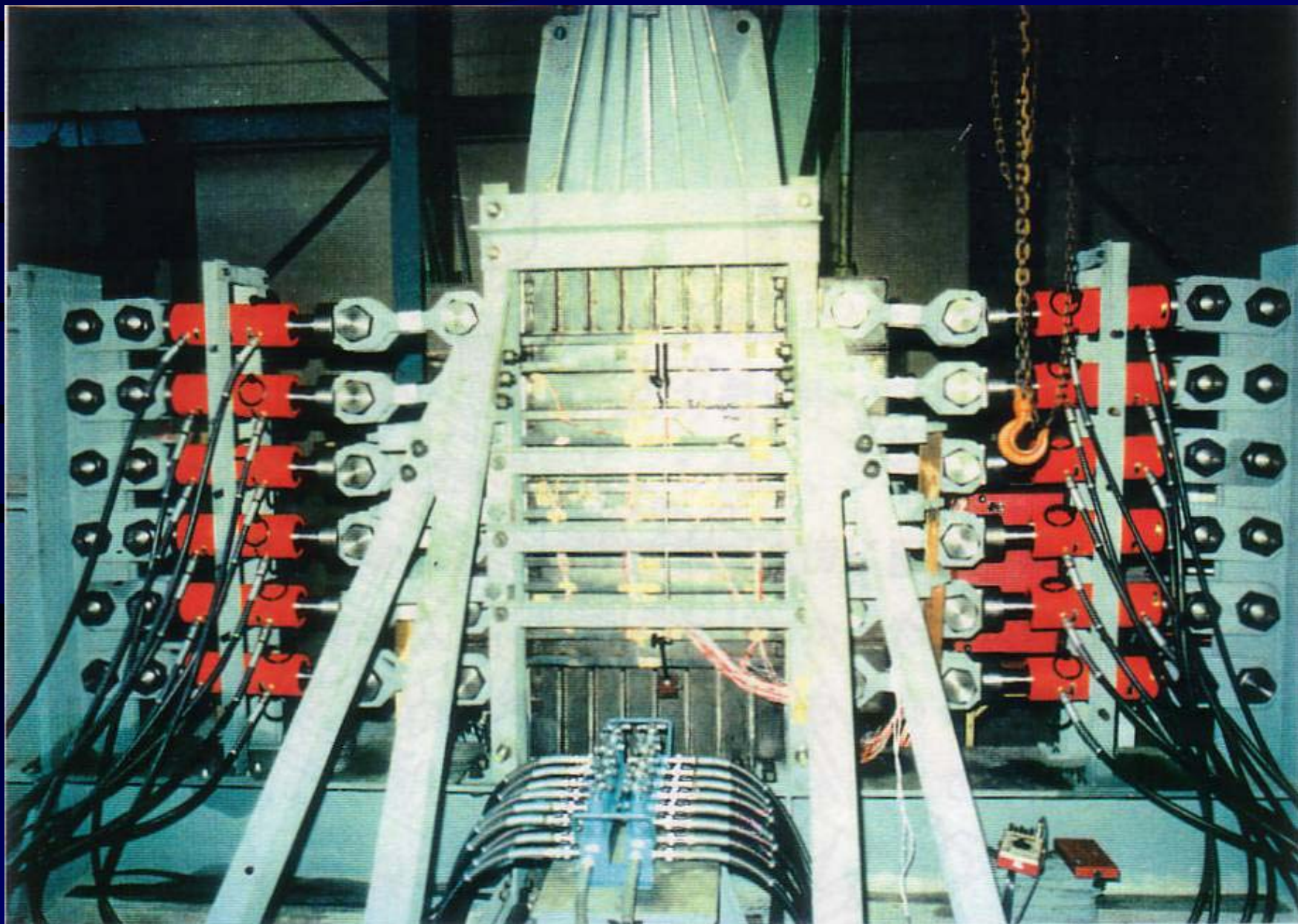
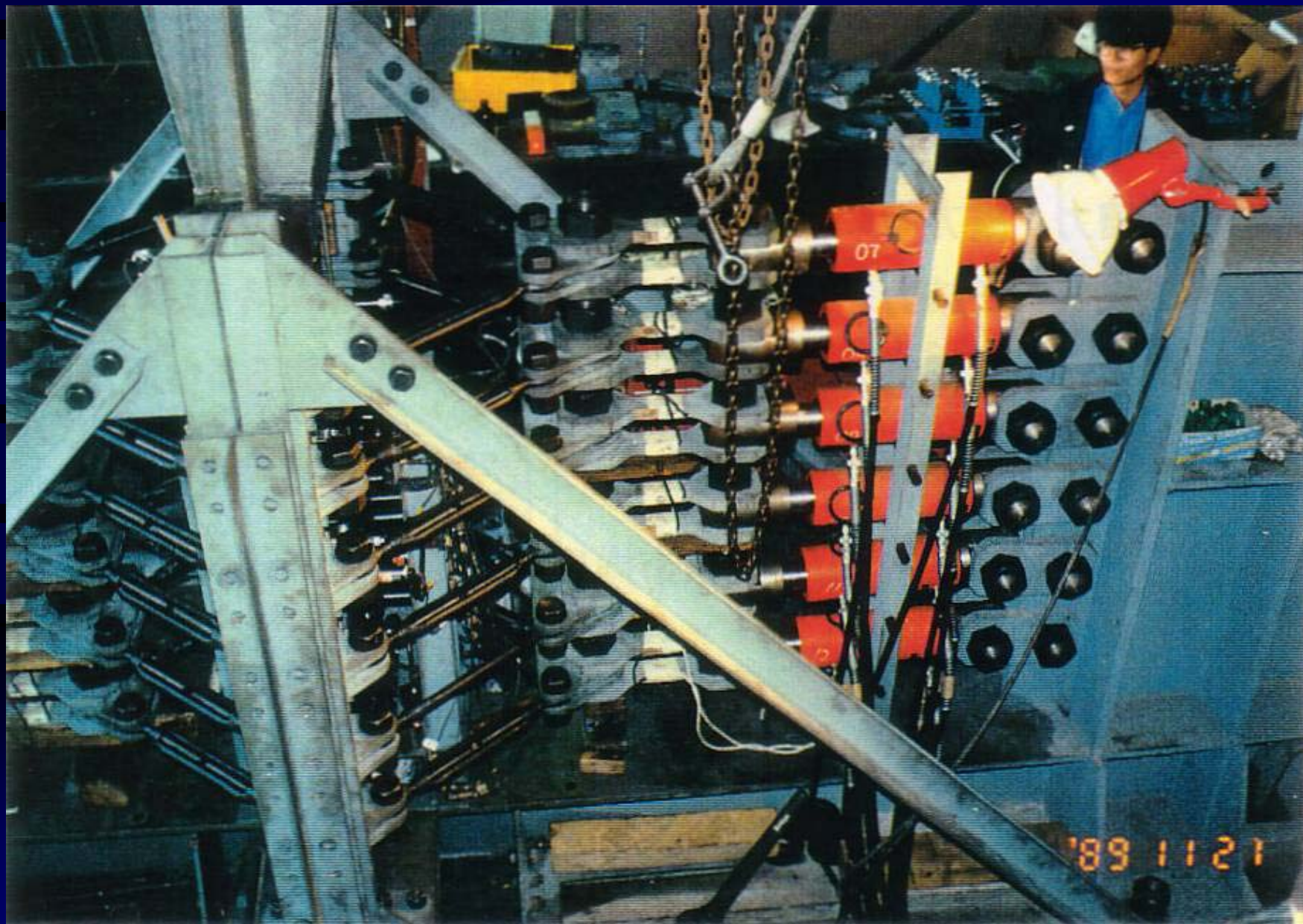


図-22 2方向面内力を受ける補剛板の座屈耐荷力相関曲線²⁾





7. プレートガーダーの座屈

(1) 実橋における作用断面力

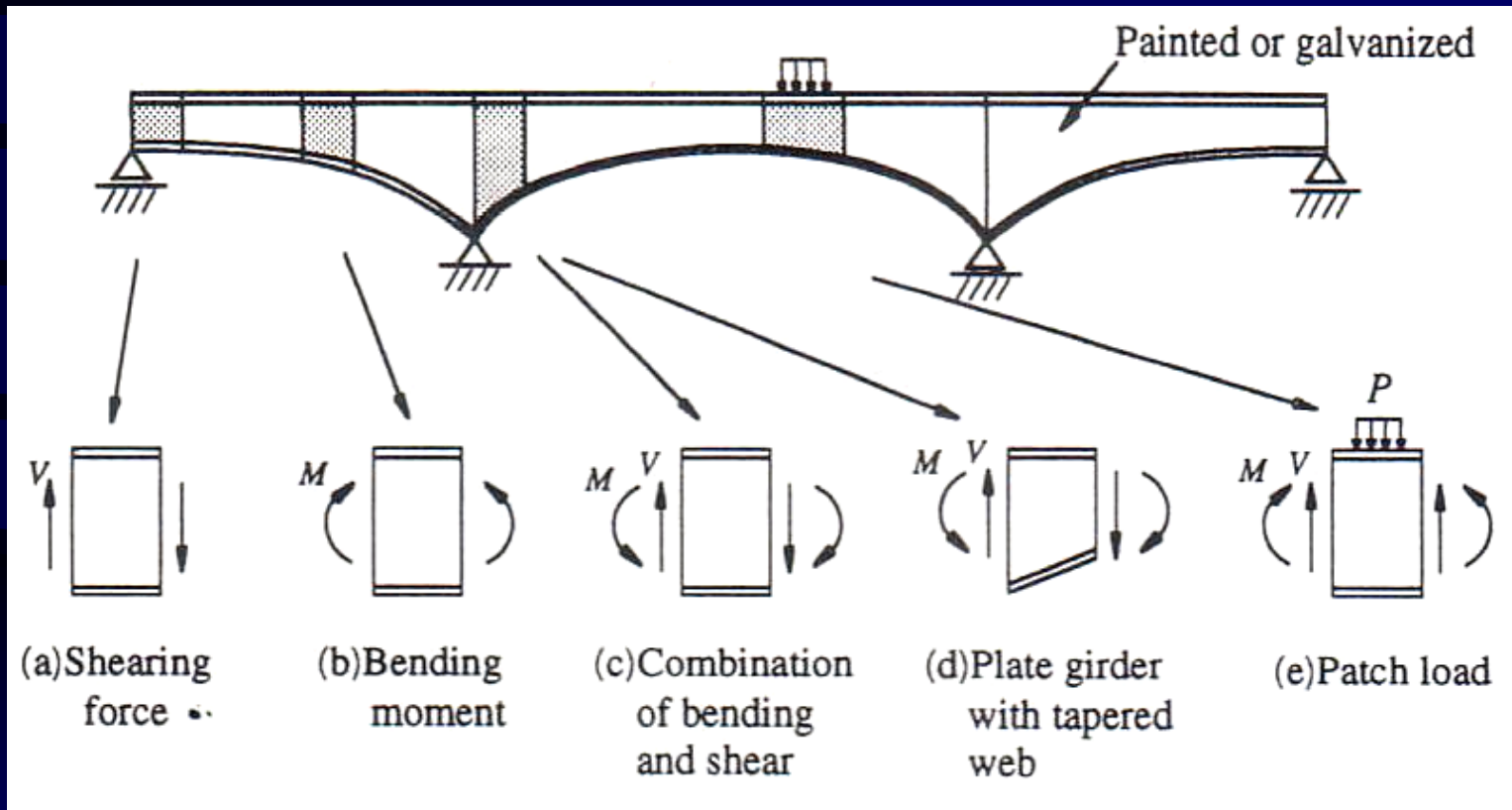


図-23 プレートガーダーおよび箱桁に作用する卓越断面力¹¹⁾

(2) プレートガーダーの終局状態に至るまでの挙動

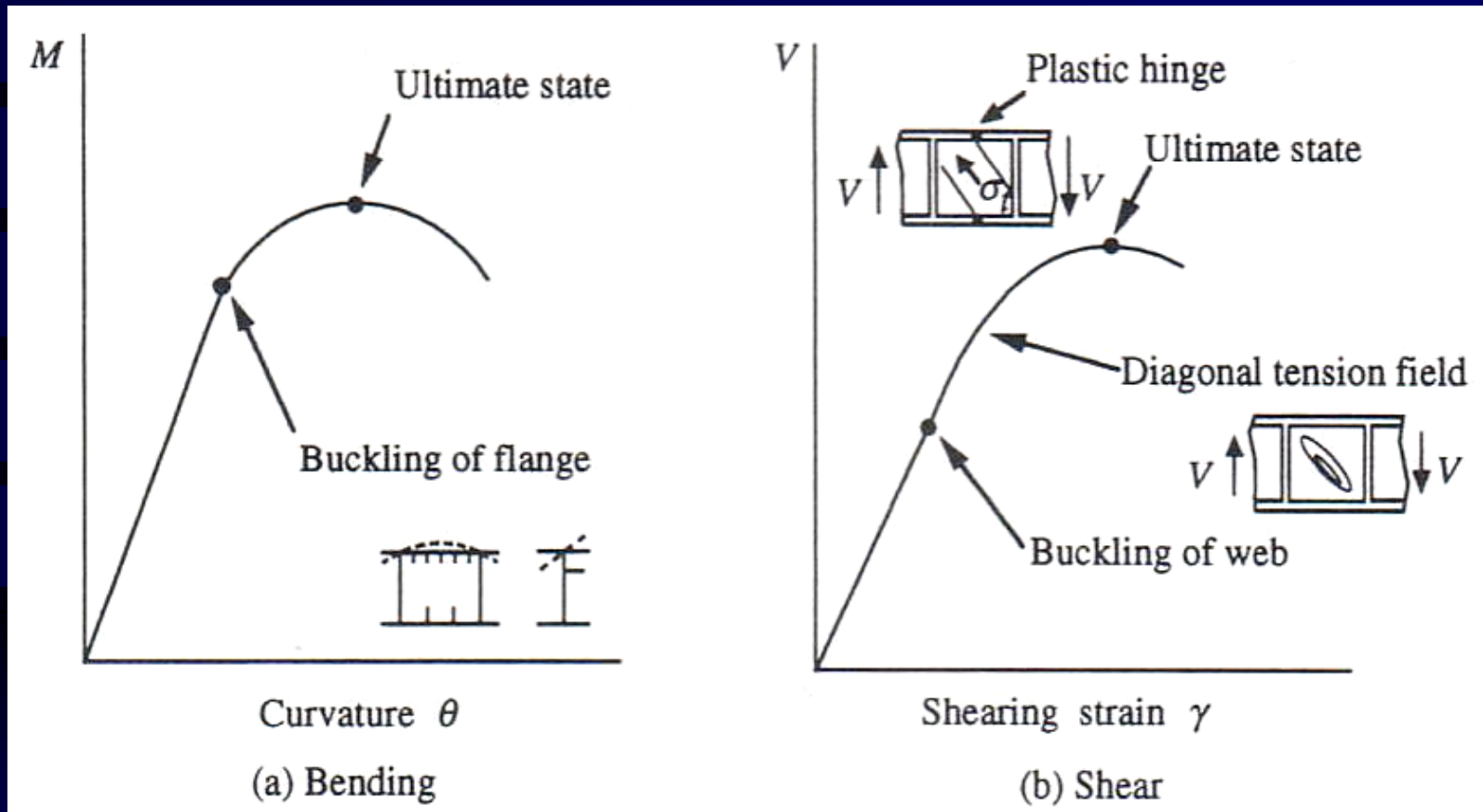


図-24 プレートガーダーの終局状態に至るまでの挙動¹¹⁾

(3) せん断を受けるプレートガーダーの3つの限界状態

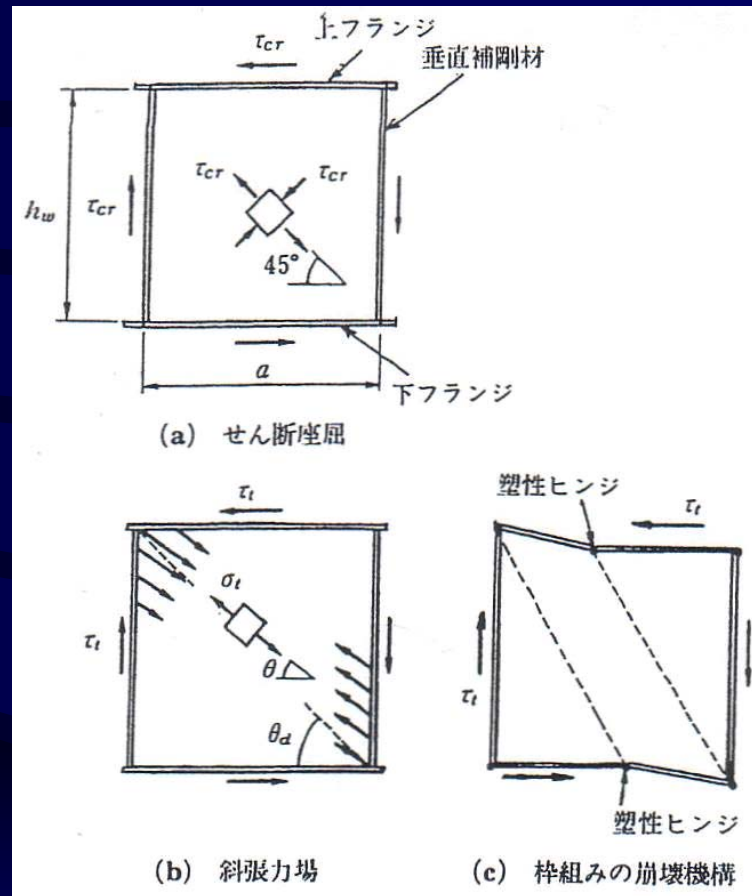


図-25 せん断力を受けるプレートガーダーの3つの限界状態²⁾

(4) 曲げとせん断とを受けるプレートガーダーの座屈耐荷力相関曲線

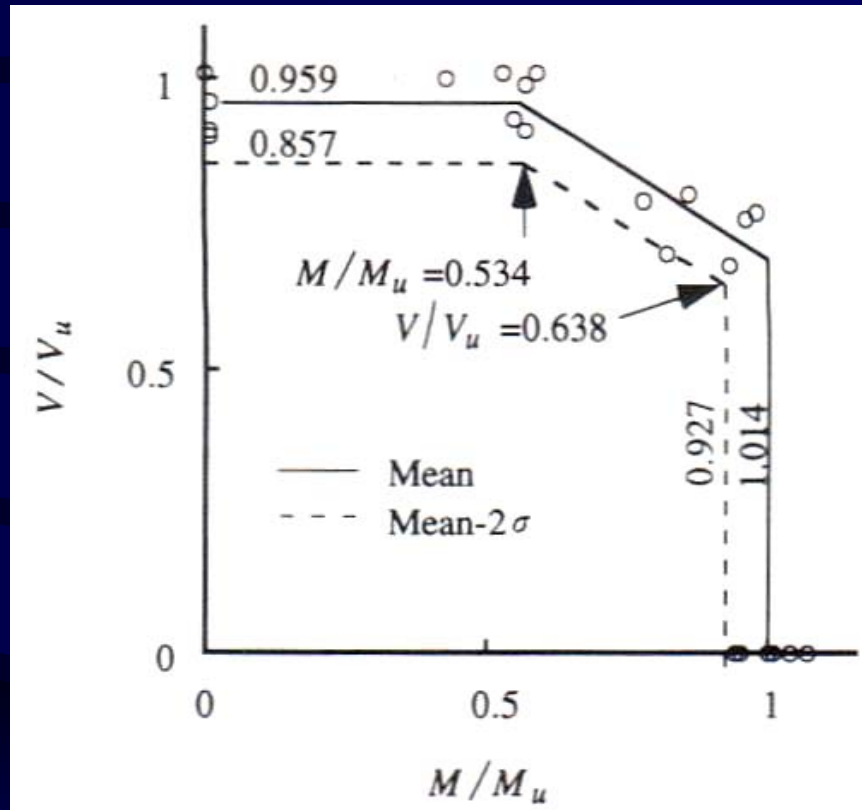


図-26 曲げとせん断とを受けるプレートガーダーの耐荷力相関曲線の例¹¹⁾

(5) 組合せ断面力を受ける補剛箱形断面の座屈耐荷力相関曲線

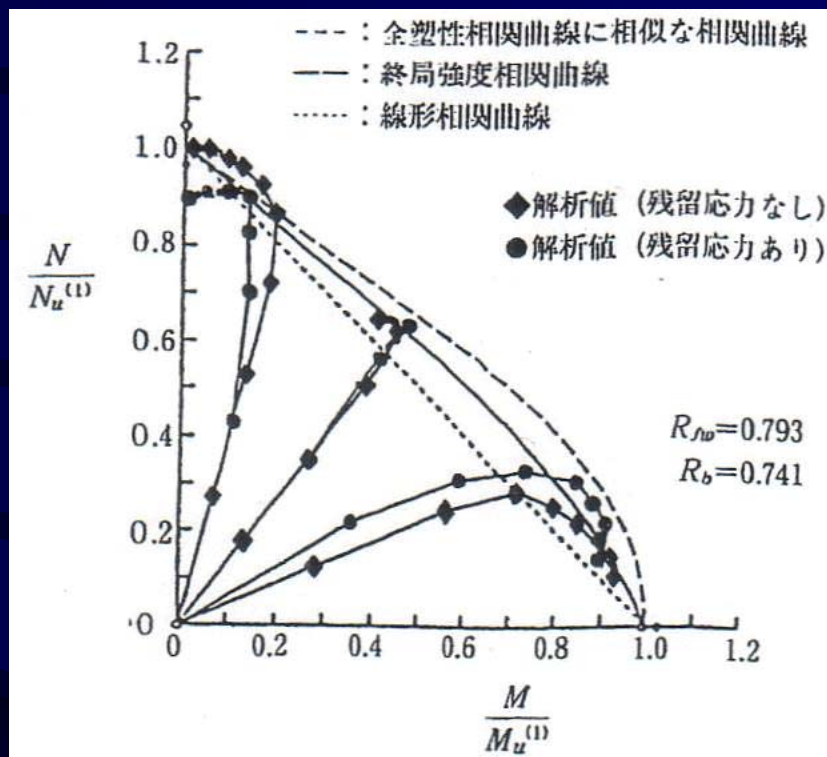


図-27 圧縮と曲げとを受ける無補剛箱形断面の座屈耐荷力相関曲線²⁾

(その他, 軸方向圧縮力, 2軸曲げモーメント, および, ねじりモーメントの組合せを受ける補剛箱形断面の座屈耐荷力相関曲線も誘導)

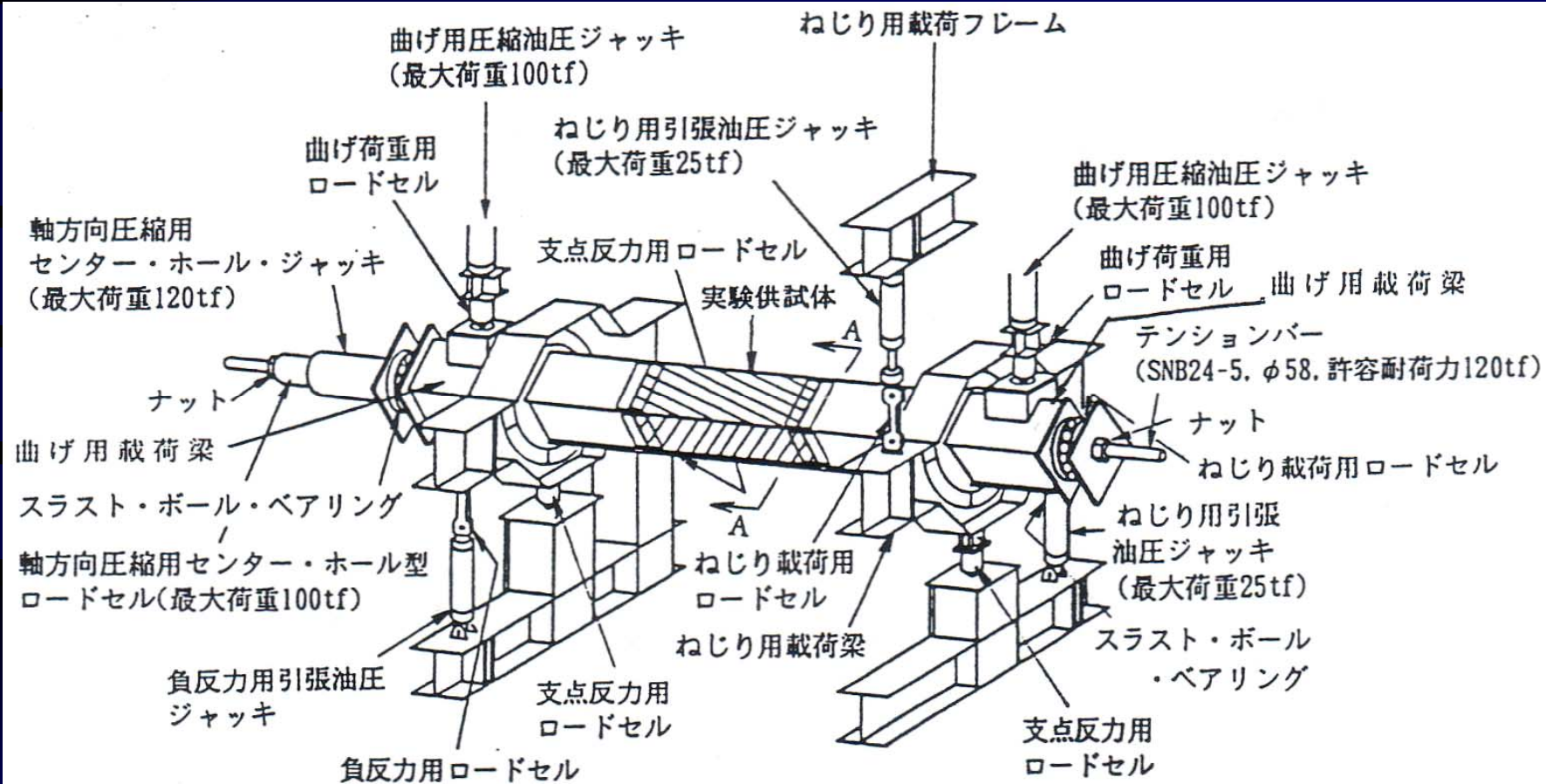


図-28 補剛箱形断面に圧縮, 曲げ, および, ねじりを同時に載荷する装置

8. シェルの座屈

円筒シェルの局部座屈

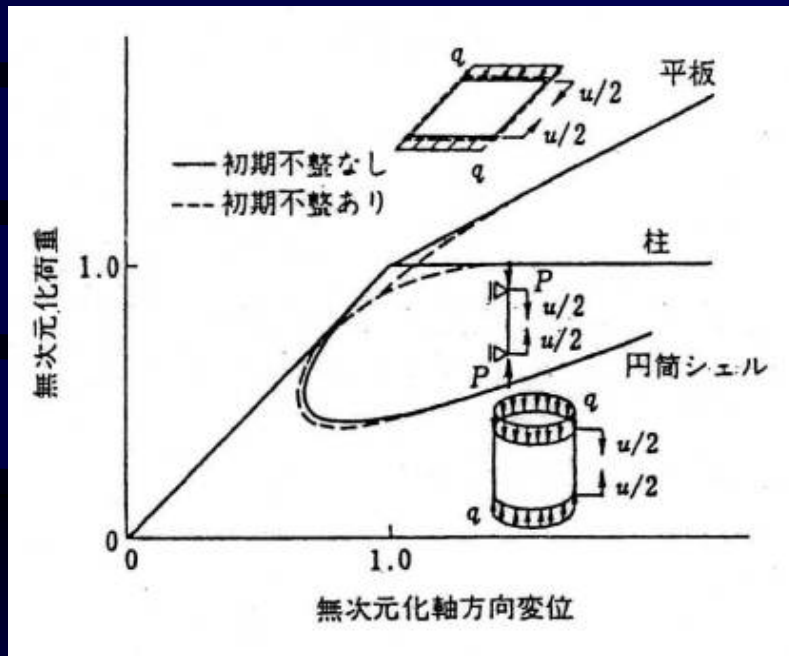


図-29 シェルおよびその他の構造の軸圧縮下における後座屈挙動の比較模式図

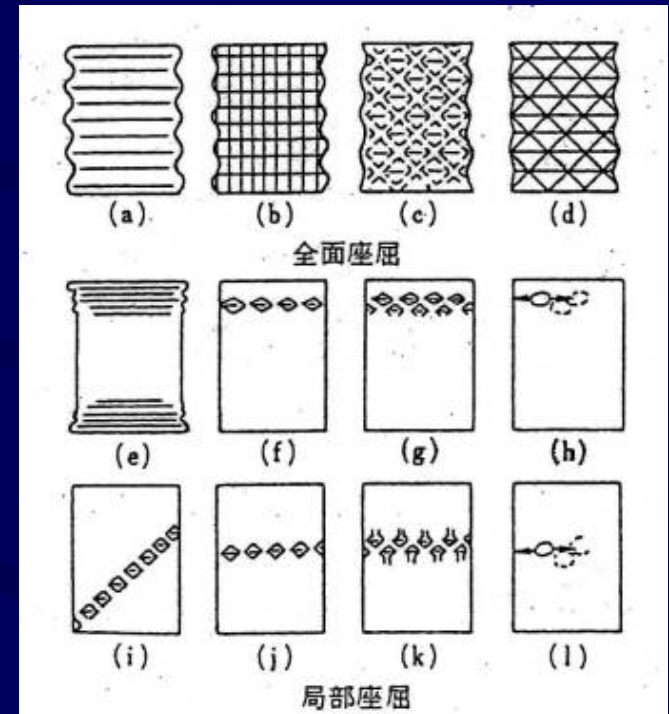


図-30 軸圧縮を受ける円筒シェルとしての座屈波形の種類

9. 柱と構成板パネルとの 連成座屈

(1) 連成座屈の説明

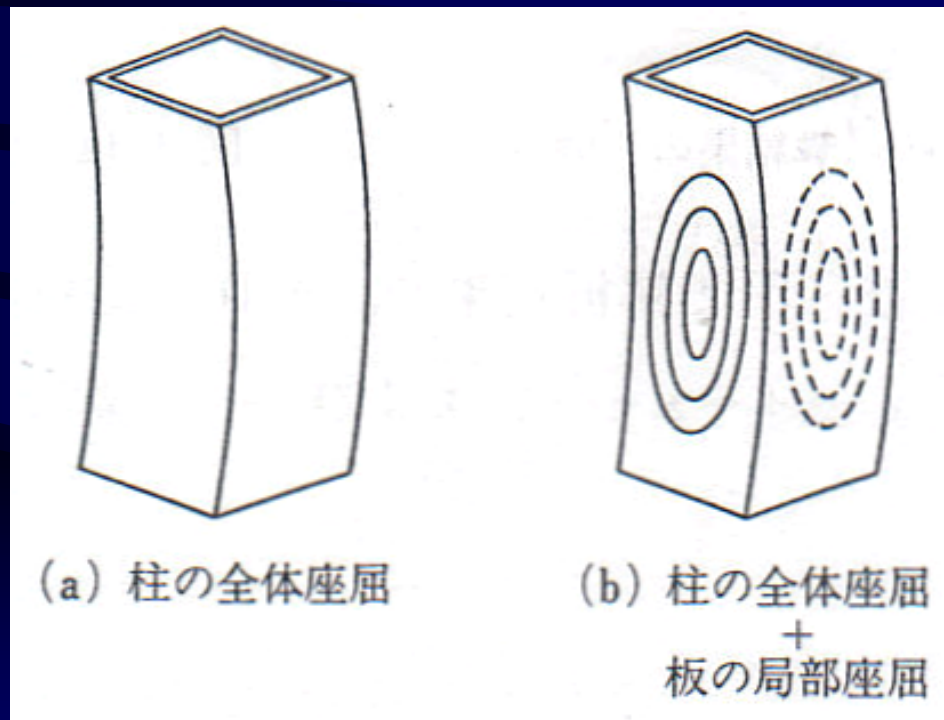


図-31 柱と構成板パネルとの連成座屈

(2) 連成座屈の解析例¹²⁾

- The deformation and plastic zone of two models at the ultimate (maximum load) state is illustrated in Figure 32, where the initial deflection as the whole beam-column and the initial deflection Mode 1 of the plate panels are considered in the analysis by the original USSP.

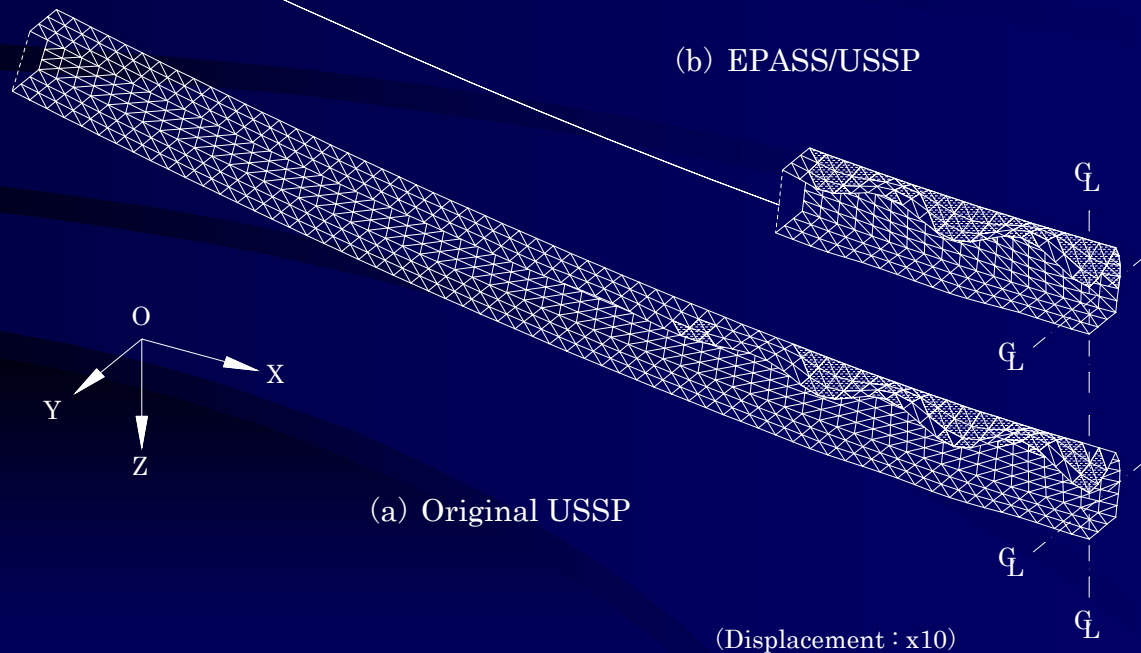


Figure 32 : Deformation and plastic zone of beam-columns at ultimate state

- Figure 33 shows the relationships between the axial force and deflection of the mid cross section of the beam-column. The ultimate strength evaluated by the original EPASS is higher than that by the original USSP because of neglecting the local buckling of the flange panel. But the behavior obtained by EPASS/USSP is similar to that obtained by the original USSP.

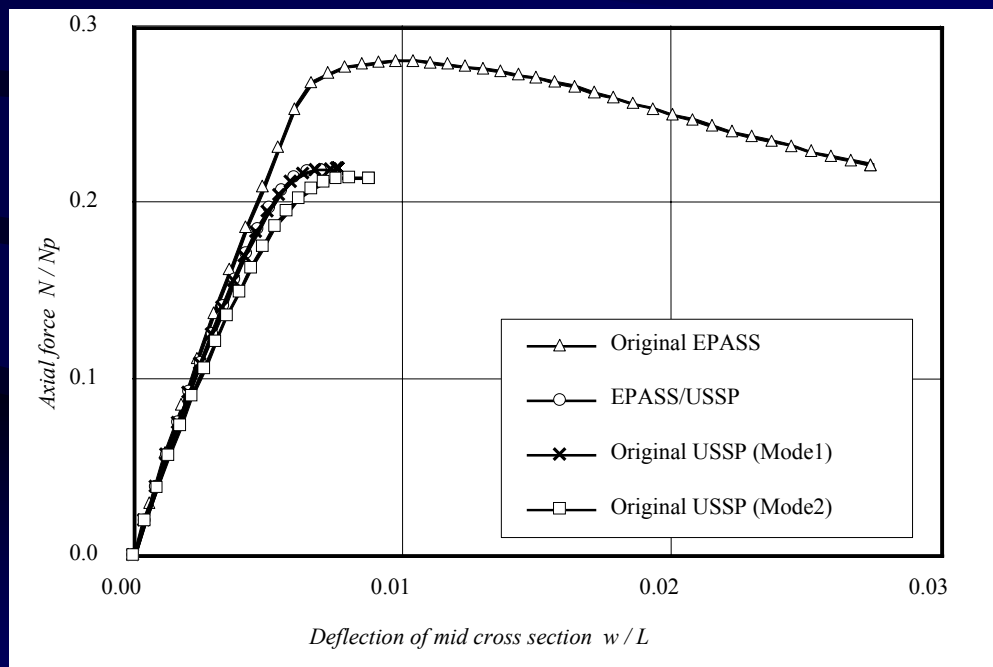


Figure 33 : Comparison among Original EPASS, Original USSP and EPASS/USSP

(3) 柱, 板, および連成座屈の区分

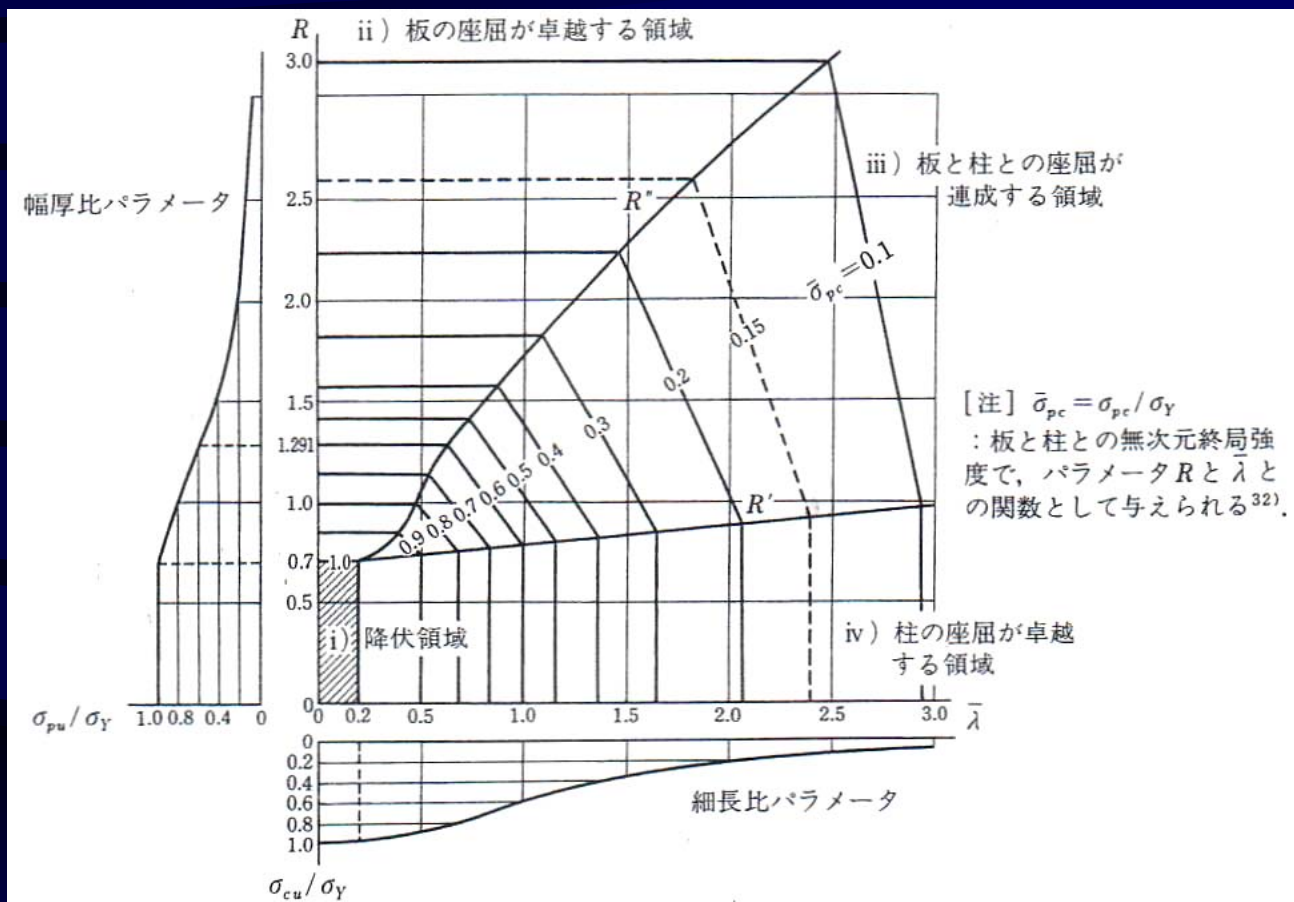


図-34 柱の全体座屈と板要素の局部座屈との連成座屈(DASt Ri012)¹⁾

(4) 連成座屈の評価法

i) 積公式(道路橋示方書の方法)

$$\sigma_{ciu} = \sigma_{ccu} \left(\frac{\sigma_{cpu}}{\sigma_Y} \right) \quad (24)$$

ここに,

σ_{ciu} : 連成を考慮した柱の終局強度

σ_{ccu} : 連成を無視した柱の終局強度

σ_{cpu} : 構成板パネルの終局強度

σ_Y : 降伏点

ii) Q ファクター法

$$\sigma_Y^* = Q \sigma_Y \quad (25)$$

$$Q = \frac{\sigma_{ccu}}{\sigma_Y} \quad (26)$$

この仮想の σ_Y^* を降伏点として, 連成を考慮しない柱の終局強度を求め, それを連成を考慮した柱の終局強度 σ_{ciu} とする.

10. 各種骨組構造の終局状態に至るまでの挙動

(1) 種々の終局限界状態

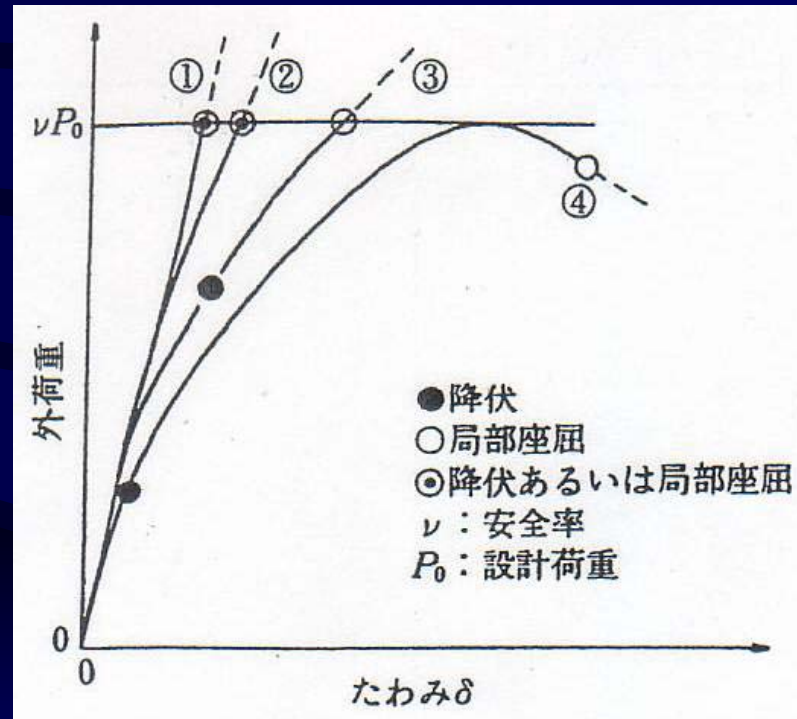


図-35 各種骨組構造物の終局状態に至るまでの挙動

11. 有効座屈長の概念

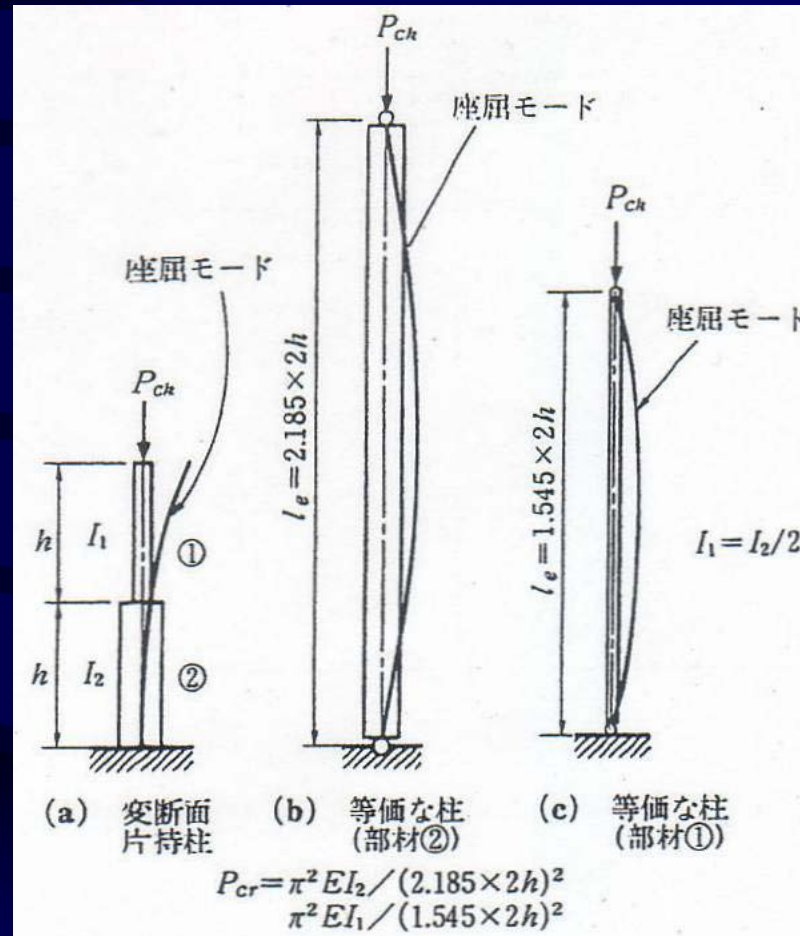


図-36 変断面片持柱の有効座屈長²⁾

12. 座屈に関する断面区分

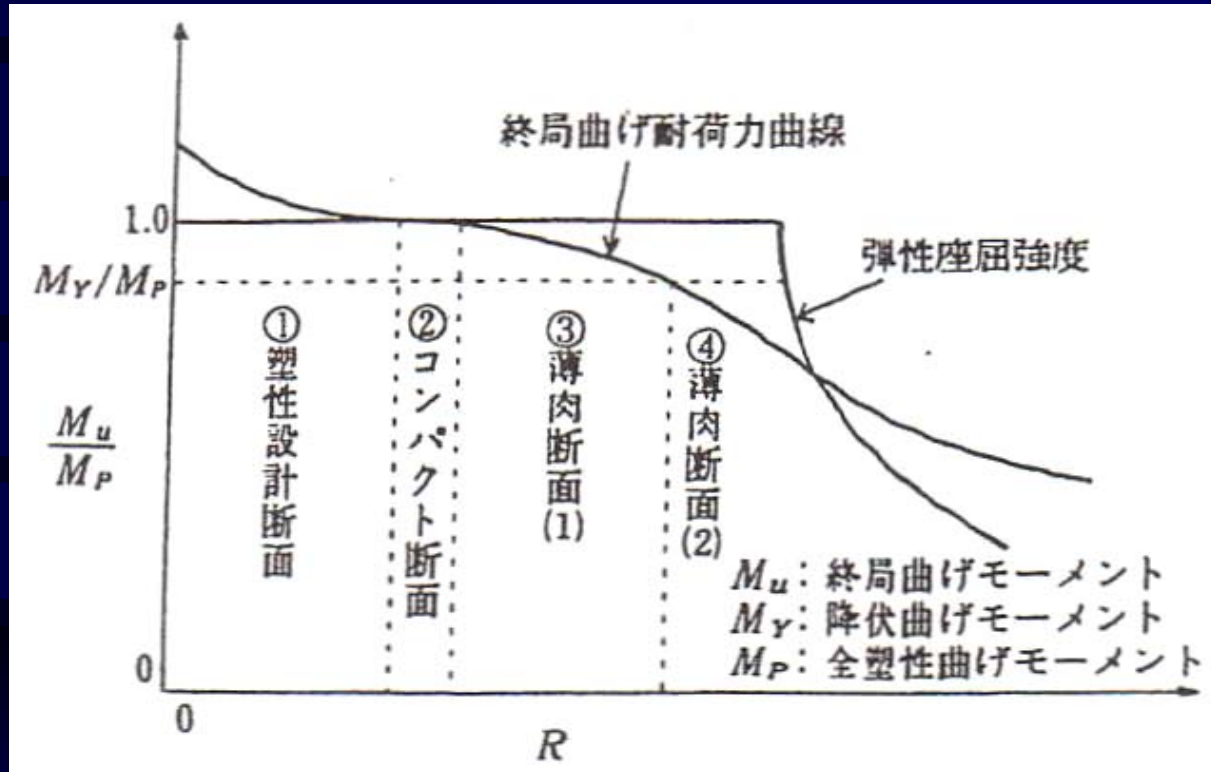
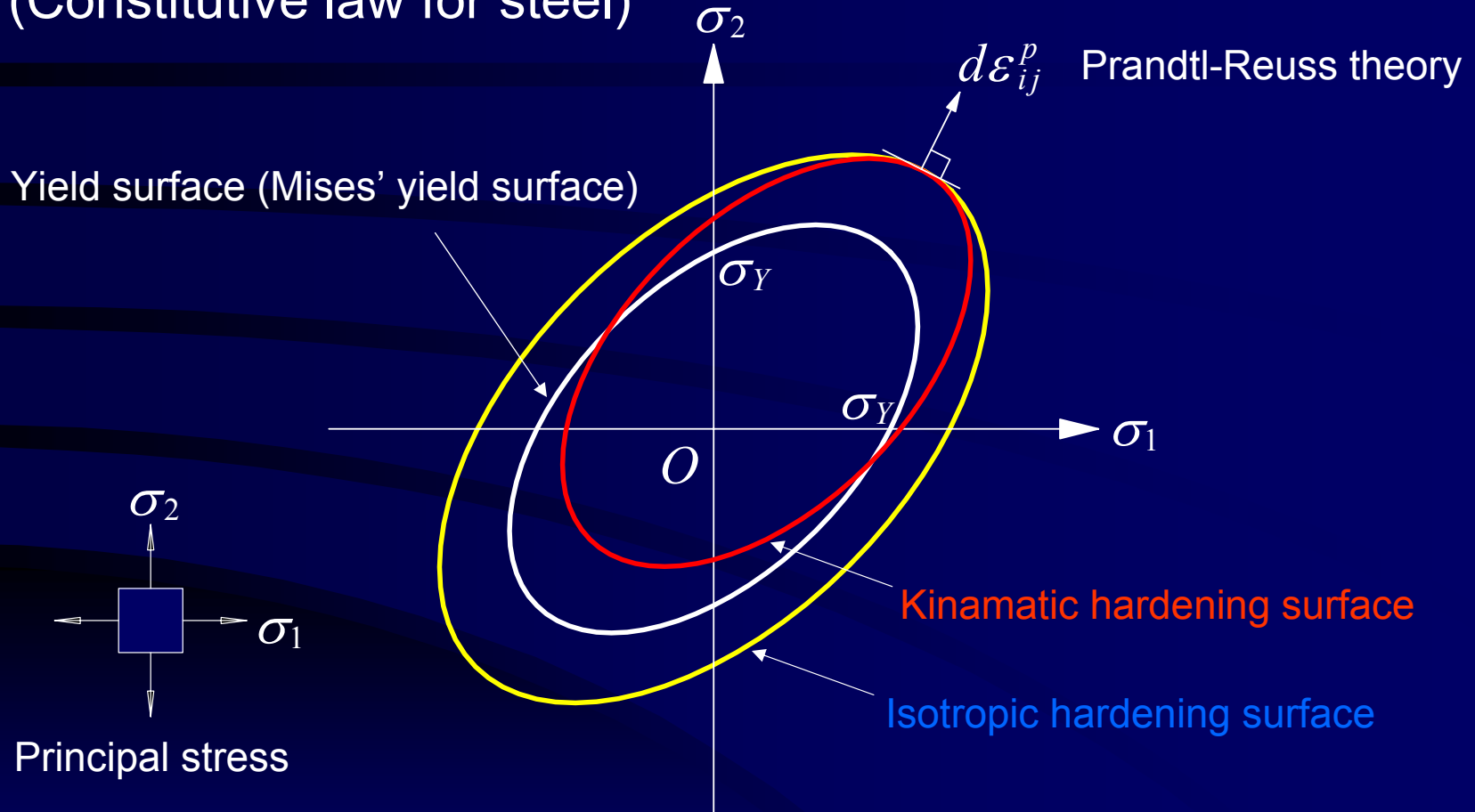


図-37 I形断面桁の断面区分と構成板要素の幅厚比パラメータ R

13. 鋼の弾塑性挙動 (図-38)

(Constitutive law for steel)

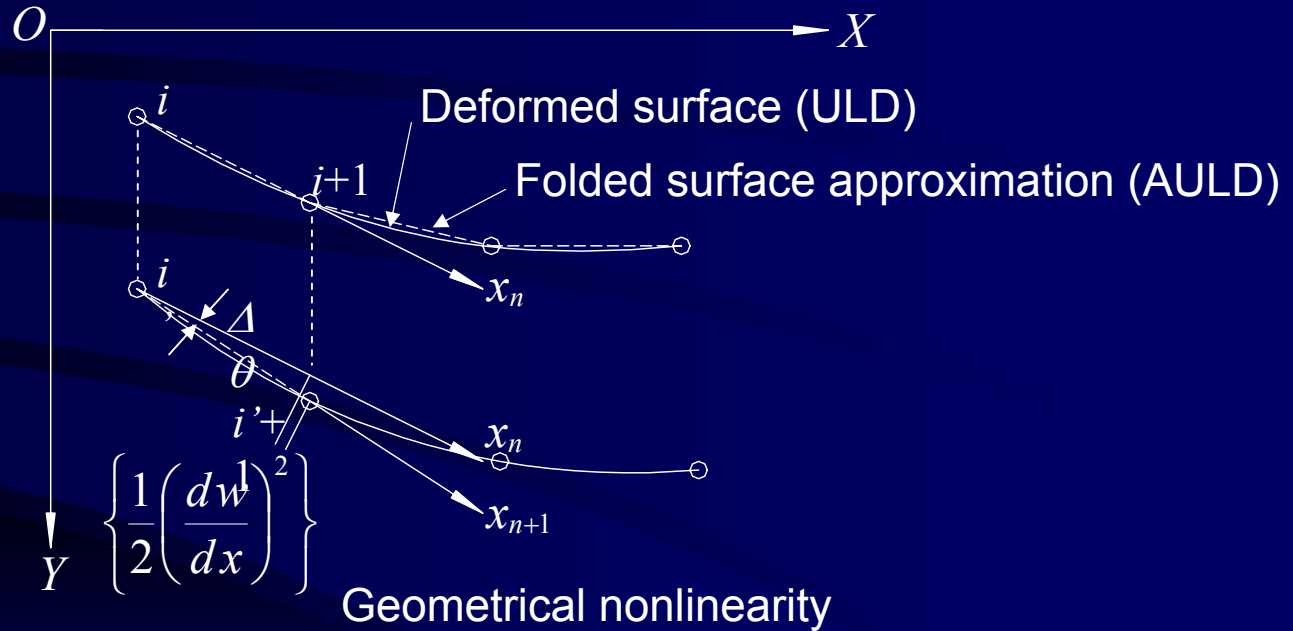


Isotropic hardening + Kinematic hardening = Combined hardening

14. 有限変位挙動

(1) 有限変位とは何か (図-39)

(Geometrical nonlinearity)



	EPASS	USSP
ULD	×	○
AULD	○	×
PULD	×	○
PAULD	○	○

AULD (Approximate Updated Lagrangian Description)

PULD (Partially Updated Lagrangian Description)

PAULD (Partial AULD)

(2) 有限変位挙動の種類

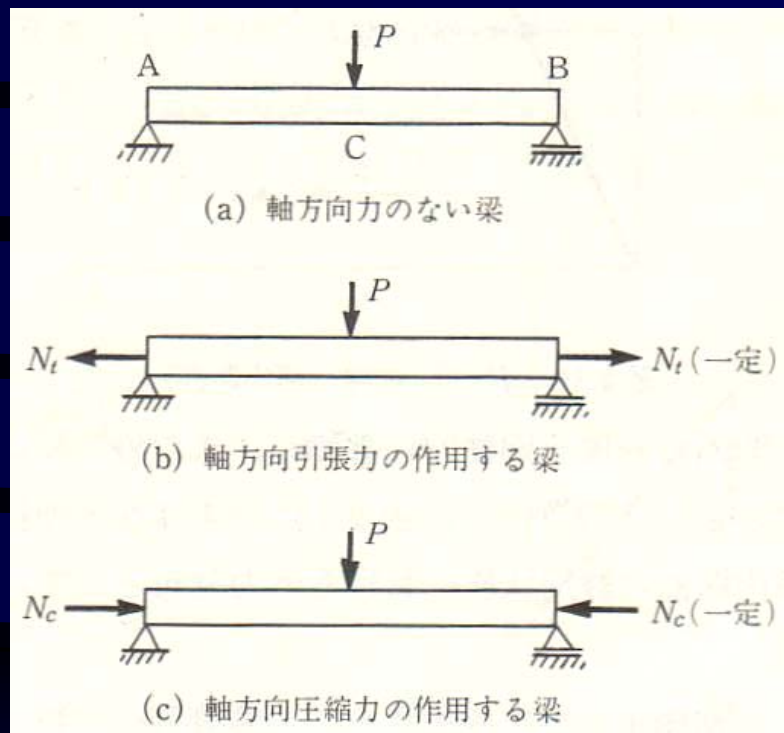


図-40 軸方向力の作用する梁¹⁰⁾

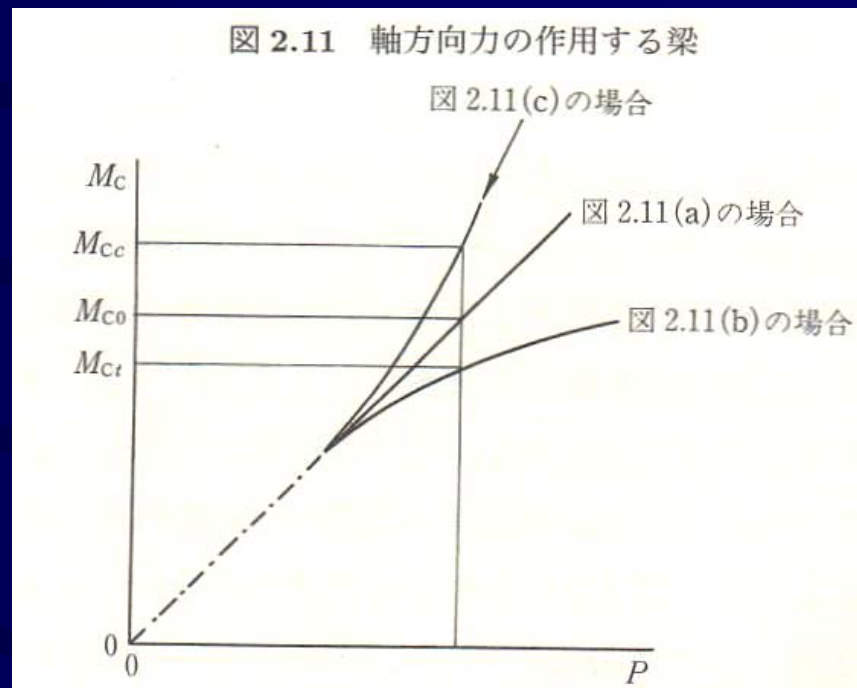
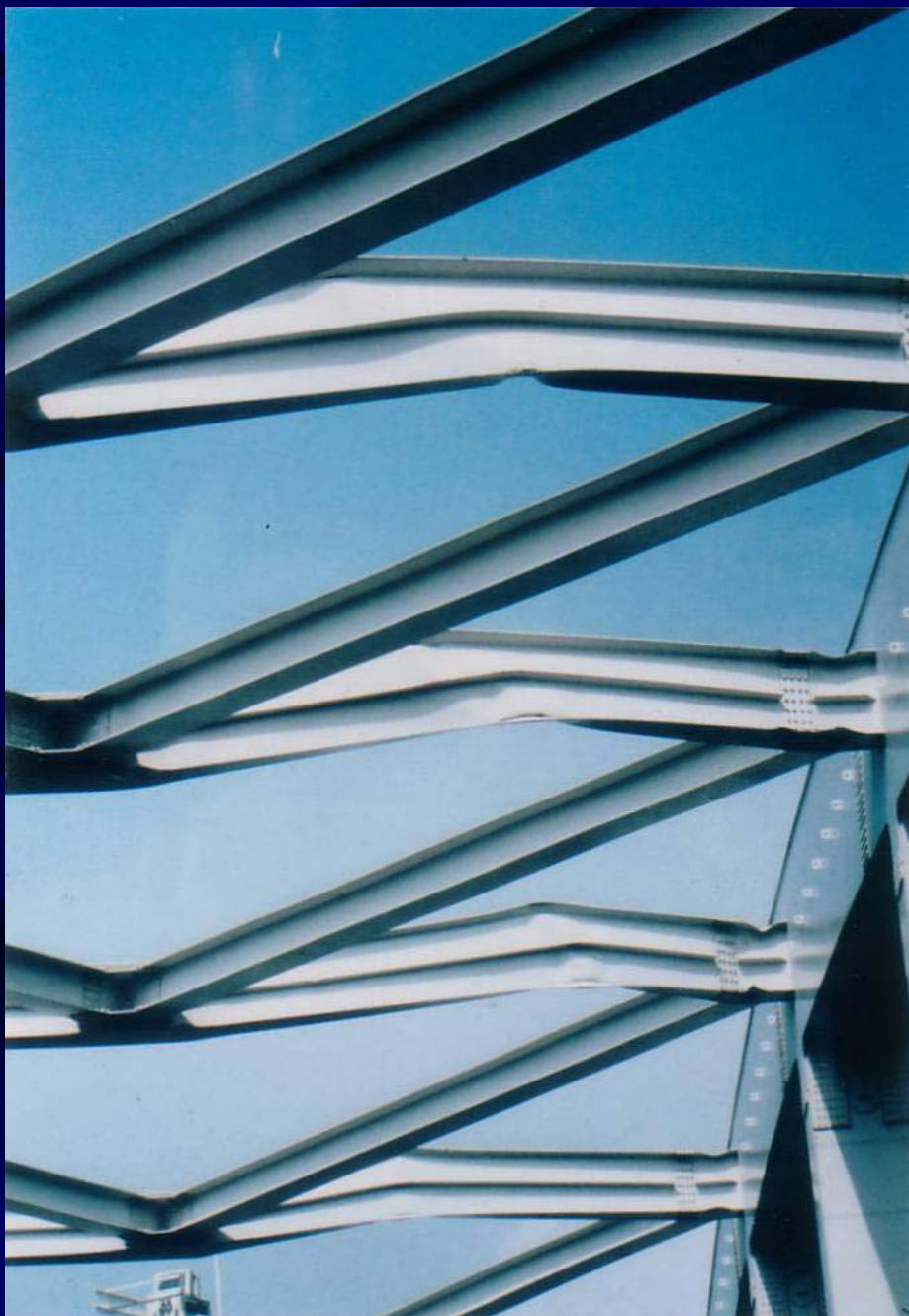
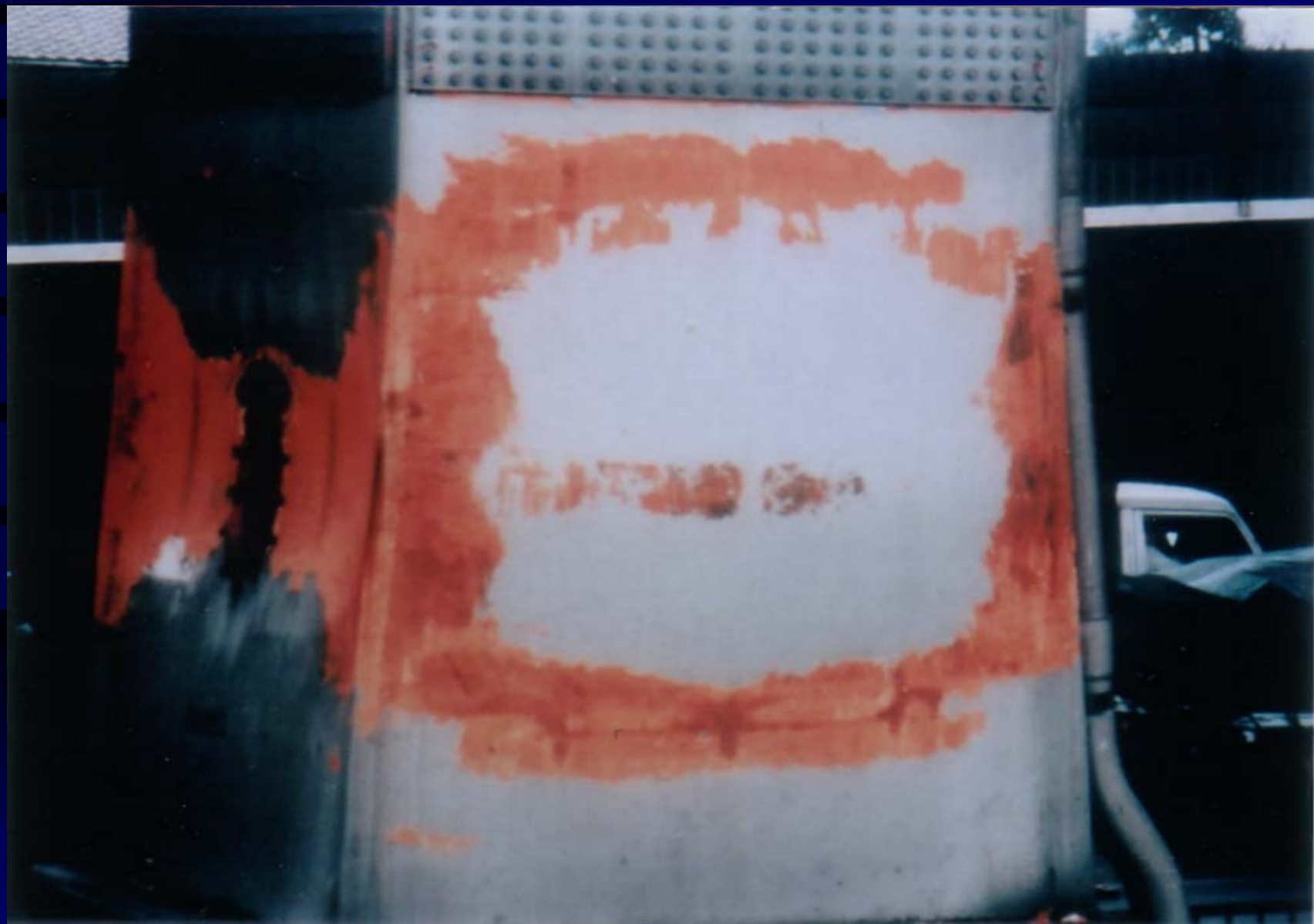


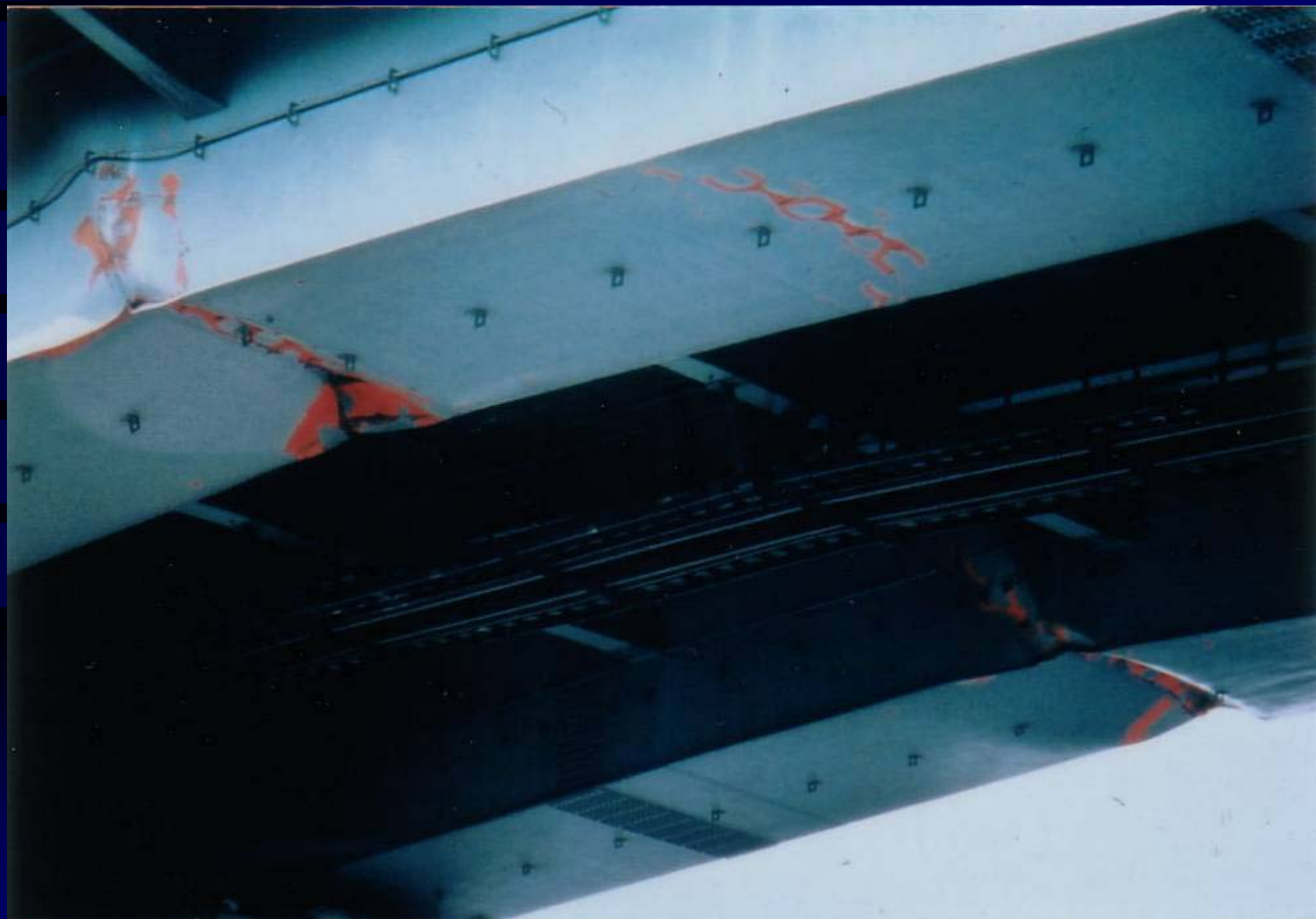
図-41 軸方向力が作用する梁の作用荷重 P と発生曲げモーメント M_c との関係¹⁰⁾

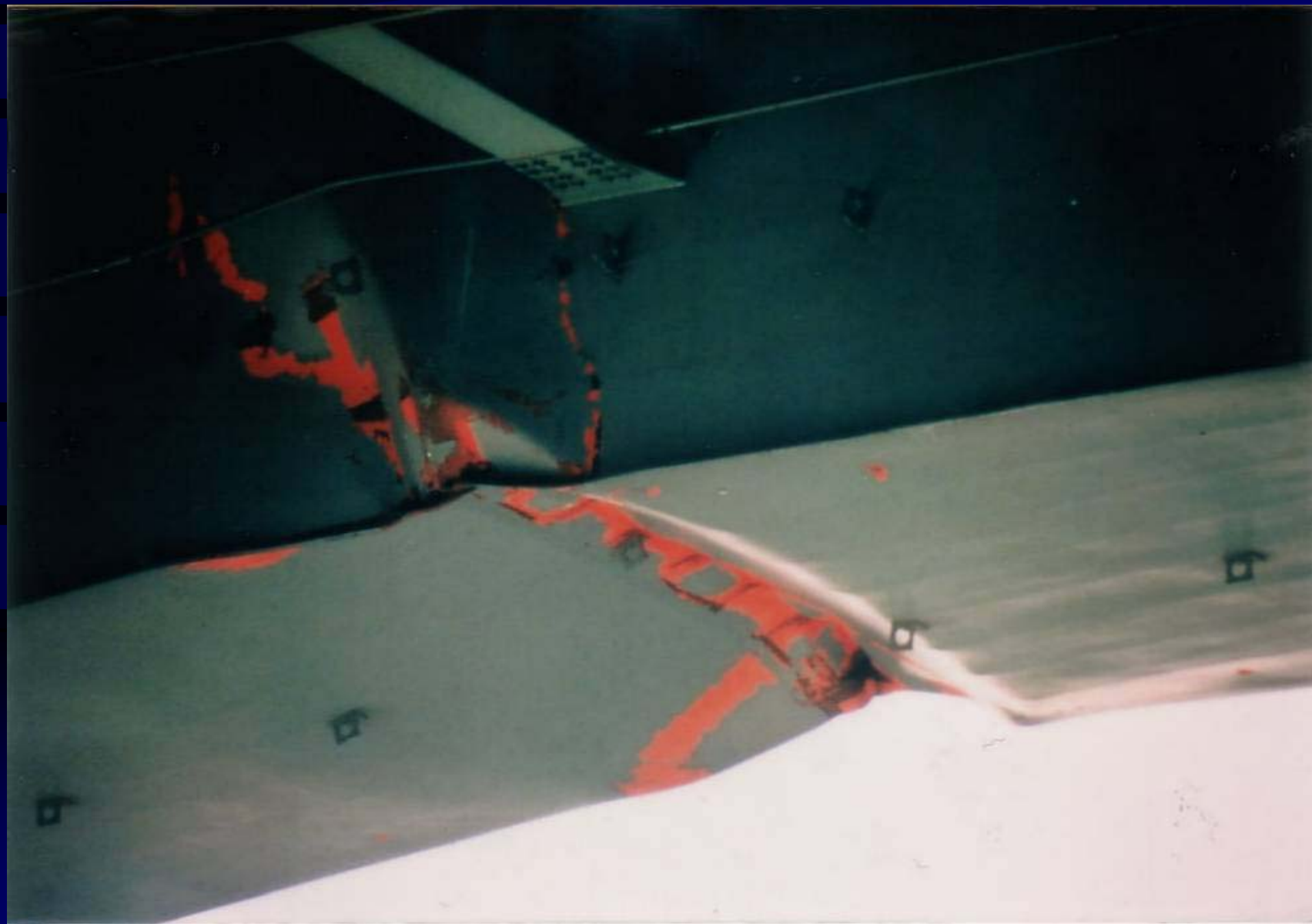
15. 兵庫県南部地震による 座屈損傷例(写真)

- (1) アーチ橋上横繫材の座屈
- (2) 補剛板の全体座屈
- (3) 箱桁の補剛圧縮フランジの全体座屈(2枚)
- (4) 補剛圧縮フランジの補剛材の局部座屈
- (5) 補剛板の補剛材間の板パネルの局部座屈
- (6) ラーメン橋脚横梁腹板のせん断座屈(2枚)
- (7) 円形断面橋脚の局部座屈(2枚)
- (8) プレートガーダー腹板のクリップリング座屈
- (9) 鋼橋脚上端のクリップリング座屈





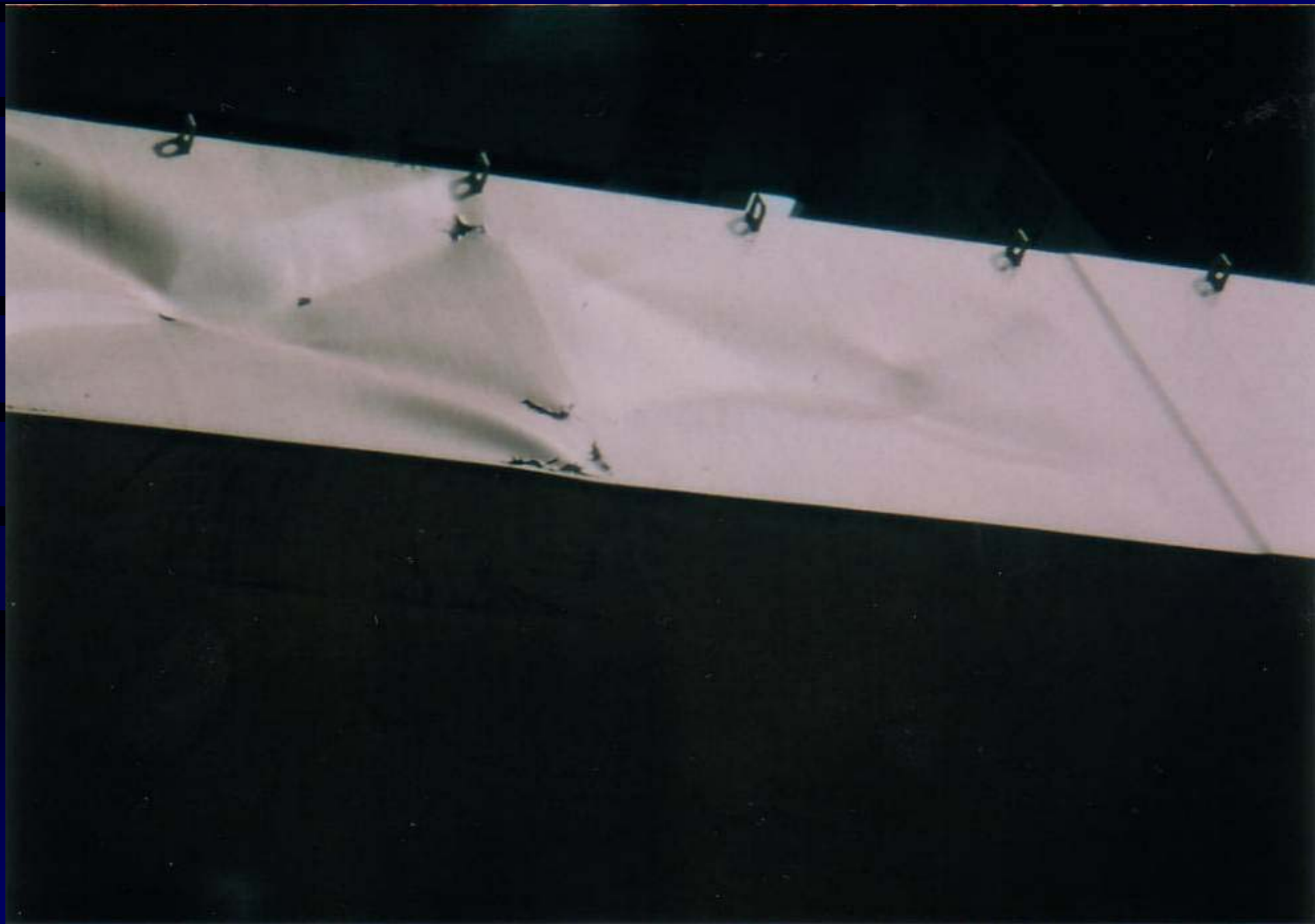




















16. 座屈理論の歴史と事故

- 1752(柱) Leonard Eulerの座屈公式
- 1845(板) ブリタニヤ橋の建設(箱桁橋、ロバート・スチーブンソン、板の座屈の認識)
- 1889(柱) Engesserの接線係数理論($E \rightarrow E_t$ 、実験値とよく合う)
- 1891(柱) Bryanによる板の座屈応力(エネルギー法による)
- 1895(柱) Engesserの等価係数理論($E \rightarrow E_r$)
- 1904(板) Wagnerによる自由突出板のねじり座屈の微分方程式と解
- 1910(板) von Karmanの有限変位を考慮した板の微分方程式(座屈の微分方程式はSaint-Venantによる)
- 1914(板) Timoshenkoの等価係数理論($E \rightarrow E_r$)
- 1917(柱) ケベック橋完成(カナダ, ゲルバートラス, 549m, 中央スパンの2回の落橋事故, 写真2枚)
- 1924(板) Bleichの接線係数理論($E \rightarrow E_t$)

- 1925頃 多次元応力状態における塑性理論の発達
- ・Hencky・Nadaiの塑性変形理論
 - ・Prandtl・Reussの塑性流れ理論
- 1932(板) von Karmanによる板座屈の有効幅
- 1942(板) Levyの解(その後、Coan(初期たわみ考慮)、八巻(種々の境界条件)の解など)
- 1947(板) Ilyushinの塑性変形理論に基づく等価係数理論
- 1947(板) Handelman・Pragerの塑性流れ理論に基づく等価係数理論
- 1947(柱) Schanleyの論文(Schanleyモデル)(接線係数理論か等価係数理論かという問題の解決)
- 1948(板) Stowellの塑性変形理論に基づく接線係数理論
- 1949(板) Bijlaardの塑性変形理論に基づく接線係数理論
- 1950(板) Pearsonの塑性流れ理論に基づく接線係数理論
- 1953 DIN4114
- 1953(板) Onat・Druckerによる自由突出板のねじり座屈に初期たわみを考慮
- 1955(板) 山本の板のSchanleyモデル(初期たわみの重要性)
- 1969(板) 上田・Tallの残留応力の考慮

(プレーガーダーの軽量化の研究が活発)

(プレートガーダー腹板の研究が活発)

1968(柱) Schulzの耐荷力曲線(道路橋示方書の柱の耐荷力曲線の原点)

1969(板) New Danube橋の落橋(11月、オーストリア、写真2枚)

1970(板) Milford Haven橋の落橋(6月、イギリス、3人死亡)

1970(板) West Gate橋の落橋(10月、オーストラリア、35人死亡)

1970(板) Skaloudの補剛板の弾塑性有限変位解析(Skaloudの仮定、柱ではPerry・Robertson公式として有名)

1971(板) Massonnet・Maquoiの補剛板の直交異方性理論による解析

1971(柱) Koblenz橋の落橋(11月、ドイツ、13人死亡、写真1枚)

(圧縮補剛板の研究が活発)

(固有値問題としての座屈理論が使われなくなり、初期たわみと残留応力とを考慮する弾塑性有限変位解析が主流となる)

(コンピュータの普及につれて有限要素法が汎用化され始める)

1972(板) 岡村・吉田による板の弾塑性有限変位解析(選点法)

1975(板) 小松・北田・宮崎による板の弾塑性有限変位解析(有限要素法)

1976(板) 上田・安川・矢尾・池上・大南による板の弾塑性有限変位解析(有限要素法)

(コスト縮減から厚肉少補剛断面が採用され始める)

(コスト縮減から、道路橋示方書の適用範囲外の補剛板の研究と採用)

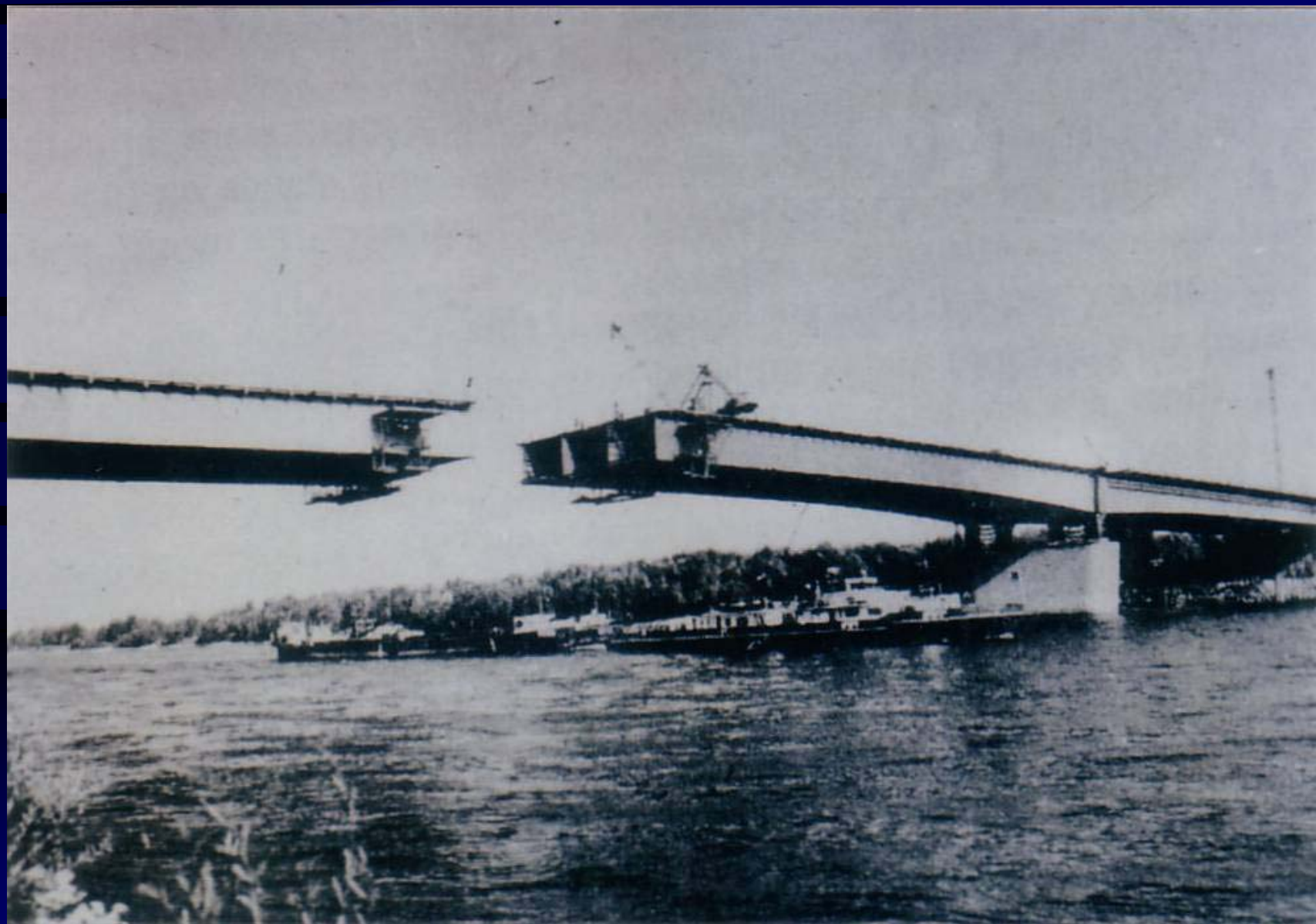
1995 兵庫県南部地震

(薄肉補剛断面部材の変形性能が重要となり、塑性領域、あるいは後座屈領域の繰返し載荷の解析が必要となる。そのための構成則として、宇佐美、水野、西村、および後藤らのモデルが作成された)

以上



ケベック橋の落橋事故の写真



新ドナウ橋の落橋事故の写真

コンプレントツ橋の落橋事故の写真

17. まとめ

この講座の資料では、鋼構造の座屈、特に、座屈現象および座屈設計の基礎と考えられる事柄を取りまとめた。これらの点をすべて与えられた時間(90分間)で十分に説明できるとは考えていない。しかし、ご参加の皆様が、時間の関係で理解できないところがあっても、このようなこともあるのだと心のどこかに留めておいていただきたい。そうすれば、何か機会があるごとに、この資料を見ていただくとともに、最後に示している参考書および参考文献のリストの中から適切なものを選んで読んで勉強していただくことができます。そのようにしていただきたい。

なお、座屈の基礎として入れるべきであるが、講演時間の関係で入れられなかった事項として、以下の点がある。

- (1) 塑性崩壊機構(全塑性状態に達して後の強度低下挙動)
- (2) 初期たわみが座屈耐荷力に及ぼす感度則(より一般的には、種々のパラメータによる座屈耐荷力のレスポンス曲面)
- (3) 地震荷重下、すなわち繰返し荷重を受ける構造物、部材、および要素の座屈耐荷力と変形性能
- (4) 座屈強度(固有値問題)および座屈耐荷力の解析方法と解析プログラム
- (5) 座屈実験法とノウハウ

最後に、この私の講演が参加者各位にとって、座屈に興味を持っていただき、座屈について勉強を始めるきっかけになれば、24歳から36年間も座屈の分野で研究を行ってきた私にとっては最大の喜びとなります。

参考書および参考文献

- 1) 関西道路研究会・道路橋調査研究委員会編:コンピュータによる鋼橋の終局強度解析と座屈設計, 共立出版(株), 1998.2
- 2) 北田俊行, 大南亮一:4.1座屈設計, 日本鋼構造協会編, 鋼構造技術総覧[土木編], pp.87-96, 1998.5
- 3) Timoshenko, S.P. and Gere, J.M. :Theory of elastic stability, 2nd edition, McGROW-HILL, Kougakusha C. Ltd, 1961
- 4) Bleich, F. :Buckling strength of metal structures, McGROW-HILL, 1952
- 5) 長柱委員会:弾性安定要覧, コロナ社, 1951
- 6) Column Research Committee of Japan (Edited by) :Handbook of structural stability, Corona Publishing Co. Ltd, 1987
- 7) 座屈設計ガイドライン, 鋼構造シリーズ2, 土木学会, 1987
- 8) 座屈設計ガイドライン, 改訂第2版[2005年版], 鋼構造シリーズ12, 土木学会, 2005
- 9) 鋼構造物の安全性の調査報告, 阪神大震災における鋼構造物の被害報告と今後の耐震設計について, 土木学会鋼構造委員会・鋼構造新技術小委員会, (社)鋼材倶楽部, 1995.5
- 10) 中井 博, 北田俊行:橋梁工学(上), 森北出版(株), 1999.9
- 11) Fukumoto, Y.(Edited by) :Structural stability design, Pergamon, 1997
- 12) Kitada, T., Matsumura, M., An, Y.R. and Yamano, T. :Advanced static-dynamic, elasto-plastic and finite displacement analysis of steel and composite spatial structures, Proceedings of International Symposium on Advances in Steel and Composite Structures, pp.58-81, Hong Kong Polytechnic University, 2005.12