

1. 各規準での疲労設計の取扱い方

パイプ継手のおよび板継手についての疲労設計に関しては、各種の規準があるが、ここではパイプ継手を取り上げる。

パイプ継手の疲労に関する規準は、海洋構造物用と一般構造物用に分類できるが、ここではそれぞれの規準に対して下記のものを取上げる。

(1) 海洋構造物用規準

- 各船級協会からの offshore rules (DNV, ABS, LLOYD, NK 等) これらのルールは主として Drilling rig を対象としている。^{3) 1) 2) 8)}
- Fixed offshore structure を対象としている (API RP - 2A, BSI)。^{5) 6)}

(2) 一般構造物用規準

- AWS D - 1.1: 本規準は海洋構造物にも適用されている。⁴⁾
- 鋼管構造設計施工指針・日本建築学会。¹³⁾

特殊な規準としては、原子炉構造物の「解析による設計」をうたった ASME CODE SEC IIIがあるがここでは取上げない。

上記の(1), (2)の各規準では、疲労強度に注意すべきことを記述しているけれども、すべての規準が必ずしも具体的な疲労設計方法を与えてはいない。

例えば、日本海事協会規則では (5.1.5) 「繰り返し応力をうける部材は、繰り返し応力の大きさ、繰り返し数、部材の形状等を考慮し、疲労に対し十分な強度のものでなければならない。」と条文としては抽象的な記述である。

また、LLOYD規則 SEC 8 - 803 (1972) や ABS規則 (1981) SEC 3.3.9.9にも日本海事協会規則と類似した表現で疲労を考慮することが記述されているにすぎない。

しかし、DNV規則のみがその Appendix 2.F.Fatigue Analysis において波高の観測値から N年間の再現期間に対する最高波高をワイブル分布を用いて推定する方法および具体的な S-N線図を与えることにより、疲労設計方法を具体的に規定している。したがって、船級協会の規則の中から DNVルールを取上げる。

AWS D 1.1に関しては Marshall の論文 7) を参考にしてその背景について記述し、各線図の適用対象を規準にそって表 1.1にリストアップした。

API, BSIについては、それぞれの規準にそって疲労設計方法の概要を述べた。

鋼管構造設計施工指針については、その解説の中で述べられている各種鋼管継手の S-N

線図に使用されているパイプ継手の種類とそれらの特徴について記述した。

最後の1.6にて、AWS、DNV、API、BSIについて個々の基準間の疲労設計の取り扱い方の比較検討を行う。

上記いずれの基準も疲労累積被害度Dはマイナー則を使用し、設計疲労寿命に対してはDは1.0を超えてはならないとしている。

基準の章節は（ ）内の数字で示した。また、応力範囲（range）と応力振巾（awplitude）の使い分けがDNVルールにのみになされており、鋼管構造設計施工指針は応力全振巾が使用されている。他の基準はすべて応力範囲で統一されている。なお、1.4 BSI DD 55 (1978) Fixed Offshore Structures は、Draftであったが、正式な設計基準としてBS6235 (1982) Code of practice for Fixed Offshore Structures になった。しかし、6.5 Fatigue に関しては Draft と内容は同じである。

1.1 AWS D 1.1 (1981) 「Structural welding Code-Steel」 American Welding Society (10.7 Fatigue)

(1) 概要

1981年 code から stress categories に対する S-N線図が大巾に改正されている。主な改正点はX線図がX₁, X₂ 線図に, また, K, T線図のうちT線図がなくなりK₁, K₂ 線図に修正されている等である。X₁, K₁ 線図を使用する場合には, 溶接部にはピーニングを適用し, 磁気探傷を行うことが明記されている。

1980年 code までのX線図はMarshall, Toprac らにより隅肉溶接継手とかパイプ継手部の疲労試験から破断寿命 (Failure) のほぼ95%信頼下限を結んで作成されたものである。

線図 A,B,C,D,E,F,G, は AISC のそれと同じである。

このX線図は BSI DD-55 のQ線図や DNVのX線図の基礎にもなっており, 現在, 最も使用頻度の高い設計曲線である。

また, この線図は $N=4.3 \times 10^3$, $N=2 \times 10^6$ の2点でS-N線図をナックルさせているのが特徴である。

Marshallらは, 実際の溶接構造物には溶接熱から生ずる降伏点ぐらいの残留応力が生じ, また, シェークダウンによる局所的な塑性変形が生じ, 新しい残留応力場ができるので変動応力のゼロ点である平均応力を知ることは困難であるという意見である。したがって, これを無視している。

本 code に規定されているパイプ材質は降伏点が36~100ksi (25.2~70kg/mm²) のものでパイプ継手形状はT,Y,K,T-K,T-Y,X 等でそれぞれの継手に対しS-N線図を与えている (図1.1, 1980年版, 1981年版)。

各線図の適用対象を表1.1 に示す。

また, 1981年 code には疲労強度を向上させるべく下記のような溶接形状をパイプ継手部に適用することを推奨している (AWS, 10.7.5)。

- (i) 隣接母材に次第にとけ込む様に crapping layer を適用し, 図1.2 に示される形状にする。

溶接面のノッチは5/8 in のディスクを当てて, 1/16 in より深くないこと。

- (ii) 溶接表面は図1.2 に示される形状にブラインダー仕上げする。

(iii) Weld toeはピーニングする（磁気探傷）。

図1.3 に本 code で取上げられるパイプ継手の種類を示す。

図1.4 ～図1.9 は旧 S-N線図のC, C', T, K, D, D', E, E' 線図であるが、その背景は、これまで行われたパイプ継手の疲労強度に関する実験データを集めてプロットし、データ群の下限を通る線図としたものである。なお、 K_1 、 K_2 線図により与えられる許容応力は非常に低い、これはパンチングシアアの計算値で使用されるため（応力集中度 S.C.F.が考慮されていない）であろう。

本基準では、Hot Spot Stress がわかれば、なるべく X_1 、 X_2 線図を使用することが好ましいとしている。

(2) AWS D 1.1 の各線図の適用対象

表1.1 (Table 10.7.3)

応力分類	パイプ継手の種類	応力の種類
A	溶接継手のない平滑パイプ	T, C, B, R
B	縦シームのあるパイプ	T, C, B, R
B	完全溶け込み突合せ溶接継手で余盛は平滑に削除し、かつX線または超音波で (Class R) 無欠陥であることが証明されたもの。	T, C, B, R
B	連続溶接された縦ステフナーを有するパイプ	T, C, B, R
C ₁	溶接のまま (余盛付) の完全溶込み突合せ溶接継手	T, C, B, R
C ₂	横 (リング) ステフナーを有するパイプ	T, C, B, R
D	クリップ、ブラケットなどの各種付加物を有するパイプ	T, C, B, R
D	十字およびT継手で完全溶込み溶接されているもの (パイプ継手部は含まない)。	T, C, B, R
DT ²	Fig .10.13.1に示される完全溶込みグループ溶接をもっている単純なT,Y,K 継手として設計された継手 (重なり継手を含むが、その中で各々の継手のメインパイプはパンチングシアアの要求に合致すること)	支管はTCBR (注: 主パイプは K_1 または K_2 で個々にチェックされること)
E	部分溶込みグループ溶接あるいは隅肉溶接された十字形継手またはT継手 (パイプ継手部は除く)	T, C, B, R 溶接はFでチェックされること。
E	二重の巻付け板, カバー板, 縦ステフナー, ガゼットプレート等を有するパイプ (パイプ継手部は除く)	T, C, B, R 溶接はFでチェックされること。

ET ²	部分溶込みグループ溶接または隅肉溶接された単純なT.Y.K継手：また、複雑なパイプ継手でここでは主パイプのパンチングシアーは、全荷重を伝達することはできないし、荷重伝達は重なり（負偏心）ガゼットプレート、リングステフナー等によりなされる。	2次パイプのT, C, B R（注：単純T,YまたはK継手の主パイプはK ₁ またはK ₂ で個々にチェックされること。溶接もFTと10.5.3によりチェックされること。）
F	カバー板あるいは二重巻付け板の終端溶接、ガゼット板、ステフナーなどにある溶接継手	溶接継手にせん断応力が働く場合
F	引張りまたは曲げ荷重のかかっている十字とT継手で隅肉または部分溶け込みグループ溶接をもつ（パイプの継手部は除く）	溶接継手にせん断応力が働く場合（荷重の方向には関係ない）
FT	引張りまたは曲げ荷重がかかっている単純なT,YあるいはK継手で隅肉または部分溶け込みグループ溶接をもつ。	溶接継手にせん断応力が働く場合（荷重の方向には関係ない）
X ₂	単純なT,Y,K継手における主管いかなる継手もその妥当性が正確なモデルテストや理論計算（FEM計算）で決められること。	模型または実物試験体を用いた実験でシェークダウン後に測定される主管外表面の溶接止端部の応力集中部の応力または歪の最大範囲または精度の高い理論計算で求められた最大範囲
X ₁	※ X ₂ に加えて10.7.5で改良された溶接形状	
X ₁	補強なしのコーンシリンダーの交差点	角度の変化するところでのホットスポット応力はNote 4にて計算する。
K ₂	主パイプの径厚比（ $r = R/t$ ）が24を超えない単純なT,Y,K継手	主パイプに対するパンチングシアーNote5にて計算する。
K ₁	※ K ₂ に加えて10.7.5により改良された溶接形状	

※ P. 4参照

(3) Table 10.7.3 (表1.1) に対する注意事項

1) T=引張り, C=圧縮, B=曲げ

R=反転 つまり公称軸応力および公称曲げ応力の全応力範囲

2) 代表的継手形状に基づく経験カーブ (図1.1)

もし、実際の応力集中係数または hot stop strainがわかっているならば、X₁ または X₂ カーブの使用が好ましい。

3) 図1.1 の実験カーブは $r = R/t$ が18から24は実験値に基づいたもので、 r がこれ

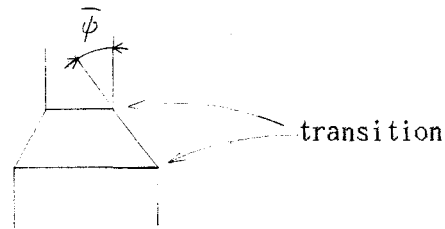
より小さい厚い板厚chord では安全側のカーブとなる。 r が24より大きい chord材には許容応力を次式により減少させる。

$$\frac{\text{疲労許容応力}}{\text{TあるいはK曲線から求められる応力}} = \left(\frac{24}{R/t} \right)^{0.7}$$

実際の応力集中係数とかhot spot strain がわかっている際は、X曲線を使用すること。

4) 応力集中係数 $SCF = 1 / \cos \bar{\psi} + 1.17 \sqrt{r b} \tan \bar{\psi}$

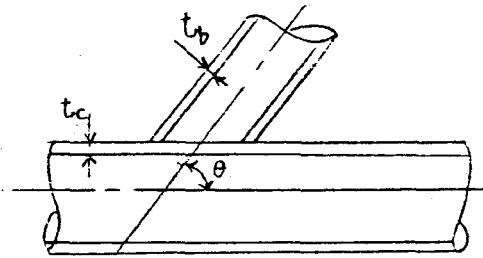
$\bar{\psi}$ はtransition
における角度変化



$r b$ はtransitionにおけるパイプの半径と板厚比

5) Punching shearの周期的応力範囲

$$V_p = \tau \sin \theta \left[\alpha f_a + \sqrt{\left(\frac{2}{3} f_{by} \right)^2 + \left(\frac{3}{2} f_{bz} \right)^2} \right]$$



$$\tau = t_b / t_c$$

f_a = 軸力に対する公称支管応力の周期的応力範囲

f_{by} = 面内曲げ応力の周期的応力範囲

f_{bz} = 面外曲げ応力の周期的応力範囲

軸荷重が同じ面内にある隣接した支管材に伝わるK継手に対して $\alpha = 1.0$

TとY継手および上に述べたK継手としてみなされないものに対して $\alpha = 2.0$

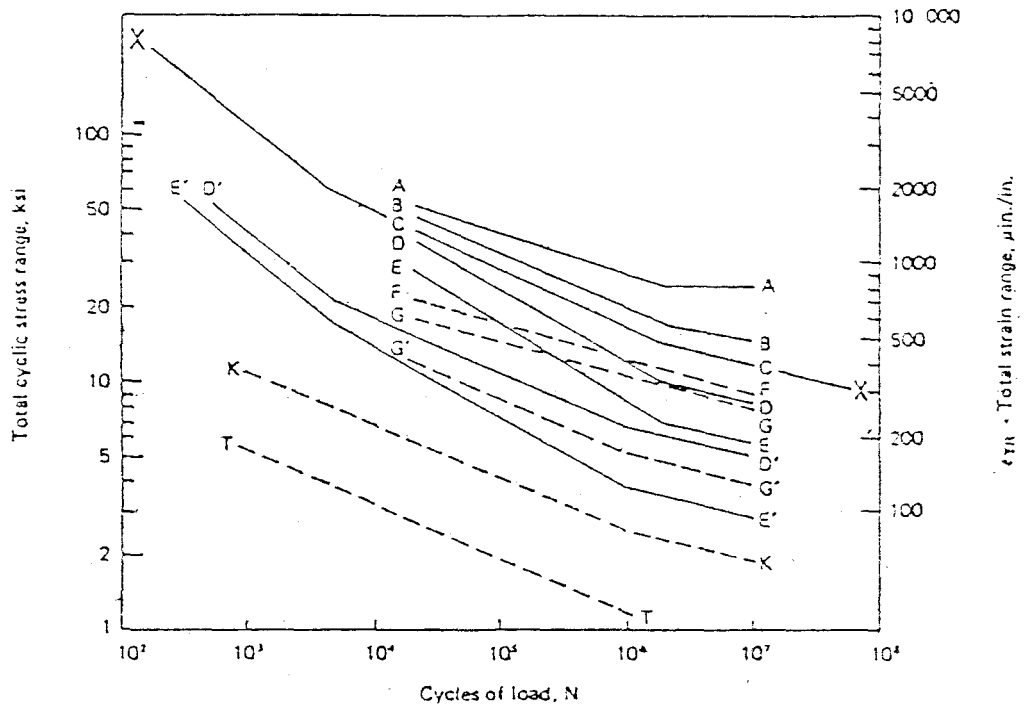


Fig. 10.7.4—Allowable fatigue stress and strain ranges for stress categories (see Table 10.7.3)
(1980 年度版)

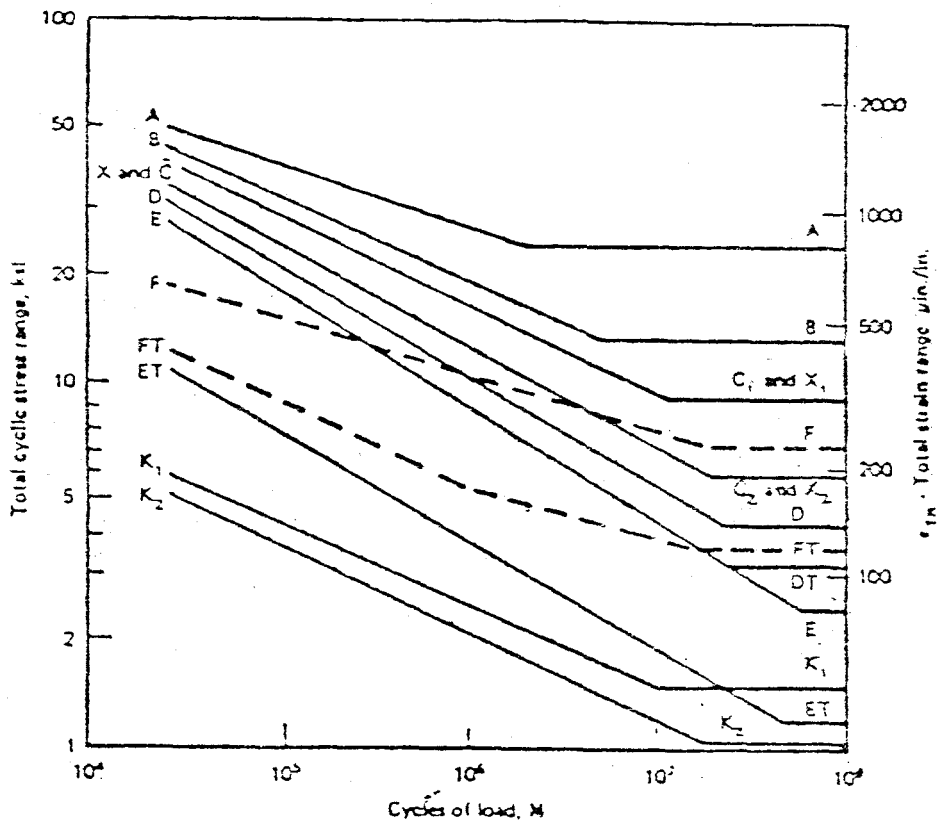
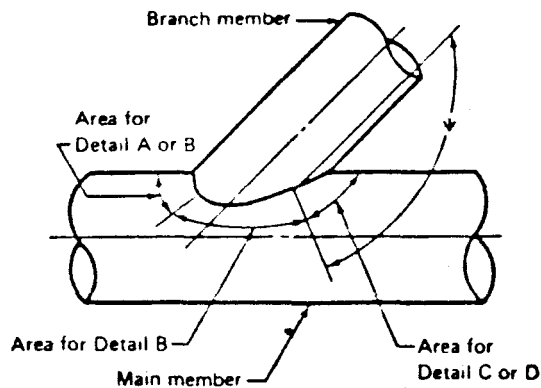


Fig. 10.7.4—Allowable fatigue stress and strain ranges for stress categories (see Table 10.7.3),
redundant structures in atmospheric service
(1981 年度版)

図 1.1 AWS D 1.1 の設計疲労寿命線図



Notes:

1. The applicable joint detail (A, B, C, or D) for a particular part of the connection is determined by the local dihedral angle, ψ , which changes continuously in progressing around the branch member, as follows:

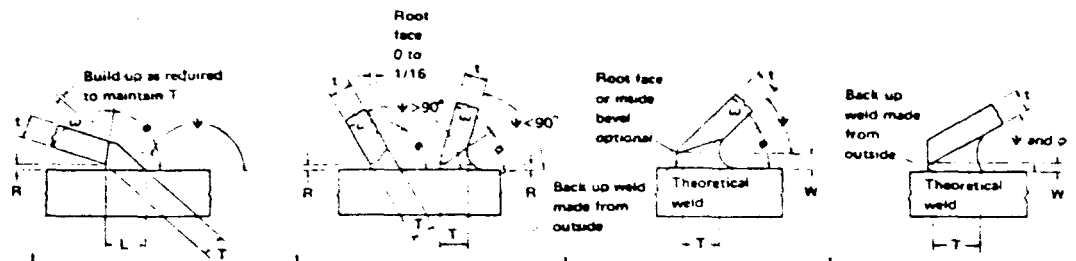
Detail	Applicable range of local dihedral angle
A	180° to 135°
B	150° to 50°
C	75° to 30°
D	40° to 15°

Sample joint required for groove angles under 30°

2. The angle and dimensional ranges given in Detail A, B, C, or D include maximum allowable tolerances.

Fig. 10.13.1A – Complete joint penetration prequalified tubular joints for simple T-, Y-, or K-connections made by shielded metal arc, gas metal arc, or flux cored arc welding

☒ 1. 2



	(A) $\Psi=180^{\circ}\text{-}135^{\circ}$	(B) $\Psi=150^{\circ}\text{-}50^{\circ}$	(C) $\Psi=75^{\circ}\text{-}30^{\circ}\text{***}$	(D) $\Psi=40^{\circ}\text{-}15^{\circ}\text{***}$		
End preparation (ω)	max	90°	90°*	.		
	min	45°	10° or 45° for $\Psi > 105^{\circ}$	10°		
Fitup or root opening (R)	max	FCAW SMAW (1) 3/16 in.	GMAW FCAW (2) 3/16 in.	FCAW SMAW (1) 1/4 in.	GMAW FCAW (2) 1/4 in. for $\phi > 45^{\circ}$ 5/16 in. for $\phi < 45^{\circ}$	*** W max. ϕ 1/8 in. 22-1/2° - 37-1/2° 3/16 in. 15° - 20-1/2°
	Necessary width min of weld groove provided by back up weld (W)	1/16 in. No min for $\phi > 90^{\circ}$	1/16 in. No min for $\phi > 120^{\circ}$	1/16 in.	1/16 in.	
Joint included angle ϕ	max		60° for $\Psi < 105^{\circ}$	37-1/2° if more use (B)		
	min		37-1/2° if less use (C)	1/2 Ψ		
Completed weld	T	$> t$	$> t$ for $\Psi > 90^{\circ}$ $> t/\sin \Psi$ for $\Psi < 90^{\circ}$	$> t/\sin \Psi$ but need not exceed 1.75t Weld may be built up to meet this	$> 2t$	
	L	$> t/\sin \Psi$ but need not exceed 1.75t				

* Otherwise as needed to obtain required ϕ

** Not prequalified for groove angles (ϕ) under 30°

*** Initial passes of back up weld discounted until width of groove (W) is sufficient to assure sound welding

Notes:

1. These root details apply to SMAW and FCAW (self-shielded) qualified in accordance with Table 10.12.

2. These root details apply to GMAW (short circuiting transfer) and FCAW (gas shielded) qualified in accordance with Table 10.12.

Fig. 10.13.1A (con't.) Complete joint penetration prequalified tubular joints for simple T-, Y-, or K-connections made by shielded metal arc, gas metal arc, or flux cored arc welding

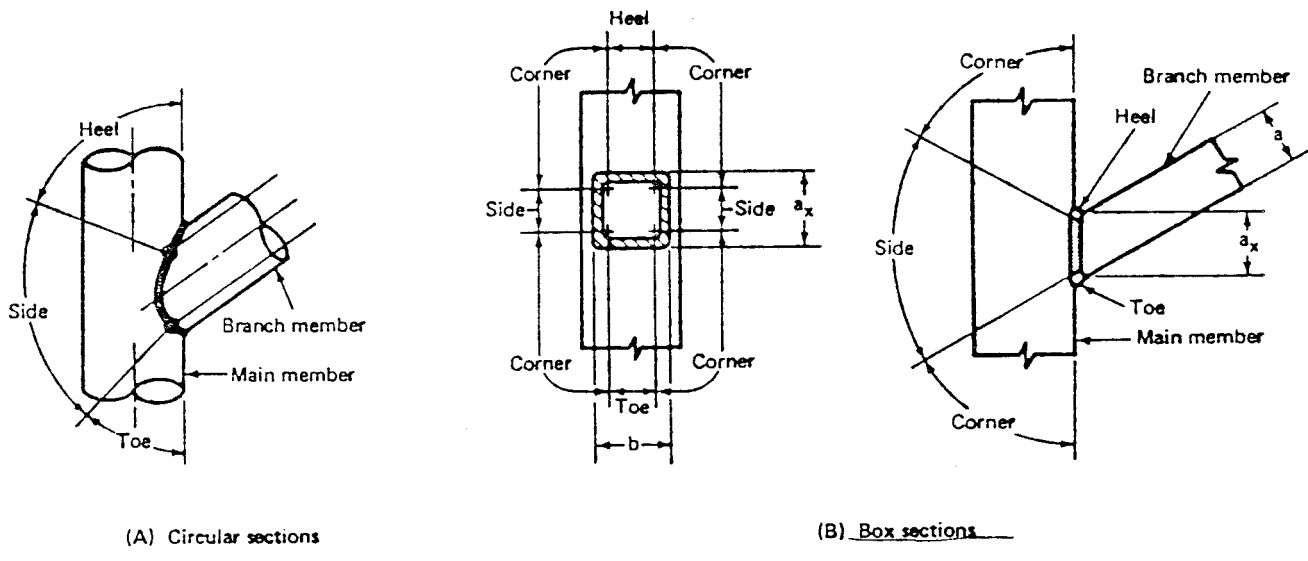


Fig. 10.1.2—Parts of a tubular connection

☒ 1. 3

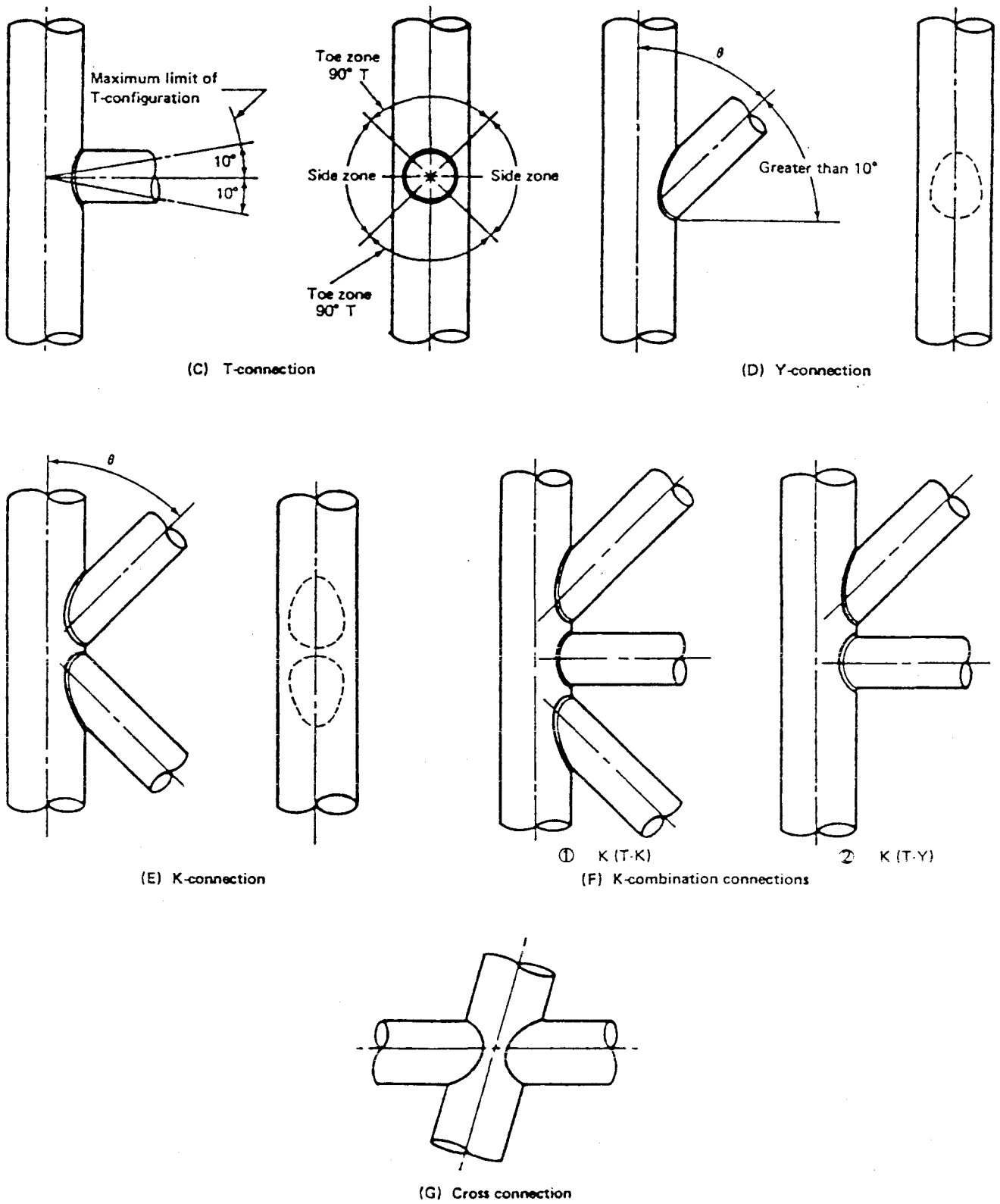
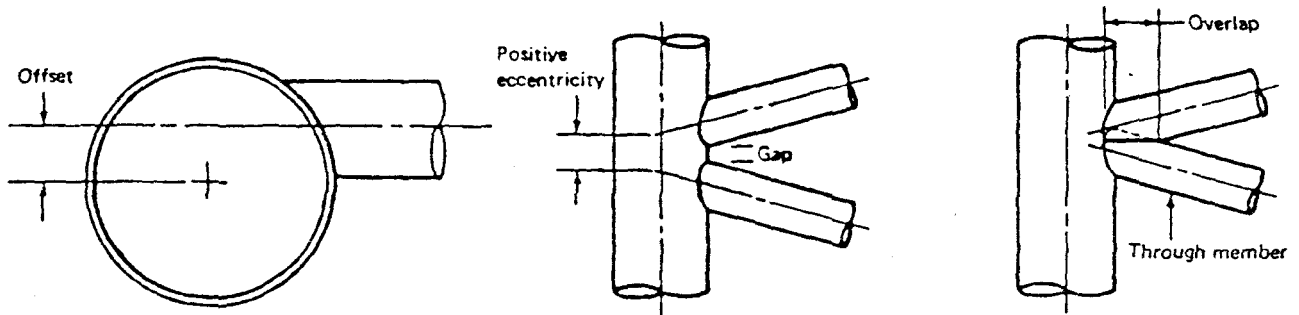
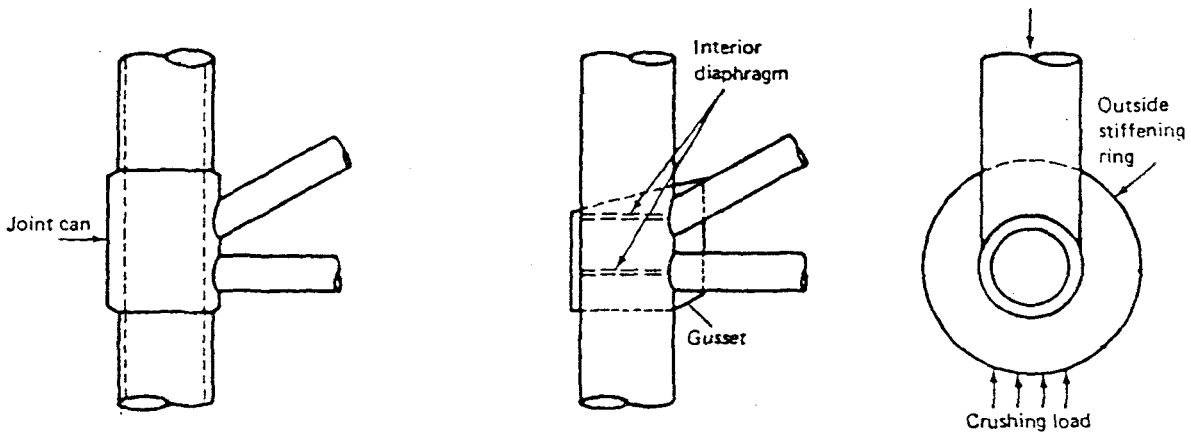


Fig. 10.1.2 (continued) — Parts of a tubular connection

☒ 1.3 続き

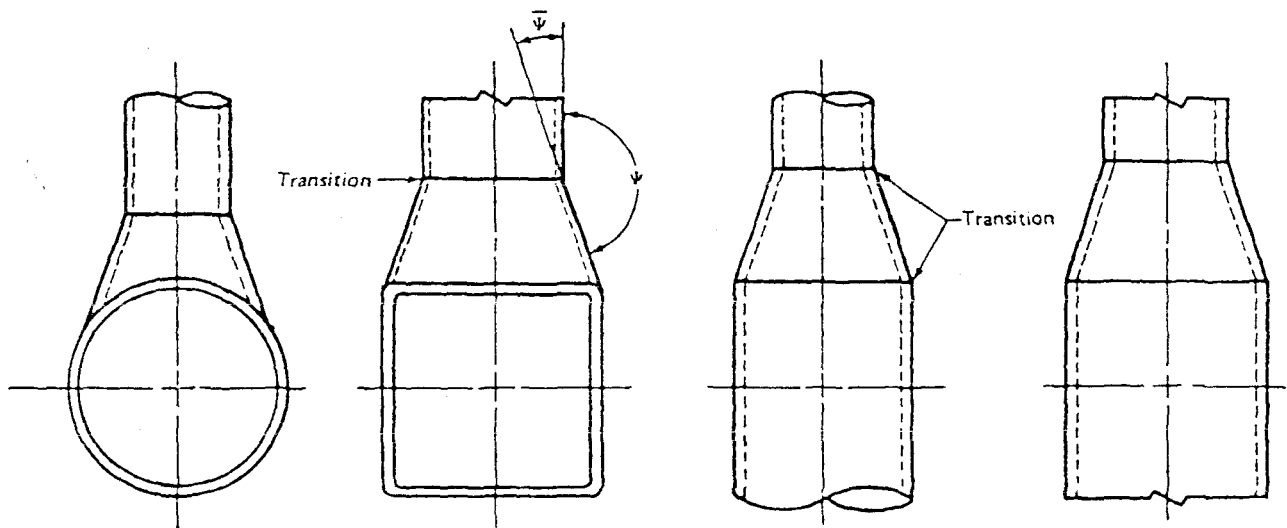


(H) Deviations from concentric connections



(I) Simple tubular connection

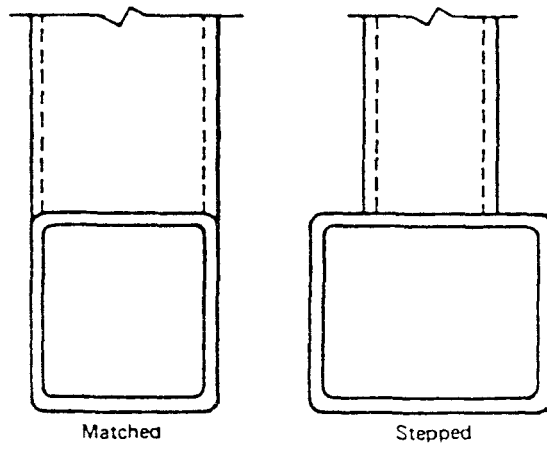
(J) Examples of complex reinforced connections



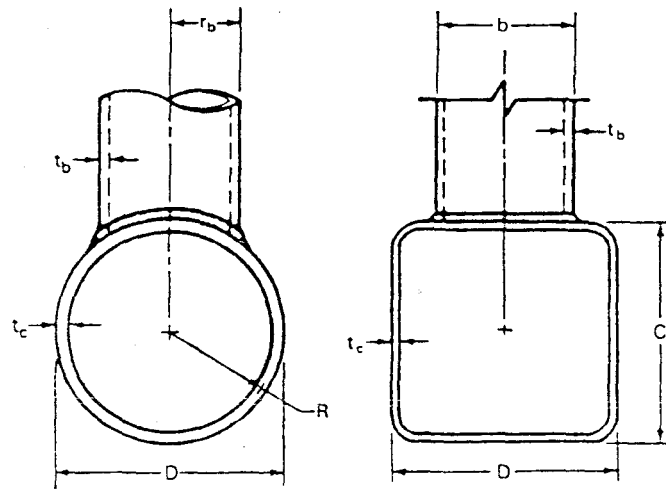
(K) Flared connections and transitions

Fig. 10.1.2 (continued)—Parts of a tubular connection

図 1.3 続き



(L) Connection types for box sections



(M) Geometric parameters

Parameter	Circular sections	Box sections
β	r_b/R	b/D
η	—	a_w/D See Fig. 10.1.2 (B)
γ	R/t_c	$D/2t_c$
τ	t_b/t_c	t_b/t_c
θ	Angle between member center lines	
ψ	Local dihedral angle at given point on welded joint	

Fig. 10.1.2 (continued)—Parts of a tubular connection

☒ 1. 3 続 き

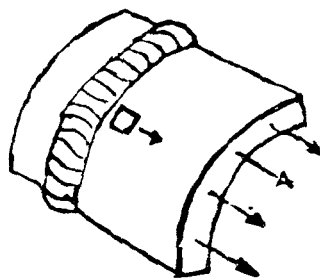
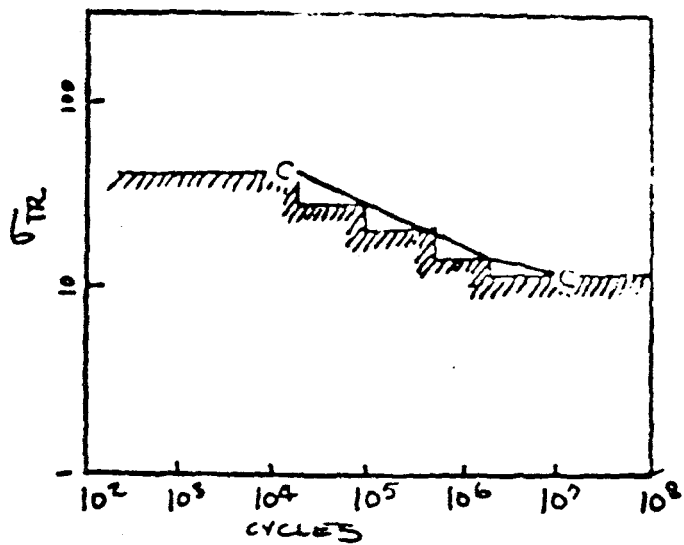


FIGURE 16

⊠ 1.4

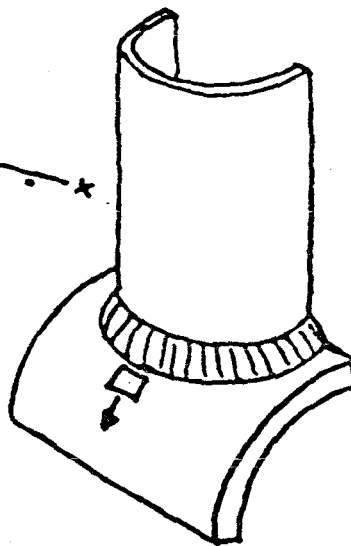
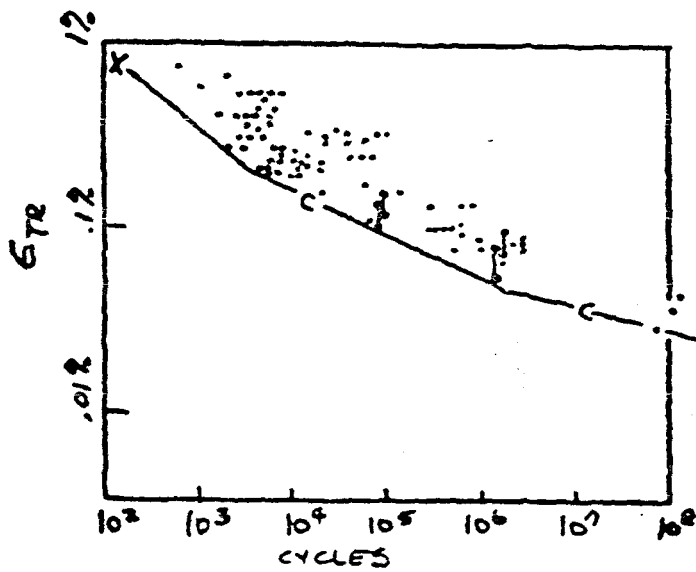


FIGURE 17

⊠ 1.5

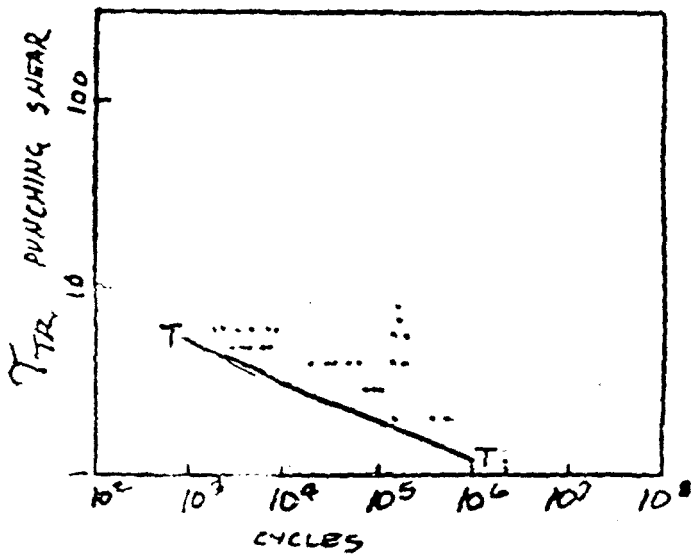


FIGURE 18

☒ 1.6

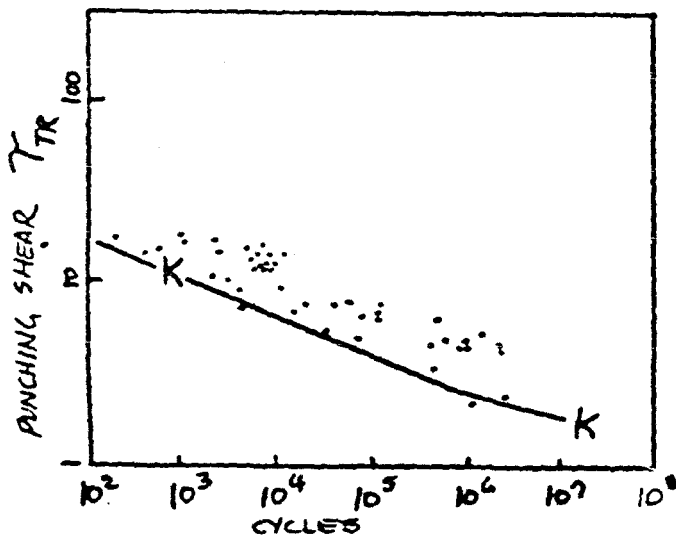
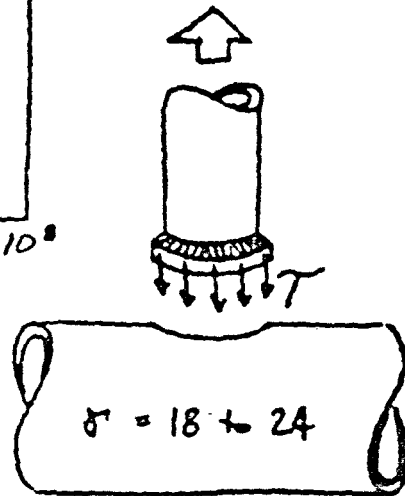
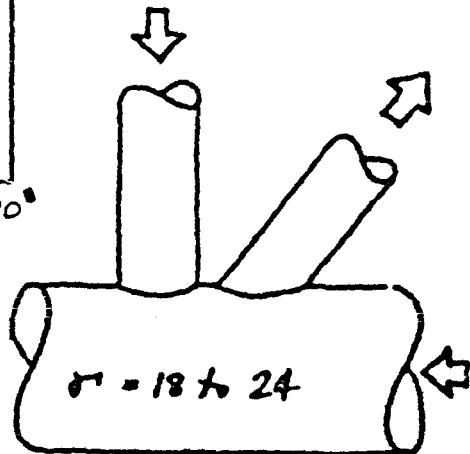


FIGURE 19

☒ 1.7



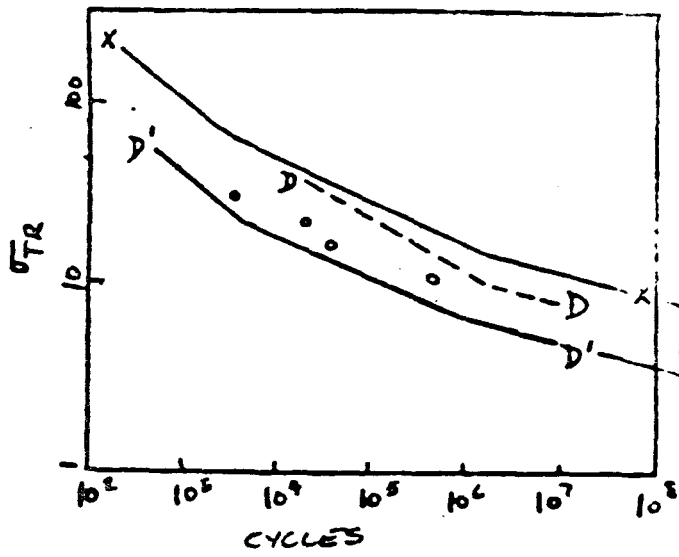


FIGURE 20

☒ 1. 8

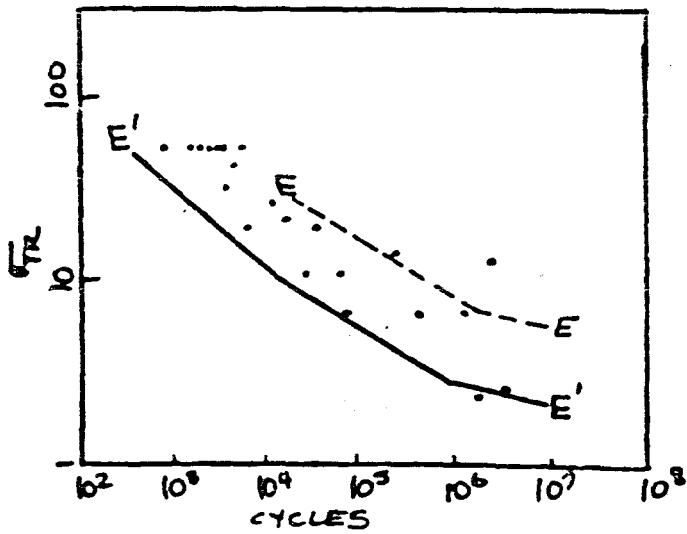
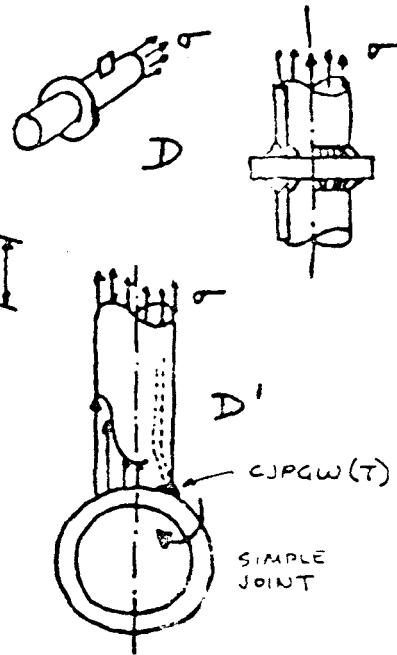
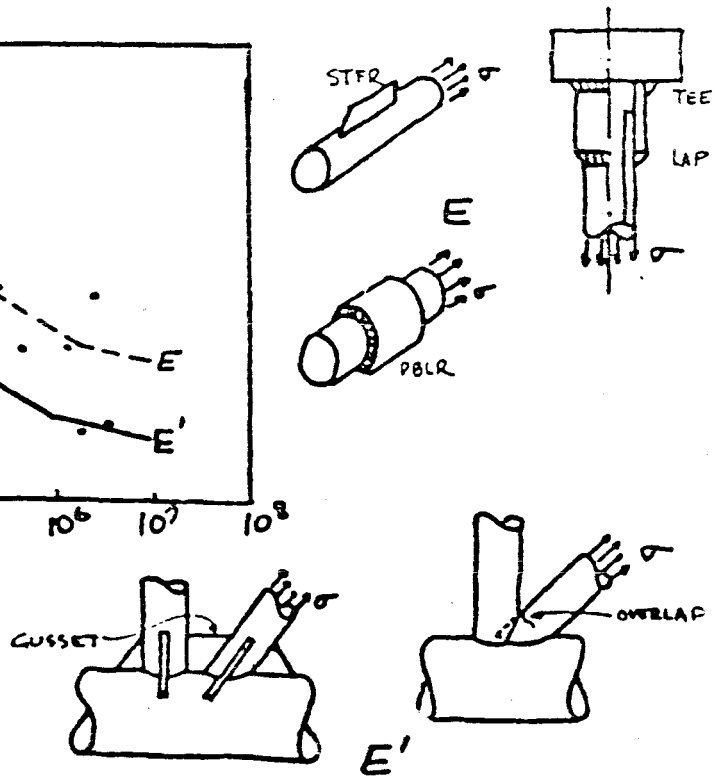


FIGURE 21

☒ 1. 9



1.2 DNV 「Rules for Classification of Mobile Offshore Units」 Det Norske Veritas. (1981)

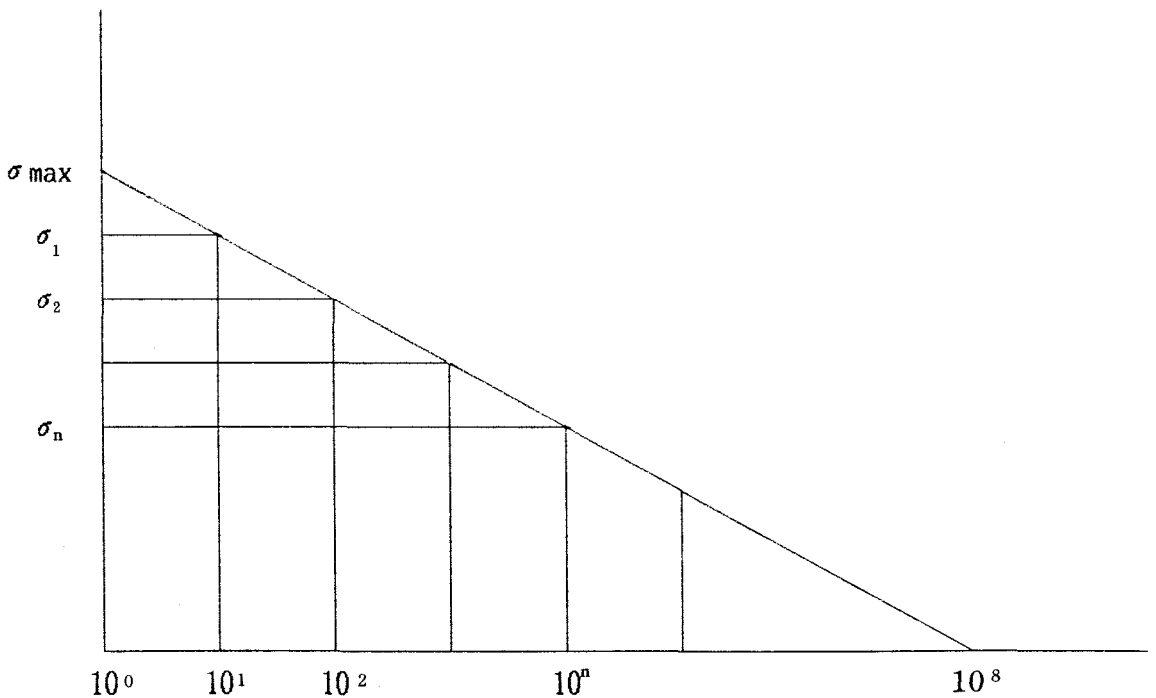
(Appendix 2. F. Fatigue Analysis)

(1) 疲労設計手順概要

海洋構造物の計画寿命期間 (20年) に発生する変動応力レベルとその発現頻度との関係が指数分布 (ワイブル分布) で表わされると仮定すると, σ_{\max} (図1.10) としては, 異常時をとり, 次に $\sigma = 0$ に対する点として構造物の耐用年数から想定される総繰り返し数に対する点をとってこの2点間を直線で結ぶ (ワイブル分布 $h=1.0$) 。

この分布線図から任意の応力レベルに対するその発現頻度が求められる。

この応力分布頻度線図とS-N線図からマイナー則に従って, 疲労の累積被害度を計算するものである。



変動応力発生頻度

図 1.10

(2) 応力分布 (F 200)

疲労に寄与する荷重は不規則なもので、疲労評価に対する応力は通常統計的長期確率分布により求める。

しかし、決定論的手法を用いてもよい。

長期応力分布は、特にセミサブリグのような大型構造物は2つのパラメータのあるワイブル分布に従うと仮定して良い。

$$Q(\sigma) = \exp \left\{ -\ln n \left(\frac{\sigma}{\sigma_{\max}} \right)^h \right\}$$

σ_{\max} = n サイクル期間における極大応力振巾

最大20年間で 10^8 サイクル

h = ワイブルパラメータ

パラメータは2つの確率レベル $Q=10^{-2}$, 10^{-8} における

応力比によりきめてもよい。

パラメータ σ_{\max} と h は別な方法で引き出しても良い。

- 即ち長期波分布の異なった確率レベル (4~6ヶ所) に相等する代表波高、波周期をもっている規則波での応力解析。
- σ_{\max} は最もきびしい波荷重条件を仮定した Design wave approach を使っても良い。

パラメータ h は類似の構造物の代表的分布からまたは応力と関係のある応答の長期分布から推定しても良い。

最も簡単な方法は、全体計算からの流体力とモーメントからの推定である。

(3) 疲労するまでのサイクル数 (F 301)

S-Nカーブは図1.11と図1.12に与えられる。

図1.11はパイプ継手に、図1.12は補強プレートに使用する。

S-Nカーブの方程式は表1.2 に与えられる。

疲労計算において疲労限度は、表1.2 に示されるように $N=2 \times 10^8$ サイクルにおける応力レベルである。図1.11と図1.12におけるS-Nカーブは有効な腐食防止システムがあると仮定する。

図1.13は応力範囲の長期分布をワイブル分布で示したものである。

(4) パイプ継手 (F 302)

図1.11の Xカーブは、パイプ継手に適用される。

Xカーブから許容サイクル数を得るので、ホットスポット応力を使用する。

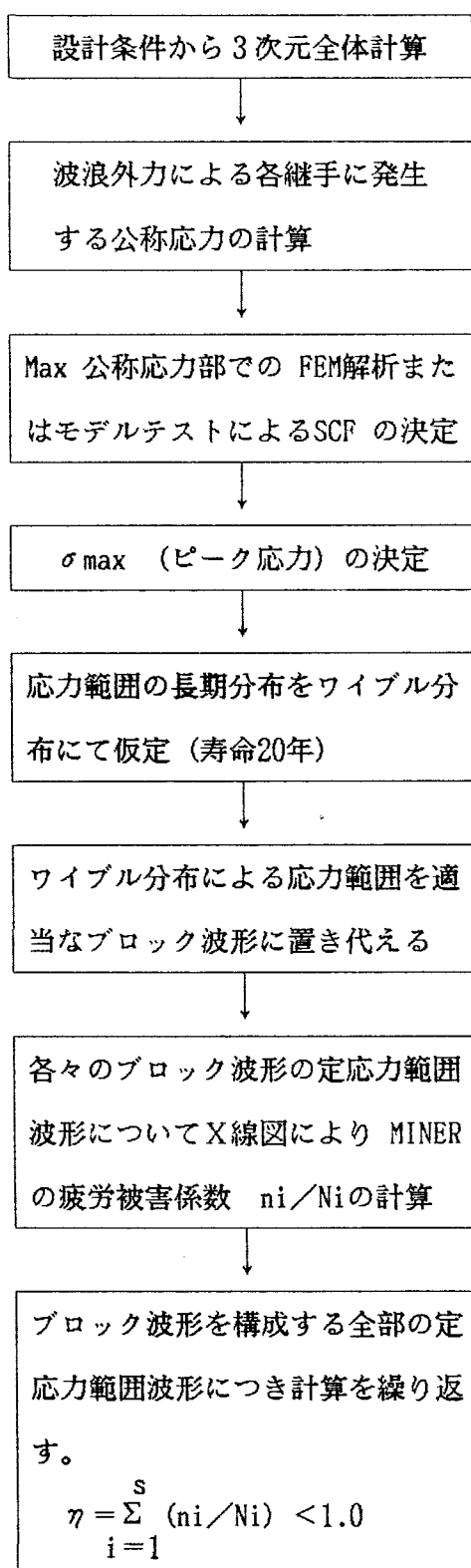
ホットスポット応力は、溶接toe の位置で溶接線に直角なブレース応力であり、溶接からの局部ノッチ効果を除く。

ホットスポット応力は、継手のいかなる局部効果をも除外した直応力として (SCF を考慮) 計算される。

S.C.F. は適切な実験とか解析から求めても良い。

(5) 疲労寿命予測 (F 400)

計算フローの1例



(6) (F 402)

長期の応力観測データが得られない場合の指標として20年相当の Max応力振巾値として

$$\sigma_{20} < \frac{1}{2} \cdot 18.42^{1/h} (10^{-8} \frac{a}{\Gamma(k/h + 1)})^{1/k} \text{ を与えている。}$$

ここで

$$\sigma_{20} = \text{20年相当の最大応力振巾} = 0.92^{1/h} \cdot \sigma_{100}$$

a.k = S-Nカーブのパラメータ

h = ワイブルパラメータ

$\Gamma(\)$ = ガンマー関数 (表 1.3)

各々の疲労分類に対する σ_{20} は図 1.14 に与えられる。

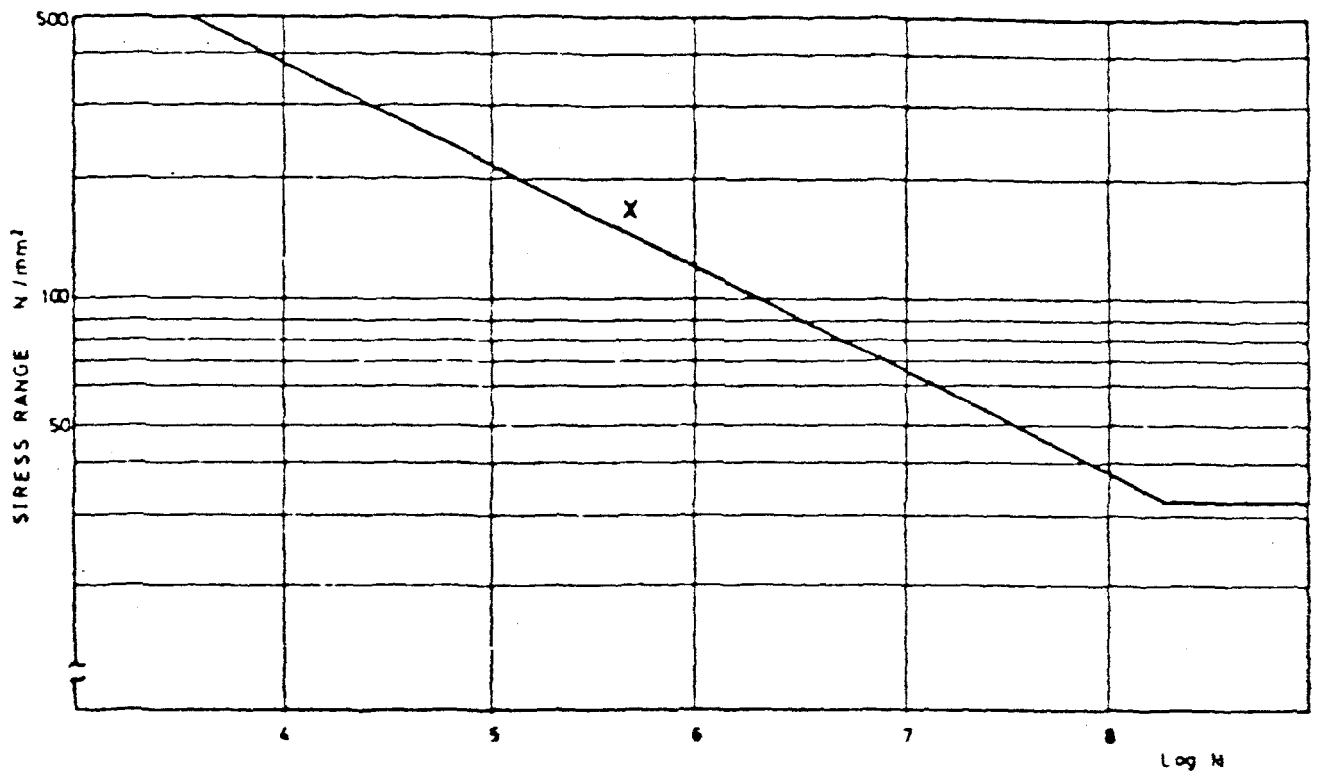


Fig. F2 S-N curve. Tubular joints. ☒ 1.11

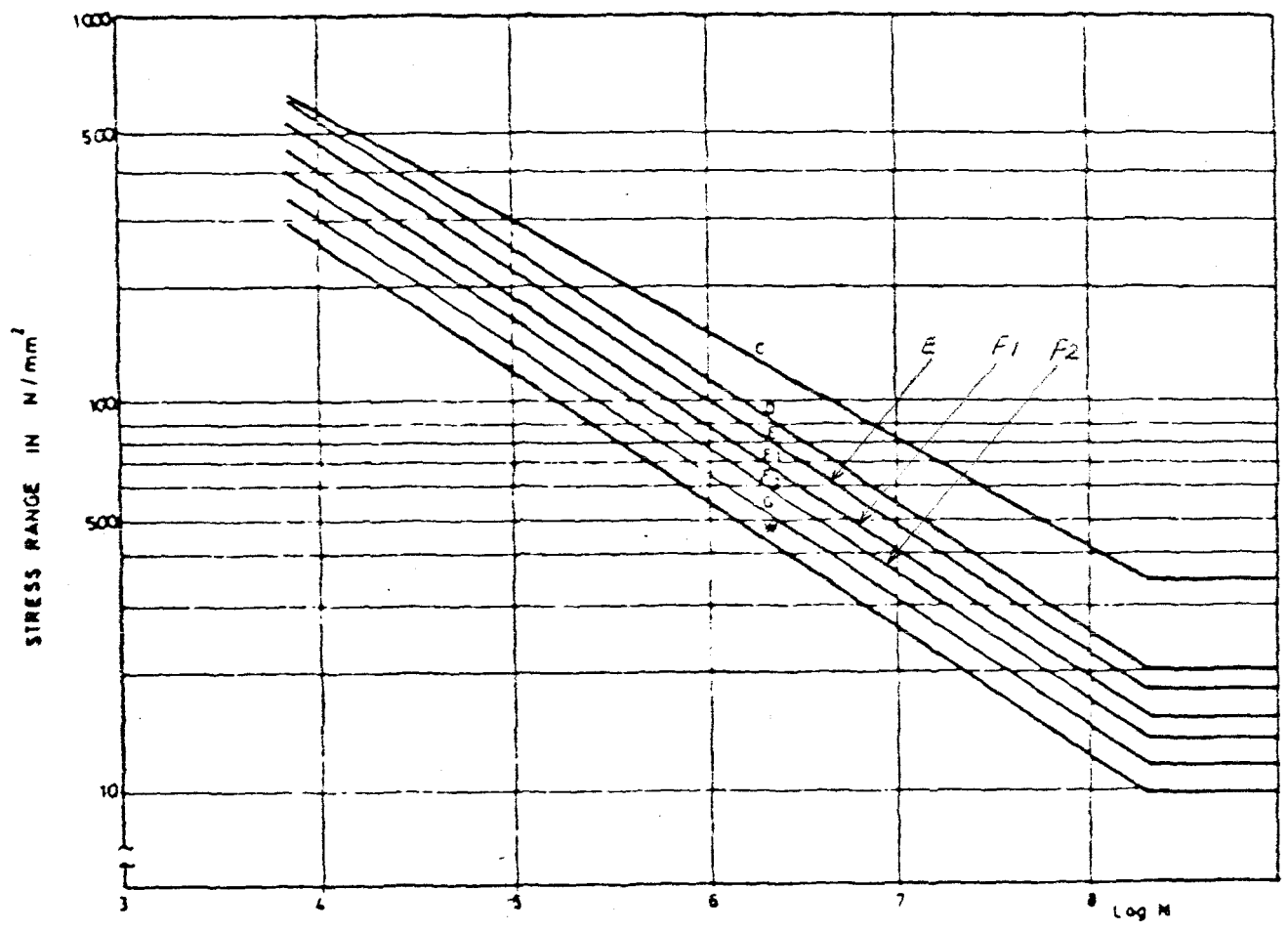


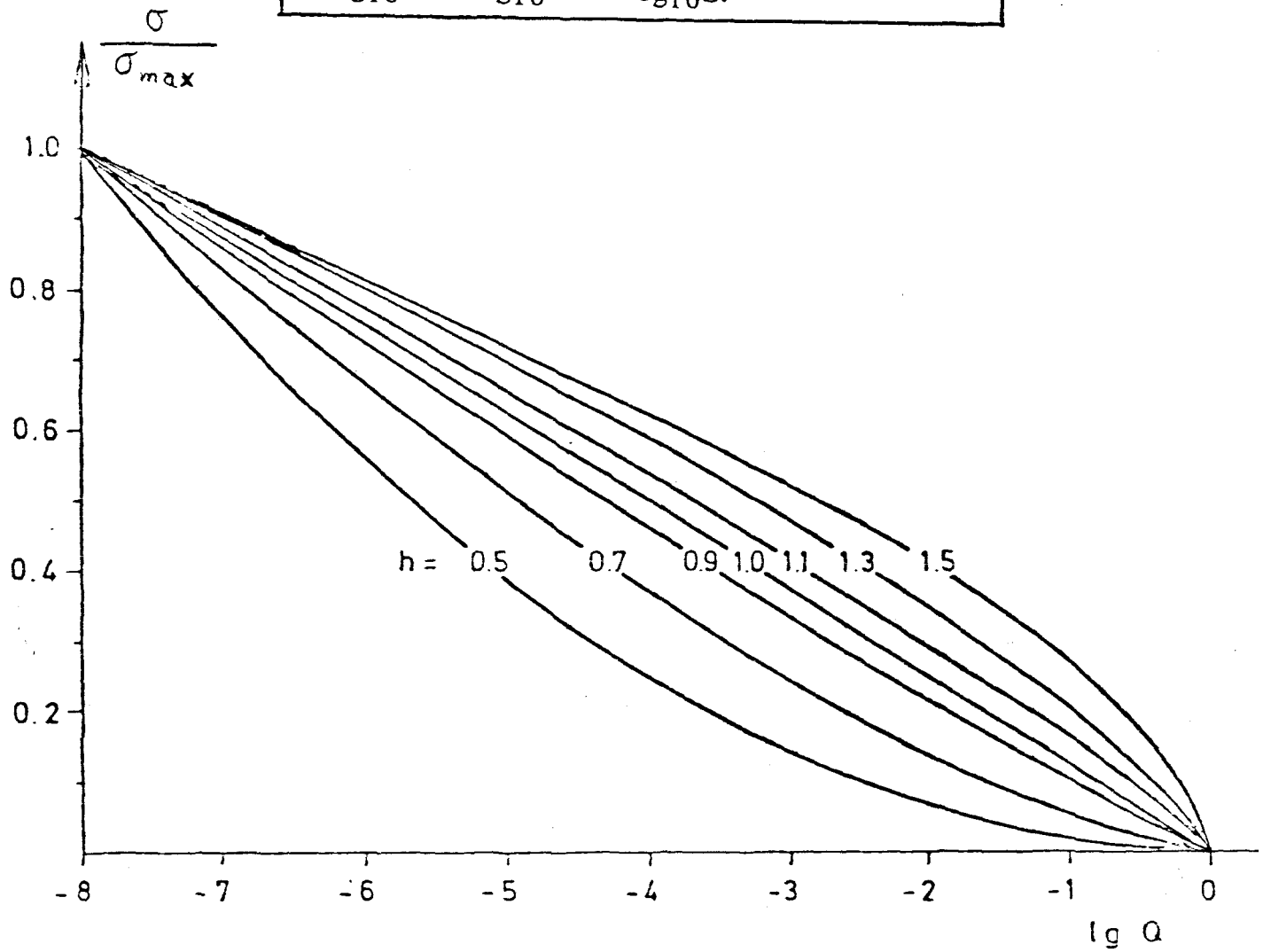
Fig. F3 S-N curves. Plate-, boxgirder details. ☒ 1.12

表 1.2

Fig. F1 Coefficients of S-N curves (units N/mm²).

Class	log ₁₀ a	K	S (N=2·10 ⁸)
B	15.01	4.0	48
C	13.63	3.5	33
D	12.18	3.0	20
E	12.02	3.0	18
F	11.80	3.0	15
F ₂	11.63	3.0	13
G	11.39	3.0	11
W	11.20	3.0	9,3
X	14.57	4.1	34

log₁₀·N = log₁₀ a - K log₁₀S.



PROBABILITY OF EXCEEDANCE

Fig. F1

☒ 1.13 Fig. F1 Long term distribution of stress amplitudes

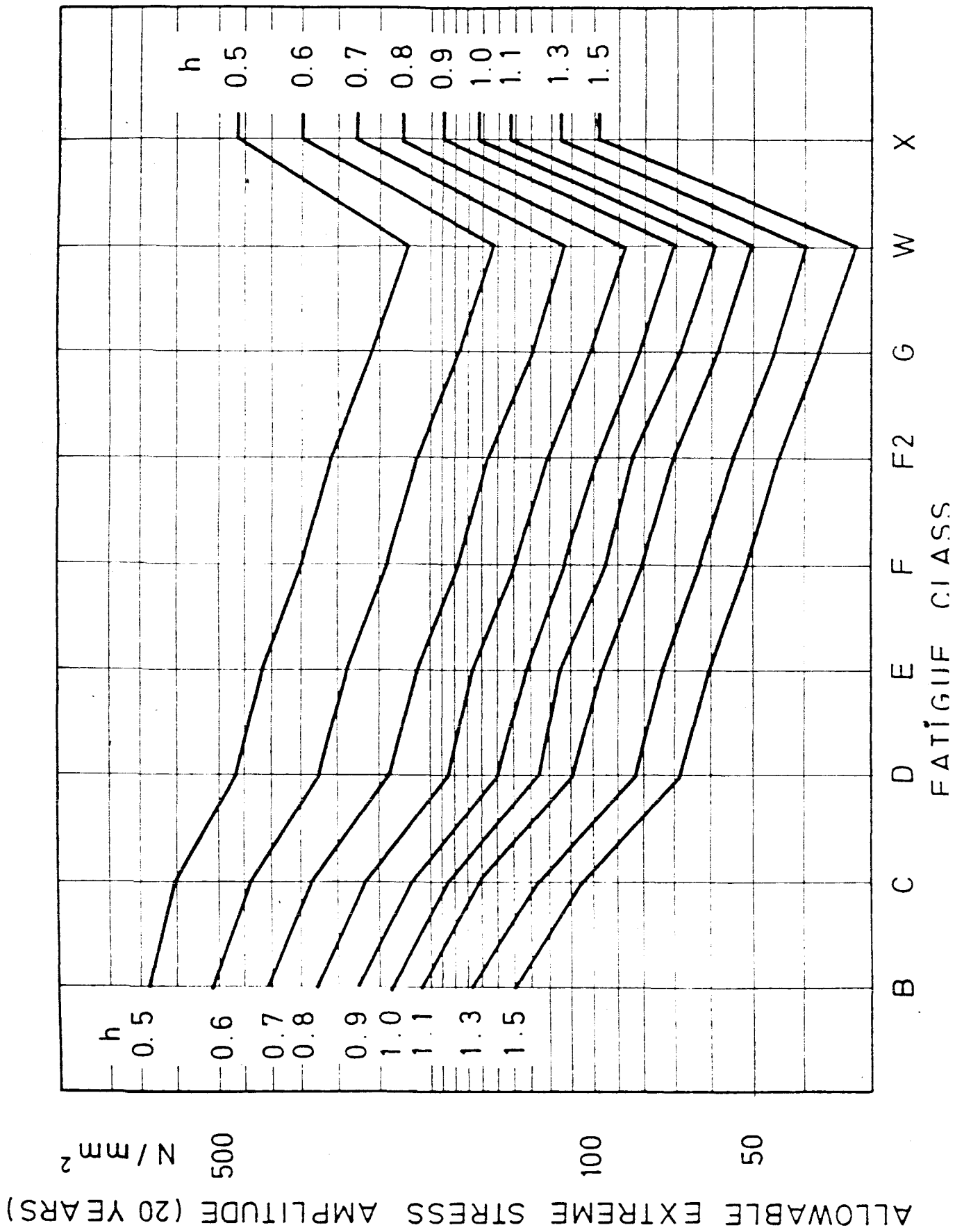


Fig. F4

☒ 1. 1 4

表 1.3

Table of the Complete gamma function.

Table F2

x	$\Gamma(x+1)$	$\text{Log } \Gamma(x+1)$
0.10	0.951350	-0.021659
0.20	0.918168	-0.037077
0.30	0.897470	-0.046979
0.40	0.887263	-0.051947
0.50	0.885226	-0.052455
0.60	0.893515	-0.048897
0.70	0.908638	-0.041603
0.80	0.931383	-0.030871
0.90	0.961765	-0.016930
1.00	0.999999	0.000000
1.10	1.046485	0.019733
1.20	1.101802	0.042103
1.30	1.165711	0.066963
1.40	1.242169	0.094180
1.50	1.329340	0.123636
1.60	1.429624	0.155222
1.70	1.544685	0.188840
1.80	1.676490	0.224401
1.90	1.827355	0.261822
2.00	1.999999	0.301029
2.10	2.197520	0.341952
2.20	2.423965	0.384526
2.30	2.683437	0.428691
2.40	2.981206	0.474392
2.50	3.323350	0.521576
2.60	3.717023	0.570195
2.70	4.170651	0.620203
2.80	4.694174	0.671559
2.90	5.299329	0.724220
3.00	5.999999	0.778151
3.10	6.812622	0.833314
3.20	7.756689	0.889676
3.30	8.855343	0.947205
3.40	10.135101	1.005870
3.50	11.631728	1.065644
3.60	13.381285	1.126497
3.70	15.431411	1.188405
3.80	17.837361	1.251342
3.90	20.667385	1.315285
4.00	23.999999	1.380211
4.10	27.931753	1.446098
4.20	32.578096	1.512925
4.30	38.077976	1.580673
4.40	44.598848	1.649323
4.50	52.342777	1.718856
4.60	61.553915	1.789255
4.70	72.527634	1.860503
4.80	85.621737	1.932584
4.90	101.270191	2.005481
5.00	119.999999	2.079181

x	$\Gamma(x+1)$	$\text{Log } \Gamma(x+1)$
5.10	142.451	2.153668
5.20	169.406	2.228929
5.30	201.813	2.304949
5.40	240.833	2.381717
5.50	287.885	2.459219
5.60	344.701	2.537443
5.70	413.407	2.616378
5.80	496.606	2.696012
5.90	597.494	2.776333
6.00	719.999	2.857332
6.10	868.956	2.938993
6.20	1,050.317	3.021320
6.30	1,271.423	3.104290
6.40	1,541.336	3.187897
6.50	1,871.254	3.272132
6.60	2,275.032	3.356987
6.70	2,769.830	3.442453
6.80	3,376.921	3.528520
6.90	4,122.709	3.615182
7.00	5,039.999	3.702430
7.10	6,169.593	3.790256
7.20	7,562.288	3.878653
7.30	9,281.392	3.967613
7.40	11,405.88	4.057129
7.50	14,034.40	4.147194
7.60	17,290.24	4.237801
7.70	21,327.69	4.328943
7.80	26,339.98	4.420615
7.90	32,569.40	4.512809
8.00	40,319.99	4.605520
8.10	49,973.70	4.698741
8.20	62,010.76	4.792467
8.30	77,035.55	4.886691
8.40	95,809.45	4.981408
8.50	119,292.4	5.076613
8.60	148,696.1	5.172299
8.70	185,550.9	5.268463
8.80	231,791.8	5.365098
8.90	289,867.7	5.462199
9.00	362,879.9	5.559763
9.10	454,760.7	5.657782
9.20	570,499.0	5.756254
9.30	716,430.6	5.855174
9.40	900,608.9	5.954536
9.50	1,133,278.	6.054336
9.60	1,427,482.	6.154570
9.70	1,799,844.	6.255234
9.80	2,271,550.	6.356324
9.90	2,863,690.	6.457835
10.00	3,628,799.	6.559763

1.3 API RP 2A (JAN. 1982)

「PLANNING, DESIGNING, and CONSTRUCTING FIXED OFFSHORE PLATFORMS」

(2.5.3. Fatigue)

(1) 疲労設計概要 (2.5.3a)

本設計基準はTemplate型 プラットフォーム, Tower, Guyed Tower, caisson といった海洋構造物に適用される。

疲労設計に関しては, ①メキシコ湾に設置される固有周期が3秒以下のTemplate型のプラットフォーム, ②固有周期が3秒以上のTemplate型構造物や異なった構造タイプ, 高張力鋼を使ったものまたは周期的荷重の長期分布がメキシコ湾よりきびしい場所に設置されるものとの2種類に分類される。

前者については, 疲労解析をすることなく, 継手部でのピーク公称ブレース応力 ($f_a + f_b$) を20 ksi (14kg/mm²) にするとか, パンチングシアを継手の種類により規定することにより部材を決定している。

後者については, 疲労解析が義務づけられS-N線図は図 1.15 に与えられる。溶接プロファイルが図 1.16 で与えられる継手に対しては, X, D, K, 線図を適用する。

溶接部のプロファイルコントロールが行われていない溶接の継手に対しては, X', E', K', の破線図が適用される。

長期の波予測としては, 使用頻度の高いものを使用すること。

波の予測は, 長期にわたって予想される海象状態の集積であり疲労解析のために海象ブロックに分けてもよい。また, 適当なスペクトルを使用してよい。

各継手および設計疲労寿命は, プラットフォームの寿命の2倍とする。

(2) 応力分布 (2.5.3b)

与えられた波力に対して, 公称部材応力に関する構造応答を得るために3次元解析を行うこと。

個々の海象ブロックに対して, それに相応する応力応答として, 有義応力範囲とサイクル数との関係で表示してもよい。

有義応力範囲は, 有義波高に類似しているので $4\sqrt{M_0}$ と定義してもよい (注)。

ここに M_0 は, 応力スペクトル線下の面積である。または, 個々の海象ブロックに対して有義波を使用して決定論的解析から引き出しても良い。

固有周期が3秒以上の構造物について動的効果を考慮すること。

注) 先ず、スペクトルを全方向、全周期数について積分し波の総エネルギーの代表値

m_0 を下記のように求める。

$$m_0 = \int_0^\infty \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} S(f, \theta) df d\theta$$

この積分値は波のスペクトルの定義により波形の分散に等しい。

$$m_0 = \overline{\eta^2} = \lim_{t_0 \rightarrow \infty} \frac{1}{t_0} \int_0^{t_0} \eta^2 dt$$

これから波形の標準偏差値 η_{rms} が次の用に表される。

$$\eta_{rms} = \sqrt{\overline{\eta^2}} = \sqrt{m_0}$$

波形がレーリー分布に従う時は代表波高と η_{rms} の間に一定の統計的關係が成立する。

$$H \frac{1}{3} = 4.004 \eta_{rms} = 4.004 \sqrt{m_0} = 4\sqrt{m_0}$$

個々の海象ブロックに対する短期応力応答は、長期応力分布に組合わされ、累積疲労損傷度を計算するのに使用される。

(3) 波荷重をうけるパイプ継手に対する S-Nカーブ (2.5.3d)

海洋でランダム荷重にさらされる as weld のパイプ継手に対しては図 1.15 に示される線図を使用する。

Hot spot歪範囲を使用して X線図を使うことが望ましい。

Hot spot歪範囲は、安定した歪サイクルが出るようになってから溶接 toe に隣接し、かつ垂直にとりつけた歪ゲージにより測定されるものを定義する。

この定義に合致する FEM解析を使用してもよく、また、そのような解析に基づく経験式 (例えば Kwang 等の式) を使用してよい。

薄肉シェル解析の結果を使用する場合には、板の中心線と実際の Hot spot位置との差は、実際の溶接形状の補強効果と一諸に考慮すること。

代案として疲労曲線 D, E, K を以下のように適用してよい。

- 単純継手 (主管が重なっていないもの、ガゼット、ダイヤフラムステフナーのないもの) として設計される継手に対して、溶接は図 1.16 に従うが、D線図は支管に生ずる公称応力範囲に適用する。

主管は、別々に K線図を使用し、次のように計算されるサイクリックパンチングシア一範囲を使用してチェックする。

サイクリックパンチングシア一範囲計算式

$$V_{pr} = \tau \sin \theta (f_{akr} + 2 f_{atr} + \sqrt{(0.67f_{byr})^2 + (1.5 f_{bZR})^2})$$

ここで τ , θ は P. 7 参照

f_{akr} = 軸方向のうちK継手として同じ面にある近接したブレースにより、
支力がとられる部分に対する応力範囲である。(Ksi)

f_{atr} = 軸方向力うち、T.V.またはX継手として反力をとられる残りの部分
に対する応力範囲である。(ksi)

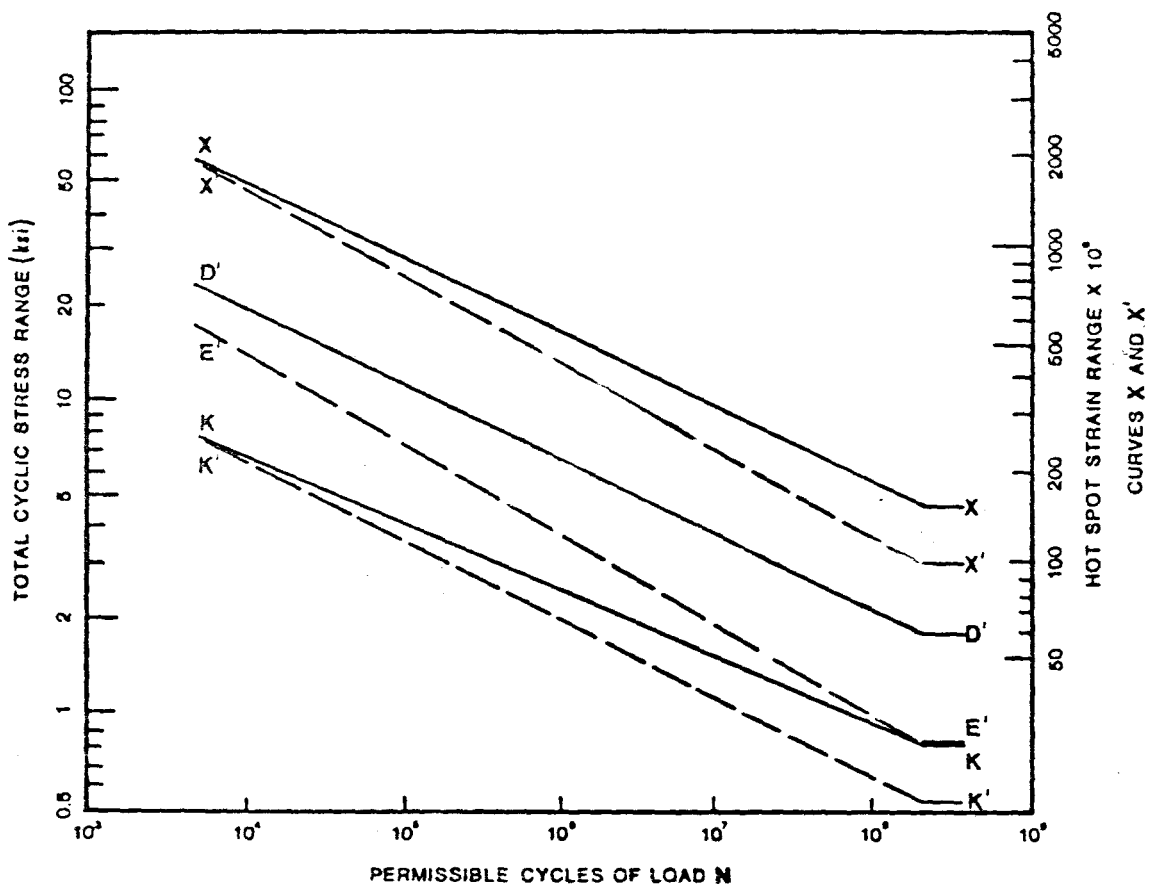
f_{byr} = 面内曲げ応力範囲 (ksi)

f_{bZR} = 面外曲げ応力範囲 (ksi)

- 図 1.16 に合致しない溶接の単純継手、即ち部分溶け込み溶接や隅肉溶接の継手や荷重伝達が重なり継手やガゼットプレートやリングステフナー等によりなされる継手に対しては、E'線図を支管の公称応力範囲に適用する。

これらの修正S-N線図は電防を想定している。

Splash zone における継手は避けることが望ましい。



NOTE--These curves may be represented mathematically as

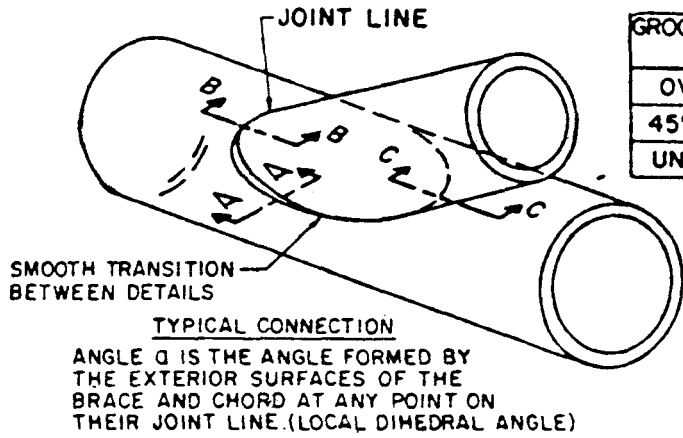
$$N = 2 \times 10^6 \left(\frac{\Delta\sigma}{\Delta\sigma_{ref}} \right)^{-m}$$

where N is the permissible number of cycles for applied cyclic stress range $\Delta\sigma$, with $\Delta\sigma_{ref}$ and m as listed below.

CURVE	$\Delta\sigma_{ref}$ STRESS RANGE AT 2 MILLION CYCLES	m INVERSE LOG-LOG SLOPE
X	14.5 ksi (100 MPa)	4.38
X'	11.4 ksi (79 MPa)	3.74
D'	5.8 ksi (40 MPa)	4.38
E'	3.0 ksi (21 MPa)	3.48
K	2.15 ksi (15 MPa)	4.66
K'	1.7 ksi (12 MPa)	4.19

FIG. 2.5.3-1
FATIGUE CURVES

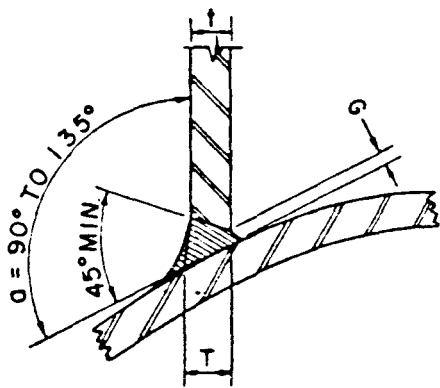
☒ 1.15



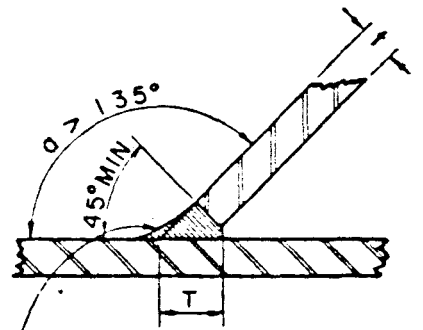
GROOVE ANGLE "b"	ROOT OPENING, G	
	IN	mm
OVER 90°	0 TO 3/16	0 TO 4.8
45° TO 90°	1/16 TO 3/16	1.6 TO 4.8
UNDER 45°	1/8 TO 1/4	3.2 TO 6.4

NOTE: INCLUDES TOLERANCE

α	MIN. "T"
50° TO 135°	1.25 t
35° TO 50°	1.50 t
UNDER 35°	1.75 t
OVER 135°	SEE SEC. B-B

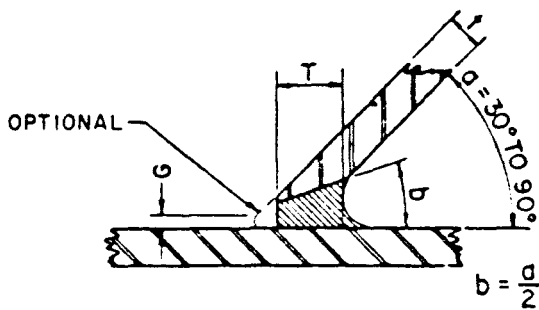


SECTION "A"- "A"



BUILD OUT TO FULL THICKNESS EXCEPT "T" NEED NOT EXCEED 1.75 t.

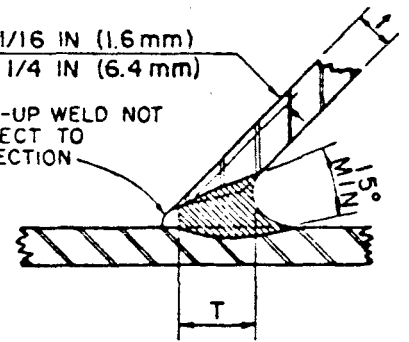
SECTION "B"- "B"



SECTION "C"- "C"

MIN. 1/16 IN (1.6 mm)
MAX. 1/4 IN (6.4 mm)

BACK-UP WELD NOT SUBJECT TO INSPECTION



SECTION "C"- "C" (ALTERNATE)

FIG. 4.13
WELDED TUBULAR CONNECTIONS
SHIELDED METAL ARC WELDING

☒ 1.16

1.4 BSI DD 55 (1978)

Fixed Offshore Structure (6.5 Fatigue life)

(1) 概要 { 6.5.1, 6.5.2, 6.5.3 { 6.5.3.1, 6.5.3.2 (6.5.3.2.1) } }

本基準による疲労解析は、下記のものについて規定されている。

- 構造の強度や安定にきわめて重要な継手や主要部材すべて。
- 据え付け後は検査や修理ができない継手や部材。
- Splash zone にあるすべての継手や材。
- パイルすべて。

疲労解析には、周期的な応力範囲のみを考慮し mean stress (平均応力) は無視する。

それぞれの設置場所に対しては、全応力範囲スペクトルを用いて累積疲労被害度を計算する。

図 1.18 をパイプ継手の疲労解析に使用するが、軸応力とせん断応力が存在するところでは、最大主応力範囲を計算に用いること。

累積疲労被害度は、腐食防止に対する信頼性、構造強度の余裕の度合、定期的検査に対する付着溶接の有効性等によりきまるものである。

通常、それは 1.0 で良いが、不確定要素がある場合は、適当に小さい値を使用すること。

疲労寿命は20年より短くないこと (波の繰り返し数約 10^8)。

(2) パイプ継手 (6.5.3.2.2)

パイプ継手の中では、主メンバーと2次メンバーがある。

ほとんどの場合、主メンバー (コード) と2次メンバー (ブレース) 間の溶接および主メンバー内のステフナーの隅肉溶接が低い疲労寿命である。

2次メンバー (ブレース) の重なり溶接があるところも疲労解析を検討する必要がある。

累積損傷度は、最も低い疲労寿命に相当する位置を見つけるべくコードに溶接してあるブレースの周辺形状をよく検討すること。

(3) パンチングシアア法 (6.5.3.2.2.1)

T.K 継手でコード材の疲労寿命は、パンチングシアア法で計算が可能である。

図 1.18 の T.K. S-N線図を使用すること。

パンチングシアア法は、コード半径とコードの板厚比 r が18と24の間にある継手に適

用されてきたが、非常に板厚の厚いコードに対しては (r が18より小さい) 線図は疲労寿命を過小評価するようになり、 r が24より大きいコードには疲労寿命を過大評価するかもしれない。

後者に対しては、許容パンチングシアは $(24/r)^{0.7}$ に比例して減少させること。

応力範囲を検討する場合、応力集中はT.K カープの中に許容されているので考慮する必要はない。

コード材の疲労寿命がパンチングシア法により定められる場合は、継手部のブレース側の疲労寿命は 2.5より小さくない応力集中係数を使ってきめてもよい、そして図1.17のF線図を使ってブレース内の軸応力と曲げ応力の合成公称応力範囲で計算してもよい。

重なりブレースに対しては、コード材に直角なブレースに対しては3より小さくないもの、斜め部材には 2.5より小さくない応力集中係数をブレースの周期的応力範囲に使用すること (F線図使用)。

溶接部が注意深く仕上げられているブレースに対しては、Q線図 (図 1.18) をF線図の代りに使用して良い。ただし、応力集中係数は変わらずとする。

(4) コードおよびブレースに対してより精度を上げた解析 (6.5.3.2.2.2)

より精度を上げた解析が要求される場合、局部的応力集中に十分考慮を払うこと。

局部ピーク応力またはピーク歪は“Hot spot strain”を参考とする。

応力集中が生ずる形状に対して、その大きさはモデルとか実物を正確に測定することや光弾性の調査により定めること。

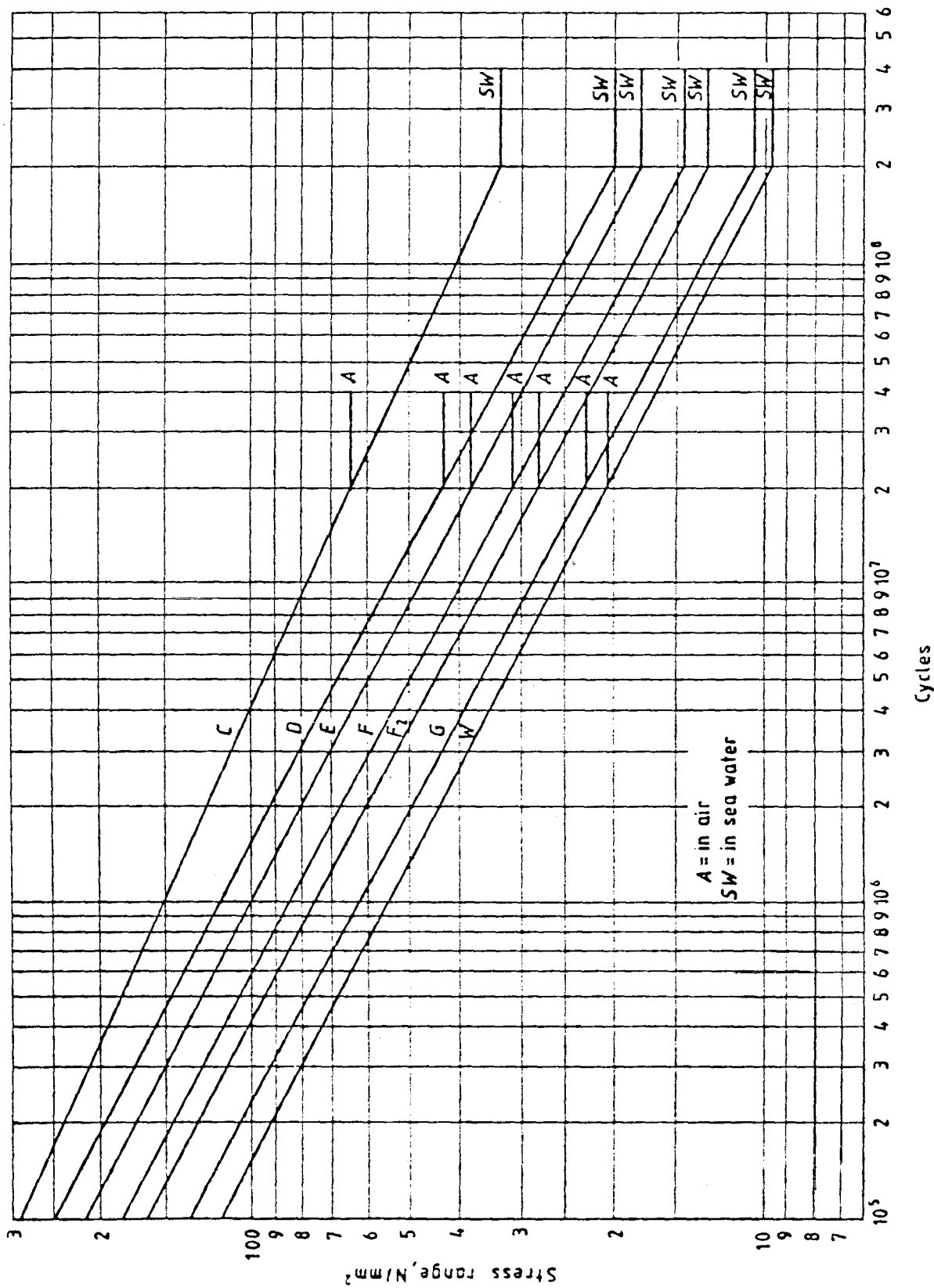
F.E.M 解析の結果は、その正確さが確認される場合のみ受け入れられる。

疲労寿命は図 1.18 のQ線図を使用し応力集中部の応力範囲から計算する。

この線図を使用する場合は、使用される応力範囲は、溶接形状に影響されないところで継手にできるだけ近いものであること。

この解析方法は T.K.Y 継手の主要部材に適用してもよい。

(5) T.Y.K 継手以外の溶接継手 (in-line butt joint) に対しては疲労寿命は、図 1.18 のQ線図を使用して計算すること (6.5.3.2.2.3)。



1. 17

Figure 6.6 S-N lines for non-tubular welded joints

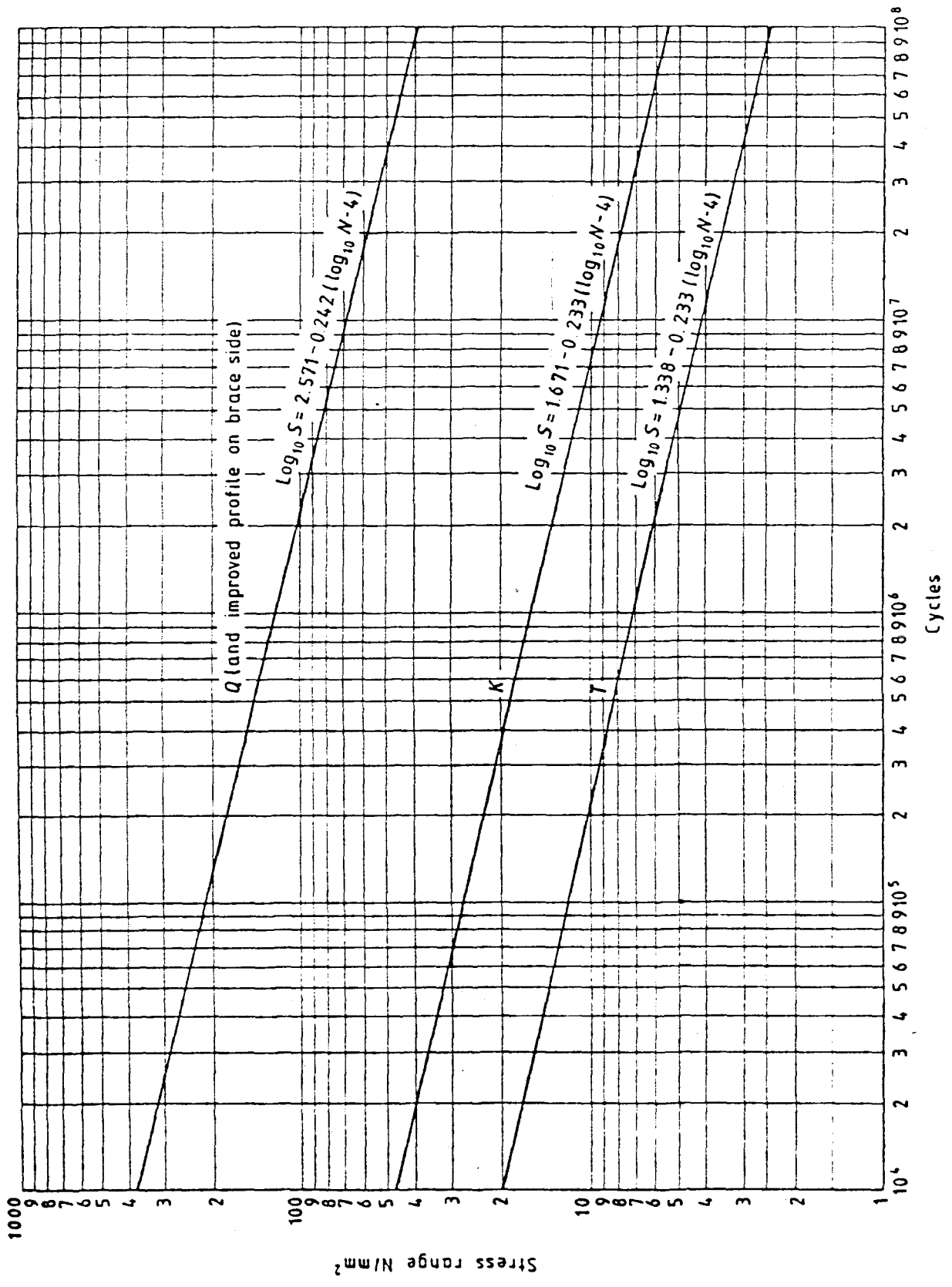


Figure 6.7 S-N lines for welded tubular joints

Figure 6.7 S-N lines for welded tubular joints

1.5 鋼管構造設計施工指針 同解説

日本建築学会 昭和55年

4-6 繰り返し応力をうける部材

および接合部

条 文

「鋼管の溶接接合部は、応力集中が著しいので、繰り返し応力をうける部材および接合部の形状寸法は、繰り返される応力の大きさ、ならびに荷重の繰り返し数に応じて、疲労破壊しないように注意して設計する。」

本節では、繰り返し応力をうける鋼管部材と鋼管構造接合部のうち主として、円形鋼管溶接接合部の疲労について解説がある。

わが国には、鋼管継手に適用できる権威づけられた疲労許容応力線図はないので、本指針ではこれに関する国内外の既往の疲労研究に基づいて各種鋼管継手のS-N線図をまとめている。

そしてある程度、実験データがまとまっている接合部に関しては、これらのデータを統計的に処理し、破壊寿命 N_f に対する応力全振巾 $2\sigma_a$ 、または荷重全振巾の回帰線を与えている。

ここでは、平均応力、平均歪、または平均荷重の影響は無視している。

鋼種は50キロ鋼クラスまでとし、高張力鋼については実験データが少ないため除外している。

疲労寿命のバラツキに関しては、疲労寿命の分布形を対数正規分布と仮定し、バラツキを表す尺度としてその標準偏差 S を用いる回帰線を $2S$ だけ下げた線（約95%下限信頼限界）の寿命値 $N=10^5$ 回および 2×10^6 回時の応力全振巾を示す。

これらを実施設計にどの様に利用するかについては、疲労設計の方針として構造物の使用期間中疲労破壊をおこさないように十分に安全をとって設計するいわゆる安全寿命にするか、場合によっては局部的な疲労破壊は止むをえないとし、その場合、補修などを建前とする安全破壊にするかは設計者の判断にまかされている。

ここでは、破壊寿命 N_f を寿命値 N としている。

S-N線図は下記のモデルについて規定されている。

(1) 部材および管端どうしを突合せ溶接した継手の疲労強度

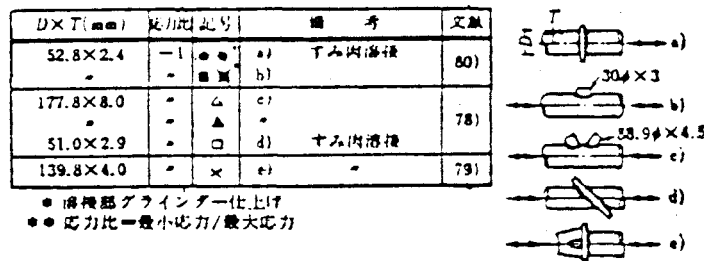


図 1.19 アタッチメントが溶接された部材および突合せ継手

(2) 管通しガセットプレート継手の疲労強度

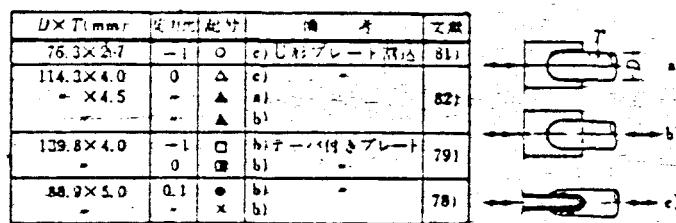


図 1.20 管通しガセットプレート継手

図 1.20 の試験体の場合、疲労きれつはプレート端の溶接ビードまたは管の溶接止端部に生ずる。管割り込み、プレート割り込みの違い等は疲労強度にほとんど影響しない。

(3) T形, X形支管どうしが相貫しないX形分岐継手の疲労強度

(a) 特殊な縦軸目盛として支管に加わる最大荷重と最小荷重の差 P_r に対する継手の静的耐力 P_u の比が使用されているもの

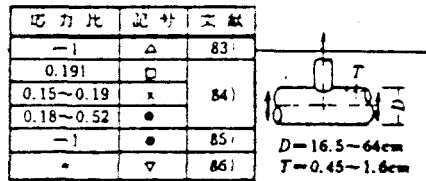


図 1.21 T形分岐継手

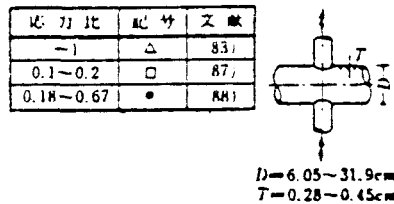


図 1.22 K形分岐継手

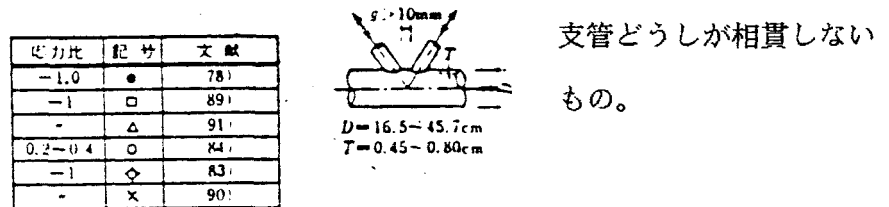


図 1.23 K形分岐継手 ($t/T > 0.5$)

図 1.21 ~ 1.23 の試験体については、主管に疲労きれつを生じ破壊した場合の実験結果が P_r / P_u について整理されている。 P_u は本指針 4.4.3 ,表3の設計式より、支管に圧縮力がかかるときの許容力を 1.7倍したもの。

(b) きれつ発生点における歪振巾または応力振巾（縦軸）

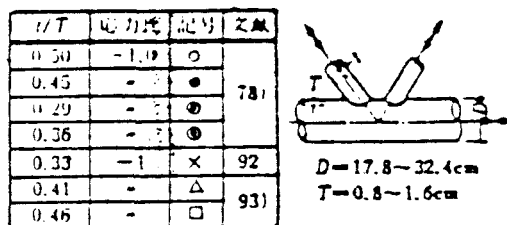


図 1.24 支管どうしが相貫しないK形分岐継手 ($t/T \leq 0.5$)

継手の種類	応力比	記号	文献
K-継手	-1.0	●	78)
"	-1	□	89)
"	-	△	91)
"	-	×	90)
T-継手	0.15~0.52	○	84)
"	-1	◇	83)
"	-	●	85)
"	-	▽	86)

図 1.25 T形および支管どうしが相貫しないK形分岐継手
試験体については図1.21, 図1.23を参照

図 1.24 は支管にきれつを生じ破壊する場合でデータは少ない。

疲労強度は支管軸方向応力全振巾について整理すると支管どうしが、相貫するK継手と ($D/T < 40$) と同程度になる。

図 1.25 については、T継手および支管どうしが相貫しないK継手について EXXON社の式より主管の応力集中点における応力全振巾 $2\sigma_a$ を求め実験結果を (N_f) 示したものと $2\sigma_a$ と疲労きれつ発生寿命 N_c の関係を示したものと2種類のS-N線図がある。

(4) 支管どうしが相貫するK形分岐継手疲労強度

D, T	g, D/B	●●	△▽	2σa
74	-1	C	■	100
32-39	-	B	□	89
●	-	B	□	102
67	-	C	■	101
35	-	B	△	83
71	-	C	▲	
24-39	-	B	△	92
46	0.16-0.42	C	●	84
18-36	-1	B	○	
26	-	B, C	●	78

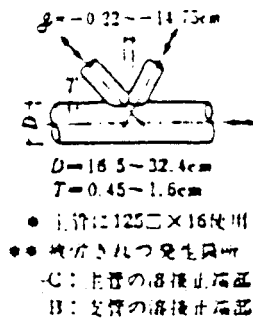


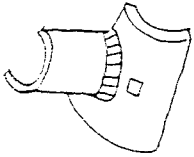
図 1.26 支管どうしが相貫するK形分岐継手

図 1.26 はK継手において支管どうしを相貫させるもので、一方の支管に加わる力の多くが主管を介さずにもう一方の支管に伝達されるので主管の応力集中が軽減される。

したがって、支管どうしが相貫しない場合にくらべて一般に疲労強度は高くなる。

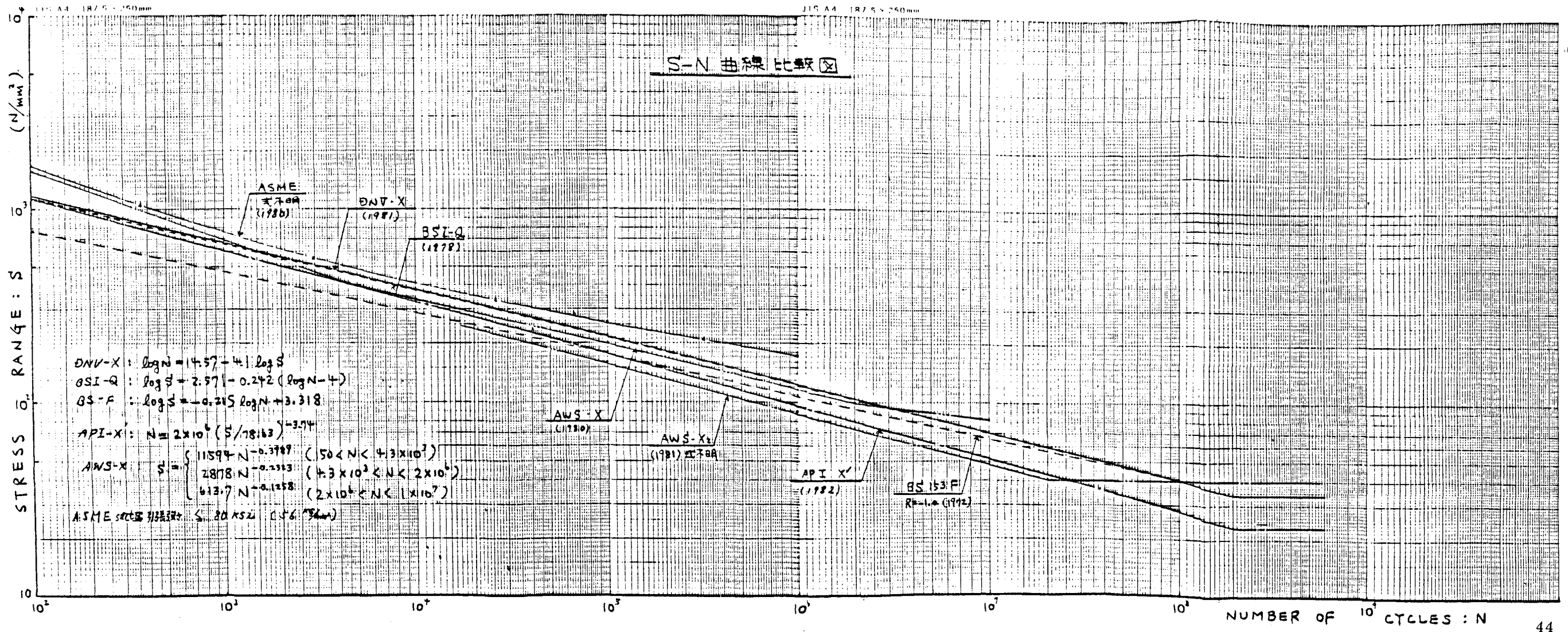
支管に疲労きれつが生じ破壊した場合の実験データを支管の応力範囲 $2\sigma_a$ について整理すると、支管どうしの相貫距離 g に関係なく同一のS-N線図が使用できる。

1 6 各設計規準の比較表

	AWS D 1.1 1981	D.N.V. 1981	API RP 2A JAN. 1982	BSI DD 55 1978
Fatigue life	-	Normally not to be taken less than 20 years.	Twice the intended service life.	Not less than 20 years on the required service life.
Cumulative fatigue damage (D)	D < 1.0 For critical members whose sole failure mode would be catastrophic, D shall be limited to a fractional value of 1/3.	D < 1.0 The cumulative usage factor D is not to exceed the value 1.0.	D < 1.0 For critical members whose sole failure could be catastrophic, use of an additional margine of safety should be considered.	D < 1.0 Should uncertainty exists with respect to those or other important matters, an appropriate lower value should be used.
Mean stress	Mean stress is ignored.	Mean value unspecified.	AWS	Mean stress are neglected.
Hot spot definition	The relevant stress for fatigue failure of tubular connection is the hot spot stress measured adjacent to the weld. 	The hot spot is the brace stress normal to the weld at the location of the weld toe, local notch effects from the weld excluded.	Hot spot strain range may be defined as that which would be measured by a strain gage element adjacent to and perpendicular to the toe of the weld after stable strain cycles have been achieved.	The stress range should be those which are as near as possible to the connection without being influenced by the weld profile (hot spot strain).

	AWS D 1.1 1981	D.N.V. 1981	API RP 2A JAN. 1982	BSI DD 55 1978
Material (Yield point)	36 — 100 KSi	—————	30 ~ 52 KSi (Structural steel tube)	(BS 4360)
Load to fatigue	Fatigue is defined as the damage that may result in fracture after sufficient number of stress fluctuation.	Main source to fatigue is stress induced by wave.	Tubular connection subject to wave loading.	Wave action is the predominant cause of fatigue but other cyclic phenomena also contribute to fatigue damage.
Fatigue life improvement technique (Weld profile improvement)	Fig. 10.13.1A Notches in the profile shall be no deeper than 1/16 in (1.6 m/m) relative to a disc of 5/8 in (15.9 m/m) diameter. Peened with blunt instrument. Final grinding marks shall be transverse to the weld toe.	—————	Fig. 4.1.3 A special effort should be made to achieve as welded surface which merges smoothly with the adjoining base metal and approximates the concave profiles shown in Fig. 4.1.3	Profile grinding and hammer peening can increase fatigue strength by up to 50% and 100% respectively.

	AWS D 1.1 1981	D.N.V. 1981	API RP 2A JAN. 1982	BSI DD 55 1978
S.C.F.	Greatest total range of hot spot stress or strain on the outside surface of intersecting members at the toe of the weld joining them—measured after shake-down in model or prototype connection or calculated with best available theory.	The S.C.F. is normally not to be taken less than : 2.5 for simple joint, 5.0 for overlapping joint. S.C.F. may be obtained from relevant test or analysis.	Finite element analysis compatible with the definition may be used as well as empirical equation, for example, Knang et al.	For overlapping braces a stress concentration factor of not less than 3 for a brace normal to the chord member and 2.5 for a diagonal brace. (F LINE)
Corrosion	-	The S-N curve in X presume that an efficient corrosion protection system is installed.	These modified S-N curves presume effective cathodic protection.	D is a factor which depend on the degree of conservatism in the calculation, the reliability of protection against corrosion, -----.



1.7 あとがき

パイプ継手を使った海洋構造物は、益々深い海域、海象条件のきびしい海域に指向しつつあるが、そこでは構造物の疲労強度が重要な設計要素となる。

1.6 にて各基準における疲労設計線図の比較を行ったが、各規準ごとに線図は異なっている。ということは適用ルールごとに設計疲労寿命が異なるということである。

これは各線図の基本になっている試験体、ホットスポットの定義、応力範囲の求め方等に差があるためと思われる。

最近、パイプ溶接継手部の疲労強度を改善するために溶接部をグラインダー仕上げしたり、ハンマーピーニングすることにより、疲労寿命が大巾に改善されることが報告されているが、AWS、BSI、API 規準には具体的に as weld と profile improve のものと疲労曲線を別々に設け、継手の形式だけでなく施工条件も考慮した上で疲労寿命を評価しているのが注目される。

今後の問題として海洋構造物の使用条件を考えると、低応力、長寿命域での疲労が問題となるが、適用する線図により疲労寿命に大きな差を生ずる。そしてこの長寿命域での曲線は現規準では、非常に少ないデータに基づいているので信頼性も低いと思われる。

さらに長寿命域での疲労寿命は海水による腐食作用が影響するので、腐食疲労のデータの集積も必要であり、時間をかけて信頼性の高い腐食疲労曲線を整備する必要がある。

そして施工も含めたより精度の高い疲労寿命の予測が確立されることが必要であろう。

参 考 文 献

- 1) American Bureau of Shipping : Rules for Building and Classing Mobile Offshore Drilling Unit, 1980.
- 2) Lloyd's Register of Shipping: Rules for the Construction and Classification of Mobile Offshore Units, 1972.
- 3) Det Norske Veritas: Rules for the Construction and Classification of Mobile Offshore Units, 1981.
- 4) American Welding Society: AWS D1.1-81 Sec. 10 Tubular Structure, 1981.
- 5) API RP 2A, JAN., 1982 : Recommended Practice for Planning, Designing, and Constructing Fixed Offshore Platform.
- 6) BSI, DD55 : 1978 Fixed Offshore Structure.
- 7) P. W. Marshall, A. A. Toprac: Basis for Tubular Joint Design Code ASCE, 1973.
- 8) Nippon Kaiji Kyokai : Mobile Offshore Units, 1978.
- 9) BS 153: Part 3B & 4, 1972.
- 10) 日本造船学会誌, No. 609 MARCH, 1980.
- 11) 岩崎外: 海洋構造物パイプ継手部の疲労データの再解析と設計応用に関する一検討, 日本造船学会誌 第 147号, 昭和55年 5月
- 12) 飯田: 海洋構造物の疲労設計規格とその背景, 日本造船学会誌第 569号, 昭和51年11月
- 13) 鋼管構造設計施工指針・同解説, 日本建築学会, 昭和55年
- 14) 合田良実: 港湾構造物の耐波設計, 鹿島出版会, 1980
- 15) 安藤他: 原子カプラーの構造設計, 東京大学出版会, 1977