

設計法の変遷 3) 鋼構造
— 鋼構造の耐荷力設計の変遷 —

小野 潔
早稲田大学教授

鋼構造の耐荷力設計の変遷

—道路橋示方書の規定の変遷—

早稲田大学 理工学術院

小野 潔

本日の講演の内容

- はじめに
- 昭和48年 道示 鋼橋編の耐荷力規定
- 昭和55年 道示 鋼橋編の耐荷力規定
- 平成 8年 道示 鋼橋編・耐震設計編の規定
- 平成24年 道示 鋼橋編・耐震設計編の規定
- 平成29年 道示 鋼橋編・耐震設計編の規定
- おわりに

昭和48年 道示 鋼橋編の耐荷力規定

— 道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編 —

S48道示の耐荷力規定

- 現行道示の耐荷力規定の基となった道示.
- S39道示と比較して, ページ数が大幅に増加.
- 改訂WGに大学の先生が多く参加し, 関西道路研究会等での検討とも共同して耐荷力規定を作成.
- 道示の解説には, 道示の根拠, 理論的な背景が詳細に記述.
- リベット構造から溶接構造を主対象とした規定への変更.
- 引張と圧縮の許容応力度の値が同じに変更.
- SM58級の鋼材の許容応力度の追加.

S48道示の改訂分科会とメンバー

示方書改訂分科会各班名簿 (50音順)

◎主査 ○幹事

(共通班)

◎杏掛哲男	榎本守	大川勝敏
岩松幸雄	柿崎博雄	斉木三郎
太田実	○竹内俊夫	田中宏昭
○佐藤信彦	○星野演	森寛
中島祥介		

(座屈班)

◎小松定夫	石岡英男	伊藤敏一
赤尾隆夫	○加藤隆夫	川上博章
岡村隆夫	中井市藏	播本沢
新田芳孝	三上	米沢
福本晴士		

(継手班)

◎田島二郎	◎中村正平	蟹沢康人
明石重雄	池田尚治	矢幡健
○椎泰敏	中島拓	
山本崇史		

(床版班)

◎国広哲男	神田創造	佐藤悟昌
梅本尚孝	田平武輔	寺田博
椎泰敏	松田真一	
○藤原稔		

(プレートガーダー班)

◎佐々木道夫	◎西野文雄	菊野衛
伊藤学	○井上啓一	前田邦夫
鈴木康弘	深沢泰晴	
山本崇史		

(合成桁班)

◎前田幸雄	荒井徹	上原基也
赤尾親助	岡村宏一	佐伯章美
岡正英	高山弘美	○日種俊哉
田井戸米好	矢幡健	山本和弘
湊勝比古		

(トラス・アーチ班)

◎西脇威夫	◎堀井健一郎	高尾孝二
○安藤敏三	川原睦人	
山中政好		

(吊橋・斜張橋班)

◎伊藤学	岡内功	沢井広之
青柳史郎	成田信之雄	西田繁一
○田中宏一	宮田利雄	
長谷川鎌一		

(パイプ構造班)

◎成瀬泰雄	◎沢井広之	中島英治
川嶋勇	寺本康二	
○三浦尚		

(ラーメン構造班)

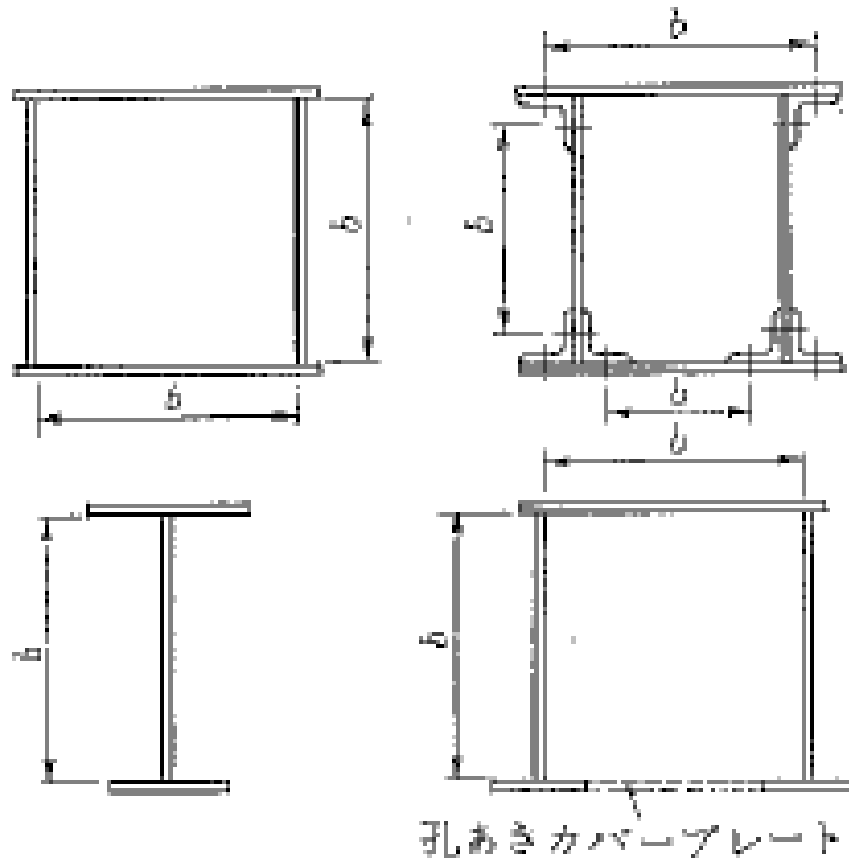
◎加藤正晴	北川正博	前田邦夫
秋山成興	光岡毅	山寺徳明
○三浦尚		

(施工班)

◎佐戸松二	阿部英彦	○池田甫
明石重雄	金山哲三	国広哲男
神崎博雄	久末達雄	関野昌文
齐木三郎	高島春生	堀川浩甫
高岡可朗	山本崇史	
松岡亮一		

出典：日本道路協会，道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編，昭和48年2月。

道示で示される鋼部材の例



【S48道示の例】

図-43・1

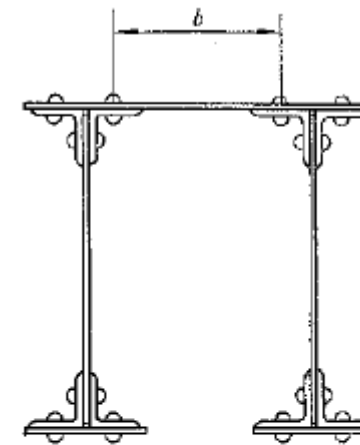
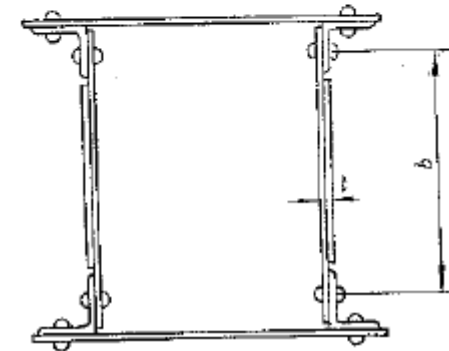


図-43・3



【S39道示の例】

出典：日本道路協会，道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編，昭和48年2月，
日本道路協会 鋼道路橋設計示方書 解説，昭和39年6月。

鋼長柱の耐荷力曲線

応力の種類	鋼種	SS 41, SMA 41	SM 41	SS 50	
1	軸方向引張応力度 (純断面積につき)	1,400		1,700	
2	軸方向圧縮応力度 (総断面積につき) l : 各章で規定する有効 座屈長(cm) r : 部材断面積の断面二 次半径(cm)	(a) $\frac{l}{r} \leq 20$	1,400	(a) $\frac{l}{r} \leq 17$	1,700
		(b) $20 < \frac{l}{r} < 93$	$1,400 - 8.4\left(\frac{l}{r} - 20\right)$	(b) $17 < \frac{l}{r} < 86$	$1,700 - 11.3\left(\frac{l}{r} - 17\right)$
		(c) $93 \leq \frac{l}{r}$	$\frac{12,000,000}{6,700 + (l/r)^2}$	(c) $86 \leq \frac{l}{r}$	$\frac{12,000,000}{5,700 + (l/r)^2}$

SM 50	SM 50Y, SM 53 SMA 50	SM 58, SMA 58	
1,900	2,100	2,600	
(a) $\frac{l}{r} \leq 15$	1,900	(a) $\frac{l}{r} \leq 14$	2,600
(b) $15 < \frac{l}{r} < 80$	$1,900 - 13\left(\frac{l}{r} - 15\right)$	(b) $14 < \frac{l}{r} < 67$	$2,600 - 21\left(\frac{l}{r} - 14\right)$
(c) $80 \leq \frac{l}{r}$	$\frac{12,000,000}{5,000 + (l/r)^2}$	(c) $67 \leq \frac{l}{r}$	$\frac{12,000,000}{3,600 + (l/r)^2}$

【S48道示】

種類	鋼材	許容
1.	軸方向引張応力度 (純断面積につき)	SS 41 1,400
2.	軸方向圧縮応力度 (総断面積につき)	SS 41 圧縮部材 $0 < l/r \leq 110$ $1,300 - 0.06(l/r)^2$ $l/r > 110$ $7,200,000/(l/r)^2$ 圧縮添接材 1,300
	圧縮部材 l : 部材の長さ (cm) r : 部材断面積の断面 二次半径 (cm)	

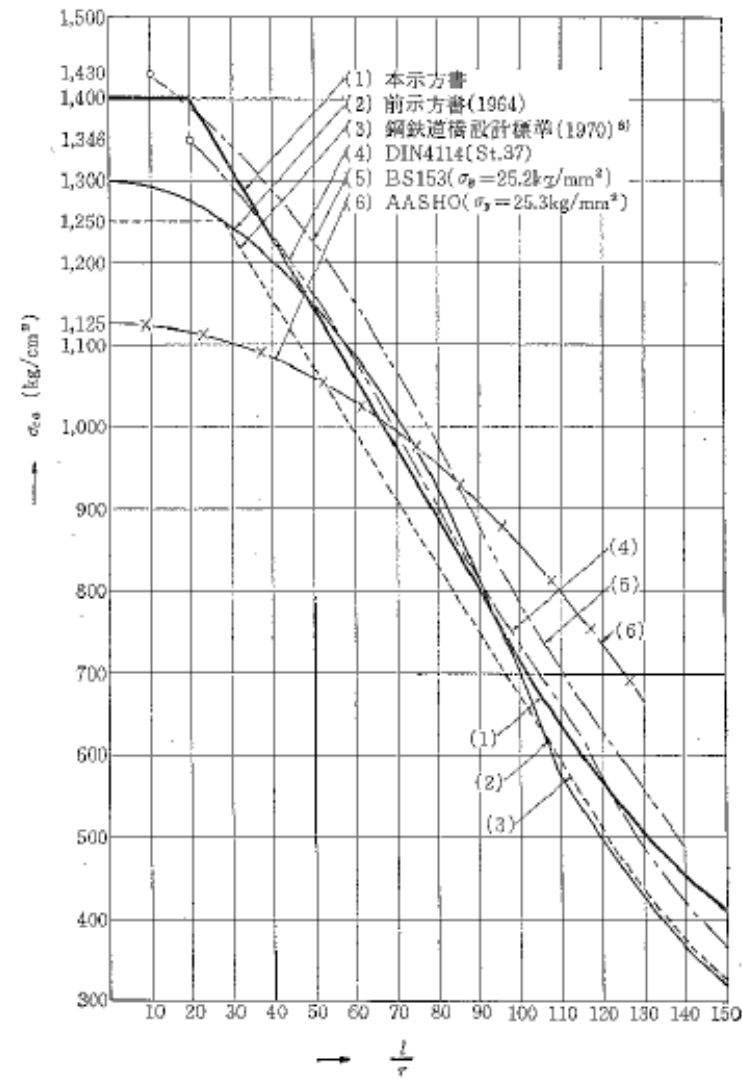
応力度 (kg/cm ²)	
SS 50	SM 50 A
1,700	1,900
$0 < l/r \leq 100$	$0 < l/r \leq 90$
$1,600 - 0.09(l/r)^2$	$1,800 - 0.11(l/r)^2$
$l/r > 100$	$l/r > 90$
$7,200,000/(l/r)^2$	$7,200,000/(l/r)^2$
1,600	1,800

【S39道示】

出典: 日本道路協会, 道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編, 昭和48年2月,
日本道路協会 鋼道路橋設計示方書 解説, 昭和39年6月.

鋼長柱の耐荷力曲線

応力の種類		鋼種	SS 41, SMA 41	SM 41	SS 50
1	軸方向引張応力度 (純断面積につき)		1,400		1,700
2	軸方向圧縮応力度 (総断面積につき) l : 各章で規定する有効 座屈長 (cm) r : 部材断面積の断面二 次半径 (cm)	(a) $\frac{l}{r} \leq 20$	1,400		(a) $\frac{l}{r} \leq 17$ 1,700
		(b) $20 < \frac{l}{r} < 93$	$1,400 - 8.4 \left(\frac{l}{r} - 20 \right)$		(b) $17 < \frac{l}{r} < 86$ $1,700 - 11.3 \left(\frac{l}{r} - 17 \right)$
		(c) $93 \leq \frac{l}{r}$	$\frac{12,000,000}{5,700 + (l/r)^2}$		(c) $86 \leq \frac{l}{r}$ $\frac{12,000,000}{5,700 + (l/r)^2}$
		SM 50	SM 50Y, SM 53 SMA 50	SM 58, SMA 58	
		1,900	2,100		2,600
(a)	$\frac{l}{r} \leq 15$	1,900	(a) $\frac{l}{r} \leq 14$	2,100	(a) $\frac{l}{r} \leq 14$ 2,600
(b)	$15 < \frac{l}{r} < 80$	$1,900 - 13 \left(\frac{l}{r} - 15 \right)$	(b) $14 < \frac{l}{r} < 76$	$2,100 - 15 \left(\frac{l}{r} - 14 \right)$	(b) $14 < \frac{l}{r} < 67$ $2,600 - 21 \left(\frac{l}{r} - 14 \right)$
(c)	$80 \leq \frac{l}{r}$	$\frac{12,000,000}{5,000 + (l/r)^2}$	(c) $76 \leq \frac{l}{r}$	$\frac{12,000,000}{4,500 + (l/r)^2}$	(c) $67 \leq \frac{l}{r}$ $\frac{12,000,000}{3,600 + (l/r)^2}$



図解 2.2.3

出典：日本道路協会，道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編，昭和48年2月。

曲げの耐荷力曲線

応力の種類	鋼種	SS 41, SMA 41	SS 50	SM 50
曲げ応力度				
(1) けたの引張縁 (純断面積につき)		1,400	1,700	1,900
(2) けたの圧縮縁 (純断面積につき)				
(2.1) 圧縮フランジが直接鉄筋コンクリート床版などで固定されている場合		1,400	1,700	1,900
(2.2) 圧縮フランジが直接鉄筋コンクリート床版などで固定されていない場合				
(2.2.1) I形断面・U形断面				
1) $\frac{A_w}{A_s} \leq 2$	(a) $\frac{l}{b} \leq 4.5$ 1,400 (b) $4.5 < \frac{l}{b} \leq 30$	(a) $\frac{l}{b} \leq 4.3$ 1,700 (b) $4.3 < \frac{l}{b} \leq 30$	(a) $\frac{l}{b} \leq 4.0$ 1,900 (b) $4.0 < \frac{l}{b} \leq 30$	
A_w : 腹板の純断面積 (cm ²) A_s : 圧縮フランジの純断面積 (cm ²)	$1,400 - 24\left(\frac{l}{b} - 4.5\right)$	$1,700 - 32\left(\frac{l}{b} - 4.3\right)$	$1,900 - 38\left(\frac{l}{b} - 4.0\right)$	
2) $\frac{A_w}{A_s} > 2$ $\left(K = \sqrt{3 + \frac{A_w}{2A_s}}\right)$	(a) $K \frac{l}{b} \leq 9$ 1,400 (b) $9 < K \frac{l}{b}$ $1,400 - 12\left(K \frac{l}{b} - 9\right)$ ただし $\frac{l}{b} \leq 30$	(a) $K \frac{l}{b} \leq 8.6$ 1,700 (b) $8.6 < K \frac{l}{b}$ $1,700 - 16\left(K \frac{l}{b} - 8.6\right)$ ただし $\frac{l}{b} \leq 30$	(a) $K \frac{l}{b} \leq 8$ 1,900 (b) $8 < K \frac{l}{b}$ $1,900 - 19\left(K \frac{l}{b} - 8\right)$ ただし $\frac{l}{b} \leq 30$	
ここに、 l : フランジ固定点間距離 (cm)、固定点は床げた・横橋・対横橋などの取付け部における骨組線と下路プレートガーダーにおいてはノーブレース間隔とする。 b : 圧縮フランジの幅 (cm)				
(2.2.2) *形断面 箱形断面	1,400	1,700	1,900	

【S48道示】

注) SM50Y級, SM58級は省略

種類	許容応力度 (kg/cm ²)		
	SS 41	SS 50	SM 50 A
3. 曲げ応力度			
けたの引張縁 (純断面積につき)	1,400	1,700	1,900
けたの圧縮縁 (純断面積につき)	$1,300 - 0.6(l/b)^2$	$1,600 - 0.9(l/b)^2$	$1,800 - 1.1(l/b)^2$
l : フランジ固定点間の距離 (cm) b : フランジの幅 (cm)	ただし $l/b \leq 30$	ただし $l/b \leq 30$	ただし $l/b \leq 30$
ただし鉄筋コンクリート床版などで直接圧縮フランジが固定されたけたの場合	1,300	1,600	1,800

【S39道示】

出典: 日本道路協会, 道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編, 昭和48年2月,
日本道路協会 鋼道路橋設計示方書 解説, 昭和39年6月.

両縁支持板の限界幅厚比

鋼種	板厚 t	
	純圧縮	圧縮と曲げ
SS 41 SM 41 SMA 41	$\frac{b}{40}$	$\frac{b}{26\varphi^2 + 4\varphi + 40}$
SS 50	$\frac{b}{36}$	$\frac{b}{24\varphi^2 + 4\varphi + 36}$
SM 50	$\frac{b}{34}$	$\frac{b}{22\varphi^2 + 4\varphi + 34}$
SM 50Y SM 53 SMA 50	$\frac{b}{32}$	$\frac{b}{21\varphi^2 + 3\varphi + 32}$
SM 58 SMA 58	$\frac{b}{28}$	$\frac{b}{19\varphi^2 + 3\varphi + 28}$

【S48道示】

純圧縮

鋼	板	厚さ t
S S	4 1	$b/40$
S S	5 0	$b/36$
S M	5 0 A	$b/34$

圧縮と曲げ

鋼材	厚さ
S S 4 1	$\frac{b}{20\varphi^2 + 25\varphi + 40}$
S S 5 0	$\frac{b}{18\varphi^2 + 23\varphi + 36}$
SM50A	$\frac{b}{17\varphi^2 + 21\varphi + 34}$

【S39道示】

出典：日本道路協会，道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編，昭和48年2月，
日本道路協会 鋼道路橋設計示方書 解説，昭和39年6月。

両縁支持板の実験結果

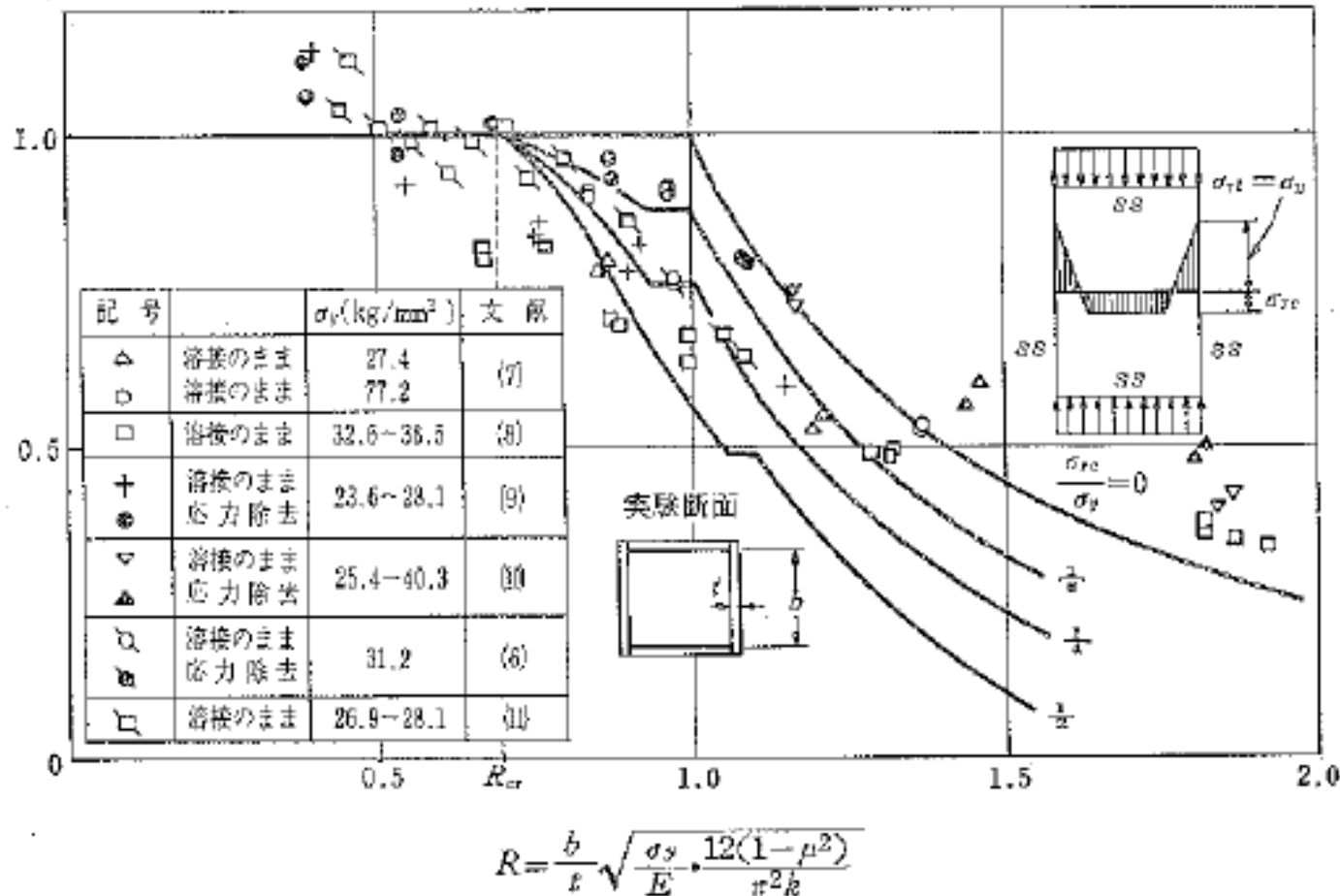


図-解 3.2.2

出典: 日本道路協会, 道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編, 昭和48年2月.

自由突出板の限界幅厚比

表-3.2.3 圧縮力を受ける自由突出部の板厚

鋼 種	板 厚 (t)
SS 41 SM 41 SMA 41	$\frac{b}{13}$
SS 50	$\frac{b}{12}$
SM 50	$\frac{b}{12}$
SM 50Y SM 53 SMA 50	$\frac{b}{11}$
SM 58 SMA 58	$\frac{b}{10}$

【S48道示】

山形鋼の自由突出脚 44 条

圧縮力を受ける山形鋼の自由突出脚の幅は、次の値をこえてはならない。

プレートガーダーのフランジにおいては厚さの	12.5 倍
軸方向圧縮力を受ける主要部材においては厚さの	12.5 倍
二次部材においては厚さの	17 倍

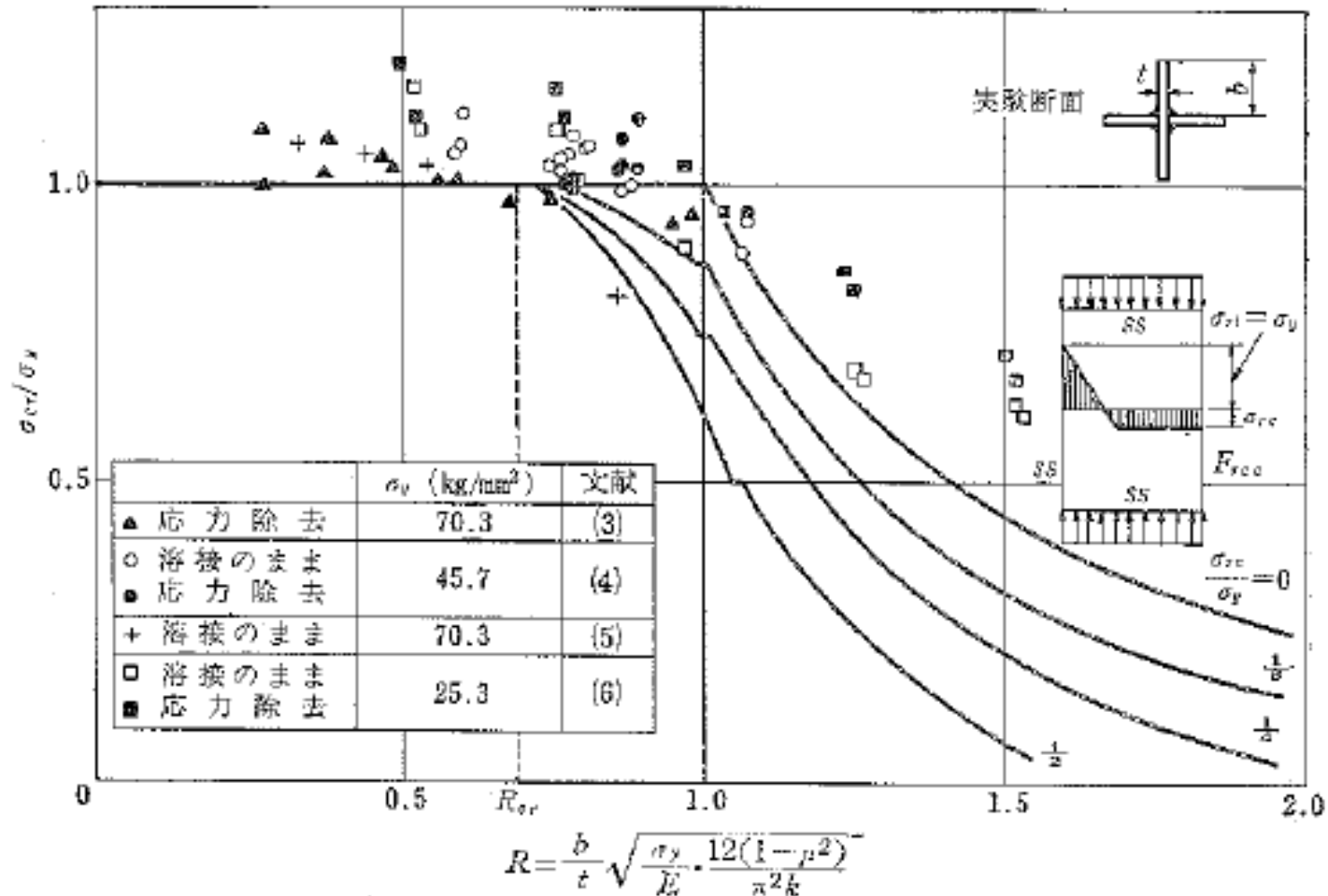
表-44・1

鋼 材	降伏点応力 (kg/cm^2)	$\sigma_{cr}=0.95\sigma_y$ (kg/cm^2)	b/t
S S 4 1	2,300	2,185	16.0
S S 5 0	2,800	2,660	14.7
S M 5 0 A	3,200	3,040	13.8

【S39道示】

出典：日本道路協会，道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編，昭和48年2月，
日本道路協会 鋼道路橋設計示方書 解説，昭和39年6月。

自由突出板の限界幅厚比



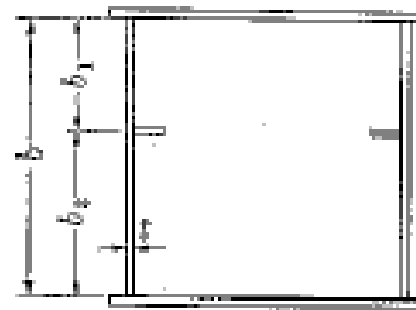
図解 3.2.1

出典: 日本道路協会, 道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編, 昭和48年2月.

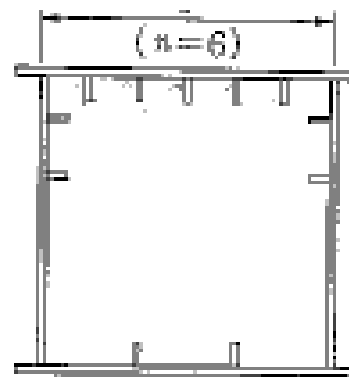
補剛板の限界幅厚比

表-3.4.1 補剛された圧縮板の板厚

鋼種	板厚 (t)
SS 41 SM 41 SMA 41	$\frac{b}{40n}$
SM 50	$\frac{b}{34n}$
SM 50Y SM 53 SMA 50	$\frac{b}{32n}$
SM 58 SMA 58	$\frac{b}{28n}$



(a) 不等間隔



(b) 等間隔

【補剛板】

鋼種	板
	純圧縮
SS 41 SM 41 SMA 41	$\frac{b}{40}$
SS 50	$\frac{b}{36}$
SM 50	$\frac{b}{34}$
SM 50Y SM 53 SMA 50	$\frac{b}{32}$
SM 58 SMA 58	$\frac{b}{28}$

【両縁支持板】

出典：日本道路協会，道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編，昭和48年2月。

腹板の新しい設計法

- 腹板では断面力に応じて、安全率を変化させた設計法が導入された。
- その際、鋼桁全体の「実際的な耐荷力」が強度の基準として用いられている
- 「実際的な耐荷力」とは、上下フランジ等の骨組みの降伏・座屈・大変形、腹板自体の降伏、鋼桁全体のタワミの著しい増加等、実用的見地からの耐荷力と定義している。
- 安全率は、あくまでも鋼桁全体の「実際的な耐荷力」と、腹板座屈応力度との関係を考慮して、各パネルについて合理的に決定した、とされている。

腹板の安全率

- 「実際の耐荷力」に対して1.7(材料の安全率)の安全率が確保できるように、各種座屈に対する安全率を以下のように設定している。
 - (a) 純圧縮を受ける場合: 1.7
(一般的な座屈に対する安全率)
 - (b) 純曲げを受ける場合: 1.4
(既往の道示の腹板の安全率を踏襲)
 - (c) 純せん断を受ける場合: 1.25
(実験結果から決定)
- 上記の(a)~(c)の安全率と整合がとれるように、実験結果をともに、圧縮、曲げ、せん断力を受ける場合の安全率 V_B を規定している。

$$V_B = 1.25 + (0.30 + 0.15\phi)e^{-4.3\eta} \geq 1.25 \quad .$$

腹板の安全率(解説より抜粋)

すなわち、腹板の弾性座屈応力度を基準におく従来の考え方を改め、プレートガーダ全体の極限耐荷力を基準と考えたものである。ただし計算の取扱いの便宜上から、腹板の座屈応力を求め、極限耐荷力との関係は安全率の値を合理的に規定することによって処理してある。以下にこの安全率の定め方、計算の基本的考え方を説明する。

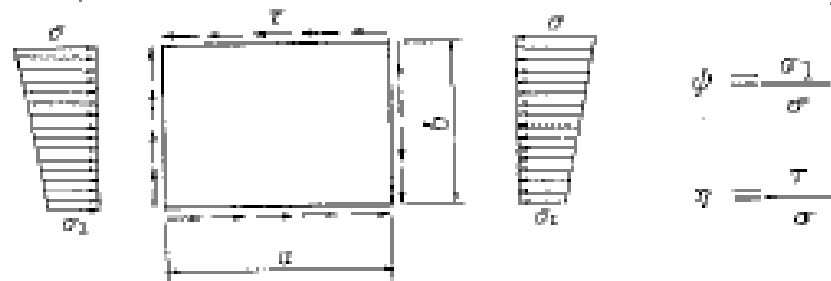
(1) 座屈安全率

プレートガーダの腹板の座屈安全率は

- 1) 純圧縮を受ける場合 1.70
- 2) 純曲げを受ける場合 1.40
- 3) 純せん断を受ける場合 1.25^{(1),(2)}

と設定し、圧縮、曲げ、せん断がそれぞれ組合わされて加わる場合を、次の一般式で与えられるものとした。

$$\nu_B = 1.25 + (0.30 + 0.15\phi)e^{-4.3\gamma} \geq 1.25 \quad (\text{解 8.4.1})$$



出典：日本道路協会，道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編，昭和48年2月。

腹板の限界幅厚比

表-8.4.1 プレートガーダーの最小腹板厚

鋼種	SS 41 SM 41 SMA 41	SM 50	SM 50Y SM 53 SMA 50	SM 58 SMA 58
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	$\frac{b}{310}$	$\frac{b}{310}$	$\frac{b}{294}$	$\frac{b}{262}$

ここに、 b : 上下両フランジの純間隔 (cm)

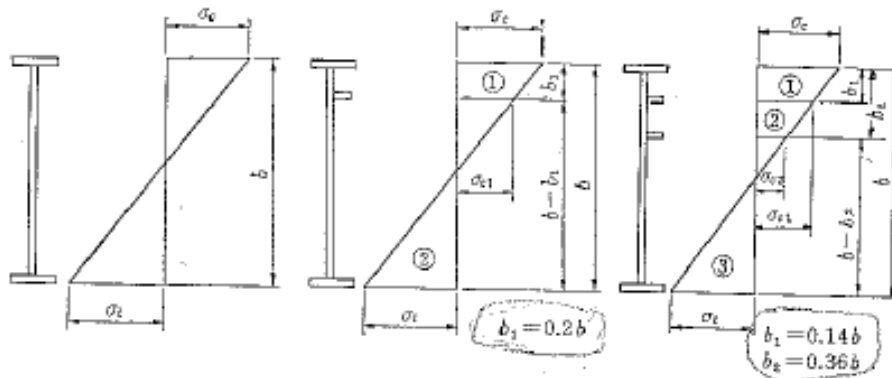


図-8.4.1 腹板の応力度と水平補剛材の位置

【S48道示】

腹板の厚さ 93 条

腹板の厚さは次式で計算した値以上でなければならない。

(1) 水平補剛材を用いない場合

表-34

鋼材	SS 41	SS 50	SM50A
腹板の最小厚さ	$b/170$	$b/154$	$b/144$

(2) 水平補剛材を1本用いた場合

表-35

腹板の最小厚さ	鋼材			備考
	SS41	SS50	SM 50A	
b_1	$b_1/50$	$b_1/46$	$b_1/44$	区間 b_1, b_2 の腹板の計算応力が許容応力に比べて著しく小さい場合にはこれらの分母の値を $\sqrt{\text{許容応力}/\text{計算応力}}$ 倍してもよい。
b_2	$b_2/95$	$b_2/85$	$b_2/80$	
b_3	$b_3/200$	$b_3/186$	$b_3/175$	

水平補剛材の位置は圧縮側から $b/5$ 付近とする。

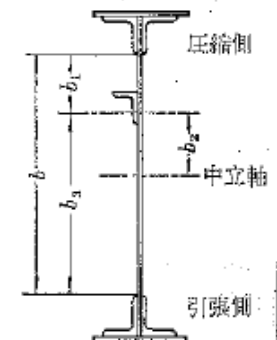
b = 上下両フランジの純間隔 (mm)

図-12



水平補剛材のない場合

図-13



水平補剛材を一本用いる場合

【S39道示】

出典：日本道路協会，道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編，昭和48年2月，
日本道路協会 鋼道路橋設計示方書 解説，昭和39年6月。

昭和55年 道示 鋼橋編の耐荷力規定

— 道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編 —

S55道示の耐荷力規定

- 板の許容応力度の大幅な改訂.
- 限界幅厚比以上の幅厚比パラメータでの耐荷力曲線式の規定.
- 連成座屈強度式が新しく規定.
- 限界幅厚比パラメータについて, 両縁支持板・自由突出板はS48と同じ, 補剛板は変更.
- 設計で対象とする状態を超えた領域での挙動を考慮して, 耐荷力曲線を設定.

最大耐力以降の挙動も考慮した安全率

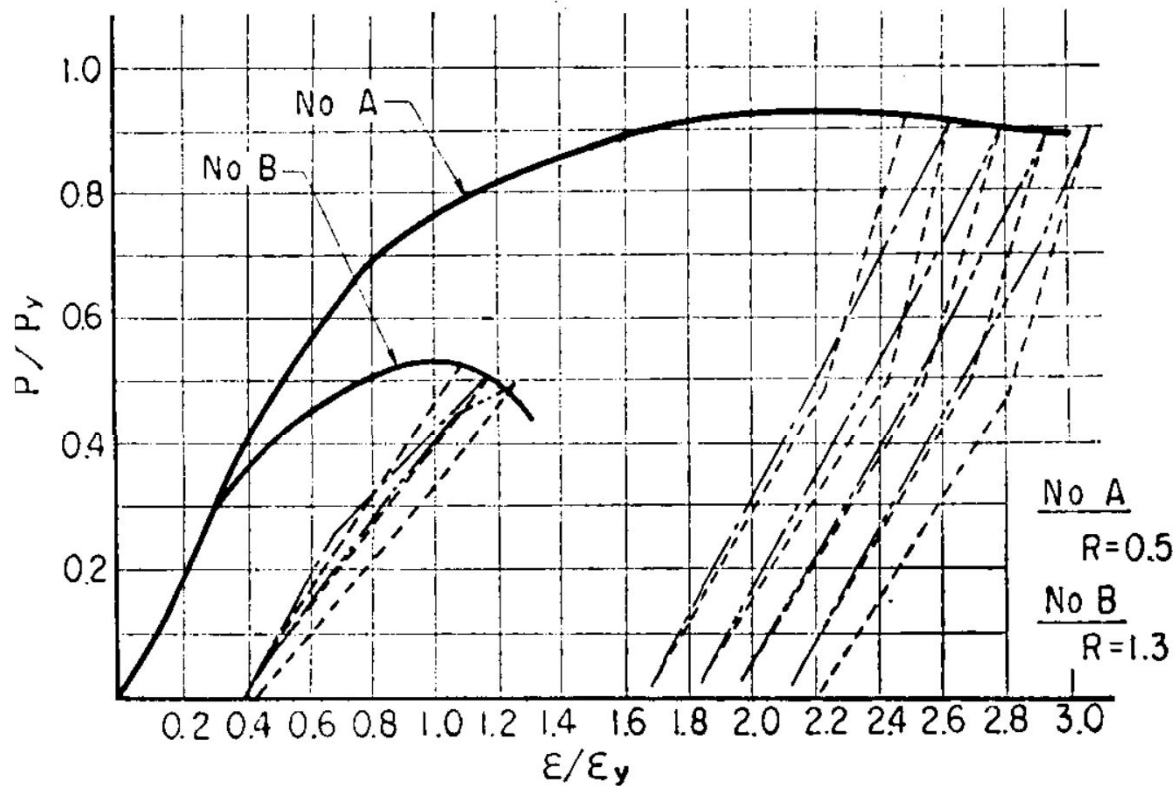


図-10 補剛板のくり返し載荷実験

出典「金井道夫, 大塚一喜:補剛板の設計法, 土木技術資料, Vol.19, No.19, 1997.

耐荷力曲線の安全余裕度(板)

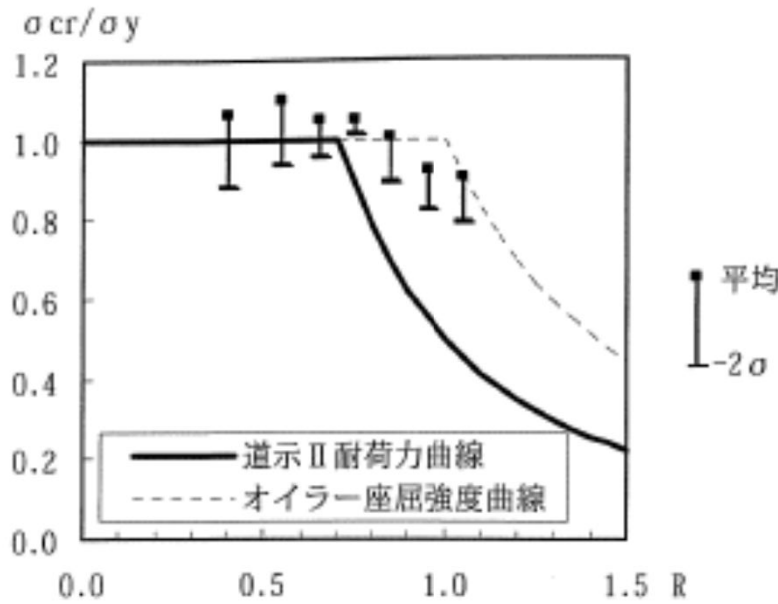


図-3.17 道示の基準耐荷力曲線と統計値の関係

(a) 自由突出板

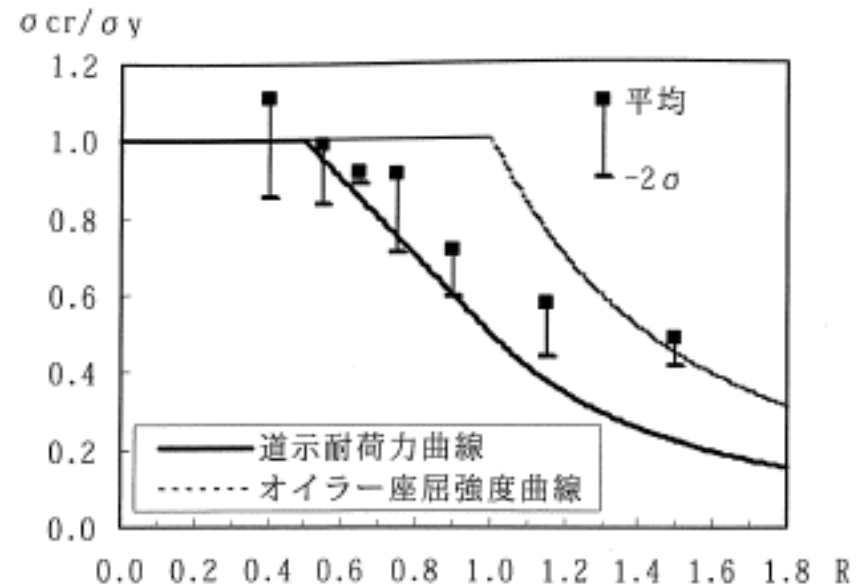


図-3.21 道示の基準耐荷力曲線と統計値の関係

(b) 補剛板

出典「独立行政法人 土木研究所:鋼材・鋼部材の強度等に関する統計データの調査, 土木研究所資料第4090号, 平成20年3月.

両縁支持板の許容応力度

表-3.2.2 両縁支持板の局部座屈に対する許容応力度

鋼種	局部座屈に対する許容応力度 (kg/cm ²)	
S S41 SM41 SMA41	1,400	: $\frac{b}{39.6f} \leq t$
	2,200,000 $\left(\frac{tf}{b}\right)^2$: $\frac{b}{80f} \leq t < \frac{b}{39.6f}$
SM50	1,900	: $\frac{b}{34.0f} \leq t$
	2,200,000 $\left(\frac{tf}{b}\right)^2$: $\frac{b}{80f} \leq t < \frac{b}{34.0f}$
SM50Y SM53 SMA50	2,100	: $\frac{b}{32.4f} \leq t$
	2,200,000 $\left(\frac{tf}{b}\right)^2$: $\frac{b}{80f} \leq t < \frac{b}{32.4f}$
SM58	2,600	: $\frac{b}{29.1f} \leq t$
SMA58	2,200,000 $\left(\frac{tf}{b}\right)^2$: $\frac{b}{80f} \leq t < \frac{b}{29.1f}$

【S55道示】

鋼種	板厚 t	
	純圧縮	圧縮と曲げ
SS 41 SM 41 SMA 41	$\frac{b}{40}$	$\frac{b}{26\varphi^2 + 4\varphi + 40}$
SS 50	$\frac{b}{36}$	$\frac{b}{24\varphi^2 + 4\varphi + 36}$
SM 50	$\frac{b}{34}$	$\frac{b}{22\varphi^2 + 4\varphi + 34}$
SM 50Y SM 53 SMA 50	$\frac{b}{32}$	$\frac{b}{21\varphi^2 + 3\varphi + 32}$
SM 58 SMA 58	$\frac{b}{28}$	$\frac{b}{19\varphi^2 + 3\varphi + 28}$

【S48道示】

出典：日本道路協会，道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編，昭和48年2月，
日本道路協会，道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編，昭和55年2月

自由突出板の許容応力度

表-3.2.3 自由突出板の局部座屈に対する許容応力度

鋼種	局部座屈に対する許容応力度 (kg/cm ²)	
SS41 SM41 SMA41	1,400	$\frac{b}{13.1} \leq t$
	$240,000 \left(\frac{t}{b}\right)^2$	$\frac{b}{16} \leq t < \frac{b}{13.1}$
SM50	1,900	$\frac{b}{11.2} \leq t$
	$240,000 \left(\frac{t}{b}\right)^2$	$\frac{b}{16} \leq t < \frac{b}{11.2}$
SM50Y SM53 SMA50	2,100	$\frac{b}{10.7} \leq t$
	$240,000 \left(\frac{t}{b}\right)^2$	$\frac{b}{16} \leq t < \frac{b}{10.7}$
SM58	2,600	$\frac{b}{9.6} \leq t$
SMA58	$240,000 \left(\frac{t}{b}\right)^2$	$\frac{b}{16} \leq t < \frac{b}{9.6}$

【S55道示】

表-3.2.3 圧縮力を受ける自由突出部の板厚

鋼種	板厚 (t)
SS 41 SM 41 SMA 41	$\frac{b}{13}$
SS 50	$\frac{b}{12}$
SM 50	$\frac{b}{12}$
SM 50Y SM 53 SMA 50	$\frac{b}{11}$
SM 58 SMA 58	$\frac{b}{10}$

【S48道示】

出典：日本道路協会，道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編，昭和48年2月，
日本道路協会，道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編，昭和55年2月

補剛板の耐荷力の考え方

新示方書の規定は、主として建設省土木研究所での実験結果などに基づいて定められているが、前示方書の規定との差を一瞥でいえば、補剛材を十分剛なものとはみなしていないということである。前示方書では、補剛板の補剛材は十分剛とみなし、補剛材で囲まれたパネルを両縁支持板として設計していたが、補剛板の補剛材は、パネルを単純支持しているとみなせるほどの剛度を有しない。この

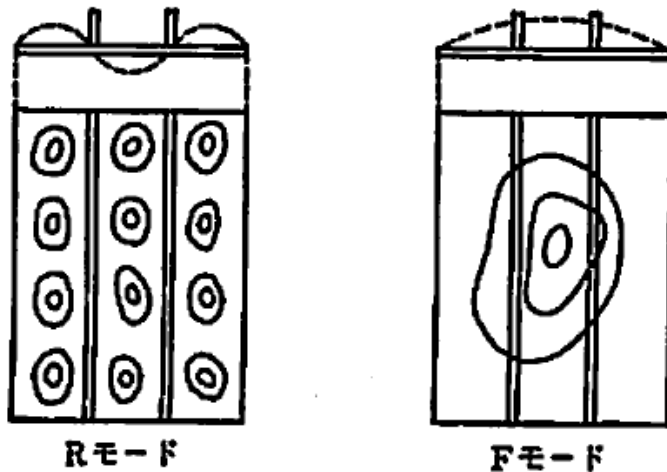


図-5 補剛板の座屈モード

【出典】金井道夫：道路橋示方書 II鋼橋編改訂の背景と運用，第2回，3章 部材に関する一般事項，橋梁と基礎，81-3，pp.6-13，1981.

補剛板の許容応力度

表-3.2.5 補剛板の局部座屈に対する許容応力度

鋼種	局部座屈に対する許容応力度 (kg/cm ²)	
SS41	1,400	$:\frac{b}{28fn} \leqq t$
SM41	$1,400 - 25 \left(\frac{b}{fn} - 28 \right)$	$:\frac{b}{56fn} \leqq t < \frac{b}{28fn}$
SMA41	$2,200,000 \left(\frac{fn}{b} \right)^2$	$:\frac{b}{80fn} \leqq t < \frac{b}{56fn}$
SM50	1,900	$:\frac{b}{24fn} \leqq t$
	$1,900 - 39 \left(\frac{b}{fn} - 24 \right)$	$:\frac{b}{48fn} \leqq t < \frac{b}{24fn}$
	$2,200,000 \left(\frac{fn}{b} \right)^2$	$:\frac{b}{80fn} \leqq t < \frac{b}{48fn}$
SM50Y	2,100	$:\frac{b}{22fn} \leqq t$
SM53	$2,100 - 45 \left(\frac{b}{fn} - 22 \right)$	$:\frac{b}{46fn} \leqq t < \frac{b}{22fn}$
SMA50	$2,200,000 \left(\frac{fn}{b} \right)^2$	$:\frac{b}{80fn} \leqq t < \frac{b}{46fn}$
SM58	2,600	$:\frac{b}{22fn} \leqq t$
	$2,600 - 67 \left(\frac{b}{fn} - 22 \right)$	$:\frac{b}{40fn} \leqq t < \frac{b}{22fn}$
	$2,200,000 \left(\frac{fn}{b} \right)^2$	$:\frac{b}{80fn} \leqq t < \frac{b}{40fn}$

【S55道示】

表-3.4.1 補剛された圧縮板の板厚

鋼種	板厚 (t)
SS 41 SM 41 SMA 41	$\frac{b}{40n}$
SM 50	$\frac{b}{34n}$
SM 50Y SM 53 SMA 50	$\frac{b}{32n}$
SM 58 SMA 58	$\frac{b}{28n}$

【S48道示】

出典：日本道路協会，道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編，昭和48年2月，
日本道路協会，道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編，昭和55年2月

補剛材の必要剛比

(3) 縦方向補剛材の必要剛比 $\gamma_{l, req}$ は次のとおりとする。

1) $\alpha \leq \alpha_0$ かつ(4)項により算出した横方向補剛材 1 個の断面二次モーメント I_t (cm⁴) が式 (3.2.6) を満足する場合

$$\gamma_{l, req} = 4\alpha^2 n \left(\frac{t_0}{t} \right)^2 (1 + n\delta_l) - \frac{(\alpha^2 + 1)^2}{n} \quad (t \geq t_0)$$

$$= 4\alpha^2 n (1 + n\delta_l) - \frac{(\alpha^2 + 1)^2}{n} \quad (t < t_0) \dots\dots\dots (3.2.5)$$

$$I_t \geq \frac{bt^3}{11} \cdot \frac{1 + n\gamma_{l, req}}{4\alpha^3} \dots\dots\dots (3.2.6)$$

2) 1)に規定する以外の場合

$$\gamma_{l, req} = \frac{1}{n} \left[\left\{ 2n^2 \left(\frac{t_0}{t} \right)^2 (1 + n\delta_l) - 1 \right\}^2 - 1 \right] \quad (t \geq t_0)$$

$$= \frac{1}{n} \left[\left\{ 2n^2 (1 + n\delta_l) - 1 \right\}^2 - 1 \right] \quad (t < t_0) \dots\dots\dots (3.2.7)$$

出典：日本道路協会，道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編，昭和55年2月

連成座屈を考慮した許容応力度

(2) 構造用鋼材の許容軸方向圧縮応力度は、式(2.2.1)により算出した値とする。

$$\sigma_{ca} = \sigma_{cag} \cdot \sigma_{cal} / \sigma_{cao} \quad \dots\dots\dots (2.2.1)$$

ここに、

- σ_{ca} : 許容軸方向圧縮応力度 (kg/cm²)
- σ_{cag} : 表-2.2.2に示す局部座屈を考慮しない許容軸方向圧縮応力度 (kg/cm²)
- σ_{cal} : 3.2.1, 3.2.2 および 3.2.3に規定する局部座屈に対する許容応力度 (kg/cm²)
- σ_{cao} : 表-2.2.2に示す局部座屈を考慮しない許容軸方向圧縮応力度の上限値 (kg/cm²)

出典: 日本道路協会, 道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編, 昭和55年2月

平成8年 道示 鋼橋編・耐震設計編の規定

- 道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編 —
- 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計 —

H8道示の耐荷力・耐震規定

- 平成7年に発生した兵庫県南部地震における鋼製橋脚の被害を受け，耐震設計編に，鋼製橋脚の塑性域での耐力，変形能を考慮した設計法が規定.
- 鋼橋編にも座屈に関する構造細目の規定が新たに追加.
- 鋼上部構造の構造細目の規定.

兵庫県南部地震における鋼製橋脚の被害例



[出典:兵庫県南部地震震災対策委員会, 兵庫県南部地震における道路橋の被災に関する調査報告書]

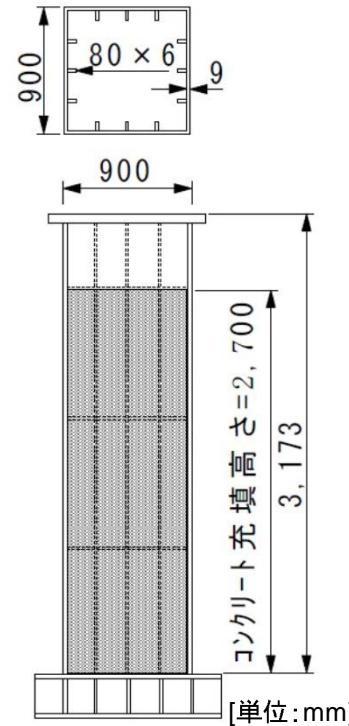


[出典:阪神高速道路公団監修, 震災から復興まで]

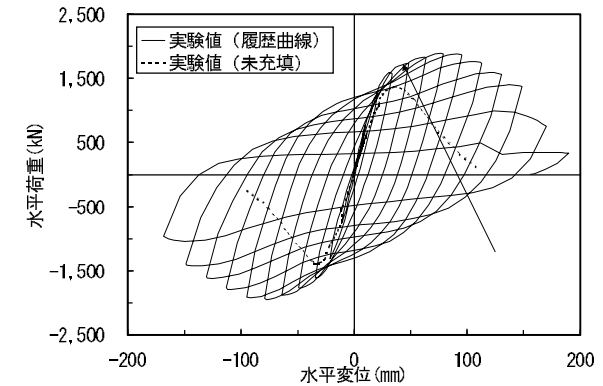
鋼製橋脚の耐震設計法・補強法開発のための研究



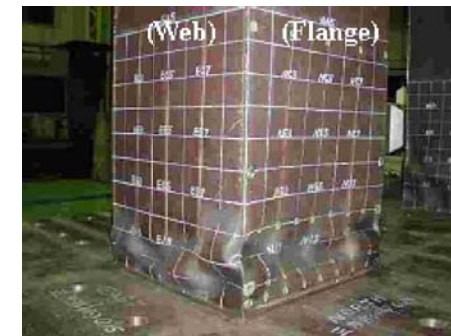
鋼製橋脚の正負交番载荷実験の例
(写真提供:土木研究所)



供試体の例¹⁾



水平荷重—水平変位関係の例¹⁾



座屈モードの例²⁾

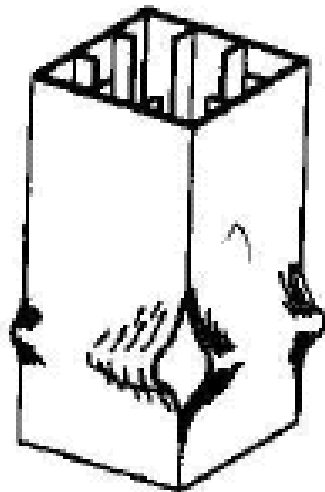
[出典]1):建設省土木研究所, 首都高速道路公団, 阪神高速道路公団, 名古屋高速道路公社, (社)鋼材倶楽部, (社)日本橋梁建設協会:道路橋橋脚の地震時限界状態設計法に関する共同研究報告書.

2)岡田誠司, 小野潔, 谷上裕明, 徳永宗正, 西村宣男:高圧縮軸力が作用する矩形断面鋼部材の耐震性能評価に関する研究, 土木学会論文集A, Vol.66, No. 3, pp.576-595, 2010. 9.]

鋼製橋脚の耐震設計の基本

- 脆性的な破壊モードの回避.
- じん性のある構造の採用. ただし, 過度に変形性能を要求すると大きな残留変位を生じる可能性があるため, その点には留意.
- 脆性的な破壊を防ぎ, じん性の向上を図れる構造細目に関する規定.
- アンカー部には塑性化しないように配慮.
- 鋼製橋脚を模した試験体による正負交番載荷実験より, L2地震動に対する鋼製橋脚の許容変位を決定.
- コンクリート充てん柱はエネルギー一定則, コンクリート無充てん柱では動的解析により地震時応答を評価する具体的な手法が記載.

脆性的な破壊モード(矩形断面の例)



(a) 矩形断面橋脚における角割れ

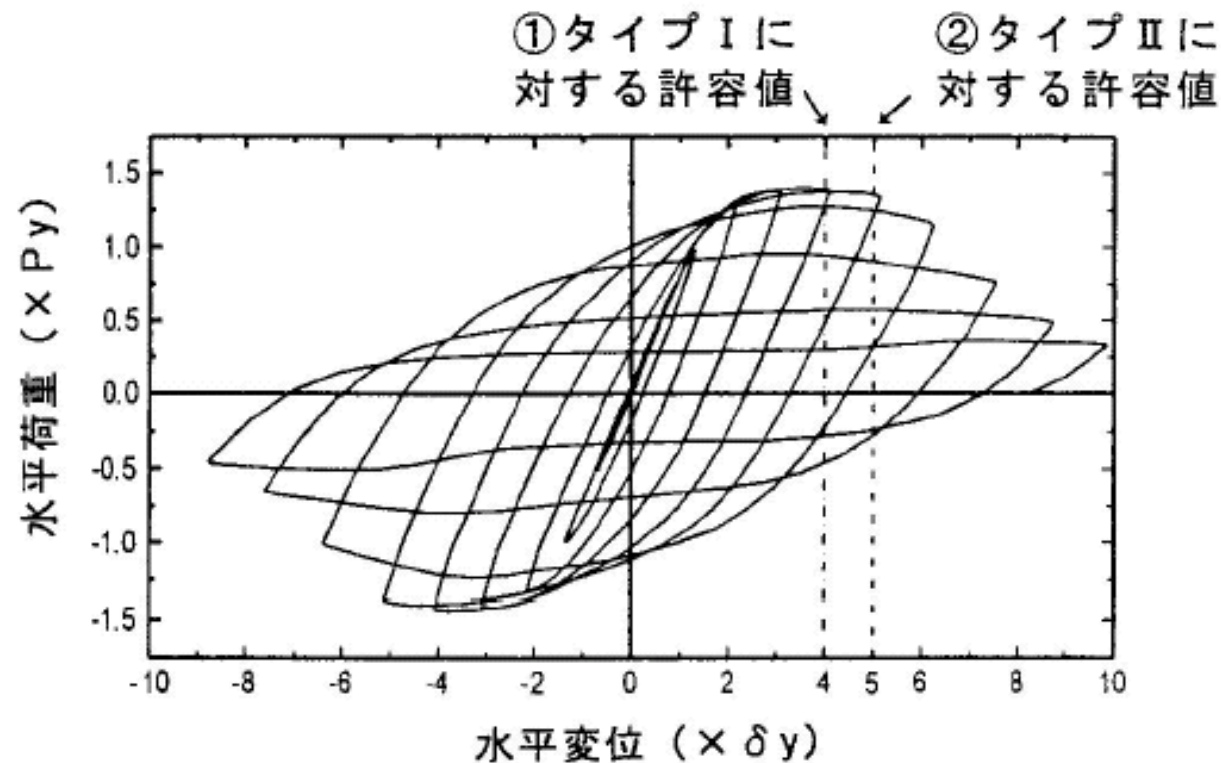
【出典:日本道路協会, 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 平成8年12月】



[出典:兵庫県南部地震震災対策委員会, 兵庫県南部地震における道路橋の被災に関する調査報告書]

コンクリート無充てん鋼製橋脚の許容変位 (角補強構造の例)

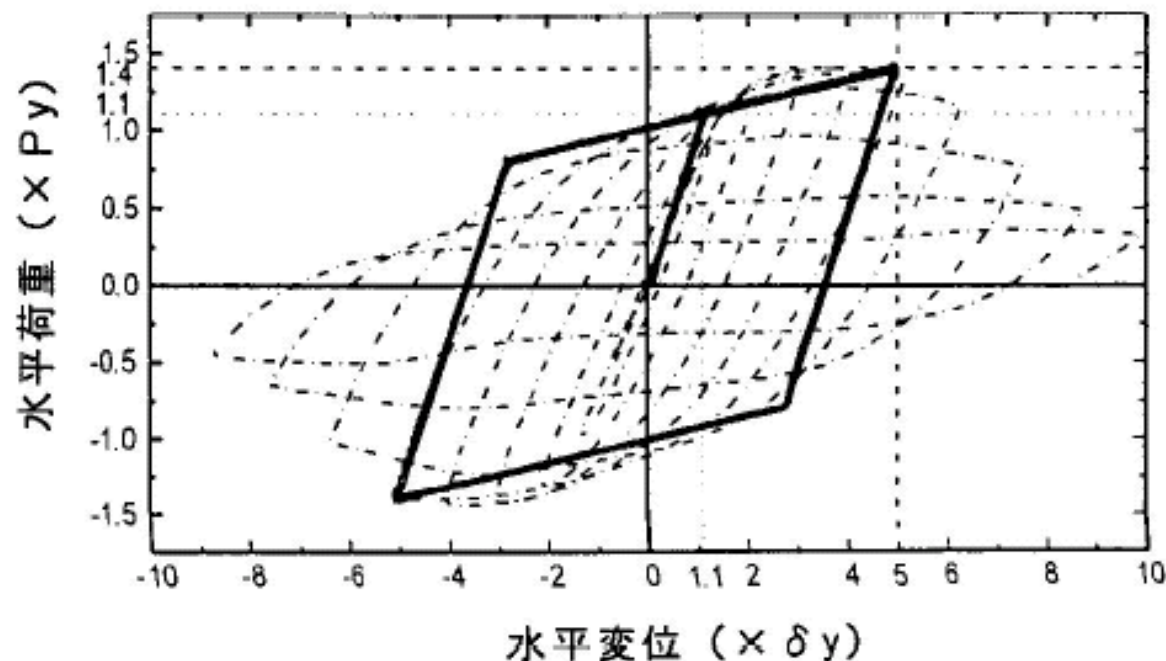
・タイプⅠ、タイプⅡの地震動に対する応答変位の許容値



出典：日本道路協会，道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，平成8年12月

コンクリート無充てん鋼製橋脚の動的解析 で用いる復元力モデル(角補強構造の例)

- ・ 動的解析に用いる復元力モデル (タイプIIの場合)



出典: 日本道路協会, 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 平成8年12月

鋼上部構造の構造細目の例

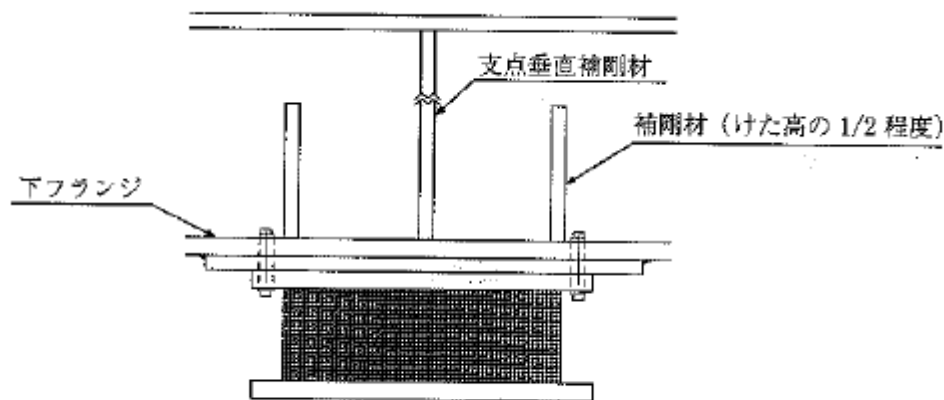


図-解 12.4.4 鉛直補剛材による支承上の鋼橋腹板の補強例

出典：日本道路協会，道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，平成8年12月.

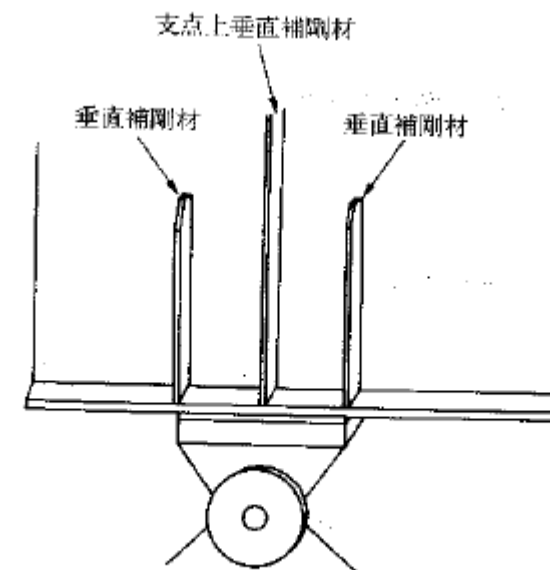


図-解 7.3.1 垂直補剛材による固定支承上の腹板の補強

出典：日本道路協会，道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，平成2年2月.

平成24年 道示 鋼橋編・耐震設計編の規定

- 道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編 —
- 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計 —

H24道示の耐荷力・耐震規定

- 設計の合理化を図るため，構造用鋼材の許容応力度・従来の許容応力度に加えて，適用頻度の高い溶接箱形断面に適用する許容応力度を設定．
- 鋼製橋脚のM- ϕ 関係の適用範囲（高軸力，長方形断面）を拡大．

鋼長柱の耐荷力規定

■ 圧縮柱の許容応力度

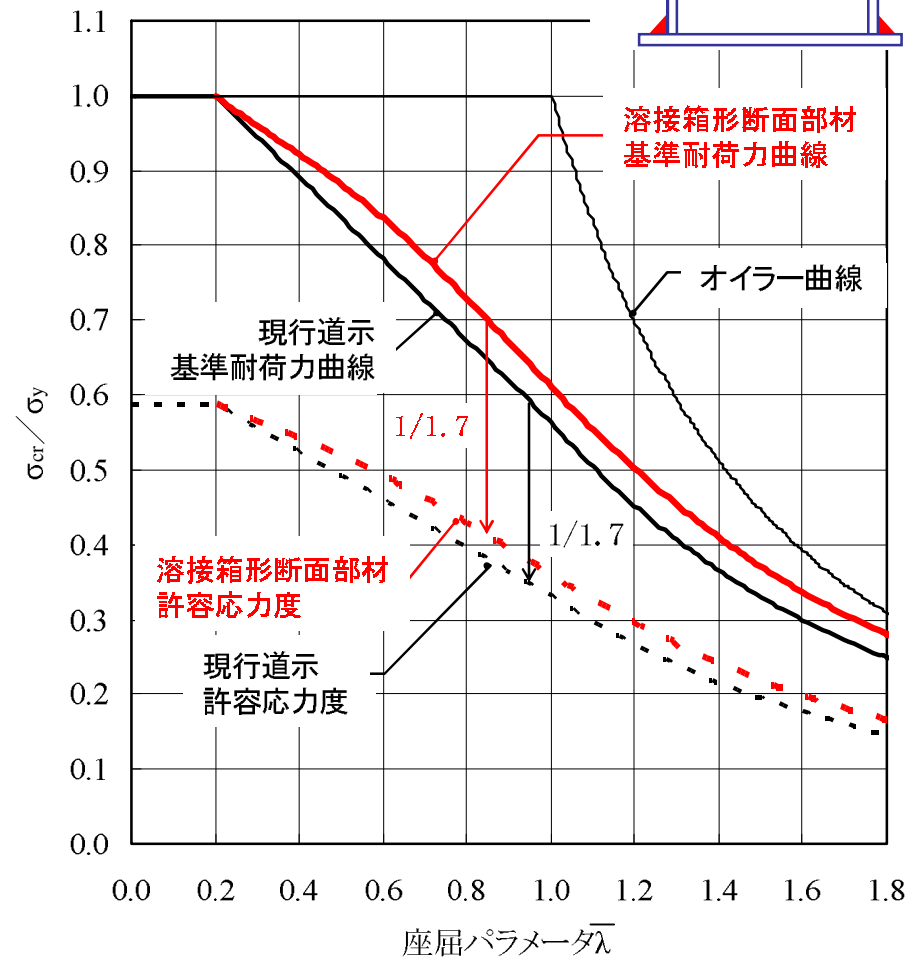
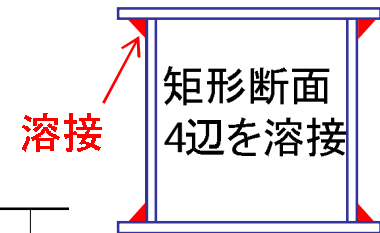
【背景】

- ・従来より，様々な断面形状の柱を想定した耐荷力の下限値に相当する基準耐荷力を基に許容応力度を設定。
- ・断面形状に応じて強度分類することにより，より合理的な耐荷力を設定できる可能性。

【改定内容】

3.2.1 構造用鋼材の許容応力度

- ・従来の許容応力度に加えて，適用頻度の高い溶接箱形断面に適用する許容応力度を設定



溶接箱形断面に適用する基準耐荷力曲線

鋼長柱の耐荷力に関する検討例



図-2.1 検討フロー

出典：鋼箱形断面圧縮部材の耐荷力に関する検討事項，土木研究所資料 第4221号，平成24年3月。

現行断面と対象とした解析

- ・実際の鋼アーチ橋(トラス橋も?)の断面諸元に関する調査
- ・調査に基づく解析モデルの設定

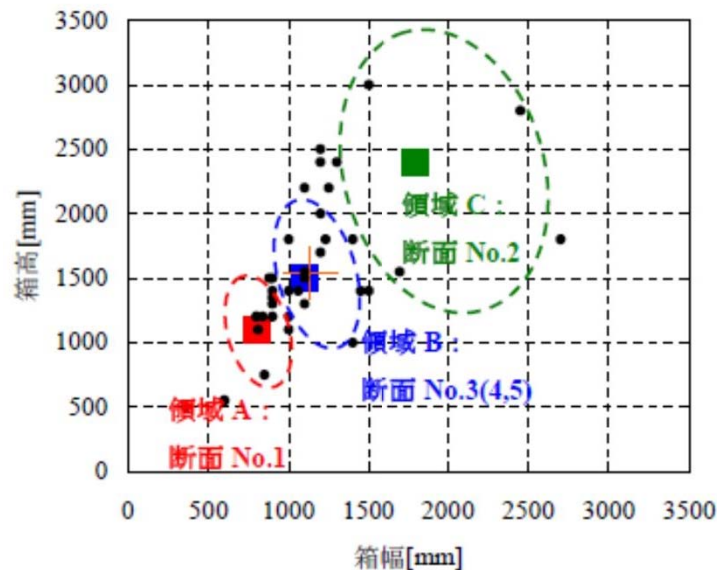
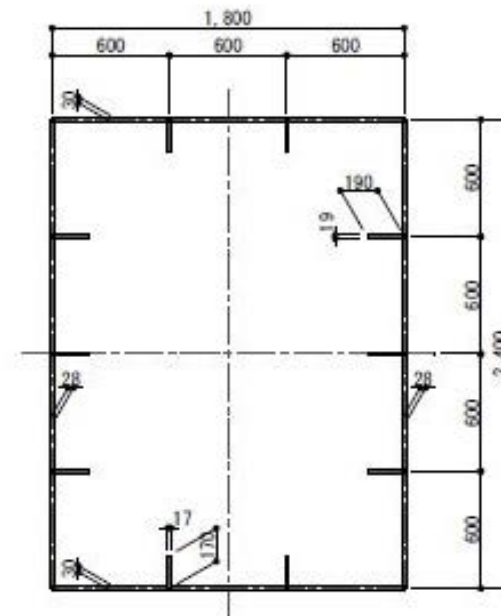


図-3.2.3 解析対象箱形断面の外形寸法

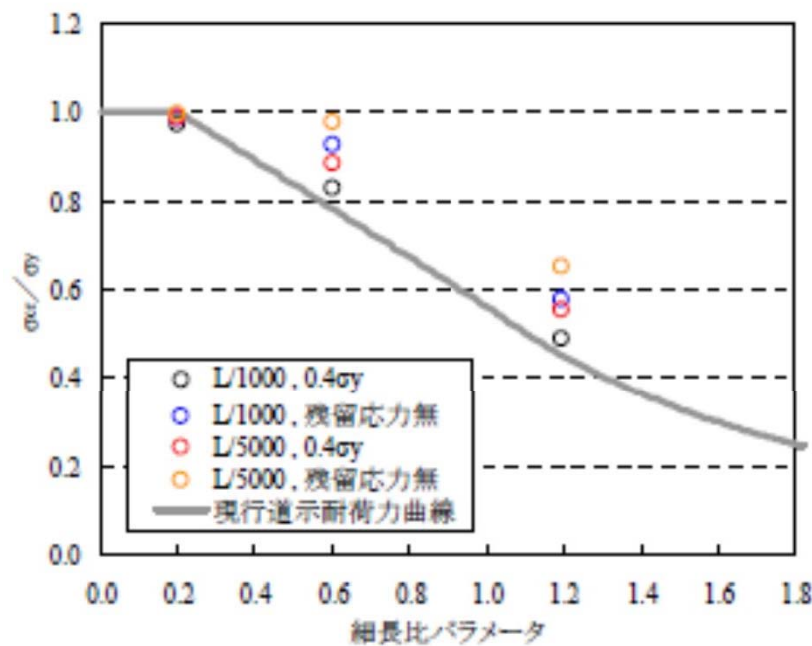


(b) 断面 No.2

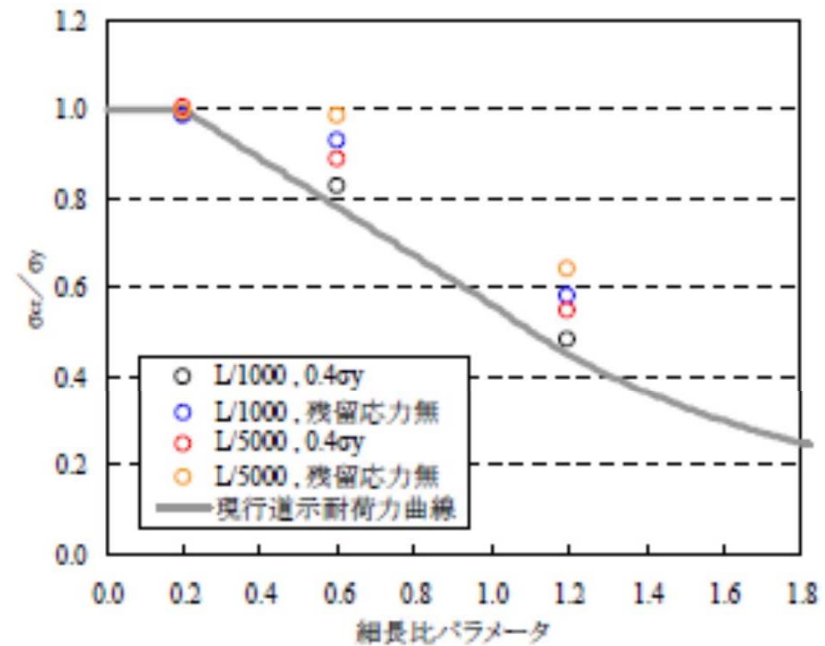
出典: 鋼箱形断面圧縮部材の耐荷力に関する検討事項, 土木研究所資料 第4221号, 平成24年3月.

初期不整をパラメータとした解析値

- ・初期たわみ，残留応力が鋼長柱の耐荷力に与える影響を解析的に検討.



(a)シェル要素



(b)ファイバー要素

図-3.3.3 断面 No.2 の σ_{cr}/σ_y 分布

出典：鋼箱形断面圧縮部材の耐荷力に関する検討事項，土木研究所資料 第4221号，平成24年3月。

耐荷力曲線算出に用いる初期不整の検討

- ・初期たわみについては、H14道示IIの「17.3.2 部材精度」の $L/1,000$.
- ・残留応力については、過去の実測結果を参照.

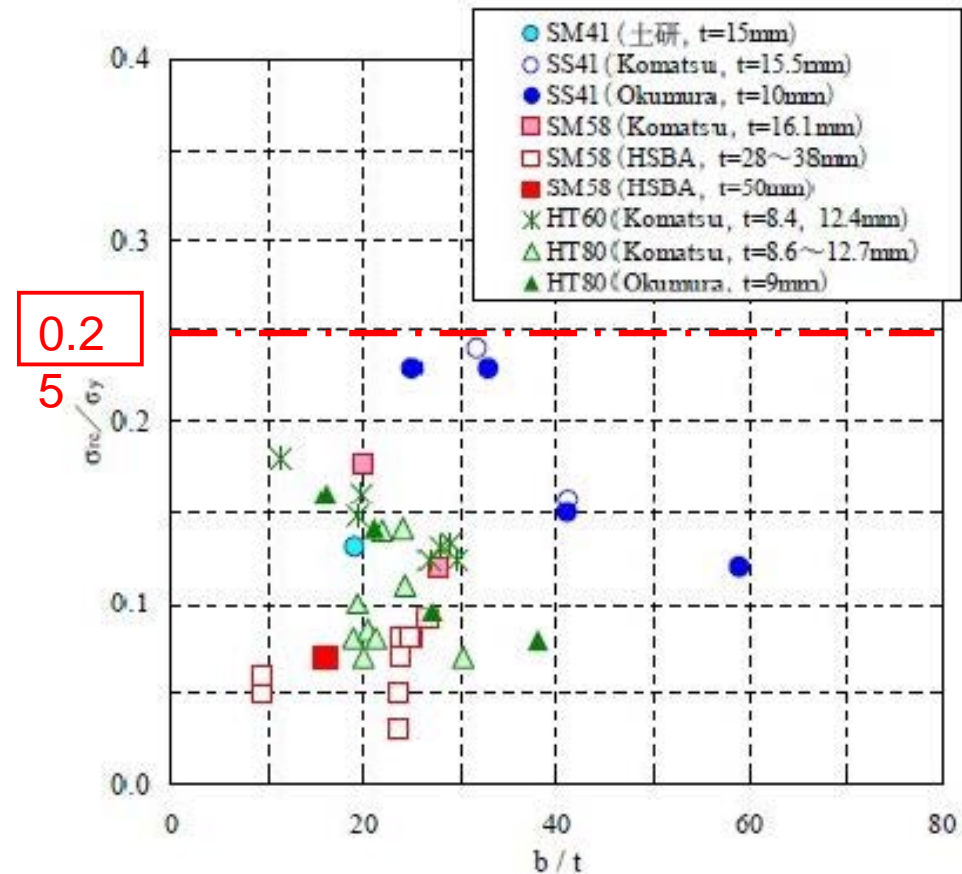


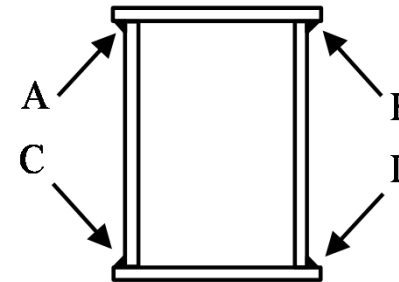
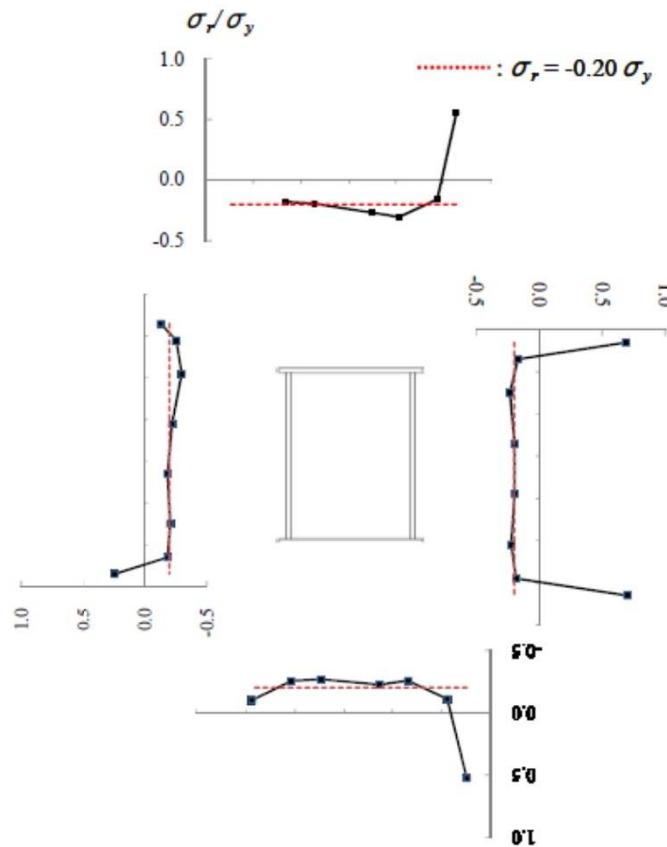
図-4.3.5 残留応力計測結果

(首都大学東京野上邦栄教授提供による)

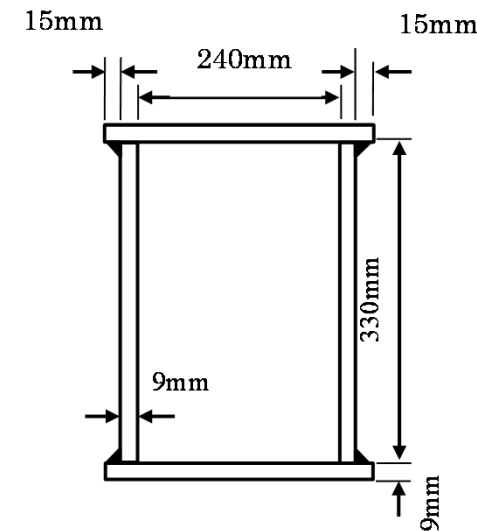
出典: 鋼箱形断面圧縮部材の耐荷力に関する検討事項, 土木研究所資料 第4221号, 平成24年3月.

残留応力の測定

- 実際の鋼トラス橋の断面を基に，供試体寸法の決定.
- 実際の溶接条件と同様の溶接条件で溶接を実施.



供試体2	
位置	脚長 (mm)
A	7.0, 8.0
B	6.5, 6.5
C	6.5, 7.0
D	7.0, 7.0



出典：小野潔，橋本祥太，岡田誠司，西村宣男：溶接箱形断面鋼長柱の残留応力および耐荷力曲線に関する研究，鋼構造年次論文報告集，第21巻，pp.147-151，2013年11月.

既往の耐荷力曲線との比較

□ 耐荷力曲線^[1)西村, 青木, 西井, 福本,1989]推定式を参考に検討.

(4) 敏感度関数

(2) で得られた各断面の部材強度の解析結果を用いて、次式の初期不整に関する未定係数を決定した。

$$E = 1 / (2 \cdot \bar{\lambda}^2) \cdot (Z - \sqrt{Z^2 - 4 \cdot \bar{\lambda}^2}) + C1$$

$$\cdot \frac{\tan^{-1}(CR + C3) - \tan^{-1}(C3)}{1 + C4 \cdot (CR + C3)^2} \dots\dots\dots (1)$$

$$Z = 1 + A \cdot (\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_{cr}) + \bar{\lambda}^2 \quad CR = (\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_{cr}) \cdot C2$$

$$Ci = A1 + A2 \cdot X + A3 \cdot X^2 + A4 \cdot Y + A5 \cdot Y^2 + A6 \cdot X \cdot Y \quad (i=1\sim4)$$

$$X = \sigma_{rc} / \sigma_y \quad Y = W / W_0 \quad (W_0 = L / 1000)$$

上式を初期不整敏感度関数と称し、部材の極限強度を細長比 ($\bar{\lambda}$)、残留応力 (σ_{rc})、初期たわみ (W) の関数として与えるものとする。右辺第1項は、細長比パラメーターの効果を反映したペリー-ロバートソン型の式であり、第2項は、種々の初期不整の組合せの影響による強度の変動を評価するための修正項で、断面特有の極限強度のばらつきに対処できるように、多数の関数形を試行錯誤した後決定した。対象断面ごとの係数の値を表一5に示す。

表一5 敏感度関数の係数表

		A1	A2	A3	A4	A5	A6	A
BOX	C1	0.4583	-1.495	1.1	-0.245	0.01667	0.625	0.5
	C2	2.1937	0.5042	-0.33333	-1.133	0.8403	-0.9375	
	C3	-0.8861	-3.233	1.167	0.4792	-0.2431	3.75	
	C4	1.58889	-4.4	5.33333	-0.7	0.11111	0.33333	

1)西村, 青木, 西井, 福本:鋼柱部材の基本強度の統一評価, 土木学会論文集, No.410, 1989.

既往の耐荷力曲線と解析値・実験値の比較

□ 耐荷力曲線^{[1)}西村, 青木, 西井, 福本, 1989]推定式と実験・解析の比較.

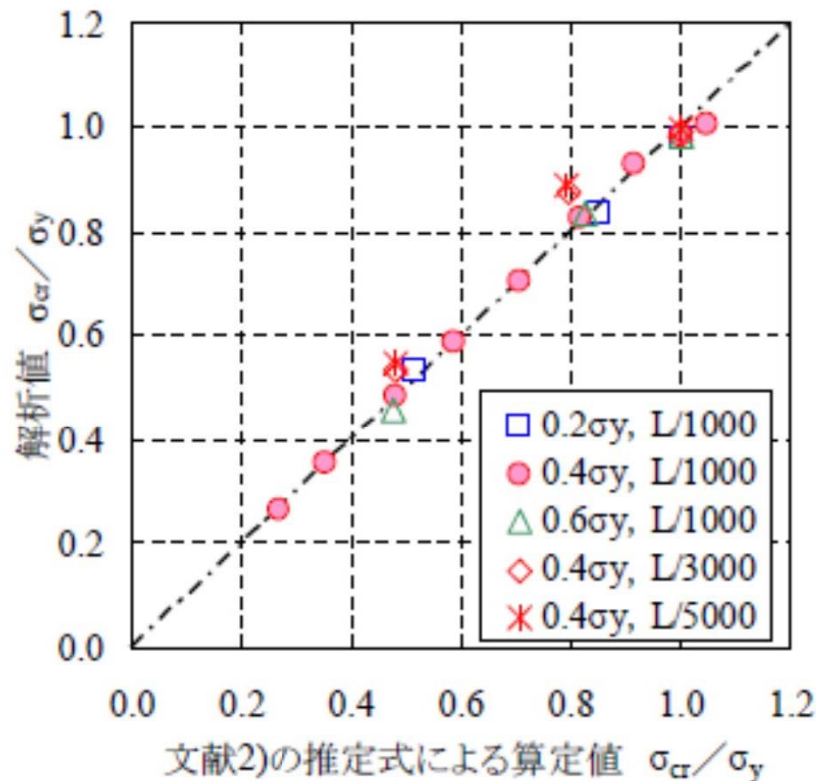


図-4.4.2 推定式²⁾による算定値と解析値の関係

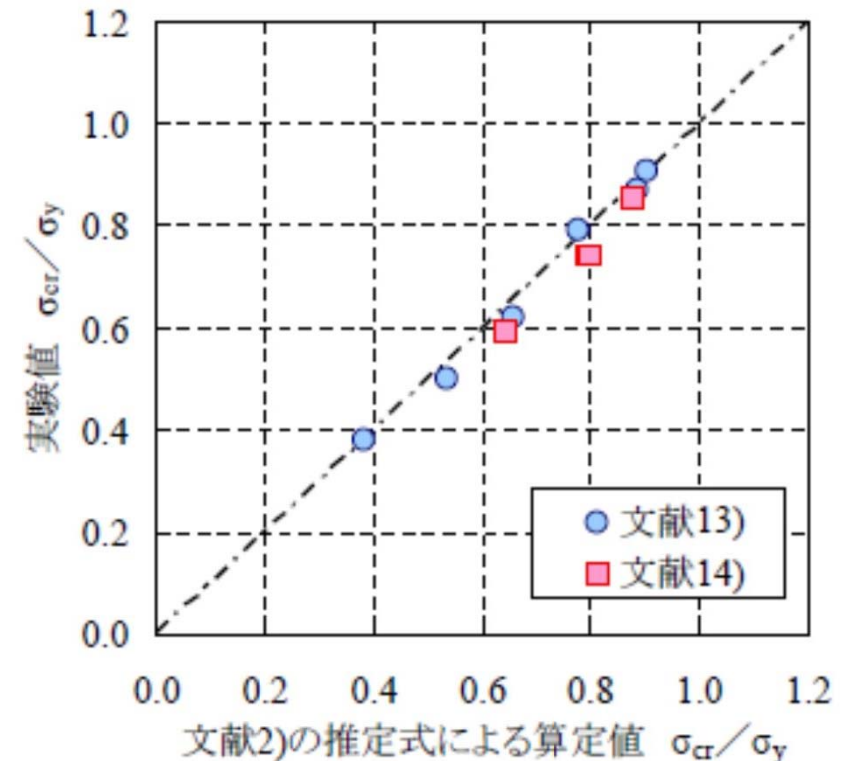


図-4.4.3 推定式²⁾による算定値と実験値の関係

出典: 鋼箱形断面圧縮部材の耐荷力に関する検討事項, 土木研究所資料 第4221号, 平成24年3月.

既往の耐荷力曲線と実験値の比較

□ 耐荷力曲線[¹⁾西村, 青木, 西井, 福本, 1989]推定式と実験値の比較.

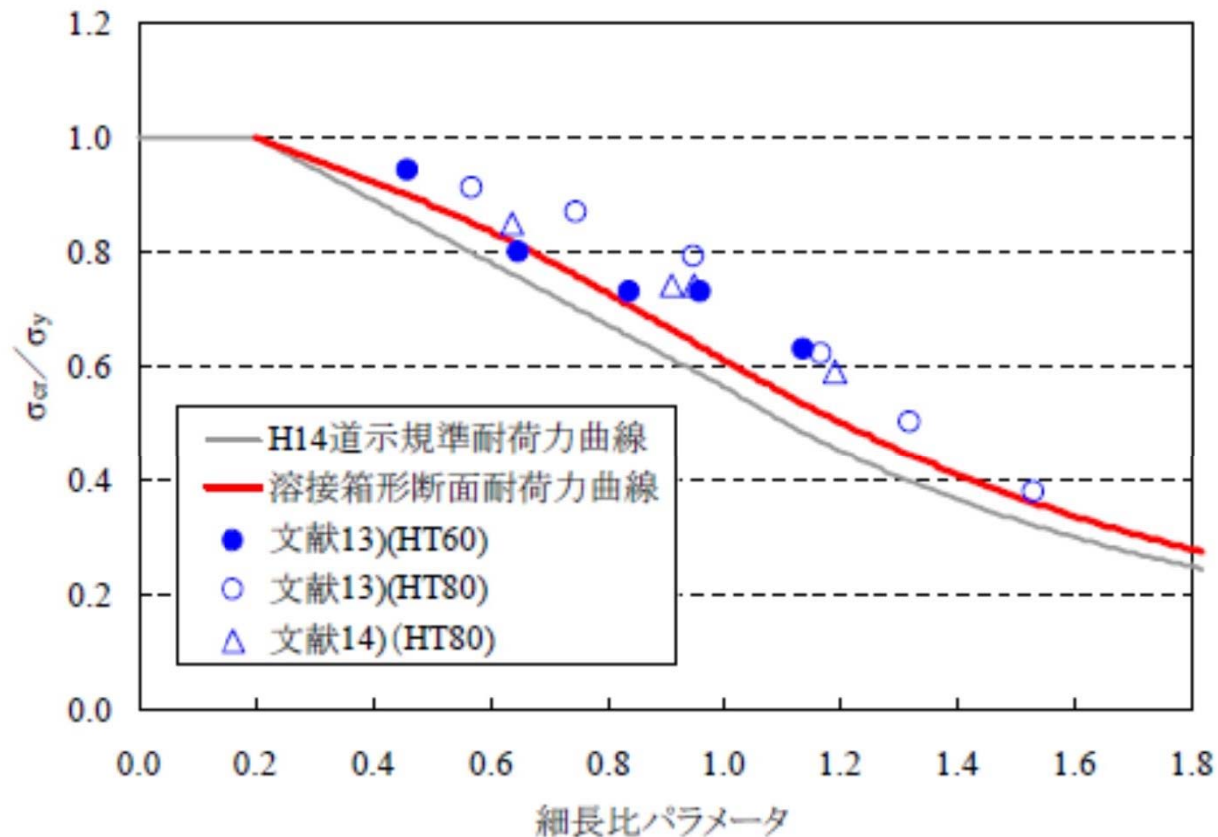


図-4.4.4 溶接箱形断面耐荷力曲線と実験値との比較

出典: 鋼箱形断面圧縮部材の耐荷力に関する検討事項, 土木研究所資料 第4221号, 平成24年3月.

その他の耐荷力曲線との比較

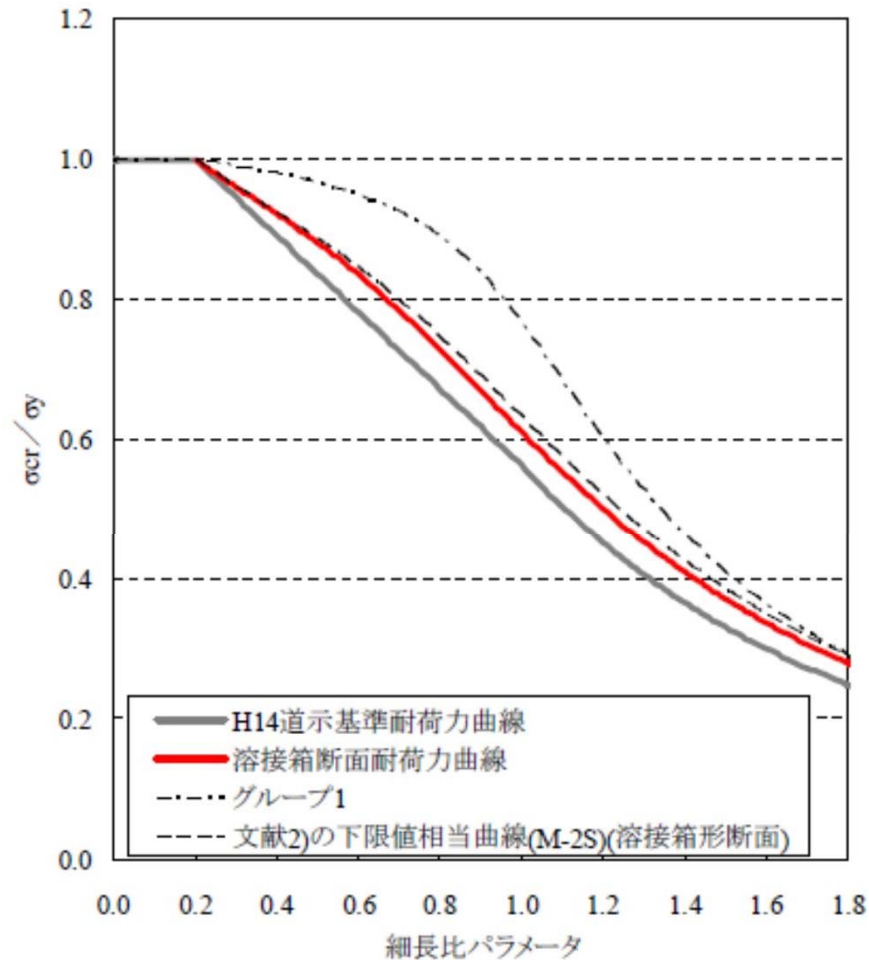


図-4.4.8 グループ1曲線と提案する耐荷力曲線の比較

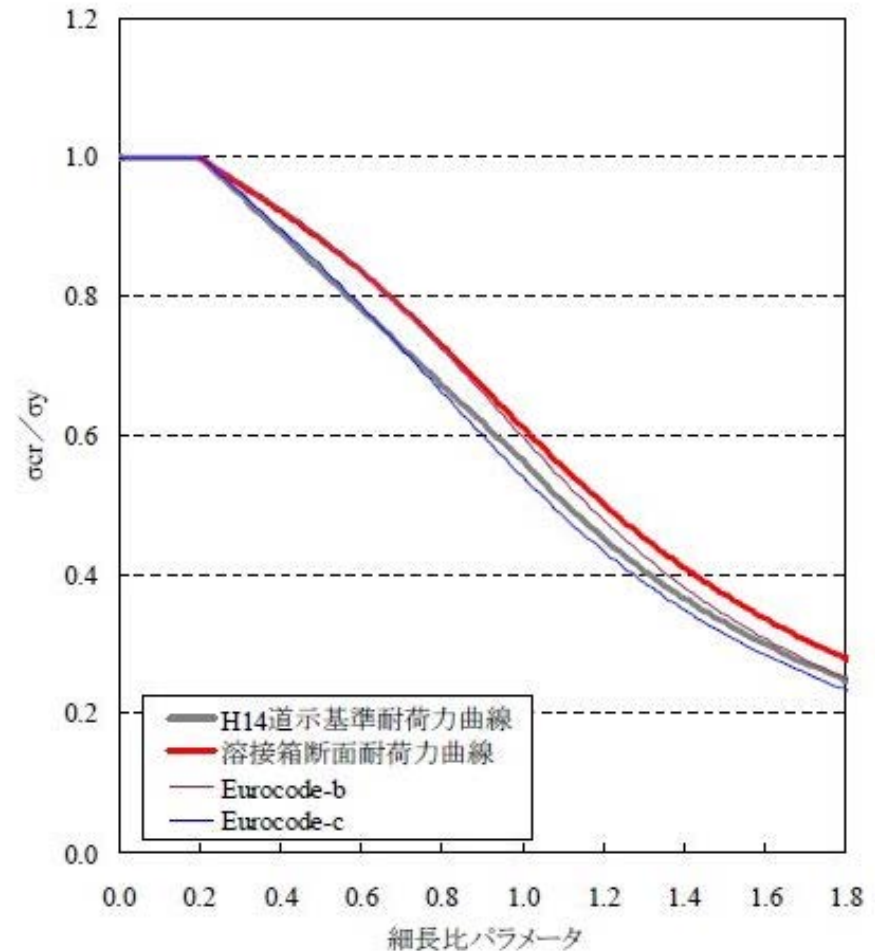
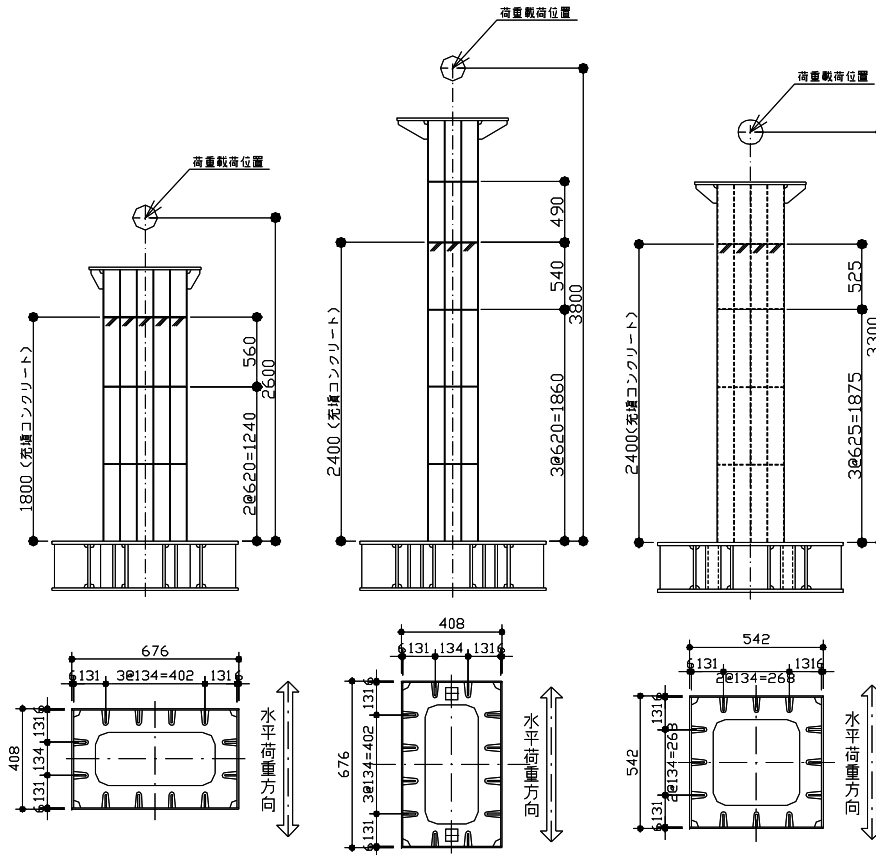


図-4.4.9 b曲線及びc曲線と提案する耐荷力曲線の比較

出典: 鋼箱形断面圧縮部材の耐荷力に関する検討事項, 土木研究所資料 第4221号, 平成24年3月.

M-φ関係の適用範囲の拡大 (矩形断面コンクリート充てんした実験供試体の例)



拡大された適用範囲

【軸力比】

$$0 \leq N/N_y \leq 0.5 (0.2)$$

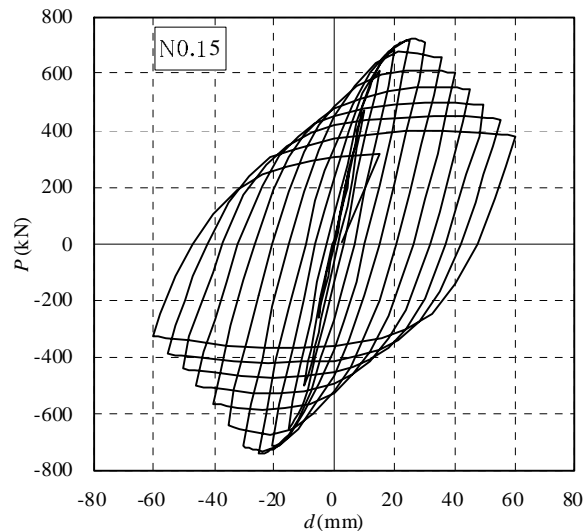
【辺長比】

$$0.5 \leq b_w/b_F \leq 2.0 (b_w/b_F \approx 1.0)$$

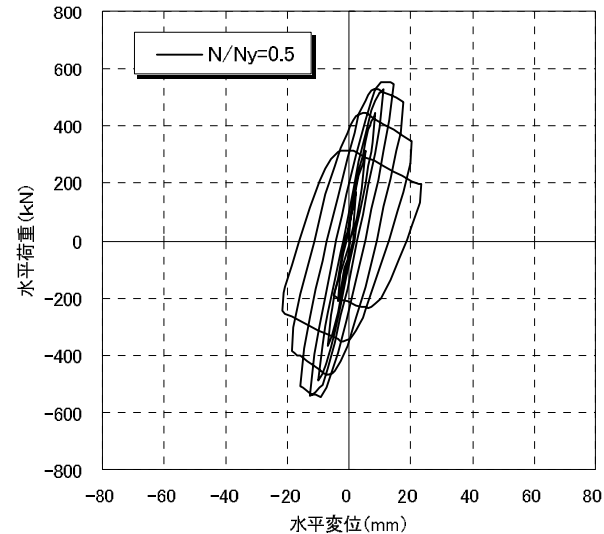
※上記外のパラメータも変更になっているので注意.

高軸力が作用する鋼製橋脚の実験データの蓄積 (矩形断面のコンクリートを充填しない鋼製橋脚の例)

$N/N_y = 0.15$ の場合



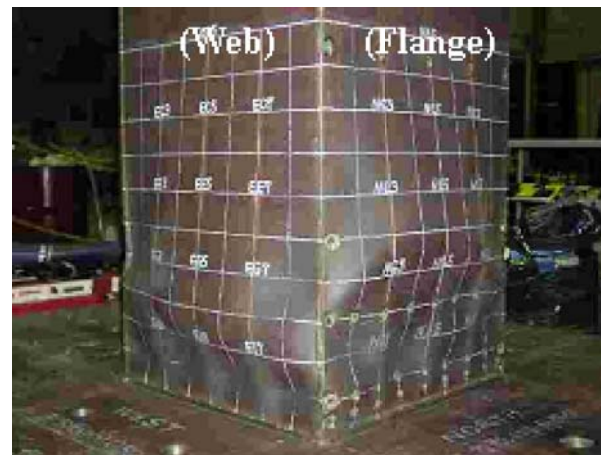
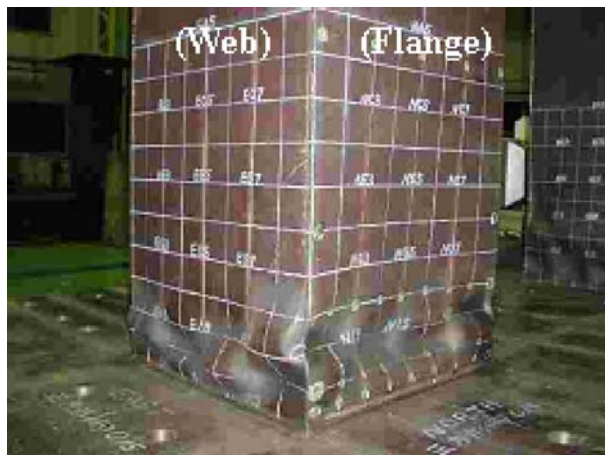
$N/N_y = 0.5$ の場合



軸力が大きいと

最大水平力
ピーク時変位
小さくなる

ピーク以降の
水平力の低下
も大きい



ピーク以降の
フランジ面の
面外変形の
進行が早い

変形が生じた
範囲も広い

矩形断面のコンクリートを充てんしない 鋼製橋脚の許容ひずみ

H14道示の評価式

$$\varepsilon_a = (20 - 25R_F) \varepsilon_y$$

(適用範囲)

$$b_W/b_F \approx 1.0 \text{ (正方形)}, 0.2 \leq R_F \leq 0.5, 0.3 \leq R_R \leq 0.5, 0 \leq N/N_y \leq 0.2, \\ 0.2 \leq \lambda \leq 0.4, \gamma_l/\gamma_l^* \geq 1.0$$

H24道示の評価式

$$\varepsilon_a = \left\{ \frac{(1.58 - N/N_y)^{3.16} \times (1.68 - R_R)^{2.48} \times (0.65 - R_F)^{0.41} \times (23.87 - l'/b')^{2.9} \times (\alpha')^{0.3}}{2500 \times (N/N_y + 1.0) \times (b_W/b_F)^{0.17}} + 0.5 \right\} \varepsilon_y$$

(適用範囲)

$$0.5 \leq b_W/b_F \leq 2.0, 0.3 \leq R_F \leq 0.5, 0.3 \leq R_R \leq 0.5, \gamma_l/\gamma_l^* \geq 1.0 \\ 0.2 \leq \lambda \leq 0.5, 2.5 \leq l'/b' \leq 9.0, 0 \leq N/N_y \leq 0.5$$

適用範囲を $N/N_y = 0.5$ まで拡大, 長方形断面にも適用可

矩形断面のコンクリートを充てんした 鋼製橋脚の許容ひずみ

$$\varepsilon_a = 7\varepsilon_y \quad (\text{H14道示と同じ})$$

H14道示の適用範囲

$$b_w/b_F \approx 1.0 (\text{正方形}), 0.2 \leq R_F \leq 0.7, 0.3 \leq R_R \leq 0.7, 0 \leq N/N_y \leq 0.2, \\ 0.2 \leq \lambda \leq 0.4, \gamma_l / \gamma_{l \cdot req} \geq 1.0$$

H24道示の適用範囲

$$0.5 \leq b_w/b_F \leq 2.0, 0.3 \leq R_F \leq 0.5, 0.3 \leq R_R \leq 0.5, \gamma_l / \gamma_{l \cdot req} \geq 1.0, \\ 0.2 \leq \lambda \leq 0.5, 2.5 \leq l'/b' \leq 9.0, 0 \leq N/N_y \leq 0.5$$

※ただし、 $0 \leq N/N_y \leq 0.2$ の場合、以下としてよい。

$$0.5 \leq b_w/b_F \leq 2.0, 0.3 \leq R_F \leq 0.7, 0.3 \leq R_R \leq 0.7, \gamma_l / \gamma_{l \cdot req} \geq 1.0, \\ 0.2 \leq \lambda \leq 0.5, 2.5 \leq l'/b' \leq 9.0$$

平成27年 道示 鋼橋編の耐荷力規定

— 道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編 —

H29道示の耐荷力・耐震規定

- 限界状態設計法と部分係数設計法の導入.
- SBHS400, SBHS500の具体的な制限値の記載.
- 既往の耐荷力曲線, もしくは実験結果等に基づき, 部分係数, 耐荷力曲線の設定.
- その他, ケーブルの安全率の見直し, 高強度ボルトの規定化等も実施.