

# 1. 鋼管構造格点部の耐力と疲れ強さ

鋼構造委員会・鋼構造進歩調査小委員会・鋼管構造進歩調査分科会

昭和55~57年度委員会報告概要 主査 田島二郎

はじめに

本分科会は昭和55年12月より、鋼管構造の近年における設計上の進歩のあとをたどって調査研究を始めた。昭和55年度は鋼管杭協会より、56、57年度は鋼材倶楽部よりの委託に基づくものである。

鋼管は合理的な断面形状を有するにため、それを部材として構造物を構成することは有利な方法のひとつである。鋼管構造は、陸上構造物として橋、鉄塔、煙突、高架水槽、球形タンクの支持構造、走行クレーン等、河海構造物としては石油掘削設備、海上作業台、さん橋、ダム取水塔など多くの構造物に採用されている。これら鋼管構造物を構成する場合、代表的な格点構造には鋼管同士を直接溶接する Simple Joint(無補剛の継手と云う)と称する継手が一般に用いられている。当分科会は調査研究にあたって、そのような鋼管構造の格点に注目して、その耐力および疲れ強さについて、内外の研究および規準類を収集して検討を行った。その成果は次の2つの報告書にとりまとめている。

## 56年度報告書 鋼管構造格点部の耐力

- 1 はじめに
- 2 研究の状況
- 3 各種基準に示されている静的耐力式
- 4 鋼管T,K継手の静的耐力の比較 (APIとJIS)
- 5 シンプルジョイント以外の継手

## 57年度報告書 鋼管構造の疲れ強さ

- 1 各規準での疲労設計の取扱ひ方
- 2 鋼管継手の疲労試験
- 3 鋼管継手部の疲労寿命推定
- 4 腐食の影響
- 5 疲労強度の改善方法

以下はこれらの報告書の概要を示すものである。

### 1. 各種の規準類

表-1に鋼管構造物を設計する場合の各種規準類を示す。

表-1

格点部の耐力については、日本では建築学会(4)が各種継手形式別の耐力式を示すのみで、他は主管の径と板厚の比に対する規定がある程度で、耐力に対する特別の記述はない。外国の規準とは、API RP-2A(11)にかなり詳細な規定があり、現在世界で広く利用されている。他の海洋構造物に対する規準にも鋼管継手に対する規定はあるが、内容的にはAPI規準と大同小異である。

疲労設計の取扱ひ方については、API(11)、BSI(12)、DNV(15)、AWS(24)などでは、設計に用いるS-N線図を与えている。日本の規準で

対象構造物	適用規準類	発行所	発行年	
陸上構造物	1 橋梁 (含高架橋)	1 道路橋示方書・同解説	日本道路協会	1980
	2	2 水質橋設計基準(WSP)	日本水道協会	1979
	3	3 塔状鋼構造設計指針・同解説	日本建築学会	1980
	4	4 鋼管構造設計施工指針・同解説	日本建築学会	1980
	5	5 送電支持物設計標準(JEC-727)	電気学会	
	6	6 高圧ガスの球形貯槽に因る規準	高圧ガス保安協会	1980
	7	7 球形クヌホルダー指針	日本瓦斯協会	1978
	8	8 JILTA 201 球形貯槽基準	日本ILP-ガスファン協会	1981
	9	9 クレーン鋼構造部分の計算規準	JIS B 8821	
	10	10 鋼管構造設計施工指針・同解説	日本建築学会	1980
河海構造物	11	11 API RP 2A: Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms	American Petroleum Institute	1982
	12	12 BSI DD 55: Fixed Offshore Structures	British Standard	1978
	13	13 BV: Rules and Regulations for the Construction and Classification of Offshore Platforms	Bureau Veritas(73-2)	1975
	14	14 Rules for the Construction and Inspection of Offshore Installations Volume I Offshore Units	Germanischer Lloyd	1976
	15	15 DNV: Rules for the Design, Construction and Inspection of Offshore Structures	Det Norske Veritas (11.72-)	1977
	16	16 港湾の施設の技術上の基準・同解説	日本港湾協会	1979
	17	17 海洋鋼構造物設計指針(案)解説	土木学会	1973
	18	18 ABS: Rules for the Construction and Classification of Mobil Offshore Drilling Units	American Bureau of Shipping	1980
	19	19 DNV: Rules for Classification of Mobil Offshore Units	Det Norske Veritas (11.72-)	1981
	20	20 Rules for the Construction and Classification of Mobil Offshore Units	Lloyd's Register of Shippings (4472)	1977
	21	21 Mobil Offshore Units	日本海洋協会	1978
	22	22 水門鉄骨技術基準	水門鉄骨協会	1978
	23	23 鋼構造設計基準	日本建築学会	1970
河海構造物	24	24 AWS D1.1-B1: Structural Welding Code - Steel	American Welding Society	1981

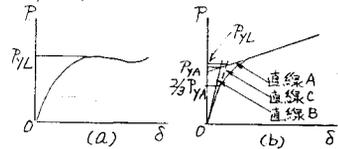
は疲労を考慮すべきことが条文としては抽象的に記述されているのみである。Lloyd (20), ABS (18) などと同様である。なお、建築学会 (4) ではその解説の中で各種継手に対する S-N 線図を示している。

## 2. 静的耐力についての研究の状況

鋼管構造継手部の耐力についての研究は、日本とアメリカで特に盛んに行われてきている。わが国ではまず金谷ら<sup>(2-1)</sup>が T 形継手について数多くの実験を行い、その結果をもとに耐力推定の実験式を導いた。その後鷲尾ら<sup>(2-2,3)</sup>が X 形、K 形継手について耐力推定式を提案している。

これらの研究はいずれも鋼管径が小さく (139.8 中以下)、従って  $D/T$  も小さい (15~30) 建築鉄骨を対象にしたものである。一方日本鋼構造協会では、海洋構造物を対象に  $D/T$  の大きい (40~100) T, X, Y, K 継手について大規模な実験を行い、その結果をまとめて設計指針として発表した。なおこの設計指針に示されている降伏耐力は次のように定義されている。

(1) 図 2-1 (a) のように  $P-\delta$  曲線上に降伏後間もなくピークが現われる場合はピークの荷重を  $P_{YL}$  とする。



(2) 図 2-1 (b) のように降伏した後も耐力が上昇する場合は降伏後の曲線の接線 A を引き、曲線の初期勾配を示す直線 B との交点の荷重  $P_{YA}$  を求める。曲線上の  $2P_{YA}/3$  に対応する点と原点を結ぶ直線 C と直線 A との交点の荷重を  $P_{YL}$  とする。

その後黒羽らは、各所で実施されてきた実験データを総合的に再整理して次に示すような耐力推定式を導いた。

$$P_u = \frac{6.57}{1 - 0.81 d/D} \sigma_y T^2 \quad (X \text{ 継手に対して})$$

$P_u$  は、圧縮支管の軸方向力を継手の荷重とし、圧縮支管の局部変形による変位を变形として継手の荷重-変形曲線と書き、図 2-2 の a の場合は圧縮支管の軸方向の最大値、b, c の場合は再負荷が起る前の圧縮支管の軸方向の最大値を耐力と定義している。T, Y, K 継手に対しても同様に耐力推定式を与えているが、これらは、建築学会 (4) にとりいれられている。

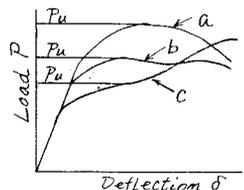


図 2-2 鋼管継手の荷重-変形曲線

アメリカでは、まず J. G. Boukamp (カリフォルニア大学)、A. A. Toprac (テキサス大学) の二人を中心に研究が始められた。A. A. Toprac<sup>(2-5)</sup> は静的耐力については、Shear area method による評価が比較的精度が高いとして、T 継手について次の式を提案している。

$$P_u = S_{sy} \cdot \pi \cdot d \cdot T$$

$P_u$ : 静的耐力,  
 $S_{sy}$ : せん断降伏強度  
 $d$ : 支管外径 + 2 × 溶接脚長  
 $T$ : 主管の板厚

その後、Robert B. Pan<sup>(2-6)</sup>、Joseph A. Yura<sup>(2-7)</sup> らは過去の実験結果を整理して、新しい耐力式を提案している。

上述のように、鋼管継手の耐力については、相当の研究がなされており、実用上は満足できるところまで進んでいるといえるが、今後さらに以下のような項目について研究を進める必要がある。

- (1) K 継手で支管がラップする場合 ( $g < 0$ )
- (2) 面外荷重が作用する場合
- (3) 大径鋼管による実験
- (4) 主管軸力が分岐継手の格点耐力におよぼす影響
- (5) 支管に引張力が作用した場合と圧縮力が作用した場合の耐力比の再評価

なお国際的な動きとして、現在 I. I. W. で鋼管分岐継手の設計についての国際規格がとりまとめられている段階である。

なお、図2-3と図2-4に建築学会(4)と、API(11)による許容耐力の比較結果を示す。主管軸力を考慮

しない場合には両者比較的良好一致している。しかし、主管軸力を考慮した場合は、圧縮軸力に対しては両者ほぼ一致しているが、引張力に対しては、大きな相違がある。

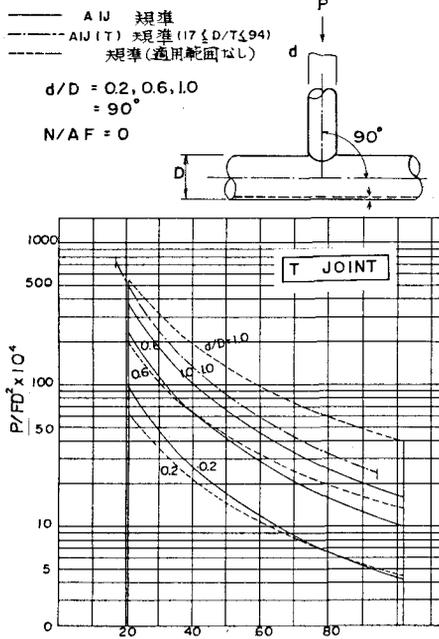


図2-3

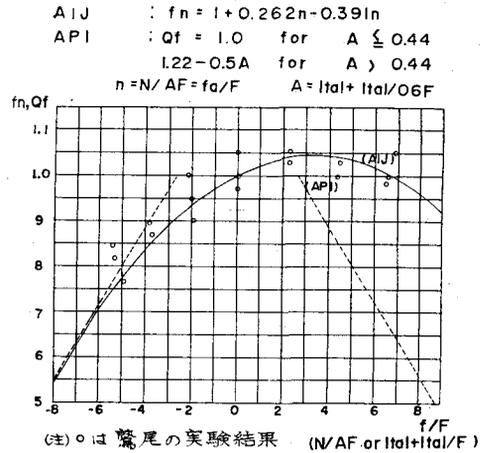


図2-4

### 3. 鋼管継手の疲労

#### (1) 疲労き裂の発生と進展性状

鋼管継手の疲労性状は、継手の形状、部材の交差角、補強形式、相貫比、荷重の種類、溶接方法およびその仕上げの程度など多くの因子の影響をうける。図3-1は川原らによる<sup>3-1)</sup>丁形鋼管継手に対する疲労試験の結果である。疲労き裂は主管と枝管の交差部の溶接余盛止端部から発生する(b図)。疲労き裂は溶接止端に沿って進展し(d図)、最終的にはそのき裂は主管方向に枝分かれする(c図)。このような疲労き裂進展は次に示す三段階に分けられている(e図)。

第一段階：高い応力が生じる位置に複数の疲労き裂が発生し、それが合体して長いき裂になる。

第二段階：表面き裂が深さ方向と長さ方向に進展する。

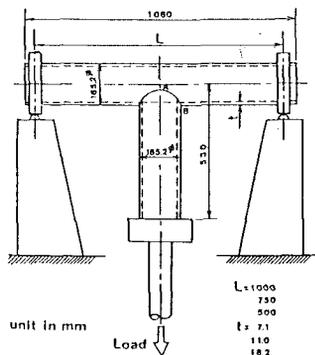
第三段階：き裂が主管を貫通あるいは枝分れした後に最終破断する。

疲労設計を行う場合、どのような状態のき裂を寿命の基準にするかが問題となる。すなわち、微小なき裂が発生した時点か、き裂が板厚を貫通した時点か、完全に部材が破断した時点かなどである。き裂がある程度大きくなると応力状態が変わってくることや、き裂の進展に対しては寸法の影響が大きく現われることから、多くの構造物において設計時には疲労き裂発生寿命( $N_c$ )で検討する方が一般的であると考えられている。

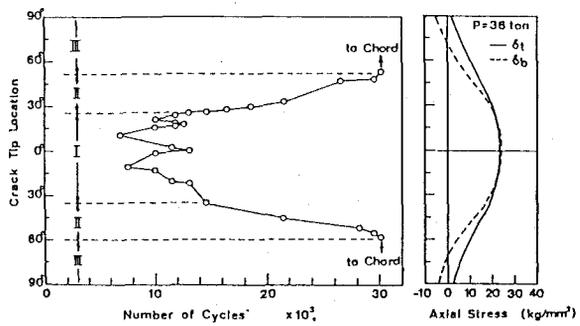
多くの鋼管継手に対する研究では前述の第一段階のき裂を発見した時点なき裂発生寿命 $N_c$ と定義しているが、基準とする表面き裂の長さは $5\text{mm} \sim 20\text{mm}$ の間どまちまちである。しかし第一段階でのき裂の進展が主としてき裂の合体により生じることから、 $N_c$ に対するこの程度の基準とするき裂の長さの差はたいした影響はないと考えられる。

岩崎らは現在までに公表されている試験データを集約し、<sup>3-2)</sup>き裂発生寿命( $N_c$ )と破断寿命( $N_f$ )について次の関係式を求めている。

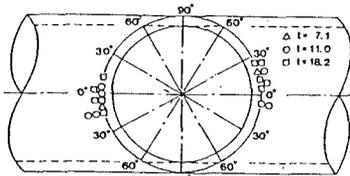
$$\text{溶接ビード、仕上げなし} : N_c / N_f = 0.67 (\Delta \sigma)^{-0.51}$$



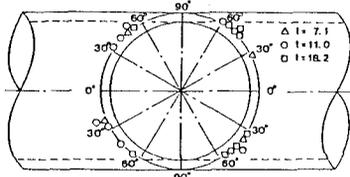
(a) 試験体の形状と載荷状況



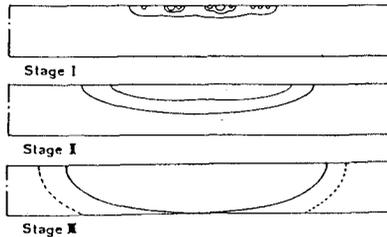
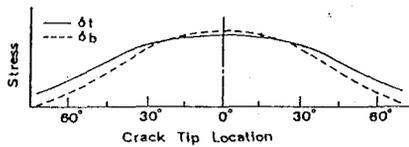
(d) 溶接止端に沿ったき裂の進展の一例



(b) き裂の発生位置



(c) き裂の分布概



(e) き裂形状の変化

図3-1 鋼管継手における疲労き裂の発生・進展

溶接ビード仕上げ :  $N_c/N_f = 7.1 (\Delta\sigma)^{-0.64}$

$\Delta\sigma$ はホットスポット応力範囲

溶接ビードを仕上げない場合  $N_c/N_f$ は低サイクル疲労域で0.1、高サイクル疲労域で0.2であるのに対し、溶接ビードを仕上げるにより  $N_c/N_f$ が大きくなり、伝播寿命の割合が低下することを示している。

その他の内外の実験結果においても、鋼管継手部の疲労寿命の大部分が疲労き裂の進展に費やされていることが報告されている。

(2) Hot spot stress / strain に基づく疲労寿命推定

鋼橋の疲労に対する安全性の照査は、各継手部毎に定められている許容応力と計算応力とを比較することにより行われている。その許容応力は橋梁中で疲労き裂の発生が予想される箇所を代表するような試験体の疲労試験結果に基づいて設定されたものであり、公称応力で整理されている。したがって多くの設計曲線を用意する必要があり、また同形式の継手部でも鋼材の板厚が大きくなったときや鋼壁の異なる場合あるいは構造ディテールが異なる場合などに問題を残すおそれがある。

構造において最大の応力が生じる位置(いわゆる Hot spot)その応力あるいはひずみを基準とすると、継手形式によらず1本の基準曲線を用いて疲労設計を行うことができ、最近の海洋構造物に対する設計基準に採用されている。この場合、どの位置を Hot spot とし、その応力あるいはひずみをどのように評価するか大きな問題となる。また、基準とする設計曲線についても種々の議論がある。

Marshall<sup>3,3)</sup>は米国で行われた種々の鋼管継手の疲労試験データを収集し、溶接止端近傍の実測ひずみ値に弾

性係数を乗じた値を Hot spot stress として、これを用いて実験値を整理し、その下限値を結ぶ曲線を設定している。これが現在海洋構造物の設計に一般的に用いられている AWS の X 曲線のベースとなっている(図3-2)。現在の AWS では、Hot spot stress はモデルを用いた実験でのシークダウン後の実測あるいは最も信頼のおける方法による解析により求めるとしている。

北海油田で AWS に基づいて設計、製作された多くの石油掘削リグに疲労損傷が発生したことがきっかけに、ヨーロッパ共同体を中心として Hot spot stress と設計曲線の精度向上を目的とした共同研究が行われている。この共同研究では余盛による局所的な応力のみだれを避けるために図3-3に示す A 点および B 点の位置のひずみ実測値から止端部のひずみを外挿して求めるようにしている。図3-4は共同研究のうちのオランダの成果であり、継手の疲労強度は、継手の寸法が大きくなるに従って低下し、特に長寿命域で X 曲線より低くなり、X-Modified 曲線をも下回ることもあることを示している。

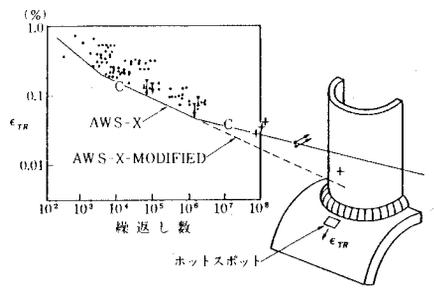


図3-2 Hot Spotの歪に対する疲労曲線

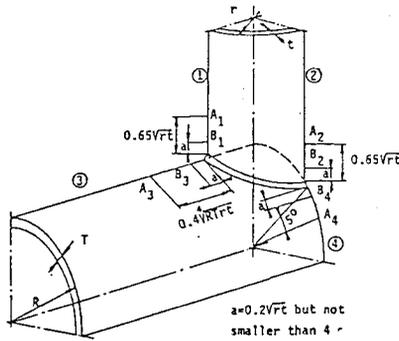


図3-3 ヨーロッパ共同研究における Hot Spot Stress/Strain

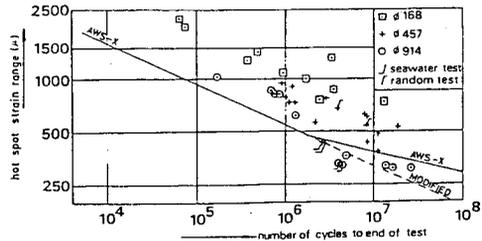


図3-4 オランダの疲労試験結果

### (3) 破壊力学の概念を用いた疲労きれつ進展寿命推定法

疲労きれつ寸法 (a) の荷重繰返し数 (N) に対する変化率 (これを疲労きれつ進展速度  $da/dN$  と呼ぶ) と、応力拡大係数の変動範囲 ( $\Delta k$ ) の関係を用いて疲労寿命を推定する方法である。Paris<sup>3-6)</sup> は  $da/dN$  と  $\Delta k$  の関係について次式を提案しており、寿命推定にしばしば用いられている。

$$da/dN = C (\Delta k)^m \quad \dots (1)$$

C, m は材料定数である。

応力拡大係数は線形破壊力学により求められるきれつ先端の応力場の強さを支配する係数であり、きれつ周辺の応力状態、きれつの形状、寸法、部材の形状、寸法などの情報を含んでいる。無限板中の長さ 2a の貫通きれつが、きれつから十分離れた位置で軸方向応力をうけるときの K は  $\sqrt{\pi a}$  であり、きれつや部材の形状、寸法などの影響を補正係数 Y で考慮するとすれば、応力範囲  $\Delta\sigma$  に対する応力係数範囲 ( $\Delta k$ ) は次式で表わされる。

$$\Delta k = \Delta\sigma \sqrt{\pi a} \cdot Y \quad \dots (2)$$

初期寸法  $a_i$  のきれつが最終きれつ  $a_f$  まで進展するのに要する荷重繰返し回数、すなわち疲労きれつ進展寿命 ( $N_p$ ) は、(2)式を(1)式に代入し、 $a_i$  から  $a_f$  まで積分することにより次のように求まる。

$$C(\Delta\sigma)^m \cdot N_p = \int_{a_i}^{a_f} \frac{1}{(\sqrt{\pi a} \cdot Y)^m} da \quad \dots (3)$$

したがって、鋼管継手部の疲労きれつ進展寿命を推定する場合、次の点が問題となる。

- (i) 鋼管継手部を構成する鋼材、溶接金属および熱影響部における  $da/dN \sim \Delta k$  の関係 (C, m の値)。

- (ii) 構造物中の疲労き裂に対する応力拡大係数。き裂の形状、応力状態などが重要な因子となる。
- (iii) 初期欠陥の形状および寸法 ( $a_i$ ) および最終欠陥の形状および寸法 ( $a_f$ ) の設定。

(1)で述べたごとく、鋼管継手の疲労寿命の大部分が疲労き裂の進展に費されることから、その疲労強度をき裂の進展を基準にして評価することは有効である。破壊力学の概念を用いて疲労き裂進展寿命を推定する場合、継手部のき裂を板厚方向に切出してモデル化したエッジき裂あるいは表面から進展する半楕円き裂と仮定することが多い(図3-5)。エッジき裂と仮定した場合の初期き裂の深さは $0.1^{\text{mm}} \sim 1.0^{\text{mm}}$ と各々の研究によりまちまちである。また最終き裂寸法は板厚の $1/2$ から板厚貫通までまちまちであるが、板厚貫通を最終状態とみなしている研究が多い。そのときの応力範囲はほとんどの研究で Hot spot stress を用いているが、(2)で述べたごとくその定義があいまいである。寿命推定の精度は複雑な形状をしている疲労き裂をどのようなき裂にモデル化し、 $a_i$ をどのように設定し、どの位置の応力を基準とし、どのような  $da/dN \sim \Delta K$  関係を用いるかといったことの組合せで決まる。

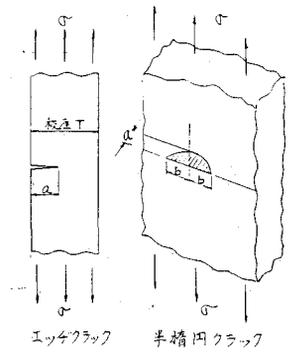


図3-5 き裂の単純化

精度の高い破壊力学の概念を用いた寿命推定が可能となれば、構造物の寸法が大きくなったときや溶接欠陥、工作誤差の程度、溶接残留応力の影響あるいは維持、管理の問題などに有用な情報を与えることになる。今後この方法を用いた鋼管継手の寿命予測やその設計製作、維持、管理への適用に関する研究がさらに進められるものと考えられる。

参考文献

2-1) 金谷他:「鋼管接合部の局部変形に関する実験的研究」(その1,その2,その3) 日本建築学会論文報告集 108~110号, 昭40.2~4

2-2) 鷺尾, 東郷, 三井:「鋼管と鋼管の十字形接合部の研究」(その1,その2) 日本建築学会大会学術講演梗概集, 昭42.10

2-3) 鷺尾, 東郷, 三井:「鋼管トラス接点弦材管の局部破壊に関する実験的研究」(その1,その2,その3) 日本建築学会論文報告集, 138~140号 昭42.8~10

2-4) 牧野, 黒羽, 三井:「鋼管継手の局部変形耐力の推定—支管が圧縮力を受ける場合—」 日本建築学会論文報告集 251号 昭52.1

2-5) L.A.Beale and A.A.Toprac: "Analysis of Inplane T,Y and K Welded Tubular Connections" Report No.S.F.R.L. Tech.Rpt pp550~559. Univ. of Texas, Austin. Texas, April 1967.

3-1) Kawahara M, T. Iwasaki: Analysis of Fatigue Crack Growth Behavior in welded Tubular T joints, OTC 3251, 1978.

3-2) 岩崎紀夫, 加藤昭彦, 浅野皓三, 川原正言: 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 日本造船学会論文集 No.147 pp184~193, 1980.

3-3) Marshall P.W.: Basic Considerations for Tubular Joint Design in Offshore Construction, WRC Bulletin 193, 1973.

3-4) International Conference "Steel in Marine Structures" Paris, Oct., 1981.

3-5) Dijkstra O.D., J.de Back: Fatigue Strength of Tubular T-and X Joints, OTC 3696, 1980.

3-6) Paris P.C., and F.Erdogan: A Critical Analysis of Crack Propagation Laws, Trans. of ASME, Series D, 85, No.3, 1963.