



# 鋼鐵道橋 維持管理를 위한 疲勞評價

李 鍾 得

鐵道專門大學 教授

工學博士

建設安全技術士

## 目 次

1. 序 論
2. 疲勞에 關한 解析과 評價項目
3. 이미 나타난 疲勞損傷에 대한 評價
  - 3.1 發見된 疲勞龜裂에 대한 評價判定
  - 3.2 原因규명을 위한 解釋
4. 疲勞損傷 豫測을 위한 評價
  - 4.1 疲勞限界에 대한 調査
  - 4.2 疲勞損傷度의 解析
  - 4.3 實應力比  $\alpha$
  - 4.4 實側値를 補正하는 係數  $\beta$
5. 鋼鐵道橋에 있어서 耐用年數 推定
  - 5.1 鋼鐵道橋에 있어서 耐用年數
  - 5.2 耐用年數 算定
  - 5.3 耐用年數 算定에 있어 疲勞損傷 基本式
  - 5.4 累積疲勞 算定式
  - 5.5 耐用年數(壽命) 評價에 쓰이는 이음의 疲勞强度
6. 結 論

## 1. 序 論

鐵道橋에서는 全荷重을 차지하는 活荷重比率이 높기 때문에 變動應力에 의한 疲勞의 影響을 무시할 수 없다.

그러나 리벳트 構造의 時代부터 疲勞에 起因한 損傷例는 몇 개가 나타나 있다.

이 疲勞에 의한 變狀은 設計時에 疲勞의 조사를 하지 않은 個所나 面外變形, 部材의 振動, 다른 變狀의 影響 등 設計時 check할 수 없는 個所, 切欠構造 등 設計計算에 의한 公稱應力을 求하는 部位 등으로 많이 발견되는 傾向이 있다.

이제와서 疲勞의 調査를 必要로 하는 主要한 部位(이음부)에 있어서 損傷의 事例는 거의 없으나, 今後는 列車回數의 增大나 speed up이 고려되기 때문에, 走行車輛이 많은 路線이다. 實動應力이 큰 個所에서는 疲勞가 問題될 可能性이 있다. 이 경우 疲勞問題에 대한 鋼鐵道橋의 安全을 確保하기 위해서는 종래 해오던

後進的인 維持管理로서는 不充分하다. 損傷 發生에 대한 豫測, 豫知手法을 취한 豫防保全 的 維持管理가 必要하다.

本文에서는 鋼鐵道橋에 있어서 疲勞에 關한 今後의 評價方法에 關해서 지금까지 實施한 實績을 體系化한 것으로, 最近의 研究成果와 新技術의 導入을 도모한 評價手法의 概要 및 鋼鐵道橋의 耐用年數의 推定方法에 關해서 記述한다.

## 2. 疲勞에 關한 解析과 評價項目

供用中の 鐵橋에 對한 疲勞의 檢討에 對해서 다음과 같은 解析·評價가 必要하다.

(1) 이미 나타난 疲勞損傷에 대한 檢討

(가) 發見된 疲勞龜裂에 대한 健全度 判定

(나) 發生한 疲勞損傷의 原因究明을 위한

解析(部材의 負擔力, 應力舉動, 變位의 把握)

(2) 疲勞損傷 豫測

(가) 疲勞限界 조사

(나) 疲勞龜裂 發生時期와 發生하는 範圍의 豫測

(다) 龜裂狀의 缺陷을 가진 部材의 남은 壽命 評價

(3) 構造物의 耐用年數(남은 壽命) 推定

## 3. 이미 나타난 疲勞損傷에 대한 評價

### 3.1 發見된 疲勞龜裂에 대한 評價 判定

疲勞龜裂이 發見된 경우 어떠한 對策을 講究할 必要가 있으나, 이를 위해서는 主로 對策의 緊急性의 判斷과 措置方法의 選定을 위한 評價가 要件이다.

일반적으로, 發生한 疲勞龜裂은 主로 다음 項目에 關해서 檢討해야 하며, 安全性과 對策 時期가 判斷된다.

(가) 變狀의 程度

(나) 進行性

(다) 그 構造物의 重要度

(라) 變狀이 미치는 影響의 程度

(마) 그 構造物에 대한 檢査의 容易性

그러나, 以上의 項目에 대한 判定은 매우 애매한 面이 많고 現場에서의 判斷에 갈피를 잡지 못하는 경우가 많다.

따라서 이 項目을 「進行性」, 「冗長性」 및 「損傷의 影響度」의 3가지로 整理했다. 鐵道橋의 損傷評價로서는 確實히 實績을 重要시하는 表 1.1에서 보여주는 評價區分을 쓰고 있다.

이제, 여기서의 「進行性」 및 「冗長性」은 다음에서 보여주는 意味를 갖는 하나의 評價指標이다.

表 1.1 鋼鐵道橋의 損傷에 關한 評價

(1) 組合에 의해 決定되는 判定區分

冗長性 進行性	a	b	c	d
a	A <sub>1</sub>	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>2</sub>
b	A <sub>2</sub>	A <sub>2</sub>	B	C
c	B	B	C	C
d	C	C	C	S

(2) 進行性 評價(變狀의 進行性에 대한 評價)

評價順位	狀 況
a	變狀 發生으로부터 4~5年 以內(全般檢査로 1回 빠뜨림을 考慮)에 機能限界에 達한 部材(品)가 破斷 등에 達할 可能性 있는 것.
b	變狀 發生으로부터 10年(塗裝週期) 以內에 機能限界에 達한 部材(이음)가 破斷 등에 達할 可能性이 있는 것
c	變狀이 發生했어도 計算上 設計想定 壽命은 滿足한 結果를 나타내는 것
s	變狀이 發生했어도 通常 거의 進行이 없거나, 進行되어도 壽命을 充分히 滿足할 수 있는 結果를 나타내는 것

(3) 冗長性 評價(構造全體의 機能低下에 대한 評價)

評價順位	狀 況
a	直接部材나 構造物의 安全을 위협하는 현저한 機能低下로 崩壞에 이르는 것
b	連鎖的으로 어느 特定 使用條件이 되었을 때 構造物의 현저한 機能低下로 崩壞에 연결되는 것
c	耐久性의 低下로 長期的으로는 機能低下나 崩壞에 이르는 것
d	이음부나 部材가 붕괴되어도 構造物 全體의 강도나 기능에는 그다지 영향을 주지 않은 것

(4) 損傷의 影響을 크게 하는 項目

- ① 放置하면 他에 多大한 影響을 미치는 것
- ② 많은 발생을 일으킬 可能性이 있는 것
- ③ 早期對策으로 維持管理上 현저하게 有效한 것
- ④ 他에도 같은 종류의 個所가 있어 2개소의 檢査가 비교적 어려운 것
- ⑤ 構造物로서의 重要도가 特히 높은 것

※ 進行性：變狀이 進行되는 상태가 빠른 指標로, 빠르다고 하는 것은 通常의 維持管理(定期檢査)에 있어서 對應하기 어려울 정도로 빠르게 進行하는 것, 즉 定期檢査의 週期가 충분히 발견되는지 어떤지 判斷하는 표준이 된다. 龜裂의 進展速度에 대한 定量的인 檢討로서는 破壞力學의 手法에 의한 龜裂進展解析을 사용하는 것이 바람직하다.

※ 冗長性：部材 또는 이음部에서 發生한 疲勞損傷의 進行이 계속될 때, 構造物로서 強度나 機能을 損傷없이 使用不能狀態를 나타내는 指標로, 使用不能이 되는 경우를 「冗長성이 없다」라고 한다.

그 構造物이 靜定構造인가, 不靜定構造인가, 龜裂이 發生한 部材가 主部材인가, 2次 部材인가, 또는 2次 部材로서 龜裂이 進展된 主部

材에 直接影響을 주게 되는지를 判斷하는 표준이 된다.

3.2 原因규명을 위한 解析

疲勞龜裂이 發生한 경우, 對策을 보다 適切하게 세우기 위해서는, 原因을 규명할 必要가 있다. 이를 위해서는 아래에서 보여주는 外力의 作用에 의한 各 部材 및 構造物 全體의 變形이나 應力舉動, 또는 그러한 不在나 이음의 強度 및 振動特性 등을 충분히 把握할 必要가 있다.

(1) 作用하는 外力

- ① 반복荷重
- ② 振動
- ③ 過大한 힘(地震·衝突)
- ④ 他의 變狀에 의한 影響(보자리 파손 등)
- ⑤ 처짐差 또는 變位差(連結構)

(2) 部材이음部의 強度

- ① 鎔接缺陷(블로우홀, 融合 不良 등)
- ② 材質 不良
- ③ 部材의 初期變形
- ④ 腐蝕 缺食

(3) 기타

- ① 鹽害 등의 惡環境
- ② 維持管理에 있어 對應 不良
- ③ 設計·施工上의 配慮 不良

4. 疲勞損傷 豫測을 위한 評價

여기서 「疲勞損傷」이란 반드시 「疲勞龜裂의 發生」이 아니라, 그 構造物이나 이음部가 機能을 상실한 상태를 지적하는 것이다. 또한 疲勞損傷의 豫測方法으로는, 「疲勞限界」 및 「疲勞損傷度」에 대한 두 가지가 있다. 疲勞損傷의 염려가 있는지 없는지는 「疲勞限界」의

조사를 하고, 또한 「疲勞損傷度」에 의한 評價는 疲勞限界에 대한 調査로 最大應力範圍가 疲勞限界를 초과했는지에 따라 하며 疲勞損傷의 發生時期를 推定한다.

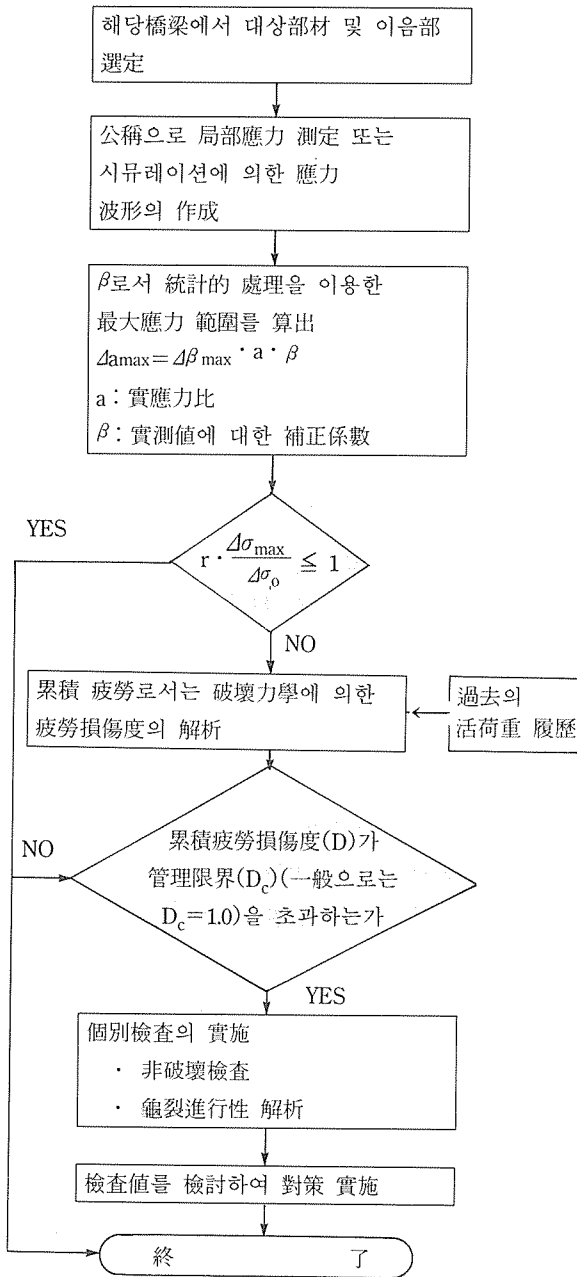


그림 4.1 疲勞에 關한 調査 흐름圖

또한, 疲勞損傷度의 解析은 「累積疲勞」에 의한 方法과 「破壞力學」이 쓰여진다. 累積疲勞에 의한 것은 線形累積疲勞被害則에 기초를 두며, 過去の 應力履歷을 評價하는 것도 있다. 또한 破壞力學은 龜裂로서 龜裂狀態의 缺陷을 갖고 있는 이음에 대해서 그 龜裂이 進展하여 어느 때 어느 時點으로부터 疲勞損傷으로 問題가 있는지를 評價하는 것으로, 「疲勞龜裂進展」問題로 취급한다.

「疲勞限界」에 대한 評價로 問題가 없는 것은 그 後의 檢討를 필요로 하지 않는다. 그림 4.1에서 疲勞에 關한 調査의 흐름을 보여준다.

#### 4.1 疲勞限界에 대한 調査

어느 部材가 今後 疲勞問題가 있는지에 關해서, 어느 이음부에 發生하는 應力範圍의 最大値가 그 이음의 一定振幅應力에 대한 應力範圍의 中斷限界(疲勞限界)를 초과하면 疲勞破壞는 일어나지 않는다. 이른바 「疲勞限界」를 고려하는 方法을 導入하는 데는 다음 式으로 구할 수 있다.

$$\gamma \cdot \frac{\Delta\sigma_{\max}}{\Delta\sigma_0} \leq 1 \dots\dots\dots (4.1)$$

여기서

$$\Delta\sigma_{\max} = \Delta\sigma_{\max} \cdot \alpha \cdot \beta$$

$\Delta\sigma_{\max}$ : 시뮬레이션 또는 實測에 의해서 얻은 最大應力範圍

$\Delta\sigma_0$ : 疲勞限界로서의 應力範圍

$\alpha$ : 實應力比

$\beta$ : 實測值에 對한 補正係數

$\gamma$ : 安全體系(通常  $\gamma$ : 1.0으로 함)

疲勞限界로서의 應力範圍  $\Delta\sigma_0$ 는 新設計標準에서 나타내는 값(表 4.1)을 사용한다.

安全係數를 決定하는 要因은, 構造物의 冗長性이나 重要度 및 檢査의 程度가 있다. 鐵道橋의 경우는, 冗長性 및 構造物의 重要도에 關해서는

安全을 목표로 어느 정도 큰 값을 취하는 反面, 檢査의 程度에 關해서는 定期檢査가 義務的으로 따르는 것으로, 작은 값으로 하기 위해서는 現狀으로는 이것이 實質的인 밸런스가 유지되기 위해 通常의 경우는  $\gamma=1.0$ 으로 하는 것이 좋다고 생각된다.

一般的으로 最大應力範圍는 實測值 등, 즉 實動應力으로부터 다음 方法으로 求한다. 우선 數值 시뮬레이션으로 몇 個의 部材나 複數의 代表的인 列車에 關해서 拔取法에 의해 應力測定을 한다. 다음으로 거기서 얻은 應力波形(시뮬레이션 波形에 關해서는 4.3에서 보여주는 實應力比  $\alpha$ 를 곱한 實動應力波形)을 直接 統計的 處理로써 最大應力範圍를 推定한다.

이미 荷重分布型이 整理된 sampling 應力과 最大應力範圍와의 關係를 判定하는 데는 4.4에서 나타내는 係數  $\beta$ 를 sampling한 實測值의 平均値를 곱해서 評價에 쓰이는 最大應力範圍를 設定한다.

#### 4.2 疲勞損傷度의 解析

疲勞損傷度의 解析은 疲勞限度를 초과하는 것에 대한 疲勞被害를 定量的으로 把握하거나 檢査에 있어서 重點檢査個所의 選定 및 보다 合理的인 檢査週期나 對策時機를 設定하는 때에

表 4.1 各 이음에 대한 疲勞限界

區 分	疲勞限界로서의 應力範圍 $\Delta\sigma_o \text{ kg} \cdot \text{f}/\text{cm}^2(\text{MPa})$
A	1900 (190)
B	1550 (155)
C	1150 (115)
D	840 (84)
E	620 (62)
F	460 (46)
G	320 (32)
H	230 (23)

사용된다. 이 評價로서는 착안하는 個所의 實動應力과 應力履歷으로는 初期龜裂長을 보다 正確하게 把握하는 것과 實態를 즉시 이음부의 疲勞強度를 設定하는 것이 重要하다. 以下의 累積疲勞(龜裂의 發生)에 의하는 것과 破壞力學(龜裂進展)에 의한 解析을 各各 설명한다.

##### 4.2.1 累積疲勞에 의한 疲勞損傷度

累積疲勞에 의한 疲勞損傷度는 累積된 疲勞損傷의 程度로서, 疲勞損傷의 累積이 1.0이 되었을 때를 착안하는 이음부에 疲勞損傷이 發生했을 때를 기초로 생각하는 것이다(線形累積疲勞被害則). 鐵道橋에서는 疲勞損傷度를 一列車에 대해서 表現하거나 그 이음에 累積된 전부의 損傷의 程度로 表現하는 경우가 많다.

여기서, 어느 編成의 一列車(혹은 一稼動單位의 荷重)가 通過할 때의 疲勞損傷度 D는 式(4.2)에서 볼 수 있다.

$$D = \sum \frac{N_{eq}}{N_i} = \frac{1}{N_i} \sum \left( \frac{\Delta\sigma_i}{\Delta\sigma_1} \right)^m \cdot n_i \dots\dots (4.2)$$

여기서 D: 疲勞損傷度(一稼動 單位의 荷重載荷)

$\Delta\sigma_i, n_i$ : 一稼動 單位의 荷重作用에 의해 發生되는 應力範圍로 그 반복回數. 단,  $\Delta\sigma_i = \Delta\sigma_{s(i)} \cdot \alpha$

$\Delta\sigma_{s(i)}$ : 시뮬레이션과 實測에 의해 얻어진 最大應力範圍

$\Delta\sigma_1, N_1$ : 基準으로 하는 應力範圍와 그 應力範圍에서 龜裂이 發生하는 반복회수

$N_{eq}$ :  $\Delta\sigma_1$ 으로 換算한 一稼動 單位의 作用에 의한 等價 반복회수

##### 4.2.2 疲勞龜裂 進展에 의한 疲勞損傷度

이 評價는 blowhole 중의 初期缺陷을 갖는 部材나 이음에 있어 그 缺陷이 初期龜裂로 發見된 경우로, 疲勞壽命의 대부분은 龜裂進展過程에서 소비하는 데 대해 적용되는 것이다.

一般的으로 破壞力學上에서는, 龜裂의 「發生」

과 「進展」에 대해서는 分離해서 생각하고 있으나, 「疲勞損傷」의 定義를 強度上的 破斷까지인지 아닌지, 構造物의 機能을 損失한 상태가 됐을 때로서 그때의 龜裂길이를 「限界 龜裂長」으로서 評價하기도 한다.

疲勞龜裂의 「進展」에 대한 疲勞損傷度도 또한, 初期龜裂을  $a_1$ 으로 했을 때 그로부터  $a_2$ 까지 進展했을 때 반복회수로, 限界龜裂길이  $a_c$ 까지 進展하는 데 요하는 반복회수의 比로 나타낼 수가 있다.

즉, 一稼動 單位의 荷重이 作用할 때에 進展하는 龜裂의 進展長  $\Delta a (= a_2 - a_1)$ 으로 그때의 반복회수  $N$ 의 관계는 아래式과 같다.

$$N = \int_{a_1}^{a_2} da/f(\Delta k) \dots\dots\dots (4.3)$$

여기서  $\Delta k$ : 應力擴大係數範圍(MPa  $\sqrt{m}$ )

$$\Delta k = F \cdot \Delta \sigma \sqrt{\pi a}$$

F: 補正係數

$\Delta \sigma$ : 作用應力 範圍

a: 龜裂 寸수

$a_1$ : 龜裂初期值 길이

$a_2$ : 進展 후의 龜裂 길이

또한 變動應力下에서는, 等價반복회수  $N_{eq}$  等價應力擴大係數  $\Delta K_e$  및 等價應力範圍를 사용하며 다음과 같은 式으로 나타낸다.

$$\Delta K_e = F \cdot \Delta \sigma_e \sqrt{\pi a} \dots\dots\dots (4.4)$$

$$N_{eq} = \int_{a_1}^{a_2} da/f(\Delta k_e) \dots\dots\dots (4.5)$$

한편, 龜裂進展으로서, 構造部材로서의 強度나 機能의 손실은 소위 「限界龜裂長」  $a_c$ 에 達할 때까지의 總반복회수  $N_c$ 는 아래 式과 같이 通한다.

$$N_c = \int_{a_1}^{a_2} da/f(\Delta k_e) \dots\dots\dots (4.6)$$

즉 部材에 發生하는 龜裂의 「進展」에 대한 「疲勞損傷度」도 「龜裂發生」의 경우와 같이 아래와 같은 반복회수의 比로 주어진다.

$$D = N_{eq} / N_c \dots\dots\dots (4.7)$$

이제, 여기서의 評價로 限界龜裂長  $a_c$ 를 어떻게 決定하느냐가 重要한 課題가 되나, 이것에 관해서는 現在 各種 試驗 등을 實施하여 하며, 그 結果가 나오기까지는 當面 暫定的으로 定한 保守標準에 보여주는 값을 쓰고 있다.

### 4.3 實應力比 $\alpha$

實應力比는 設計計算이나 시뮬레이션으로 求한 應力을 疲勞 評價에 利用하는 「實動應力」을 變換하기 위한 것으로 實測應力과 設計計算應力の 比로 나타낸다.

設計計算應力은, 實測應力과 같은 條件이 되는 荷重을 載荷시켜 設計 計算했을 때 얻어지는 公稱應力이다. 또한 實測應力은 部材 혹은 이음 強度 評價에 쓰이는 公稱應力이 얻어지는 位置에 接觸한 처짐 게이지로부터 檢出된 應力이다. 따라서 疲勞評價에 쓰이는 實動應力은, 設計計算이나 시뮬레이션으로 求해진 應力은 實應力比  $\alpha$ 를 곱해서 구해진다.

實應力比는 荷重의 種類나 部材의 構造에 의해 산출되며, 보다 精度를 높이기 위해서는 個個의 部材나 每荷重에 대해 各各 求하는 것이 좋다. 그러나 反面, 實務作業이 대단히 煩雜하게 되므로 實務에 導入이 곤란하다. 따라서 여기서는 過去 實績으로부터 다음과 같이 보여준다. 現在 鋼鐵道橋의 保守標準에서 耐力·耐久性 評價에 사용되고 있는 값은 다음과 같다.

影響線長	實應力比 $\alpha$
$\leq 10m$	0.65
$> 10m$	0.75

새로운 設計標準에 있어서 疲勞의 調査는 여기서 대개 安全을 보아 一律的으로 0.85로 하고 있다.

實應力比를 別途 求하는 경우, 保守標準으로 가정하는 構造形式이나 荷重條件이 大幅 다른

경우나, 適用의 適否를 判斷할 수 없는 경우는  $\alpha=1.0$  하든가, 別途 調査하여 決定할 必要가 있다.

또한, 實測應力을 直接 사용하여 疲勞의 評價를 하는 경우는 當然  $\alpha=1.0$ 이 되지만, 그 경우 疲勞限界에 대한 조사로서는 後述하는 實測值을 補正하는 係數  $\beta$ 를 곱할 必要가 있다.

#### 4.4 實測值을 補正하는 係數 $\beta$

疲勞限界評價에 實測值을 사용하는 경우, 그때 얻은 應力範圍의 最大值가 疲勞損傷評價에 쓰인 最大應力範圍가 되는 限界이다. 이것을 考慮하기 위해서는 補正係數  $\beta$ 가 사용된다.

$\beta$ 를 決定하기 위해서는 그 部材에 생기는 實測應力의 應力範圍에 관한 分布型이 必要하다. 鐵道橋의 경우는 過去의 調査結果로부터 疲勞에 대한 配應을 必要로 하는 電車專用線의 應力強度 分布型이 대부분 對數正規分布로 생각하기 위해 같은 모양의 荷重系로 생각하는 경우 이 分布型을 쓰는 것이 보다 좋다고 생각된다. 그러나, 本來는 各各의 線區에서 이러한 分布型을 구해, 이것을 쓰는 방법은 精度가 좋은 評價가 가능하다.

이 경우  $\beta$ 를 求하는 方法으로는, 꼭 長期의 應力頻度測定을 하여, 그 結果로부터 確率密度 係數를 算出한다. 確率密度分布가 對數正規分布의 경우에는, 그 非超過確率 97.7%의 값을 疲勞限界 조사에 쓰이는 最大值로서 그 값과 얻어진 分布의 平均值(여기서는 3乘根平均)와의 比를 「 $\beta$ 」로 한다. 따라서 sampling의 實測值의 平均值에  $\beta$ 를 곱한 것이 疲勞限界로 쓰이는 最大應力範圍로 생각한다. 이와 덧붙여 新幹線의 경우  $\beta$  값은 1.4~1.7 程度로 생각한다. 應力頻度の 分布型이 明確하지 않은 경우는 sampling해서 測定한 값으로부터 極值統計處理 등을 사용하여 最大值를 推定한다.

이제 實際橋梁에서 sampling은 各 橋梁에서

同類部材 中 5~10%를 任意 抽出하여 그 이음에 대한 公線應力을 測定하는 것이다. 또한 測定하는 列車數는 幹線鐵道나 電車專用線의 경우는 3~5 列車 程度로 생각한다.

여기서 나타내는  $\alpha$  및  $\beta$ 는 一部 調査結果나 實績을 基礎로 決定된 暫定的인 것이다. 따라서 現在 實橋梁에서 應力頻度の 長期測定을 시작으로 荷重이나 作用應力에 관해서 어떤 調査를 進行하는 데 있어 수차 이 結果를 反映해서 다시 보도록 해야 한다.

### 5. 鋼鐵道橋의 耐用年數 推定

#### 5.1 鋼鐵道橋의 耐用年數

鋼鐵道橋의 耐用年數를 決定하는 「壽命」의 定算에 관해서는 종종 생각하는 바가 있으나, 하나의 생각하는 방향으로 「經濟的, 物理的 面으로 미루어 보아 構造物의 強度나 機能을 確保上 致命的인 損傷이 생긴 때」를 壽命이라고 하고, 그 경우 거기까지의 期間을 「構造物의 經濟性을 考慮한 物理的 耐用年數(耐用期間)로 생각할 수 있다. 다만 그 橋梁이 供用期間中에 構造的으로 致命的이 되지 않는 程度의 變狀이 생긴 경우에는 通常 保守管理로 修繕되는 것이 前提이다.

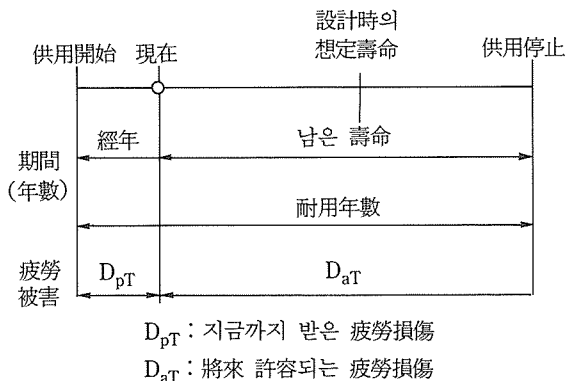


그림 5.1 鋼橋의 壽命·經年圖

## 5.2 耐用年數의 算定

### (1) 耐用年數 算定의 基本的인 考慮方法

供用中の 構造物의 耐用年數나 남은 壽命은 그 構造物의 壽命을 決定하는 變狀의 種類와 그 部材로서는 이음의 疲勞強度 및 過去에 받은 應力履歷을 알면 推定할 수가 있다. 또한 그 推定은 累積疲勞는 破壞力學의 手法에 의해 定量的으로 할 수가 있다.

따라서, 耐用年數를 推定하는 데는 처음으로 그 構造物의 壽命을 決定하는 個所의 選定이 必要하나, 이 選定方法에 대해서는 매뉴얼 등으로 표시할 必要가 있다.

### (2) 累積疲勞 評價에 의한 耐用年數 및 남은 壽命 算定

構造物이 供用 開始부터 停止에 이를 때까지 耐用年數(耐用期間)는 그림 5.1에서 보여준 것과 같은 疲勞損傷의 문제를 생각할 수 있다.

耐用年數의 算定은, 原則으로는 實態에 적합한 條件으로 評價하는 것으로, 實動荷重을 써서 하는 것이 原則이다.

그러나 過去의 荷重이나 應力履歷을 충분히 알지 못하는 경우나, 將來의 走行計劃이 明確하지 않은 경우도 많다. 그 경우는 어느 假定으로 實動應力을 算定하지 않으면 안되므로, 몇개의 方法을 공부해 둘 필요가 있다.

## 5.3 耐用年數 算定에서 疲勞損傷 評價의 基本式

耐用年數 算定에서 疲勞損傷을 評價하는 方法은 前述한 것과 같이 「累積疲勞損傷」과 「破壞力學의 評價」의 두 종류가 適用된다.

### (1) 累積疲勞損傷에 의한 評價

累積疲勞損傷에 의한 方法(4.2.1)은 一般적으로 아래에서 보여주는 Palmgren-Miner 法則,

또는 單純히 Miner 法則으로 불리우는 手法에 의해 余壽命을 推定하는 方法으로 아래와 같은 假定에 基礎를 둔다.

(a) 어느 應力 Level에 있어서 疲勞損傷의 進行은 그 應力에 의해 결정하며, 그러고도 線形으로 累積된다.

(b) 各 應力 Level에 있어서, 疲勞損傷의 總和가 一定値에 達하면 疲勞破壞된다.

바꿔 말하면 어느 應力範圍  $\Delta\sigma_i$ 을 반복 負荷시킨 경우 반복회수  $N_i$ 으로 破壞되는 이음이 그 應力範圍를  $n_i$ 回變, 式(4.2)로 표시되는 疲勞損傷  $D$ 의 누적이 1에 達했을 때, 疲勞破壞된다고 생각한다.

本法則을 既存 構造物의 疲勞健全性의 評價法으로 사용되는 경우는 여기까지 累積된 疲勞損傷  $D_{pT}$ 와 장래 받는다고 생각되는 疲勞損傷  $D_{aT}$ 로 나누어 그 合計가 1이 될 때, 疲勞破壞가 되는 것을 조사할 수가 있다.

$$D_{pT} + D_{aT} = 1 \dots\dots\dots (5.1)$$

이 경우, 評價에 쓰이는  $\Delta\sigma-N$  線圖에서는 疲勞限界를 考慮한 Miner 法則이나 疲勞限界를 考慮한 修正 Miner 法則 및 長壽命域의 強度線圖를 折曲한 Maibach에 의한 方法 등이 있으나, 여기서는 三木이 提案한 「打切 限界付 修正 Miner의 方法」을 사용하고 있다. 이 方法은 變動 振幅應力下에서도 疲勞損傷에 기여하지 않는 應力範圍의 限界値가 있고 이것을 修正 Miner 法則에 導入하는 方法이 있다.

### (2) 破壞力學의 手法에 의한 評價

이 方法은 疲勞損傷을 반복되는 應力에 의해 龜裂의 進展과, 龜裂이라고 하더라도 龜裂狀態의 缺陷이 成長해서 構造部材나 이음의 強度나 기능을 상실한 時期를 推定 計算해서 그 時機를 推定計算한다.

그 時期까지를 「耐用年數」라고도 한다.



(3) 腐食部材의 疲勞壽命 評價

一般的으로 設計에서는 構造物에 腐蝕이 일어나지 않는 것으로 配慮하고 있으며 一部 部材를 除外하고는 強度檢査에서는 그렇게 腐蝕의 程度를 考慮하지 않고 있다. 維持管理에 있어서 疲勞壽命의 評價도 斷面缺損의 影響을 考慮해서 하고 있으며 대개 腐蝕보다 疲勞強度의 低下를 考慮하지 않는 경우가 많다.

이 理由로써 通常 構造物은 適切히 塗裝管理가 이루어지고, 또한 古桁을 사용한 疲勞試驗 등으로부터 局部的인 침식으로 腐蝕된 길이의 位置까지 疲勞龜裂이 發生하였어도 途中에서 停止되며, 最終破斷은 最少斷面部에서 일어날 確率이크다. 따라서 腐蝕部材의 疲勞壽命은 實構造物에서 생각하는 限, 局部的인 凹凸로 보아 評價할 必要가 없다고 생각된다. 그러나, 實際 構造物의 腐蝕部材에서 最少斷面部(斷面缺損이나 리벳트 구멍이 있는 斷面)에 局部的으로 깊게 腐蝕이 있고, 그곳으로부터 龜裂이 發生하는 경우도 없거나 있는 것으로 이것에 대한 配慮는 必要하다. 따라서 일단 龜裂이 發生하여 破斷에 이른다 해도 물의 進入에 의해 腐蝕의 問題도 있다.

따라서 부식의 影響에 관해서 충분한 해석 없이 표면만 보고는, 작은 것으로도 評價가 위험측으로 되기 쉬우므로 腐食의 程度를 어느 程度 配慮한  $\Delta\sigma-N$  線圖를 사용하여 評價한다.

(表 5.1 參照)

5.4 累積疲勞의 算定式

(1) 지금까지 받은 累積疲勞  $D_{DT}$ 와 余壽命 算出에 쓰이는 累積疲勞  $D_{aT}$

式(4.2)에서 보여주는 疲勞損傷度에 대해서, 지금까지 받은  $K$  種類의 各 應力 Level의 반복회수와 그 應力  $\Delta\sigma$ 에서 疲勞壽命( 반복회수)을 각각  $n_i, N_i$ 라 하면, 따라서 그 다음의  $N_0=2i \cdot 10^6$ 회 疲勞強度  $\Delta\sigma_{TD}$ 와 等價 損傷이 되는 반복회수를  $N_{oeq}$ 라 하면, 이제껏 받은 累積疲勞  $D_{PT}$ 는 아래와 같다.

$$D_{PT} = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} = \frac{N_{oeq}}{N_0} \dots\dots\dots (5.2)$$

여기서 等가 반복회수  $N_{oeq}$ 는

$$N_{oeq} = \sum_{i=1}^k n_i \left( \frac{\Delta\sigma_i \cdot \alpha}{\Delta\sigma f^0} \right)^m \dots\dots\dots (5.3)$$

이 되므로,  $D_{PT}$ 는 다음 式으로 표시된다.

$$D_{PT} = \frac{1}{N_0} \cdot \sum_{i=1}^{k_p} n_i \cdot \left( \frac{\Delta\sigma_i \cdot \alpha}{\Delta\sigma f^0} \right)^m \dots (5.4)$$

이 생각과 같은 모양으로  $D_{aT}$ 도 표시할 수 있다.

즉,

$$D_{aT} = \frac{1}{N_0} \cdot \sum_{i=1}^{k_a} n_i \cdot \left( \frac{\Delta\sigma_i \cdot \alpha}{\Delta\sigma f^0} \right)^m \dots\dots (5.5)$$

여기서  $N_0 : 2 \times 10^6$ 회

表 5.1 供用桁의 疲勞評價에 쓰이는 이음의 200萬回 時間 強度

應力의 種類	이음의 種類		強度等級의 區分	200萬回 時間 強度(MPa)	勾配	記 事 (게이지 方向等)
公稱應力	플 랜 지	腐蝕을 가진 母材	C	125	3	단, 打切한계는 설치하지 않은 純斷面應力으로 照査
	리벳트 이음	輕度나 부식 포함	C	125	3	
포르스포트	公線應力을 定義할 수 없는 이음	熔接部를 仕上한 것이나 빋트 형상이 良好한 것	D	100	3	포르스포트에 착안하여 측정 및 해석한 應力 사용
		다듬지 않은 것	E	80	3	

$\Delta\sigma_i, n_i$ : 變動應力을 應力範圍頻度 解析時  $i$ 番  
째 應力範圍와 그 반복회수

$\Delta\sigma_{f0}$ : 그 이음의  $2 \times 10^6$  회 強度

$K_p$ : 지금까지 받은 應力範圍의 種類數

$K_a$ : 今後 作用하는 應力範圍의 種類數

$m$ : 그 이음의  $\Delta\sigma-N$  線圖의 勾配를 決定  
하는 係數

$\alpha$ : 實應力比

즉  $\Delta\sigma_i$ 와  $n_i$ 를 어떤 方法으로 求한다고 하면,  
 $D_{PT}$ 도  $D_{aT}$ 도 求해지게 된다.  $\Delta\sigma_i$ 와  $n_i$ 의 求하는  
方法은 몇개의 方法이 있다. 實務로서 簡便化를  
도모한 方法이 많으나, 一般의으로 簡便化를 도  
모하면 도모한 만큼 安全側에 過大한 評價를  
하게 된다.

(2) 余壽命 算出

여기서 許容할 수 있는 累積疲勞  $D_{aT}$ 는 式(5.  
1)에 의해 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$D_{aT} = 1 - D_{PT} \dots\dots\dots (5.6)$$

또한,  $D_{aT}$ 는 余壽命( $Tr$ )을 사용하여 다음과  
같이 표현할 수 있다.

$$D_{aT} = (\text{今後 받을 수 있는 疲勞損傷度의 年間  
累計}) \times Tr$$

즉,

$$D_{aT} = \frac{1}{N_0} \cdot \sum_{i=1}^{k_a} \left\{ n_{aeq(i)} \cdot \left( \frac{\Delta\sigma_{a\max}(i) \cdot \alpha}{\Delta\sigma_{f0}} \right)^m \right\} \cdot Tr$$

..... (5.7)

$$n_{aeq(i)} = \sum_{i=1}^{n_a} \left\{ n(i) \cdot \left( \frac{\Delta\sigma(i)}{\Delta\sigma_{a\max}(i)} \right)^m \right\} \cdot N_y$$

..... (5.8)

여기서,  $\Delta\sigma_{a\max}(i)$ : 將來 走行하는 各 列車에  
의해 생기는 最大應力範圍

$n_{aeq(i)}$ : 通過하는 各 列車의 最大應力範圍에  
대한 1年間に 해당하는 等價 반복회수

$\Delta\sigma(i), n(i)$ : 列車가 走行할 때 생기는 變動應

力을 頻度解釋時 그 結果로부터 얻어지는 各  
應力範圍와 그 반복회수

$nm$ : 一個 列車가 通過할 때의 頻度解析을 하  
는 應力範圍 Level 數

$N_y$ : 一年間에 通過하는 列車本數, 확실하지  
않은 경우는  $N=365 n_{ad}$

$n_{ad}$ : 一時동안 通過本數

이 式을 이용하여 余壽命  $Tr$ 을 구할 때 다음과  
같이 한다.

$$Tr = N_0 \cdot C - D_{PT} / \sum_{i=1}^{k_a} \left\{ n_{aeq}(i) \cdot \left( \frac{\Delta\sigma_{a\max}(i) \cdot \alpha}{\Delta\sigma_{f0}} \right)^m \right\}$$

..... (5.9)

5.5 耐用年數(壽命) 評價에 쓰이는 이음의  
疲勞強度

(1) 累積疲勞로 쓰이는 強度

이 評價에 쓰이는 이음의 強度는  $\Delta\sigma-N$  線  
圖를 사용, 新設計 標準에서 보여주는 것을 適  
用한다.

이제, 供用桁에서 一般으로 腐蝕을 수반한 것  
이나 現場에서 加工된 것, 構造나 이음의 形狀이  
複雜하여 公線應力이 明確하지 않은 것도 있다.  
이것에 관해서는 現在 종종 研究를 진행하고  
있으나 잠정적으로는 前述한 表 5.1에서 보여  
주는 것을 사용하고 있다.

(2) 破壞力學에 對한 것

破壞力學에서 疲勞龜裂進展速度는 다음 式으  
로 표시한다.

$$da/dN = C (\Delta K^m - \Delta K_{th}^m) \dots\dots\dots (5.10)$$

여기서  $C, n$ : 定數

$\Delta K_{th}$ : 下限界應力擴大係數 範圍

表 5.2  $da/dN - \Delta K$  線圖의 線定數

	c	m	$\Delta K_{th}(MP\sqrt{m})$
最安全曲線	$2.7 \times 10^{-11}$	2.75	2.0
平均曲線	$1.5 \times 10^{-11}$	2.75	2.9

또한 定數  $C, m$ 과  $\Delta K_{th}$ 는  $da/dN - \Delta K$  線圖를 써서 求하며 그 값은 表 5.2에 의한다. 이것은 JSSC의 疲勞設計指針值를 이용한 것이다.

러한 方法의 導入에 의해 鋼鐵道橋의 效率的인 維持管理와 適正한 改良計劃이 可能하도록 고려해야 한다.

## 6. 結 論

## 參考文獻

列車速度 向上이나 列車回數의 增大 등은 豫想되는 鋼鐵道橋의 疲勞損傷에 대응하기 위해 疲勞損傷의 評價手法을 생각해내게 되었다.

今後 豫想되는 疲勞損傷에 대해서는 지금과 같은 檢査로 發見해서 對處하는 方法이 아닌, 龜裂의 發生이나 進展을 解析하는 方法에 의해 疲勞損傷을 豫測하는 手法을 導入하는 것이 必要하다.

또한, 이 方法은 現存 鋼鐵道橋의 耐用年數(余壽命)의 推定에도 應用된다. 今後 實動應力이나 이음의 疲勞強度 등에 關한 Data의 累積에 의해 評價의 精度를 높이는 것이 必要하다. 이

- 1) 西村俊夫, 三木千壽: 引張應力に起因する鋼橋梁變狀, 土木學會誌, Vol 60, 1975. 11
- 2) 進翰省鐵道局: 鐵道構造物等 設計標準(鋼合成構造物) 1991. 12
- 3) 榎本守: 土木構造物の壽命とは何か: 土木學會誌, 1985. 8
- 4) 竹名與英, 川上博造, 淺川和夫, 阿部允: 經年劣化したりベットプレートガーターの 疲勞強度, 鐵道技術研究報告, No 1339, 1987. 2
- 5) 日本鋼構造協會: 疲勞設計指針(案), JSSC 레포트 No. 14, 1989. 11

# 안전의식 개혁

