

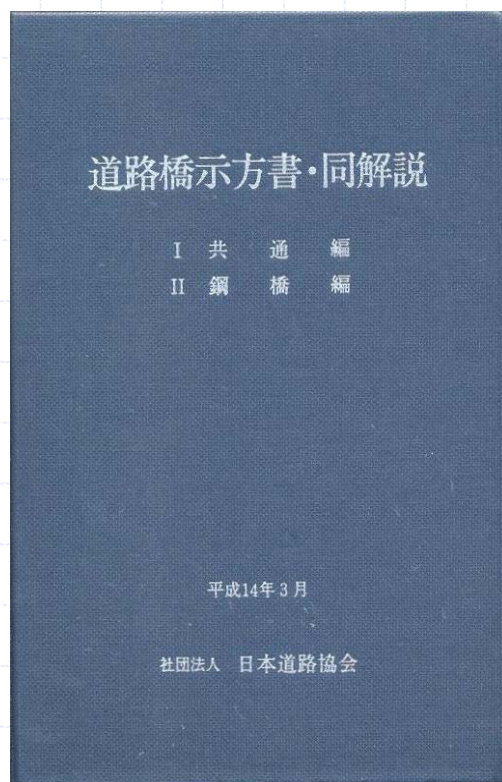
道路橋示方書 と座屈設計事項

首都大学東京 野上邦栄

目次

1. 道路橋示方書の変遷
2. 圧縮部材
3. 曲げ部材
4. 軸力と曲げを受ける部材
5. 鋼げた

1. 道路橋示方書の変遷



- 1886年 国県道の築造標準(内務省令)
- 1909年 道路構造令および街路構造令(内務省令)
- 1926年 道路構造令に関する細則案(内務省土木局)
- 1939年 鋼道路橋設計示方書案(内務省土木局)
- 1956年 鋼道路橋設計示方書(建設省道路局長)
- 1964年 鋼道路橋設計示方書
- 1965年 合成ゲタ設計施工指針
- 1966年 鋼道路橋高力ボルト摩擦接合設計施工指針
- 1972年 鋼道路橋設計示方書(統合)
- 1972年～ 道路橋示方書 I 共通編、II 鋼橋編、
1980年 III コンクリート橋編、
IV 下部構造編、V 耐震設計編

1993年 道路橋示方書

- A,B活荷重

1994年 道路橋示方書

- ケーブル安全率

1996年 道路橋示方書

- 兵庫県南部地震、適用板厚100mm

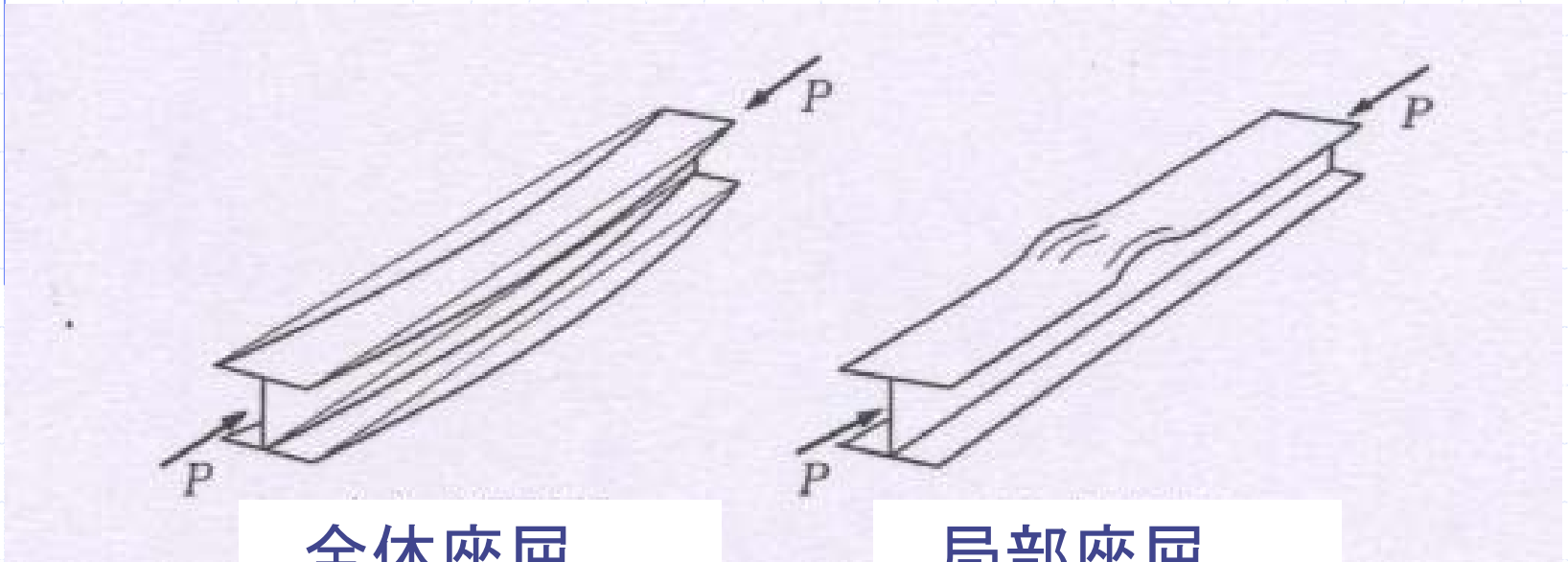
2002年 道路橋示方書

- 疲労、耐久性、設計の合理化(耐震設計など)
- 性能規定化(第一段階)
 - 要求事項の明確化, みなし仕様化など

2004年 道路橋示方書の改訂作業開始

- 性能規定化(第二段階)
 - 要求性能のさらなる具体化、みなし仕様の充実
 - 部分係数法の導入

2. 圧縮部材



全体座屈

局部座屈

2.1 全体座屈への対処

$$\sigma = \frac{P}{A_g} \leq \sigma_{cag} = \frac{\sigma_{cr}}{\gamma}$$

A_g 総断面積 σ_{cag} 局部座屈を考慮しない許容軸方向圧縮応力度

γ 安全率 σ_{cr} 全体座屈に対する基準耐荷応力度

$$\frac{\sigma_{cr}}{\sigma_y} = 1.0 \quad \lambda \leq 0.2$$

$$\frac{\sigma_{cr}}{\sigma_y} = 1.109 - 0.545\lambda \quad 0.2 < \lambda \leq 1.0$$

$$\frac{\sigma_{cr}}{\sigma_y} = \frac{1.0}{(0.773 + \lambda^2)} \quad 1.0 < \lambda$$

$$\lambda = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}} \cdot \frac{l}{r}$$

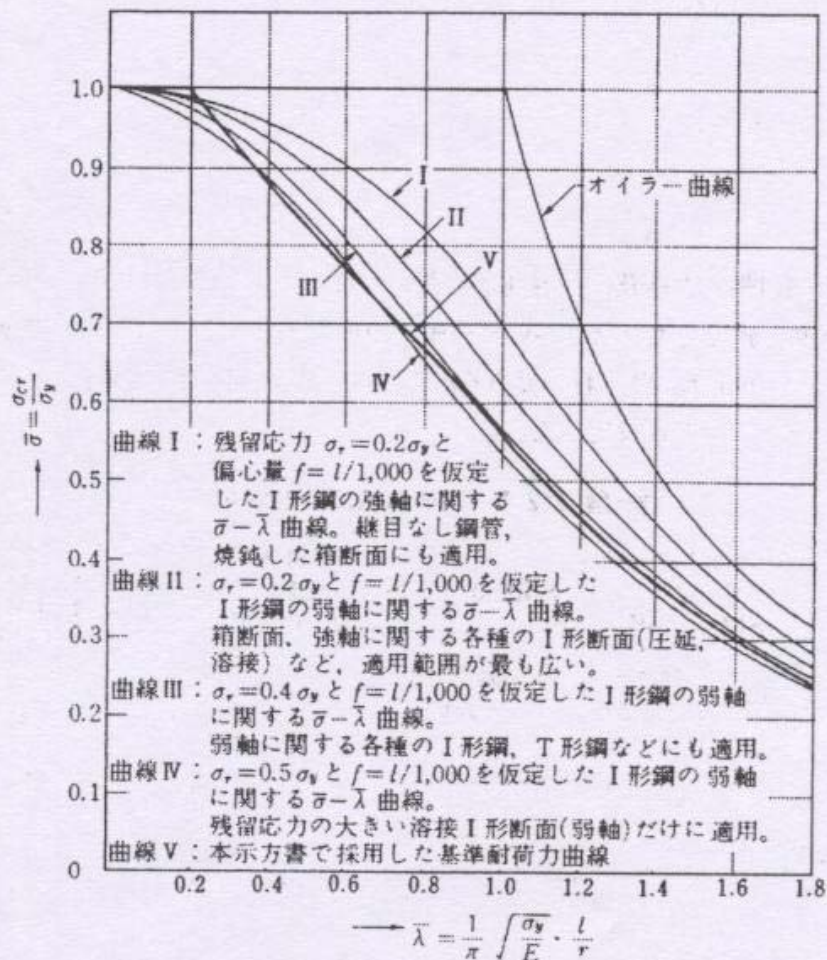


図-解 3.2.1 耐荷力曲線

$$\frac{\sigma_{cr}}{\sigma_Y} = 1.109 - 0.545\lambda \quad 0.2 < \lambda \leq 1.0$$

$$\sigma_{cag} = \frac{1.0\sigma_Y}{\gamma} + \frac{0.109\sigma_Y}{\gamma} - \frac{0.545\sigma_Y}{\gamma} \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\sigma_Y}{E} \frac{\lambda}{r}}$$

$$= 140 - 0.82 \left(\frac{\lambda}{r} - 18 \right) \quad 18 < \frac{\lambda}{r} \leq 92$$

有効座屈長

表-3.2.2 局部座屈を考慮しない許容軸方向圧縮応力度 (N/mm²)

鋼種 板厚 (mm)	SS400 SM400 SMA400W	SM490	SM490Y SM520 SMA490W	SM570 SMA570W
40 以下	$140: \frac{l}{r} \leq 18$ $140 - 0.82 \left(\frac{l}{r} - 18 \right):$ $18 < \frac{l}{r} \leq 92$ $\frac{1,200,000}{6,700 + \left(\frac{l}{r} \right)^2};$ $92 < \frac{l}{r}$	$185: \frac{l}{r} \leq 16$ $185 - 1.2 \left(\frac{l}{r} - 16 \right):$ $16 < \frac{l}{r} \leq 79$ $\frac{1,200,000}{5,000 + \left(\frac{l}{r} \right)^2};$ $79 < \frac{l}{r}$	$210: \frac{l}{r} \leq 15$ $210 - 1.5 \left(\frac{l}{r} - 15 \right):$ $15 < \frac{l}{r} \leq 75$ $\frac{1,200,000}{4,400 + \left(\frac{l}{r} \right)^2};$ $75 < \frac{l}{r}$	$255: \frac{l}{r} \leq 18$ $255 - 2.1 \left(\frac{l}{r} - 18 \right):$ $18 < \frac{l}{r} \leq 67$ $\frac{1,200,000}{3,500 + \left(\frac{l}{r} \right)^2};$ $67 < \frac{l}{r}$
40 をこえ 75 以下	$125: \frac{l}{r} \leq 19$	$175: \frac{l}{r} \leq 16$	$195: \frac{l}{r} \leq 15$ $195 - 1.3 \left(\frac{l}{r} - 15 \right):$ $15 < \frac{l}{r} \leq 77$ $\frac{1,200,000}{4,700 + \left(\frac{l}{r} \right)^2};$	$245: \frac{l}{r} \leq 17$ $245 - 2.0 \left(\frac{l}{r} - 17 \right):$ $17 < \frac{l}{r} \leq 69$ $\frac{1,200,000}{3,600 + \left(\frac{l}{r} \right)^2};$

有効座屈長

◆ トラス構造

■ 面内への座屈

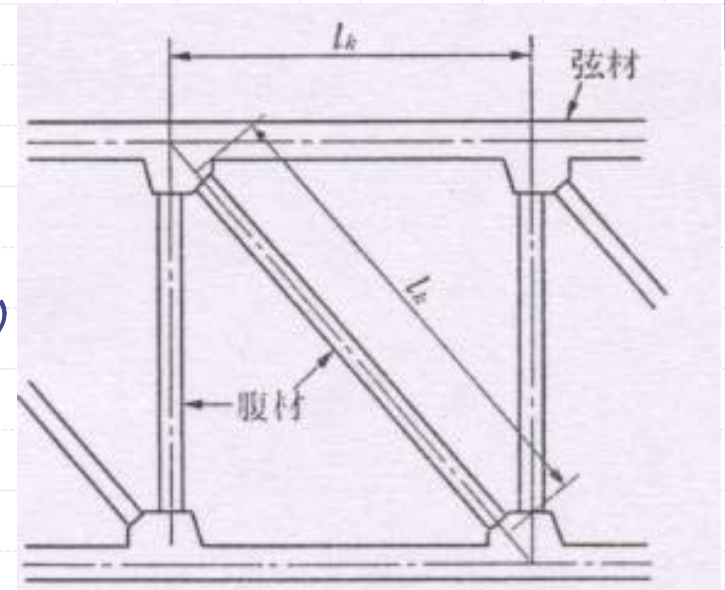
- ◆ 弦材…部材骨組長 (λ)
- ◆ 腹材…ガセット部ボルト群
重心間距離 ($> 0.8 \lambda$)

■ 面外への座屈

- ◆ 部材骨組長

◆ ラーメン構造

- 代表的ラーメン構造に対して部材の剛比の関数で近似



有効座屈長の算出法

◆ 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

- 弾性座屈解析

荷重を κ 倍したとき、構造系が平衡状態に入る
 du の大きさにかかわらず、 $d\psi$ が変化しない状態

$$(\mathbf{K}_E + \mathbf{K}_G) du - dP = d\psi$$

$$|\mathbf{K}_E + \kappa \mathbf{K}_G| = 0$$

弾性固有値解析による有効座屈長

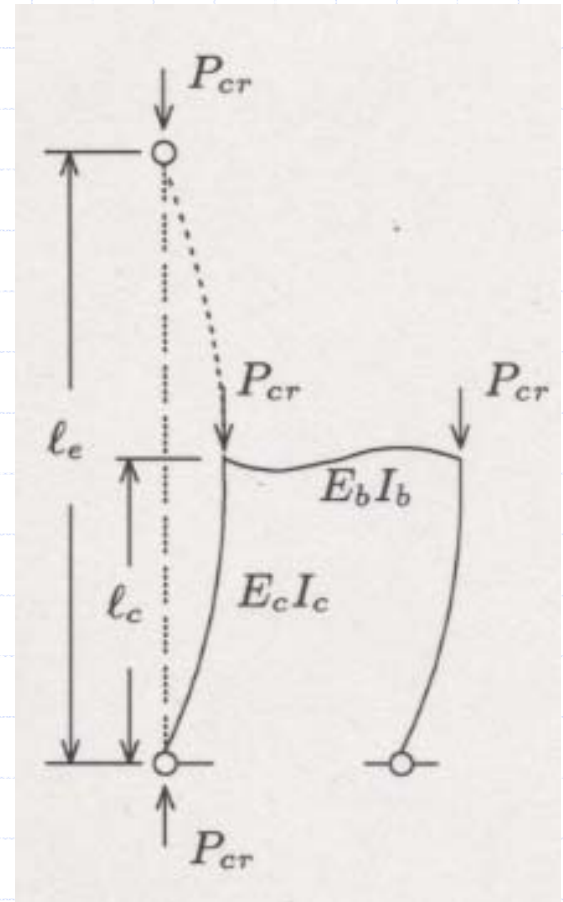
◆ 有効座屈長による強度評価

$$\lambda_e = \beta \lambda$$

$$\beta = \frac{\pi}{\lambda_c} \sqrt{\frac{E_c I_c}{P_{cr}}}$$

P_{cr} : 座屈荷重の評価

- ◆ 分岐座屈荷重に相当する固有値は、構造系に一つ存在
- ◆ 全体座屈強度と全部材の座屈強度がほぼ等しい構造に対して精度が良い



設計上の利点と問題点

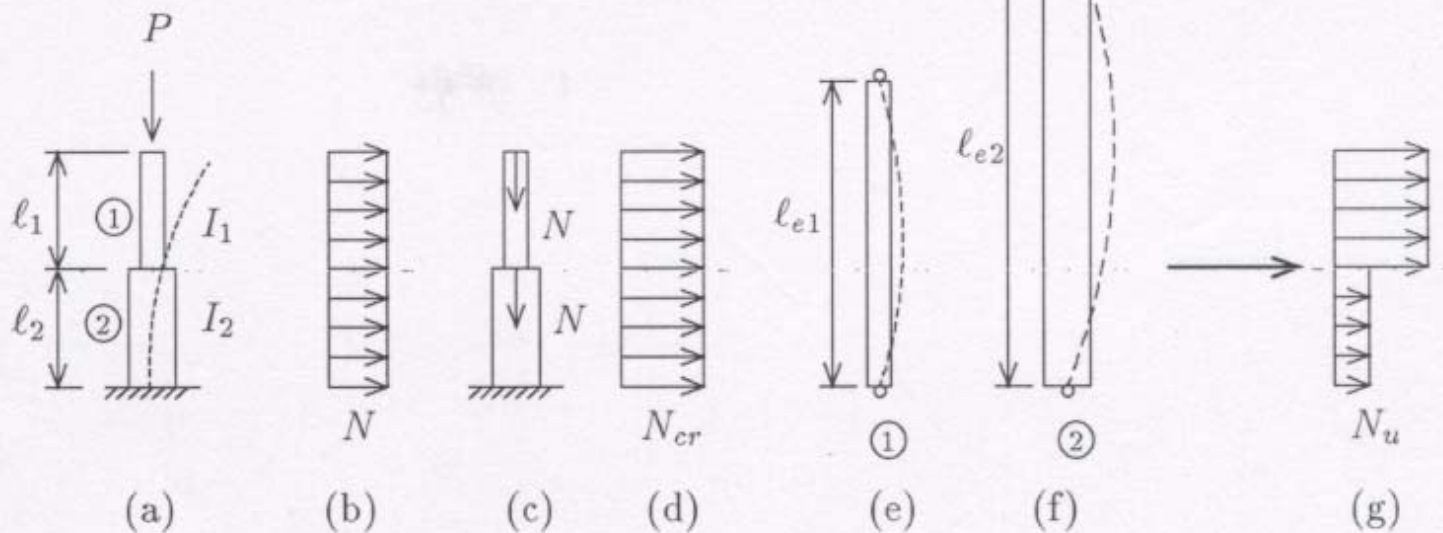
◆ 部分構造解析法

- 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、および荷重条件を容易に考慮
- 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
- 軸力が小さい場合不合理な有効座屈長を算出
- 断面力解析における荷重状態と有効座屈長を算出するときの荷重状態が異なる

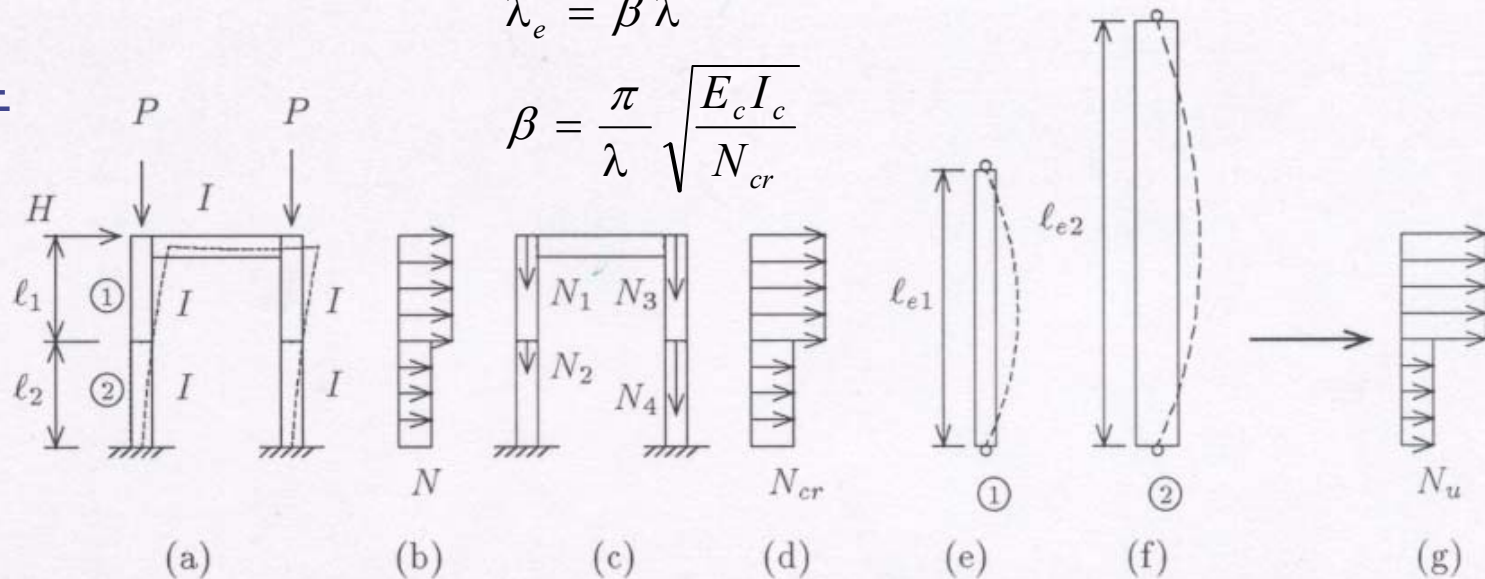
变断面



$$\lambda_e = \beta \lambda$$

$$\beta = \frac{\pi}{\lambda} \sqrt{\frac{E_c I_c}{N_{cr}}}$$

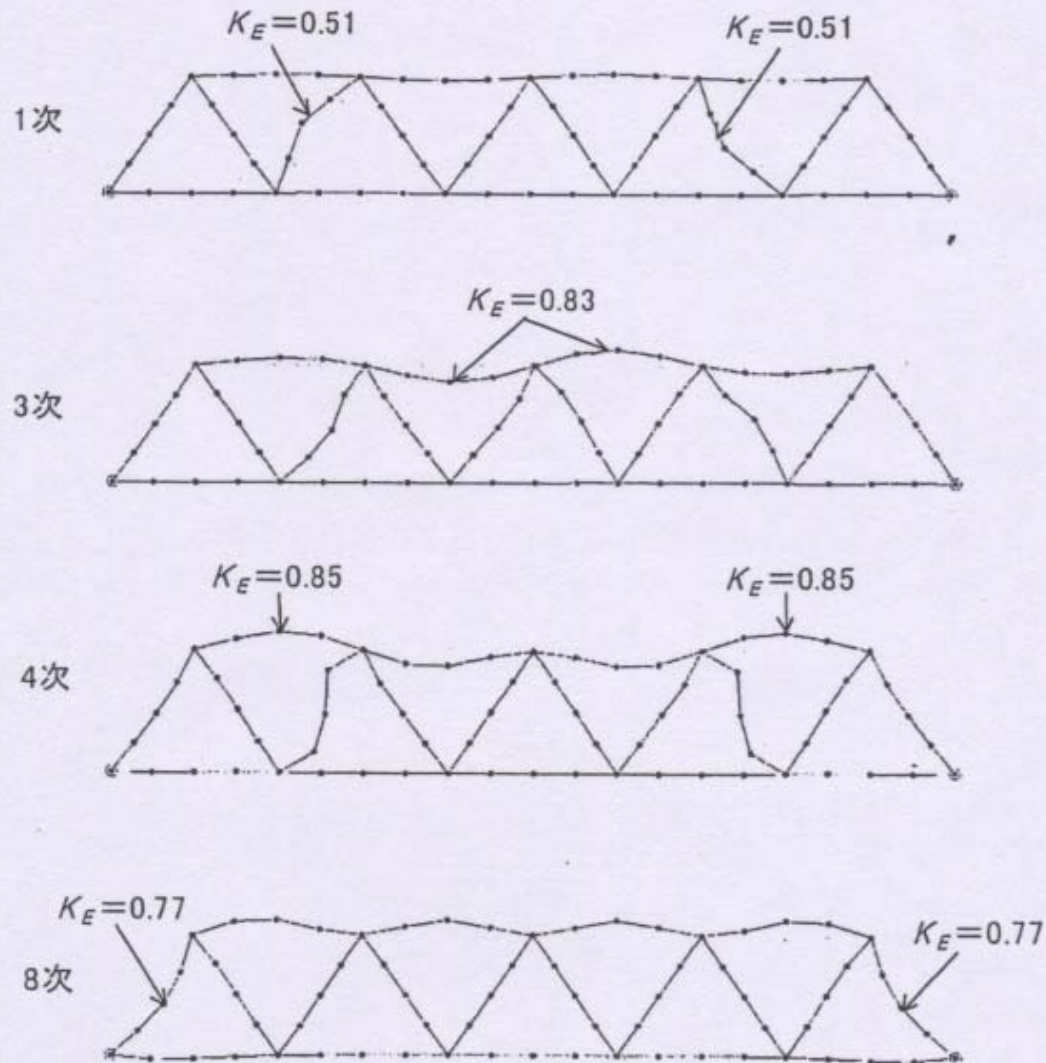
荷重条件



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

高次固有値の適用例



2.2 局部座屈への対処

(1) 両縁支持板の座屈

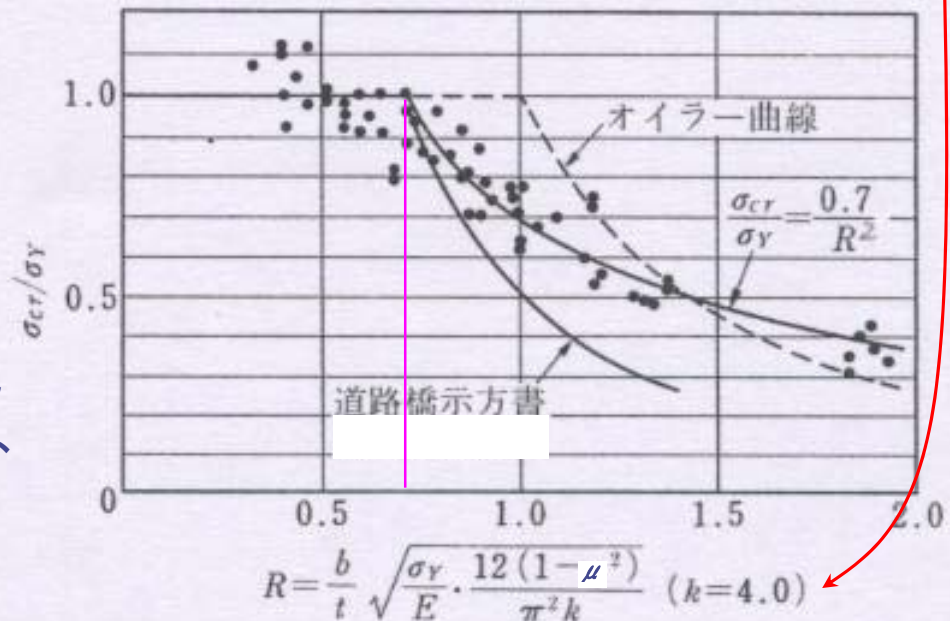
- ◆ 幅厚比に応じて板の局部座屈に対する許容応力度を設定する方法

$$\frac{\sigma_{cr}}{\sigma_y} = k \frac{\pi^2}{12(1-\mu^2)} \frac{E}{\sigma_y} \frac{1}{(b/t)^2} = \frac{1}{R^2}$$

- 鋼板の耐荷力の下限にあたる基準耐荷力曲線

$$\frac{\sigma_{cr}}{\sigma_y} = 1.0 \quad R \leq 0.7$$
$$\frac{\sigma_{cr}}{\sigma_y} = 0.5 R^2 \quad 0.7 < R$$

- ◆ 耐荷力に達した後の挙動;
Rが大きい場合強度が急激に低下し、粘りのない構造になるため、耐荷力に対して余裕を持たせた
- ◆ 面外たわみ、剛性の低下



幅厚比の上限の設定

両縁支持板

$$R \leq 1.0$$

- 溶接の際のひずみ、
- 取扱いの際の不測の外力による損傷
- 面外たわみの発生
- 剛性の低下

表-4.2.1 圧縮応力を受ける両縁支持板の最小板厚

鋼 種 鋼材の 板厚 (mm)	SS400 SM400 SMA400W	SM490	SM490Y SM520 SMA490W	SM570 SMA570W
40以下	$\frac{b}{56f}$	$\frac{b}{48f}$	$\frac{b}{46f}$	$\frac{b}{40f}$
40をこえ75以下	$\frac{b}{58f}$	$\frac{b}{50f}$		
75をこえ100以下			$\frac{b}{48f}$	$\frac{b}{42f}$

両縁支持板の許容応力度

$$\frac{\sigma_{cr}}{\sigma_Y} = \frac{0.5}{R^2}, \quad 0.7 < R$$

$$\sigma_{cal} = \frac{0.5 \sigma_Y}{\gamma} \frac{0.109 \sigma_Y}{\left(\frac{b}{t}\right)^2 \frac{\sigma_Y}{E} \frac{12(1-\mu^2)}{4.0\pi^2}}$$

$$= 210,000 \left(\frac{t}{b}\right)^2, \quad t < \frac{b}{38.7}$$

応力勾配による係数

両縁支持板の局部座屈に対する許容応力度

		局部座屈に対する許容応力度 (N/mm ²)	
SS400 SM400 SMA400W	40以下	140	$\frac{b}{38.7f} \leq t$
		$210,000 \left(\frac{t}{b}\right)^2$	$\frac{b}{80f} \leq t < \frac{b}{38.7f}$
	40をこえ 100以下	125	$\frac{b}{41.0f} \leq t$
		$210,000 \left(\frac{t}{b}\right)^2$	$\frac{b}{80f} \leq t < \frac{b}{41.0f}$

- ◆ 完成時に引張応力を受ける両縁支持板が、架設時の一時的な圧縮応力を受ける場合、不経済な設計を避けるため、最小板厚制限を緩和。

圧縮と曲げを受ける両縁支持板

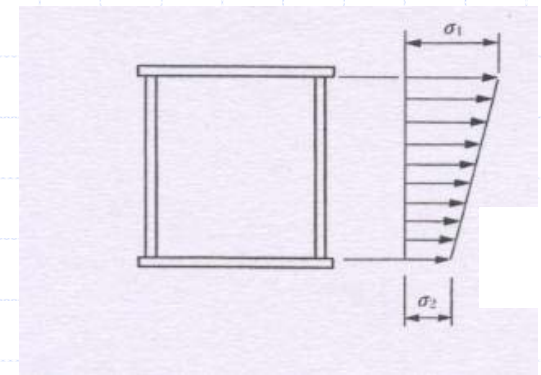
◆ 曲げと圧縮の応力比

$$\varphi = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\sigma_1} \quad (\sigma_1 \geq \sigma_2), \quad \psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = 1 - \varphi$$

1. 純曲げでは、残留応力、初期たわみの影響が少ない

—————→ R=1まで適用可能

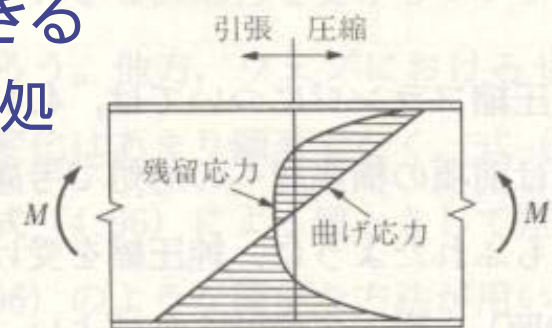
$$R_0 = 0.7 + 0.15 \varphi$$



2. 桁の腹板は、後座屈強度が期待できる

—————→ 安全率の低減で対処

$$\gamma = 1.7 - 0.15 \varphi$$



3. 座屈係数 k は、弾性座屈理論に従う

応力勾配による係数

◆ 曲げ成分の割合による幅厚比の限界を変化

$$\frac{b}{t} = f(\varphi) \left(\frac{b}{t} \right)_0 \qquad \frac{b}{t} = R_0 \pi \sqrt{\frac{k}{12(1-\mu^2)}} \sqrt{\frac{E}{\gamma \sigma_a}}$$

$$\varphi = 0 : R_0 = 0.70, \quad \gamma = 1.70, \quad k = 4.0 \rightarrow \frac{b}{t} = 40, \quad f(0) = 1$$

$$\varphi = 1 : R_0 = 0.85, \quad \gamma = 1.55, \quad k = 7.8 \rightarrow \frac{b}{t} = 70, \quad f(1) = \frac{70}{40}$$

$$\varphi = 2 : R_0 = 1.00, \quad \gamma = 1.40, \quad k = 23.9 \rightarrow \frac{b}{t} = 152, \quad f(2) = \frac{152}{40}$$

$$f = 0.65 \varphi^2 + 0.13 \varphi + 1.0$$

(2) 自由突出板の座屈

- ◆ 純曲げに比して座屈係数が小さい、
- ◆ 応力勾配の影響も少ない
- ◆ 一様圧縮に対する局部座屈強度を曲げを受ける場合にも適用

$$\frac{\sigma_{cr}}{\sigma_Y} = 1.0 \quad R \leq 0.7$$

$$\frac{\sigma_{cr}}{\sigma_Y} = \frac{0.5}{R^2} \quad 0.7 < R$$

$$\frac{\sigma_{cr}}{\sigma_Y} = \frac{0.5}{R^2}, \quad 0.7 < R$$

$$\sigma_{cal} = \frac{0.5 \sigma_Y}{\gamma} \frac{0.109 \sigma_Y}{\left(\frac{b}{t}\right)^2 \frac{\sigma_Y}{E} \frac{12(1-\mu^2)}{0.43\pi^2}}$$

$$= 23,000 \left(\frac{t}{b}\right)^2, \quad t < \frac{b}{12.8}$$

表-4.2.3 自由突出板の局部座屈に対する許容応力 (N/mm²)

鋼種	鋼材の板厚 (mm)	局部座屈に対する許容応力 (N/mm ²)
SS400 SM400 SMA400W	40以下	140 : $\frac{b}{12.8} \leq t$ 23,000 $\left(\frac{t}{b}\right)^2$: $\frac{b}{16} \leq t < \frac{b}{12.8}$
	40をこえ 100以下	125 : $\frac{b}{13.6} \leq t$ 23,000 $\left(\frac{t}{b}\right)^2$: $\frac{b}{16} \leq t < \frac{b}{13.6}$
	100以上	185 : $\frac{b}{16} \leq t$

- ◆ 架設時の一時的な圧縮応力を受ける場合を考慮

(3) 圧縮と曲げとせん断を受ける 両縁支持板

◆ 圧縮とせん断

$$\frac{\sigma_c}{\sigma_{cr}} + \left(\frac{\tau}{\tau_{cr}} \right)^2 \leq \left(\frac{1}{\gamma} \right)^2$$

◆ 曲げとせん断

$$\left(\frac{\sigma_b}{\sigma_{bcr}} \right)^2 + \left(\frac{\tau}{\tau_{cr}} \right)^2 \leq \left(\frac{1}{\gamma} \right)^2$$

◆ 圧縮と曲げとせん断

$$\frac{\sigma_c}{\sigma_{cr}} + \left(\frac{\sigma_b}{\sigma_{bcr}} \right)^2 + \left(\frac{\tau}{\tau_{cr}} \right)^2 \leq \left(\frac{1}{\gamma} \right)^2$$

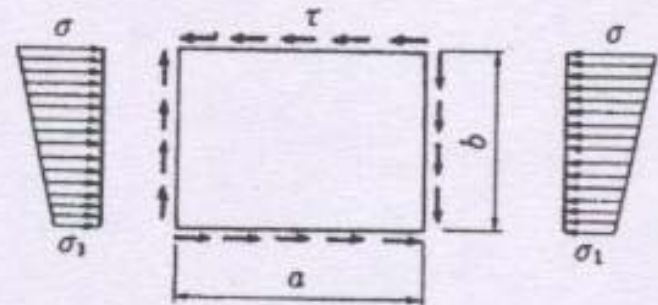
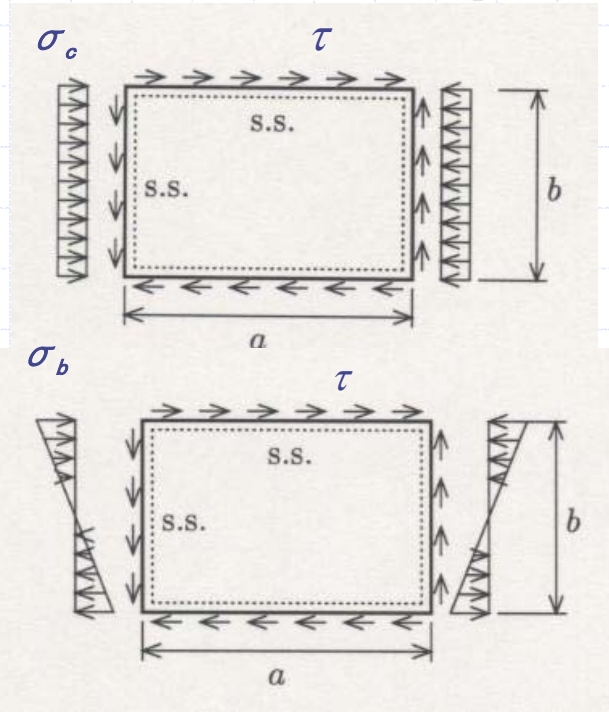
$$\sigma_{cr} = k_b \frac{\pi^2 E}{12(1 - \mu^2)} \left(\frac{t}{b} \right)^2$$

$$\tau_{cr} = k_s \frac{\pi^2 E}{12(1 - \mu^2)} \left(\frac{t}{b} \right)^2$$

$$k_b \approx 23.9$$

$$k_s \approx 4 \left\{ \frac{4}{3} + \frac{1}{(a/b)^2} \right\}, \quad \frac{a}{b} \geq 1$$

$$k_s \approx 4 \left\{ 1 + \frac{4}{3(a/b)^2} \right\}, \quad \frac{a}{b} < 1$$



縁応力度による照査

$$\frac{\sigma_c}{\sigma_{cr}} + \left(\frac{\sigma_b}{\sigma_{bcr}} \right)^2 = 1$$



$$F_1 \left(\frac{\sigma}{\sigma^*} \right) + F_2 \left(\frac{\sigma}{\sigma^*} \right)^2 = 1$$

$$\frac{\sigma}{\sigma^*} = \frac{F_1}{2F_2} \left(\sqrt{1 + \frac{4F_2}{F_1^2}} - 1 \right) = 1$$

$$F_1 + F_2 = 1 \quad F_1 = \frac{2-\varphi}{2}, F_2 = \frac{\varphi}{2}$$

$$\sigma_c = 0 \ (\varphi = 2) \rightarrow F_1 = 0, F_2 = 1$$

$$\sigma_b = 0 \ (\varphi = 0) \rightarrow F_1 = 1, F_2 = 0$$



$$\frac{2-\varphi}{2} \left(\frac{\sigma}{\sigma^*} \right) + \frac{\varphi}{2} \left(\frac{\sigma}{\sigma^*} \right)^2 + \left(\frac{\tau}{\tau^*} \right)^2 \leq 1$$

σ^* : 弾性座屈強度/3.4(=1.7×2)、(純圧縮)、 τ^* : 弾性座屈強度/1.7

両縁支持板の寸法評価

$$\frac{2-\varphi}{2}\left(\frac{\sigma}{\sigma^*}\right) + \frac{\varphi}{2}\left(\frac{\sigma}{\sigma^*}\right)^2 + \left(\frac{\tau}{\tau^*}\right)^2 \leq 1$$

$$\psi = 1 - \varphi, \quad \frac{1+\psi}{2}\left(\frac{\sigma}{\sigma^*}\right) + \frac{1-\psi}{2}\left(\frac{\sigma}{\sigma^*}\right)^2 + \left(\frac{\tau}{\tau^*}\right)^2 = 1$$

$$\left(\frac{\sigma}{\sigma^*}\right)^2 \text{ を両辺に加える} \longrightarrow \left(\frac{3-\psi}{4}\frac{\sigma}{\sigma^*}\right)^2 + \left(\frac{\tau}{\tau^*}\right)^2 = \left(1 - \frac{1+\psi}{4}\frac{\sigma}{\sigma^*}\right)^2$$

$$\frac{1+\psi}{4}\left(\frac{\sigma}{\sigma^*}\right) + \sqrt{\left(\frac{3-\psi}{4}\frac{\sigma}{\sigma^*}\right)^2 + \left(\frac{\tau}{\tau^*}\right)^2} = 1$$

板の応力度と座屈応力度の比

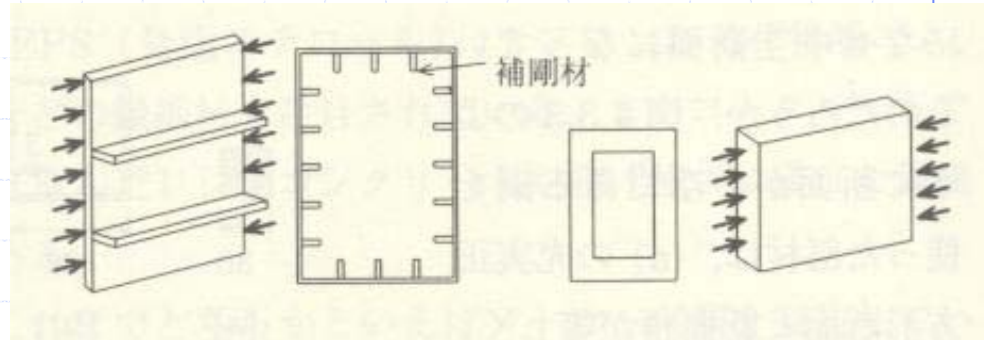
$$R^2 = \frac{S_y}{S_{cr}}$$

s : Mises の合成応力

$$\frac{1+\psi}{4}\left(\frac{\sigma}{\sigma^*}\right) + \sqrt{\left(\frac{3-\psi}{4}\frac{\sigma}{\sigma^*}\right)^2 + \left(\frac{\tau}{\tau^*}\right)^2} = R^2$$

(4) 補剛板の座屈

薄肉多補剛設計思想



◆ 同じ長さ、同じ断面積を有する圧縮部材の全体座屈強度の向上 → 断面2次モーメントの増大



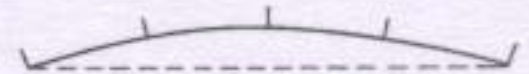
◆ 断面中立軸から遠い位置に板要素を配置
→ 同一断面積では板厚薄くなり、局部座屈発生



◆ 補剛材を溶接した補剛板

補剛板の設計の基本

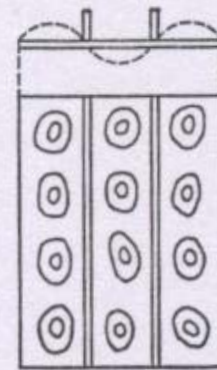
- ◆ 補剛材は、等間隔に配置
- ◆ 補剛板の全体座屈は、防止
- ◆ 座屈が起こる場合、補剛材を節とする補剛材間の板の座屈
- ◆ 補剛材自身は座屈しない
- ◆ 補剛材の鋼種は、補剛される板と同等以上
- ◆ 補剛板の基準耐荷力をもとに、平板と同様な考え方で対処



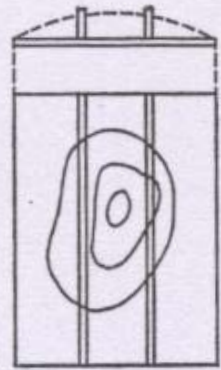
(a) 全体座屈



(b) 局部座屈



Rモード



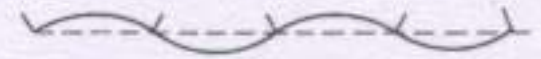
Fモード

剛比と補剛板の座屈係数

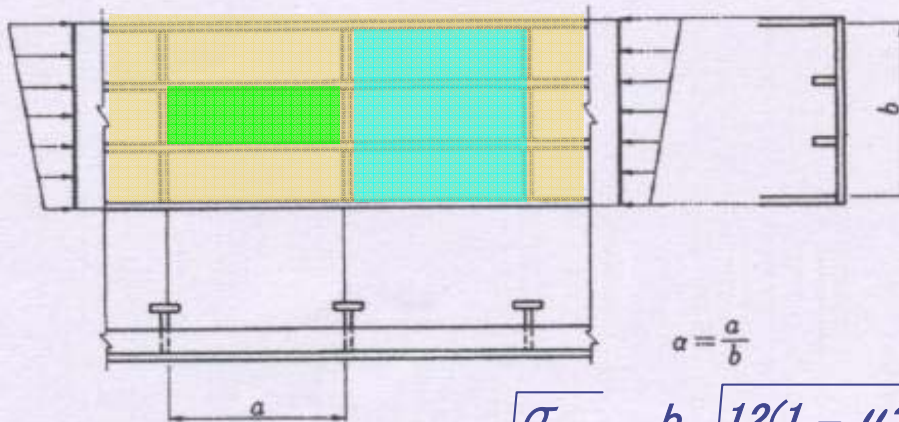
$$\sigma_{cr} = k \frac{\pi^2 E}{12(1 - \mu^2)} \frac{1}{(b/t)^2}$$

◆ 補剛材間の局部座屈

$$R_R = \sqrt{\frac{\sigma_{cr}}{\sigma_y}} = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{12(1 - \mu^2)}{\pi^2 k_R} \frac{\sigma_y}{E}}, \quad k_R = 4n, \quad n: \text{パネル数}$$

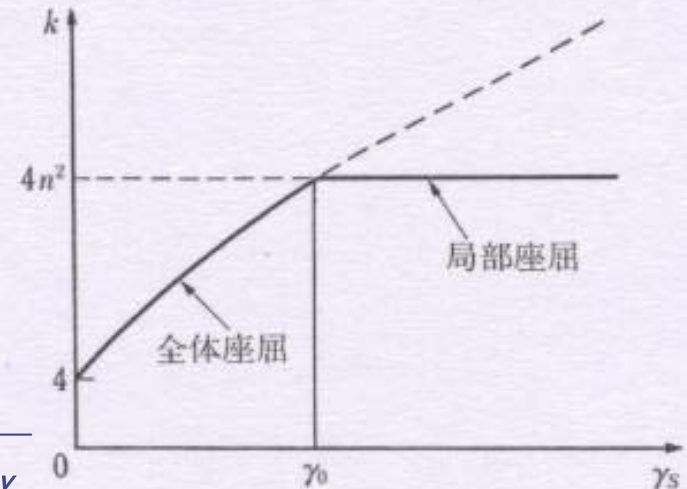


(b) 局部座屈



$$\alpha = \frac{a}{b}$$

$$R_F = \sqrt{\frac{\sigma_{cr}}{\sigma_y}} = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{12(1 - \mu^2)}{\pi^2 k_F} \frac{\sigma_y}{E}}$$



$$k_F = \frac{1}{1+n\delta_\lambda} \left[\left(\frac{m}{\alpha} + \frac{\alpha}{m} \right)^2 + \left(\frac{m}{\alpha} \right)^2 n\gamma_\lambda + \frac{\alpha}{m^2} \gamma_r \right]$$

$$k_{Fmin} = \frac{2}{1+n\delta_\lambda} \left(1 + \sqrt{(1+n\gamma_\lambda) \left(1 + m \frac{\gamma_r}{\alpha} \right)} \right)$$

◆ 補剛板の全体座屈

$$\alpha \leq \sqrt[4]{1+n\gamma_\lambda} ; \quad k_F = \frac{(1+\alpha^2)^2 + n\gamma_\lambda}{\alpha^2(1+n\delta_\lambda)}$$

$$\alpha > \sqrt[4]{1+n\gamma_\lambda} ; \quad k_F = \frac{2(1+\sqrt{1+n\gamma_\lambda})}{1+n\delta_\lambda}$$

$$\gamma_\lambda = \frac{I_\lambda}{bt^3 / [12(1-\mu^2)]} \approx \frac{I_\lambda}{bt^3 / 11}$$

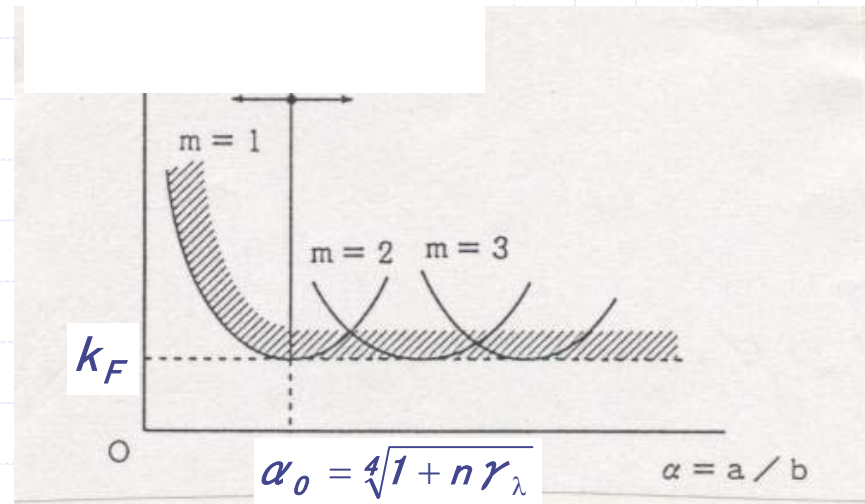
$$\gamma_r = \frac{I_r}{bt^3 / [12(1-\mu^2)]} \approx \frac{I_r}{bt^3 / 11}$$

$$\delta_\lambda = \frac{A_\lambda}{bt}$$

$$\alpha = a/b$$

◆ 横補剛材の所要剛度

$$\gamma_r = \frac{1+n\gamma_\lambda}{4\alpha^3}$$



縦補剛材の所要剛度

$$\left(\frac{b}{t}\right)_F \leq R_F \sqrt{\frac{\pi^2 k_F}{12(1-\mu^2)} \frac{E}{\sigma_y}}$$

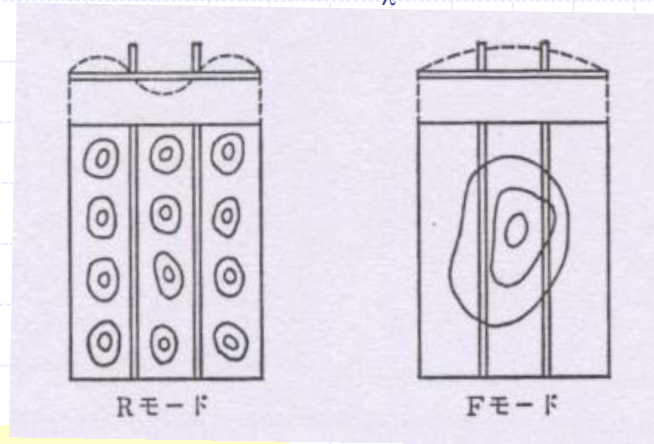
$$\alpha \leq \sqrt[4]{1+n\gamma_\lambda}; \quad k_F = \frac{(1+\alpha^2)^2 + n\gamma_\lambda}{\alpha^2(1+n\delta_\lambda)}$$

$$\alpha > \sqrt[4]{1+n\gamma_\lambda}; \quad k_F = \frac{2(1+\sqrt{1+n\gamma_\lambda})}{1+n\delta_\lambda}$$

$$\left(\frac{b}{t}\right)_R \leq R_R \sqrt{\frac{\pi^2 k_R}{12(1-\mu^2)} \frac{E}{\sigma_y}}$$

$$k_R = 4n^2$$

$$k_F \leq k_R \left(\frac{(b/t)_F}{(b/t)_R} \right)^2 = k_R \left(\frac{t_R}{t_F} \right)^2$$



$$\alpha \leq \sqrt[4]{1+n\gamma_\lambda}: \quad \gamma_\lambda = 4\alpha^2 n \left(\frac{t_R}{t_F} \right)^2 (1+n\delta_\lambda) - \frac{(1+\alpha^2)^2}{n}$$

$$\alpha > \sqrt[4]{1+n\gamma_\lambda}: \quad \gamma_\lambda = \frac{1}{n} \left[2n^2 \left(\frac{t_R}{t_F} \right)^2 (1+n\delta_\lambda) - 1 \right] - \frac{1}{n}$$

縦補剛材の所要剛度

1. $R_F = R_R$ の補剛材剛度を超える剛度を設けても耐荷力増加しない
2. $R_R \leq 0.5$ では、 $R_F = R_R$ の剛度を必要としない

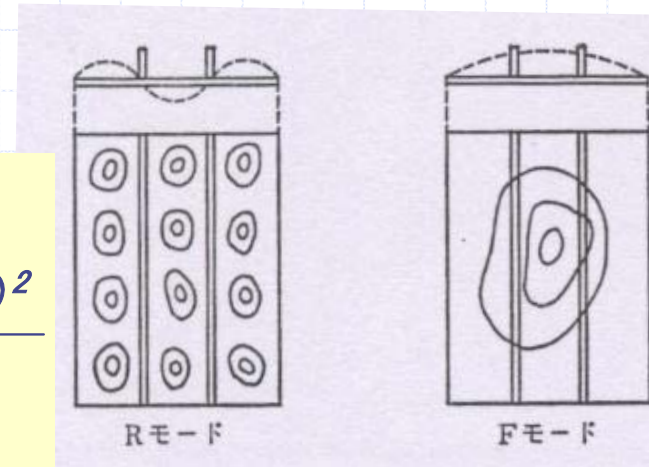
$$R_F = 0.5 \quad (R_R \leq 0.5)$$

$$R_F = R_R \quad (R_R > 0.5)$$

$$\alpha \leq \sqrt[4]{1 + n\gamma_\lambda} :$$

$$t_F \geq t_R : \gamma_\lambda = 4\alpha^2 n \left(\frac{t_R}{t_F} \right)^2 (1 + n\delta_\lambda) - \frac{(1 + \alpha^2)^2}{n}$$

$$t_F < t_R : \gamma_\lambda = 4\alpha^2 n (1 + n\delta_\lambda) - \frac{(1 + \alpha^2)^2}{n}$$



- ◆ 面外変形、剛度低下を考慮して安全側に定めている

補剛板の耐荷力

$$\frac{\sigma_{cr}}{\sigma_Y} = 1.0$$

$$R_R \leq 0.5$$

$$\frac{\sigma_{cr}}{\sigma_Y} = 1.5 - R_R \quad 0.5 < R_R \leq 1.0$$

$$\frac{\sigma_{cr}}{\sigma_Y} = \frac{0.5}{R_R^2}$$

$$1.0 < R_R \leq 1.4$$

- ◆ 製作、取り扱い上の問題への板厚制限

$$R_R = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{12(1 - \mu^2)}{k_R}} \sqrt{\frac{\sigma_Y}{E}} \left(\frac{b}{t} \right)$$

$$k_R = 4n^2$$

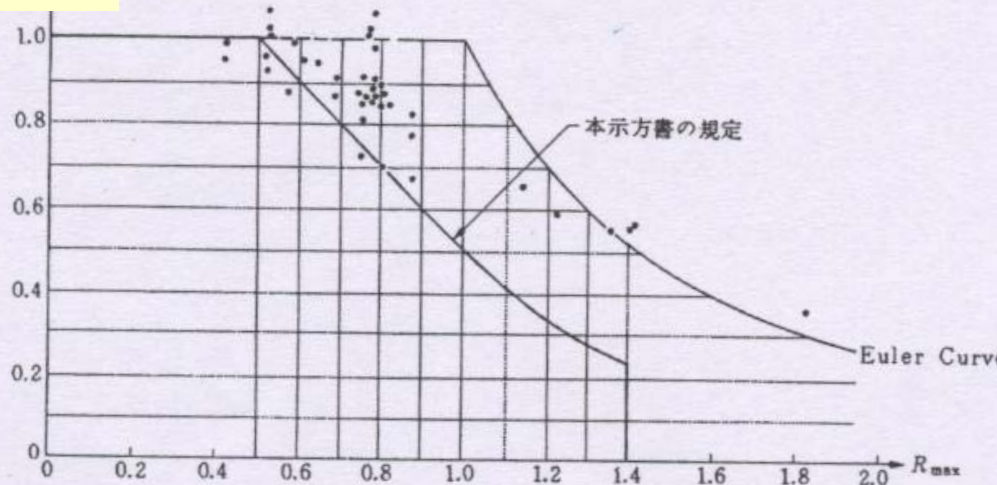


図-解 4.2.4 補剛板の基準耐荷力曲線

f を両縁支持板と同一式を用いることは一貫性なし。 ψ/n が小さい、f 値があまり大きくないことから安全側の規定

補剛板の許容応力度

$$\frac{\sigma_{cr}}{\sigma_Y} = 1.5 - R_R \quad 0.5 < R_R \leq 1.0$$

$$\sigma_{cal} = \frac{1.0\sigma_Y}{\gamma} + \frac{0.5\sigma_Y}{\gamma} - \frac{\sigma_Y}{\gamma} \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{12(1-\mu^2)}{k_R}} \sqrt{\frac{\sigma_Y}{E} \frac{b}{t}}$$

$$= 140 - 2.6 \left(\frac{b}{tfn} - 28 \right) \quad \frac{b}{56fn} < t \leq \frac{b}{28fn}$$

表-4.2.5

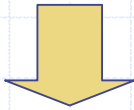
鋼種 板厚 (mm)	SS400 SM400 SMA400W	SMA490W	SMA570W	SMA700W
40	140: $\frac{b}{28fn} \leq t$	185: $\frac{b}{24fn} \leq t$	210: $\frac{b}{22fn} \leq t$	255: $\frac{b}{22fn} \leq t$
以下	140 -2.6 $\left(\frac{b}{tfn} - 28 \right)$: $\frac{b}{56fn} \leq t < \frac{b}{28fn}$	185 -3.9 $\left(\frac{b}{tfn} - 24 \right)$: $\frac{b}{48fn} \leq t < \frac{b}{24fn}$	210 -4.6 $\left(\frac{b}{tfn} - 22 \right)$: $\frac{b}{46fn} \leq t < \frac{b}{22fn}$	255 -6.9 $\left(\frac{b}{tfn} - 22 \right)$: $\frac{b}{40fn} \leq t < \frac{b}{22fn}$
	210,000 $\left(\frac{tfn}{b} \right)^2$: $\frac{b}{80fn} \leq t < \frac{b}{56fn}$	210,000 $\left(\frac{tfn}{b} \right)^2$: $\frac{b}{80fn} \leq t < \frac{b}{48fn}$	210,000 $\left(\frac{tfn}{b} \right)^2$: $\frac{b}{80fn} \leq t < \frac{b}{46fn}$	210,000 $\left(\frac{tfn}{b} \right)^2$: $\frac{b}{80fn} \leq t < \frac{b}{40fn}$

両縁支持板、補剛板の注意事項

- ◆ 耐震設計上、じん性が要求される鋼製橋脚基部などの部位に用いられる両縁支持板、自由突出板および補剛板については、局部座屈しないように座屈パラメータを制限している。
- ◆ 局部座屈に対する許容応力度がその上限値となる範囲($R \leq 0.7$, $R_R \leq 0.5$)で部材設計する。



2.3 全体座屈と局部座屈の連成

- ◆ 部材を構成する板の板厚は、局部座屈が降伏点まで生じないような板厚とすることが基本
 - ◆ 交番応力として小さな圧縮応力を受ける板、
 - ◆ 架設時のみに一般的に小さな圧縮力を受ける板、
厚い板厚を規定してしまい、不経済設計を生む可能性ある
- 
- ◆ 局部座屈を考慮し、薄い板でも許容応力度を下げて用いることができるように、より自由度の大きな規定に改訂

- ◆ 断面全体としての平均圧縮応力が全体座屈応力に達する以前に、断面を構成する板要素の応力が局部座屈応力に達する
- ◆ 局部座屈を起こした段階で、見かけの剛性低下により部材全体としての座屈荷重が低下する



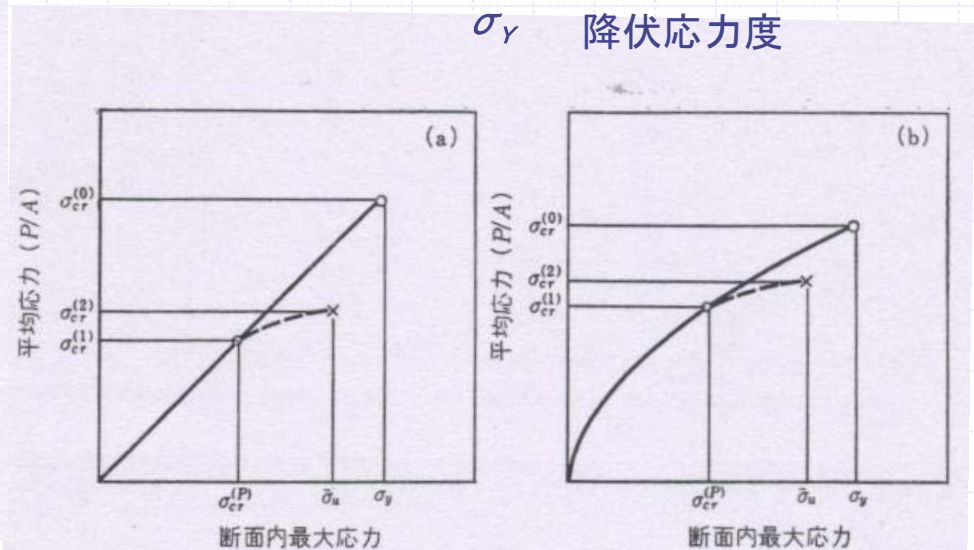
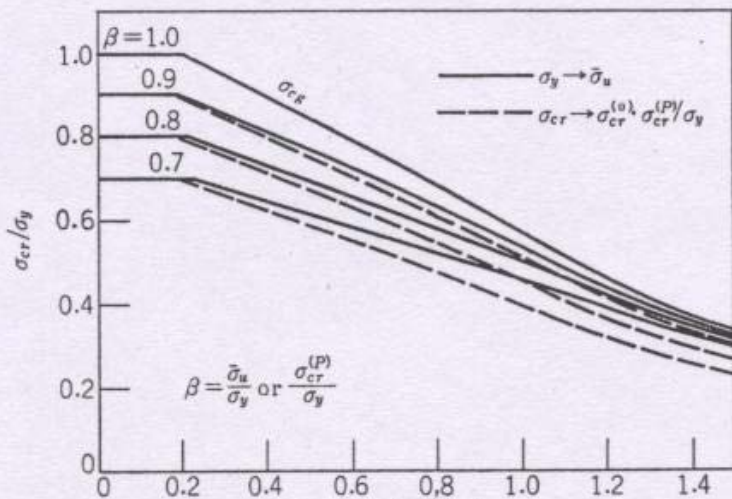
- ◆ 部材の全体座屈強度に対する構成板要素の局部座屈の影響を厳密に評価し、設計に反映させることは困難

$$\sigma_{ca} = \sigma_{cag} \frac{\sigma_{cal}}{\sigma_{ca0}} \quad (\text{積公式})$$

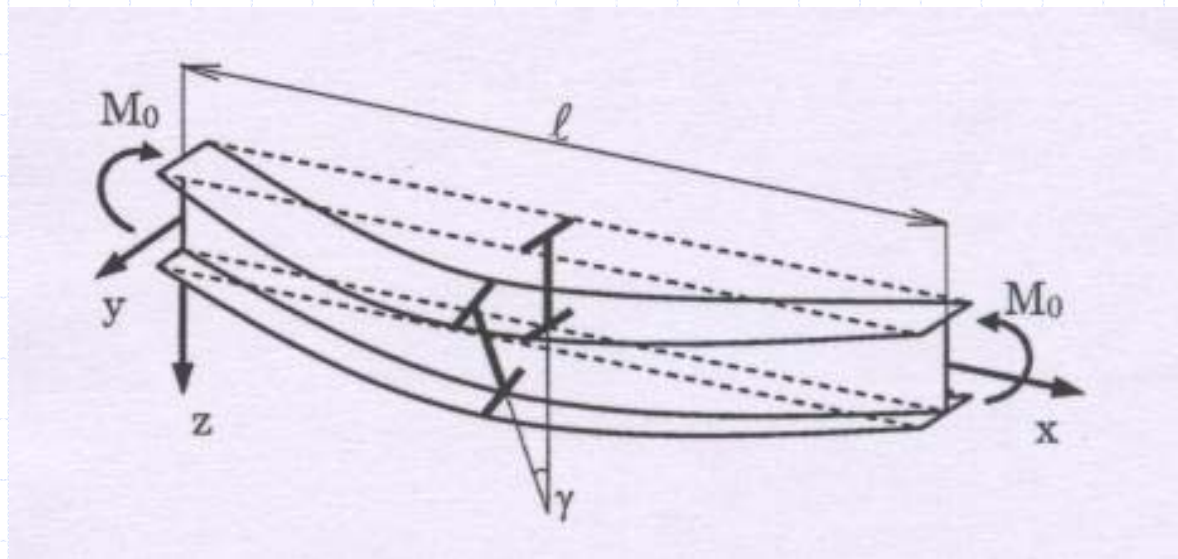
➤ 局部座屈をしない部材の平均圧縮応力と断面内最大圧縮応力が線形関係にある場合が正しいが、そうでない場合は安全側の値を与える

$$\sigma_{cr}^1 = \sigma_{cr}^0 \frac{\sigma_{cr}^p}{\sigma_Y}$$

σ_{cr}^1 連成座屈応力度
 σ_{cr}^0 部材の全体座屈応力度
 σ_{cr}^p 板の耐荷応力度
 σ_Y 降伏応力度



3. 曲げ部材



横倒れ座屈

3.1 曲げモーメントによる直応力度

$$\sigma_b = \frac{M}{I_g} y_c \leq \sigma_{bag} = \frac{\sigma_{cr}}{\gamma}$$

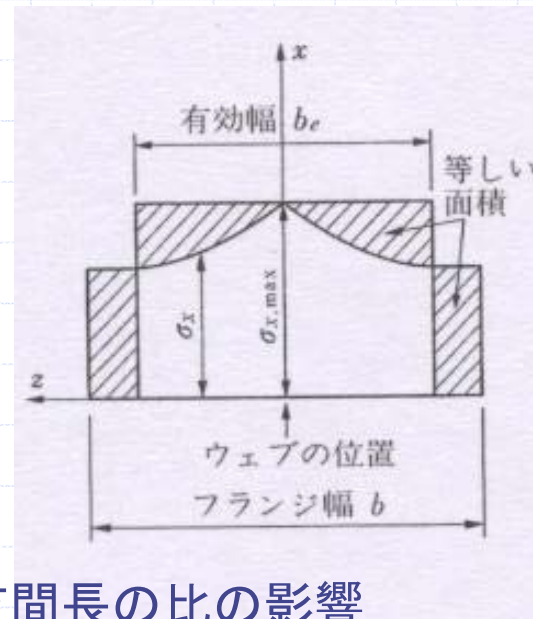
◆ 総断面の断面2次モーメント

■ フランジ有効幅

- ◆ せん断遅れ現象
- ◆ 支持条件、荷重条件、フランジ幅と支間長の比の影響

$$\frac{b}{\lambda} < \frac{1}{20} : b_e \approx b$$

- フランジ幅の広い合成桁、鋼床版ボックス桁、連続桁やカンチレバー桁の中間支点付近



3.2 横倒れ座屈強度

◆ 桁の全体座屈に対する耐荷力を規定

$$M_{cr} = \frac{\pi}{\lambda} \sqrt{EI_y GJ} \sqrt{1 + \left(\frac{\pi}{\lambda}\right)^2 \frac{EI_\omega}{GJ}}$$

$$\sigma_{cr} = \frac{M_{cr}}{W_c} = \sqrt{\left(\frac{\pi}{\lambda}\right)^2 \frac{EI_y GJ}{W_c^2} + \left(\frac{\pi}{\lambda}\right)^4 \frac{EI_y EI_\omega}{W_c^2}}$$

■ 横倒れ座屈が問題になる断面

$$\kappa = \lambda \sqrt{\frac{GJ}{EI_\omega}}$$

$\kappa < 0.4$ そりねじり応力度(開断面)

$\kappa > 10$ サン・ブナンのねじり応力度(閉断面)

$$\sigma_{cr} \approx \frac{\pi^2 E}{\lambda^2 W_c} \sqrt{I_y I_\omega}$$

横倒れ座屈強度パラメータ

$$\sigma_{cr} \approx \frac{\pi^2 E}{4 \left(3 + \frac{A_w}{2A_f} \right) \left(\frac{\lambda}{b} \right)^2} \longrightarrow \frac{\sigma_{cr}}{\sigma_Y} = \frac{1}{\alpha^2}$$

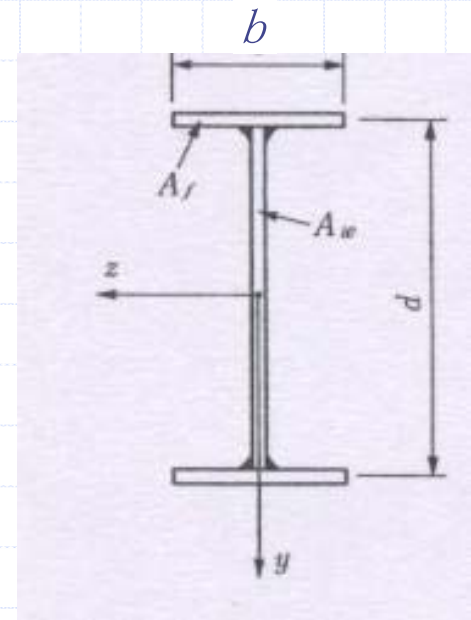
$$\alpha = \frac{2}{\pi} K \sqrt{\frac{\sigma_Y}{E}} \left(\frac{\lambda}{b} \right)$$

$$K = \sqrt{3 + \frac{A_w}{2A_f}}$$

λ : 圧縮フランジの固定点間距離

$$\frac{A_w}{2A_f} \leq 1, \quad K = 2$$

$$\frac{A_w}{2A_f} > 1, \quad K = \sqrt{3 + \frac{A_w}{2A_f}}$$



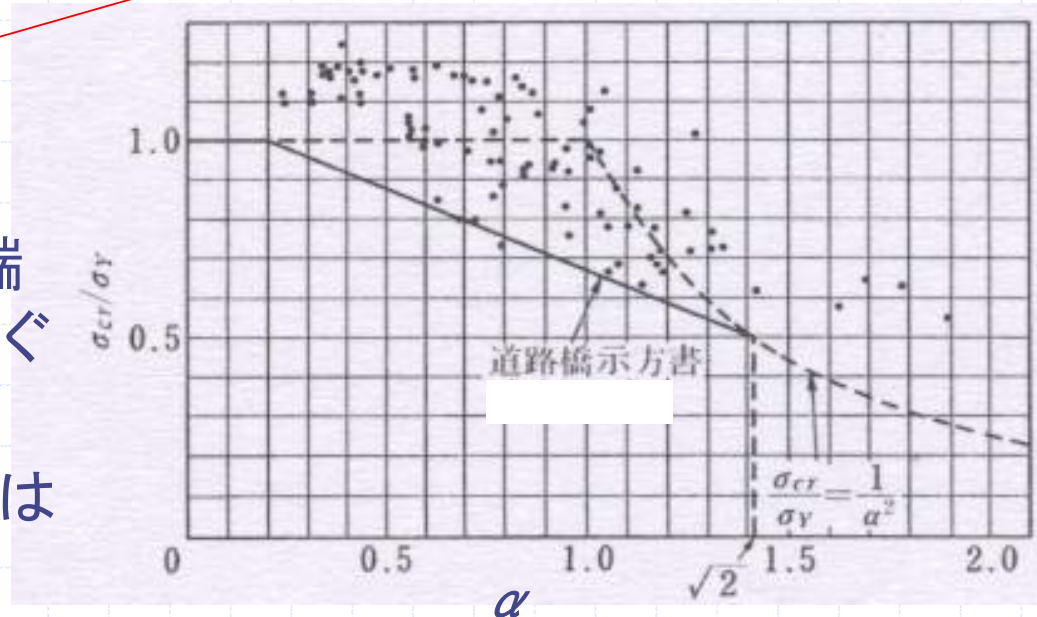
3.3 曲げ耐荷力

$$\frac{\sigma_{cr}}{\sigma_Y} = 1.0 \quad \alpha \leq 0.2$$

$$\frac{\sigma_{cr}}{\sigma_Y} = 1.0 - 0.412(\alpha - 0.2) \quad 0.2 < \alpha \leq \sqrt{2}$$

$\frac{\lambda}{b}$ の上限値(最大値)

- 許容応力度が極端に低下するのを防ぐため
- オイラー座屈領域は使わない



許容曲げ圧縮応力度

表-3.2.3(b) 許容曲げ圧縮応力度(N/mm²)
(表-3.2.3(a)に規定する以外の場合)

鋼種		SS400 SM400 SMA400W	SM400V
板厚 (mm)			
$\frac{A_w}{A_c} \leq 2$	40以下	140: $\frac{l}{b} \leq 4.5$ 140 $-2.4\left(\frac{l}{b}-4.5\right):$ $4.5 < \frac{l}{b} \leq 30$	185: $\frac{l}{b} \leq 4.0$ 185 $-3.8\left(\frac{l}{b}-4.0\right):$ $4.0 < \frac{l}{b} \leq 27$
	40をこえ 75以下	125: $\frac{l}{b} \leq 5.0$ 125 $-2.2\left(\frac{l}{b}-5.0\right):$ $5.0 < \frac{l}{b} \leq 30$	175: $\frac{l}{b} \leq 4.0$ 175 $-3.6\left(\frac{l}{b}-4.0\right):$ $4.0 < \frac{l}{b} \leq 30$
	75をこえ 100以下		190: $\frac{l}{b} \leq 4.0$ 190 $-4.0\left(\frac{l}{b}-4.0\right):$ $4.0 < \frac{l}{b} \leq 27$
			245: $\frac{l}{b} \leq 4.5$ 245 $-6.2\left(\frac{l}{b}-4.5\right):$ $4.5 < \frac{l}{b} \leq 25$
			240: $\frac{l}{b} \leq 4.5$ 240 $-6.0\left(\frac{l}{b}-4.5\right):$ $4.5 < \frac{l}{b} \leq 25$

$$\frac{\sigma_{cr}}{\sigma_Y} = 1.0 - 0.412(\alpha - 0.2) \quad 0.2 \leq \alpha < 0.5$$
$$\sigma_{ba} = \frac{1.0\sigma_Y}{\gamma} + \frac{0.412\sigma_Y}{\gamma} \left(\frac{2}{\pi} K \right)$$
$$= 140 - 1.2 \left(K \frac{\lambda}{b} - 9 \right) \quad \frac{9}{K} \leq \frac{\lambda}{b} < \frac{9}{0.2}$$

$K = 2$

$$\frac{\sigma_{cr}}{\sigma_Y} = 1.0 - 0.412(\alpha - 0.2) \quad 0.2 < \alpha \leq \sqrt{2}$$

$$\sigma_{ba} = \frac{1.0\sigma_Y}{\gamma} + \frac{0.412\sigma_Y}{\gamma} \left(\frac{2}{\pi} K \sqrt{\frac{\sigma_Y}{E}} \frac{\lambda}{b} - 0.2 \right)$$

$$= 140 - 1.2 \left(K \frac{\lambda}{b} - 9 \right) \quad \frac{9}{K} < \frac{\lambda}{b} \leq 30$$

許容応力度の注意事項(1)

- ◆ 圧縮フランジが直接コンクリート床版に固定される場合、箱断面桁、 π 断面桁では、許容応力度は上限値を適用可能

表-3.2.3(a) 許容曲げ圧縮応力度(N/mm^2)
(圧縮フランジがコンクリート床版等で直接固定されている場合及び箱形断面、 π 型断面の場合)

鋼 種 鋼材の 板厚(mm)	SS400 SM400 SMA400W	SM490	SM490Y SM520 SMA490W	SM570 SMA570W
40以下	140	185	210	255
40をこえ75以下	125	175	195	245
75をこえ100以下			190	240

許容応力度の注意事項(2)

- ◆ 圧縮フランジの固定点距離は、横倒れ座屈を拘束するような構造の床桁、横構、対傾構などの取付け部における部材骨組線の交点間の距離

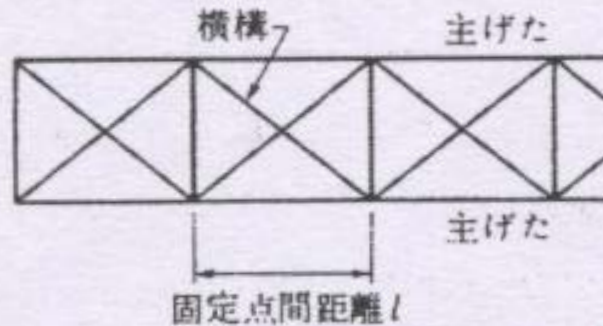


図-解 3.2.3 圧縮フランジの固定点間距離

許容応力度の注意事項(3)

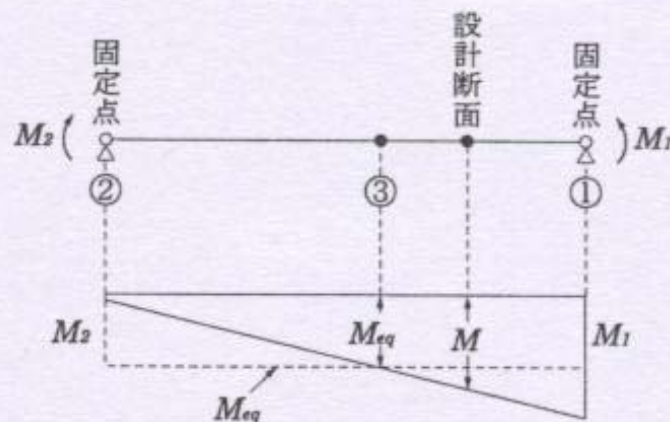
- ◆ 固定点間で曲げモーメントが直線変化する場合、応力照査断面の曲げモーメント M を M/M_{eq} 倍割り増すこと可能

$$\frac{\sigma_b}{\sigma_{ba}^*} = \frac{C_m \sigma_b}{\sigma_{ba}} \leq 1.0$$

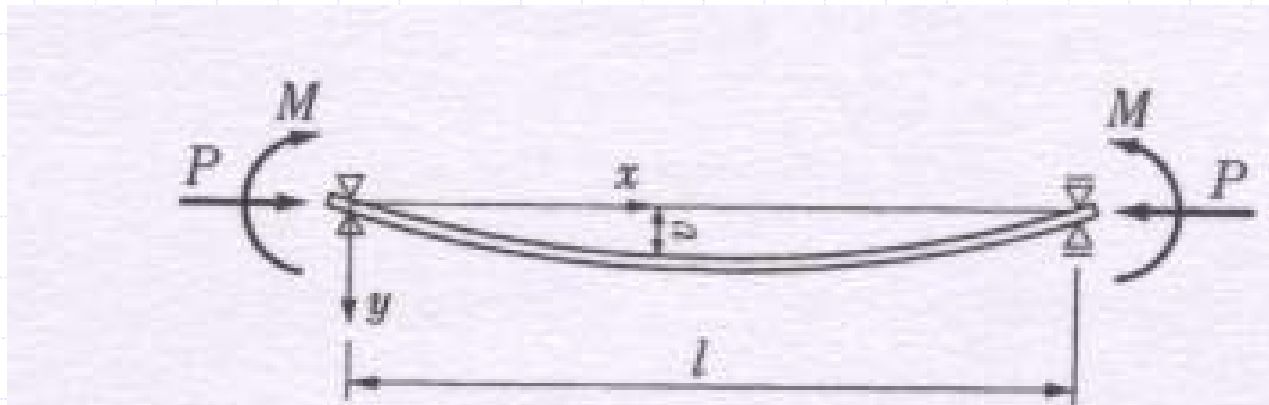
$$\sigma_{ba}^* = \sigma_{ba} \frac{M}{M_{eq}}$$

$$\frac{M_{eq}}{M} = C_m = 0.6 + 0.4\kappa \leq 0.4$$

$$\kappa = \frac{M_2}{M_1}, \quad M_1 \geq M_2$$



4. 軸力と曲げを受ける部材



安全性照査

◆ 応力照査

$$\sigma_c + \frac{\sigma_{bcy}}{1 - \frac{\sigma_c}{\sigma_{eay}}} + \frac{\sigma_{bcz}}{1 - \frac{\sigma_c}{\sigma_{eaz}}} \leq \sigma_{ca}$$

◆ 安定の検算

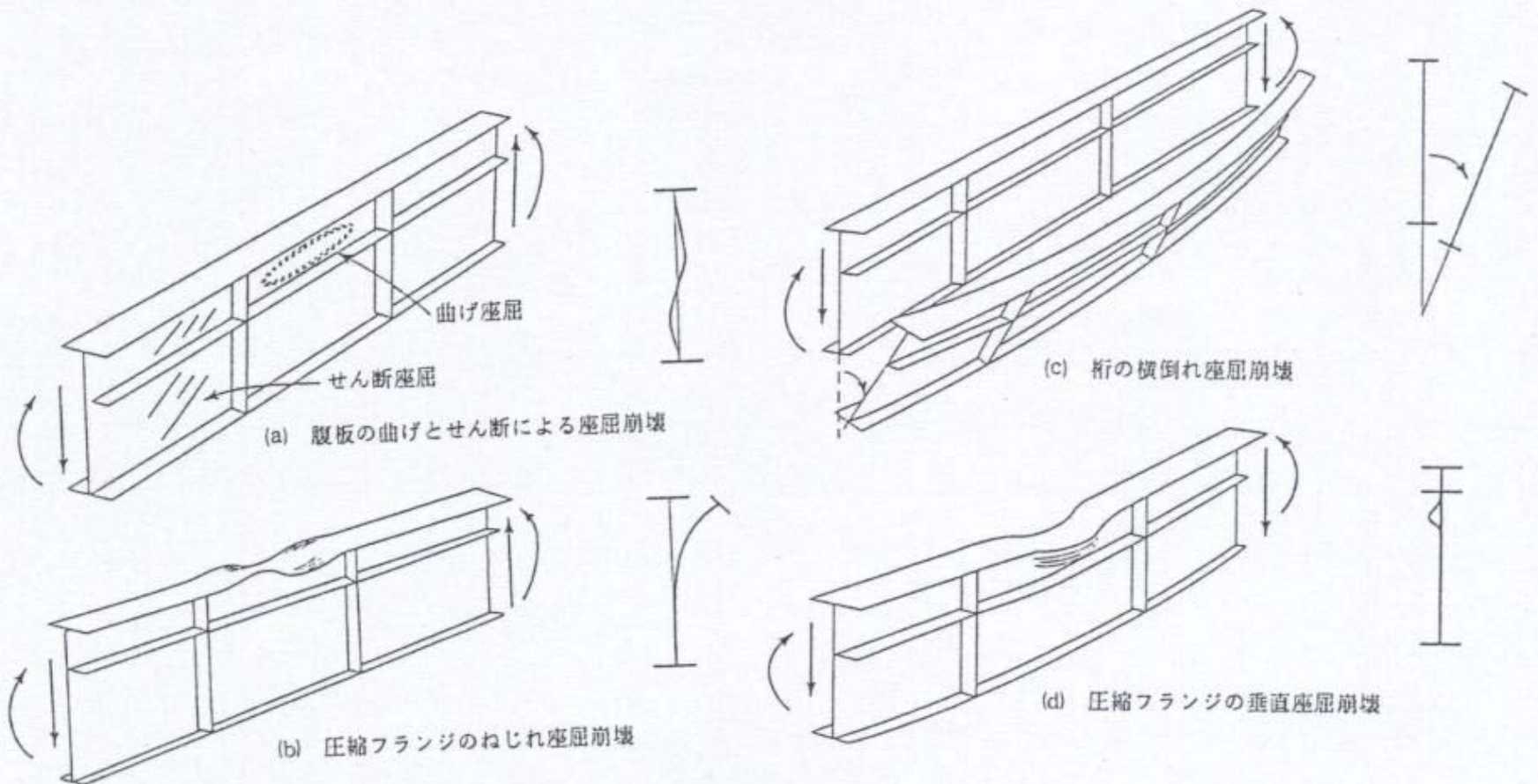
$$\frac{\sigma_c}{\sigma_{caz}} + \frac{\sigma_{bcy}}{\sigma_{bagy} \left(1 - \frac{\sigma_c}{\sigma_{eay}} \right)} + \frac{\sigma_{bcz}}{\sigma_{ba0} \left(1 - \frac{\sigma_c}{\sigma_{eaz}} \right)} \leq 1$$

◆ 局部座屈照査

$$\sigma_c + \frac{\sigma_{bcy}}{1 - \frac{\sigma_c}{\sigma_{eay}}} + \frac{\sigma_{bcz}}{1 - \frac{\sigma_c}{\sigma_{eaz}}} \leq \sigma_{cal}$$

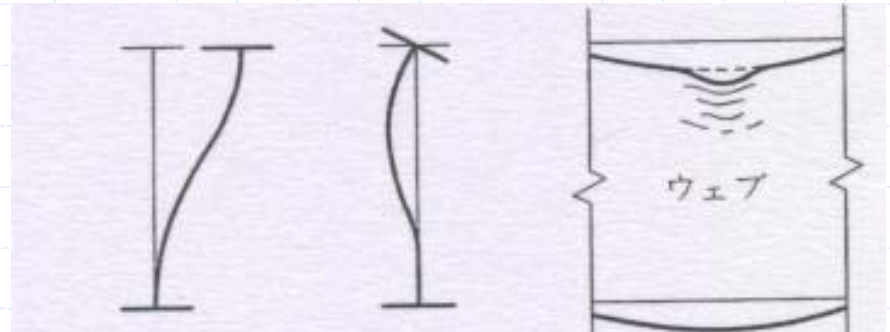
$$M_{max} = M_0 \frac{1}{1 - \frac{P}{P_E}}$$

5. 鋼げた



鋼桁たの崩壊形式

- ◆ 桁の曲げによる圧縮フランジの側方への座屈
 - 横倒れ座屈への対処
- ◆ 桁の曲げによる圧縮フランジのねじれ座屈
 - 純圧縮を受ける板要素(他端自由)の局部座屈への対処
- ◆ 桁の曲げによる圧縮フランジの垂直座屈
 - 圧縮フランジのかなり薄い腹板へのくい込みへの対処
- ◆ 曲げとせん断による腹板の座屈



水平座屈

ねじれ座屈

垂直座屈

5.1 板の幅厚比制限

(1) 座屈に対する安全率

- ◆ 垂直補剛材を有する場合、張力場作用による座屈後強度が期待できる。



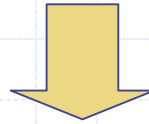
- ◆ 座屈強度に対する安全率の低減で調整
 - 純圧縮: 1.7、純曲げ: 1.4、純せん断: 1.25

$$\nu = 1.25 + (0.3 + 0.15 \varphi) e^{-4.3 \eta} \geq 1.25$$

$$\eta = \frac{\tau}{\sigma}$$

(2) 座屈パラメータ

- ◆ 残留応力と曲げによる直応力分布から、残留応力が腹板の曲げ座屈に及ぼす影響小さい
- ◆ 水平補剛材を有する腹板の圧縮フランジに隣接パネルに対しては、強度低下の影響を考慮



- ◆ 残留応力などによる座屈強度および後座屈強度の低下の影響を、座屈パラメータに低減係数として考慮

$$R = 0.9 - 0.1\psi$$

純圧縮: 0.8、純曲げ: 1.0

腹板の最大幅厚比

表-10.4.1 鋼げたの最小腹板厚

鋼 種	SS400 SM400 SMA400W	SM490	SM490Y SM520 SMA490W	SM570 SMA570W
水平補剛材のないとき	$\frac{b}{152}$	$\frac{b}{130}$	$\frac{b}{123}$	$\frac{b}{110}$
水平補剛材を1段用いるとき	$\frac{b}{256}$	$\frac{b}{220}$	$\frac{b}{209}$	$\frac{b}{188}$
水平補剛材を2段用いるとき	$\frac{b}{310}$	$\frac{b}{310}$	$\frac{b}{294}$	$\frac{b}{262}$

極端な薄い腹板厚の採用を避ける
(座屈によらない限界)

溶接ひずみ、
組み立て運搬の作業性
板の面外振動

最小腹板厚の解釈

- ◆ 圧縮と曲げとせん断の組合せ状態の座屈照査式から算出と記述
- ◆ せん断を考慮しないで算出

$$\frac{\sigma}{\sigma^*} = R^2 \qquad \sigma^* = k \frac{\pi^2 E}{12(1 - \mu^2)} \left(\frac{t}{\bar{b}} \right)^2$$

$$\left(\frac{t}{b} \right)^2 = \left(\frac{\bar{b}}{b} \right)^2 \frac{\nu \bar{\sigma}}{k R^2} \frac{12(1 - \mu^2)}{\pi^2 E}$$

$\bar{b}$: 補剛材で区切られた1パネルの幅

$\bar{\sigma}$: 補剛材で区切られた1パネルの最大縁応力度

$$\nu = 1.55 + 0.15 \varphi \geq 1.25 \quad (\eta = 0)$$

補剛材数	0	1	
区間	全	上	下
$\bar{b}/b$	1.00	0.20	0.80
$\bar{\sigma}/\sigma$	1.00	1.00	0.60
φ	-1.00	0.60	-5/3
ν	1.40	1.61	1.30
R	1.00	0.84	1.00
K	23.9	4.99	23.9
$\sigma = 140$	152	272	255
$= 185$	131	234	219
$= 210$	124	222	208
$= 255$	112	200	187

補剛材数	鋼材	計算値	道示
0	SM400	152	152
	SM490	131	130
	SM520	124	123
	SM570	112	110
1	SM400	255	256
	SM490	219	220
	SM520	208	209
	SM570	187	188
2	SM400	365	310
	SM490	313	310
	SM520	298	294
	SM570	268	262

補剛材を省略できる 腹板の最大幅厚比

$$\frac{b}{t} \leq \frac{660}{\sqrt{\tau}}$$

$$\left(\frac{\sigma}{\sigma_{cr}}\right)^2 + \left(\frac{\tau}{\tau_{cr}}\right)^2 \leq \frac{1}{\gamma_B^2}$$

$$\sigma^2 + 3\tau^2 = (1.1\sigma_a)^2$$

$$\sigma_{cr} = k_b \frac{\pi^2 E}{12(1 - \mu^2)} \left(\frac{t}{b}\right)^2$$

$$k_b \approx 23.9$$

$$\tau_{cr} = k_s \frac{\pi^2 E}{12(1 - \mu^2)} \left(\frac{t}{b}\right)^2$$

$$k_s \approx 5.34$$

表-10.4.2 垂直補剛材を省略しうるフランジ純間隔の最大値

鋼 種	SS400 SM400 SMA400W	SM490	SM490Y SM520 SMA490W	SM570 SMA570W
上下両フランジ純間隔	70t	60t	57t	50t

5.2 補剛材の位置と剛度

水平補剛材の位置

- ◆ 溶接施工性から10mm以下の腹板に対しては2段以上の位置は好ましくない
- ◆ 4辺単純支持、純曲げに対する最適位置
- ◆ 曲げとせん断が共存する応力状態に対して必ずしも最適位置ではない。

水平補剛材	道示	計算値
1段	0.2	0.2
2段	0.14	0.12
	0.36	0.27

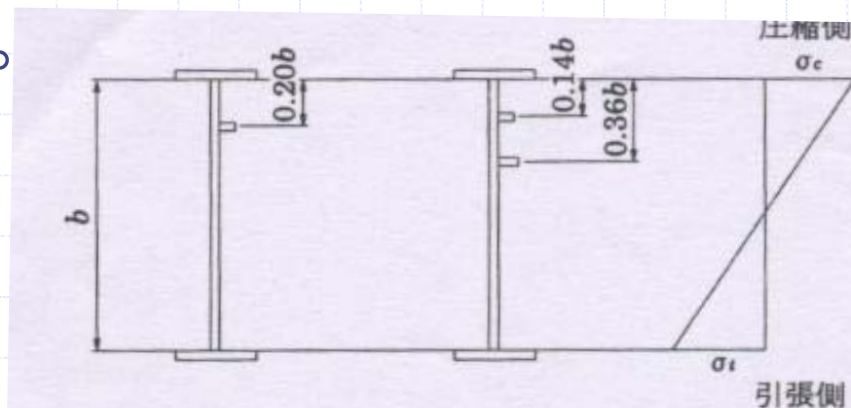


図-10.4.1 上下両フランジの純間隔

垂直補剛材の配置と間隔

$$\left(\frac{\sigma}{\sigma_{cr}}\right)^2 + \left(\frac{\tau}{\tau_{cr}}\right)^2 \leq \frac{1}{\gamma_B^2}$$

$$\sigma_{cr} = k_b \frac{\pi^2 E}{12(1 - \mu^2)} \left(\frac{t}{b}\right)^2$$

$$k_b \approx 23.9$$

$$k_s \approx 4 \left\{ \frac{4}{3} + \frac{1}{(a/b)^2} \right\}, \quad \frac{a}{b} \geq 1$$

$$\tau_{cr} = k_s \frac{\pi^2 E}{12(1 - \mu^2)} \left(\frac{t}{b}\right)^2$$

$$k_s \approx 4 \left\{ 1 + \frac{4}{3(a/b)^2} \right\}, \quad \frac{a}{b} < 1$$

◆ 水平補剛材を用いない場合

$$\gamma_B = 1.25 \quad \left(\frac{b}{100t}\right)^4 \left[\left(\frac{\sigma}{345}\right)^2 + \left\{ \frac{\tau}{77 + 58(b/a)^2} \right\}^2 \right] \leq 1, \quad 1.5 \geq \frac{a}{b} > 1$$

$$\left(\frac{b}{100t}\right)^4 \left[\left(\frac{\sigma}{345}\right)^2 + \left\{ \frac{\tau}{58 + 77(b/a)^2} \right\}^2 \right] \leq 1, \quad \frac{a}{b} \leq 1$$

補剛材の所要剛度

$$I_s = \frac{bt^3}{11} \gamma_{req}$$

◆ 所要剛比算定式の複雑さを避けた

水平補剛材に対して: $\gamma_{req} = 30 \left(\frac{a}{b} \right)$

◆ 腹板がフランジの降伏まで耐荷力を保持

垂直補剛材に対して: $\gamma_{req} = 8 \left(\frac{b}{a} \right)^2$

◆ 腹板の座屈後の十分な剛性を保持

◆ 補剛材自身の局部座屈を起こさない幅厚比を確保

$$b_s \geq \frac{b}{30} + 50 \text{ mm} \quad t_s \geq \frac{b_s}{13}$$

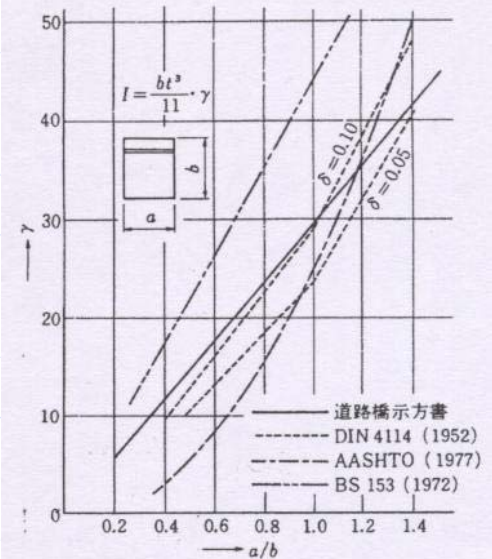


図-解 10.4.10

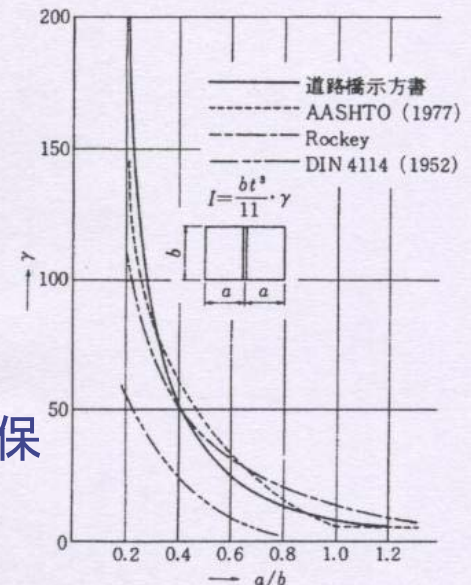
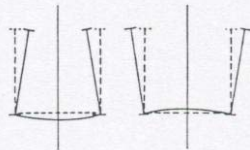
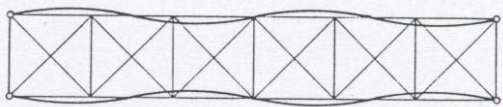


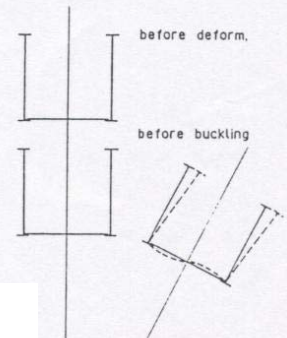
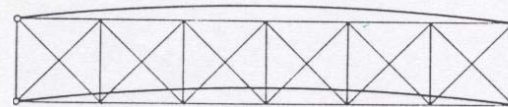
図-解 10.4.7

5.3 構造全体としての安定性

- ◆ 主桁の支間長に比して主桁間隔が非常に狭い桁橋では、全体座屈に注意
- ◆ 支間長 $>$ 腹板間隔の18倍
- ◆ 断面全体における水平方向断面2次モーメント $<$ 鉛直方向断面2次モーメント



対称座屈



非対称座屈

ご静聴ありがとうございました。