

# 板厚对焊接接头在空气中和 海水中疲劳性能的影响

薛以年 徐纪林 李 禾 李延革

(中国科学院力学研究所)

## 提 要

本文讨论了国产海上平台用钢E36—Z35的十字型板状焊接接头在空气中和海水中的弯曲疲劳试验, 试件厚度分别为16mm、32mm和40mm。试验结果表明: 板厚的增加使焊接接头在空气和海水中的疲劳强度均明显降低, 并建议在空气中的疲劳强度修正公式为 $\Delta S = \Delta S_0 (\frac{t_0}{t})^{1/3}$ 和疲劳寿命修正公式为 $N = N_0 (\frac{t_0}{t})^{4/3}$ , 在海水中的厚度修正公式为 $\Delta S = \Delta S_0 (\frac{t_0}{t})^{1/4}$ 和 $N = N_0 (\frac{t_0}{t})$ , 相比之下, 厚度对海水腐蚀疲劳强度的影响比在空气中稍小一些; 对于板厚为16mm和40mm的焊接接头试件在海水中的疲劳寿命和空气中的寿命相应为36%和57%, 可见随着板厚的增加, 海水腐蚀疲劳寿命比空气中寿命的缩短要少一些。本文还从断裂力学方法出发, 讨论了板厚影响焊接接头疲劳寿命的原因。

## 一、引 言

导管架海上平台是大型的焊接钢结构, 其疲劳设计规范是基于大量的S-N试验数据所制定的, 由于试验设备的载荷容量和试验费用等的限制, 这些试验所用试件的厚度一般在20mm左右的范围内, 实际上导管架平台结构的厚度均大于20mm, 然而厚度增加会使构件焊接的疲劳强度明显降低, 因此上述设计规范对厚度较大的焊接结构是不安全的。Gurong[1]曾提出焊接接头疲劳强度的厚度修正半经验公式为

$$\Delta S = \Delta S_0 \left( \frac{t_0}{t} \right)^{1/4} \quad (1)$$

其中 $\Delta S_0$ 是对应于厚度为 $t_0$ 的疲劳强度(应力范围), 如果疲劳寿命曲线 $N \Delta S^m = C$ 中, 的 $m = 3$ , 则

$$N = N_0 \left( \frac{t_0}{t} \right)^{3/4} \quad (2)$$

其中 $N_0$ 是对应于厚度为 $t_0$ 的疲劳寿命。以上公式已编入1984年英国能源部关于离岸结构的指导性文件[2]中, 对于焊接头 $t_0 = 22\text{mm}$ , 管节点 $t_0 = 32\text{mm}$ 。但是从研究中发现, 上述厚度修正公式还不够成熟, 有些试验数据表明此公式不是保守的。

近年来国际上很重视研究厚度对板状焊接接头疲劳强度的影响,在这方面做了许多工作<sup>[3]</sup>,通过板状焊接试件的研究,可以探讨导管架管节点疲劳强度的厚度效应,但是大多数是空气中的试验,在海水中的试验比较少,有的仅是在一定应力水平上来察看厚度对疲劳寿命的影响。

作者进行了国产海洋平台用钢E36-Z35的十字型板状焊接接头在空气中和在海水中自由腐蚀条件下的弯曲疲劳试验,共65个,试件厚度分别为16mm、32mm和40mm,连同以前25mm厚的A537进口钢材焊接接头试件的试验数据<sup>[4]</sup>,将它们放在一起,分析了板厚对疲劳强度的影响。结果表明,板厚的增加使焊接接头在空气中和海水中的疲劳强度均明显降低,相比之下,海水腐蚀疲劳强度受厚度的影响比在空气中稍小一些。在这些工作的基础上,本文提出了试验结果所相应的板厚修正公式。文中还分析了厚度影响的主要原因,认为占较大比例的裂缝扩展寿命随板厚增加而降低,是由焊趾处应力强度因子表达式中的焊缝放大系数 $M_k$ 所引起的,在一定的初始裂缝长度下, $M_k$ 随板厚增加而迅速增大,即应力强度因子增大,从而使裂缝扩展速率增大,裂缝扩展寿命随之缩短。

## 二、试件和试验条件

试件采用国产海洋平台用钢E36-Z35,该钢板具有抗Z向撕裂的特点,其化学成分和机械性能见表1和表2,表中数据是各种板厚以及各块钢板测试值的平均值。试件均为十字型板状焊接接头,其中一类是悬臂弯曲加载形式(图1(a)),厚度有16mm和40mm两种;一类是受四点弯曲加载形式(图1(b)),厚度有16mm和32mm两种。试件的焊接工艺与制作管节点的要求相同。本试验包括在空气中的疲劳试验和海水腐蚀疲劳试验都是在海水腐蚀疲劳专用试验设备<sup>[5]</sup>上进行的,试验方法参见文献<sup>[4]</sup>。

表1 E36-Z35钢板的化学成分

C	S	Si	Mn	P	Cu	Nb	Al
0.16	0.0012	0.33	1.35	0.009	0.04	0.027	0.04

表2 E36-Z35钢板的机械性能

$\sigma_s$ (N/mm)	$\sigma_b$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\psi_s$ (%)	$\psi_2$ (%)	$Cv_{-40^\circ C}$ (kg·m)	$Cv_{40^\circ C}$ (时效)(kg·m)
403	548	33	72	19.4	10.3

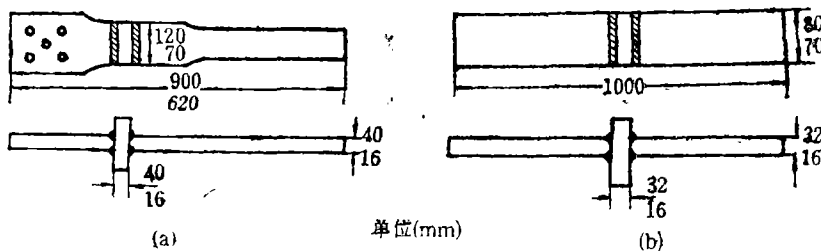


图1

在空气中进行试验的加载频率对疲劳寿命影响很小,本试验取1Hz,应力比 $R=-1$ ;在海水中进行试验的加载频率取0.2Hz,接近海浪载荷的频率,应力比 $R=-1$ ,试验在自

由腐蚀条件下进行,海水温度为 $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ ,海水按ASTM, D1141-75配方由人工配制而成,海水循环流过包围试件焊缝的塑料海水槽,使焊缝局部表面不断有海水流过,大约2分钟至5分钟在海水槽中更换一次,平均流速为 $1\text{l}/\text{min}$ ,海水成分和参数范围见表3和表4。

表3 海水成分(g/l)(按ASTM, D1141-75配制)

NaCl	MgCl <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	CaCl <sub>2</sub>	KCl	NaHCO <sub>3</sub>	KBr	K <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	SrCl <sub>2</sub>	NaF
24.53	5.20	4.09	1.16	0.695	0.201	0.101	0.027	0.025	0.003

表4 海水参数范围

PH值	盐度(g/l)	氯度(g/l)	含氧量	温度
7.5-8.5	32-36	18-20	82-89%饱和(11-12mg/l)	19-20 $^{\circ}\text{C}$

### 三、试验结果

本试验结果以焊趾处弯曲应力状态的表面最大应力范围和试件疲劳破坏的加载循环次数关系给出。应力范围 $\Delta S$ 和破坏次数 $N_f$ 在直角对数坐标系里一般呈线性关系

$$\log \Delta S = a + b \log N_f \quad (3)$$

试验数据通常比较分散,这里将 $\Delta S$ 和 $N_f$ 的试验数据在对数坐标系中进行线性回归分析,得到的 $\Delta S-N_f$ 关系作为平均寿命的疲劳强度曲线。

#### 1. 空气中的试验结果

焊接接头在空气中共进行了34个试件的疲劳试验,试验结果在图2中给出,相同厚度试件的试验数据进行线性回归分析,得到了不同厚度的平均寿命曲线,其回归系数(斜率)和相关系数对应于16mm、32mm、40mm分别为

$$b_{16} = -0.240, \quad b_{32} = -0.303, \quad b_{40} = -0.251;$$

$$r_{16} = -0.846, \quad r_{32} = -0.927, \quad r_{40} = -0.969.$$

相关系数值表明试验数据的分散性不大,同时也表明不同加载类型和不同试件形状对空气中的疲劳寿命没有什么影响。试件基本上都是在焊趾处产生裂缝直至破坏的。

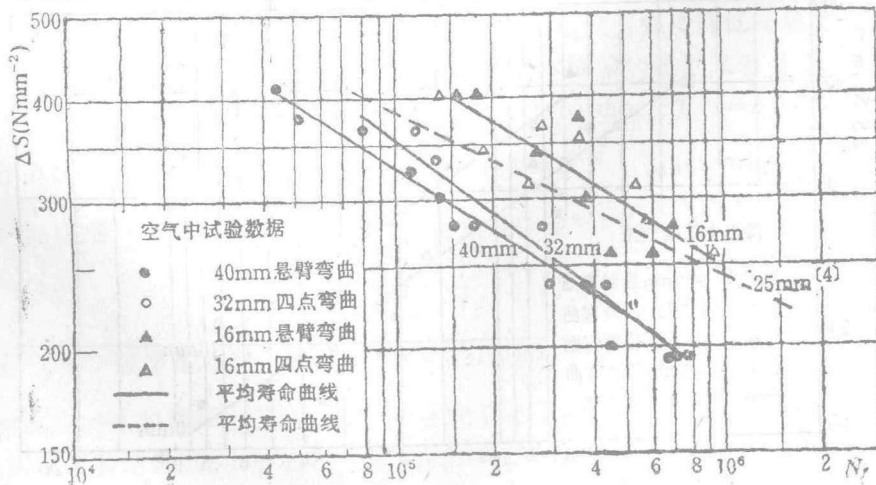


图2

图2中还给出了进口平台钢A537厚25mm的试件在空气中的疲劳寿命曲线<sup>[4]</sup> ( $b_{25} = -0.197$ ,  $r_{25} = -0.927$ ), 与本试验的结果一并分析板厚对疲劳寿命的影响, 从A537钢材的化学成分和机械性能<sup>[4]</sup>与E36—Z35钢材相比, 这两种钢材是很相近的。

为便于分析厚度效应, 将各种厚度的试验数据在给定斜率 $b = -0.25$ 下重新作最小二乘法平均处理, 得到了四条平行的寿命曲线, 见图3, 之所以取斜率 $b = -0.25$ , 是因为厚度为16mm和40mm的试验数据线性回归分析结果的斜率均接近 $b = -0.25$ 。由图3看出, 板厚对疲劳寿命的影响是显著的, 后面将进一步讨论。

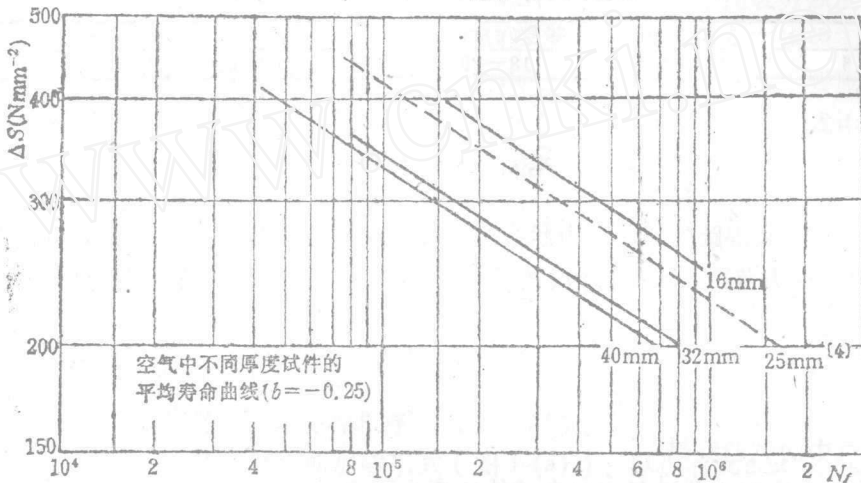


图 3

2. 海水中的试验结果

焊接接头在海水中共进行了31个试件的腐蚀疲劳试验, 试验结果在图4中给出, 相同厚度的试件的试验数据进行线性回归分析, 得到了不同厚度的平均寿命曲线, 其回归系数对应于16mm、32mm、40mm分别为

$$b_{16} = -0.255, \quad b_{32} = -0.277, \quad b_{40} = -0.264;$$

$$r_{16} = -0.903, \quad r_{32} = -0.981, \quad r_{40} = -0.934.$$

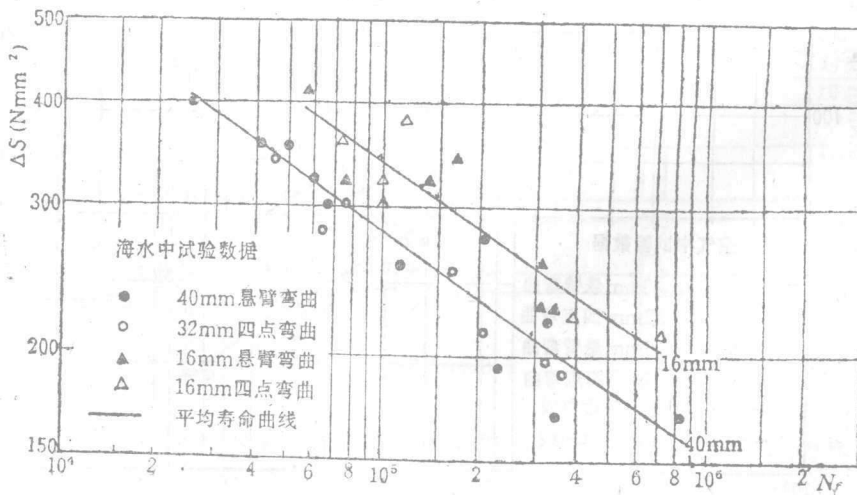


图 4

相关系数值表明试验数据分散性不大,同时也表明不同载荷类型和不同试件形状对海水中腐蚀疲劳寿命没有什么影响。试件基本上都是在焊趾处产生裂缝直至破坏的。

由图4看出,32mm板厚试件的疲劳寿命与40mm板厚试件很接近,这是由于板厚相差不大和试验数据的分散性所致。40mm板厚试件的疲劳寿命比16mm板厚试件的疲劳寿命明显降低。并且由于这两条平均寿命曲线的斜率都接近 $b = -0.25$ ,以后就将在此基础上进行讨论。

图5中给出了两种板厚(16mm和40mm)试件在海水中自由腐蚀条件下的疲劳寿命与空气中疲劳寿命的比较,结果表明,就平均寿命而言,对于16mm厚的试件,在海水中的疲劳寿命为空气中疲劳寿命的36%;对于40mm厚的试件则为57%。可见板厚增加,海水中自由腐蚀的疲劳寿命比空气中疲劳寿命缩短要少一些。

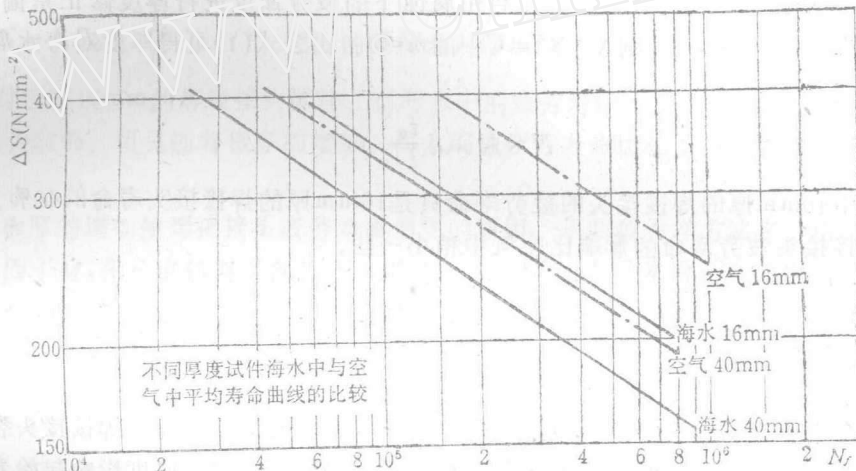


图 5

#### 四、板厚对疲劳寿命的影响

##### 1. 空气中的情形

从图3中可以看到,在空气中板厚增加而焊接接头的疲劳强度降低是显著的,但是,如果用半经验公式(1)对疲劳强度进行厚度修正,从本试验的数据来看是不安全的,当用 $t_0 = 16\text{mm}$ 对 $t = 40\text{mm}$ 进行疲劳强度修正,则 $\Delta S_0 = 311\text{Nmm}^{-2}$  ( $N = 4 \times 10^5$ )时,由公式(1)得, $\Delta S = 311\text{Nmm}^{-2} \times \left(\frac{16}{40}\right)^{1/4} = 247\text{Nmm}^{-2}$ ,而40mm的试验结果为 $\Delta S = 232\text{Nmm}^{-2}$ ,它低于公式(1)的结果。本文建议在空气中采用下式:

$$-\Delta S = \Delta S_0 \left(\frac{t_0}{t}\right)^{1/3} \quad (4)$$

应用公式(4)进行厚度修正,则有 $\Delta S = 311\text{Nmm}^{-2} \times \left(\frac{16}{40}\right)^{1/3} = 229\text{Nmm}^{-2}$ ,它低于40mm板厚的试验结果,因此厚度修正公式(4)是偏于安全的。对于疲劳寿命表达式(3),由本试验结果取 $b = -0.25$ ,即 $N\Delta S^m = C$ 中 $m$ 的 $=4$ ,由公式(4)可得厚度对疲劳

### 寿命的修正公式

$$N = N_0 \left( \frac{t_0}{t} \right)^{4/3} \quad (5)$$

可见空气中40mm厚的焊接接头的疲劳寿命只是16mm厚的焊接接头寿命的30%。

### 2. 海水中的情形

从图4中可以看到,在海水中的板厚对焊接接头腐蚀疲劳强度的影响是显著的,并且由本试验结果可以看到,用公式(1)对疲劳强度进行厚度修正是合适的,用 $t_0=16\text{mm}$ 对 $t=40\text{mm}$ 进行修正,当 $\Delta S_0=236\text{Nmm}^{-2}$  ( $N=4 \times 10^5$ )时,由公式(1)得 $\Delta S=236\text{Nmm}^{-2} \times \left(\frac{16}{40}\right)^{1/4}=188\text{Nmm}^{-2}$ ;本试验板厚为40mm的结果为 $\Delta S=191\text{Nmm}^{-2}$ ,它略高于公式(1)的结果,所以公式(1)对海水自由腐蚀下的疲劳强度进行厚度修正是偏于安全的。和空气中一样,取 $b=-0.25$ ,则 $N\Delta S^m=C$ 中的 $m=4$ ,由公式(1)可得厚度对海水腐蚀疲劳寿命的修正公式

$$N = N_0 \left( \frac{t_0}{t} \right) \quad (6)$$

可见在海水中40mm厚的焊接接头的疲劳寿命只是16mm厚的焊接接头寿命的40%。在海水中厚度对焊接接头疲劳寿命的影响比空气中稍小一些。

## 五、厚度影响焊接接头疲劳寿命的原因

疲劳寿命主要分为两个阶段,裂缝起始阶段和裂缝扩展阶段。对于焊接接头裂缝起始阶段的寿命只占总寿命的20%左右,大部分寿命是在裂缝扩展阶段。厚度影响起始寿命的原因与通常非焊接试样疲劳寿命的尺寸效应相类似,是由于板厚增加,使得焊缝处的缺陷、杂质等相应增多,再加上焊接残余应力增大所致。

关于焊接接头裂缝扩展阶段的厚度影响, Gurney<sup>[6]</sup>用断裂力学方法进行了分析,由Paris公式

$$\frac{da}{dN} = C (\Delta k)^m \quad (7)$$

其中  $\Delta k = M_k Y_u \Delta S \sqrt{\pi a}$  (8)  
 $M_k$ 是焊缝形状引起的焊缝放大因子,  $Y_u$ 是无焊缝的修正系数,由Paris公式(7)积分得

$$\int_{a_i}^{a_f} \frac{da}{(M_k Y_u \sqrt{\pi a})^m} = C (\Delta S)^m N \quad (9)$$

于是可求得从初始裂缝长度 $a_i$ 到疲劳破坏的裂缝扩展寿命 $N$ 。

通常,  $M_k$ 是用有限元方法计算得到的,计算中考虑焊缝形状的细节,如几何参数焊缝角 $\theta$ 和焊趾曲率半径 $\rho$ 。计算结果表明,  $M_k$ 随裂缝深度与板厚比 $\frac{a}{t}$ 的减小(在 $\frac{a}{t}$ 较小时)而迅速增大,这说明对相同深度的初裂缝,  $M_k$ 随板厚增加而迅速增大,也就增大了应力强度因子范围,使裂缝扩展速率变快,缩短了裂缝扩展寿命。

## 六、结 论

由本工作的试验结果,可得到如下的主要结论:

1. 板厚的增加使焊接接头在空气中和海水中的疲劳强度均明显降低;相比之下,厚度对海水腐蚀疲劳强度影响比在空气中稍小一些。

2. 根据本试验结果,建议焊接接头在空气中的疲劳强度厚度修正公式为  $\Delta S = \Delta S_0 \left(\frac{t_0}{t}\right)^{1/3}$

, 相应的疲劳寿命厚度修正公式为  $N = N_0 \left(\frac{t_0}{t}\right)^{4/3}$ ; 在海水中的疲劳强度厚度修正

公式为  $\Delta S = \Delta S_0 \left(\frac{t_0}{t}\right)^{1/4}$ , 相应的疲劳寿命厚度修正公式为  $N = N_0 \left(\frac{t_0}{t}\right)$ 。

3. 对于厚16mm的焊接接头试件,在海水中的疲劳寿命为空气中的36%,对于厚40mm的试件则为57%,可见随着板厚的增加,海水腐蚀疲劳寿命比在空气中疲劳寿命的缩短要少一些。

4. 板厚的增加使焊接接头疲劳寿命缩短的原因,从断裂力学方法来分析,主要是由于焊缝放大因子  $M_k$  在一定初裂缝深度下,随着板厚的增加而迅速增大,即增大了应力强度因子范围,使裂缝扩展速率变快,从而缩短了占总寿命较大比例的裂缝扩展寿命。

参加本工作的还有石茂、王亚立、于桂清和唐驰。

## 参 考 文 献

- [1] Gurney, T.R., Some Comments on Fatigue Design Rules for Offshore Structures, Proc. 2nd International Symposium on Integrity of Offshore Structures, 219—234, 1981.
- [2] Offshore Installations Guidance on Design and Construction, 3rd ed., 1984, UK Department of Energy, 1984.
- [3] Berge, S. and S.E. Webster, The Size Effect on the Fatigue Behaviour of Welded Joints, Paper PS 8, International Conference, Steel in Marine Structures Delft, 1987.
- [4] 薛以年、徐纪林、李禾、李延萍, 焊接钢接头的海水腐蚀疲劳试验研究, 海洋工程, 第五卷, 第二期, 1987年。
- [5] 薛以年、李禾、李延萍, 焊接钢接头的海水腐蚀疲劳及其试验装置, 中国钢结构协会海洋钢结构专业委员会第一次学术交流会论文集, 1985年。
- [6] Gurney, T. R., The Influence of Thickness on the Fatigue Strength of Welded Joints, 2nd International Conference on Behaviour of Offshore Structures, 1979.

# THE INFLUENCE OF PLATE THICKNESS ON FATIGUE BEHAVIOUR OF WELDED JOINTS IN AIR AND IN SEA WATER

Xue Yinian, Xu Jilin, Li He and Li Yanping

( Institute of Mechanics, Academia Sinica )

## ABSTRACT

Bending fatigue tests have been carried out on cruciform welded joints of E36-Z35 steel in air and in sea water with plate thickness of 16mm, 32mm and 40mm. The test results show a significant reduction in fatigue strength of welded joints in air and in sea water with increasing plate thickness. The present paper proposes thickness correction for fatigue strength  $\Delta S = \Delta S_0 \left( \frac{t_0}{t} \right)^{1/3}$  and for fatigue life  $N = N_0 \left( \frac{t_0}{t} \right)^{3/4}$  in air, and thickness correction for fatigue strength  $\Delta S = \Delta S_0 \left( \frac{t_0}{t} \right)^{1/4}$  and for fatigue life  $N = N_0 \left( \frac{t_0}{t} \right)$  in sea water. Thus the influence of plate thickness on the fatigue strength in sea water is less than that in air. The test results show that the fatigue life of welded joints in sea water with plate thickness of 16mm and 40mm are 36% and 57% respectively of the fatigue life in air. Thus the reduction of the fatigue life in sea water is less than that in air with increasing plate thickness. In addition, an explanation for effect of plate thickness on fatigue life of welded joints is made by using the theory of fracture mechanics.