

鋼構造物の 鋸接連結部の 疲勞強度에 관한 研究(I)

A Study on the Fatigue Strength of the Welded Joints in Steel Structures(I)

朴	濟	善*
Park,	Je	Seon
張	東	—**
Chang,	Dong	Il
鄭	榮	和***
Chung,	Yeong	Wha

Abstract

The simplified method drawing the S-N curves in welding joints of the cover plates, the transverse stiffeners and the gusset plates of the plate girders by calculation and its computer program without the direct fatigue tests, was established. And the method was applied to the Yo-ung-Dong Great Bridge, the 3th Han River Bridge and the Kang Chon Bridge.

Before this, SS 41, SS 50, SWS 50 and SWS 58 were selected, then the compact tension specimens were made by the use of these materials, the things welded by these materials transversely and the ones longitudinally to the crack propagation direction. The fatigue tests were performed by the use of these specimens, and the values of material constants c and m were obtained.

By these results the followings were obtained.

It was showed that the fatigue strength in the case of the cover plates was much lower than in the case of other two cases.

It was showed that, in the case of the cover plates with the cover plates thicker the fatigue strength was lower, but besides this the fatigue strength was not much influenced by the size of specimens.

It was showed that in the difference from this the fatigue strength was sensitively influenced by the values of c and m .

It was showed that in accordance with the lower values of c and m the fatigue strength was fairly higher, in accordance with the lower values of m the gradient of the S-N curves was abrupter.

It was considered that if such data were accumulated continuously, in the near future the basic pattern used availably in providing the indicator of the fatigue design of the plate girders, and presuming the life-proof of the existing plate girders.

*正會員・江原大學校 工科大学 教授, 土木工學科

**正會員・漢陽大學校 工科大学 教授, 土木工學科

***正會員・江原大學校 工科大学 副教授, 土木工學科

鈹桁橋의 덧개板, 垂直補強材 및 連結板 등의 銲接連結部를 포함하는 實物을 modeling 하여 直接 疲勞試驗을 행하지 않고서도 계산 program에 의해 S-N 線圖를 그리는 방안을 정립하여 서울의 永東大橋, 第3 漢江橋 및 春川의 江村橋 등에 적용해 보았다.

이에 앞서, SS 41, SS 50, SWS 50, SWS 58 등의 構造鋼으로서 素材, 均열방향에 평행용접, 均열방향에 직각 용접의 compact tension 시험편을 제작 피로시험을 행하여 계산 program 중의 data로 쓰여질 材料常數 c 및 m 값을 구하였다.

이 결과 다음과 같은 결과들을 얻었다.

덧개板의 경우 다른 두 부분보다 疲勞強度가 매우 낮았다.

덧개板의 경우 그 두께가 커지면 疲勞強度가 상당히 낮아지는 외에는 치수에 그다지 큰 영향을 받지 않으며, c 및 m 값에는 매우 민감한 영향을 받음을 알 수 있었다.

c 값 및 m 값이 적어질수록 疲勞強度가 상당히 커지며, m 값이 적어지면 S-N 곡선의 경사가 매우 급해짐을 알 수 있었다.

이와 같은 연구가 계속되어 더 많은 data가 集積되면 앞으로 設計될 鈹桁橋의 疲勞設計指針을 마련하고, 또 既存 鈹桁橋의 疲勞에 대한 耐用年限을 推定할 수 있는 基本 pattern이 提供될 수 있으리라 사료된다.

1. 序 論

1.1 研究動向

Paris, Erdogan⁽¹⁾ 등은 荷重作用回數에 대한 疲勞龜裂의 進展速度 da/dN 은 일정한 범위의 荷重反復에 따라 정해지는 應力擴大係數의 變動範圍 ΔK 의 函數,

$$\text{즉, } \frac{da}{dN} = c(\Delta K)^m \quad (1-1)$$

a : 龜裂길이

N : 荷重作用回數

ΔK : 應力擴大係數의 變動範圍

c, m : 材料特性, 製作差異 등에 따른 常數로 됨을 밝혔다.

이 後 疲勞破壞의 연구는 대부분 應力擴大係數 K 를 계산하는 일, 材料 및 銲接條件 또는 사용조건 등이 여러가지로 바뀌어짐에 따라 각 경우의 材料常數 c 및 m 을 구하는 일, 實物試驗片에 대한 疲勞強度를 결정하는 일 등에 모아지고 있다.

應力擴大係數 K 를 계산하는 데에는 無限板에 대한 Westergaard-Irwin^(2,3)의 방법, Muskheli-

shvili 및 Leknitskii⁽⁴⁾에 의해 導入되고 간단한 문제에 대해 Timoshenko와 Goodier 共同⁽⁵⁾, Savin⁽⁶⁾, Sih⁽⁷⁾ 등이 적용을 한 有限板에 대한 일반적인 複素函數를 쓰는 방법, 石田^(8,9,10) 등이 쓴 Laurent 展開法, Bowie⁽¹¹⁾ 등이 쓴 選點法(boundary collocation 법, point matching 법), Buchner⁽¹²⁾ 등이 쓴 積分法 등이 연구되어 있으며 최근에는 有限要素法을 이용하는 방법으로 直接法, 重疊法, 局部 energy 법, 全 energy 법, 線積分法, 특수要素를 쓰는 방법 등이 연구⁽¹³⁾되어 있으나 境界條件을 결정하기 어려운 形態의 龜裂先端 등에서는 아직까지 완전한 계산법이 연구되어 있지 못하다.

材料常數 c 및 m 을 결정하기 위해서는 ASTM-E 399 규격으로 정해진⁽¹⁴⁾ 小引張(compact tension; CT) 시험편을 사용하여 일정범위의 應力變動下에서 疲勞試驗을 행하여 $\log \frac{da}{dN} - \log \Delta K$ 의 관계직선을 그려서 縱軸의 截片과 기울기로서 c 및 m 을 구한다.

미국에서는 Rolfe 및 Barsom⁽¹⁵⁾, Gurney⁽¹⁶⁾ 등이 각종 美製鋼鐵에 대해 疲勞試驗을 행하여 c 및 m 값의 上·下限線을 定해 각종 鋼構造物의 設計에 이용하고 있다.

日本에서는 최근까지 이에 대한 종합적인 研究가 없다가 本州-四國 連結橋를 計劃⁽¹⁷⁾하면서 日本土木學會 內에 本州-四國 連結橋 設計를 위한 별도의 위원회를 두어 지금까지 Kitagawa⁽¹⁸⁾, Roshiga 및 Kawahara⁽¹⁹⁾, Gurney⁽¹⁶⁾ 등이 疲勞試驗을 행하고, 또 지금까지의 연구 data를 確率의으로 分析하여 c 와 m 사이의 관계식을 유도하는 등 개별적으로 연구한 결과를 모아⁽²⁰⁾ 이후의 각종 鋼構造物 設計에 이용하고 있다. 여기에 사용된 data의 현황은 표 1.1과 같다.

表 1.1 日本綜合에 사용된 data數⁽²⁰⁾

강철	구분	소재	용접속부	열영향부	비고
SM 41		19개	6개	5개	탄소강
SM 50		18개	5개	9개	저합금강
SM 58		22개	9개	8개	Quench 및 temper 된 고강도강
HT 80		27개	8개	4개	

이외에도 용접방법, 용접入熱量, 용접방향, 鎔接棒의 종류 등을 다르게 했을 경우에 대한 疲勞龜裂 進展舉動의 차이에 대해서도 본 연구원들이 일부 같은 연구를 하면서⁽²¹⁾ 지적한대로 많은 연구가 행해지고 있다.

그리고, 疲勞強度를 결정하기 위해서는 적당한 축척으로 축소된 實物試驗片에 대한 疲勞試驗을 행하여 應力-疲勞壽命의 관계곡선, 즉 S-N 線圖를 그려서 이용하고 있다.

이러한 과정등을 거쳐서 외국에서는 構造物의 疲勞設計指針까지 마련되어 있는바 例로서 미국의 도로교 표준시방서 AASHTO, 영국의 도로교 및 철도교 표준시방서 BS 5400, 일본의 鋼鐵道橋設計規準 등에 이러한 疲勞設計指針이 定해져 있다.

1.2 研究內容

이제 우리도 우리의 재료, 기술수준에 맞는 疲勞龜裂進展舉動을 밝혀 橋梁, 建築物, 鐵塔, 高壓容器, 水門, 海岸 및 海洋構造物, 發電所構造物, 선박, 항공기, 방위산업물 등에 대한 疲勞設計指針을 조속히 마련할 수 있어야 할 것이다.

本 研究는 이와 같은 요구에 부응하여 각종 鋼

構造物의 girder 中 주요형식인 plate girder(飯桁)에서 덮개板(cover plate), 連結板(gusset plate), 垂直補剛材(transverse stiffener) 등 용접 연결부에서의 疲勞強度를 밝혀 보고자 한 것이다.

적당 축척으로 축소된 實物試驗片에 대한 疲勞試驗을 행하여 S-N 線圖를 그리는 방법은 다음의 보고로 미루고 여기서는 우선 Zettlemoyer 및 Fisher가 유도한 應力集中係數 계산식, Paris 및 Sih가 제안한 應力擴大係數의 變動範圍 ΔK 를 계산하는 식중의 係數函數를 계산하기 위해 Zettlemoyer 및 Fisher가 유도한 식, 그리고 (1-1)식 등을 組合하여 實驗에 의하지 않고도 S-N 線圖를 그리는 계산식과 program을 정립하였다. 이것을 서울의 永東大橋, 第3 漢江橋, 春川의 江村橋 등 몇개의 飯桁橋에 적용해 봄으로써 앞으로 설계될 飯桁橋의 疲勞設計指針을 마련하고, 또, 既存 飯桁橋의 疲勞에 대한 耐用年限을 推定할 수 있는 基礎資料의 提供에 이바지하고자 하였다.

이에 앞서 각종 素材, 荷重方向에 대해 가로 및 세로방향 용접을 한 小引張試驗片에 대해 疲勞試驗을 행하여 계산 program중의 data로 쓰여질 材料常數 c 및 m 값을 구하였다.

2. 材料常數 c 및 m 을 구하는 疲勞試驗

2.1 試驗片

1) 母材

두께 30 mm의 SS 41, SS 50, SWS 50, SWS 58 鋼板

2) 鎔接棒

표 2.1 사용된 鎔接棒

母材	SS 41	SS 50	SWS 50, SWS 58
鎔接棒	번호	4220	4316
	직경	φ3.2mm	φ4mm

3) 용접방법

별립角 30°, 홈깊이 15 mm, 先端半徑 5 mm의 U型 鎔込용鎔接으로 하여 1電極 多層 submerged arc 용접을 하였다.

4) 형상 및 치수

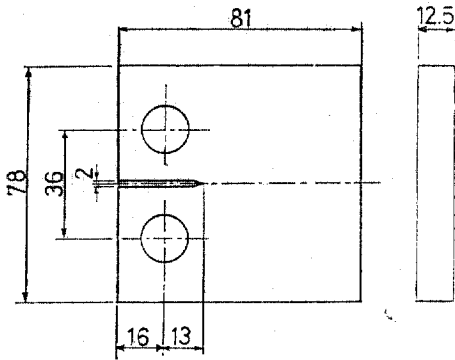


그림 2.1 試驗片의 형상 및 치수

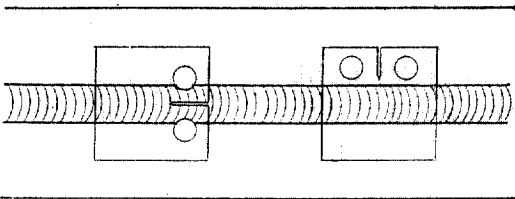


그림 2.2 母板으로부터의 절단

各 素材로서 2개씩, 그림 2.2와 같이 용접방향이 균열방향과 직각(荷重方向에 대해 橫方向) 및 평행(荷重方向에 대해 縱方向)으로 용접한 試驗片 각 2개씩을 만들었다. 母板두께 30 mm로부터 용접된면에도 銲接部가 나타나도록 12.5 mm 두께로 절단 하였다.

2.2 試驗機

江原大學校 工科大學 土木工學科에 保有 중인 25 ton 겸 5 ton 電氣油壓式 疲勞試驗機, dynamic strain amplifier, multicorder, X-Y Recorder를 사용하였다.

2.3 試驗方法

1) 荷重

최대 800 kg, 최소 50 kg 정도의 引張脈動荷重으로 하였다.

2) 豫備疲勞龜裂

龜裂의 先端을 예리하게 하여 疲勞龜裂進展에 關한 여러가지 公式의 적용을 타당하게 하기 위하여 균열선단에 豫備疲勞龜裂을 삽입하였다.

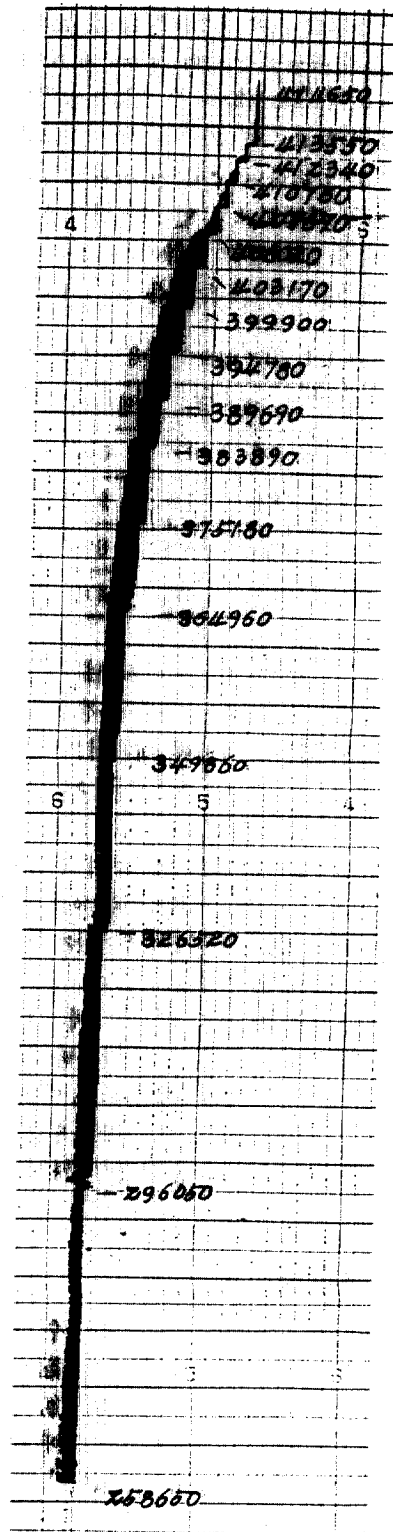


그림 2.3 Multi-corder에 의한 $\epsilon-t$ 곡선의一例

그 방법은 50 kg~1,200 kg의 引張脈動荷重으로 0.4 mm 정도, 50 kg~1,000 kg으로 0.4 mm 정도, 또 50 kg~900 kg으로 0.2 mm 정도, 50 kg~850 kg으로 0.2 mm 정도, 합계 1.6 mm 정도의 豫備龜裂을 삽입하였다. 균열이 쉽게 발생하게 하기 위해 처음은 최대하중을 크게 하였으나 점차 최대하중을 줄여 本 試驗의 荷重에 가까운 條件으로 하였다.

3) 試驗片연마

母材에서 절단해낸 부분에서 육안으로는 母材 熱影響部, 鎔着金屬部가 구분되지 않으므로 이를 구분하기 위하여, 또 절단표면의 잔류응력을 최소로 줄이기 위하여 표면을 1,000 번까지의 emery (sand paper)로 연마하고 nital과 pielic 산의 1:1 혼합액으로 entching 하였다.

4) 龜裂進展의 測定

龜裂進展 前方에 crack gauge를 붙여 multi-corder에 의해 變形-時間(e-t)曲線을 그려서 crack gauge lead線 1本 절단時마다 荷重反復回數를 읽었다.

예비균열 삽입時에는 pitch 0.2 mm, 전체폭 5.1 mm의 crack gauge를 사용하였으나 측정時는 pitch 1 mm, 전체폭 25.2 mm의 crack gauge를 사용하였다. 0.2 mm의 것은 data를 세밀한 간격으로 읽을수 있어 좋으나 전체폭이 좁아 시험편 전체폭을 cover할 수 없기 때문이었다.

2.4 結果整理

1) 應力擴大係數의 變動範圍 ΔK 의 計算 ASTM-E 399 小型引張(compact-tension) 시험편의 疲勞試驗時 이미 널리 이용되고 있는 다음과 같은 式⁽²²⁾을 써서 每 측정점에서 均열선단부근의 應力擴大係數의 變動範圍 ΔK 를 計算하였다.

$$\Delta K = \frac{\Delta P}{B\sqrt{W}} \cdot \frac{2+\alpha}{(1-\alpha)^{3/4}} (0.886+4.64\alpha - 13.32\alpha^2+14.72\alpha^3-5.6\alpha^4) \quad (2-1)$$

ΔP : 荷重變動範圍

B : 試驗片 두께

W : 시험편 폭

α : a/w

a : 均열길이

2) $\log\left(\frac{da}{dN}\right) - \log(\Delta K)$ 회귀직선

측정에서 얻어진 매 측정점 사이에서의 da/dN 와 計算에서 얻어진 ΔK 의 매 측정점 사이의 差 값 ΔK 를 가지고 $\log\left(\frac{da}{dN}\right) - \log(\Delta K)$ 의 회귀직선을 그린다. 縱軸의 절편과 기울기로서 c 및 m 값을 구한다.

3. S-N 線圖 작성을 위한 計算式 유도

3.1 對象試驗片

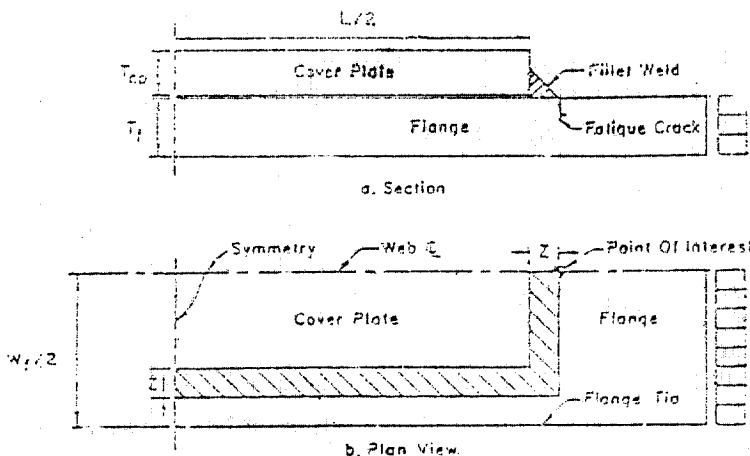
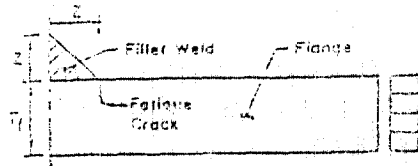
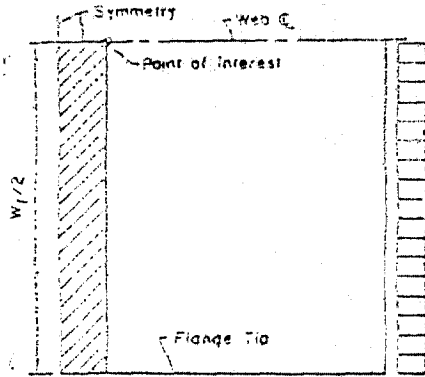


그림 3.1 Cover plate



a. Section



b. Plan View

그림 3.2 Transverse stiffener

3.2 계산식 유도

Zettlemoyer 및 Fisher가 덧개板, 垂直補剛材 및 連結板의 實物 model에서 龜裂이 처음 발생할 위험이 큰 鎔接部分에 대한 應力集中係數를 계산하도록 유도한 식을 應力擴大係數의 變動範圍 ΔK 를 계산하기 위해 Paris 및 Sih가 제안한 식중의 係數函數를 계산하기 위하여 Zettlemoyer 및 Fisher가 유도한 식에 대입하고, 이것을 위 ΔK 식에 대입한 것을 다시 (1-1)식에 대입하여 疲勞壽命 N 에 대해 積分하도록 하였다.

1) 應力集中係數(stress concentration factor) K_t 의 계산

Zettlemoyer 및 Fisher^(23,24)는 다음과 같은 식을 유도하였다.

덧개板

$$K_t = -3.539 \log\left(\frac{Z}{T_f}\right) + 1.981 \log\left(\frac{T_{ep}}{T_f}\right) + 5.798 \quad (3-1)$$

垂直補剛材

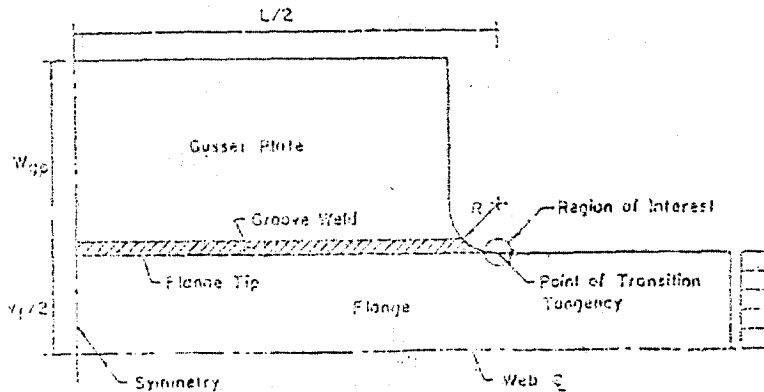


그림 3.3 Gusset plate

$$K_t = 1.621 \log\left(\frac{Z}{T_f}\right) + 3.963 \quad (3-2)$$

連結板

$$K_t = -1.115 \log\left(\frac{R}{W_f}\right) + 0.5370 \log\left(\frac{L}{W_f}\right) + 0.1384 \log\left(\frac{W_{gp}}{W_f}\right) + 0.2848 \left(\frac{T_{gp}}{T_f}\right) + 0.6801 \quad (3-3)$$

Z : fillet 鎔接의 치수

T_{ep} : 덧개板의 두께

T_f : flange 두께

R : 連結板 부착부분 曲率半徑

L : 連結板 부착길이

W_{gp} : 連結板 幅

W_f : flange 幅

T_{gp} : 連結板 두께

2) 應力擴大係數의 變動範圍 ΔK 의 계산

Paris 및 Sih 등은 다음과 같은 식^(23,24,25)을 제안하였다.

$$\Delta K = F_a \Delta \sigma \sqrt{\pi a}, F_a = F_s \cdot F_r \cdot F_w \cdot F_g \quad (3-4)$$

F_s : 龜裂의 形狀函數 (crack shape correction factor)

F_r : 前面의 自由表面函數 (fronk free surface correction factor)

F_w : 有限幅函數 (finite width correction factor)

F_g : 應力傾斜函數 (stress gradient correction factor)

$\Delta \sigma$: 公稱應力의 變動範圍 (nominal, uniform stress range)

a : 龜裂길이 (crack length)

그러나, 鉸釘橋에서는 F_s, F_w, F_r 의 값이 거의 1에 가까운 값⁽²⁵⁾이므로 본 연구에서는 F_r 만을 고려하였다.

Zettlemoyer 및 Fisher는 F_r 를 구하기 위하여 다음과 같은 近似式을 유도하였다^(23,24).

$$F_r/K_s = \frac{1}{1 + \frac{1}{d} \alpha^g} \quad (3-5)$$

d, g : 덮개板, 垂直補剛材, 連結板에 대한 幾何學的 常數로 각각 다음값을 제시하였다^(23,24).

덮개板: 0.1473 및 0.4348

垂直補剛材: 0.3602 및 0.2487

連結板: 1.158 및 0.6051

$$\alpha = a/W_f$$

(3-5)식에 (3-1), (3-2), (3-3)식을 代入하여 F_r 를 계산할 수 있다.

3) 疲勞壽命 N 의 계산

(3-4)식에 위 F_r 를 代入하고, (1-1)식에 代入하여 積分하면

$$N = \frac{1}{c} \int_{a_i}^{a_{cr}} \frac{1}{(\Delta K)^m} da = \frac{1}{c} \int_{a_i}^{a_{cr}} \frac{1}{(F_a \Delta \sigma \sqrt{\pi a})^m} da$$

$$= \frac{1}{c} \frac{1}{\alpha (F_a)^m (\Delta \sigma)^m \pi^{m/2}} (a_i^{-\alpha} - a_{cr}^{-\alpha})$$

여기서, $\alpha = \frac{m}{2} - 1$

$$= c' (\Delta \sigma)^{-m}$$

여기서, $c' = \frac{1}{c} \frac{a_i^{-\alpha} - a_{cr}^{-\alpha}}{\alpha (F_a)^m \pi^{m/2}}$

4) 入力 data

初期龜裂길이 a_i 는 X-ray 및 超音波탐사 등 非破壞檢査에 의해 測定해야 하나 對象으로 택한 鉸釘橋들이 既設이며, 현 실정으로 實測이 곤란하여 假定한 값을 택하였다. 또, 限界龜裂길이 a_{cr} 는 (1-1)식에서 ΔK 대신 材料에 固有한 값, 즉 材料韌性(toughness)值 K_c 를 代入하고 示方書上에 定해진 疲勞壽命(例로서, 일본 鋼道路橋 示方書에는 2×10^6)을 代入하여 da 에 對해 積分함으로써 구할 수 있으나, 韌性值 K_c 를 구하는 實驗資料가 없어 역시 假定한 값을 취하였다.

표 3.1 對象橋梁의 치수

(단위: mm)

교량명 구분 위치		永 東 大 橋					第3漢江橋		江村橋		假 定		
		1	2	3	4	5	1	2	1	2	1	2	3
덮개板	flange 두께 T_{f1}	30	30	38	38		38		36				
	덮개板 두께 T_{f2}	22	28	22	30		15		20				
	鎔接치수 Z_1	9	9	9	9		9		9				
補剛材	flange 두께 T_{f2}	19	22	28	30	38	22	30	26	26			
	鎔接치수 Z_2	6	6	6	6	6	6	6	6	9			
連結板	flange 幅 W_f	700					580	750	580	550	150	200	250
	連結板 幅 W_{r1}										20	25	28
	flange 두께 T_{f3}										20	25	28
	連結板 두께 T_{r1}										50	100	100
	부착부분 曲率半徑 R 부착길이 L										150	300	300

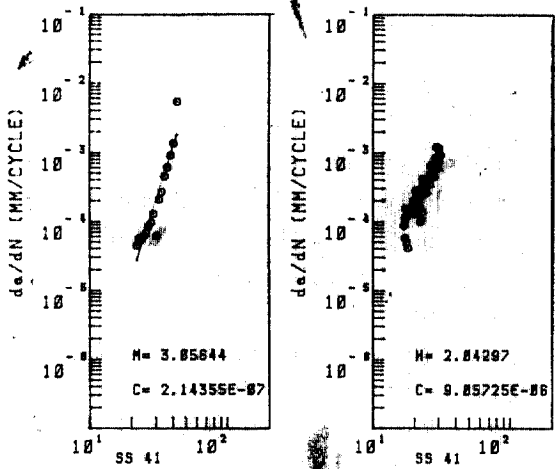
표 3.2 入力 data

Case	위치 구분	덮개板(mm)			補剛材(mm)		連結板(mm)						c	m
		T_{f1}	T_{cp}	Z_1	T_{f2}	Z_2	W_f	W_{cp}	T_{fs}	T_{cp}	R	L		
Case 1		30	15	9	19	6	550	150	20	20	50	150	2.18×10^{-9}	3.0
Case 2		38	28	"	38	"	750	250	28	28	100	300	"	"
Case 3		"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	2.5
Case 4		"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	1.8×10^{-10}	3.0
Case 5		"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	1.8×10^{-12}	4.0

初期龜裂길이 $a_i = 0.2 \text{ mm}$, 限界龜裂길이 $a_{cr} = 100 \text{ mm}$

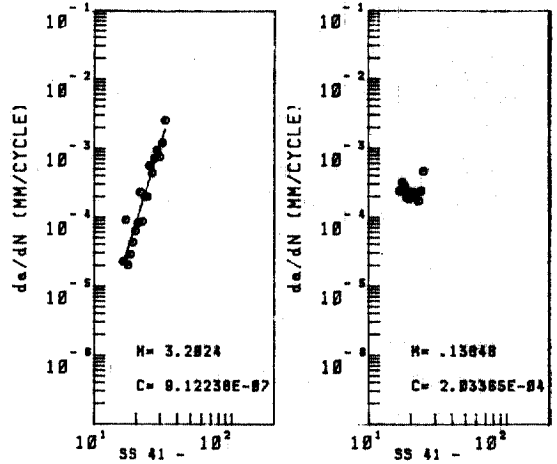
4. 結果 및 考察

4.1 c, m을 그하는 疲勞試驗



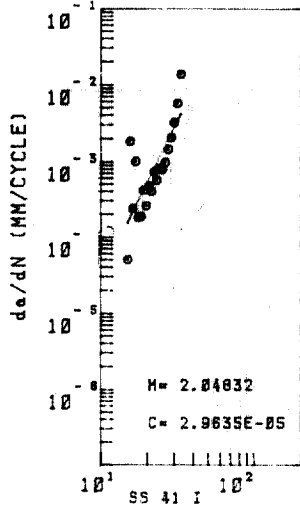
(a) DELTA K (MPA*ME.5) (b) DELTA K (MPA*ME.5)

그림 4.1 SS 41 소재

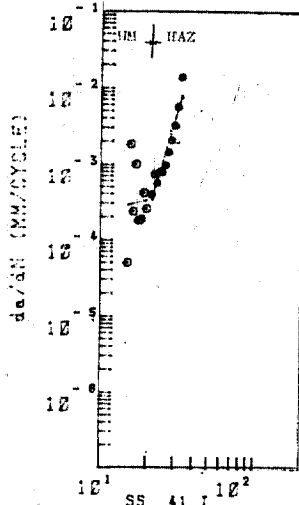


(a) DELTA K (MPA*ME.5) (b) DELTA K (MPA*ME.5)

그림 4.2 SS 41 균열방향과 평행용접

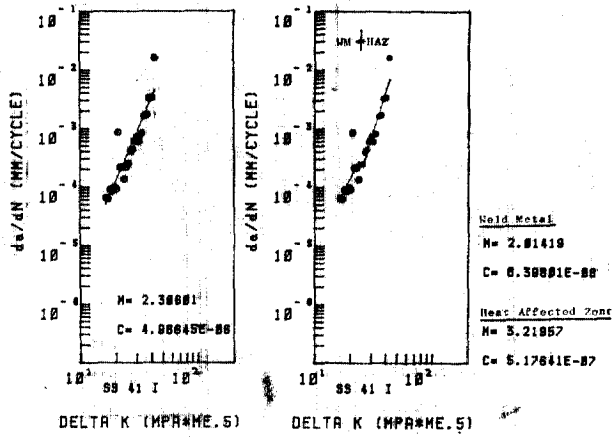


(a) DELTA K (MPA*ME.5)



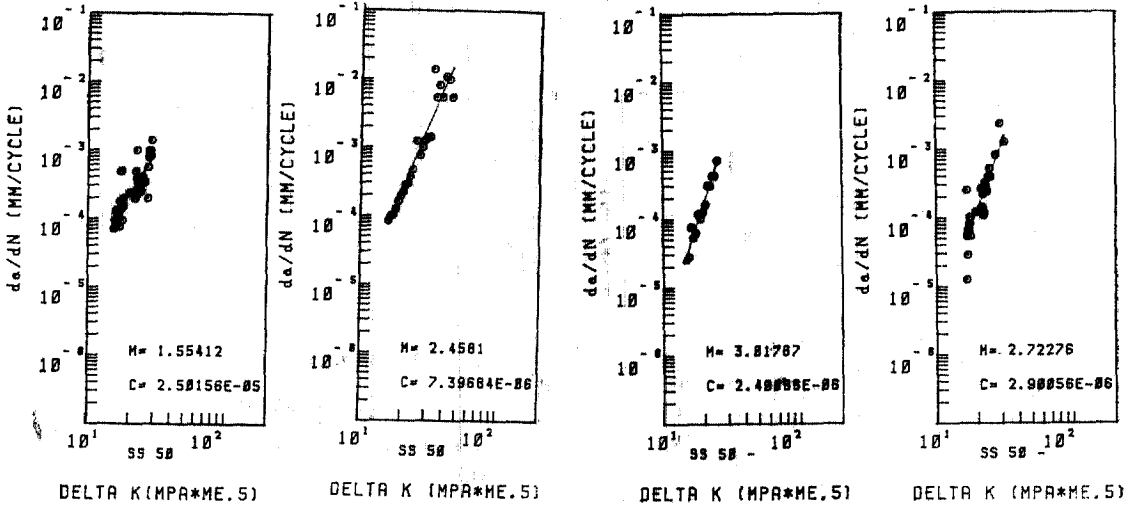
(a') DELTA K (MPA*ME.5)

Hold Metal
H= .264285
C= 2.35959E-04
Heat Affected Zone
H= 3.47847
C= 1.68479E-06



(b) (b')

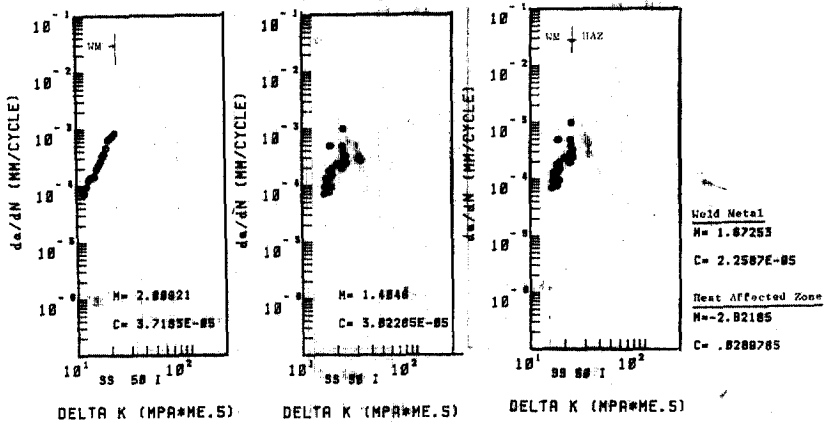
그림 4.3 SS 41 균열방향과 직각용접



(a) (b)

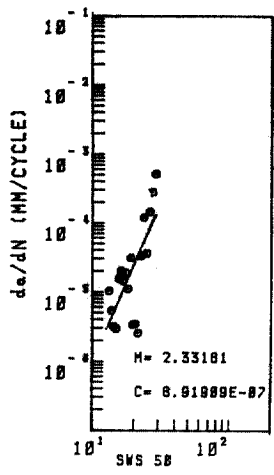
그림 4.4 SS 50 소재

그림 4.5 SS 50 균열방향과 평행용접



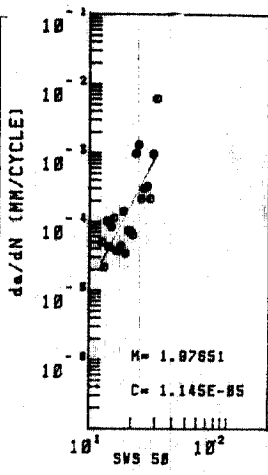
(a) 및 (a') (b) (b')

그림 4.6 SS 50 균열방향과 직각용접



DELTA K (MPA*ME.5)

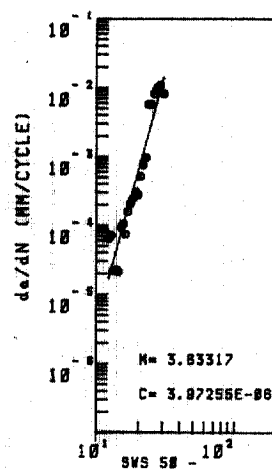
(a)



DELTA K (MPA*ME.5)

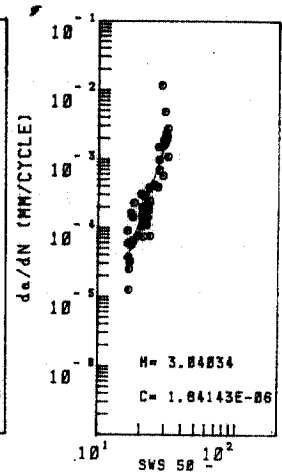
(b)

그림 4.7 SWS 50 소재



DELTA K (MPA*ME.5)

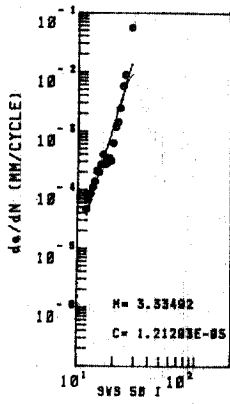
(a)



DELTA K (MPA*ME.5)

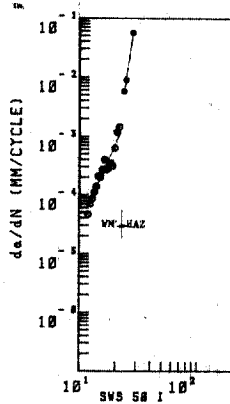
(b)

그림 4.8 SWS 50 균열방향과 평행용접



DELTA K (MPA*ME.5)

(a)

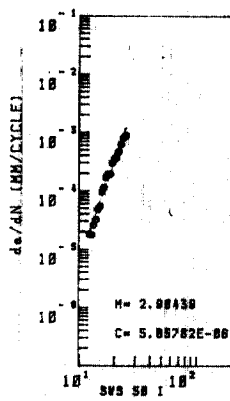


DELTA K (MPA*ME.5)

(a)'

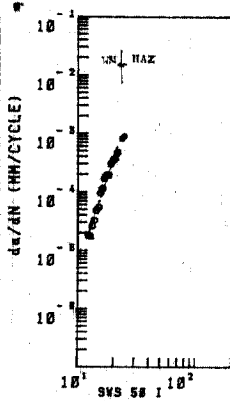
Weld Metal
M = 2.34523
C = 2.72933E-05

Heat Affected Zone
M = 6.58785
C = 5.4838E-08



DELTA K (MPA*ME.5)

(b)



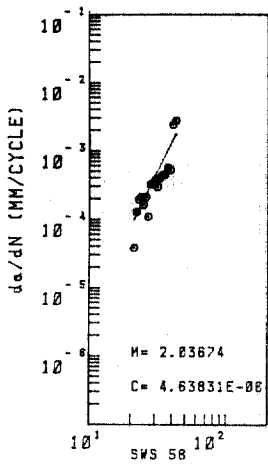
DELTA K (MPA*ME.5)

(b)'

Weld Metal
M = 3.88888
C = 5.84428E-08

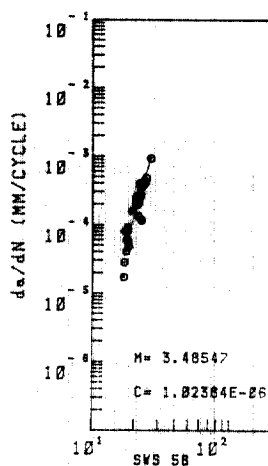
Heat Affected Zone
M = .988835
C = 1.48757E-04

그림 4.9 SWS 50 균열방향과 직각용접



DELTA K (MPA*ME.5)

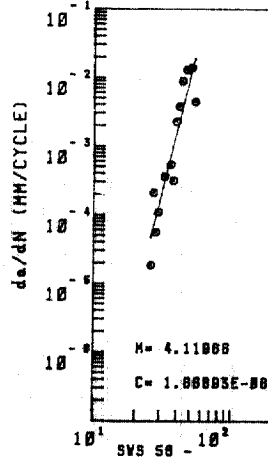
(a)



DELTA K (MPA*ME.5)

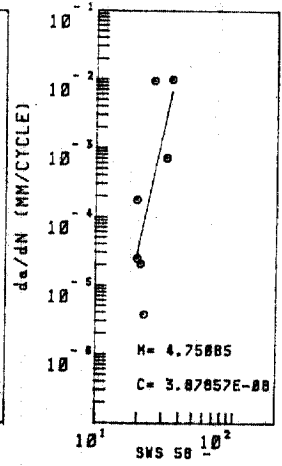
(b)

그림 4.10 SWS 58 소재



DELTA K (MPA*ME.5)

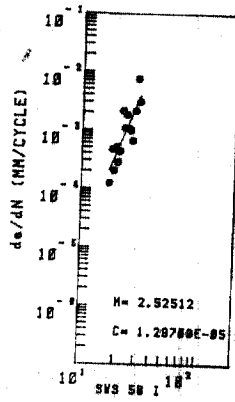
(a)



DELTA K (MPA*ME.5)

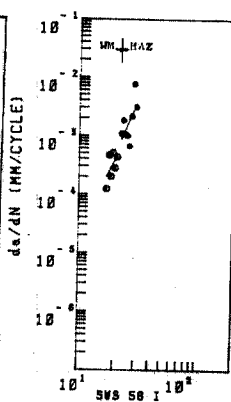
(b)

그림 4.11 SWS 58 균열방향과 평행용접



DELTA K (MPA*ME.5)

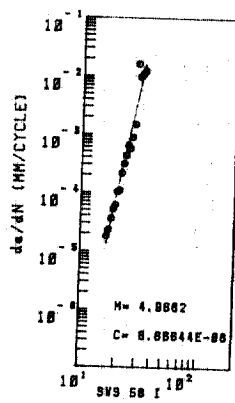
(a)



DELTA K (MPA*ME.5)

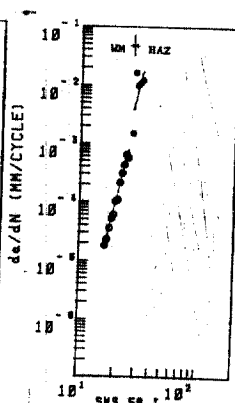
(a)'

Weld Metal
M = 2.81972
C = 2.1879E-05
Heat Affected Zone
M = 2.5188
C = 1.88813E-05



DELTA K (MPA*ME.5)

(b)



DELTA K (MPA*ME.5)

(b)'

Weld Metal
M = 4.28188
C = 2.28818E-07
Heat Affected Zone
M = 4.11184
C = 7.72521E-07

그림 4.12 SWS 58 균열방향과 직각용접

표 4.1 m 값 및 c 값

강철	용접 구분	m 값	c 값	비고	강철	용접 구분	m 값	c 값	비고
SS 41	소 재 (a)	3.05644	2.14355 E-07		SWS 50	소 재 (a)	2.33181	8.91909 E-07	
	" (b)	2.04297	9.05725 E-06			" (b)	1.97651	1.145 E-05	불량
	평행용접 (a)	3.2024	9.12238 E-07			평행용접 (a)	3.63317	3.97255 E-06	
	" (b)	0.14848	2.03365 E-04	불량		" (b)	3.04034	1.84143 E-06	
	직각용접 (a)	2.04832	2.9635 E-05	다소불량		직각용접 (a)	3.33492	1.21293 E-05	다소불량
	" (a) 'WM	0.264295	2.35959 E-04	불량		" (a) 'WM	2.34323	2.72933 E-05	다소불량
	" (a) 'HAZ	3.47847	1.66479 E-06			" (a) 'HAZ	6.56785	5.4636 E-08	불량
	" (b)	2.30601	4.96645 E-06			" (b)	2.90439	5.85782 E-06	
" (b) 'WM	2.01419	8.39801 E-06		" (b) 'WM	3.08688	5.04428 E-06			
" (b) 'HAZ	3.21957	5.17641 E-07		" (b) 'HAZ	0.989935	1.48757 E-04	불량		
SS 50	소 재 (a)	1.55412	2.50156 E-05	불량	SWS 58	소 재 (a)	2.03674	4.63831 E-06	
	" (b)	2.4581	7.39684 E-06			" (b)	3.48547	1.02384 E-06	
	평행용접 (a)	3.01767	2.40086 E-06			평행용접 (a)	4.11966	1.66893 E-08	
	" (b)	2.72276	2.90056 E-06			" (b)	4.75085	3.87657 E-08	
	직각용접 (a) (a)'	2.00921	3.7183 E-05	다소불량		직각용접 (a)	2.52512	1.29709 E-05	다소불량
	" (b)	1.4046	3.02285 E-05	불량		" (a) 'WM	2.01972	2.1879 E-05	"
	" (b) 'WM	1.67253	2.2587 E-05	"		" (a) 'HAZ	2.3188	1.86613 E-05	"
	" (b) 'HAZ	-2.62185	.0289785	"		" (b)	4.9682	8.66644 E-08	
				" (b) 'WM	4.29108	2.20918 E-07			
				" (b) 'HAZ	4.11104	7.72521 E-07			

우선 같은 시험편이라 해서 같은 data가 얻어지지 않고 離散됨을 볼 수 있다. 일본에서 종합한 참고문헌(20)에서도 이것을 지적하고 있으며 따라서 많은 수의 data를 써서 종합 분석해서 이용하고 있다. 다만 일본에서 종합한 것을 보면 SM 41 및 SM 50의 경우가 SM 58 및 HT 80의 경우보다 離散이 큰 것으로 나타나 있다.

표 4.2 日本 綜合의 결과

방 법	강 철	m 값	c 값
Barsom 방법 ⁽¹²⁾ 에 의해 계산된 上限값	SM 41, SM 50	3.0	2.1×10^{-10}
	SM 58, HT 80	2.25	9.7×10^{-9}
Barsom 방법에 의해 계산된 下限값	SM 58, HT 80	2.25	4.0×10^{-9}
c 및 m의 연구 결과를 확률적으로 분석한 中央값	SM 41, SM 50	4.0	1.8×10^{-12}
	SM 58, HT 80	3.0	1.6×10^{-10}
c 및 m의 연구 결과를 확률적으로 분석한 上限값	SM 41, SM 50	4.0	4.6×10^{-12}
	SM 58, HT 80	3.0	2.7×10^{-10}

SS 41, SS 50, SWS 50 및 SWS 58의 소재에서 불량하다고 생각되는 data를 제외하면 최소 m 값은 2.01419, 최소 c 값은 2.14355×10^{-7} 이고 최대 m 값은 3.63317, 최대 c 값은 9.05725×10^{-6} 이다. m 값은 최대값이 표 4.2의 Barsom 방법에 의한 값보다 크나 확률방법에 의한 값의 범위는 벗어나지 않고 있다. 그러나, c 값은 표 4.2의 어느 경우에 비해서도 훨씬 큰 값을 나타내고 있다.

SWS 58의 鎔接 時는 불량하다고 생각되는 data를 제외하면 최소 m 값은 4.11104, 최소 c 값은 1.66893×10^{-8} 이고, 최대 m 값은 4.9682, 최대 c 값은 7.72521×10^{-7} 이다. 일본은 高強度 鋼에서 m 값이 적을 때 비해 鎔接時 우리는 m 값이 오히려 더 커서 표 4.2의 범위를 벗어나고 있다. c 값은 SS 41, SS 50, SWS 50, SWS 58의 소재의 경우보다는 덜하나 역시 큰 값을 나타내고 있다.

이와 같이 c 값이나 m 값이 크게 나타나는 것은 鋼鐵의 靱성이 적어 龜裂의 進展이 빨라지기 때문이라고 해석함이 보통이나 상당히 결론을 내리려 하지는 않으려 한다. 試驗片에 사용된 鋼鐵의 화학성분 분석 및 靱性值 實驗을 계획하고

있으므로 결론은 이 이후로 미루려한다.

4.2 S-N 線圖

모든 경우 덮개板은 다른 두 부분보다 曲線이 左側으로 치우쳐 疲勞強度가 상당히 낮음을 볼 수 있다.

case 1과 case 2를 비교해 보면 試驗片의 치수에는 그다지 영향을 받지 않으며, 다만 덮개

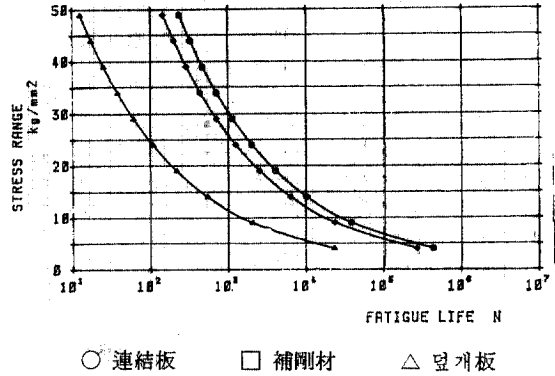


그림 4.13 Case 1

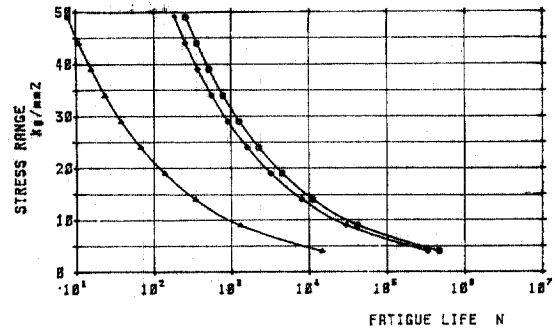


그림 4.14 Case 2

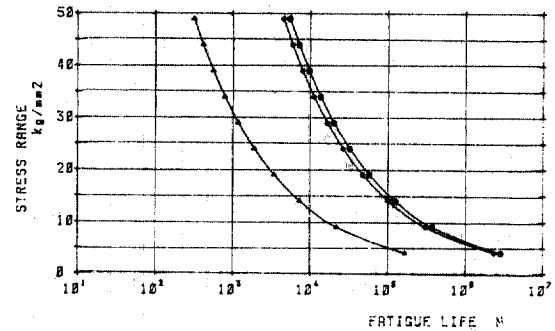


그림 4.15 Case 3

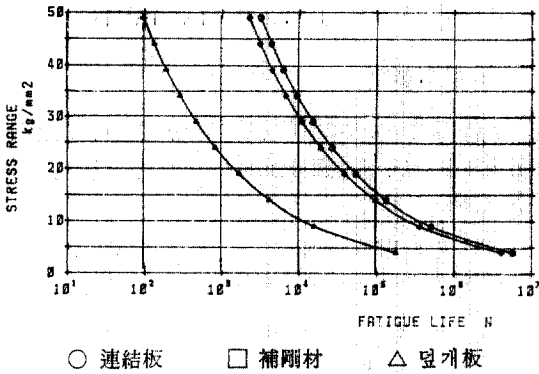


그림 4.16 Case 4

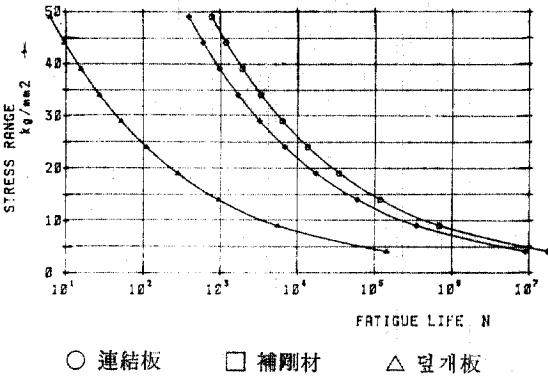


그림 4.17 Case 5

板의 경우 case 2에서와 같이 덮개板 두께가 커짐에 따라 疲勞強度가 낮아짐을 볼 수 있다.

c 및 m 값에 대해서는 매우 민감한 영향을 받고 있다. case 2와 case 4를 비교해 보면 case 4와 같이 c 값이 적어질수록 疲勞強度가 훨씬 커짐을 볼 수 있다. case 2와 case 3를 비교해 보면 case 3과 같이 m 값이 적어질수록 疲勞強度가 훨씬 커짐을 볼 수 있다. 또, m 값이 적어질수록 S-N 곡선의 경사가 급해져서 應力範圍의 차이가 커져도 疲勞壽命의 차이는 줄어드는 것을 볼 수 있다.

c 및 m 값으로 實驗에서 얻어진 값을 취하면 疲勞強度가 너무나 낮아져서 그 값을 취하지 못하고 假定된 값을 취하게 된 것은 매우 유감이다. 좀 더 정확한 c 및 m 값을 구하기 위한 노력이 진행중이며, 또 實物試驗片에 대한 疲勞試驗을 행하여 實驗에 의한 S-N 線圖를 그려서 비교해 볼 계획으로 있어 이 이후에 좀 더 명확한 결과가 얻어질 수 있으리라 본다.

5. 結 論

鋼構造物의 girder 중 主要形式인 板桁에서 덮개板, 連結板, 垂直補剛材 등 용접연결부를 포함하는 實物을 modeling 하여 直接 疲勞試驗을 행하지 않고서도 계산에 의해 S-N 線圖를 그려서 疲勞強度를 검토할 수 있는 계산식 및 program을 정립하였다. 이것을 서울의 永東大橋, 第3 漢江橋, 春川의 江村橋 등에 적용해 보았다.

이에 앞서 각종 素材, 荷重方向에 대해 가로 및 세로방향 용접을 한 小引張試驗片에 대해 疲勞試驗을 행하여 계산 program 중의 data로 쓰여질 材料常數 c 및 m 값을 구하였다.

이 결과 다음과 같은 결과들을 얻었다.

덮개板의 경우 다른 두 부분보다 疲勞強度가 매우 낮았다.

덮개板의 경우 그 두께가 커지면 疲勞強度가 상당히 낮아지는 외에는 치수에 그다지 큰 영향을 받지 않으며, c 및 m 값에는 매우 민감한 영향을 받고 있음을 알 수 있었다.

c 값 및 m 값이 적어질수록 疲勞強度가 상당히 커지며, m 값이 적어지면 S-N 곡선의 경사가 매우 급해짐을 알 수 있었다.

본 연구중의 실험에서 얻은 c 및 m 값은 정확한 값인지, 아직 명확한 결론을 내리지 못하였으나 이를 위해 계속 노력 중이며, 實物試驗片에 대한 疲勞試驗이 진행 중에 있으므로 다음 연구 보고서에서는 좀 더 명확한 결론이 얻어지리라 생각된다.

이와 같은 연구가 계속되어 더 많은 data가 集積되면 앞으로 設計될 鉸桁橋의 疲勞設計指針을 마련하고, 또 既存 鉸桁橋의 疲勞壽命을 推定할 수 있는 基本 pattern이 提供되리라 사료된다.

감사의 말

本 研究는 韓國科學財團 1984~1985年 新進研究의 支援으로 行해진 第1次年度分으로 財團當局과 審査陳여러분께 감사드립니다.

아울러 추운 겨울부터 유난히도 무더웠던 7月末까지 實驗에 임히준 江原大學校 大學院 土木工學科 大學

院生 김남형, 김정태, 이용재, 이승하 대학원 졸업생,
김경진군들께도 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Paris, P.C. and Erdogan, F.: "A Critical Analysis of Crack Propagation Laws", Transaction of American Society of Mechanical Engineers; *Journal of Basic Engineering*, Vol. 85, Series D., No. 3, 1963, pp. 528~534.
2. Irwin, G.R.: "Analysis of Stresses and Strains near the End of a Crack Traveling a Plate", *Tran. Am. Soc. Mechanical Engrs.*, J. Appl. Mech., 1957.
3. Westergaard, H.M.: "Bearing Pressures and Cracks", *Tran. Am. Soc. Mechanical Engrs.*, J. Appl. Mech., 1939.
4. Muskhelishvili, N.I.: "*Some Basic Programs of Mathematical Theory of Elasticity*", (Published in Russia in 1933), English Translation, P. Noordhoff and Co., 1953.
5. Timoshenko, S. and Goodier, J.N.: "*Theory of Elasticity*", McGraw Hill, New York, 1951.
6. Savin, G.N.: "*Stress Concentration around Holes*", Pergamon, New York, 1961.
7. Sih, G.C., Paris, P.C. and Erdogan, F.: "Crack Tip Stress Intensity Factors for Plane Extension and Plate Bending Programs", *Trans. Am. Soc. Mechanical Engrs.*, J. Appl. Mech., 1962.
8. 石田誠, "た圓孔を有する帶板の引張", 日本機械學會誌, Vol. 21, No. 107, 1955.
9. 石田誠, "た圓孔を有する半無限板の引張", 日本機械學會誌, Vol. 22, No. 123, 1955.
10. 石田誠, "任意の直線龜裂群を持つ板における應力拡大係數の解析", 日本機械學會誌, Vol. 35, No. 2 27, 1969.
11. Bowie, O.L.: "Rectangular Tensile Sheet with Symmetric Edge Crack", *Trans. Am. Soc. Mechanical Engrs.*, J. Appl. Mech., Vol. 31, 1964.
12. Sadowsky, M.A. and Strenburg, F.G.: "Stress Concentration around a Triaxial Ellipsoidal Cavity", *Trans. Am. Soc. Mechanical Engrs.*, J. Appl. Mech., 1949.
13. 鄭榮和, "應力擴大係數의 計算에 關한 基礎", 江原大學校 研究論文集, 科學: 技術研究, 第18輯, 1983, 9.
14. 白鳥正樹, 三好俊郎, 松下久雄, "數値破壊力學", 實數出版株式, 1980. 5, pp. 219~225.
15. Rolfe, S.T. and Barsom, J.M.: "*Fracture and Fatigue Control in Structures*", Prentices-Hall Inc., 1977, pp. 236~239.
16. Gurney, P.R.: "*Fatigue of Welded Structures*", Second Edition, Cambridge University Press, 1979, pp. 53~64.
17. Japan Society of Civil Engineers, "*Fatigue Design for Honshu-Shikoku Bridges*", 1974.
18. Tajima J., Okukawa A. and Tanaka Y.: "*Fatigue Design Criteria on Honshu-Shikoku Suspension Bridges*", 10th Congress of IABSE, Sept., 1976.
19. Matsuzaki Y., Shimokawa H. and Murakami K.: "*Fatigue Design of Honshu-Shikoku Bridges in Japan*", Colloquium IABSE, March 1982.
20. Kitagawa H.: "Fracture Mechanics Analysis of Fatigue Crack Growth (Part 1)", *Journal of the Society of Materials Science*, Japan, Vol. 26, No. 284, 1975. 5, pp. 88~99.
21. Roshiga F. and Kawahara M.: "A Proposed Design Basis with Special Reference to Fatigue Crack Propagation", *Journal of the Naval Architects in Japan*, No. 133, 1973. 6, pp. 305~312.
22. Okumura T., Nishimura T., Miki C. and Hasegawa K.: "Fatigue Crack Growth Rates in Structural Steels", *Proc. of JSCE*, No. 322, June 1982, pp. 175~178.
23. 張東一, 鄭榮和, "銲接이음한 構造鋼의 小引張試驗片에서의 疲勞龜裂進展學動", 大韓土木學會論文集, Vol. 4, No. 2, 1984. 6, pp. 133~142.
24. 岡村弘亡, 林郁產, 中澤一, 國尾武, "破壊力學 實驗法", 朝倉書店, 1984. 5, pp. 242~245.
25. Srawley, J.E.: *Int. J. of Frac. Mech.*, Vol. 12, 1976, pp. 475~476.
26. Zettlemoyer, N. and Fisher J.W., "*Stress Gradient Correction Factor for Stress Intensity at Welded Stiffeners and Cover Plates*", Welding Research Supplement, 1977. 12, pp. 393-s~398-s.
27. Zettlemoyer, N. and Fisher, J.W., "*Stress Gradient Correction Factor for Stress Intensity at Welded Gusset Plates*", Welding Research Supplement, 1978. 2, pp. 57-s~62-s.
28. Zettlemoyer, N. and Fisher, J.W.: "*Stress Gradient and Crack Shapes Effects on Stress Intensity at Welded Detail*", Welding Research Supplement, 1978. 8, pp. 246-s~250-s.

(接受: 1985. 9. 10)