海洋構造物用鋼管継手の疲労実験データ分析

正員 吉田 宏一郎* 正員 福岡 哲二**
伊藤 壮一*** 正員 榎本 一夫*
正員 大勝 孝司****

Analyses of Fatigue Test Data of Offshore Tubular Joints

by Koichiro Yoshida, *Member* Tetsuji Fukuoka, *Member*
Soichi Ito Kazuo Enomoto, *Member*
Takashi Ohkatsu, *Member*

Summary

A paper-surveying on fatigue tests of tubular and fundamental joints for offshore structure design was carried out and tested data were collected. The collected data were arranged as two sets of data base: the data base on tubular joint tests and the data base on fundamental joint tests including cruciform joints, butt-welded plates and so on. Based on these data bases, the regression analyses were conducted in order to evaluate effects of factors on the fatigue strength of these joints. Plate thickness, material, load ratio, random loading, corrosive environments, grinding, TIG-dressing etc. are included in these factors.

Correlations between the effect of each of these factors on the fatigue strength of fundamental and tubular joints were discussed and it was, generally speaking, found that the correlations are good. Finally, the current fatigue design curves were compared with the collected data and the extent of safety of the curves were confirmed.

1 はじめに

鋼製海洋構造物の水線下構造には、その優れた流体力学および構造力学的特性から鋼管構造が使用される。鋼管部材の継手は、海洋波に基づく不規則な繰り返し荷重を受け、厳しい腐食環境にさらされるとともに、それ自体の幾何学的形状の複雑さや溶接のために、高い応力集中や残留応力が存在している。そのため、鋼管継手の疲労強度は、この種の海洋構造物の設計における最も困難な問題の1つとなっている。本論文では、まず、近年、ヨーロッパにおいて実施されている2大共同研究プロジェクト UKOSRP (United Kingdom Offshore Structure Research Project) および ECSC (European Coal and Steel Community) プロジェクトや我が国における研究を中心として、ここ約 10 年間の会議録や定期刊行物を調査し、海洋構造物用の鋼管継手

の疲労強度に関する実験データを収集した。実験データは、鋼管継手そのものの疲労実験に関するものと、鋼管継手の基礎資料を得るための十字継手などの基礎継手の疲労実験に関するものの2種類に大別し、それぞれについてデータベースを作成した。

これらを基に、疲労強度に及ぼす諸因子の定性的、定量的評価のために単回帰分析を行い、基礎継手、鋼管継手それぞれに関する因子の影響を検討するとともに、両者の相関について考察を行った。この結果、板厚、鋼種、不規則荷重、腐食環境、グラインダー仕上げや TIG ドレッシングなどの疲労強度改善法などの効果や影響に関する相関は、定性的には全般的に非常に良く、定量的にも多くの因子について良好であることがわかった。このことは応力集中など鋼管継手固有の課題を除けば、基礎継手の結果が鋼管継手に直接適用できることを裏付けたことになろう。一方、収集された実験データと既存の代表的な設計曲線との比較を行い、考察を加えた。

2 データベースの作成

海洋構造物の構造強度に関する論文が掲載されている

* 東京大学工学部

** 三井造船(株)千葉研究所

*** 日本鋼管(株)重工研究所

**** 東京大学教養学部

国内外の会議録 11 種類, 学術雑誌 14 種類, 研究機関報告 15 種類について近年約 10 年分の文献調査を行い, 海洋構造物の鋼管継手の疲労強度に関する実験データを収集した。

データは, 鋼管継手そのものの疲労実験に関するものと鋼管継手の疲労強度の基礎データを得るための十字継手などの基礎継手の疲労強度に関するものの 2 種類に大別された。収集されたデータは, それぞれ以下のようなデータベースとして整理された。

2.1 基礎継手用データベース

基礎継手の疲労実験データとして収集された実験点の個数は 900 であり, 1 実験点あたり 38 項目のデータとして整理した。

データ項目の概要は次のようである。

- (1) 継手形式: 各種基礎継手形式 (Fig.1 参照)
- (2) 試験体寸法: 内容は継手形式による。
- (3) 材料: 鋼種, 降伏応力, 引張り強さ, 伸び, シャルピー値, 化学成分
- (4) 実験条件: 載荷方法・方向, 載荷様式, 制御方法, 荷重比, 加振周波数, スペクトル
- (5) 環境条件: 実験雰囲気, 海水の種類, 防食法
- (6) 溶接条件: 溶接の種類, 仕上げ法, 熱処理法
- (7) 実験結果: 公称応力 (歪) 範囲, 最大応力, き裂発生寿命, 破断寿命

2.2 鋼管継手用データベース

鋼管継手の疲労実験として収集した実験点の個数は, 607 であり, 1 実験点当たりのデータ項目数は 35 である。データ項目の概要は次のようである。

- (1) 継手形式: 各種鋼管継手形式 (無補強 (Fig.2 参照) および補強継手)
- (2) 試験体寸法: 主管, 枝管の外径, 板厚, 長さ, 交叉角, ギャップ量
- (3) 材料: 鋼種, 降伏応力, 引張り強さ, 伸び, シャルピー値, 継手耐力
- (4) 実験条件: 制御方法, 荷重の種類, 環境, 温

Fig. 1 Type of Fundamental Joint Specimen

Fig. 2 Type of Non-Stiffened Tubular Joint Specimen

- 度, 加振周波数, 防食電位
- (5) 溶接部条件: 仕上げ法, 熱処理法
- (6) 実験結果: 破壊箇所, 最大・最小荷重, 荷重比, 応力集中係数, ホットスポット歪範囲, き裂発生寿命, 板厚貫通寿命, 破断寿命

作成されたデータベースの統計解析には, 著者所属機関に属するプログラムパッケージを用いたが, これらには, データ管理, データ検索, 統計分析, レポート作成機能などを備えたものも含まれており, データの変換加工, 編集, 基礎統計, 多変量解析, 分散分析などが行い得る。

3 基礎継手疲労実験データ分析

海洋構造物の鋼管構造に関連して実施される基礎継手疲労実験は, 実大の鋼管継手構造そのものを使って実験することが適さず, 諸因子による疲労特性を究明する目的で実施されている。

因子のうちで最初に問題になるのは, 継手形式である。各国の研究で, 前出の Fig. 1 に示すような異なった形式の継手を使用しているが, 鋼管継手の一部をモデル化する考え方の違いだけで, 他に必然的な理由はないようである。

Fig. 3 および Fig. 4 に, 各国の実験結果のうち, 空気中または海水中無防食 (freely corrosion) の条件の下で行われた, 溶接のまま (as-weld) の試験体に対する定振幅載荷実験データの公称応力範囲 ΔS と破断寿命 N_f に関する平均線を示す。鋼種, 板厚, 溶接溶込み, 荷重比, 加振周波数など他の試験条件については問題にせず, すべてのデータを単回帰分析したものである。図には, 溶接板継手に対する疲労設計線として知られる BS-153F を併せて示す。空気中での突き合わせ板継手 (butt-welded plate) と荷重非伝達型 (NLC) 十

Fig. 3 Mean Lines of Fatigue Test Data of As-weld Joints in Air

Fig. 4 Mean Lines of Fatigue Test Data of As-weld Joints in Sea Water

字継手の結果は、他に比べ高い疲労強度を示しているが、前者については、余盛角が大きく止端部での応力集中が小さい、また後者については、板厚が 8mm (他は 20mm 以上) という明らかな理由が考えられる。これらの結果を除けば、Fig. 3 および Fig. 4 は、継手形式の違いによる差が小さいことを示しているといえる。

しかしながら、一方でオランダにおいては、継手形式による差を見る目的で、T 継手と荷重伝達型 (LC) 十字継手の比較実験を行い、十字継手の疲労強度の方が高くなるとしているが²⁾、この差は、継手形式というよりは、むしろ、溶接溶込み、余盛角、止端半径などで表現される溶接部の影響が大きいといえ、特に止端半径は、応力集中に敏感に働き、その影響度合いが大きいと考えられる。しかし、今回のデータでは、一部の言及²⁵⁾を除き、止端半径は定量化されていない。

これらのことを考えて、以下の議論では、形式の違いを問題にせず、因子影響を中心に実験データを整理し直した結果の主なものについて述べることにする。なお、定量的に述べている部分は、いずれも得られたデータに

対して単回帰した $\log \Delta S \sim \log N_f$ の関係式に基づいている。

3.1 荷重モードと荷重比

基礎継手疲労実験の場合、ほとんど曲げによる载荷で実験している。軸力载荷との比較は、UKOSRP で荷重伝達型十字継手とタブ付板について行っているが、前者の場合、その差は、ほとんどなく、後者の場合、曲げによる方が高い疲労強度を示す結果になっている。一方、荷重比 R については、文献^{1), 11)}などでその比較を述べているが、溶接のままの場合、おおむね $R = -1$ の方がやや高い。特に、曲げモードの時に、その傾向がいちじるしい。

3.2 鋼種および板厚

鋼種については、ノルウェーで⁸⁾ 突合わせ継手を使って BS 4360-50D ($\sigma_u = 530$ MPa) と OX 602 ($\sigma_u = 640$ MPa) の比較を、ベルギーで⁷⁾ 荷重非伝達型十字継手を使って FeE 235 ($\sigma_u = 372$ MPa) と FeE 355 ($\sigma_u = 504$ MPa) の比較を行った結果があり、両者の場合とも鋼種による差はほとんどない。高張力鋼の疲労強度は、溶接のままの場合、高い切欠感受性によって疲労強度は、軟鋼と結果はほとんど変わらないといわれているが¹²⁾、溶接部仕上げによる改善効果は大きい⁷⁾。

板厚が疲労強度に及ぼす影響については、後述の Fig. 12 に示す。この中で、Leeuwen の結果 (T 継手) については、データが 4 点しかなく、バラツキもあって信頼性が乏しい。それを考慮すると、この図は、板厚が増すと疲労強度が低下するという傾向が、基礎継手の場合にもあることを示している。

3.3 溶接部および仕上げ

溶接部として考えられる因子の主なもの、溶接溶込み、余盛角度、止端半径である。このうち、止端半径については、応力集中に関連して重要と考えられる³¹⁾にもかかわらず、前述したようにほとんど定量的に扱われていない。他の 2 つについては、イギリス¹⁾で、荷重伝達型十字継手を使って溶接溶込みの影響を、オランダ⁸⁾で T 継手を使って溶接溶込みと余盛角について調べている。余盛角については、 110° と 135° で、後者の方が疲労強度が大きい、その差はせいぜい 5% ほどである。このことは、余盛角だけの影響であればそれほど大きくないことを示している。

溶接部仕上げの疲労強度改善効果については、基礎継手を使った疲労実験の大きな目的の 1 つであり、実験データも多い。特に空気中でのデータは豊富である。Fig. 5 は、荷重伝達型十字継手の空気中実験結果を、Fig. 6 は T 継手の海水中実験結果をまとめて示したものである。これらの結果をまとめると、

1) グラインダー仕上げは、空気中では非常に大きな

Fig. 5 Fatigue Test Data of Treated Load Carrying Cruciform Joints in Air [1]

Fig. 6 Fatigue Test Data of Treated T Joints in Sea Water

改善効果を示し、 $N_f = 2 \times 10^6$ で疲労強度は 30～130% 増加するが、海水中では、せいぜい 20% ほどとその効果は、空気中ほどでない（荷重伝達型十字継手、T 継手の結果）。

- 2) 空気中のデータしかないが、ハンマーピーニングも大きな効果を示し、 $N_f = 2 \times 10^6$ で 100～150% 強度が増加する（荷重伝達型十字継手の結果）。
- 3) TIG ドレッシングについても、おおむね疲労強度改善効果は認められているが、高応力レベルで効果がある（T 継手³⁾）という結果と、低応力レベルで効果大きい（荷重伝達型十字継手、荷重非伝達型十字継手⁷⁾）という結果に分かれる。また、海水中で他の仕上げに比べて効果の落ち方が大きいとする結果がある²⁾。

溶接後熱処理による残留応力除去の効果については、すべての継手形式について実験されており、荷重比 $R = -1$ の時には、一様に疲労強度を向上させる結果になっている。空気中実験によれば、 $N_f = 2 \times 10^6$ で 20～50% 程度の増加である。

3.4 腐食環境

海洋構造物の疲労強度を考える上で、最も重要な因子は、海水という腐食環境である。各継手形式に対して、腐食環境下（主に ASTM D 114152 人工海水使用）での実験が行われている。その中から、他の試験条件が全く同じで、腐食作用の影響を正確に定量化できるケースについて強度低下をまとめてみたものが Table 1 である。溶接部は、溶接のままである。この表から、一般に、海水中、塩分雰囲気中で疲労強度は低下することがわかる。さらに、幾つかの特徴的傾向を把握することができる。まず、実験海水温度の影響が大きいことである。5°C で実験された荷重伝達型十字継手、タブ付板のデータ（イギリス UKOSRP）は、強度低下の程度が小さい。また、疲労強度低下は、一般に低応力レベルでより大きく、荷重比、鋼種による差は特になさそうである。

次に、電気防食の条件下で実験されたデータについて、同様に定量的比較のできるものを Table 2 にまとめた。この場合、強度の基準は、海水中無防食の結果である。この表から、適正な電位であれば、電気防食は有効で、特に低応力レベルで改善効果が大きいといえる。むしろ、空気中の強度を上回る場合もあり得る。ただ、高張力鋼（60 キロ鋼 OX 602）の場合は、1 ケースだけではあるが、効果が小さい結果になっている。なお、前述の溶接部仕上げによる疲労強度改善法の電気防食下での効果は、それらの効果が、海水中無防食の下で低下するだけに大いに期待されるところであるが、ほとんどデータがなく、残留応力除去についてのみ、電気防食下においてなお改善効果を示す結果がある⁸⁾。

3.5 不規則荷重

実荷重をモデル化した不規則荷重に対する実験は、いくつかの継手形式を使って行われている（たとえば¹³⁾）。主に、不規則荷重作用の効果、Miner 則適用などを調べることを目的としており、次のような特性が得られている。

- 1) 海水中での強度の低下は、定振幅と同程度かむしろ少ない。
- 2) V 継手の結果によれば、不規則荷重下での海水中疲労実験において、加振周波数（0.2, 1, 10 Hz で実験）は大きな影響を及ぼさない（ただし、この見解は UKOSRP などとは異なる）。
- 3) 作用応力に関して、RMS で整理すると、定振幅の結果とは、ほぼ一致し、また、スペクトル（実験では狭帯域スペクトルを使用）間での違いはあまりない。
- 4) 定振幅荷重実験データを Miner 則に適用すると、累積被害度は 1 以下で破断している。

Table 1 Change of Fatigue Strength in Corrosive Environment
(Constant Amp.)

Environ- ment	Specimen Type	Rate(%) w.r.t. data in air		Conditions			
		+: improve	-: decrease	Load ratio R	Material σ_y (MPa)	Thickness (mm)	Water temp. (°C)
		$N_f = 2 \times 10^5$	$N_f = 2 \times 10^6$				
Freely corrosion	LC [9] cruciform	-13	-18	-1	355	38	5
		-6	+4	0	"	"	"
	[8] butt-welded plate	-18	-36	" *	"	25	10
		-16	-36	" *	490	22	"
	[6] V joint	-14	-14	-1 **	260	20	15
		-14	-14	" **	"	50	"
	[2,3,4,5] T joint	-17	-30	"	380	70	20
		-14	-25	0 *	510	28	-
		-27	-25	0.1	410	40	20
		-12	-33	"	380	70	"
		-12	-17	" *	350	27	12
		-23	-23	"	390	40	20
	NLC [2] cruciform	-26	-29	"	"	"	"
	[10] Tab plate	-8	-4	-1	345	38	5
		-8	-9	0	"	"	"
Saline atmosphere	[14] butt-welded plate	-10	-13	" *	370	25	-
Inter- mittent	LC [9] cruciform	-16	-15	-1	345	38	5
		-8	0	0	"	"	"
	[10] Tab plate	+3	+7	-1	"	"	"
		+17	-7	0	"	"	"

Loading freq. *: 1 Hz **: 0.2, 1, 10 Hz others: 0.17~0.2 Hz

Table 2 Improvement by Cathodic Protection (Constant Amp.)

Specimen Type	Improvement ratio (%)		Conditions				
	w.r.t. data in free cor.		Potential (mV)	Load ratio R	Material σ_y (MPa)	Thickness (mm)	Water temp. (°C)
	$N_f = 2 \times 10^5$	$N_f = 2 \times 10^6$					
LC [9] cruciform	+14	+22	-850 *	-1	345	38	5
	+9	+21	-850 *	0	"	"	"
[8] butt-welded plate	+25	+17	-700	"	370	25	10
	-1	+45	-780	"	"	"	"
	+18	+32	-1100	"	"	"	"
	+6	+3	-780	"	540	22	"
[2] T joint	+6	+54	-900 *	0.1	390	70	20

1) *: mV Ag/AgCl others: mV SCE

2) Concerning loading freq., refer to Table 1

不規則荷重下の実験については、依然明確でない点もあり、また、種々の因子における実験も不足しているのが現状である。なお、電気防食については、一様にその効果が認められている。

4 鋼管継手疲労実験データ分析

4.1 データ分析

鋼管継手の疲労強度は、継手部に生じる局所的な歪（ホットスポット歪）によって支配され、鋼管継手疲労実

 Fig. 7 $\Delta\epsilon_{HOT}$ vs. N_c of Fatigue Test Data of Tubular Joints

験の結果は主として、繰り返し中のホットスポット歪範囲 $\Delta\epsilon_{HOT}$ と疲労寿命の関係により整理されている。ここでホットスポット歪は溶接部の近傍に貼布した歪ゲージにより計測された溶接線に直角方向の歪で、溶接部における局所的な切欠効果の影響は除かれるものというのが一般的な定義である。しかし、具体的な求め方については、統一された方法はなく実験者により異なっているのが現状である。一方、疲労寿命としては、き裂が発見されるか一定の寸法に達した時のき裂発生寿命 N_e 、板厚を貫通する寿命 N_p 、または破断寿命 N_f などが用いられている。以下の分析においては、ホットスポット歪と最も関係が深いと考えられる N_e を主に用いることとする。調査データから $\Delta\epsilon_{HOT} \sim N_c$ 関係をプロットしたのが Fig. 7 である。これには、継手形式・寸法、実験条件、溶接条件・溶接部形状などの特性の異なるものが混在している。そこで、ここでは、基本となる溶接のまま（ここでは余盛仕上げのないものを意味し、溶接後熱処理されているものも含む）の継手の空气中で定振幅荷重の繰り返しにより得られる $\Delta\epsilon_{HOT} \sim N_c$ 関係に影響を及ぼす因子として、鋼種、板厚、荷重比を採り、それぞれ次のように分類する。まず、鋼種については、40 キロ級 ($400 \leq \sigma_{ul} < 430 \text{ MPa}$)、45 キロ級 ($440 \leq \sigma_{ul} < 460 \text{ MPa}$)、50 キロ級 ($480 \leq \sigma_{ul} < 500 \text{ MPa}$)、80 キロ級 ($700 \leq \sigma_{ul} < 900 \text{ MPa}$) の 4 種類に分類する。ここで、 σ_{ul} は引張り強度 σ_u の下限の規格値である。板厚については、 T_1 ($0 \leq t < 10 \text{ mm}$)、 T_2 ($10 \leq t < 20 \text{ mm}$)、……、 T_7 ($60 \leq t < 70 \text{ mm}$)、 T_8 ($70 \text{ mm} \leq t$) の 8 種類に分類する。荷重比については、 $R0$ ($-0.1 \leq R \leq 0.1$)、 $R1$ ($R = -1.0$) の 2 種類に分類する。なお、他の因子、たとえ

Fig. 8 Treatment of Data for Comparison of Fatigue Life

Fig. 9 Effects of Material, Plate Thickness and Load Ratio on Fatigue Life

ば継手形式、試験体寸法、破壊位置、荷重モード（軸力、面内曲げ、面外曲げ）、加振周波数などの影響は、無視できるものとする。

上記の各分類に対する $\Delta\epsilon_{HOT} \sim N_c$ 線図を求め、その傾き、係数を比較することが望ましいが、データ数が限られており、傾きを正確に求めることは難しい。そこで、本解析では、 $\Delta\epsilon_{HOT} \sim N_c$ 線図の傾き K を有効な全データのプロットから得た 0.24 に固定し、実験データを $\Delta\epsilon_{HOT} = 850 \times 10^{-6}$ （実験データの平均値にはほぼ相当）における寿命 N_{850} に換算し（Fig. 8 参照）、各分類の N_{850} の平均値 $\bar{N}_{850}$ と標準偏差 σ_{850} を求める。

得られた平均値 $\bar{N}_{850}$ と上下限值 $N_e (= \bar{N}_{850} \pm \sigma_{850})$ を Fig. 9 に示す。同図中の星印と点線は板厚のみをパラメータとした時の平均値と上下限值である。なお N_f についても同様の解析を行ったが、 N_e の場合と類似の結果が得られている。また、 N_f/N_e の値は平均 5.0 になっている。

4.2 鋼 種

今回調査した鋼管継手模型は、前述のように 40, 45, 50, 80 キロ級の4つの強度レベルに分類できる。Fig. 9 の結果をみると、板厚 30mm 以下で 50 キロ級の平均寿命が僅かに 40 キロ級のそれよりも大きくなる傾向が認められる。一方、80 キロ級のデータは板厚 10~20 mm の範囲にのみ見られるが、50 キロ級に対して有意差は認められない。Fig. 10 には板厚 10~20mm における各鋼種の実験データをプロットしているが、上記の傾向を確認することができる。

4.3 板 厚

Fig. 9 の結果から板厚による疲労強度の差が比較的はっきり認められる。すなわち、板厚が増加すると疲労寿命が減少する傾向がある。Fig. 11 は板厚をパラメータとしてデータをプロットしたものであるが、板厚が 30mm 以上のデータに疲労強度の低いものがみられ、板厚による疲労強度の低下を考慮する必要があることを示している。今回の調査データにおける厚板 (30mm 以上) のデータは 50 キロ級の鋼種により得られたものであり、他の強度レベルの鋼種についても同様の結果が得られるかどうかは、今後の研究を待つ必要がある。

4.4 荷 重 比

Fig. 9 において $R=0$ と $R=-1$ の平均寿命を比較すると、 $R=-1$ の場合に寿命が長くなる傾向がわずかにみられるが、その差は非常に小さい。これは、溶接による残留応力や周囲の拘束などによりき裂発生点における応力比、平均応力が荷重比と対応していないためと考えられる。

5 基礎継手および鋼管継手疲労強度の相関

3でも述べたように取り上げた基礎継手の疲労実験は、鋼管継手の疲労強度に及ぼす諸因子の影響を明らかにすることを主目的として行われたものである。そのため、ここで基礎継手と鋼管継手の実験結果の相関を考えてみる。基礎継手実験の試験体の形式と荷重条件は、鋼管継手のホットスポット近傍の応力場を適切にモデル化したものであるため、考察に際し、鋼管継手のホットスポット応力 (ホットスポット至×ヤング率) は基礎継手の公称応力に、また鋼管継手の N_e は基礎継手の N_f に対応するという仮説を設ける。この仮説の前半部は基礎継手の形状が鋼管継手の局部構造を簡略化したものであ

Fig. 10 $\Delta\epsilon_{HOT}$ vs. N_c of Fatigue Test Data with Various Classes of Material (in Air and with Thickness from 10 to 20mm)

Fig. 11 $\Delta\epsilon_{HOT}$ vs. N_c of Fatigue Test Data with Various Plate Thickness (in Air and in Case of 500 Mpa Class Steel)

り、基礎継手に載荷する荷重は鋼管継手局部構造に作用する内力を単純化したものであると考えることに対応している。一方、後半部は、鋼管継手のホットスポットにおいては、一般に疲労き裂発生以後、伝播寿命が長く前述のように破断寿命とき裂発生寿命の比が大きいのに対して、基礎継手疲労実験においては、この比がかなり小さいことに対応している。前出の Fig. 11 において基礎継手のデータが鋼管継手のデータのばらつきに含まれ、

Fig. 12 Effects of Plate Thickness on Fatigue Strength

また後出の Fig. 17 において、基礎継手のデータが鋼管継手のデータの下限近くにくるという事実から、この仮説は一応成立すると考えられる。しかし、今後、より詳細な検討に基づく裏付けを得ることが必要であろう。

5.1 板厚効果

鋼管継手による Fig. 9 の結果では、板厚の増加とともに疲労寿命が短くなる傾向が認められたが、この結果は他に種々の因子を含んだ模型による実験結果を板厚のみに注目して導かれたものである。一方、基礎継手には板厚の影響を系統的に検討したものがあり^{1),2),11),15)~17)}、それらの結果と今回の鋼管継手による結果との相関を調べると Fig. 12 のようになる。同図は板厚による疲労強度 ($N=2 \times 10^6$ における応力範囲) の変化を示しているが、鋼管継手の場合と基礎継手の場合で類似の傾向を示していることがわかる。基礎継手における実験は、板厚と溶接部寸法をほぼ相似に変化させることによって得られたものであり、この板厚増加による疲労強度の減少を応力集中係数と応力勾配の変化で説明しているものがある¹⁵⁾。鋼管継手の場合も同様な理由が考えられるが、ホットスポット歪の計測に板厚や管寸法の影響が入る可能性があるなど、より複雑な事情下にあるものと予想される。Fig. 12 には、UK-DÖE¹⁸⁾ や DnV¹⁹⁾ による板厚修正と T 線図から求まる値をも示したが、実験結果と比較的よい相関を示している。

5.2 鋼種、荷重比の影響

今回調査したデータでは、基礎継手、鋼管継手ともに 50 キロ級鋼の他、40, 60, 80 キロ級の結果がみられる。それによると、溶接のままの状態では降伏応力、引張り強度が高くなっても疲労強度にはあまり差がないようである。しかし、溶接止端部を仕上げ、応力集中を緩

Fig. 13 RMS of $\Delta \varepsilon_{HOT}$ vs. Number of Cycles of Fatigue Test Data under Random Loading (in Air)

和することによる疲労強度改善の効果は高張力鋼のほうが大きくなる傾向が見られる。この点に関しては、今後より詳細に検討する価値がある。

荷重比の影響は、基礎継手の場合、比較的明確であるが、鋼管継手の場合にはホットスポット近傍は不静不定が高く周囲の拘束が強いため、前述のように基礎継手による実験ほど顕著に現われない。

5.3 不規則荷重の効果^{20),21)}

鋼管継手模型を用いた不規則荷重疲労実験の結果を基礎継手の平均線と同時に Fig. 13 に示す。鋼管継手と基礎継手ではほぼ同じ結果が得られていること、また歪の RMS 値で評価すれば、定振幅荷重実験の結果ともよい

相関となることがわかる。一方, Miner 則による疲労被害度は基礎継手の場合は1.0以下, 鋼管継手の場合は0.1~7.0²¹⁾という値が得られているが, 一般的な結論を出すには至っていない。

5.4 腐食環境の影響^{20), 22), 23)}

海水中の鋼管継手疲労実験による $\Delta\epsilon_{HOT} \sim N_c(N_f)$ 関係を Fig. 14 に示す。腐食環境中の疲労強度は, 温度や加振周波数の影響を大きく受け, Fig. 14 より一般的な結論を導くことは難しいが, 北海を想定したほぼ同じ環境 (0.1~0.2 Hz, 10°C) で実験された荷重伝達型十字継手による結果とほぼ同じ結果が得られている。また, 電気防食の効果により, 海水中でも空気中と同等の疲労強度が得られることは注目すべきことである。

5.5 溶接部における疲労強度改善法の効果^{24)~27)}

鋼管継手疲労実験において, 溶接部をグラインダー仕上げした場合の $\Delta\epsilon_{HOT} \sim N_c$ 関係を Fig. 15 に示す。こ

Fig. 14 Fatigue Test Data of Tubular Joints in Sea Water

Fig. 15 Fatigue Test Data of Tubular Joints with Grinding

の場合の $\Delta\epsilon_{HOT}$ はグラインダー仕上げした溶接部で計測されたもので, き裂発生点での歪値 (ASME 流のピーク歪に相当) となっている。したがって, 溶接のままの場合のホットスポット歪に対して, 溶接部における歪集中係数を乗じたものに相当している。実験における計測結果によると, その歪集中係数は 1.5~2.6 の値となっている²⁴⁾。Fig. 15 には荷重伝達型十字継手の溶接のままとグラインダー仕上げした場合の $\Delta\epsilon_{HOT} \sim N_c$ 線図を示したが, これによるとグラインダー仕上げによる疲労強度の上昇は $N=10^5$ で 30%, $N=10^6$ で 50% となっている。今回の鋼管継手によるデータの場合も上記のグラインダー仕上げした溶接部の歪集中係数を平均 2.0 とすると, 十字継手と同等の疲労強度の上昇が得られていることになる。以上の結果は, 50 キロ級の鋼種を用いた場合の結果であり, 高強度レベルの鋼種を使用した場合には, その効果の程度が異なることが予想されるので新たに調べる必要がある。

溶接止端部に TIG ドレッシングを施した鋼管継手の疲労実験データ²⁷⁾を Fig. 16 に示す。同図のデータは HT-80 を使用した鋼管継手からなっており, 比較のために, HT-80 からなる荷重非伝達型十字継手の結果も示す²⁸⁾。鋼管継手と十字継手がほぼ同じ挙動を示している。HT-80 の場合, 応力集中による疲労強度の変化が大きく, Fig. 16 の場合も TIG ドレッシングによる応力集中緩和の結果, 3 倍の疲労強度の上昇が得られている。

6 設計曲線との比較

鋼管継手の疲労設計曲線としては, ホットスポット歪と疲労寿命の関係を与える AWS-X 線図²⁹⁾ が広く用い

Fig. 16 Fatigue Test Data of Tubular Joints with TIG-dressing

Fig. 17 $\Delta\epsilon_{HOT}$ vs. N_f of Fatigue Test Data of Tubular Joints and Fatigue Design Curves

られている。同線図は 1981 年版において溶接止端部の形状を仕上げた場合の X_1 線図と、溶接のままの X_2 線図とに区別され、溶接止端部仕上げ効果を考慮するようになっている。溶接のままの継手に対する X_2 曲線を Fig. 10, 11 に実線で示した。 X_2 曲線はデータの下限近傍とはなっているが、一部 X_2 曲線を下まわるデータが見られる。一方、き裂発生寿命 N_c の代わりに破断寿命 N_f を用いた場合のデータと比較すると Fig. 17 のように安全側に評価していることがわかる。 X_1 曲線と X_2 曲線の応力レベルの比率を調べると、グラインダー仕上げした場合の Fig. 15 の結果よりも安全側の評価になっている。

次に UK-DÖE または DnV の T 曲線については、Fig. 10, 11 に示したように疲労寿命を N_c で評価すると T 曲線は安全側にならないが、Fig. 17 に示したように N_f で評価すると安全側になる。また DnV では溶接止端部をグラインダー仕上げた場合には疲労寿命を 2 倍に評価してよいとしており、T 曲線における傾き $k=1/3$ を考慮すると、26% の強度上昇に相当し、AWS と同様安全側の評価を行っている。

7 結 論

- (1) 荷重伝達型の十字継手、V 継手、突合わせ溶接板継手、荷重非伝達型の T 継手、十字継手、タブ付板などの基礎継手に関して、継手形式による疲労強度（公称応力範囲と破断寿命との関係）の差は小さい。鋼管継手に関しては、従来、認められている通り、ホットスポット歪範囲とき裂発生寿

命との関係と見做すことにより、T, K, Y, X などの継手形式による強度差はほとんどない。

- (2) 基礎継手と鋼管継手の疲労強度の相関の検討の前提として、「鋼管継手のホットスポット応力（ホットスポット歪×ヤング率）は基礎継手の公称応力に対応し、鋼管継手のき裂発生寿命は基礎継手の破断寿命に対応する」という仮説を設けた。この仮説はほぼ成立すると考えられるが、今後の裏付けの強化が必要であろう。
- (3) 基礎継手と鋼管継手の疲労強度に影響を及ぼす因子の効果に関する相関は、板厚、鋼種、不規則荷重、腐食環境、グラインダー仕上げ、TIG ドレッシングなどについては定性的に非常に良く、定量的にも多くの因子について良好である。ただし、荷重比については、鋼管継手の場合、ホットスポットにおける応力比や平均応力が荷重比のみにはよらないため相関は上記ほど明かではない。しかし、全体としては、基礎継手実験に基づく因子の効果を鋼管継手に直接適用できることを裏付けたことになる。
- (4) 実験データと DnV の T 曲線、AWS の X_2 曲線との比較より、これらの設計曲線は、破断寿命に基づいていることを確認した。また、 X_1 曲線と X_2 曲線の応力レベルの比率は、実験データによるグラインダー仕上げ効果より低く、DnV の T 曲線のグラインダー仕上げに関する緩和規定による強度上昇も低めになっており、ともに安全側の評価になっていると考えられる。

本研究の基礎となった文献調査は、(財)日本溶接協会、塑性設計研究委員会（委員長・藤田譲東大教授）の中に設けられた海洋パイプ構造小委員会における共同作業として行われたものである。文献の収集・整理に協力され、またデータの解析に対しても貴重なご意見を賜った小委員会の委員諸氏に対し、深甚の謝意を表します。なお、本論文の参考文献欄には、直接引用した文献名のみが挙げられているが、全関係文献名については、小委員会資料³⁰⁾を参照されたい。

参 考 文 献

- 1) Booth, G. S.: Constant Amplitude Fatigue Tests on Welded Steel Joints Performed in Air, Proc. Intl. Conf. European Offshore Steel Research Seminar (EOSRS), No. III-p4 (1978).
- 2) Van Leeuwen, J. L. et al.: Constant Amplitude Fatigue Tests on Welded Steel Joints Performed in Air and Seawater, Proc. Intl. Conf. on Steel in Marine Structures (SMS),

- No. 2.1 (1981).
- 3) Wildshutz, H. et al.: Fatigue Behaviour of Weld Joints in Air and Sea Water, EOSRS, No. III-p 5 (1978).
 - 4) Haagensen, P. J. et al.: Fatigue Performance in Air and Sea Water and Fracture Toughness of TIG-Dressed Steel Weldments, EOSRS, No. III-p 8 (1978).
 - 5) Haagensen, P. J.: Fatigue Strength of TIG-Dressed Steel Joints, SMS, No. 9.4 (1981).
 - 6) Oliver, R. et al.: Corrosion Fatigue Behaviour of Offshore Steel Structures under Constant Amplitude Loading, SMS, No. 2.4 (1981).
 - 7) Haeyer, R. D. et al.: Some Experiments on the Possible Improvement of Fatigue Life of Welded Joints by TIG-Dressing, SMS, No. 9.3 (1981).
 - 8) Solli, O.: Corrosion Fatigue of Welded Joints in Structural Steels and the Effect of Cathodic Protection, EOSRS, No. IV-p 10 (1978).
 - 9) Booth, G. S.: The Influence of Simulated North Sea Environmental Conditions on the Constant Amplitude Fatigue Strength of welded Joints, 11th OTC, No. 3420 (1979).
 - 10) Booth, G. S.: Constant Amplitude Fatigue Tests on Welded Steel Joints Performed in Sea Water, EOSRS, No. III-p 9 (1978).
 - 11) Haibach, E. et al.: Fatigue Strength of Angled Specimens with Fillet Welds Produced from 50 mm Plate, EOSRS, No. III-p 7 (1978).
 - 12) 森脇良一, 他: 高張力鋼溶接継手の疲れ許容応力の一検討 (その1), 溶接学会誌, 第51巻, 第1号 (その2), 溶接学会誌, 第51巻, 第3号 (1982).
 - 13) Schutz, W.: Procedures for the Prediction of Fatigue Life of Tubular Joints, SMS (1981).
 - 14) Solli, O.: Corrosion Fatigue of Weldments of C-Mn and the Effect of Cathodic Protection, Stress Relieving Treatment and Saline Atmosphere, SMS, No. 2.2 (1981).
 - 15) Berge, S. et al.: Effect of Plate Thickness in Fatigue of Transverse Fillet Welds, SMS, No. 2.5 (1981).
 - 16) Holmes, R.: Fatigue and Corrosion Fatigue of Welded Joints under Random Loading Conditions, EOSRS, No. IV-p 11 (1978).
 - 17) 金属材料技術研究所: 溶接構造用圧延鋼 SM 50 B リブ十字すみ肉溶接継手の疲れ特性データシート試験片寸法の効果一, No. 13 (1979)
 - 18) U.K. Dept. of Energy: Guidance on Design and Construction, New Fatigue Design Guidance for Steel Welded Joints in Offshore Structures, Recommendations of DOE Guidance Notes (1983).
 - 19) Det Norske Veritas: Classification Notes, Fatigue Strength Analysis for Mobile Offshore Units, No. 30.2 (1984).
 - 20) Pozzolini, P. F.: Tests on Tubular Joints, SMS (1981).
 - 21) McDonald, A. et al.: The Influence of Geometrical and Loading parameters on the Fatigue Life of Tubular Joints, SMS, No. 10.2 (1981).
 - 22) Lourenssen, A. A. et al.: Fatigue Tests on Large Post Weld Heat Treated and As Welded Tubular T-Joints, 14th OTC, No. 4405 (1982).
 - 23) Gibstein, M. B.: Fatigue Strength of Welded Tubular Joints Tested at Det Norske Veritas Laboratories, SMS, No. 8.5 (1981).
 - 24) Teramoto, S. et al.: Fatigue Strength of Welded Tubular Joints with Various Stiffeners in Offshore Structures, 5th OTC, No. 1820 (1973).
 - 25) Iida, K. et al.: A Proposal for Fatigue Design Procedure for Offshore Tubular Connections, IIW Doc. XIII-1020-81 (1981).
 - 26) 吉田宏一郎, 他: T型パイプ継手の歪詳細解析と疲労亀裂発生寿命予測, 日本造船学会論文集, 第144号 (1978).
 - 27) Iida, K. et al.: Fatigue Strength of Welded Tubular K-Joints of 800 N/mm² Class High Strength Steel, IIW Doc. XIII-872-78 (1978).
 - 28) 石黒隆義, 他: 鋼材の腐食疲労強度向上に関する問題点, 鉄と鋼, Vol. 65, No. 8 (1979).
 - 29) American Welding Society: Design of New Tubular Structures, AWS Structural Welding Code, D1. 1-72, Sec. 10 (1972) & (1981).
 - 30) 日本溶接協会: 海洋パイプ構造物の構造強度研究における最近の進歩, 塑性設計資料集 (その11), (昭和60年4月印刷予定, 1985).
 - 31) Sanders, W. W. Jr. et al.: Effects of External Geometry on Fatigue Behaviour of Welded Joints, Welding Journal, 44-2 (1965).