

まえがき

この規格は、工業標準化法第 14 条によって準用する第 12 条第 1 項の規定に基づき、社団法人日本クレール協会(JCA)／財団法人日本規格協会(JSA)から、工業標準原案を具して日本工業規格を改正すべきとの申出があり、日本工業標準調査会の審議を経て、厚生労働大臣及び経済産業大臣が改正した日本工業規格である。

これによって、**JIS B 8821:1994** は改正され、この規格に置き換えられる。

この規格の一部が、技術的性質をもつ特許権、出願公開後の特許出願、実用新案権、又は出願公開後の実用新案登録出願に抵触する可能性があることに注意を喚起する。厚生労働大臣、経済産業大臣及び日本工業標準調査会は、このような技術的性質をもつ特許権、出願公開後の特許出願、実用新案権、又は出願公開後の実用新案登録出願にかかわる確認について、責任はもたない。

JIS B 8821 には、次に示す附属書がある。

附属書（参考）柱の座屈計算

目 次

	ページ
1. 適用範囲	1
2. 引用規格	1
3. 定義	1
4. 材料	2
5. 等級及び分類の決定	2
6. 荷重及び荷重の組合せ	2
7. 許容応力	2
7.1 基本許容応力	2
7.2 構造部材及び溶接部分の許容応力	3
7.3 溶接部分の許容応力	4
7.4 放射線試験	4
7.5 ボルト及びピン	4
7.6 疲れ許容応力	5
8. 強度設計	5
8.1 記号	5
8.2 引張材の計算	5
8.3 圧縮材の計算	6
8.4 軸方向に曲げを伴う部材の計算	6
8.5 曲げ及びねじりを受けるボックスガーダの計算	6
8.6 車輪荷重を直接受ける溶接部の計算	7
8.7 継手の計算	8
9. 溶接設計	9
9.1 記号	9
9.2 溶接継手の計算	9
9.3 溶接構造の設計細目	11
10. 疲労設計	13
10.1 記号	13
10.2 定義	14
10.3 適用	14
10.4 疲労設計に対する照査の範囲	14
10.5 疲労設計に用いる応力	15
10.6 疲労設計曲線	15
10.7 平均応力補正係数 CR	17
10.8 板厚補正係数	17
10.9 設計繰返し数	19

10.10	等価応力範囲	19
10.11	設計応力範囲	19
10.12	疲労許容応力範囲	20
10.13	疲労照査法	20
10.14	疲労照査手順及び流れ図	21
11.	座屈計算	37
11.1	記号	37
11.2	一般	39
11.3	トラス・ラチスジブの設計	50
11.4	板の局部座屈の計算	56
	附属書（参考）柱の座屈計算	61

クレーン鋼構造部分の計算基準

Calculation Standards for steel structures of cranes

1. 適用範囲 この規格は、JIS B 0146-1 に規定するクレーン（移動式クレーンを含む）の鋼構造部分の設計に適用する。ただし、正当な理論又は実験によって証明できるならば、この規格に規定する数式及び数値によらなくてもよい。

2. 引用規格 次に掲げる規格は、この規格に引用されることによって、この規格の規定の一部を構成する。これらの引用規格は、その最新版（追補を含む。）を適用する。

JIS B 0146-1 クレーン用語－第1部：一般

JIS B 0146-2 クレーン用語－第2部：移動式クレーン

JIS B 1186 摩擦接合用高力ボルト・六角ボルト・平座金のセット

JIS B 8822-1 クレーン及び巻上装置－分類及び等級－第1部：一般

JIS B 8822-2 クレーン及び巻上装置－分類及び等級－第2部：移動式クレーン

JIS B 8822-3 クレーン及び巻上装置－分類及び等級－第3部：タワークレーン

JIS B 8822-4 クレーン及び巻上装置－分類及び等級－第4部：ジブクレーン

JIS B 8822-5 クレーン及び巻上装置－分類及び等級－第5部：天井走行及び橋形クレーン

JIS B 8830 クレーン－風荷重の評価

JIS B 8831 クレーン－荷重及び荷重の組合せに関する設計原則

JIS G 3101 一般構造用圧延鋼材

JIS G 3106 溶接構造用圧延鋼材

JIS G 3114 溶接構造用耐候性熱間圧延鋼材

JIS G 3128 溶接構造用高降伏点鋼板

JIS G 3136 建築構造用圧延鋼材

JIS G 3444 一般構造用炭素鋼鋼管

JIS G 3445 機械構造用炭素鋼鋼管

JIS G 3466 一般構造用角形鋼管

JIS G 4051 機械構造用圧延鋼材

JIS Z 3104 鋼溶接継手の放射線透過試験方法

3. 定義 この規格で用いる主な用語の定義は、JIS B 0146-1 及び JIS B 0146-2 による。

4. 材料 クレーンに用いる材料は、表 1 によるか、これと同等以上のものとする。
また、鋼材の定数は、表 2 による。

表 1 材料

鋼材，形鋼， 平鋼，棒鋼	JIS G 3101	一般構造用圧延鋼材	SS400
	JIS G 3106	溶接構造用圧延鋼材	SM400 (A,B,C)，SM490 (A,B,C)， SM520 (B,C)，SM570
	JIS G 3114	溶接構造用耐候性熱間圧延鋼材	SMA400AW，SMA400AP SMA400BW，SMA400BP SMA400CW，SMA400CP SMA490AW，SMA490AP SMA490BW，SMA490BP SMA490CW，SMA490CP SMA570W，SMA570P
	JIS G 3128	溶接構造用高降伏点鋼板	SHY685，SHY685N，SHY685NS
	JIS G 3136	建築構造用圧延鋼材	SN400A，SN400B，SN400C SN490B，SN490C
鋼管	JIS G 3444	一般構造用炭素鋼管	STK290，STK400，STK500， STK490，STK540
	JIS G 3445	機械構造用炭素鋼鋼管	STKM11A～20 A
	JIS G 3466	一般構造用角形鋼管	STKR400，STKR490
ピン・ボルト	JIS G 3101	一般構造用圧延鋼材	SS400
	JIS G 4051	機械構造用炭素鋼鋼材	S20C，S35C，S45C
高力ボルト及び ナット	JIS B 1186	摩擦接合用高力ボルト・六角ボルト・ 平座金のセット	F8T，F10T，F11T，F35 T (座金)

表 2 鋼材の定数

縦弾性係数	E	206 000 N/mm ²
せん断弾性係数	G	79 000 N/mm ²
ポアソン比	ν (1/m)	0.3
線膨張係数	α	1.2×10^{-5}
密度	ρ	7.85 g/cm ³

5. 等級及び分類の決定 この規格はクレーンの鋼構造部分の設計に使用する規格であるが、クレーンの設計に当たっては、設計の前提条件となるクレーンの使用頻度及び荷重率（クレーンの分類及び等級）を明確にしなければならない。これらの負荷条件については設計者及び購入者が協定する。

なお、購入者が未定のクレーンについても、そのクレーンの使用頻度及び荷重率を定め、これによって設計に着手する。

クレーンの使用頻度及び荷重率によって定まる作業係数は、JIS B 8831 による。

6. 荷重及び荷重の組合せ 荷重及び荷重の組合せは、JIS B 8831 による。

7. 許容応力

- 7.1 基本許容応力 基本許容応力 σ_0 は、6. に示すそれぞれの荷重の組合せに対し、材料の降伏点（又は 0.2 %耐力）及び引張強さを、表 3 の強度係数で除した値のうちいずれか小さい方の値とする。

表 3 強度係数

負荷状態	強度係数	
	降伏点に対するもの	引張強さに対するもの
荷重の組合せ A	1.5	1.8
荷重の組合せ B	荷重の組合せ A の値を 1.15 で除した値	荷重の組合せ A の値を 1.15 で除した値
荷重の組合せ C	荷重の組合せ A の値を 1.30 で除した値	荷重の組合せ A の値を 1.30 で除した値

7.2 構造部材及び溶接部分の許容応力 構造部材及び溶接部分の許容応力は、表 4 による。

表 4 構造部材及び溶接部分の許容応力

応力の種類			許容応力	計算に用いる断面		
構造部材	引張		σ_a	純断面		
	圧縮		$\sigma_a / 1.15$	総断面		
	曲げ	引張側	σ_a	純断面		
		圧縮側	$\sigma_a / 1.15$	総断面		
	せん断		$\sigma_a / \sqrt{3}$	総断面		
	座屈		$\sigma_a / 1.15$ 及び 11. による	総断面		
	支圧		$1.42 \sigma_a$	総断面		
溶接部分	突合せ	引張	鋼材種類 A	$0.840 \times \sigma_a$	純断面	
			鋼材種類 B	$0.800 \times \sigma_a$		
		圧縮	鋼材種類 A	$0.945 \times \sigma_a / 1.15$	総断面	
			鋼材種類 B	$0.900 \times \sigma_a / 1.15$		
		曲げ	引張側	鋼材種類 A	$0.840 \times \sigma_a$	純断面
				鋼材種類 B	$0.800 \times \sigma_a$	
			圧縮側	鋼材種類 A	$0.840 \times \sigma_a / 1.15$	総断面
				鋼材種類 B	$0.800 \times \sigma_a / 1.15$	
		せん断	鋼材種類 A	$0.840 \times \sigma_a / \sqrt{2}$	総断面	
			鋼材種類 B	$0.800 \times \sigma_a / \sqrt{2}$		
	すみ肉	引張	鋼材種類 A	$0.840 \times \sigma_a$	のど厚で計算	
			鋼材種類 B	$0.800 \times \sigma_a$		
		圧縮	鋼材種類 A	$0.840 \times \sigma_a / 1.15$	のど厚で計算	
			鋼材種類 B	$0.800 \times \sigma_a / 1.15$		
		曲げ	鋼材種類 A	—		
			鋼材種類 B	—		
		せん断	鋼材種類 A	$0.840 \times \sigma_a / \sqrt{2}$	のど厚で計算	
			鋼材種類 B	$0.800 \times \sigma_a / \sqrt{2}$		

備考1. この表において、A は JIS G 3106 (溶接構造用圧延鋼材)、JIS G 3114 (溶接構造用耐候性熱間圧延鋼材)、JIS G 3128 (溶接構造用高降伏点鋼板)、JIS G 3136 (建築構造用圧延鋼材) に定める SN400B, SN400C, SN490B 若しくは SN490C、JIS G 3444 (一般構造用炭素鋼鋼管) に定める STK490、JIS G 3445 (機械構造用炭素鋼鋼管) に定める 18 種又は JIS G 3466 (一般構造用角形鋼管) に定める STKR490 に適合する鋼材を、B はこれらの鋼材以外の鋼材を表す。

2. 純断面は、ボルト穴の断面積を除いた最小断面の位置とする。

7.3 溶接部分の許容応力 放射線試験を行う場合は、構造部分の溶接部（溶接加工の方法が突合せ溶接である場合に限る。）が次に挙げるところに該当するときは、当該溶接部に係る計算に使用する許容応力（許容引張応力、許容圧縮応力及び許容曲げ応力に限る。）の値は、構造部材と同一値としてもよい。

- a) **JIS Z 3104**（鋼溶接継手の放射線透過試験方法）に規定する第3種のきずがないこと。
- b) **JIS Z 3104**に規定する第1種及び第4種のきず又は第2種のきずのいずれかがある場合には、当該きずに係る**JIS Z 3104**に規定するきず点数又はきず長さがそれぞれ**JIS Z 3104**に規定する第1種及び第4種の2類の許容限度を表す値又は第2種の2類の許容限度を表す値以下であること。
- c) **JIS Z 3104**に規定する第1種及び第4種のきず並びに第2種のきずが混在する場合には、当該きずに係る**JIS Z 3104**に規定するきず点数及びきず長さがそれぞれ**JIS Z 3104**に規定する第1種及び第4種の2類の許容限度を表す値及び第2種の2類の許容限度を表す値の2分の1以下であること。

7.4 放射線試験 放射線試験は次による。

- a) **JIS Z 3104**の規定に従うこと。また、構造部分の溶接部の全長の20パーセント以上の長さについて行うこと。
- b) 構造部分の溶接部は、その余盛りが母材の表面と同一の面まで削られていなければならない。ただし、余盛りの中央における高さが、表5の左欄に掲げる母材の厚さに応じて、それぞれ同表の右欄に掲げる高さ以下である場合には、余盛りが母材の表面と同一面まで削られている必要はない。

表 5 余盛りの高さ

単位 mm	
母材の厚さ	高さ
12 以下	1.5
12 を超え 25 以下	2.5
25 を超えるもの	3.0

7.5 ボルト及びピン ボルト及びピンの許容応力は、表6による。

表 6 ボルト及びピンの許容応力

	材質	応力の種類	許容応力	備考：計算に用いる径など
高力ボルト	F8T, F10T,	見かけせん断	$0.21 \sigma_a$	ボルト幹径
高力グリップボルト	F11T	見かけせん断	$0.24 \sigma_a$	ボルト幹径
リーマボルト	SS400 S20C S35C S45C	せん断	$\sigma_a / \sqrt{3}$	ボルト幹径
		支圧	$1.42 \sigma_a$	
ピン結合		せん断	$\sigma_a / \sqrt{3}$	ピン径
		支圧	$1.42 \sigma_a$	ピンが微動する場合は、支圧許容 応力だけ左記の 50 %とする。
基礎ボルト	SS400 S20C	曲げ	σ_a	ねじ低径
		引張	$0.6 \sigma_a$	
		せん断	$0.35 \sigma_a$	

備考1. 見かけせん断とは、摩擦接合で伝達される荷重をボルトのせん断に置き換えたものとする。

- 2. 高力ボルトは、ねじ底径における応力が、材料の耐力の75%、また、高力グリップボルトの場合は、85%で締め付けられているものとする。
- 3. 高力ボルト又は高力グリップボルトを用いた継手にあつては、構造部材の摩擦面は、油、塗料などがなく清浄であり、かつ黒皮はサンドブラストなどによって除去された状態にあるものとする。
- 4. 高力ボルト及び高力グリップボルトとも、基本許容応力の算出に当たっては、降伏点の代わりに、耐力を基準としてよい。

5. 許容支圧応力については、結合部材及び支持部材の σ_a のうち小さい方を基準とする。

6. 材質については、表 6 によるか、これと同等以上のものとする。

7.6 疲れ許容応力 疲れ許容応力は、10. (疲労設計) による。

8. 強度設計

8.1 記号 この項で使用する記号は、次による。

A	: 腹板及びフランジの中心線で囲まれた面積 (mm ²)
A _F	: 引張フランジの総断面積 (mm ²)
A _{Fn}	: 引張フランジの純断面積 (mm ²)
A _{Wn}	: せん断を受ける腹板の純断面積 (mm ²)
A _n	: 純断面積 (mm ²)
e _c	: 中立軸から圧縮へりまでの距離 (mm)
e _t	: 中立軸から引張へりまでの距離 (mm)
F _B	: 曲げによるせん断力 (N)
F _J	: 継目箇所での最大せん断力 (N)
f	: 係数 (表 7 参照)
h	: 腹板結合ボルトの最外側間の距離 (mm)
I	: 断面二次モーメント (mm ⁴)
I _G	: ガーダの総断面の中立軸回りの断面二次モーメント (mm ⁴)
I _W	: ガーダの総断面の中立軸回りの腹板の断面二次モーメント (mm ⁴)
M	: 曲げモーメント (N・mm)
M _J	: 継目箇所のガーダの受ける曲げモーメント (N・mm)
M _W	: 腹板の受ける曲げモーメント (N・mm)
N	: 軸方向引張力 (N)
n	: 接合線の片側にある継目ボルトの総数
R	: y _n における 1 個のボルトに作用する合力 (N)
T	: せん断中心回りのねじりモーメント (N・mm)
t	: 腹板又はフランジの厚さ (mm)
y _n	: 中立軸 (図 5 参照) から最も遠いボルトまでの距離 (mm)
Σy ²	: 接合線の片側にある継目ボルトから中立軸までの距離の二乗の総和 (mm ²)
σ _{ca}	: 7. による許容圧縮応力 (N/mm ²)
σ _{ce}	: 圧縮へり応力 (N/mm ²)
σ _t	: 引張応力 (N/mm ²)
σ _{ta}	: 7. による許容引張応力 (N/mm ²)
σ _{te}	: 引張へり応力 (N/mm ²)
τ	: 曲げによるせん断応力 (N/mm ²)
τ _a	: 7. による許容せん断応力 (N/mm ²)
τ _t	: ねじりモーメントによるせん断応力 (N/mm ²)

8.2 引張材の計算 引張応力は、ボルト穴を除いた純断面積で次式によって計算する。

$$\sigma_t = \frac{N}{A_n} \leq \sigma_{ta} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、
 σ_t : 引張応力 (N/mm²)
 A_n : 純断面積 (mm²)
 N : 軸方向引張力 (N)
 σ_{ta} : 許容引張応力 (N/mm²)

なお、時間の周期的な関数として応力の値が変化する交番応力を受ける場合には、10. に示す疲れ強さを検討する。

8.2.1 引張材の純断面積 引張材の有効純断面積を求めるには、ボルトの位置によって適当にボルト穴を減じなければならない。図 1 において a-c-c-a 断面が a-a 断面より小さければ、部材断面積から 4 個のボルト穴を減じなければならない。

山形鋼、みぞ形鋼が、偏心のない構造の場合は、脚及びフランジを展開して上記に準じるものとする。

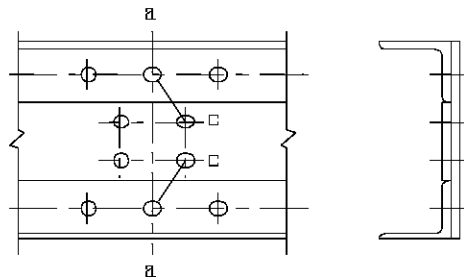


図 1 有効純断面積

8.3 圧縮材の計算 圧縮材の計算は、11. (座屈計算) による。

8.4 軸方向に曲げを伴う部材の計算 11. (座屈計算) による。

8.5 曲げ及びねじりを受けるボックスガードの計算 曲げ及びねじりを受けるボックスガードは、曲げとねじりに対してそれぞれ次式によって計算する。ただし、普通の天井クレーンでは、一般的に (スパン) / (ガードの幅) が 40 を超えることがないため、曲げによる横倒れ座屈は考慮しなくてもよい。

8.5.1 曲げ応力及びせん断応力の計算

$$\sigma_{te} = \frac{M}{I} \cdot \frac{A_F}{A_{Fn}} \cdot e_t \leq \sigma_{ta} \quad \text{..... (2)}$$

$$\sigma_{ce} = \frac{M}{I} e_c \leq \sigma_{ca} \quad \text{..... (3)}$$

$$\tau = \frac{F_B}{A_{Wn}} \leq \tau_a \quad \text{..... (4)}$$

ここに、

σ_{te} : 引張へり応力 (N/mm²)

σ_{ce} : 圧縮へり応力 (N/mm²)

τ : 曲げによるせん断応力 (N/mm²)

M : 曲げモーメント (N・mm)

I : 断面二次モーメント (mm⁴)

A_F : 引張フランジの総断面積 (mm²)

A_{Fn} : 引張フランジの純断面積 (mm²)

e_c : 中立軸から圧縮へりまでの距離 (mm)

e_t : 中立軸から引張へりまでの距離 (mm)

F_B : 曲げによるせん断力 (N)

A_{Wn} : せん断を受ける腹板の純断面積 (mm²)

σ_{ta} : 許容引張応力 (N/mm²)
 σ_{ca} : 許容圧縮応力 (N/mm²)
 τ_a : 許容せん断応力 (N/mm²)

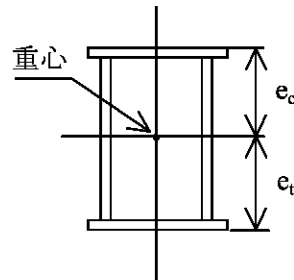


図 2 曲げを受けるボックスガーダ

8.5.2 ねじりモーメントによるせん断応力の計算

$$\tau_t = \frac{T}{2 \cdot A \cdot t} \leq \tau_a \quad \text{..... (5)}$$

ここに,
 τ_t : ねじりモーメントによるせん断応力 (N/mm²)
 T : せん断中心回りのねじりモーメント (N・mm)
 A : 腹板及びフランジの中心線で囲まれた面積 (mm²)
 t : 腹板又はフランジの厚さ (mm)
 τ_a : 許容せん断応力 (N/mm²)

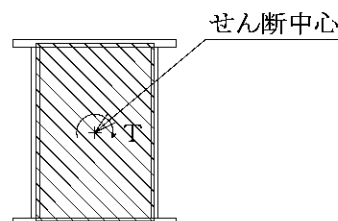


図 3 ねじりを受けるボックスガーダ

8.5.3 曲げによるせん断応力とねじりによるせん断応力の合成 合成応力は、曲げによるせん断応力 τ とねじりモーメントによるせん断応力 τ_t の向きが一致する側で最大となり次式によって計算する。

$$\tau + \tau_t \leq \tau_a \quad \text{..... (6)}$$

ここに,
 τ : 曲げによるせん断応力 (N/mm²)
 τ_t : ねじりによるせん断応力 (N/mm²)
 τ_a : 許容せん断応力 (N/mm²)

8.6 車輪荷重を直接受ける溶接部の計算 車輪荷重を直接受ける溶接部は、図 4 による。

レールが腹板の真上にあつて、特に正確な計算を行わない場合には、車輪荷重は図 4 のように車輪の真下 50 mm から 45 度の方向内に均等に分布することとする。

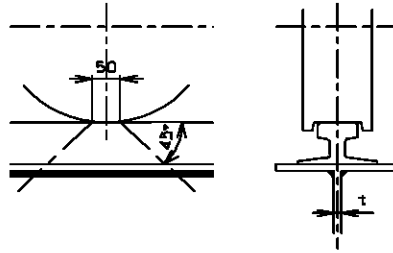


図 4 車輪荷重の分布

8.7 継手の計算

8.7.1 曲げを受けるガーダの腹板継目の計算 曲げモーメントを受けるプレートガーダの腹板継目は、せん断力と曲げモーメントによって設計することとし、継目ボルトに作用する最大合力は、次式によって計算する。この場合ボルトの許容強さは、プレートガーダのフランジから中立軸までの距離と式中の y_n との比によって減じる。

$$R = \sqrt{\left(\frac{F_J}{n}\right)^2 + \left(\frac{M_w}{\sum y^2} \cdot y_n\right)^2} \dots\dots\dots (7)$$

$$\text{ただし, } M_w = M_J \cdot \frac{I_w}{I_G}$$

- ここに、
- R : y_n における 1 個のボルトに作用する合力 (N)
 - n : 接合線の片側にある継目ボルトの総数
 - F_J : 継目箇所での最大せん断力 (N)
 - M_w : 腹板の受ける曲げモーメント (N・mm)
 - M_J : 継目箇所のガーダの受ける曲げモーメント (N・mm)
 - I_w : ガーダの総断面の中立軸周りの腹板の断面二次モーメント (mm⁴)
 - I_G : ガーダの総断面の中立軸周りの断面二次モーメント (mm⁴)
 - $\sum y^2$: 接合線の片側にある継目ボルトから中立軸までの距離の二乗の総和 (mm²)
 - y_n : 中立軸 (図 5 参照) から最も遠いボルトまでの距離 (mm)

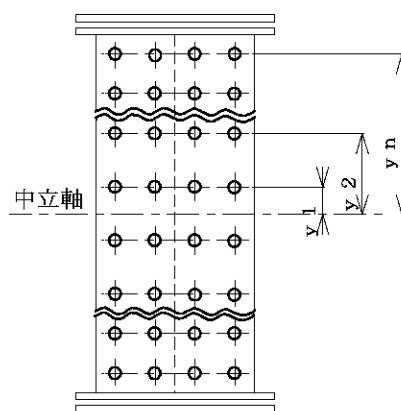
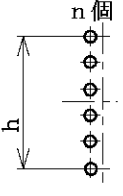
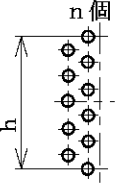
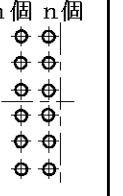
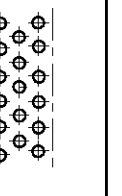
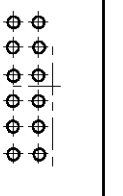
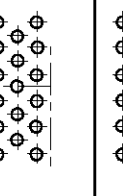
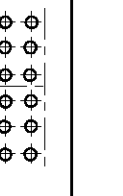


図 5 ガーダの継目

なお、上式の $\frac{M_w}{\sum y^2} \cdot y_n$ の代わりに $\frac{M_w}{h} \cdot f$ によって計算してもよい。f の値は、表 6 に示す。

表 7 係数 f の値

1 列におけるボルト数 n	1 列ボルト結合	2 列ボルト結合		3 列ボルト結合		4 列ボルト結合	
							
	$f_1 = \frac{6(n-1)}{n(n+1)}$	$f_2 = \frac{6(n-1)}{n(2n-1)}$	$f_2 = \frac{f_1}{2}$	$f_3 = \frac{2(n-1)}{n^2}$	$f_3 = \frac{f_1}{3}$	$f_4 = \frac{3(n-1)}{n(2n-1)}$	$f_4 = \frac{f_1}{4}$
4	0.900	0.643	0.450	0.375	0.3000	0.322	0.2125
5	0.800	0.533	0.400	0.320	0.2667	0.267	0.2000
6	0.714	0.455	0.357	0.278	0.2380	0.227	0.1785
7	0.643	0.396	0.322	0.249	0.2143	0.198	0.1068
8	0.583	0.350	0.292	0.219	0.1943	0.175	0.1458
9	0.533	0.314	0.267	0.198	0.1777	0.157	0.1332
10	0.491	0.284	0.246	0.180	0.1637	0.142	0.1228
11	0.455	0.260	0.228	0.165	0.1517	0.130	0.1138
12	0.423	0.239	0.212	0.153	0.1410	0.120	0.1058
13	0.396	0.222	0.198	0.142	0.1320	0.111	0.0990
14	0.371	0.206	0.186	0.133	0.1237	0.103	0.0928
15	0.350	0.193	0.175	0.124	0.1167	0.097	0.0875
16	0.331	0.181	0.166	0.117	0.1103	0.091	0.0828
17	0.314	0.171	0.157	0.111	0.1047	0.086	0.0785
18	0.298	0.162	0.149	0.105	0.0993	0.081	0.0745
19	0.284	0.153	0.142	0.100	0.0947	0.077	0.0710
20	0.271	0.146	0.136	0.095	0.0903	0.073	0.0678

9. 溶接設計

9.1 記号 この項で使用する記号は、次による。

- σ : 溶接部分に生じる引張り又は圧縮応力 (N/mm²)
- τ : 溶接部分に生じるせん断応力 (N/mm²)
- P : 継手に作用する力 (N)
- a : 溶接部分ののど厚 (9.3.2 参照) (mm)
- ι : 溶接部分の有効長さ (9.3.3 参照) (mm)
- M : 継手に作用する曲げモーメント (N・mm)
- I : のど厚の中立軸回りの断面二次モーメントで、すみ肉溶接の場合はのど厚を接合面に展開した図 6 に示すような展開有効断面の断面二次モーメント (mm⁴)
- y : 応力計算点の中立軸からの距離 (mm)
- Q : 応力計算する溶接線から外側の断面の中立軸の回りの断面一次モーメント (mm³)
- A_a : 腹板の総断面積, すみ肉溶接の場合は, 腹板部分のすみ肉ののど厚の合計面積 (mm²)
- σ_a : 許容引張応力 (N/mm²)

9.2 溶接継手の計算

9.2.1 引張, 圧縮又はせん断力が作用する継手の応力

突合せ溶接部分又はすみ肉溶接部分に生じる応力は、次式による。

$$\sigma = \frac{P}{\sum a \cdot \iota} \dots\dots\dots (8)$$

$$\tau = \frac{P}{\sum a \cdot l} \dots\dots\dots (9)$$

ここに、
 σ : 溶接部分に生じる引張り又は圧縮応力 (N/mm²)
 τ : 溶接部分に生じるせん断応力 (N/mm²)
 P : 継手に作用する力 (N)
 a : 溶接部分ののど厚 (9.3.2 参照) (mm)
 l : 溶接部分の有効長さ (9.3.3 参照) (mm)

9.2.2 曲げモーメントとせん断力とが同時に作用する継手の応力 腹板とフランジとを結合する連続溶接部、腹板の垂直又は水平突合せ溶接並びに I 形けたを壁面に結合するすみ肉溶接部のように、曲げモーメントとせん断力とが同時に作用する継手に対しては、次式によって合成応力を計算する。

$$\sqrt{\sigma^2 + 2\tau^2} \leq \sigma_a \dots\dots\dots (10)$$

ここに、
 σ : 曲げ応力 (N/mm²) ただし、 $\sigma \leq \sigma_a$
 τ : せん断応力 (N/mm²) ただし、 $\tau \leq \tau_a$
 σ_a : 許容引張応力 (N/mm²)

a) 曲げモーメントによる応力

$$\sigma = \frac{M}{I} \cdot y \dots\dots\dots (11)$$

ここに、
 M : 継手に作用する曲げモーメント (N・mm)
 I : のど厚の中立軸回りの断面二次モーメントで、すみ肉溶接の場合はのど厚を接合面に展開した図 6 に示すような展開有効断面の断面二次モーメント (mm⁴)
 y : 応力計算点の中立軸からの距離 (mm)
 σ : 曲げ応力 (N/mm²) ただし、 $\sigma \leq \sigma_a$

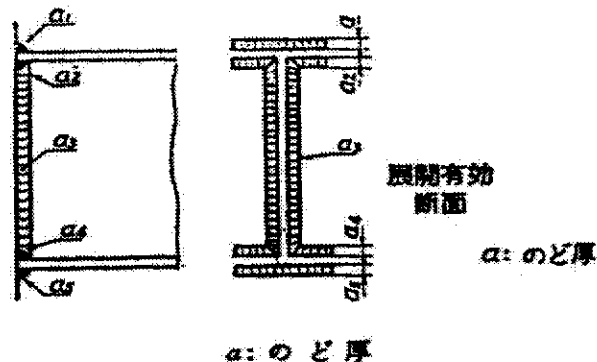


図 6 のど厚の展開

b) せん断応力

$$\tau = \frac{P \cdot Q}{I \cdot a} \dots\dots\dots (12)$$

ここに、
 τ : 溶接部分に生じるせん断応力 (N/mm²)
 P : 継手に作用する力 (N)

- Q : 応力計算する溶接線から外側の断面の中立軸の回りの断面一次モーメント (mm³)
 I : のど厚の中立軸回りの断面二次モーメントで、すみ肉溶接の場合はのど厚を接合面に展開した図 6 に示すような展開有効断面の断面二次モーメント (mm⁴)
 a : のど厚 (mm)

簡易計算の場合は、せん断力は腹板部だけで受けもつとして、次式によってよい。

$$\tau = \frac{P}{A_a} \dots\dots\dots (13)$$

- ここに、
 τ : 溶接部分に生じるせん断応力 (N/mm²)
 P : 継手に作用する力 (N)
 A_a : 腹板の総断面積, すみ肉溶接の場合は、腹板部分のすみ肉ののど厚の合計面積 (mm²)

9.3 溶接構造の設計細目

9.3.1 主要部材の溶接 主要部材の溶接は、一般に工場溶接とする。

9.3.2 溶接継手部分の有効厚さ 応力を伝える溶接継手の有効厚さは、溶接ののど厚とし、のど厚のとり方は、次による。

- a) グループ溶接ののど厚は、図 7 のとおり接合される部材の板厚とし、厚さの異なるときは、薄い方の板厚とする。

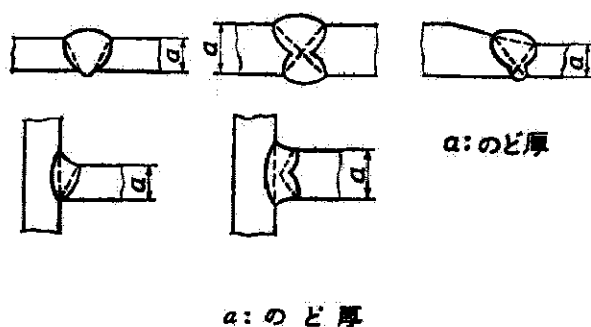


図 7 グループ溶接ののど厚

- b) すみ肉溶接ののど厚は、図 8 のとおり短い方のサイズを一边とする二等辺三角形の高さとする。

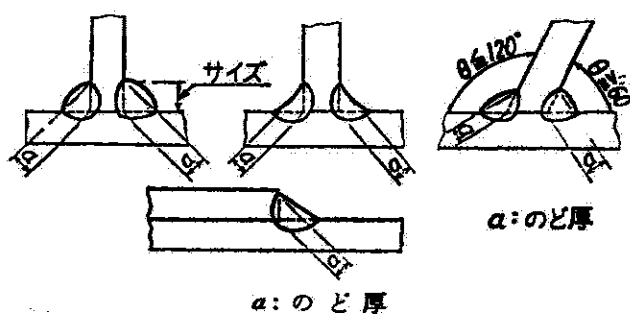


図 8 すみ肉溶接ののど厚

9.3.3 溶接継手部分の有効長さ 溶接継手の有効長さは、完全なのど厚をもつ溶接の長さとする。

- a) 突合せ溶接線が応力に直角でないときは、溶接線を直角に投影した長さとする (図 9 a) 参照)。
 b) すみ肉溶接で、まわし溶接を行ったときでも、まわし溶接の部分は有効長さとはしない (図 9 b) 参照)。

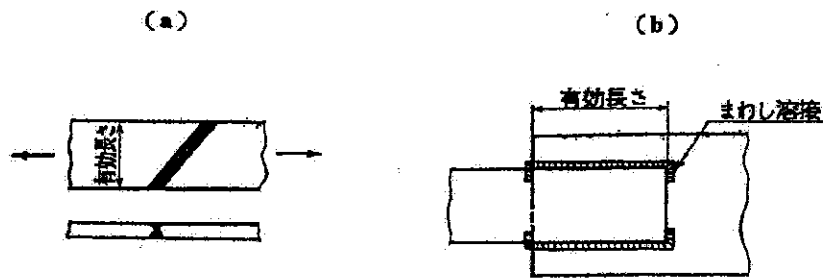
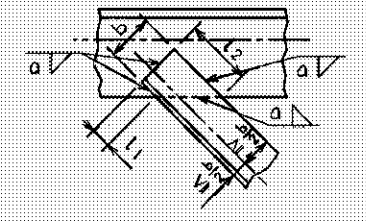


図 9 溶接の有効長さ

- c) 斜材端部の溶接の有効長さは、表 8 による。
ただし、150a（のど厚の 150 倍）を最長とする。
この表による場合、溶接線の斜材の重心軸までの偏心モーメントを考慮する必要はない。これは山形鋼以外の形鋼にも有効とする。

表 8 斜材端部の計算上の溶接線の長さ Σl

	継手の種類	図	計算上の継手の長さ Σl
1	側面すみ肉溶接		$\Sigma l = 2 l_1$
2	前面及び側面すみ肉溶接		$\Sigma l = b + 2 l_1$
3	環状すみ肉溶接, 重心軸は長い溶接線に近い。		$\Sigma l = l_1 + l_2 + 2b$

4	環状すみ肉溶接, 重心軸は短い溶接線に近い。		$\Sigma l = 2 l_1 + 2b$
---	---------------------------	---	-------------------------

10. 疲労設計

10.1 記号 この項で使用する記号は、次による。

C_R	: 平均応力補正係数
C_t	: 板厚補正係数
C_0	: $\Delta \sigma$ -N 線図の定数
D_0	: $\Delta \tau$ -N 線図の定数
F	: 対象部材に作用する荷重 (N)
F_1	: 垂直動荷重 (N)
F_2	: 垂直静荷重 (N)
F_3	: 水平動荷重 (N)
K	: 作業係数
N	: 応力繰返し数
R	: 応力比
T	: 設計寿命中の単位期間の数
m	: $\Delta \sigma$ -N 線図又は $\Delta \tau$ -N 線図の傾斜を表す定数
n_i	: 応力頻度分布における $\Delta \sigma_i$ の繰返し数
n_t	: 設計総繰返し数
t	: 板厚 (mm)
Ψ	: 衝撃係数
α	: 設計応力補正係数
κ	: 応力範囲打ち切り限界又は 200 万回基本許容応力範囲
γ	: 動荷重係数
γ_b	: 損傷影響度係数
γ_w	: 重要度係数
γ_i	: 検査係数
ϕ	: 静荷重係数
$\Delta \sigma$	: 直応力範囲 (N/mm ²)
$\Delta \sigma_c$	: 2×10^6 回基本許容応力範囲 (N/mm ²)
$\Delta \sigma_d$	: 設計応力範囲 (N/mm ²)
$\Delta \sigma_e$	: 等価応力範囲 (N/mm ²)
$\Delta \sigma_i$	: 応力範囲頻度分布中の一応力範囲成分 (N/mm ²)
$\Delta \sigma_k$	: 2×10^7 回基本許容応力範囲 (N/mm ²)
$\Delta \sigma_{\max}$	: 最大応力範囲 (N/mm ²)
$\Delta \sigma_R$	: 設計繰返し数に対する許容応力範囲 (N/mm ²)
$\Delta \sigma_u$	: 応力範囲の打ち切り限界 (N/mm)
$\Delta \tau$	: せん断応力範囲 (N/mm ²)
$\Delta \tau_c$	: 2×10^6 回基本許容せん断応力範囲 (N/mm ²)
$\Delta \tau_d$	: 設計せん断応力範囲 (N/mm ²)
$\Delta \tau_e$	: 等価せん断応力範囲 (N/mm ²)
$\Delta \tau_I$	: せん断応力範囲頻度分布中の一せん断応力範囲 (N/mm ²)
$\Delta \tau_R$	: 設計繰返し数に対する許容せん断応力範囲 (N/mm ²)
$\Delta \tau_u$	: せん断応力範囲の打ち切り限界 (N/mm ²)

10.2 定義 この項で使用する用語の定義は、次による。

公称応力	: はり理論のような一般理論によって求められる断面力に基づく応力
応力範囲	: 1 応力サイクル中の最大応力と最小応力の差
応力振幅	: 1 応力サイクル中の最大応力と最小応力の差の 1/2
平均応力	: 1 応力サイクル中の最大応力と最小応力の和の 1/2
最大応力範囲	: 設計寿命中に予想される最大の応力範囲
直応力	: 荷重方向に垂直な断面に生じる応力、すなわち垂直応力
応力比	: 最大応力に対する最小応力の比
等価応力範囲	: 変動応力と同じ繰返し数の下で、一定応力範囲と等価な疲労被害を受ける応力範囲
打ち切り限界	: この値以下では疲労損傷が生じない応力範囲
疲労寿命	: 疲労損傷が起こるまでの応力繰返し数
疲労強度	: 特定の疲労寿命に対する応力範囲
継手の種類	: 継手の形状及び疲労強度に応じた継手の分類
疲労強度等級	: 継手の種類に依存した疲労強度、(疲労強度等級 100 は 2×10^6 回疲労強度が 100 N/mm^2 であることを示す。)
疲労設計曲線	: 応力 (直応力、せん断応力) 範囲と疲労寿命の関係を示す曲線
基本許容応力範囲	: 応力範囲と繰返し数線図 ($\Delta \sigma$ -N 線図又は $\Delta \tau$ -N 線図) に基づいて定められる許容応力範囲
2×10^6 回基本許容応力範囲	: 2×10^6 回の繰返し数に対する基本許容応力範囲
許容応力範囲	: 基本許容応力範囲を平均応力及び板厚の影響を考慮して補正した許容応力範囲
設計寿命	: 設計上期待する構造部材の使用期間
設計繰返し数	: 設計寿命中に予想される応力の総繰返し数又は打ち切り限界以上の応力範囲の総繰返し数
設計応力範囲	: 設計で計算した等価応力範囲を設計計算応力補正係数で修正した応力範囲
単位期間	: 設計寿命を数えるために用いられる単位となる期間。たとえば、日、月、年など
損傷影響度係数	: 対象とする継手又は部材が疲労損傷したときに、損傷が構造物全体の強度又は機能に及ぼす影響を考慮した係数
重要度係数	: 構造物の重要性や損傷の影響を考慮した係数
検査係数	: 検査や維持管理のし易さを表す係数
冗長度係数	: 損傷度影響係数、重要度係数、検査係数の積として表される係数

10.3 適用 この項に示す基準は、鋼材を用いたクレーン構造部分の疲労に対する安全性を照査するために適用する。ただし、正当な理論的裏付けや信頼性の高い実験データ又は十分な使用実績データがある場合には、この基準に規定する数式や数値によらなくてもよい。

10.4 疲労設計に対する照査の範囲 疲労強度の照査が必要な場合には、本項によって行う。ただし、本照査は、次に示す条件の場合は適用しない。

- クレーン構造部分の最大公称応力が材料の降伏点や耐力を超える場合。
- 腐食環境下又は腐食の可能性が懸念される箇所で使用する場合。
- 常に高温にさらされる環境で使用する場合。
- 最大応力範囲 $\Delta \sigma_{\max}$ が次の条件を満足する場合。

$$\Delta \sigma_{\max} < 36 \text{ N/mm}^2$$

- 設計繰返し数が 10^4 回以下の場合。

10.5 疲労設計に用いる応力 部材の応力は、クレーン（移動式クレーンを除く）では式（14）を、移動式クレーンでは式（15）を用いて算定した荷重 F に対して公称応力を求める。公称応力の計算は、材料の線形弾性挙動を仮定して構造力学等により行う。但し、溶接継手などによる局所的な応力集中は考慮しない。

$$F = K [(\Psi \cdot F_1) + F_2 + F_3] \quad (14)$$

$$F = (\gamma \cdot F_1) + (\phi \cdot F_2) + F_3 \quad (15)$$

ここに、
 F : 対象部材に作用する荷重 (N)
 K : 作業係数
 Ψ : 衝撃係数
 F_1 : 垂直動荷重 (N)
 F_2 : 垂直静荷重 (N)
 F_3 : 水平動荷重 (N)
 γ : 動荷重係数
 ϕ : 静荷重係数

作業係数 K 、衝撃係数 Ψ 、動荷重係数 γ 及び静荷重係数 ϕ は、6.（荷重の組合せ）による。

10.6 疲労設計曲線 疲労設計には、直応力を受ける継手に対しては $\Delta \sigma$ - N 線図（図 10）を、せん断応力を受ける継手に対しては $\Delta \tau$ - N 線図（図 11）を用いる。直応力を受ける継手の $\Delta \sigma$ - N 線図は式（16）に、せん断応力を受ける継手の $\Delta \tau$ - N 線図は式（17）による。

$$\Delta \sigma^m \cdot N = C_0 \quad (16)$$

$$\Delta \tau^m \cdot N = D_0 \quad (17)$$

ここに、
 $\Delta \sigma$: 直応力範囲 (N/mm²)
 $\Delta \tau$: せん断応力範囲 (N/mm²)
 m : $\Delta \sigma$ - N 線図又は $\Delta \tau$ - N 線図の傾斜を表す定数
 N : 応力繰返し数
 C_0 : $\Delta \sigma$ - N 線図の定数
 D_0 : $\Delta \tau$ - N 線図の定数

m 、 C_0 及び D_0 は表 9 で求める。

参考 図 10 に示す 16 本の $\Delta \sigma$ - N 線図及び図 11 に示す 2 本の $\Delta \tau$ - N 線図は、継手の疲労強度等級に依存してそれぞれ両対数紙上で平行である。

図 10 に示す直応力を受ける継手に対する $\Delta \sigma$ - N 線図は、 $10^4 < N \leq 5 \times 10^6$ では両対数紙上で傾斜が $1/3$ ($m=3$ の逆数) の直線で、 $5 \times 10^6 < N \leq 10^8$ の範囲では、傾斜が $1/5$ ($m=5$ の逆数) の直線で表す。 $N > 10^8$ では、 $\Delta \sigma$ は N に依存しない直線、すなわち、打ち切り限界を示す。図 11 に示す $\Delta \tau$ - N 線図は、 $10^4 < N \leq 10^8$ では両対数紙上で傾斜が $1/5$ ($m=5$ の逆数) の 2 本の平行な直線として表す。 $N > 10^8$ では $\Delta \tau$ は N に依存しない直線として表す。

参考 継手の疲労強度等級は、継手の疲労試験結果の下限を与えるもので、疲労強度等級を表す数値、例えば 100 は、 2×10^6 回疲労強度が 100 N/mm^2 であることを示している。

表 10 は、直応力を受ける継手に対する疲労強度等級ごとの 2×10^6 回疲労強度、 $\Delta \sigma$ - N 線図の定数 C_0 、 5×10^6 回疲労強度及び応力範囲の打ち切り限界を示す。表 11 は、せん断応力を受ける継手に対する疲労強度等級ごとの 2×10^6 回疲労強度、 $\Delta \tau$ - N 線図の定数 D_0 及び応力範囲の打ち切り限界を示す。

表 9 C_0 , D_0 , m の値

N の範囲		$10^4 < N \leq 5 \times 10^6$		$5 \times 10^6 < N \leq 10^8$		$10^4 < N \leq 10^8$	
継手	定数	C_0	m	C_0	m	D_0	m
	非溶接継手	$2 \times 10^6 \cdot \Delta \sigma_c^m$	3	$2 \times 10^7 \cdot \Delta \sigma_K^m$	5	—	—
	板及び中空断面溶接継手	$2 \times 10^6 \cdot \Delta \sigma_c^m$	3	$2 \times 10^7 \cdot \Delta \sigma_K^m$	5	—	—
	せん断を受ける継手	—	—	—	—	$2 \times 10^6 \cdot \Delta \sigma_c^m$	5

参考 表 9 中の $\Delta \sigma_c$, $\Delta \tau_c$ は 2×10^6 基本許容応力範囲, $\Delta \sigma_K$ は 2×10^7 基本許容応力範囲である。

表 10 $\Delta \sigma$ -N 線図の定数, 疲労強度及び応力範囲の打ち切り限界

疲労強度等級	2×10^6 回疲労強度 N/mm^2	$10^4 < N \leq 5 \times 10^6$ における C_0 $m=3$	5×10^6 回疲労強度 N/mm^2	$5 \times 10^6 < N \leq 10^8$ における C_0 $m=5$	応力範囲の打ち切り限界 N/mm^2
36	36	9.331×10^{10}	26.5	6.562×10^{13}	14.6
40	40	1.280×10^{11}	29.5	1.110×10^{14}	16.2
45	45	1.823×10^{11}	33.2	2.005×10^{14}	18.2
50	50	2.500×10^{11}	36.8	3.393×10^{14}	20.2
56	56	3.512×10^{11}	41.3	5.979×10^{14}	22.7
63	63	5.000×10^{11}	46.4	1.078×10^{15}	25.5
71	71	7.158×10^{11}	52.3	1.957×10^{15}	28.7
80	80	1.024×10^{12}	58.9	3.557×10^{15}	32.4
90	90	1.458×10^{12}	66.3	6.408×10^{15}	36.4
100	100	2.000×10^{12}	73.7	1.086×10^{16}	40.5
112	112	2.810×10^{12}	82.5	1.913×10^{16}	45.3
125	125	3.906×10^{12}	92.1	3.314×10^{16}	50.6
140	140	5.488×10^{12}	103.2	5.488×10^{16}	56.7
160	160	8.192×10^{12}	117.9	1.138×10^{17}	64.8
180	180	1.166×10^{13}	132.6	2.052×10^{17}	72.9
200	200	1.600×10^{13}	147.4	3.475×10^{17}	80.9

表 11 $\Delta \tau$ -N 線図の定数, 疲労強度及び応力範囲の打ち切り限界

疲労強度等級	2×10^6 回疲労強度 N/mm^2	$10^4 < N \leq 10^8$ における D_0 $m=5$	応力範囲の打ち切り限界 N/mm^2
80	80	6.554×10^{15}	36.6
100	100	2.000×10^{16}	45.7

10.6.1 直応力を受ける非溶接継手の疲労強度等級と疲労設計曲線の関係 非溶接継手の疲労強度等級は 100, 125, 160, 200 の 4 等級とし, $\Delta \sigma$ -N 線図は図 10 を使用する。非溶接継手の疲労強度等級分類を表 15 に示す。

10.6.2 直応力を受ける板及び中空断面溶接継手の疲労強度等級と疲労設計曲線の関係 板及び中空断面溶接継手の疲労強度等級は, 36 から 200 までの 16 等級とし, $\Delta \sigma$ -N 線図は図 10 を使用する。板及び中空断面溶接継手の疲労強度等級分類は表 16 による。疲労強度等級は溶接継手の仕上げ状態及び非破壊検査によって, 等級のランクを上げてよい。

10.6.3 セン断応力を受ける継手の疲労設計曲線 セン断応力を受ける非溶接継手及び溶接継手の疲労強度等級は、80 及び 100 の 2 等級とし、 $\Delta \sigma$ -N 線図は、図 11 を使用する。

10.7 平均応力補正係数 C_R 引張り平均応力（平均応力が正）を受ける溶接継手及び母材に対しては、引張り平均応力の影響は考慮しない。平均応力が圧縮の場合には、次式で示す平均応力補正係数を基本許容応力範囲に乗じて許容応力範囲を定める。

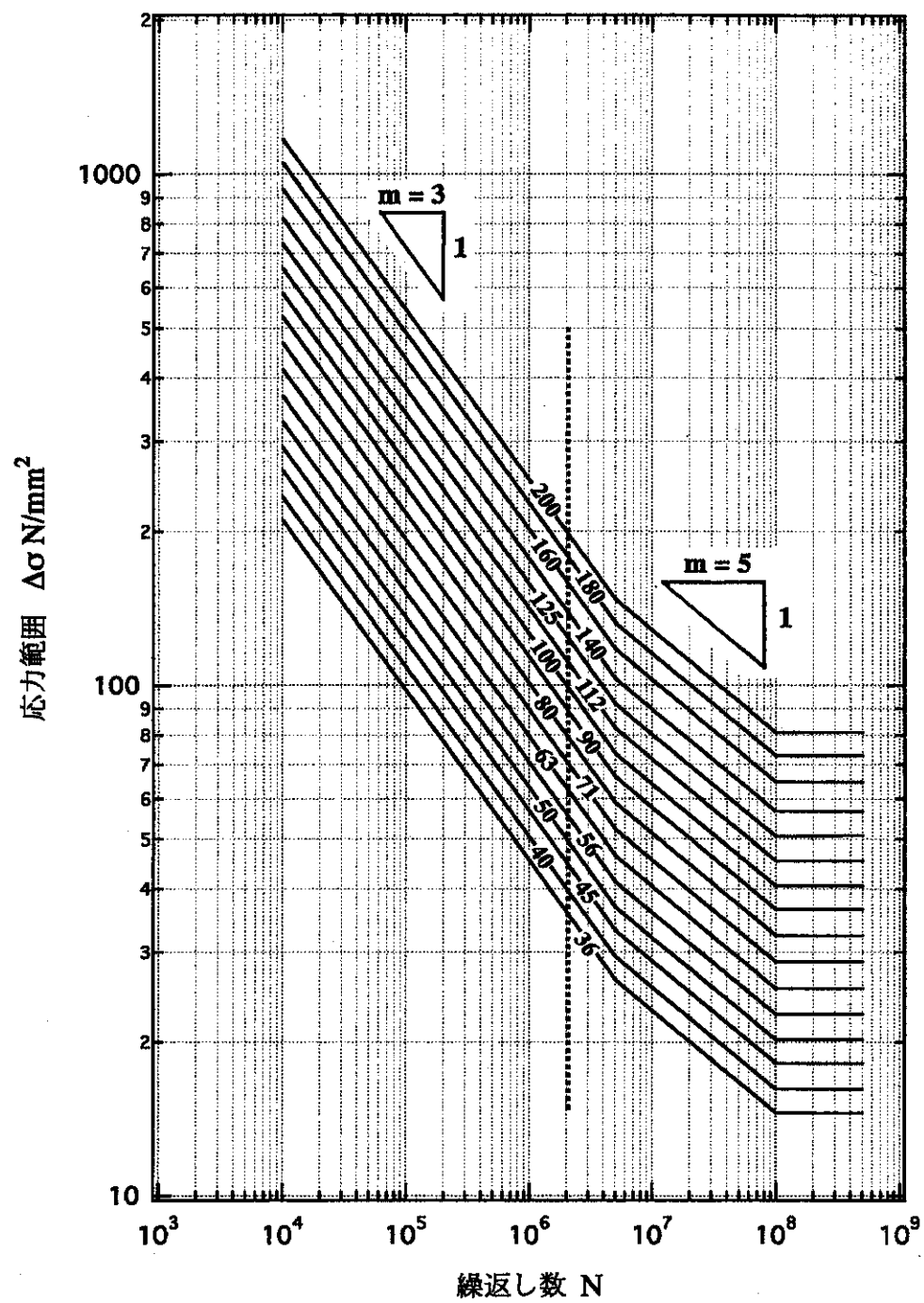
$$C_R = \frac{1.3(1-R)}{1.6-R} \dots\dots\dots (18)$$

ここに、 C_R : 平均応力補正係数
 R : 応力比

10.8 板厚補正係数 板厚が 25 mm を超える継手については、次式で示す板厚補正係数を基本許容応力範囲に乗じて許容応力範囲を定める。

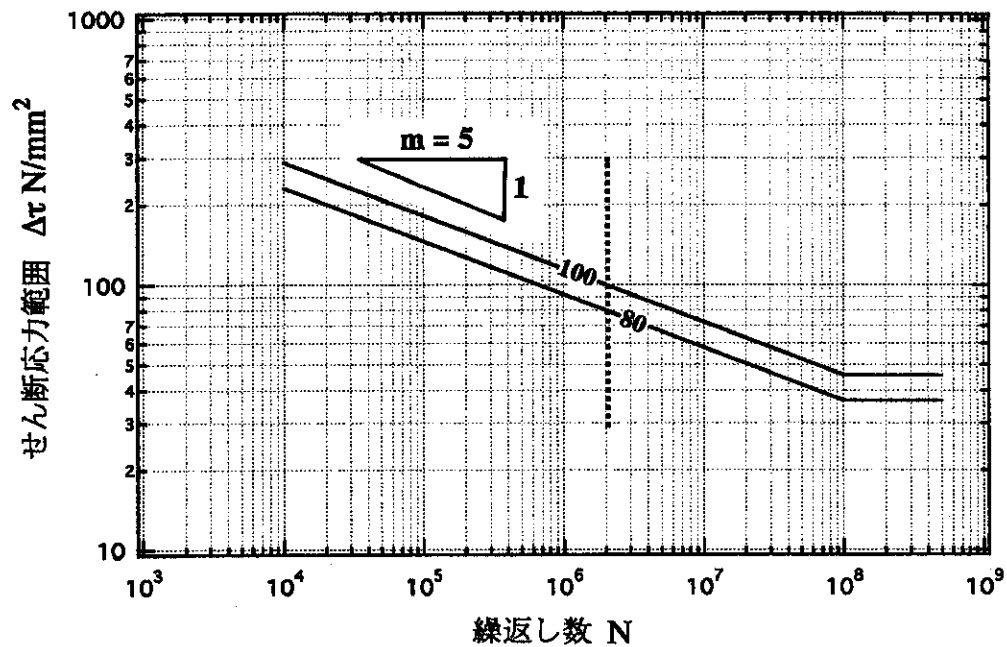
$$C_t = \sqrt[4]{25/t} \dots\dots\dots (19)$$

ここに、 C_t : 板厚補正係数
 t : 板厚 (mm)



注 グラフ中の数値は、強度等級を示す。

図 10 直応力を受ける非溶接継手及び溶接継手の $\Delta\sigma$ - N 線図



備考 グラフ中の数値は、強度等級を示す。

図 11 せん断応力を受ける継手の $\Delta \tau$ -N 線図

10.9 設計繰返し数 設計繰返し数は、次式による。

$$n_t = T \cdot \sum n_i \quad (20)$$

ここに、
 n_t : 設計繰返し数
 $\sum n_i$: 単位期間内の応力の総繰返し数
 T : 設計寿命中の単位期間の数

10.10 等価応力範囲 変動応力と同じ繰返し数の下で、一定応力範囲と等価な疲労被害を受ける応力範囲、すなわち等価応力範囲又は等価せん断応力範囲は、次式による。

$$\Delta \sigma_e = \sqrt[m]{\sum \Delta \sigma_i^m (n_i / \sum n_i)} \quad (21)$$

$$\Delta \tau_e = \sqrt[m]{\sum \Delta \tau_i^m (n_i / \sum n_i)} \quad (22)$$

ここに、
 $\Delta \sigma_e$: 等価応力範囲 (N/mm²)
 $\Delta \tau_e$: 等価せん断応力範囲 (N/mm²)
 $\Delta \sigma_i$: 応力範囲頻度分布中の一応力範囲成分 (応力頻度分布中の i 番目の応力範囲) (N/mm²)
 $\Delta \tau_i$: せん断応力範囲頻度分布中の一せん断応力範囲 (N/mm²)
 n_i : $\Delta \sigma_i$ 又は $\Delta \tau_i$ の繰返し数
 m : $\Delta \sigma$ -N 線図又は $\Delta \tau$ -N 線図の傾斜を表す定数

10.11 設計応力範囲 設計応力範囲は、次式による。

$$\Delta \sigma_d = \alpha \Delta \sigma_e \quad (23)$$

$$\Delta \tau_d = \alpha \Delta \tau_e \quad (24)$$

ここに、
 $\Delta \sigma_d$: 設計応力範囲 (N/mm²)
 $\Delta \tau_d$: 設計せん断応力範囲 (N/mm²)
 α : 設計応力補正係数であって、計算した応力が実際の応力と異なることが明らかな場合に乗じる係数
 $\Delta \sigma_e$: 等価応力範囲 (N/mm²)
 $\Delta \tau_e$: 等価せん断応力範囲 (N/mm²)

10.12 疲労許容応力範囲 設計繰返し数に対する許容応力範囲及び設計繰返し数に対するせん断許容応力範囲は、次式による。

$$\Delta \sigma_R = \sqrt[m]{C_0 / n_t} \cdot C_R \cdot C_t \dots\dots\dots (25)$$

$$\Delta \tau_R = \sqrt[m]{D_0 / n_t} \dots\dots\dots (26)$$

ここに、
 $\Delta \sigma_R$: 設計繰返し数に対する許容応力範囲 (N/mm²)
 $\Delta \tau_R$: 設計繰返し数に対する許容せん断応力範囲 (N/mm²)
 C_0 : $\Delta \sigma$ -N 線図の定数 (表 9 参照)
 D_0 : $\Delta \tau$ -N 線図の定数 (表 9 参照)
 m : $\Delta \sigma$ -N 線図又は $\Delta \tau$ -N 線図の傾きを表す定数 (表 9 参照)
 n_t : 設計繰返し数
 C_R : 平均応力 (応力比) 補正係数
 C_t : 板厚補正係数

10.13 疲労照査法 次の式が成立することを確認する。

$$(\gamma_b \cdot \gamma_w \cdot \gamma_i) \Delta \sigma_d \leq \Delta \sigma_R \dots\dots\dots (27)$$

$$(\gamma_b \cdot \gamma_w \cdot \gamma_i) \Delta \tau_d \leq \Delta \tau_R \dots\dots\dots (28)$$

ここに、
 γ_b : 損傷影響度係数 (表 12 参照)
 γ_w : 重要度係数 (表 13 参照)
 γ_i : 検査係数 (表 14 参照)
 $\Delta \sigma_d$: 設計応力範囲 (N/mm²)
 $\Delta \sigma_R$: 許容応力範囲 (N/mm²)
 $\Delta \tau_d$: 設計せん断応力範囲 (N/mm²)
 $\Delta \tau_R$: 許容せん断応力範囲 (N/mm²)

なお、冗長度係数 ($\gamma_b \cdot \gamma_w \cdot \gamma_i$) の上限は 1.25、下限は 0.80 とする。

表 12 損傷影響度係数 γ_b の値

γ_b	条件
1.1	疲労損傷がクレーン全体の崩壊を引き起こす場合
1.00~1.10	疲労損傷がクレーンの強度又は機能に影響を及ぼす場合
0.80	疲労損傷が生じてもクレーンの強度上、機能上特に問題が生じない場合

表 13 重要度係数 γ_w の値

γ_w	条件
0.80～1.10	重要度に依存，通常は 1

表 14 検査係数 γ_i の値

γ_i	条件
0.90～1.00	検査や管理の容易な構造の場合
1.10	検査が困難な場合

10.14 疲労照査手順及び流れ図 疲労照査手順は，次による。

- a) 照査部位を決める。
- b) 対象部材に加わる垂直動荷重，垂直静荷重，水平動荷重，作業係数，衝撃係数，動荷重係数，静荷重係数から，部材に作用する最大応力 $\sigma_{\max}$ と最小応力 $\sigma_{\min}$ を求め，最大応力範囲を決める。
- c) 対象部材の設計繰返し数を決める。
- d) 継手の強度等級（表 15，表 16）を決め， $\Delta \sigma$ -N 線図（図 10）又は $\Delta \tau$ -N 線図（図 11）を参照して，設計繰返し数が 2×10^6 回以下の場合には 2×10^6 回疲労強度を，設計繰返し数が 2×10^6 回以上の場合には応力範囲の打ち切り限界（表 10，表 11）を定める。
- e) 応力範囲の最大値に構造補正係数を乗じた値と，200 万回基本許容応力範囲又は応力範囲の打ち切り限界に平均応力補正係数及び板厚補正係数を乗じた値とを比較し，応力範囲の最大値に構造補正係数を乗じた値の方が小さければ，疲労照査を終了する。大きな場合には，詳細疲労照査を行う。
- f) クレーンの使用年数，取扱物の質量と分布，荷役回数などから応力頻度分布を求める。
- g) 等価応力範囲を計算する。
- h) 等価応力範囲に設計計算補正係数を乗じて設計応力範囲を求める。
- i) 継手の強度等級，設計繰返し数，平均応力補正係数，板厚補正係数などから許容応力範囲を計算する。
- j) 設計応力範囲と板厚補正係数の積と許容応力範囲の比較を行い，設計応力範囲と板厚補正係数の積の方が許容応力範囲よりも小さければ照査を終了する。大きい場合は設計変更を行う。

疲労照査の流れ図を図 12 に示す。

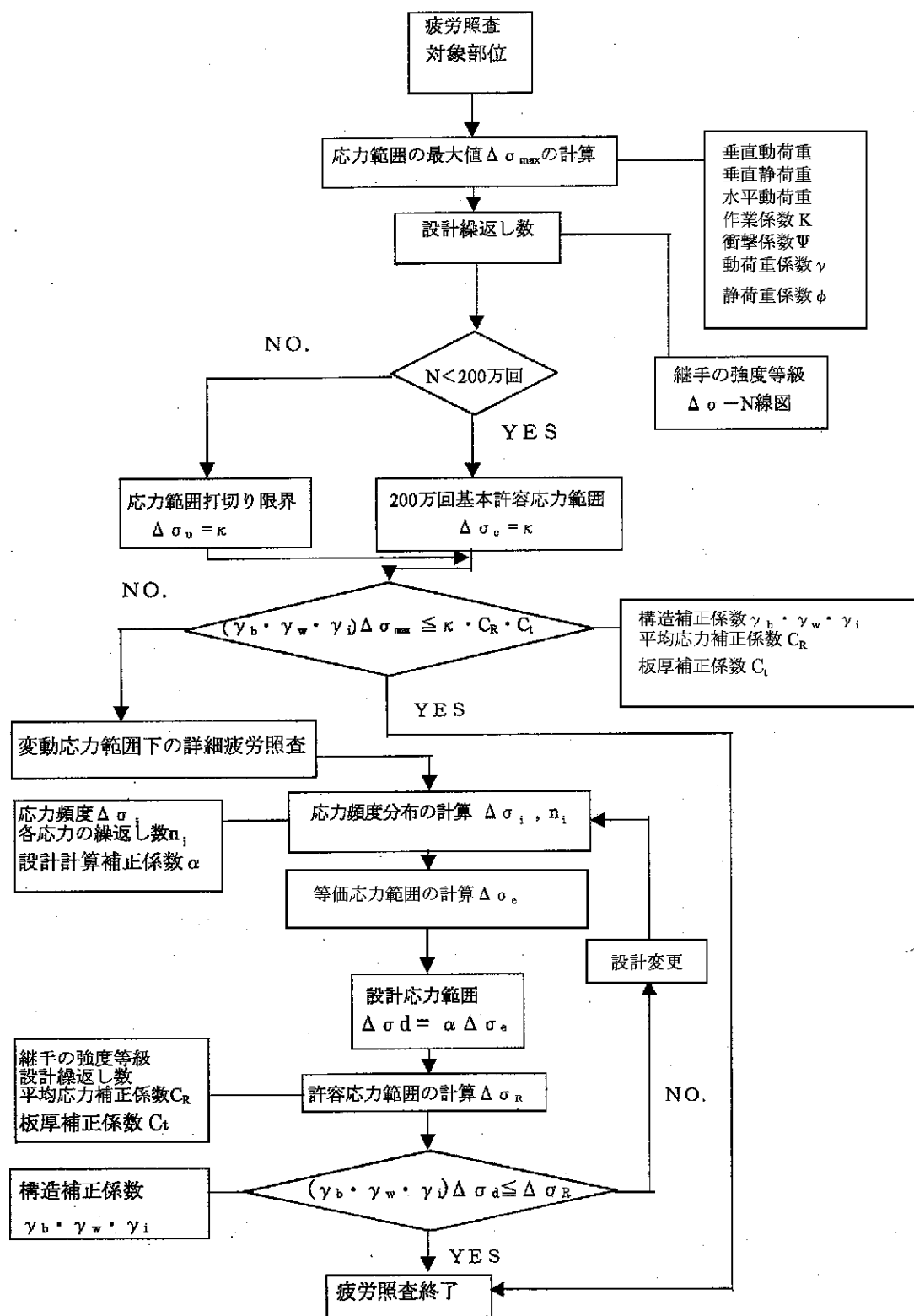


図 12 疲労照査フローチャート

表 15 非溶接継手の疲労強度等級分類

1. 母材

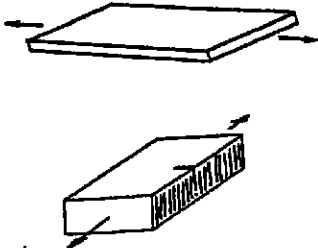
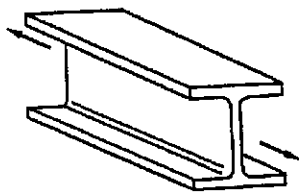
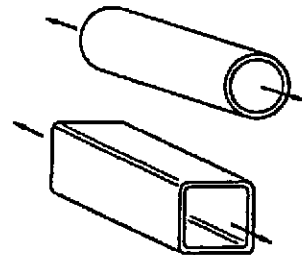
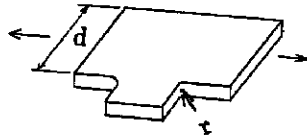
No.	構造詳細	強度等級	説 明	備 考
111		200	表面及び端面機械仕上げ (切断面表面粗さ 6.3a 以下)	
		160	黒皮付きでガスカットした 切断縁をもつ (切断面表面粗さ 25a 以下)	
		125	黒皮付きでガスカットした 切断縁をもつ	
121		160	黒皮付き	
		160	黒皮付きでガスカットした 切断縁をもつ (切断面表面粗さ 25a 以下)	
		125	黒皮付きでガスカットした 切断縁をもつ	
131		160		
141		160	$+1/5 \leq r/d$ (切断面表面粗さ 6.3a 以下)	
		125	$1/10 \leq r/d < 1/5$ (切断面表面粗さ 6.3a 以下)	
		125	$1/5 \leq r/d$ (切断面表面粗さ 25a 以下)	
		100	$1/10 \leq r/d < 1/5$ (切断面表面粗さ 6.3a 以下)	

表 15 非溶接継手の疲労強度等級分類 (続き)

2. 高力ボルト継手の母材

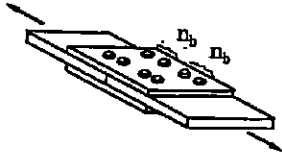
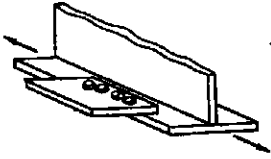
No.	構造詳細	強度等級	説 明	備 考
151	高力ボルト摩擦接合継手の母材 (総断面応力) 	160	$1 \leq n_b \leq 4$	n_b : 応力方向の ボルト本数 孔を押抜きせ ん断加工した 場合は強度等 級を下げる
		125	$5 \leq n_b \leq 5$	
		100	$16 \leq n_b$	
171	対象方向の応力を伝えない高力ボ ルト締め孔をもつ母材 (純断面応力) 	160		孔を押抜きせ ん断加工した 場合は強度等 級を下げる

表 16 溶接継手の疲労強度等級分類

No.	構造詳細	強度等級	説 明	備 考
211	平板の横突合せ継手 (仕上げ)	160	余盛りを削除した継手 完全溶込み溶接	アンダーカット 除去 仕上げ方向は応 力の方向と平行
		125	止端仕上げした継手 完全溶込み溶接	
212	平板の横突合せ継手 (非仕上げ)	100	両面溶接	完全溶込み溶接 深さ 0.5 mm 以 上のアンダーカ ット除去
		100	良好な形状の裏波をもつ片 面溶接	
		63	裏面の形状を確認できない 片面溶接	
		63	裏当て金付き片面溶接	
221	板厚の異なる板の横突合せ継手 (余盛り削除, 止端仕上げ, 遷移部 仕上げ)	125	こう配 1/5 以下	完全溶込み溶接 アンダーカット 除去
		100	こう配 1/3 以下	
		80	こう配 1/2 以下	
222	板厚の異なる板の横突合せ継手 (非仕上げ)	100	こう配 1/5 以下	完全溶込み溶接 アンダーカット 除去
		90	こう配 1/3 以下	
		80	こう配 1/2 以下	
223	板厚の異なる板の横突合せ継手 (非仕上げ)	71	2 枚の板厚の中心は一致さ せる。 仕上げ又は溶接形状のこう 配が緩やかな場合には No.222 を参考	完全溶込み溶接

表 16 溶接継手の疲労強度等級分類 (続き)

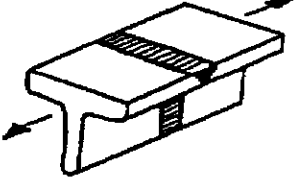
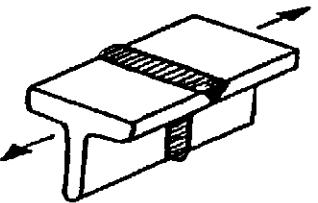
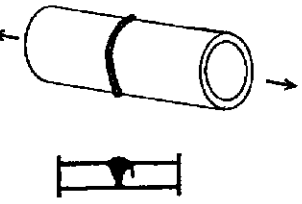
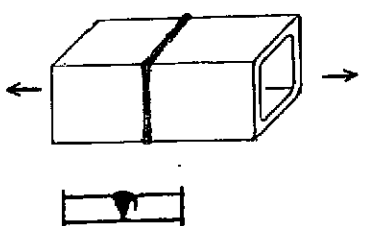
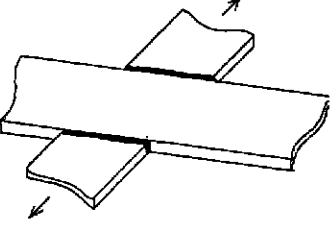
No.	構造詳細	強度等級	説 明	備 考
231	圧延形鋼の横突合せ継手 (仕上げ) 	80	表面を平らにグラインダ 仕上げ 完全溶込み溶接	アンダーカット 除去
232	圧延形鋼の横突合せ継手 (非仕上げ) 	71	完全溶込み溶接	
241	丸形鋼管の横突合せ溶接継手 	71	片面溶接 完全溶込み ルート部検査	
251	角形鋼管の横突合せ溶接継手 	56	片面溶接 完全溶込み ルート部検査	
261	フランジ交差部の横突合せ継手 (非仕上げ) 	50	突合わせ溶接部に生じる き裂が対象	

表 16 溶接継手の疲労強度等級分類 (続き)

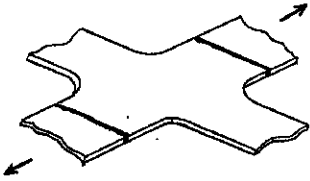
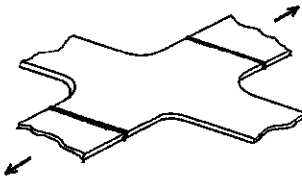
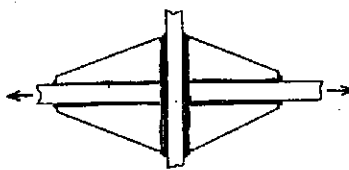
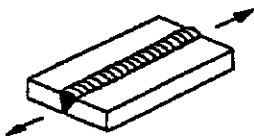
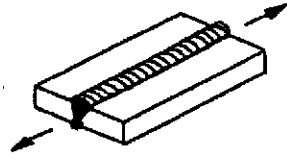
No.	構造詳細	強度等級	説 明	備 考
271	横突合せ溶接されたガセット継手 (仕上げ) 	125	表面を平らにグラインダ仕上げ 溶接止端をグラインダ仕上げ フランジの交差部仕上げ 円弧状の遷移部仕上げ	
272	横突合せ溶接されたガセット継手 (一部仕上げ) 	100	溶接余盛り形状を制御 フランジの交差部仕上げ 円弧状の遷移部仕上げ	
281	補助ガセットをもつ横突合せ溶接継手 	80 71	表面を平らなグラインダで仕上げた横突合せ溶接継手 溶接止端部をグラインダ仕上げ 溶接止端部をグラインダ仕上げ	
311	縦方向溶接継手 (仕上げ) 	160	完全溶込み溶接継手 表裏面ともに溶接方向と平行にグラインダ仕上げして余盛り削除	
312	縦方向溶接継手 (非仕上げ) 	125	完全溶込み溶接継手	

表 16 溶接継手の疲労強度等級分類 (続き)

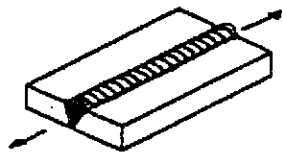
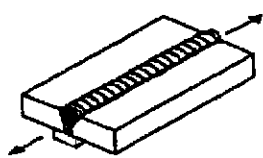
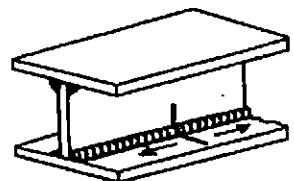
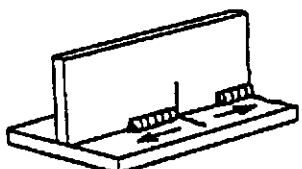
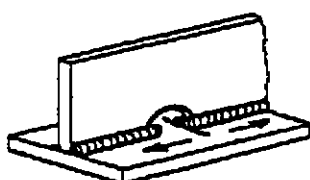
No.	構造詳細	強度等級	説 明	備 考
313	縦方向溶接継手 	100	部分溶込み溶接継手	
314	縦方向溶接継手 	80	裏当て金付き溶接	
321	縦方向突合せ溶接継手 	100 90	すみ肉溶接 継目なしの連続自動縦方向 両面溶接 連続手動縦方向すみ肉溶接	フランジの応力 で照査
322	縦方向溶接継手 	80 71 63 56 50 45 40 36	断続縦方向すみ肉溶接 $\sigma/\tau=0$ $\sigma/\tau=0.0\sim0.2$ $\sigma/\tau=0.2\sim0.3$ $\sigma/\tau=0.3\sim0.4$ $\sigma/\tau=0.4\sim0.5$ $\sigma/\tau=0.5\sim0.6$ $\sigma/\tau=0.6\sim0.7$ $\sigma/\tau>0.7$	溶接端における フランジの直応 力 σ とウェブの せん断応力 τ で 照査
323	縦方向溶接継手 	71 63 56 50 45 40 36	スカーラップを含むすみ肉 又は断続すみ肉溶接継手 $\sigma/\tau=0$ $\sigma/\tau=0.0\sim0.2$ $\sigma/\tau=0.2\sim0.3$ $\sigma/\tau=0.3\sim0.4$ $\sigma/\tau=0.4\sim0.5$ $\sigma/\tau=0.5\sim0.6$ $\sigma/\tau>0.6$	溶接端における フランジの直応 力 σ とウェブの せん断応力 τ で 照査

表 16 溶接継手の疲労強度等級分類 (続き)

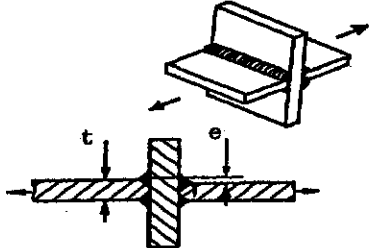
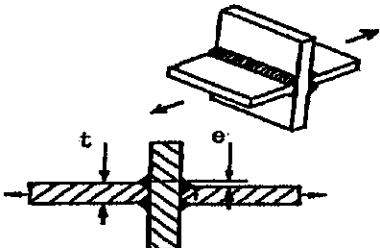
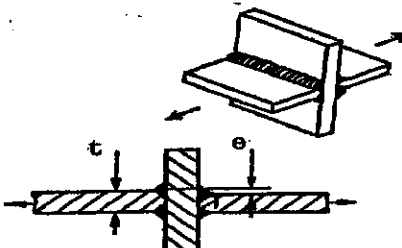
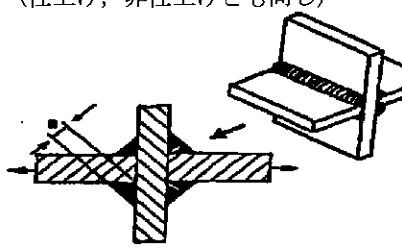
No.	構造詳細	強度等級	説 明	備 考
411	荷重伝達形十字継手又は T 継手 (仕上げ) 	100	滑らかな止端をもつ K 開先 すみ肉溶接継手 完全溶込み 形状不整 $e < 0.15t$ 止端グラインダ仕上げ (止端破壊対象)	
412	荷重伝達形十字継手又は T 継手 (非仕上げ) 	80	K 開先すみ肉溶接 完全溶込み 形状不整 $e < 0.15t$ (止端破壊対象)	
413	荷重伝達形十字継手 (非仕上げ) 	63	K 開先すみ肉溶接又は部分 溶込みすみ肉溶接 形状不整 $e < 0.15t$ (止端破壊対象)	
414	荷重伝達形十字継手 (仕上げ, 非仕上げとも同じ) 	45	K 開先すみ肉溶接又は部分 溶込みすみ肉溶接 (レート破壊対象)	のど断面での平均せん断応力で 照査

表 16 溶接継手の疲労強度等級分類 (続き)

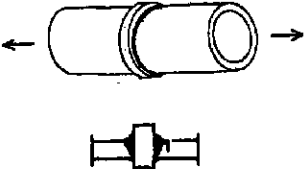
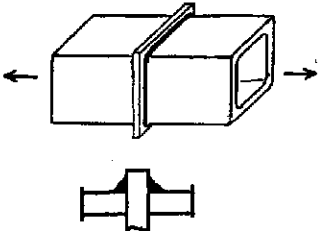
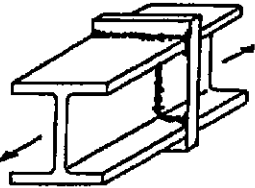
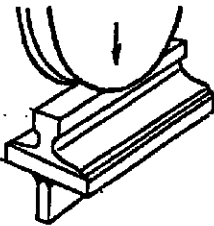
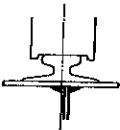
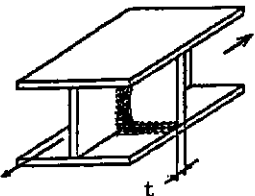
No.	構造詳細	強度等級	説 明	備 考
421	荷重伝達形十字継手 	60	丸形鋼管又は角形鋼管の中板を介して片側から開先すみ肉溶接した継手 (止端破壊対象)	
422	荷重伝達形十字継手 	40	丸形鋼管又は角形鋼管の中板を介して片側からすみ肉溶接した継手 (ルート破壊)	のど断面応力で 照査
423	荷重伝達形十字継手 	45	中板を介してすみ肉溶接した形鋼の継手 (ルート破壊)	のど断面応力で 照査
431	集中荷重を受けるフランジとウェブの継手 	100~45	No.411~414 に示した継手と見なして評価する。 偏心荷重による局所的な曲げも考慮する。 	
441	垂直補剛材が溶接されたはり又は板けた 	80 71	$t \leq 12 \text{ mm}$ $t > 12 \text{ mm}$	

表 16 溶接継手の疲労強度等級分類 (続き)

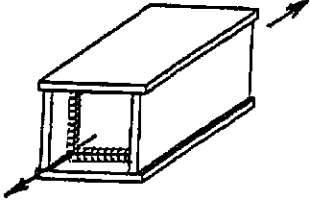
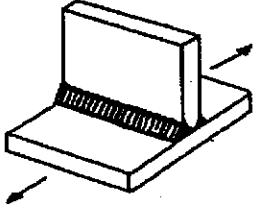
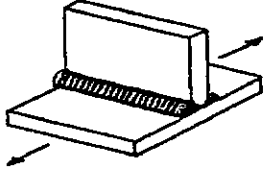
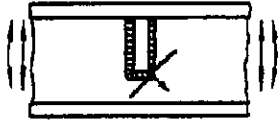
No.	構造詳細	強度等級	説 明	備 考
451	フランジ又はウェブが溶接された箱けた 	80 71	$t \leq 12 \text{ mm}$ $t > 12 \text{ mm}$	t は、ダイヤフラムの板厚
511	荷重非伝達形の追加物をもつ継手 (仕上げ) 	100 100	K 開先すみ肉溶接 止端グラインダ仕上げ 両面すみ肉溶接 止端グラインダ仕上げ	追加板が主板より薄い横継手
512	荷重非伝達形の追加物をもつ継手 (非仕上げ) 	80 71	すみ肉溶接 すみ肉溶接 追加板が主板より厚い場合	
521	荷重非伝達形の追加物をもつ継手 (仕上げ) 	100 100	桁のウェブ又はフランジに溶接した補剛材 K 開先すみ肉溶接 止端グラインダ仕上げ すみ肉溶接 止端グラインダ仕上げ	追加板が主板より薄いこと
522	荷重非伝達形の追加物をもつ継手 (非仕上げ) 	80 71	すみ肉溶接 追加板が主板より厚い場合	

表 16 溶接継手の疲労強度等級分類 (続き)

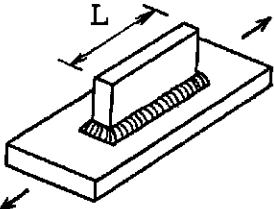
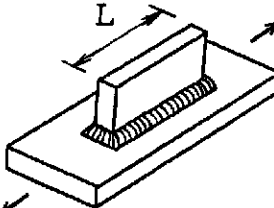
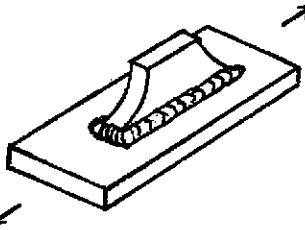
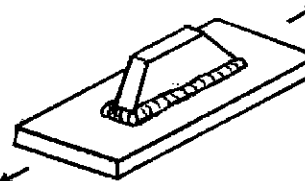
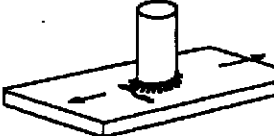
No.	構造詳細	強度等級	説 明	備 考
531	面外ガセットすみ肉溶接継手 (止端仕上げ) 	80	ガセット長さ $L \leq 100 \text{ mm}$	
532	面外ガセットすみ肉溶接継手 (非仕上げ) 	71 63 50	ガセット長さ $L \leq 100 \text{ mm}$ ガセット長さ $100 \text{ mm} < L \leq 300 \text{ mm}$ ガセット長さ $L > 300 \text{ mm}$	
533	フィレットをもつ面外ガセットすみ肉溶接継手 	71	端部はすみ肉溶接で回し溶接, その後グラインダ仕上げ	
534	角を切り取ったガセットをすみ肉溶接した面外ガセット溶接継手 	63		
541	スタッドを溶接した継手 	80		主板断面で照査 スタッド断面ではせん断応力で照査

表 16 溶接継手の疲労強度等級分類 (続き)

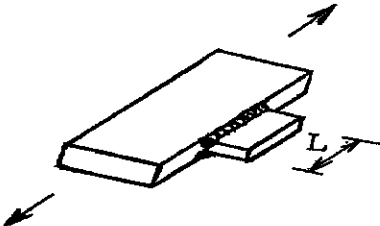
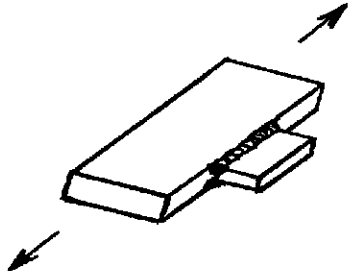
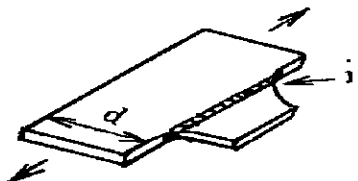
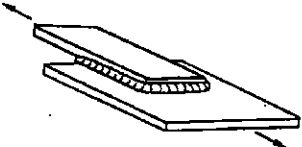
No.	構造詳細	強度等級	説 明	備 考
551	ガセットを開先溶接した面内ガセット溶接継手 (止端仕上げ) 	50	$L < 150 \text{ mm}$	
		45	$L < 300 \text{ mm}$	
		40	$L > 300 \text{ mm}$	
552	ガセットを開先溶接した面内ガセット溶接継手 	40		
553	フィレットをもつガセットを開先溶接した面外ガセット溶接継手 (フィレット部仕上げ) 	100	$1/3 \leq r/d$	アンダーカット除去 グラインダでの仕上げ方向は応力方向と同方向
		80	$1/5 \leq r/d < 1/3$	
		63	$1/10 \leq r/d < 1/5$	
611	重ね継手 	40	主板断面	前面すみ肉溶接のど断面及び側面すみ肉溶接のど断面ではせん断応力で照査
		40	添接板断面	
612	重ねガセット継手の母材 	40		アンダーカット除去

表 16 溶接継手の疲労強度等級分類 (続き)

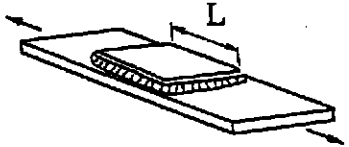
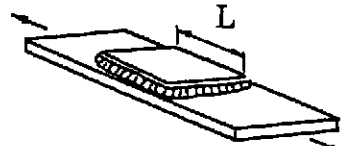
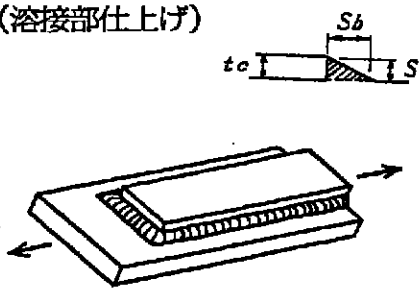
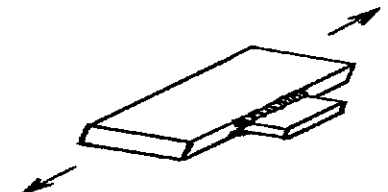
No.	構造詳細	強度等級	説 明	備 考
711	あて板をすみ肉溶接で取付けた継手 (止端仕上げ) 	80	$L \leq 300 \text{ mm}$	アンダーカット 除去 グラインダでの 仕上げ方向は応 力方向と同方向
712	あて板をすみ肉溶接で取付けた継手 (非仕上げ) 	63	$L \leq 300 \text{ mm}$	深さ 0.5 mm 以 上のアンダーカ ットは除去
713	カバープレートをすみ肉溶接で取り付 けた継手 (溶接部仕上げ) 	100	$S_h \geq 0.8 \text{ tc}$ $S_b \geq 2.5 \text{ Sh}$	
714	カバープレートをすみ肉溶接で取り付 けた継手 (非仕上げ) 	40		

表 16 溶接継手の疲労強度等級分類 (続き)

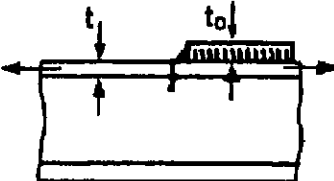
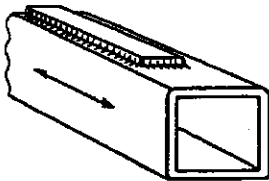
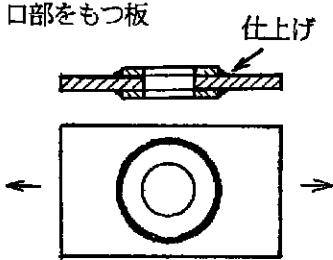
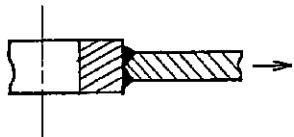
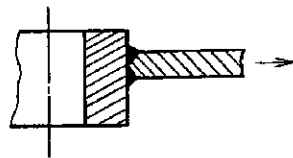
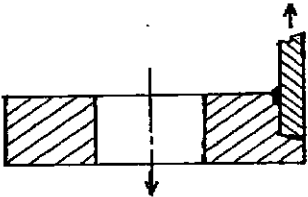
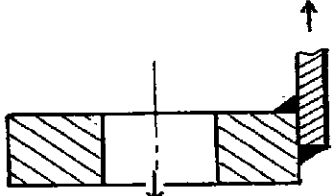
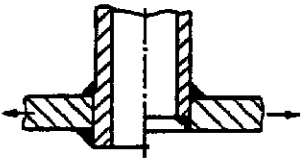
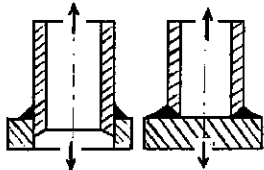
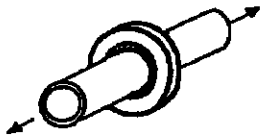
No.	構造詳細	強度等級	説 明	備 考
721	あて板をすみ肉溶接で取付けた I 断面けた 	56	$t_D \leq 0.8t$	溶接止端位置で照査
		50	$0.8t < t_D \leq 1.5t$	
		45	$t_D > 1.5t$	
731	あて板をすみ肉溶接された角形鋼管 	50	鋼管の板厚 25 mm 以下	溶接止端位置での応力範囲で照査
741	あて板をすみ肉溶接された円形開口部をもつ板 口部をもつ板 仕上げ 	80	溶接止端をグラインダ仕上げ	
		71	溶接のまま	
811	剛なフランジ 	71	完全溶け込み溶接	
812	剛なフランジ 		部分溶け込み又はすみ肉溶接	
		63	板の止端破壊対象	
		45	のど断面のルート破壊対象	

表 16 溶接継手の疲労強度等級分類 (続き)

No.	構造詳細	強度等級	説 明	備 考
821	ほぼ完全溶込みで溶接された平らなフランジ 	71	完全溶け込み溶接 止端破壊対象	パイプの応力 力で照査
822	すみ肉溶接で接合された平らなフランジ 	63	止端破壊対象	パイプの応力 力で照査
832	管のブランチ又は板を貫通したパイプ 	71	すみ肉溶接	
911	中実断面の棒と突合せ溶接した円形鋼管 	63	溶接のまま	
912	片面からの突合せ溶接又は2つのすみ肉溶接で他の部材に接合された円形鋼管 	50		ルート破壊 対象
921	外側に円盤が溶接された円形鋼管 	90 90 71	K開先突合せ溶接 止端グラインダ仕上げ すみ肉溶接 止端グラインダ仕上げ すみ肉溶接 溶接のまま	

11. 座屈計算

11.1 記号 この章で使用する記号は、次による。

- a : 区画の長さ (mm)
- A : 総断面積 (mm^2)
- A_d : ラチス部材の断面積 (mm^2)
- A_{xd} : 側面の1つの構成面における斜材の断面積 (mm^2)
- A_{yd} : 上下面の1つの構成面における斜材の断面積 (mm^2)
- b : 区画の幅 (mm)
- C : 補正係数
- d : 斜材の長さ (mm)
- e : 主材間の距離 (mm)
- e_1 : 中立軸から断面のへりまでの距離 (mm)
- E : 縦弾性係数 (N/mm^2)
- f : 有効座屈長さ係数
- I : 断面二次モーメント (mm^4)
- k : 座屈軸についての最小回転半径 (mm)
- k_1 : 単一材の回転半径 (mm)
- k_0 : 山形鋼の長辺に平行な重心軸に関する全断面回転半径 (mm)
- k_d : 部材断面の回転半径 (mm)
- K : 局部座屈係数
- l_1 : 単一材の座屈長さ (mm)
- l_d : 部材長さ (mm)
- l_k : 有効座屈長さ (mm)
- l_s : 部材端の結合ボルト (リベットを含む) 重心距離 (mm)
- M : 曲げモーメント ($\text{N}\cdot\text{mm}$)
- M_x : 組合せ全部材に作用する面内曲げモーメント ($\text{N}\cdot\text{mm}$)
- M_y : 組合せ全部材に作用する面外曲げモーメント ($\text{N}\cdot\text{mm}$)
- m : 横継ぎ材 (ラチス又はつづり板) で一体に結合された単一材の数
- n : 平行面内に並ぶ横継ぎ材の数
- n_x : 面内せん断力を分担する構成面の数
- n_y : 面外せん断力を分担する構成面の数
- N : 軸方向圧縮力 (N)
- Q_x : 組合せ全部材に作用する面内せん断力 (N)
- Q_y : 組合せ全部材に作用する面外せん断力 (N)
- S : 局部座屈に対する強度係数
- t : 板厚 (mm)
- Z_x : 組合せ全部材面内曲げに関する断面係数 (mm^3)
- Z_y : 組合せ全部材面外曲げに関する断面係数 (mm^3)
- α : 区画の長さとの比
- γ : 補剛材の剛比

δ	: 補剛材の面積比
θ_x	: 側面の斜材の取付角度
θ_y	: 上下面の斜材の取付角度
λ	: 部材の細長比
λ_1	: 単一材の細長比
λ_i	: 組合せ材の等価細長比
λ_s	: 主柱材の細長比
λ_x	: $x-x$ 軸に直角な座屈に対する細長比
λ_{yi}	: $y-y$ 軸に直角な座屈に対する等価細長比
λ_y	: 全部材の $y-y$ 軸に直角な座屈に対する細長比
ν	: ポアソン比
σ_{ki}	: 弾性座屈応力 (N/mm ²)
σ_{kr}	: 弾塑性範囲の座屈応力 (N/mm ²)
σ_c	: 圧縮応力 (N/mm ²)
σ_k	: 許容座屈応力 (N/mm ²)
σ_{ca}	: 許容圧縮応力 (N/mm ²)
σ_s	: 主柱材の軸圧縮応力 (N/mm ²)
σ_{xd}	: 側面の斜材に作用する軸圧縮応力 (N/mm ²)
σ_{yd}	: 上下面の斜材の軸圧縮応力 (N/mm ²)
σ_1	: 最大圧縮応力の絶対値 (N/mm ²)
σ_e	: 基本座屈応力 (N/mm ²)
σ_{1ki}	: 局部座屈応力 (N/mm ²)
σ_{vki}	: 理想組合せ応力 (N/mm ²)
τ	: せん断応力 (N/mm ²)
τ_{ki}	: 局部座屈応力 (N/mm ²)
ϕ	: 板に働く垂直応力の最大と最小の比
ϕ_0	: 塑性範囲が断面の内径に達する点を見込む角度の 2 分の 1 (rad)
ϕ_1	: 塑性範囲が断面の外径に達する点を見込む角度の 2 分の 1 (rad)
ω	: 座屈係数

11.2 一般

11.2.1 適用対象 この項は、クレーンの構造部分に用いる鋼材の座屈に対する安全性を照査するための計算について定める。ただし、正当な理論的裏付けや信頼性の高い実験データ、又は十分な使用実績データがある場合には、本基準に規定する数式や数値によらなくても良い。

座屈計算に用いる荷重は衝撃係数、作業係数又は動荷重係数、静荷重係数により割増しを行った荷重の値を用いる。

11.2.2 柱材の座屈荷重

11.2.2.1 有効座屈長さ 部材の有効座屈長さは、端部の拘束条件によって異なる。有効座屈長さは、単純化した方法、又は弾性理論によって決定してよい。

11.2.2.2 細長比 部材の細長比は次式による。

$$\lambda = \frac{l_k}{k} \dots\dots\dots (29)$$

ここに、
 λ : 部材の細長比
 l_k : 有効座屈長さ (mm)
 k : 座屈軸についての最小回転半径 (mm)

ラチスジブの有効座屈長さ l_k は 11.3.2.2 および 11.3.3.2 を参照する。

11.2.2.3 許容座屈応力 許容座屈応力は、次式による。

$$\sigma_k = \text{MIN} \left\{ \frac{\sigma_{ki}}{2.5}, \frac{\sigma_{kr}}{1.5} \right\} \dots\dots\dots (30)$$

ここに、
 σ_k : 許容座屈応力 (N/mm²)
 σ_{ki} : 弾性座屈応力 (N/mm²)
 σ_{kr} : 弾塑性範囲の座屈応力 (N/mm²)

弾性座屈応力は、次式による。

$$\sigma_{ki} = \frac{\pi^2 \cdot E}{\lambda^2} \dots\dots\dots (31)$$

ここに、
 σ_{ki} : 弾性座屈応力 (N/mm²)
 E : 縦弾性係数 (N/mm²)
 π : 円周率
 λ : 部材の細長比

弾塑性範囲の座屈応力は、鋼材の断面形状に応じて次式による。

1) 直径と板厚の比が 6 以下の円筒材以外の場合

$$\lambda_2 = \frac{\pi^2 \cdot E}{\sigma_{kr}} \left[1 - \frac{m \cdot \sigma_{kr}}{\sigma_Y - \sigma_{kr}} + 0.25 \left(\frac{m \cdot \sigma_{kr}}{\sigma_Y - \sigma_{kr}} \right)^2 - 0.005 \left(\frac{m \cdot \sigma_{kr}}{\sigma_Y - \sigma_{kr}} \right)^3 \right] \dots\dots\dots (32)$$

$$m = 2.317 \left(0.05 + \frac{\lambda}{500} \right) \dots\dots\dots (33)$$

ここに、
 σ_{kr} : 弾塑性範囲の座屈応力 (N/mm²)
 σ_Y : 材料の降伏点又は耐力 (N/mm²)
 E : 縦弾性係数 (N/mm²)
 π : 円周率
 λ : 部材の細長比

2) 直径と板厚の比が 6 以下の円筒材の場合

以下の式において、弾塑性範囲の座屈応力は円筒断面の外径と内径の比が大きいほど小さく求められるので、安全側の値をとり $r=1.5$ とし、

a) $0 < \phi_1 < \cos^{-1}\left(-\frac{1}{r}\right)$ のとき

$$n \frac{\sigma_{kr}}{\sigma_Y - \sigma_{kr}} = \frac{2}{3} \frac{r^3 \cdot \sin^3 \phi_1 - \sin^3 \phi_0}{r^2 (\phi_1 - \cos \phi_1 \cdot \sin \phi_1) - (\phi_0 - \cos \phi_0 \cdot \sin \phi_0)} \dots\dots\dots (34)$$

$$\lambda^2 = \frac{\pi \cdot E}{\sigma_{kr} (r^4 - 1)} \left[\begin{aligned} & r^4 \left(\phi_1 - \sin \phi_1 \cdot \cos \phi_1 - \frac{2}{3} \cos \phi_1 \cdot \sin^3 \phi_1 \right) \\ & - \left(\phi_0 - \sin \phi_0 \cdot \cos \phi_0 - \frac{2}{3} \cos \phi_0 \cdot \sin^3 \phi_0 \right) + \frac{4n \cdot \sigma_{kr}}{\sigma_e - \sigma_{kr}} \\ & \left\{ r^3 \left(\phi_1 \cdot \cos \phi_1 - \sin \phi_1 + \frac{1}{3} \sin^3 \phi_1 \right) - \left(\phi_0 \cdot \cos \phi_0 - \sin \phi_0 + \frac{1}{3} \sin^3 \phi_0 \right) \right\} \end{aligned} \right] \dots\dots\dots (35)$$

$$n = \frac{\sqrt{3.25}}{2} \left(0.05 + \frac{\lambda}{500} \right) \dots\dots\dots (36)$$

$$\cos \phi_0 = r \cdot \cos \phi_1 \dots\dots\dots (37)$$

ここに、
 σ_{kr} : 弾塑性範囲の座屈応力 (N/mm²)
 σ_Y : 材料の降伏点又は耐力 (N/mm²)
 E : 縦弾性係数 (N/mm²)
 π : 円周率
 λ : 部材の細長比
 r : 円筒断面の外径と内径の比。1.5 とする。
 ϕ_0 : 塑性範囲が断面の内径に達する点を見込む角度の 2 分の 1 (rad)
 ϕ_1 : 塑性範囲が断面の外径に達する点を見込む角度の 2 分の 1 (rad)

b) $\phi_1 \geq \cos^{-1}\left(-\frac{1}{r}\right)$ のとき

$$n \frac{\sigma_{kr}}{\sigma_Y - \sigma_{kr}} = \frac{2}{3} \frac{r^3 \cdot \sin^3 \phi_1}{r^2 (\phi_1 - \cos \phi_1 \cdot \sin \phi_1) - \pi} \dots\dots\dots (38)$$

$$\lambda^2 = \frac{\pi \cdot E}{\sigma_{kr} (r^4 - 1)} \left[\begin{aligned} & r^4 \left(\phi_1 - \sin \phi_1 \cdot \cos \phi_1 - \frac{2}{3} \cos \phi_1 \cdot \sin^3 \phi_1 \right) - \pi \\ & + \frac{4 \cdot n \cdot \sigma_{kr}}{\sigma_Y - \sigma_{kr}} \left\{ r^3 \left(\phi_1 \cdot \cos \phi_1 - \sin \phi_1 + \frac{1}{3} \sin^3 \phi_1 \right) - \pi \cdot r \cdot \cos \phi_1 \right\} \end{aligned} \right] \dots\dots\dots (39)$$

$$n = \frac{\sqrt{3.25}}{2} \left(0.05 + \frac{\lambda}{500} \right) \dots\dots\dots (40)$$

ここに、
 σ_{kr} : 弾塑性範囲の座屈応力 (N/mm²)
 σ_Y : 材料の降伏点又は耐力 (N/mm²)
 E : 縦弾性係数 (N/mm²)
 π : 円周率
 λ : 部材の細長比
 r : 円筒断面の外径と内径の比。1.5 とする。
 ϕ_1 : 塑性範囲が断面の外径に達した点を見込む角度 (rad)

許容座屈応力は表 17 から表 23 により与えられた座屈係数を用い、次式によって求めてもよい。

$$\sigma_k = \frac{\sigma_{ca}}{\omega} \dots\dots\dots (41)$$

ここに、
 σ_k : 許容座屈応力 (N/mm²)
 σ_{ca} : 許容圧縮応力 (N/mm²)
 ω : 座屈係数

ただし、 λ が 20 未満の場合は次式による。

$$\sigma_k = \sigma_{ca} \dots\dots\dots (42)$$

ここに、
 σ_k : 許容座屈応力 (N/mm²)
 σ_{ca} : 許容圧縮応力 (N/mm²)

11.2.2.4 座屈係数 座屈係数 ω は次式による。又は、鋼材の降伏点又は耐力に応じて計算されている表 17 から表 23 の値を用いる。

$$\omega = \frac{\sigma_{ca}}{\sigma_k} \dots\dots\dots (43)$$

ここに、
 ω : 座屈係数
 σ_{ca} : 許容圧縮応力 (N/mm²)
 σ_k : 許容座屈応力 (N/mm²)

表 17 座屈係数 ω (降伏点又は耐力が 245 N/mm² 以下の鋼材に適用)

λ	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
20	1.00	1.00	1.00	1.00	1.01	1.01	1.01	1.02	1.02	1.03
					1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
30	1.03	1.04	1.04	1.05	1.05	1.06	1.06	1.07	1.08	1.08
	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.01	1.01
40	1.09	1.10	1.10	1.11	1.12	1.12	1.13	1.14	1.14	1.15
	1.02	1.02	1.03	1.03	1.04	1.04	1.05	1.05	1.06	1.06
50	1.16	1.17	1.18	1.19	1.19	1.20	1.21	1.22	1.23	1.24
	1.07	1.08	1.08	1.09	1.10	1.10	1.11	1.12	1.12	1.13
60	1.25	1.26	1.27	1.28	1.29	1.31	1.32	1.33	1.34	1.35
	1.14	1.15	1.16	1.16	1.17	1.18	1.19	1.20	1.21	1.22
70	1.37	1.38	1.39	1.41	1.42	1.43	1.45	1.46	1.48	1.49
	1.23	1.24	1.25	1.26	1.27	1.29	1.30	1.31	1.32	1.33
80	1.51	1.52	1.54	1.55	1.57	1.59	1.60	1.62	1.64	1.66
	1.35	1.36	1.37	1.39	1.40	1.42	1.43	1.45	1.46	1.48
90	1.68	1.69	1.71	1.73	1.75	1.77	1.79	1.81	1.83	1.85
	1.50	1.51	1.53	1.55	1.56	1.58	1.61	1.64	1.68	1.71
100	1.87	1.89	1.91	1.94	1.96	1.98	2.00	2.03	2.05	2.07
	1.75	1.78	1.82	1.85	1.89	1.93	1.96	2.00	2.04	
110	2.11	2.15	2.19	2.23	2.27	2.31	2.35	2.39	2.43	2.47
120	2.51	2.56	2.60	2.64	2.69	2.73	2.77	2.82	2.86	2.91
130	2.95	3.00	3.04	3.09	3.14	3.18	3.23	3.28	3.33	3.37
140	3.42	3.47	3.52	3.57	3.62	3.67	3.72	3.77	3.83	3.88
150	3.93	3.98	4.03	4.09	4.14	4.20	4.25	4.30	4.36	4.42
160	4.47	4.53	4.58	4.64	4.70	4.75	4.81	4.87	4.93	4.99
170	5.05	5.11	5.17	5.23	5.29	5.35	5.41	5.47	5.53	5.60
180	5.66	5.72	5.78	5.85	5.91	5.98	6.04	6.11	6.17	6.24
190	6.30	6.37	6.44	6.51	6.57	6.64	6.71	6.78	6.85	6.92
200	6.99									

備考 上下 2 段に示されている場合、下段の数値は直径と板厚の比が 6 以下の円筒材の座屈係数を、上段の数値はそれ以外の鋼材の座屈係数を表す。

表 18 座屈係数 ω (降伏点又は耐力が 245 N/mm^2 を超え 325 N/mm^2 以下の鋼材に適用)

λ	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
20	1.00	1.00	1.00	1.01	1.01	1.02	1.02	1.03	1.03	1.04
				1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
30	1.04	1.05	1.05	1.06	1.07	1.07	1.08	1.09	1.09	1.10
	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.01	1.01	1.02	1.02	1.03
40	1.11	1.12	1.13	1.13	1.14	1.15	1.16	1.17	1.18	1.19
	1.03	1.04	1.04	1.05	1.06	1.06	1.07	1.08	1.08	1.09
50	1.20	1.21	1.22	1.23	1.24	1.25	1.27	1.28	1.29	1.30
	1.10	1.11	1.12	1.13	1.13	1.14	1.15	1.16	1.17	1.18
60	1.32	1.33	1.35	1.36	1.37	1.39	1.41	1.42	1.44	1.45
	1.19	1.20	1.22	1.23	1.24	1.25	1.27	1.28	1.29	1.31
70	1.47	1.49	1.51	1.52	1.54	1.56	1.58	1.60	1.62	1.64
	1.32	1.34	1.35	1.37	1.38	1.40	1.42	1.43	1.45	1.47
80	1.66	1.68	1.70	1.72	1.75	1.77	1.79	1.82	1.84	1.86
	1.49	1.52	1.56	1.60	1.63	1.67	1.71	1.75	1.79	1.84
90	1.89	1.92	1.96	2.00	2.05	2.09	2.14	2.18	2.22	2.27
	1.88									
100	2.32	2.36	2.41	2.46	2.51	2.55	2.60	2.65	2.70	2.75
110	2.80	2.85	2.91	2.96	3.01	3.06	3.12	3.17	3.23	3.28
120	3.34	3.39	3.45	3.50	3.56	3.62	3.68	3.74	3.80	3.86
130	3.92	3.98	4.04	4.10	4.16	4.22	4.28	4.35	4.41	4.48
140	4.54	4.61	4.67	4.74	4.80	4.87	4.94	5.01	5.07	5.14
150	5.21	5.28	5.35	5.42	5.49	5.57	5.64	5.71	5.78	5.86
160	5.93	6.01	6.08	6.16	6.23	6.31	6.38	6.46	6.54	6.62
170	6.70	6.77	6.85	6.93	7.01	7.09	7.18	7.26	7.34	7.42
180	7.51	7.59	7.67	7.76	7.84	7.93	8.01	8.10	8.19	8.28
190	8.36	8.45	8.54	8.63	8.72	8.81	8.90	8.99	9.08	9.17
200	9.27									

備考 上下 2 段に示されている場合、下段の数値は直径と板厚の比が 6 以下の円筒材の座屈係数を、上段の数値はそれ以外の鋼材の座屈係数を表す。

表 19 座屈係数 ω (降伏点又は耐力が 325 N/mm^2 超え 365 N/mm^2 以下の鋼材に適用)

λ	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
20	1.00	1.00	1.00	1.01	1.01	1.02	1.02	1.03	1.04	1.04
				1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
30	1.05	1.05	1.06	1.07	1.07	1.08	1.09	1.10	1.10	1.11
	1.00	1.00	1.00	1.00	1.01	1.01	1.02	1.02	1.03	1.03
40	1.12	1.13	1.14	1.15	1.16	1.17	1.18	1.19	1.20	1.21
	1.04	1.05	1.05	1.06	1.07	1.08	1.08	1.09	1.10	1.11
50	1.22	1.23	1.24	1.26	1.27	1.28	1.30	1.31	1.32	1.34
	1.12	1.13	1.14	1.14	1.16	1.17	1.18	1.19	1.20	1.21
60	1.35	1.37	1.38	1.40	1.42	1.43	1.45	1.47	1.49	1.51
	1.22	1.24	1.25	1.26	1.28	1.29	1.31	1.32	1.34	1.36
70	1.53	1.55	1.57	1.59	1.61	1.63	1.65	1.67	1.70	1.72
	1.37	1.39	1.41	1.43	1.44	1.46	1.50	1.54	1.58	1.62
80	1.74	1.77	1.79	1.82	1.84	1.88	1.92	1.97	2.01	2.06
	1.67	1.71	1.75	1.79						
90	2.11	2.15	2.20	2.25	2.30	2.35	2.40	2.45	2.50	2.55
100	2.60	2.65	2.71	2.76	2.81	2.87	2.92	2.98	3.03	3.09
110	3.15	3.21	3.26	3.32	3.38	3.44	3.50	3.56	3.62	3.68
120	3.75	3.81	3.87	3.94	4.00	4.07	4.13	4.20	4.26	4.33
130	4.40	4.46	4.53	4.60	4.67	4.74	4.81	4.88	4.95	5.03
140	5.10	5.17	5.25	5.32	5.40	5.47	5.55	5.62	5.70	5.78
150	5.85	5.93	6.01	6.09	6.17	6.25	6.33	6.41	6.50	6.58
160	6.66	6.74	6.83	6.91	7.00	7.08	7.17	7.26	7.34	7.43
170	7.52	7.61	7.70	7.79	7.88	7.97	8.06	8.15	8.24	8.34
180	8.43	8.52	8.62	8.71	8.81	8.90	9.00	9.10	9.20	9.29
190	9.39	9.49	9.59	9.69	9.79	9.89	10.00	10.10	10.20	10.30
200	10.41									

備考 上下 2 段に示されている場合、下段の数値は直径と板厚の比が 6 以下の円筒材の座屈係数を、上段の数値はそれ以外の鋼材の座屈係数を表す。

表 20 座屈係数 ω (降伏点又は耐力が 365 N/mm^2 を超え 460 N/mm^2 以下の鋼材に適用)

λ	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
20	1.00	1.00	1.01	1.02	1.02	1.03	1.03	1.04	1.05	1.05
			1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
30	1.06	1.07	1.07	1.08	1.09	1.10	1.11	1.12	1.13	1.14
	1.00	1.00	1.01	1.01	1.02	1.03	1.03	1.04	1.05	1.05
40	1.15	1.16	1.17	1.18	1.19	1.20	1.22	1.23	1.24	1.26
	1.06	1.07	1.08	1.09	1.10	1.11	1.12	1.13	1.14	1.15
50	1.27	1.29	1.30	1.32	1.33	1.35	1.37	1.39	1.40	1.42
	1.16	1.17	1.18	1.20	1.21	1.22	1.24	1.25	1.27	1.29
60	1.44	1.46	1.48	1.50	1.53	1.55	1.57	1.60	1.62	1.64
	1.30	1.32	1.34	1.36	1.38	1.40	1.43	1.47	1.52	1.56
70	1.67	1.69	1.72	1.75	1.80	1.84	1.89	1.94	1.99	2.05
	1.61	1.65	1.70							
80	2.10	2.15	2.20	2.26	2.31	2.37	2.43	2.48	2.54	2.60
90	2.66	2.72	2.78	2.84	2.90	2.96	3.02	3.09	3.15	3.21
100	3.28	3.34	3.41	3.48	3.55	3.62	3.68	3.75	3.82	3.90
110	3.97	4.04	4.11	4.19	4.26	4.34	4.41	4.49	4.57	4.64
120	4.72	4.80	4.88	4.96	5.04	5.12	5.21	5.29	5.37	5.46
130	5.54	5.63	5.71	5.80	5.89	5.98	6.06	6.15	6.24	6.34
140	6.43	6.52	6.61	6.71	6.80	6.89	6.99	7.09	7.18	7.28
150	7.38	7.48	7.58	7.68	7.78	7.88	7.98	8.08	8.19	8.29
160	8.39	8.50	8.61	8.71	8.82	8.93	9.04	9.14	9.25	9.37
170	9.48	9.59	9.70	9.81	9.93	10.04	10.16	10.27	10.39	10.51
180	10.62	10.74	10.86	10.98	11.10	11.22	11.34	11.47	11.59	11.71
190	11.84	11.96	12.09	12.21	12.34	12.47	12.60	12.73	12.86	12.99
200	13.12									

備考 上下 2 段に示されている場合、下段の数値は直径と板厚の比が 6 以下の円筒材の座屈係数を、上段の数値はそれ以外の鋼材の座屈係数を表す。

表 21 座屈係数 ω 表(降伏点又は耐力が 460 N/mm^2 を超え 575 N/mm^2 以下の鋼材に適用)

λ	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
20	1.01	1.01	1.02	1.02	1.03	1.04	1.04	1.05	1.06	1.07
	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
30	1.08	1.08	1.09	1.10	1.11	1.12	1.13	1.14	1.16	1.17
	1.01	1.02	1.02	1.03	1.04	1.04	1.05	1.06	1.07	1.08
40	1.18	1.19	1.21	1.22	1.24	1.25	1.27	1.29	1.30	1.32
	1.09	1.10	1.11	1.12	1.13	1.15	1.16	1.17	1.19	1.20
50	1.34	1.36	1.38	1.40	1.42	1.44	1.47	1.49	1.51	1.54
	1.22	1.23	1.25	1.27	1.29	1.31	1.33	1.35	1.38	1.43
60	1.56	1.59	1.62	1.64	1.68	1.73	1.79	1.84	1.90	1.95
	1.48	1.53	1.58	1.63						
70	2.01	2.07	2.12	2.18	2.24	2.31	2.37	2.43	2.49	2.56
80	2.62	2.69	2.76	2.82	2.89	2.96	3.03	3.10	3.17	3.25
90	3.32	3.39	3.47	3.55	3.62	3.70	3.78	3.86	3.94	4.02
100	4.10	4.18	4.26	4.35	4.43	4.52	4.61	4.69	4.78	4.87
110	4.96	5.05	5.14	5.23	5.33	5.42	5.52	5.61	5.71	5.80
120	5.90	6.00	6.10	6.20	6.30	6.40	6.51	6.61	6.72	6.82
130	6.93	7.03	7.14	7.25	7.36	7.47	7.58	7.69	7.81	7.92
140	8.03	8.15	8.26	8.38	8.50	8.62	8.74	8.86	8.98	9.10
150	9.22	9.35	9.47	9.59	9.72	9.85	9.97	10.10	10.23	10.36
160	10.49	10.62	10.76	10.89	11.02	11.16	11.29	11.43	11.57	11.71
170	11.85	11.99	12.13	12.27	12.41	12.55	12.70	12.84	12.99	13.13
180	13.28	13.43	13.58	13.73	13.88	14.03	14.18	14.33	14.49	14.64
190	14.80	14.95	15.11	15.27	15.43	15.59	15.75	15.91	16.07	16.23
200	16.40									

備考 上下 2 段に示されている場合、下段の数値は直径と板厚の比が 6 以下の円筒材の座屈係数を、上段の数値はそれ以外の鋼材の座屈係数を表す。

表 22 座屈係数 ω (降伏点又は耐力が 575 N/mm^2 を超え 620 N/mm^2 以下の鋼材に適用)

λ	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
20	1.01	1.01	1.02	1.03	1.03	1.04	1.05	1.06	1.06	1.07
	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.01
30	1.08	1.09	1.10	1.11	1.12	1.13	1.14	1.16	1.17	1.18
	1.01	1.02	1.03	1.04	1.04	1.05	1.06	1.07	1.08	1.09
40	1.20	1.21	1.22	1.24	1.26	1.27	1.29	1.31	1.33	1.35
	1.10	1.11	1.12	1.14	1.15	1.16	1.18	1.19	1.21	1.23
50	1.37	1.39	1.41	1.43	1.46	1.48	1.51	1.53	1.56	1.59
	1.24	1.26	1.28	1.30	1.32	1.34	1.39	1.44	1.49	1.54
60	1.61	1.64	1.70	1.75	1.81	1.87	1.93	1.98	2.04	2.10
	1.59									
70	2.17	2.23	2.29	2.36	2.42	2.49	2.55	2.62	2.69	2.76
80	2.83	2.90	2.97	3.04	3.12	3.19	3.27	3.35	3.42	3.50
90	3.58	3.66	3.74	3.82	3.91	3.99	4.07	4.16	4.24	4.33
100	4.42	4.51	4.60	4.69	4.78	4.87	4.97	5.06	5.15	5.25
110	5.35	5.45	5.54	5.64	5.74	5.84	5.95	6.05	6.15	6.26
120	6.36	6.47	6.58	6.69	6.80	6.91	7.02	7.13	7.24	7.35
130	7.47	7.58	7.70	7.82	7.94	8.05	8.17	8.30	8.42	8.54
140	8.66	8.79	8.91	9.04	9.16	9.29	9.42	9.55	9.68	9.81
150	9.94	10.08	10.21	10.35	10.48	10.62	10.76	10.89	11.03	11.17
160	11.31	11.46	11.60	11.74	11.89	12.03	12.18	12.33	12.47	12.62
170	12.77	12.92	13.07	13.23	13.38	13.53	13.69	13.85	14.00	14.16
180	14.32	14.48	14.64	14.80	14.96	15.13	15.29	15.45	15.62	15.79
190	15.95	16.12	16.29	16.46	16.63	16.81	16.98	17.15	17.33	17.50
200	17.68									

備考 上下 2 段に示されている場合、下段の数値は直径と板厚の比が 6 以下の円筒材の座屈係数を、上段の数値はそれ以外の鋼材の座屈係数を表す。

表 23 座屈係数 ω (降伏点又は耐力が 620 N/mm^2 を超え 685 N/mm^2 以下の鋼材に適用)

λ	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
20	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.01	1.02	1.02
								1.00	1.00	1.00
30	1.03	1.04	1.05	1.06	1.08	1.09	1.10	1.11	1.13	1.14
	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.01	1.02	1.03	1.04	1.05
40	1.15	1.17	1.19	1.20	1.22	1.24	1.26	1.28	1.30	1.32
	1.06	1.07	1.09	1.10	1.11	1.13	1.14	1.16	1.18	1.20
50	1.34	1.36	1.39	1.41	1.43	1.46	1.49	1.51	1.56	1.61
	1.22	1.24	1.26	1.30	1.35	1.40	1.45			
60	1.67	1.72	1.78	1.84	1.90	1.96	2.02	2.08	2.14	2.21
70	2.27	2.34	2.40	2.47	2.54	2.61	2.68	2.75	2.82	2.89
80	2.97	3.04	3.12	3.19	3.27	3.35	3.43	3.51	3.59	3.67
90	3.75	3.84	3.92	4.01	4.09	4.18	4.27	4.36	4.45	4.54
100	4.63	4.73	4.82	4.92	5.01	5.11	5.21	5.30	5.40	5.50
110	5.61	5.71	5.81	5.92	6.02	6.13	6.23	6.34	6.45	6.56
120	6.67	6.78	6.90	7.01	7.12	7.24	7.36	7.47	7.59	7.71
130	7.83	7.95	8.07	8.20	8.32	8.44	8.57	8.70	8.82	8.95
140	9.08	9.21	9.34	9.47	9.61	9.74	9.88	10.01	10.15	10.29
150	10.43	10.56	10.70	10.85	10.99	11.13	11.28	11.42	11.57	11.71
160	11.86	12.01	12.16	12.31	12.46	12.61	12.77	12.92	13.08	13.23
170	13.39	13.55	13.71	13.87	14.03	14.19	14.35	14.52	14.68	14.85
180	15.01	15.18	15.35	15.52	15.69	15.86	16.03	16.20	16.38	16.55
190	16.73	16.90	17.08	17.26	17.44	17.62	17.80	17.98	18.16	18.35
200	18.53									

備考 上下2段に示されている場合、下段の数値は直径と板厚の比が6以下の円筒材の座屈係数を、上段の数値はそれ以外の鋼材の座屈係数を表す。

11.2.2.5 圧縮材の計算 圧縮応力の計算は、ボルト穴又はリベット穴を除かない総断面積について、次式による。

$$\sigma_c = \frac{N}{A} \leq \sigma_k \quad \text{..... (44)}$$

又は

$$\sigma_c = \frac{N}{A} \leq \frac{\sigma_{ca}}{\omega} \quad \text{..... (45)}$$

ここに、
 σ_c : 圧縮応力 (N/mm²)
 N : 軸方向圧縮力 (N)
 A : 総断面積 (N/mm²)
 σ_k : 許容座屈応力 (N/mm²)
 σ_{ca} : 許容圧縮応力 (N/mm²)
 ω : 座屈係数

11.2.2.6 軸方向圧縮力に曲げを伴う部材の計算 軸方向圧縮力に曲げを伴う部材の計算は次式による。ただし、必要に応じ変形を考慮した精密な座屈計算を行う。

$$\sigma_c = \frac{N}{A} + \frac{0.9 \cdot M}{\omega \cdot I} \cdot e_1 \leq \sigma_k \quad \text{..... (46)}$$

又は

$$\sigma_c = \frac{N}{A} + \frac{0.9 \cdot M}{\omega \cdot I} \cdot e_1 \leq \frac{\sigma_{ca}}{\omega} \quad \text{..... (47)}$$

ここに、
 σ_c : 圧縮応力 (N/mm²)
 N : 軸方向圧縮力 (N)
 M : 曲げモーメント (N・mm)
 A : 総断面積 (mm²)
 ω : 座屈係数
 σ_k : 許容座屈応力 (N/mm²)
 σ_{ca} : 許容圧縮応力 (N/mm²)
 I : 断面二次モーメント (mm⁴)
 e_1 : 中立軸から断面のへりまでの距離 (mm)

また I 形部材のように開放断面の部材においては、横倒れ座屈を検討する。

11.3 トラス・ラチスジブの設計

11.3.1 全体座屈強度

11.3.1.1 組合せ圧縮材 組合せ圧縮材は、ラチス部材、図 13 a) と、ラーメン部材、図 13 b) に区別する。組合せ圧縮材は等価細長比を次のように求め、単一圧縮材と同様に扱う。ただし、ラーメン部材の場合のつづり板は、剛であることを前提とする。

$$\lambda_i = \sqrt{\lambda^2 + \frac{m}{2} \cdot \lambda_1^2} \dots\dots\dots (48)$$

ここに、 λ_i : 組合せ材の等価細長比
 λ : 全部材の主軸に関する細長比
 m : 横継ぎ材(ラチス又はつづり板)で一体に結合された単一材の数 (図 14～図 16)
 λ_1 : 単一材の細長比で

$$\text{ラチスの場合} \quad \lambda_1 = \pi \sqrt{\frac{A}{n \cdot A_d} \cdot \frac{d^3}{l_1 \cdot e^2}} \dots\dots\dots (49)$$

ここに、 A : 組立て材の総断面積 (mm²)
 A_d : ラチスの断面積 (mm²)
 n : 平行面内に並ぶ横継ぎ材の数
 d : 斜材の長さ (mm)
 l_1 : 単一材の座屈長さ (mm) 図 13 参照
 e : 主材間の距離 (mm) 図 13 参照

$$\text{ラーメンの場合} \quad \lambda_1 = \frac{l_1}{k_1} \dots\dots\dots (50)$$

ここに、 l_1 : 単一材の座屈長さ (mm)
 k_1 : 単一材の回転半径 (mm)

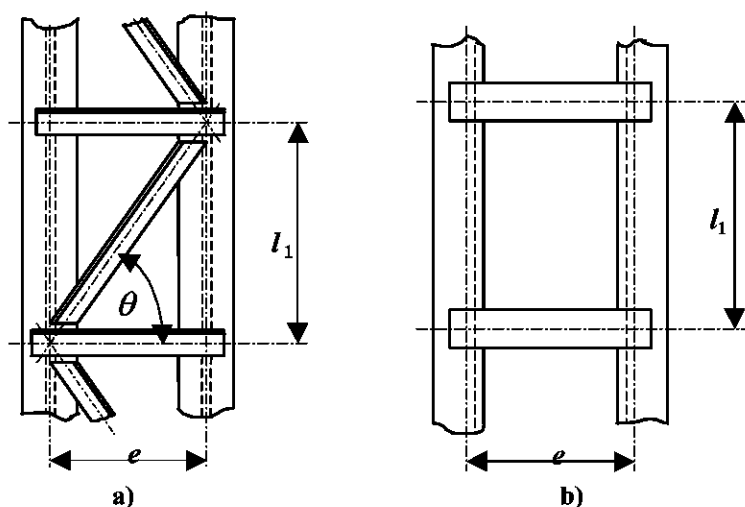


図 13 組合せ圧縮材

a) 図 14 において、 $x-x$ 軸に直角な座屈に対する細長比は次式による。

$$\lambda_x = \frac{l_{kx}}{k_x} \dots\dots\dots (51)$$

ここに、
 λ_x : $x-x$ 軸に直角な座屈に対する細長比
 l_{kx} : $x-x$ 軸に直角な座屈に対する座屈長さ (mm)
 k_x : $x-x$ 軸に直角な座屈に対する回転半径 (mm)

図 14 において、 $y-y$ 軸に直角な座屈は等価細長比によって計算する。等価細長比は次式による。

$$\lambda_{yi} = \sqrt{\lambda_y^2 + \frac{m}{2} \cdot \lambda_1^2} \dots\dots\dots (52)$$

$$\lambda_y = \frac{l_{ky}}{k_y} \dots\dots\dots (53)$$

ここに、
 λ_{yi} : $y-y$ 軸に直角な座屈に対する等価細長比
 λ_y : 全部材の $y-y$ 軸に直角な座屈に対する細長比
 l_{ky} : 全部材の $y-y$ 軸に直角な座屈に対する座屈長さ (mm)
 k_y : 全部材の $y-y$ 軸に直角な座屈に対する回転半径 (mm)
 λ_1 : 単一材の 1-1 軸に直角な座屈に対する細長比
 m : 横継ぎ材 (ラチス又はつづり板) で一体に結合された単一材の数

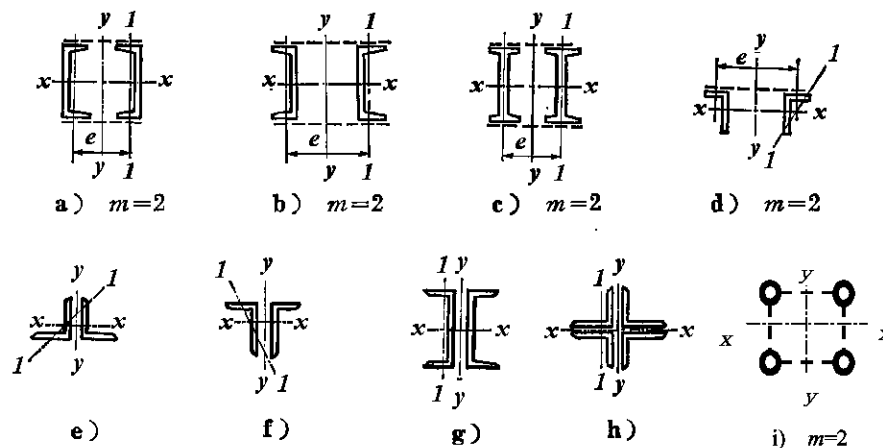


図 14 細長比のとり方

b) 図 15 では、 $x-x$ 軸に直角な座屈に対してだけ計算する。この場合座屈長さ l_{kx} は支持荷重面及びそれに垂直な面における座屈長さの平均値をとる。

図 15 b) では $k_x \cong \frac{k_0}{1.15}$ ，従って $\lambda_x = 1.15 \frac{l_{kx}}{k_0}$ としてよい。ただし k_0 は山形鋼の長辺に平行な重心軸に関

する全断面回転半径とする。

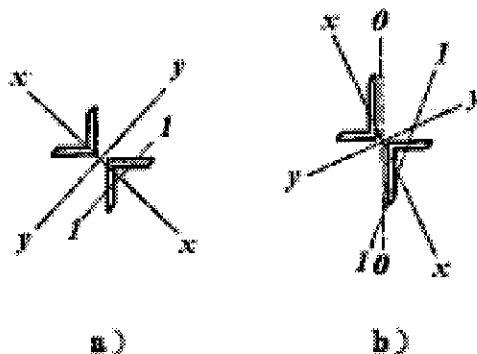


図 15 細長比のとり方

c) 図 16 においては，等価細長比を求めて座屈荷重を計算する。等価細長比は次式による。

$$\lambda_{yi} = \sqrt{\lambda_y^2 + \frac{m}{2} \cdot \lambda_1^2} \dots\dots\dots (54)$$

$$\lambda_{xi} = \sqrt{\lambda_x^2 + \frac{m'}{2} \cdot \lambda_1^2} \dots\dots\dots (55)$$

ここに，

λ_{yi} : $y-y$ 軸に直角な座屈に対する等価細長比

λ_{xi} : $x-x$ 軸に直角な座屈に対する等価細長比

λ_y : 全部材の $y-y$ 軸に直角な座屈に対する細長比

λ_x : 全部材の $x-x$ 軸に直角な座屈に対する細長比

λ_1 : 単一材の 1-1 軸に直角な座屈に対する細長比

m, m' : 横継ぎ材（ラチス又はつづり板）で一体に結合された単一材の数

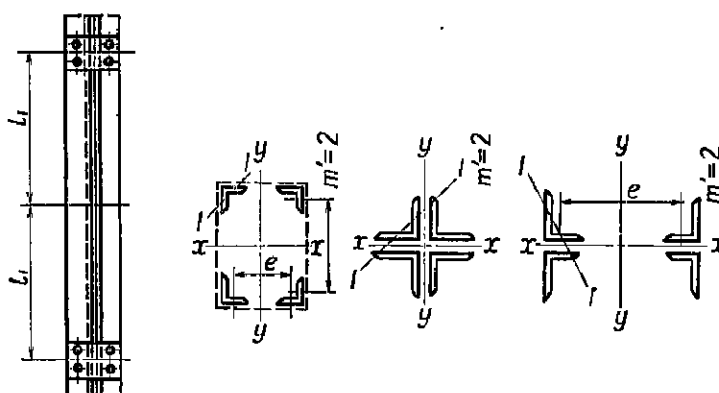


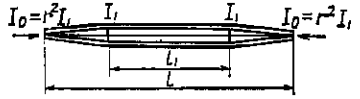
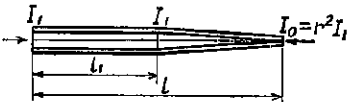
図 136 細長比のとり方

11.3.1.2 高さの変化する圧縮材 部材の高さが変化する等断面形をもった圧縮材は、等価断面二次モーメントをもつ柱として計算する。等価断面二次モーメントは次式による。

$$I = C \cdot I_{\max} \quad \dots\dots\dots (56)$$

ここに、
 I : 等価断面二次モーメント(mm⁴)
 C : 減少係数(表 11.8 参照)
 $I_{\max}$: 最大断面二次モーメント(mm⁴)

表 24 減少係数 C

部 材 の 形		減 少 係 数 C
a		$l_1 \leq 0.5l \quad 0.1 \leq r \leq 1$ $C = (0.17 + 0.33r + 0.5\sqrt{r}) + \frac{l_1}{l} (0.62 + \sqrt{r} - 1.62r)$
b		$l_1 \leq 0.5l \quad 0.1 \leq r \leq 1$ $C = (0.08 + 0.92r) + \left(\frac{l_1}{l}\right)^2 (0.32 + 4\sqrt{r} - 4.32r)$
c		$0.1 \leq r \leq 1$ $C = 0.48 + 0.02r + 0.5\sqrt{r}$
d		$0.1 \leq r \leq 1$ $C = 0.18 + 0.32r + 0.5\sqrt{r}$
$I_0 \geq 0.01 I_{\max}$ の滑節支持部材にだけ適用する。 $l_1 \geq 0.8l$ ならば $C=1$ $0.8l > l_1 > 0.5l$ ならば C は比例補間して求める。		$r = \sqrt{\frac{I_0}{I_{\max}}}$

11.3.2 主柱材の区間座屈強度 主柱材の区間座屈強度を評価するときの主柱材の作用軸圧縮応力と細長比は次のように計算する。

11.3.2.1 主柱材の応力 組合せ部材の主柱材に作用する軸圧縮応力は、次式による。

$$\sigma_s = \frac{N}{A} + \frac{M_x}{Z_x} + \frac{M_y}{Z_y} \quad \dots\dots\dots (57)$$

ここに、
 σ_s : 主柱材の軸圧縮応力(N/mm²)
 M_x : 組合せ全部材に作用する面内曲げモーメント(N・mm)
 M_y : 組合せ全部材に作用する面外曲げモーメント(N・mm)
 N : 組合せ全部材に作用する軸圧縮力(N)
 A : 組合せ全部材の横断面積の合計(mm²)
 Z_x : 組合せ全部材面内曲げに関する断面係数(mm³)
 Z_y : 組合せ全部材面外曲げに関する断面係数(mm³)

11.3.2.2 細長比 主柱材の細長比は、単一材の細長比に表 25 に示す有効座屈長さ係数を乗じた値とする。

図 17 において、トラスの節点 a 及び b が、ともにトラス面に直角に変位せず、部材長の両半分の部材力が異なるならば、主柱材の有効座屈長さによる。

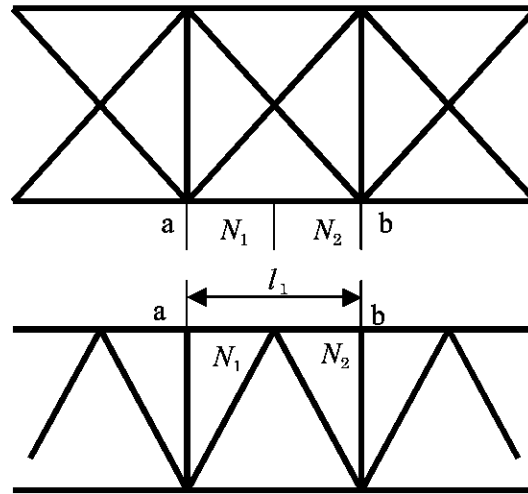


図 17

$$\lambda_s = f \cdot \frac{l_1}{k_s} \quad \text{..... (58)}$$

$$f = 0.75 + 0.25 \cdot \frac{N_2}{N_1} \quad \text{..... (59)}$$

ここに、
 λ_s : 主柱材の細長比
 f : 有効座屈長さ係数
 l_1 : 主柱材の一区間の長さ(mm)
 k_s : 主柱材断面の回転半径(mm)
 N_1 : 部材の片側の部材力のうち大きい方の値(N)
 N_2 : 部材の片側の部材力のうち小さい方の値(N)

11.3.3 斜材の座屈強度 斜材の座屈強度を評価するときの主柱材の作用軸圧縮応力と細長比は以下のよう
 に計算する。

11.3.3.1 斜材の応力 組合せ部材の斜材に作用する軸圧縮応力は次式による。

$$\sigma_{xd} = \frac{Q_x}{n_x \cdot A_{xd} \cdot \cos \theta_x} \quad \text{..... (60)}$$

$$\sigma_{yd} = \frac{Q_y}{n_y \cdot A_{yd} \cdot \cos \theta_y} \quad \text{..... (61)}$$

ここに、
 σ_{xd} : 側面の斜材に作用する軸圧縮応力(N/mm²)
 σ_{yd} : 上下面の斜材に作用する軸圧縮応力(N/mm²)
 Q_x : 組合せ全部材に作用する面内せん断力(N)
 Q_y : 組合せ全部材に作用する面外せん断力(N)
 A_{xd} : 側面の1つの構成面における斜材の断面積(mm²)
 A_{yd} : 上下面の1つの構成面における斜材の断面積(mm²)
 n_x : 面内せん断力を分担する構成面の数
 n_y : 面外せん断力を分担する構成面の数
 θ_x : 側面の斜材の取付角度(deg)
 θ_y : 上下面の斜材の取付角度(deg)

11.3.3.2 細長比 斜材の細長比は表 25 に示す有効座屈長さ係数を乗じた値とし、次式による。

$$\lambda_d = f \cdot \frac{l_d}{k_d} \dots\dots\dots (62)$$

ここに、 λ_d : 斜材の細長比
 f : 有効座屈長さ係数
 l_d : 部材長さ(mm)
 k_d : 部材断面の回転半径(mm)

表 25 有効座屈長さ係数 f の値

座屈の形態と構造の状況		f の値
トラス面内における 曲げ座屈の場合	図 18 a) 参照 ただし、部材が他の部材と交わり、交差部分が圧縮部材に必要なボルト数の 1 / 4 以上のボルトで結合されているときは、 交点はトラス面内で変位しないとみてよい。	$\frac{l_s}{l_d}$
トラス面に垂直な 曲げ座屈の場合	(a) 部材の両端が変位しないように支えられている場合 図 18 a) 参照	1
	(b) 部材の一端が、横に変位しない曲げこわさのある横材に ラーメン結合されている場合 図 18 b) 参照	0.8
	(c) 部材の両端とも、横に変位しない曲げこわさのある横材に ラーメン結合されている場合 図 18 c) 参照	0.7

ここに、 l_s : 部材端の結合ボルト重心距離(mm)
 l_d : 部材長さ(mm)

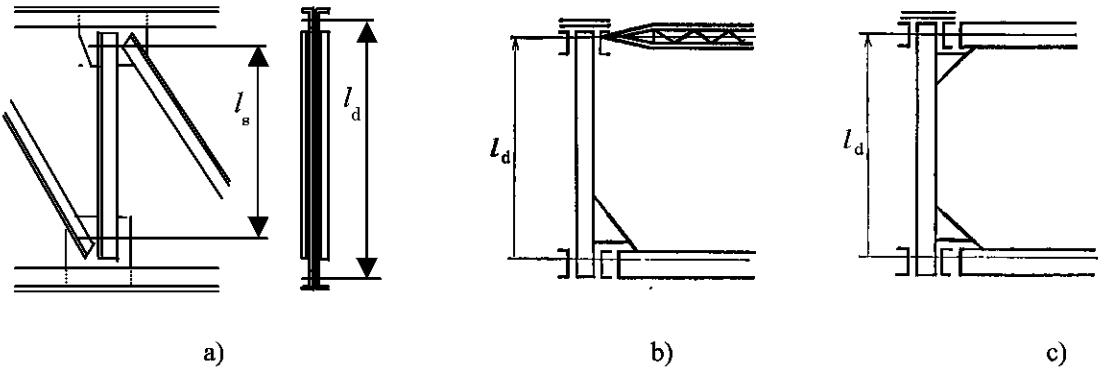


図 18 座屈長さ

11.3.4 細長比の制限 部材の細長比は、表 26 に示す値を超えてはならない。

表 26 部材の細長比の制限

部材の種類	細長比
主要圧縮材	150
補助圧縮材	200

11.4 板の局部座屈の計算 板の局部座屈強さは、補剛材等で囲まれた部分区画の座屈と補剛材を含めた面全体としての座屈の両者について計算する。

板に加わる荷重には衝撃係数及び作業係数、又は動荷重係数及び静荷重係数を乗じて割り増しを行った荷重を用いる。

11.4.1 圧縮応力及びせん断応力が単独に作用する場合 局部理想座屈応力 σ_{lki} 又は $\sqrt{3} \cdot \tau_{ki}$ が材料の比例限を超す場合は、**11.4.2** によって許容応力を低減する。最大圧縮応力の絶対値又はせん断応力の限界は以下による。

$$\sigma_1 \leq \frac{\sigma_{lki}}{S} \dots\dots\dots (63)$$

$$\tau \leq \frac{\tau_{ki}}{S} \dots\dots\dots (64)$$

ここに、 σ_1 : 最大圧縮応力の絶対値(N/mm²)(表 28 及び表 29 参照)

τ : せん断応力(N/mm²)

σ_{lki} : 局部理想座屈応力(N/mm²)で、次式による。

$$\sigma_{lki} = \sigma_e \cdot K \dots\dots\dots (65)$$

τ_{ki} : 局部理想座屈応力(N/mm²)で、次式による。

$$\tau_{ki} = \sigma_e \cdot K \dots\dots\dots (66)$$

S : 局部座屈に対する強度係数で、表 27 による。

σ_e : 基本座屈応力(N/mm²)で、次式による。

$$\sigma_e = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot t^2}{12b^2(1-\nu^2)} = (431 \cdot \frac{t}{b})^2 \dots\dots\dots (67)$$

ここに、 E : 縦弾性係数(N/mm²)

ν : ポアソン比

t : 板厚(mm)

b : 区画の幅(mm)

K : 局部座屈係数で、部分区画については表 28 による。補剛材を含めた面全体については、表 29 から各々の応力状態によって求める。

a : 区画の長さ(mm)

α : 区画の長さとの幅の比で、次式による。

$$\alpha = \frac{a}{b} \dots\dots\dots (68)$$

γ : 補剛材の剛比で、次式による。

$$\gamma = \frac{I}{0.092b \cdot t^3} \dots\dots\dots (69)$$

I : 補剛材の総断面の局部座屈を計算する板の中心線に対する断面二次モーメント(mm⁴)

δ : 補剛材の面積比で、次式による。

$$\delta = \frac{A}{b \cdot t} \dots\dots\dots (70)$$

A : 補剛材の総断面積(mm²)

表 27 局部座屈に対する強度係数 S

負荷状態	面全体としての座屈に対する 強度係数	補剛材で囲まれた部分区画の 座屈に対する強度係数
荷重の組合せ A	1.71+0.180(φ-1)	1.5+0.075(φ-1)
荷重の組合せ B	1.50+0.125(φ-1)	1.35+0.050(φ-1)
荷重の組合せ C	1.35+0.075(φ-1)	1.25+0.025(φ-1)

ここに、φ は板に働く垂直応力の最大と最小の比をいう。

11.4.2 垂直応力及びせん断応力が同時に作用する場合 二つの局部座屈応力、σ_{1*ki*}、τ_{*ki*}を別々に計算し、理想組合せ応力を求めて限界値と比較する。理想組合せ応力 σ_{*Vki*} は次式による。

$$\sigma_{Vki} = \frac{\sqrt{\sigma_1^2 + 3\tau^2}}{\frac{1+\phi}{4} \cdot \frac{\sigma_1}{\sigma_{1ki}} + \sqrt{\left(\frac{3-\phi}{4} \cdot \frac{\sigma_1}{\sigma_{1ki}}\right)^2 + \left(\frac{\tau}{\tau_{ki}}\right)^2}} \dots\dots\dots (71)$$

ここに、 σ_{*Vki*} : 理想組合せ応力(N/mm²)
σ₁ : 板に作用する垂直応力の最大値(N/mm²)
σ_{1*ki*} : 局部座屈応力(N/mm²)
τ : 板に作用するせん断応力(N/mm²)
τ_{*ki*} : 局部座屈応力(N/mm²)
φ : 板に作用する垂直応力の最大と最小の比。表 28 及び表 29 参照。
特別な場合として、 τ = 0 のときは σ_{*Vki*} = σ_{1*ki*} になり、
σ₁ = 0 のときは σ_{*Vki*} = √3・τ_{*ki*} になる。

理想組合せ応力 σ_{*Vki*} が材料の比例限を超す場合には、図 19 によって減少組合せ応力 (σ_{*Vk*}) を求めて許容応力を決める。

$$\sigma_V = \sqrt{\sigma_1^2 + 3\tau^2} \leq \frac{\sigma_{Vk}}{S} \dots\dots\dots (72)$$

ここに、 σ_{*V*} : 組合せ応力(N/mm²)
σ_{*Vk*} : 減少組合せ応力(N/mm²)
σ₁ : 板に働く垂直応力の最大値(N/mm²)
τ : 板に働くせん断応力(N/mm²)
S : 局部座屈に対する強度係数で、表 27 による。

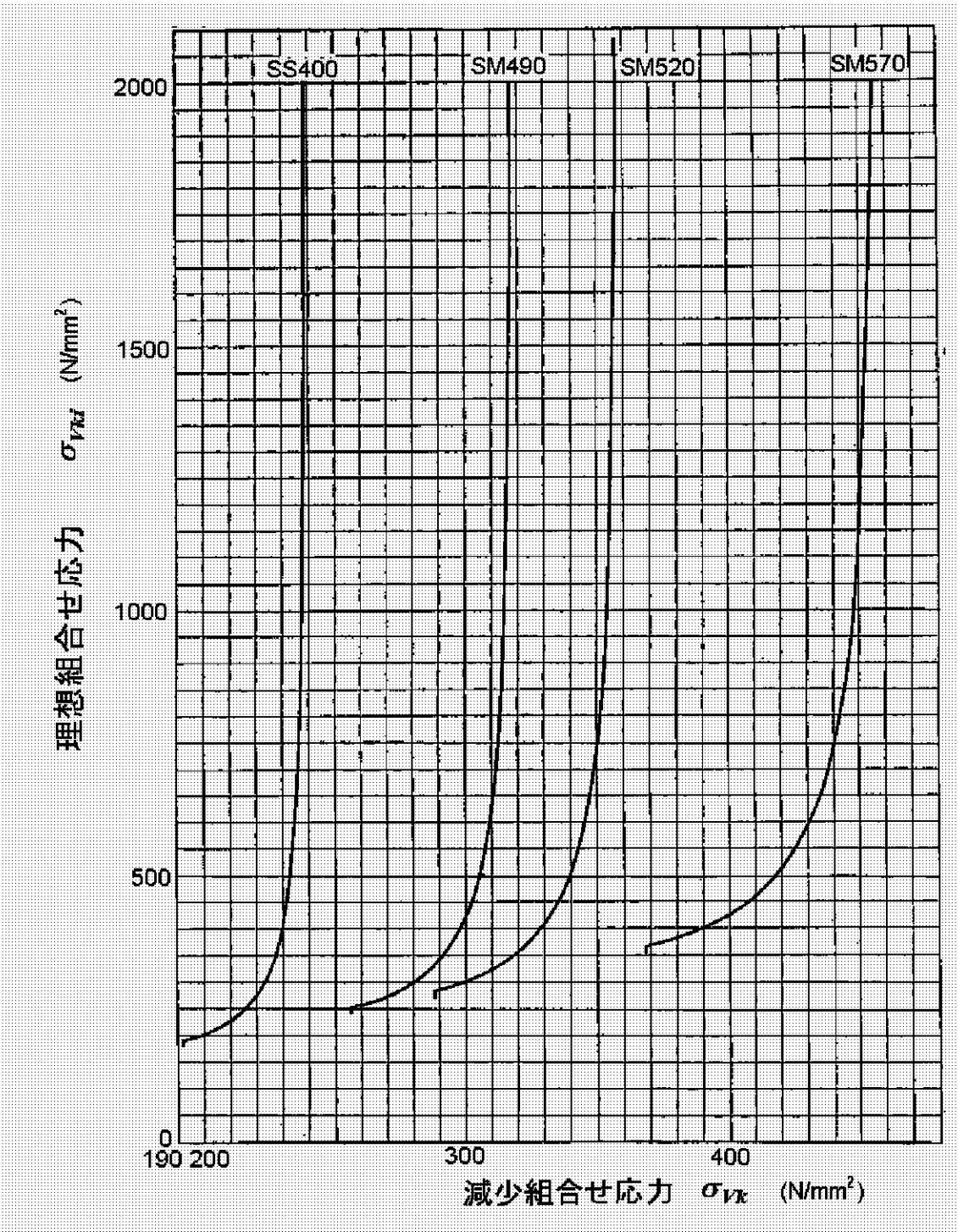


图 19 減少組合せ応力

表 28 部分区画の座屈係数 K

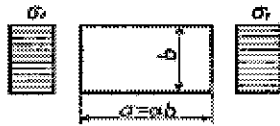
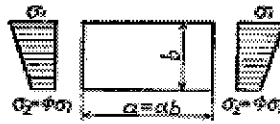
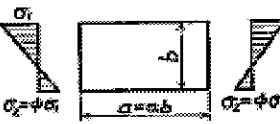
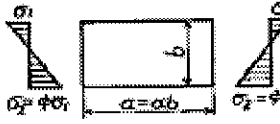
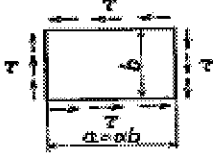
No.	荷 重 条 件	適用範囲	座 屈 係 数 K
1	等分布圧縮応力 $\phi=1$		$\alpha \geq 1$ $K=4$
		$\alpha < 1$ $K=\left(\alpha+\frac{1}{\alpha}\right)^2$	
2	直線分布圧縮応力 $0 \leq \phi < 1$		$\alpha \geq 1$ $K=\frac{8.4}{\phi+1.1}$
		$\alpha < 1$ $K=\left(\alpha+\frac{1}{\alpha}\right)^2+\frac{2.1}{\phi+1.1}$	
3	直線分布引張及び圧縮応力 で圧縮応力が大きい場合 $-1 < \phi < 0$		$K=(1+\phi) \cdot K' - \phi K'' + 10\phi(1+\phi)$ K' : $\phi=0$ の場合の座屈係数 (No. 2 による) K'' : $\phi=-1$ の場合の座屈係数 (No. 4)
4	直線分布引張及び圧縮応力 で両者等しい場合及び 引張応力が大きい場合 $\phi \leq -1$		$\alpha \geq \frac{2}{3}$ $K=23.9$
		$\alpha < \frac{2}{3}$ $K=15.87+\frac{1.87}{\alpha^2}+8.6\alpha^2$	
5	等分布せん断応力		$\alpha \geq 1$ $K=5.34+\frac{4.00}{\alpha^2}$
		$\alpha < 1$ $K=4.00+\frac{5.34}{\alpha^2}$	

表 29 面全体の座屈係数 K

No.	荷重条件及び補剛材位置	適用範囲	座屈係数 K
1	座屈分布圧縮応力 $0 \leq \sigma \leq 1$ 中央に一本の水平補剛材	$\sigma \leq \sqrt{1+2\eta}$	$K = \frac{2}{8.95(\eta+1.1)} \cdot \frac{(1+\sigma^2)^2 + 2\eta}{\sigma^2(1+2\eta)}$
		$\sigma > \sqrt{1+2\eta}$	$K = \frac{4}{8.95(\eta+1.1)} \cdot \frac{1+\sqrt{1+2\eta}}{1+2\eta}$
2	座屈分布圧縮応力 $0 \leq \sigma \leq 1$ 中央に一本の垂直補剛材	$0.4 \leq \sigma \leq 1.0$	$K = \frac{A - \sqrt{A^2 - B}}{1.63\sigma(\eta+1.1)}$ $A = 1.5(1+\sigma^2)^2 + 0.167(\eta+\sigma^2)^2 + 1.3\sigma^2\eta$ $B = (1+\sigma^2)^2(\eta+\sigma^2)^2 + 2\sigma^2\eta[(1+\sigma^2)^2 + (\eta+\sigma^2)^2]$
3	等分分布圧縮応力 中央に一本の水平及び 垂直補剛材	$0.9 \leq \sigma \leq 1.1$	$K = \frac{(1+\sigma^2)^2 + 2(\eta_1 + \eta_2\sigma^2)}{\sigma^2(1+2\eta)}$
4	等分せん断応力 中央に一本の水平補剛材	$0.3 \leq \sigma \leq 2.0$	$K = \frac{4.93(1+\sigma^2)}{\sigma^2\sqrt{\zeta}}$ $\zeta = \frac{28.28(1+\sigma^2)^2 + 3.16(1+9\sigma^2)^2 + 4.93\eta}{(1+\sigma^2)^2(1+9\sigma^2)^2 + 2\eta[(1+\sigma^2)^2 + 2\eta(1+9\sigma^2)^2]}$ $+ \frac{10.24(1+\sigma^2)^2 + 0.41(\eta+\sigma^2)^2 + 13.11\eta}{(1+\sigma^2)^2(\eta+\sigma^2)^2 + 2\eta\sigma^2(\eta+\sigma^2)^2 + 10.24(1+\sigma^2)^2}$
5	等分せん断応力 中央に一本の垂直補剛材	$0.3 \leq \sigma \leq 2.0$	$K = \frac{4.93(1+\sigma^2)}{\sigma^2\sqrt{\zeta}}$ $\zeta = \frac{10.24(1+\sigma^2)^2 + 0.41(1+9\sigma^2)^2 + 13.11\eta\sigma^2}{(1+\sigma^2)^2(1+9\sigma^2)^2 + 2\eta\sigma^2[(1+\sigma^2)^2 + 2\eta(1+9\sigma^2)^2]}$ $+ \frac{28.28(1+\sigma^2)^2 + 3.16(\eta+\sigma^2)^2 + 4.93\eta\sigma^2}{(1+\sigma^2)^2(\eta+\sigma^2)^2 + 2\eta\sigma^2(\eta+\sigma^2)^2 + 2\eta\sigma^2(1+\sigma^2)^2}$
6	等分せん断応力 中央に一本の水平及び 垂直補剛材	$0.5 \leq \sigma \leq 2.0$	$K = 2.60 \frac{1+\sigma^2}{\sigma^2} \sqrt{(1+\sigma^2)^2 + 2(\eta_1 + \sigma^2\eta_2)}$

備考 1. 両補剛材は交互で長ければ減少することなく負値するが、又は同一側面で結合されている場合はならない。
 2. 記号 η は座屈補剛比、 σ は水平補剛材を示す。

附属書（参考）柱の座屈計算

この附属書（参考）は、本体及び附属書（規定）に関連する事柄を補足するもので、規定の一部ではない。

今日、海外では限界状態設計法をクレーンの設計法に取り入れる動きがあり、それとともに座屈の計算式も日本におけるそれとは異なったものが提案されている。本規格にそれらを取り入れることは構造規格との整合性の上で矛盾を生じる可能性があり、また国内で十分に検討されていない方式を直ちに取り入れるのは性急に過ぎるため、ジブたわみを計算に取り入れた方式の計算方式とともに附属書に記述する。

クレーンの構造部材に用いられる鋼材の座屈計算には、より厳密な方法の一つに以下の方法がある。**2.2.3**で求めた座屈応力をペンダントロープで先端を支える形式のラチスジブに適用する場合は、ジブのたわみによる圧縮力の変化を考慮した**3.**の方法により全体柱の座屈強度の照査を行う。

1. 記号

A_{bx} , A_{by}	: ジブ側面及び上下面の垂直材1本の断面積(mm ²)
A_{dx} , A_{dy}	: ジブ側面及び上下面の斜材1本の断面積(mm ²)
b	: 中間支持点までの距離(mm)
b_{ax} , b_{ay}	: ジブ側面及び上下面の垂直材長さ（主材中心間距離）(mm)
d	: 斜材のピッチ(mm)
E	: 縦弾性係数(N/mm ²)
g	: 重力加速度(m/s ²)
I_x	: 面内曲げに関するジブ平行部分の断面2次モーメント(mm ⁴)
I_y	: 面外曲げに関するジブ平行部分の断面2次モーメント(mm ⁴)
k	: 座屈軸についての最小回転半径(mm)
k_{cr}	: ジブの支持条件を考慮した座屈長さの補正係数
l_k	: 有効座屈長さ(mm)
l	: ジブ長さ(mm)
l_2	: ジブ起伏用ワイヤロープの長さ(mm)
l_3	: 巻上用ワイヤロープの長さ(mm)
l_4	: 中間支持ワイヤロープの長さ(mm)
M	: 等価モーメント(N・mm)
M_y	: それぞれy軸とz軸に関する曲げモーメント (N・mm)
M_{Ld}	: 横ねじれ座屈荷重 (N・mm)
M_{dy}	: z軸に関する曲げ抵抗 (N・mm)
M_{dz}	: z軸に関する曲げ抵抗 (N・mm)
M_j	: ジブの質量(kg)
M_1	: プレースのない区間における、大きい方の端部モーメント(N・mm)
m_x	: 面内せん断に対する組立柱としての修正係数
m_y	: 面外せん断に対する組立柱としての修正係数
N	: 軸力, ジブ先端の軸圧縮力(N)
N_x	: 面内曲げに関する座屈荷重(N)
N_{cy} , N_{cz}	: それぞれy軸とz軸に関する座屈抵抗(N)
N_{Ey} , E_z	: それぞれy軸とz軸に関するオイラー座屈荷重(N)
N_{3a}	: 中間支持ロープ張力のジブ軸方向成分(N)
n	: 構成する面の数
T_2	: ジブ起伏用ワイヤロープの張力(N)
T_3	: 巻上用ワイヤロープの張力(N)

T_4	: 中間支持ワイヤロープの張力(N)
α	: 軸の初期非直線性, 荷重偏心, 残留応力の影響を表す係数
β	: 等価モーメント係数
β_y	: y軸に関する等価モーメント係数
β_z	: z軸に関する等価モーメント係数
β_1	: モーメントだけが加わる場合の等価モーメント係数
δ_0	: 中間支持点の面外たわみ(mm)
δ	: ジブ先端の面外たわみ(mm)
θ	: ジブ起伏角度 (deg)
λ	: 部材の細長比
l_k	: 有効座屈長さ(mm)
$\bar{\lambda}$	: 部材の相対細長比
$\bar{\lambda}_0$	: これ以下ではひずみ硬化のため弾性不安定が生じなくなる限界の相対細長比
λ_c	: 細長係数(縮減係数)
σ_y	: 降伏点又は耐力(N/mm ²)
σ_c	: 座屈応力(N/mm ²)
ϕ_x, ϕ_y	: ジブ側面及び上下面の斜材取付角(deg)
ϕ	: 静荷重係数

2. 一般

2.1 座屈計算 クレーンの構造部分に用いる鋼材の座屈計算について定める。座屈計算に用いる荷重には衝撃係数, 作業係数又は動荷重係数, 静荷重係数によって割増しを行った荷重の値を用いる。

2.2 柱材の座屈荷重

2.2.1 部材の有効座屈長さは, 端部の拘束条件によって異なる。有効座屈長さは, 単純化した方法, 又は弾性理論によって決定してよい。

2.2.2 細長比 部材の細長比 λ は次式による。

$$\lambda = \frac{l_k}{k} \quad \text{..... (1)}$$

ここに, λ : 部材の細長比
 l_k : 有効座屈長さ(mm)
 k : 座屈軸についての最小回転半径(mm)

ラチスジブの有効座屈長さ l_k は **11.3.2.2** 及び **11.3.3.2** を参照。

部材の相対細長比 $\bar{\lambda}$ と細長係数(縮減係数) λ_c は次式による。

$$\bar{\lambda} = \frac{\lambda}{\lambda_c} \quad \text{..... (2)}$$

$$\lambda_c = \pi \sqrt{\frac{E}{\sigma_y}} \quad \text{..... (3)}$$

ここに, $\bar{\lambda}$: 部材の相対細長比
 λ_c : 細長係数(縮減係数)
 E : 縦弾性係数(N/mm²)
 σ_y : 降伏点又は耐力(N/mm²)

2.2.3 座屈応力 座屈応力は次式による。

$$\frac{\sigma_c}{\sigma_y} = \left[B + (B^2 - \bar{\lambda}^2)^{0.5} \right]^{-1} \quad \text{..... (4)}$$

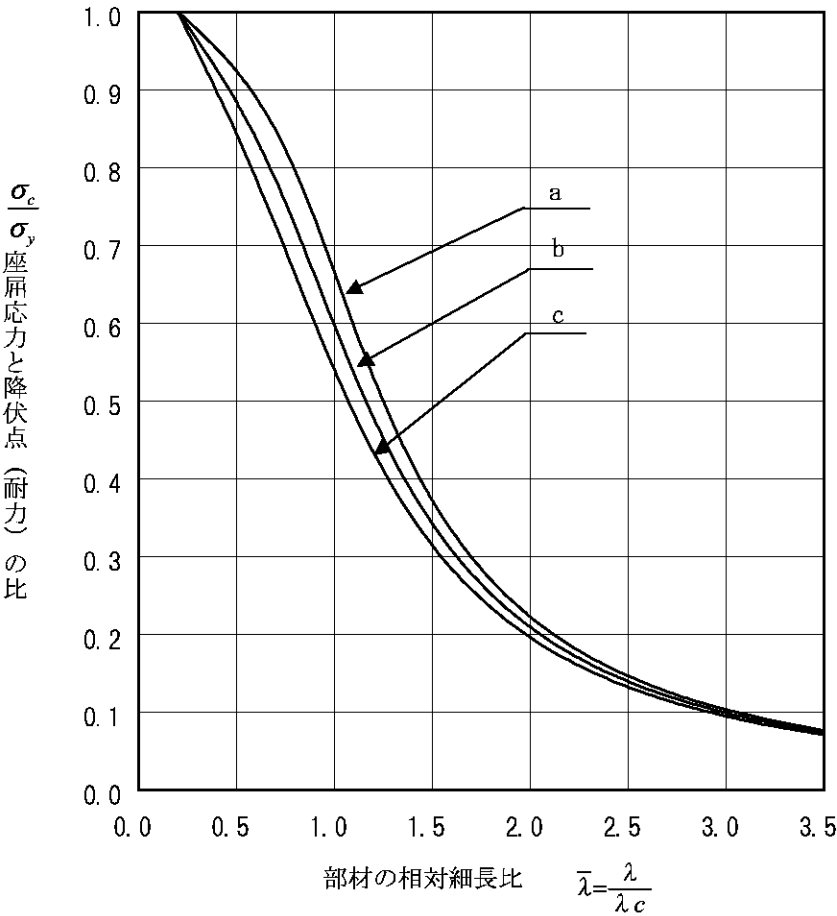
ここに、 $B=0.5\left[1+\alpha\left(\bar{\lambda}-\bar{\lambda}_0\right)+\bar{\lambda}^2\right] \cdots \cdots \cdots (5)$

- σ_c : 座屈応力 (N/mm²)
- σ_y : 降伏点又は耐力 (N/mm²)
- α : 軸の初期非直線性, 荷重偏心, 残留応力の影響を表す係数で, 附属書表 1 による。
- $\bar{\lambda}$: 部材の相対細長比
- $\bar{\lambda}_0$: これ以下ではひずみ硬化のため弾性不安定が生じなくなる限界の相対細長比で, 附属書表 1 による。

附属書表 1

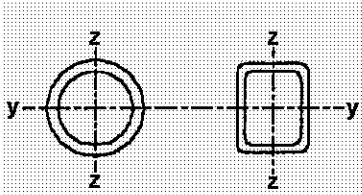
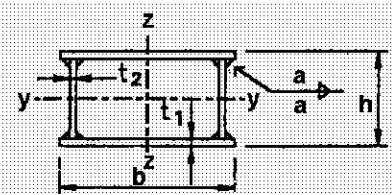
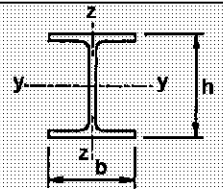
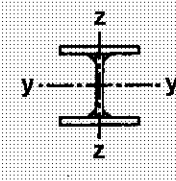
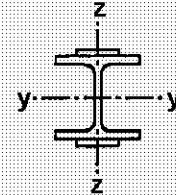
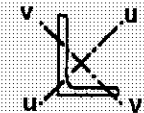
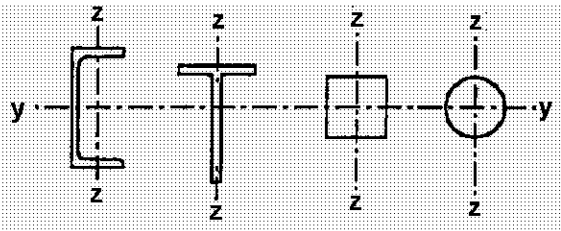
座屈曲線 \ 係数	α	$\bar{\lambda}_0$
A	0.21	0.2
B	0.34	0.2
C	0.49	0.2

この方法によって計算された $\frac{\sigma_c}{\sigma_y}$ を附属書図 1 に示す。



附属書図 1 座屈曲線

附属書図 1 における座屈曲線a, b, cは, 附属書表 2 に示す断面形状及び条件に応じて選択する。

断面形状	必要条件	軸に直角な方向の座屈	座屈曲線
中空断面形： 	熱間又は冷間圧延鋼，残留応力除去	y-y 又は z-z	A
	冷間圧延鋼	y-y 又は z-z	b
溶接箱形断面形： 	残留応力除去	y-y 又は z-z	A
	溶接したもの (次のものを除く)	y-y 又は z-z	b
	厚板溶接 ($a > \frac{t}{2}$) $\frac{b}{t} < 30$ $\frac{h}{t} < 30$	y-y z-z	c
I-形鋼： 	$\frac{h}{b} > 1.2$	y-y z-z	A B
	$\frac{h}{b} \leq 1.2$	y-y z-z	B C
溶接 I-断面形： 	残留応力除去	y-y z-z	A B
	ガスカットされたフランジ	y-y 又は z-z	B
	圧延されたままのフランジ	y-y z-z	B C
補強板付 I-断面形 	溶接で取り付けられた板のある I-形鋼	y-y	B
		z-z	A
山形鋼： 	一般	u-u 又は v-v	c
	めっきしたもの		b
みぞ形鋼， T 形鋼 及び 中実鋼： 		y-y 又は z-z	C

附属書表 2 断面形状と座屈曲線の関係

2.3 軸方向に曲げを伴う場合の計算 軸方向圧縮力に曲げを伴う部材の計算は、軸力による曲げモーメントの増加、部材の長手方向に沿った曲げモーメントの変動、ねじれ座屈、初期偏心、残留応力等を考慮した、適当な相互作用方程式による。**ISO10721-1:1997** には、次式が1方法として挙げられている。

a) 断面に対し

$$\frac{N}{N_{cy}} + \frac{M_y}{M_{dy}} + \frac{M_z}{M_{dz}} \leq 1.0 \quad \text{..... (6)}$$

ここに、
 N : 軸力 (N)
 N_{cy} : y軸に関する座屈抵抗 (N)
 M_y : y軸に関する曲げモーメント (N・mm)
 M_z : z軸に関する曲げモーメント (N・mm)
 M_{dy} : z軸に関する曲げ抵抗 (N・mm)
 M_{dz} : z軸に関する曲げ抵抗 (N・mm)

b) 部材全体の抵抗力

$$\frac{N}{N_{cz}} + \frac{\beta_y \cdot M_y}{M_{dy} \left(1 - \frac{N}{N_{Ey}}\right)} + \frac{\beta_z \cdot M_z}{M_{dz} \left(1 - \frac{N}{N_{Ez}}\right)} \leq 1.0 \quad \text{..... (7)}$$

ここに、
 N : 軸力 (N)
 N_{cz} : z軸に関する座屈抵抗 (N)
 N_{Ey} : y軸に関するオイラー座屈荷重 (N)
 N_{Ez} : z軸に関するオイラー座屈荷重 (N)
 M_y : y軸に関する曲げモーメント (N・mm)
 M_z : z軸に関する曲げモーメント (N・mm)
 M_{dy} : z軸に関する曲げ抵抗 (N・mm)
 M_{dz} : z軸に関する曲げ抵抗 (N・mm)
 β_y : y軸に関する等価モーメント係数
 β_z : z軸に関する等価モーメント係数

c) 横ねじり座屈に対し

$$\frac{N}{N_{cz}} + \frac{\beta_y \cdot M_y}{M_{Ld} \left(1 - \frac{N}{N_{Ey}}\right)} + \frac{\beta_z \cdot M_z}{M_{dz} \left(1 - \frac{N}{N_{Ez}}\right)} \leq 1.0 \quad \text{..... (8)}$$

かつ

$$\frac{\beta_y}{1 - \frac{N}{N_{Ey}}} \geq 1.0 \quad \text{..... (9)}$$

ここに、
 N : 軸力 (N)
 N_{cy} : y軸に関する座屈抵抗 (N)
 N_{cz} : z軸に関する座屈抵抗 (N)
 N_{Ey} : y軸に関するオイラー座屈荷重 (N)
 N_{Ez} : z軸に関するオイラー座屈荷重 (N)
 M_y : y軸に関する曲げモーメント (N・mm)
 M_z : z軸に関する曲げモーメント (N・mm)
 M_{Ld} : 横ねじり座屈荷重 (N・mm)
 β_y : y軸に関する等価モーメント係数
 β_z : z軸に関する等価モーメント係数

d) 等価モーメント係数 β_y , β_z は、より詳細な解析を行わない場合は以下の β による。

○モーメントのみが加わる部材：

$$\beta \cdot M = \beta_1 \cdot M = 0.6M_1 - 0.4M_2 \geq 0.4M_1 \dots\dots\dots (10)$$

ここに、 β ：等価モーメント係数

β_1 ：モーメントのみが加わる場合の等価モーメント係数

M ：等価モーメント(N・mm)

M_1 ：ブレースのない区間における、大きい方の端部モーメント(N・mm)

M_2 ：ブレースのない区間における、小さい方の端部モーメント(N・mm)

○柱の軸に垂直な荷重のみが加わる部材：

$$\beta \cdot M = \beta_0 \cdot M = M_0 \dots\dots\dots (11)$$

ここに、 β ：等価モーメント係数

β_0 ：柱の軸に垂直な荷重のみを受ける場合の等価モーメント係数

M ：等価モーメント(N・mm)

M_0 ：ブレースのない区間両端における、最大モーメント(N・mm)

○モーメントと柱の軸に垂直な荷重が加わる部材：

i) モーメントと柱の軸に垂直な荷重が同じ向きの曲げを起こすとき

$$\beta \cdot M = \beta_1 \cdot M + \beta_0 \cdot M_0 = \beta_1 \cdot M + M_0 \dots\dots\dots (12)$$

ここに、 β ：等価モーメント係数

β_0 ：柱の軸に垂直な荷重による等価モーメント係数

β_1 ：モーメントによる等価モーメント係数

M ：等価モーメント(N・mm)

M_0 ：ブレースのない区間両端における、最大モーメント(N・mm)

M_1 ：ブレースのない区間における、大きい方の端部モーメント(N・mm)

ii) 柱の軸に垂直な荷重とモーメントが反対向きの曲げを起こし、柱の軸に垂直な荷重による最大モーメント $|M_0|$ が、モーメントによる最大モーメント $|M_1|$ に対して、 $|M_0| \leq |M_1|$ のとき

$$\beta \cdot M = \beta_1 \cdot M = 0.6M_1 - 0.4M_2 \dots\dots\dots (13)$$

ここに、 β ：等価モーメント係数

β_1 ：モーメントによる等価モーメント係数

M ：等価モーメント(N・mm)

M_1 ：ブレースのない区間における、大きい方の端部モーメント(N・mm)

M_2 ：ブレースのない区間における、小さい方の端部モーメント(N・mm)

iii) 柱の軸に垂直な荷重とモーメントが反対向きの曲げを起こし、柱の軸に垂直な荷重による最大モーメント $|M_0|$ が、モーメントによる最大モーメント $|M_1|$ に対して、 $|M_0| > |M_1|$ のとき

$$\beta M = |M_0| - \beta_1 |M_1| \dots\dots\dots (14)$$

ここに, β : 等価モーメント係数

β_1 : モーメントによる等価モーメント係数

M : 等価モーメント(N・mm)

M_0 : ブレースのない区間両端における, 最大モーメント(N・mm)

M_1 : ブレースのない区間における, 大きい方の端部モーメント(N・mm)

3. 全体組立柱の安定 ペンダントロープで先端を支える形式のラチスジブは, 組立柱としてのジブの支持条件を考慮し, 座屈荷重を以下のように求める。

3.1 面内座屈荷重は以下による。

$$N_x = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_x}{(k_{cr} \cdot l)^2} \dots\dots\dots (15)$$

ここに, N_x : 面内曲げに関する座屈荷重(N)

E : 縦弾性係数 (N/mm²)

I_x : 面内曲げに関するジブ平行部分の断面二次モーメント (mm⁴)

k_{cr} : ジブの支持条件を考慮した座屈長さの補正係数で, $k_{cr}=1.0$ とする。

l_k : 有効座屈長さ(mm)

l : ジブ長さ(mm)

3.2 面外座屈荷重は以下による。

$$N_y = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{(k_{cr} \cdot l)^2} \dots\dots\dots (16)$$

ここに, N_y : 面外曲げに関する座屈荷重(N)

E : 縦弾性係数 (N/mm²)

I_y : 面外曲げに関するジブ平行部分の断面二次モーメント(mm⁴)

k_{cr} : ジブの支持条件を考慮した座屈長さの補正係数で, 次式による。

$$\tan \frac{\pi}{k_{cr}} = \frac{\pi}{k_{cr}} \left(1 - \frac{c_{cr}}{l} \right) \dots\dots\dots (17)$$

$$c_{cr} = \frac{N}{\frac{T_2}{l_2} + \frac{T_4}{l_4} + \frac{T_3}{l_3} \cdot \frac{b}{l} \cdot \frac{\delta_0}{\delta}} \dots\dots\dots (18)$$

ここに, c_{cr} : 有効拘束長さ(mm)

N : ジブ先端の軸圧縮力(N)

T_2 : ジブ起伏用ワイヤロープの張力(N)

T_4 : 中間支持ワイヤロープの張力(N)

T_3 : 巻上用ワイヤロープの張力(N)

l_2 : ジブ起伏用ワイヤロープの長さ(mm)

l_4 : 中間支持ワイヤロープの長さ(mm)

l_3 : 巻上用ワイヤロープの長さ(mm)

b : 中間支持点までの距離(mm)

l : ジブ長さ(mm)

δ_0 : 中間支持点の面外たわみ(mm)

δ : ジブ先端の面外たわみ(mm)

3.3 全体座屈荷重と判定

全体座屈荷重（面内）は、以下による。

$$N_{crx} = \frac{C_x \cdot N_x}{1 + m_x \cdot C_x \cdot N_x} \dots\dots\dots (19)$$

ここに、 N_{crx} ：面内全体座屈荷重(N)

C_x ：面内曲げに関するジブテーパー部分に対する減少係数

m_x ：面内せん断に対する組立柱としての修正係数で、次式による

$$m_x = \frac{1}{n \cdot A_{dx} \cdot E \cdot \sin \phi_x \cdot \cos^2 \phi_x} + \frac{b_{ax}}{n \cdot A_{bx} \cdot E \cdot d} \dots\dots\dots (20)$$

全体座屈荷重（面外）は、以下による。

$$N_{cry} = \frac{C_y \cdot N_y}{1 + m_y \cdot C_y \cdot N_y} \dots\dots\dots (21)$$

ここに、 N_{cry} ：面外全体座屈荷重(N)

C_y ：面外曲げに関するジブテーパー部分に対する減少係数

m_y ：面外せん断に対する組立柱としての修正係数で、下式による。ただし、第2項は垂直材のあるときだけ加える。

$$m_y = \frac{1}{n \cdot A_{dy} \cdot E \cdot \sin \phi_y \cdot \cos^2 \phi_y} + \frac{b_{ay}}{n \cdot A_{by} \cdot E \cdot d} \dots\dots\dots (22)$$

ここに、 A_{bx} 、 A_{by} ：ジブ側面及び上下面の垂直材1本の断面積(mm)

A_{dx} 、 A_{dy} ：ジブ側面及び上下面の斜材1本の断面積(mm)

ϕ_x 、 ϕ_y ：ジブ側面及び上下面の斜材取付角(mm)

b_{ax} 、 b_{ay} ：ジブ側面及び上下面の垂直材長さ(mm)

(主材中心間距離)

d ：斜材のピッチ(mm)

n ：構成する面の数

面内曲げに対応する座屈の判定は以下による。

$$\frac{N_{crx} - 0.5 \cdot N_{3a} - 0.5 \cdot M_j \cdot g \cdot \phi \cdot \sin \theta}{N} \geq 1.7 \dots\dots\dots (23)$$

面外曲げに対応する座屈の判定は以下による。

$$\frac{N_{cry} - 0.5 \cdot N_{3a} - 0.3 \cdot M_j \cdot g \cdot \phi \cdot \sin \theta}{N} \geq 1.7 \dots\dots\dots (24)$$

ここに、 N_{3a} ：中間支持ロープ張力のジブ軸方向成分(N)

M_j ：ジブの質量 (kg)

g ：重力加速度 (m/s²)

ϕ ：静荷重係数

θ ：ジブ起伏角度 (deg)