構造用 軟鋼材에 대한 疲勞硬化의 影響에 관한 硏究

A Study on the Effect of the Cyclic Hardening by Fatigue in Structural Mild Steel

張 東 一*
Chang, Dong Il
龍 煥 鮮**
Yong, Hwan Sun
黃 潤 菊***
Hwang, Yoon Koog

Abstract

In order to obtain the necessary data for the safety maintenance, repair, and reinforcement of steel structures, experiment was carried out to examine the mechanical capacity and toughness variation for steel with service history and without.

In this paper, hardening and embrittlement by fatigue accumulation, and the decrease of toughness was examined and weld that was commonly used as the connection method of steel structure was also examined. It was found that hardening and embrittlement have more effect on the decrease of toughness than the increase of strength. Such a tendency was also similary state in case of weld. And it was found that, in the weld of steel with service history and without, embrittlement was observed at normal temperature.

要 旨

鋼構造物의 安全維持 및 補修補强에 필요한 資料를 얻기 위해, 供用履歷을 갖는 鋼材와 갖지 않는 鋼材의 機械的 性能 및 靭性變化를 實驗的 方法을 通해 비교검토 하였다.

本 硏究에서는, 供用中에 받은 疲勞累積에 의한 硬化 및 脆化靭性低下등을 검토하였으며, 파악된 사항이 鋼構造物 連結方法에 사용되고 있는 鎔接에 미치는 영향을 고찰하였다.

그 結果, 硬化 및 脆化의 영향은 强度增加 보다 靭性低下에 더 많은 작용을 하였으며, 鋼構造物 連結方法으로 채택한 鎔接에서도 같은 경향을 보였다. 또한 供用履歷을 갖는 鋼材와 갖지 않는 鋼材를 鎔接하였을 경우에는 常溫에서도 脆性을 나타내고 있음을 알 수 있었다.

1. 序 論

鋼은 풍부한 靭性과 塑性變形의 特性으로 인해 훌륭한 構造材料로 인식되어 왔으나 橋梁 및 構造材로서 多樣한 荷重條件과 環境條件에 放置되어 있다. 이러한 狀態에서 安全性 및 供用性에 關係되는 具體的인 現狀은 彈性傷失에 대한 抵抗性으로서 强度와 破壞進前에 대한 抵抗性인 靭性으로 大別할 수 있으며 彈性傷失에 대해서는 應力水準이 降伏應力에 관계되므로 設計

* 正會員・漢陽大學校 工科大學 土木工學科 敎授
** 正會員・大林專門大 土木工學科 助敎授
*** 正會員・漢陽大學校 工科大學 土木工學科

時 考慮가 가능하지만 靭性에 관계되는 모든 要素들은 항상 不確實한 要因으로서 應力-變形擧動만으로는 規制할 수가 없다[1,2,3].

鋼材는 疲勞硬化, 加工硬化 등에 의해 延性減少現狀과 材料的 缺陷, 鎔接이음時의 殘留應力등에 의해 靭性不足現狀이 發生하고 이러한 部分에 低溫, 衝擊 및 缺陷으로서 龜裂이 존재하는 경우 龜裂先端의 應力은 급격히 增加하고 급속히 傳播되어 部材破損을 유발한다[4]. 더우기 鋼構造物이 長期間의 變動荷重을 받아 供用履歷을 갖는 경우에는 疲勞龜裂進前에 의한 不安定한 龜裂傳播의 위험성이 증가하며 應力設計方法의 應力-變形擧動이 적용되지 않는 不安定破損에 이르게 된다. 또 실제로 老朽橋梁의 교체例에서 통과하중의 증가에 의한 耐荷力傷失을 제외하고는 彈性傷失이 원인이 되어 橋梁의 主構造材를 교체한 例는 거의 없다[5,6].

이에 따라 長期間의 履歷을 갖는 鋼材의 破壞機構를, 원인과 양식이 다양한 破壞形式에 대해 완전한 解析을 할 수는 없으나 不安定破損을 막기위한 各國의 規定[7]과 實驗結果로 얻어지는 재료의 特性値를 비교할 수 있도록 자료의 축적에 기여하며 補修補强에 사용되고 있는 용접의 신뢰도를 확인하고자 한다. 이의 수행 방법으로는 실험적방법[8,9]과 수식적인 추정방법[10]이 利用되어 왔다.

본 硏究에서는 인위적으로 반복작용시킨 履歷效果가 아닌 실제 供用履歷을 갖는 鋼材에 대해 疲勞硬化의 정도 및 疲勞硬化가 機械的 性能 및 靭性에 어떠한 影響을 주는가를 실험적 방법을 통해 검토하고 補修補强時 鎔接이 갖는 역할을 확인하였다.

2. 龜裂傳播機構

鋼材는 反復應力(repeat stress)을 지속적으로 받는 경우 疲勞에 의한 加工硬化現狀이 누적되고 鋼材自體의 變形能力이 硬化되어 원래의 材質과 달라진다. 이러한 현상은 機械構造에서 疲勞現狀에 관한 硏究中에 밝혀진 바 있다.

變形能力의 감소는 變形이 局部에 限定되게 하고 이때의 破壞擧動은 非線形的으로 된다. 低靭性破壞現狀으로서 缺陷(龜裂)을 갖는 鋼材에 있어서 龜裂의 傳播는 龜裂先端의 局部應力이 作用應力 및 龜裂길이에 관계된다. Irwin의 理論에 의하면, 龜裂先端에서 先端半經이 $\rho \to 0$로 될 때 局部應力이 무한히 增加하여, 應力이 $\sigma_{yy} > \sigma_y$로 되어 龜裂先端에 塑性域이 형성되며, 應力이 계속 증가하면 龜裂이 不安定해지고 龜裂擴張에 의한 에너지解放率이 塑性變形에너지보다 크게 될 때 龜裂은 새로운 表面을 형성하며 進前한다. 龜裂이 진전하기 위한 限界에너지를 求하기 위하여, 균열이 생기기 이전의 塑性變形에너지를 W_p^I라 하면[11]

$$W_p^I = \int_0^r 2\pi r E(r)\, dr \qquad (2\text{-}1)$$

여기서

$E(r)$: 에너지密度

r : 塑性域의 크기

이때 龜裂先端에서 거리 r에 있어서 塑性變形率을 $\varepsilon(r)$이라 하면 $E(r)$은

$$E(r) = \frac{\sigma_0[\varepsilon(r)]^{n+1}}{n+1} \qquad (2\text{-}2)$$

여기서

n : 變形硬化指數[12]

σ_0 : 作用應力

따라서

$$W_p^I = \frac{2\pi\sigma_0}{n+1}\int_0^r [\varepsilon(r)]^{n+1} dr \qquad (2\text{-}3)$$

여기서

$\varepsilon(r) = \varepsilon_c\left(-\frac{r}{r_c}+1\right)$ (ε_c : 龜裂이 擴張하기 始作하는 限界變形率, r_c : 龜裂이 擴張하기 시작할 때의 限界塑性域의 크기)

$$W_p^I = \frac{2\pi\sigma_0\varepsilon_c^{n+1}}{n+1}\int_0^{r_c} r\left(1-\frac{r}{r_c}+1\right)^{n+1} dr \qquad (2\text{-}4)$$

또한 龜裂先端에서 단위길이의 새로운 龜裂을 형성하는데 필요한 부가적인 塑性變形에너지를 W_p^{II}라 하면

$$W_p^{II} = \frac{2\sigma_0\varepsilon_c^{n+1}r_c}{(n+1)(n+2)} \qquad (2\text{-}5)$$

合成塑性變形에너지는 $W_p = W_p^I + W_p^{II}$로 不安定한 龜裂이 擴大되기 위한 局部變形에너지解放率 $G_I = W_p$라 할 수 있고 K_{IC}는 平面變形率靭性(plane-strain toughness)의 관계로[13]부터

$$K_{IC} = \left[\frac{2E\sigma_0}{(1-\nu^2)(n+1)(n+2)}\right]^{\frac{1}{2}} \varepsilon_c^{\frac{n+1}{2}} r_c^{\frac{1}{2}} \qquad (2\text{-}6)$$

式(2-6)은 安定龜裂이 不安定한 傳播를 하기 위한 限界값으로서 應力, 포아슨比, 變形硬化指數 極限變形率, 限界塑性域으로서 表示된다.

3. 實　驗

3.1 實驗材料

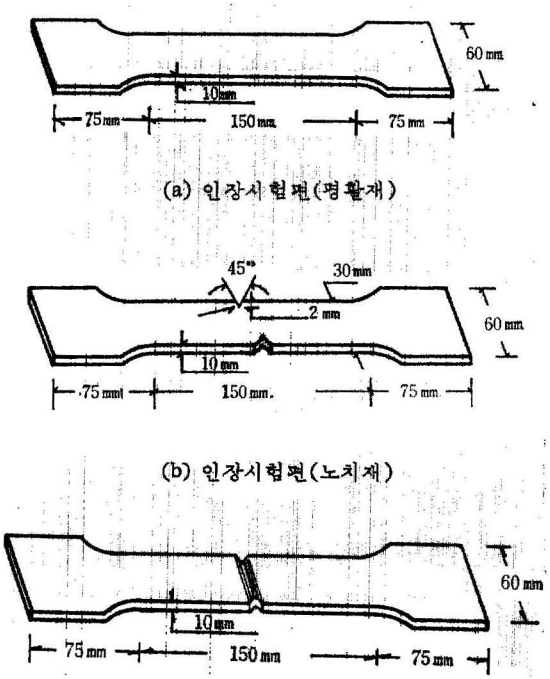
實驗材料는 供用履歷을 갖는 鋼材로서 近年에 撤去된 京釜線安養川鐵橋의 리벳板桁(이하 舊鋼材)이며, 銃彈에 의한 彈痕이 있는 것으로 보아 架設時期가 6.25事變以前으로 생각되며 撤去時까지 30年以上 供用履歷을 갖고 있는 것으로 추정된다. 試驗材는 板桁의 해체시 플랜지리벳을 가스절단하는 관계로 플랜지를 試驗片으로 사용하지 못하였고 腹部板 역시 端部를 제외하고는 재사용하는 관계로 支點部의 腹部板으로부터 채취하였다. 試驗片의 製作은 引張方向과 主應力方向 및 豫想龜裂傳播方向과 試驗片의 노치方向을 一致시키기 위하여 桁軸에 대하여 45°方向으로 채취하였다. 이와 대비 試驗片으로는 浦項製鐵産 構造用 軟鋼으로서 SB 41(이하 新鋼材)을 擇하였으며 試驗方向을 舊鋼材와 일치시키기 위하여 壓延方向에 대해 45°方向으로 試驗片을 채취하여 材料의 塑性異方性의 影響을 除去하였다[14,16].

3.2 實驗方法

供用履歷을 갖는 鋼材의 破壞擧動을 파악하기 위하여 履歷事項이 있는 鋼材와 없는 鋼材에 대해 靜的引張試驗 및 衝擊試驗을 실시하고, 鎔接性파악을 위해서도 같은 실험을 실시하여 靜的引張試驗에서는 應力-變形擧動, 斷面收縮率, 局部伸張, 破斷時變形率 등을 測定比較하였으며 靭性低下狀態를 파악하기 위하여 衝擊試驗을 통해 衝擊吸收에너지의 溫度變化에 따르는 軟脆性遷移關係, 破面觀察에 의한 破面遷移關係 등을 測定比較하였다.

靜的引張試驗片은 新鋼材와 舊鋼材로서 그림 3.1.a 및 그림 3.1.b와 같고 鎔接引張試驗은 新鋼材와 新鋼材의 鎔接과 新鋼材와 舊鋼材를 鎔接을 하여 제작(그림 3.1.c)하였으며 平滑材와 노치材(양면노치, 角 45°, 길이 3 mm, 노치선단반경 ρ=0.25 mm)를 Tipper 方法[15]에 의해 各各 3개씩 총 18개로서 full thickness tensile test를 하였으며 應力變形擧動은 strain gage(日本 Shinko社製, gage length 5 mm, Ohms 120±0.2)를 부착하여 측정하였다. 負荷速度는 約 3 kg/sec의 低 strain rate로 하여 强度, 變形率, 斷面收縮에 미치는 荷重速度에 의한 영향을 最小限으로 減少시켰다.

衝擊試驗片은 그림 3.2.a~b와 같은 형상으로 KS B 0809 제3호 標準試驗片(노치角 45°, 노치선단반경 ρ=0.25 mm)으로 新鋼材와 舊鋼材에서 한 溫度當 4개씩 4개溫度(−25°C, 0°C, 10°C, 20°C)에서 衝擊試驗을 실시하고, 鎔接衝擊試驗片은 標準노치로서 노치의 위치를 鎔接루우트(root)에 設置한 것과 鎔接비이드(bead)를 제거하고 비이드 中央部에 설치한 試驗片으로서 각각 3개씩 4가지 溫度에서 吸收에너지를 測定하였다. 이때 溫度의 調節은 incubator(美國 Hotpactc社製, 溫度調節範圍 −30°C~60°C)를 사용하였으며 衝擊試驗機는 Charpy 衝擊試驗機(日本東京測機社製容量 30kg-m)를 사용하고 引張試驗은 U.T.M (Universal Testing Machine)을 사용하였다.

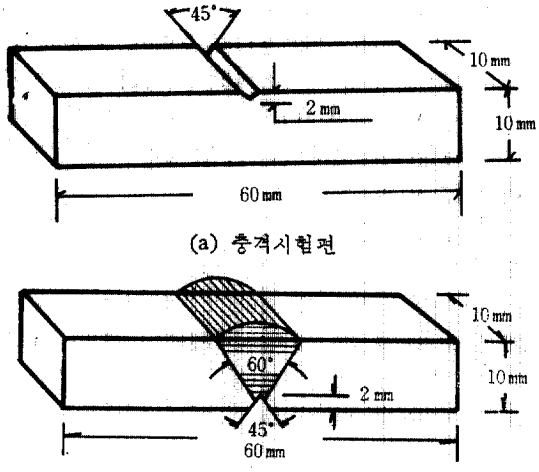


(a) 인장시험편(평활재)

(b) 인장시험편(노치재)

(c) 용접인장시험편(노치재)

그림 3.1 인장시험편형상



(a) 충격시험편

(b) 용접시험편

그림 3.2 충격시험편형상

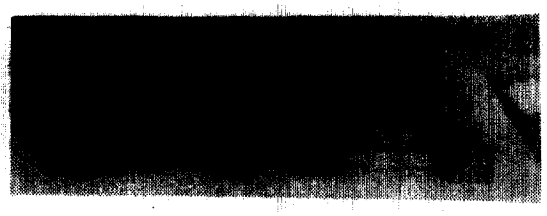


사진 1. 인장시험편

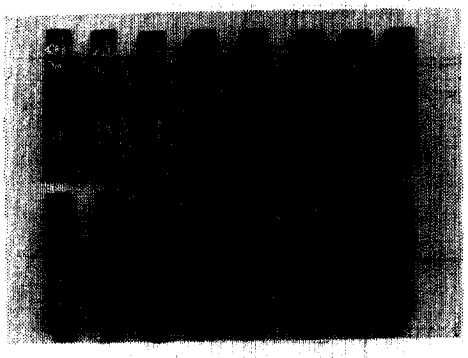


사진 2. 충격시험편

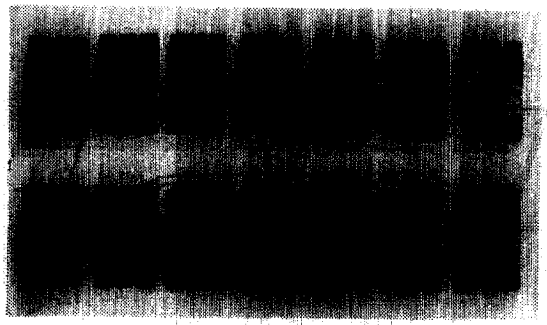


사진 3. 용접 충격시험편

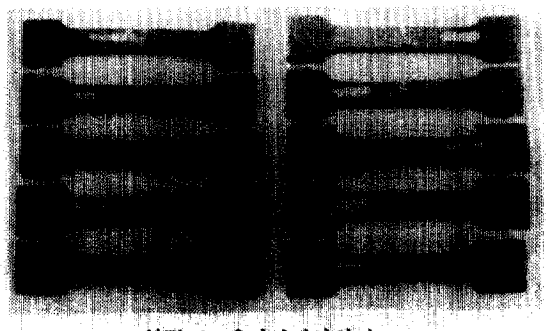


사진 4. 용접인장시험편

3.3 實驗測定値

表 3.1 강재의 화학성분

(%)

원소 / 강재	C	Si	Mi	T	S
신강재	0.28	0.07	0.76	0.015	0.016
구강재	0.31	0.06	0.43	0.023	0.050

表 3.2 경도 측정치

측정방법 / 온도		상 온	400°C	700°C	1000°C
Shore (Hs)	신강재	22.5	24	22	21
	구강재	20.0	21	20.5	20.5
Rockwell(H_R)	신강재	68.5	76	71	71
	구강재	68	73	66.5	67

表 3.3 정적인장시험 결과

종류	구분	최대하중 (kg)	원단면적 (mm^2)	파단시 단면적 (mm^2)	단면수축율 (%)	공칭응력 (kg/mm^2)	진응력 (kg/mm^2)
신강재 평활	1	13,300	294.9	134.3	54.46	45.10	99.03
	2	13,150	299.4	112.5	62.42	43.92	116.88
	3	13,150	292	119.3	51.94	45.03	110.23
신강재 노치	1	10,430	238.8	197.3	17.38	43.67	52.85
	2	10,980	239.4	200.4	16.28	45.86	54.78
	3	10,880	238.6	200.5	15.98	45.59	54.27
구강재 평활	1	13,420	302.5	138.8	54.41	44.69	96.70
	2	13,600	302.0	155.3	48.58	45.04	87.58
	3	13,520	305.5	144.5	52.71	44.26	93.59
구강재 노치	1	10,800	242.5	215.5	11.13	44.54	50.10
	2	10,600	242.5	203.9	16.25	43.71	52.19
	3	10,400	240.5	206.4	14.19	43.24	50.39

表 3.4 정적인장시험의 변형률

강재 / 하중(kg)	신강재평활			신강재노치			구강재평활			구강재노치		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
900	230	220	230	240	225	310		240	170	140	300	80
1,800	390	355	375	390	340	410		395	315	270	455	195
2,700	520	525	540	510	468	615	280	550	460	410	585	330
3,600	690	635	700	670	590	685	415	690	525	680	740	470
4,500	825	775	805	810	705	860	545	840	753	720	935	595
5,400	990	920	990	960	825	975	665	1,013	880	820	1,090	820
6,300	1,135	1,065	1,150	1,370	985	1,145	795	1,095	1,020	960	—	1,390
7,200	1,350	1,265	1,265	2,120	1,155	3,630	955	1,275	1,085	1,115	—	—
8,100	1,415	1,390	1,330	—	—	—	1,040	1,405	1,295	—	—	—
9,000	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
파단강도	13,300	13,150	13,150	10,430	10,980	10,880	13,420	13,600	13,520	10,800	10,600	10,400

表 3.5 용접인장시험편의 시험결과

종류 / 구분		최대하중 (kg)	원단면적 (mm²)	파단시 단면적 (mm²)	단면수축율 (%)	공칭응력 kg/mm²	진응력 kg/mm²
신—신	1	13,950	235.24	210.41	10.56	59.30	66.29
	2	14,350	236.24	211.51	10.47	60.74	67.85
	3	13,900	237.35	217.62	8.31	58.56	63.87
신+구	1	13,900	243.18	220.19	9.45	57.16	63.12
	2	13,500	241.39	215.48	10.73	55.93	62.65
	3	13,250	236.18	219.55	7.03	56.10	60.35

*신 : 신강재, 구 : 구강재

表 3.6 충격흡수에너지

(°C)(kg-m)

강재 / 온도		20	0	10	20
신강재	1	2.83	7.16	8.38	10.65
	2	2.57	6.24	6.67	10.32
	3	2.57	6.39	10.65	9.66
	4	1.58	8.70	8.70	9.50
구강재	1	1.27	2.27	4.18	3.31
	2	1.15	2.50	3.58	3.58
	3	1.29	2.34	5.03	3.77
	4	1.34	3.58	3.96	4.07

表 3.7 용접재의 충격흡수에너지

(kg-m)

온도 °C / 구분		신+신		신+구	
		비이드	루우트	비이드	루우트
−20	1		7.59	6.26	4.26
	2		5.76	8.22	6.64
	3			4.95	7.08
0	1	11.2	6.84	8.77	8.58
	2	21.56	7.28	11.72	8.58
	3	6.84	4.03	15.33	14.32
10	1	12.45	12.02	13.13	3.99
	2	11.33	11.84	19.22	11.57
	3	11.35	7.82	13.33	7.82
20	1	13.44	11.94	9.66	7.08
	2	6.64	11.42	15.75	8.51
	3	8.39	11.45	12.87	12.06

4. 實驗結果의 考察

4.1 鋼材의 化學成分 및 硬度

表 3-1의 화학성분 분석결과에 의하면 舊鋼材 및 新鋼材의 炭素含量은 低炭素鋼으로서는 많은 편으로 Semikilled 鋼[17]에 속하며 硫黃 및 燐의 含量은 KSD 3503 일반구조용 압연강재의 규정에 적합하다. 鋼材는 强度와 硬度가 比例하는 관계를 갖고 있으며 강도와 경도는 炭素(C) 및 망간(M_n)의 量에 따라 변한다. 특히 鋼의 硬化性은 鎔接時 熱影響部의 硬化程度 및 이에 따른 變形拘束 등으로 인한 龜裂發生가능성으로 인해 鎔接性에 큰 영향을 미치고 있으며 鎔接性의 判定方法으로 炭素當量(C_{eq}; Carbon Equavo-을(entl 이용한다. 이에 관한 硏究는 Dearden,

Oneill, 木原, 鈴木, Winterton[18,19] 등이 炭素當量의 計算法을 제안 하였다. 本 硏究에서는 木原의 公式을 이용하였고, 이때 여러式 중 공통적으로 포함되어 있는 C, M_n, S_i의 含有率만을 사용하여 계산된 炭素當量은 舊鋼材가 0.364, 新鋼材가 0.409이며 木原이 제안한 硬度推定公式에 의한 硬度는 舊鋼材가 258.46 H_R, 新鋼材가 258.7 H_R로써 新鋼材의 硬度가 더 크다. 표 3-2 및 그림 4-1은 鎔接時 열영향부의 온도상태를 가정하여 400°C, 700°C, 및 1000°C로 加熱冷却후 測定한 Shore 硬度 및 Rockwell 硬度値로서 各 溫度에서 공히 新鋼材의 硬度가 큰 것으로 나타났으며, 이는 木原方法에 의한 추정과 같은 結果를 보여준다.

이상의 결과로부터 新鋼材의 强度와 硬度가 舊鋼材에 比하여 크고 이에 따라 新鋼材가 變形拘束이 크며 노치靭性이 작고 疲勞龜裂 및 脆性破壞發生위험이 클 것으로 예견된다.

4.2 引張試驗結果의 分析

表 3-3의 引張試驗結果에 의하면 新鋼材의 平滑材平均强度는 45.60 kg/mm² 이며 舊鋼材의 平滑材平均强度가 44.66 kg/mm²로서 新鋼材가 0.94 kg/mm² 더 크게 나타났다.

그러나 斷面收縮率에 있어서 新鋼材平滑材가 平均 58.67%, 舊鋼材平滑材가 平均 51.9 %로서 新鋼材의 斷面收縮率이 6.67 % 더 크고 노치材는 新鋼材가 平均 45.04 %, 舊鋼材가 平均 43.83%로서 新鋼材가 1.21 % 더 커서 平滑材, 노치材 共히 新鋼材의 斷面收縮率이 크게 나타났다. 또한 노치材와 平滑材의 破斷應力으로 계산한 노치係數(平滑材의 破斷應力／노치材의 破斷應力)는 新鋼材가 1.012이며 舊鋼材가 1.018로서 노치效果는 舊鋼材가 크다.

그림 4-2는 靜的引張試驗에서 測定된 荷重—變形率關係를 나타낸 것으로서 變形擧動은 전체적으로 新鋼材가 舊鋼材보다 크며 變形率測定時 舊鋼材는 노치를 넣은 試驗片에서 新鋼材平滑材의 85 % 應力水準에서, 노치를 넣지 않은 시험편에서는 新鋼材노치材의 75 % 應力水準에서 變形率測定이 不可能하였다. 이러한 현상은 노치주위에 형성되는 形變拘束이 舊鋼材가 新鋼材에 비하여 크기 때문에 變形이 노치주위에 국한되

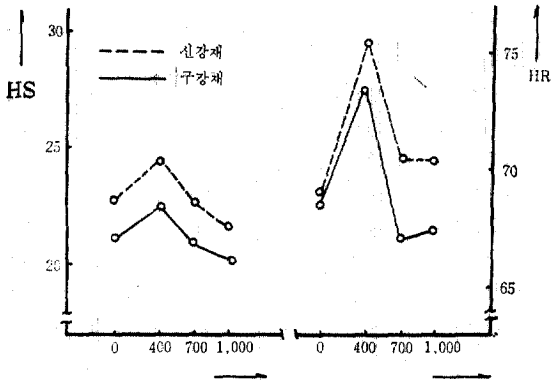


그림 4.1 Shore 경도 및 Rockwell 경도

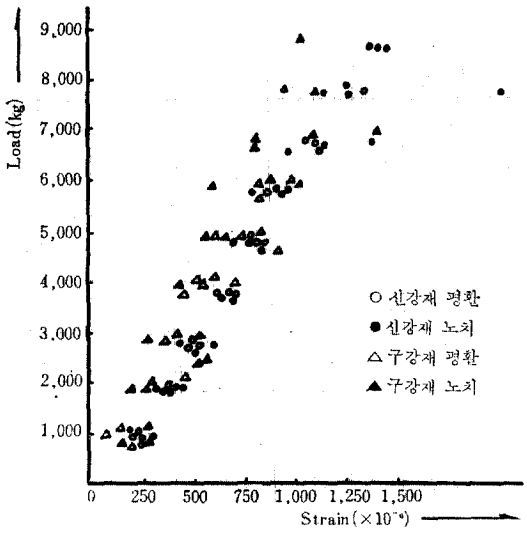


그림 4.2 정적인장시험의 하중-변형률관계

고 낮은 應力水準에서 破斷된다는 것을 의미한다. 또한 變形率測定値가 新鋼材는 密集되어 있으나, 舊鋼材는 平滑材와 노치재가 둘다 分散되어 있어 應力-變形擧動에 信賴性이 없으며, 變形擧動이 不規則한 것은 試驗片 채취부위의 서로 다른 疲勞累積의 영향인 것으로 보인다.

表 4-1과 그림 4-3은 목부의 變形狀態를 알아보기 위해 破斷面으로 부터 5 mm, 10 mm, 15 mm, 20 mm, 25 mm에서의 局部伸張量을 나타낸 것이다. 舊鋼材는 新鋼材에 비하여 全伸張量이 작을뿐 아니라 局部伸張量도 新鋼材의 平滑材는 25 mm 구간 伸張量의 44 %가 10 mm 구간에서 발생하였으나, 노치材에서는 25 mm 구간 伸

表 4.1 정적인장시험의 국부신장량

(mm)

구분 / 측정범위	신강재 평활			신강재 노치			구강재 평활			구강재 노치		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
10mm	10.7	10.3	10.4	3.1	3.9	4.4	7.8	7.8	7.6	4.7	3.5	3.5
20mm	17.8	15.0	15.0	4.2	5.4	4.8	12.0	12.0	11.8	4.9	3.6	3.5
30mm	18.9	18.3	18.6	4.5	5.4	4.8	16.2	15.6	15.9	5.5	4.7	4.2
40mm	20.4	22.4	20.8	4.7	6.4	6.0	18.8	18.0	18.8	6.8	4.7	4.5
50mm	24.0	24.0	23.5	5.2	7.5	6.0	20.0	19.5	19.0	6.9	4.7	5.4

* 측정범위는 파단점을 중심으로 2배한 것임.

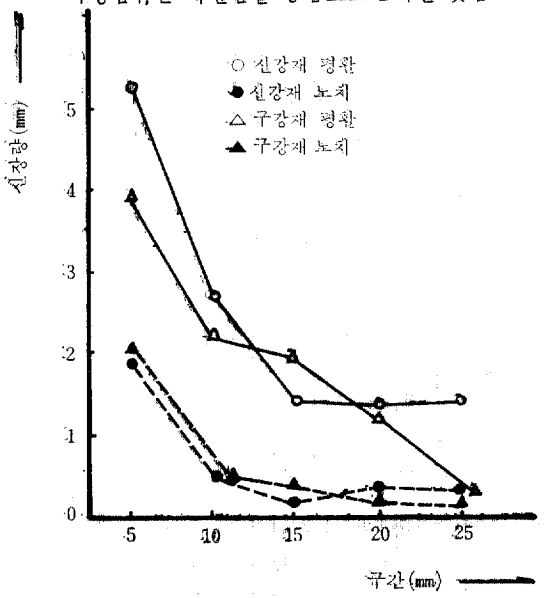


그림 4.3 정적인장시험의 국부신장량

張量의 61 %가 10 mm 구간에서 발생하였다. 이러한 현상은 龜裂로서 노치가 존재하는 경우 노치先端의 應力에 관계되는 塑性域이 노치주위에 국한되므로 인하여 變形이 局部에 集中되는 것이라 생각된다.

이러한 관점에서 McGregor,[20] Peel과 Forsyth[15] 등이 목부의 應力-變形關係를 硏究하였으며 Peel과 Forsyth는 목부의 破斷時變形率 $\varepsilon=\varepsilon_f$($\varepsilon_f$; 破斷時變形率)에서 龜裂이 발생하는 것으로 보았다. 이때 塑性域에서 破斷時變形率은

$$\varepsilon_f=\ln\frac{A_0}{A_f}=\ln(1/\{1-RA\}) \qquad (4\text{-}1)$$

여기서

A_0 : 원단면적

A_f : 파단시 단면적,

RA : 파단시 단면수축율($[A_0-A_f]/A_0\times100$)

이며 表 4.2는 $\varepsilon_f=\ln\frac{A_0}{A_f}$로 계산된 변형률 값이다. 이들의 평균치는 新鋼材에서 平滑材가 0.84, 노치材가 0.13, 舊鋼材에서 平滑材가 0.66, 노치재가 0.05로서, 舊鋼材가 新鋼材에 比하여 變形拘束이 크며 노치材에서 變形拘束정도는 新鋼材에서 9배이고 舊鋼材에서는 13배로 나타났다.

이상의 新鋼材와 舊鋼材의 試驗成果를 分析한 結果 機械的 性能에서 鋼材의 化學成分上 硬化性과 다른 結果를 보여주고 있으며 强度와 반비례하는 현상을 나타냈다. 斷面收縮率 및 노치效果, 變形擧動에 따르면 舊鋼材가 新鋼材보다 變形구속이 크고 취약하다. 그 原因은 疲勞에 의한 加工硬化[21,22] 및 脆化에 의한 영향이 크게 작용한 것으로 사료된다.

4.3 衝擊試驗結果의 分析

그림 4.4은 表 3.6으로 부터 그린 것으로서 試驗用鋼材의 온도에 따른 吸收에너지의 관계를 나타낸 그림이다. 衝擊吸收에너지는 各 溫度에서 新鋼材가 舊鋼材보다 破斷되는데 더 큰 에너지를 필요로 하고 있으며 溫度가 上昇하면 그

表 4.2 파단시 변형률

시편 / 변형률	신강재 평활			신강재 노치			구강재 평활			구강재 노치		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
—	0.78	0.87	0.89	0.09	0.14	0.15	0.66	0.72	0.61	0.06	0.07	0.02

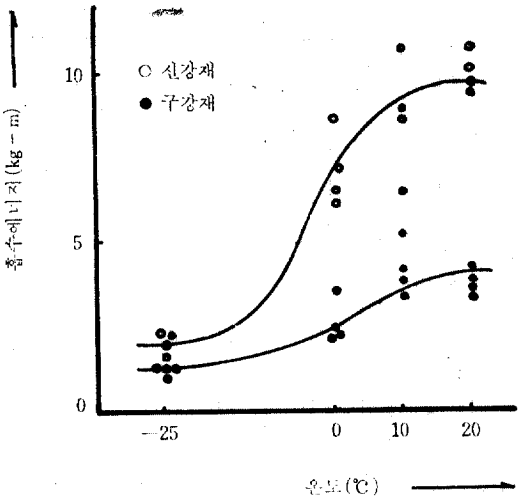


그림 4.4 온도와 흡수에너지 관계

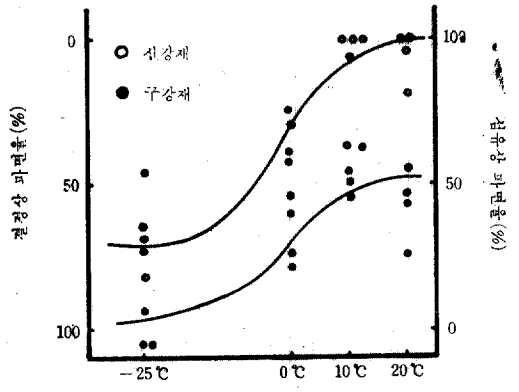


그림 4.5 온도에 따른 파면천이 관계

차이는 더욱 컸다. 더우기 舊鋼材의 衝擊吸收에너지는 道路橋示方書에서 規定하고 있는 2.8 kg-m 보다 평균 0.4 kg-m 정도 더 작았다. 그림 4.5는 破斷된 충격 시험편의 破面사진으로부터 測定한 纖維狀破面率〔纖維狀破面/(纖維狀破面+結晶狀破面)〕과 溫度와의 관계를 나타낸 것으로서 鋼材의 性質이 軟性에서 脆性으로 變하는 遷移溫度 즉, 結晶狀破面率 50 %에서의 溫度[23]가 新鋼材는 −10°C 部近이고 舊鋼材는 15°C 部近으로 舊鋼材는 常溫에서 脆性을 나타내고 있다. 이와 같은 舊鋼材의 脆性化 原因은 鋼材의 化學成分上 硫黃이나 燐이 舊鋼材에 더 含有되어 있으며 舊鋼材의 M_n/C 比[24]가 新鋼材에 比하여 작아서 低溫脆性이 향상된다고 할 수 있으나, 常溫에서까지 舊鋼材의 吸收에너지가 매우 작은 것은 化學成分에 의한 영향과 더불어 引張試驗結果에서와 마찬가지로 疲勞에 의한 硬化와 脆化의 영향이 있기 때문인 것으로 생각된다.

兩鋼材에서 龜裂傳播에 대한 抵抗性으로서 破壞靱性을 塑性域에서 變形硬化指數 n 의 관계로부터 $n=\varepsilon_f$ 를 使用하면 (2-6)式은 다음과 같이 된다.

$$K_{IC}=\left[\frac{2E\sigma_0}{(1-\nu^2)(n+1)(n+2)}\right]^{\frac{1}{2}} n^{\frac{n+1}{2}} r_c^{\frac{1}{2}} \qquad (4\text{-}2)$$

여기서 E,ν 는 鋼材의 고유상수이고, r_c 는 σ_0 및 龜裂의 형상에 따른 函數이므로 同一한 응력과 동일한 상태의 龜裂이 존재하면 두 鋼材에서 r_c 는 같다고 가정할 수 있으므로

$$K_{IC}=\left[\frac{1}{(n+1)(n+2)}\right]^{\frac{1}{2}} n^{\frac{n+1}{2}}\left[\frac{2E\sigma_0}{1-\nu^2}\right]^{\frac{1}{2}} r_c^{\frac{1}{2}} \qquad (4\text{-}3)$$

여기서 $\left[\frac{2E\sigma_0}{1-\nu^2}\right]^{\frac{1}{2}} r_c^{\frac{1}{2}}$ 은 두 강재가 일치하는 것으로 보고 K_{IC} 는 다음의 식으로 구해지는 값에 비례한다고 할 수 있다.

$$\left[\frac{1}{(n+1)(n+2)}\right]^{\frac{1}{2}} n^{\frac{n+1}{2}} \qquad (4\text{-}4)$$

引張試驗結果로부터 式 (4-4)에 의해 計算한 값은 新鋼材가 平均 0.2 舊鋼材가 0.133으로 신강재는 균열진전에 대한 抵抗性이 크며 이는 충격시험결과와 일치한다.

4.4 鎔接引張試驗의 結果分析

表 3.5의 鎔接引張試驗의 結果에 의하면 新鋼材끼리 용접한 試驗片은 인장강도가 59.53kg/mm²이며 新, 舊鋼材를 용접한 시험편의 인장강도는 56.4 kg/mm² 로서 表 3-3의 平均引張强度보다 兩鋼材에서 共히 큰 값을 나타냈다. 이는 노치가 鎔着金屬과 熱影響部의 境界部에 위치하여 最高硬度部位[25]에 해당하므로 큰 應力을 나타낸 것이라 생각된다. 또한 新鋼材와 舊鋼材를 용접한 것은 新鋼材와 新鋼材를 용접한것 보다 3.13 kg/mm² 더 작은 값을 나타냈다. 表 4.3에서 斷面收縮率은 新鋼材끼리 鎔接한 試驗片이 9.78 %로서 新, 舊鋼材를 용접한 試驗片의 8.95 %보다 0.83 % 더 크며 新舊鋼材를 용접한 試驗片의 硬化度가 더 크기 때문에 변형이 구속되어 위와

表 4.3 용접인장시편의 국부신장량

(mm)

구분 \ 구간		10	20	30	40	50	전신장량
신+신	1	1.95	0.40	0.65	0.55	0.70	5.65
	2	1.79	1.11	0.60	0.60	0.45	9.15
	3	4.05	0.05	0.4	0.35	0.65	8.85
신+구	1	3.25	0.05	0.55	0.55	0.75	10.85
	2	2.40	0.00	0.85	1.10	0.70	11.8
	3	1.50	0.30	0.35	1.05	0.65	8.5

같은 결과가 나타난 것으로 생각되며 S.J. Maddox,[26] Takeyoshi Michio[27] 등의 연구결과와 일치한다. 또한 表 3-3의 斷面收縮率로부터 式(4-4)로 계산한 靱性値는 新鋼材끼리 용접한 引張試驗片이 0.14, 新舊鋼材를 용접한 試驗片이 0.13으로 신강재끼리 용접한 것이 인성이 크다.

4.5 鎔接衝撃試驗片의 衝撃試驗結果의 分析

그림 4.6은 表 3.7의 용접시험편의 충격시험결과를 그린 것으로서 특징적인 현상은 그림4.4의 용접하지 않은 試驗片 보다 測定値가 分散되어 있다. 이는 노치위치가 용접 루우트 및 비이드상의 中央으로 되어 있어 루우트와 비이드에서 정확한 노치위치를 찾기가 곤란하였으며 熱 cycle에 의한 잔류응력이 不均一한데 기인하는 것으로 생각된다. 한편 노치위치가 루우트部에 있는 試驗片은 常溫에서 新鋼材끼리 鎔接한 것이 新舊鋼材를 용접한 것보다 흡수 에너지가 크며, −20°C에서는 거의 같은 수준을 이루고, 노치를 비이트中央部에 설치한 試驗片은 常溫 및 抵溫에서 新舊鋼材를 용접한 것이 新鋼材끼리 용접한 것보다 크다. 또한 노치가 루우트에 위치한 新舊鋼材를 용접한 試驗片은 −20°C에서 흡수에너지가 서로 비슷하였으나 常溫에서는 다른 試驗片에 비해 월등히 낮았다.

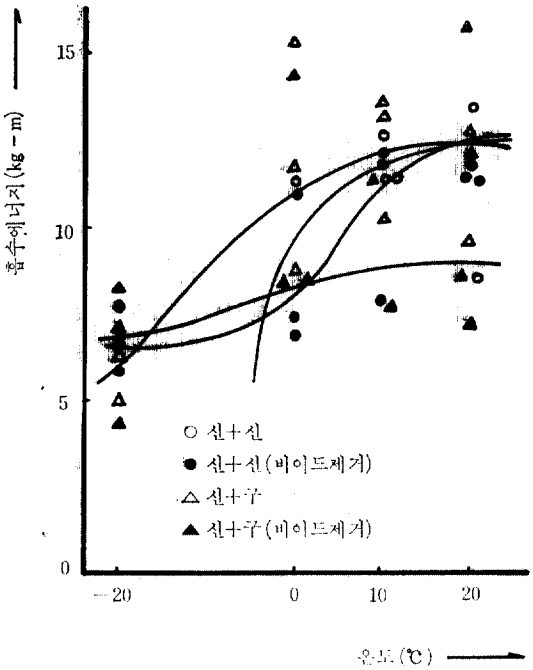
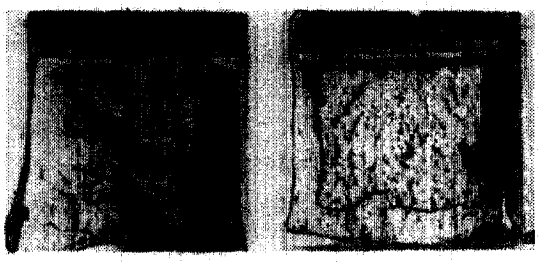


그림 4.6 온도와 흡수에너지관계(용접재)



(a) 섬유상 파면(신강재) (b) 결정상 파면(구강재)

사진 5. 충격시험편의 파단면

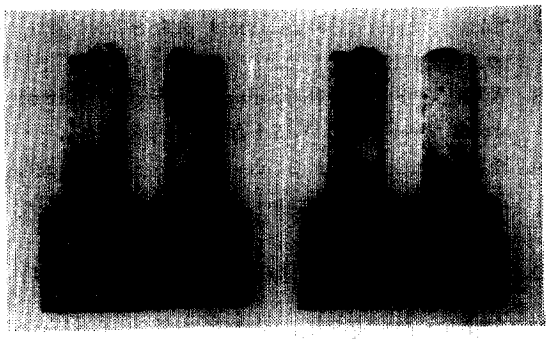


사진 6. 인장시험편의 파단면

5. 結 論

本 實驗研究結果 얻어진 事項은 化學成分과 硬度에 의해 추정한 强度와 硬化性이 實際로 供用履歷을 갖는 鋼材에 대해 일치하지 않았으며 이에 대해 다음과 같은 몇가지 사항을 확인할 수 있었다.

1. 供用履歷을 갖는 鋼材는 化學成分에 의하

면 新鋼材보다 軟性 및 靭性이 크게 나타나야 하지만 供用中 받아온 疲勞에 의한 加工硬化와 疲勞脆性에 의한 영향으로 더 硬化된 현상을 나타냈다.

2. 疲勞硬化된 鋼材는 常溫에서도 脆性을 나타냈으며, 이는 溫度의 低下時 龜裂이 존재하는 경우 脆性破壞의 위험성을 갖고 있다고 볼 수 있다.

3. 鎔接材에 있어서도 舊鋼材와 혼합된 용착물은 新鋼材끼리 용접한 것 보다 變形拘束정도가 크고 靭性은 작았으며 構造物 補修補强時에 이에 대한 考慮가 필요하다.

4. 鎔接材는 루우트에 노치를 갖는 경우 인성이 가장 낮았으며 이러한 경우 鎔接루우트에 龜裂이 발생한다면 構造物에 致命的인 損傷을 줄 수 있다.

參 考 文 獻

1. John W. Fisher, "Quinnipiac River Bridge Cracking," *ASCE Structural Division Vol. 106, No. ST4*, 1980.
2. 張東一, 鄭榮和, "鋼橋梁의 脆性破壞事例와 이에 대한 考慮", 대한토목학회지, 제26권, 제 2 호, 1978, 6.
3. 西村 俊夫, 三木 千壽, "引張應力に起因する 鋼橋梁の變狀", 日本土木學會誌, 1975年 11月號.
4. 張東一, 鄭榮和, 龍煥鮮, "構造鋼의 脆性破壞擧動에 대한 實驗硏究", 대한토목학회지, 제27권, 제 2 호, 1977.4.
5. "鋼橋梁의 耐用性調査報告", JSSC, Vol. 5, No. 39, 1969.
6. "鋼構造物의 耐用性調査報告", JSSC, Vol. 8, No. 39, 1972.12.
7. "Bridge Steel Specification," *AASHTO*, 1977, pp. 1342~1356.
8. W. Illg, "Factors in Evaluating Fatigue Life of structural Parts," *NASA NT D-725*, 1961.
9. H.T. Corten, "Cumulative Damage in Fatigue", *Inter. Conf. on Fatigue of Metals proc., Part 3, No. 2*, 1956.
10. 張東一, "實動荷重의 作用을 받는 構造用 鋼材의 疲勞强度", 大韓土木學會誌, 第25卷, 第 2 號, 1977.6.
11. Takezshi Kawabata et al, "On the Relationship Between Ductility and Fracture Toughness," *Acta Metallogical, Vol. 29*.
12. H.J. Kleemola and M.A. Nieminen, "On the Strain-Hardening Parameters of Metals", *Metallurgical Transactions, Vol. 5*, Aug., 1974.
13. A.S. Tetelman, A.J. McEvily, Jr, *"Fracture of Structural Materials"* John Wiley & Sons, Inc., 1967, pp.68~71.
14. 羽鳥行男 등, "構造用 鋼材의 引張試驗", JSSC, Vol. 48, 1969.
15. G.M. Boyd, *"Brittle Fracture in steel structures"*, Butter Worth, 1970, pp.50.
16. S.P. Timoshenko et al, *"Mechanics of Materials"*, Educational Publishing, 1972.
17. 吉田亨, "最適溶接構造の設計", 日刊工業新聞社, 昭和 50年, pp.170~173.
18. "溶接便覽", 丸善, 昭和 52年.
19. 張東一, "鋼構造工學", 創知社, 1982.
20. Bogdan O. Kuzmanovic, Nicholas Willems, *"steel Design for Structural Engineers"*, Prentice-Hall, Inc., 1977, pp.46.
21. 越賀方夫, "脆性破壞防止를 위한 溶接設計", 溶接技術, 1972.4.
22. H.D. Fuch et al, *"Metal Fatigue in Engineering,"* John-Willey & Sons. 1980.
23. 掘川浩甫, "土木材料工學", 共立出版社.
24. "低溫脆性", 特殊鋼, 제26권, 제 9 호
25. E. Smith, M.D. Coward et al, "Weld Heat-Affected zone Structure And Properties of Two Mild Steels", *Welding and Metal Fabrication, June*. 1970.
26. S.J. Maddox, G.I. Mech. E. "Fatigue Crack Propagation in weld metal and HAZ", *Metal Construction and British Welding Journal, July*. 1970.
27. Takeyoshi Kasugai and Michio Inagaki, "Effect of Mn on Transformation Behaviors of Synthetic Weld Heat-Affected Zone of steels," *Trans of National Research Inst. for Met., Vol. 22, No. 4, 1973*.

(接受 : 1982.11.8)