

# 鐵橋의 健全度 評價方法

## 이 종 득

철도전문대학 교수

우리 협회 이사·

비상근전문위원

## 1. 序 論

鐵道橋에서 速度向上과 列車回數 增加 등 그 使用條件은 엄격해지고 있다. 이로 인해 安全에 대한 支障이나 維持管理經費의 增大 등이 뒤따르게 되었다.

이것을 解決하기 위해서는 기존 橋梁의 損傷이나 耐力, 耐久性 등의 實態를 보다 定量的으로 把握하여 適切한 補修·補強 등의 對策을 강구할 必要가 있다. 鋼橋의 實態를 把握하는 技術에 관해서 鐵道에서는 여러가지 研究가 이루어져 왔다. 그 結果, 耐力의 評價, 또는 耐久性의 評價 등 個個의 技術이 確立되어 왔다. 그러나 이 개개의 技術을 정리하여 體系化하기까지는 어려운 문제점도 많았다.

여기에 소개하고자 하는 橋梁診斷 시스템(BMC)은, 鋼橋의 健全度에 관한 各種 技術을 體系化하여 維持管理에 從事하는 技術者가 쉽게 이용할 수 있도록 시스템化한 것이다.

여기서는 BMC 시스템에 있어서 評價·診斷方

### 目 次

1. 序論
2. 鐵橋의 健全度와 그 評價項目
3. 損傷度의 評價
  - 3.1 損傷 패턴
  - 3.2 損傷 評價의 흐름
  - 3.3 損傷度의 評價
4. 現有耐力의 評價
  - 4.1 現有耐力의 算定
  - 4.2 現有耐力의 判定區分
  - 4.3 BMC 시스템에 의한 現有耐力 算定흐름
  - 4.4 시스템에 의한 處理
5. 耐久性(余壽命)의 評價
  - 5.1 余壽命이란
  - 5.2 BMC 시스템에 있어서 余壽命 評價의 흐름
  - 5.3 入力데이터
6. 使用性(主로 走行性)의 評價
7. BMC 시스템의 活用 事例
  - 7.1 老朽桁의 余壽命 評價
  - 7.2 檢査의 效率化

법에 관해 記述함과 同詩에 2, 3의 活用方法에 대하여 언급하고자 한다.

## 2. 鋼橋의 健全度와 그 評價項目

構造物은 해가 지남에 따라 서서히 劣化하여 그 性能이 低下하는 것이 一般의이나 그 劣化의 정도는 各種 條件에 따라 차이가 생긴다.

예를 들면 變狀, 소위 損傷은 當初부터 가정된 經年劣化 이상으로 性能이 低下하는 現狀으로 생각할 수 있으나, 設計時 假定되지 않은 苛酷한 條件으로 使用되는 경우가 많이 발생하고 그 程度에 따른 劣化의 進行速度를 上回하여 빠른 低下를 받게 된다.

이 構造物의 性能의 時系列的 變化를 보여주는

것이 그림1의 劣化曲線이다. 縱軸내 性能, 橫軸내 經年을 보여준다.

이 線圖에서 「設計時의 初期性能 레벨」과 構造物에 要求되는 性能을 合理的으로 유지하기 위한 最適의 投資時期로 「管理上의 保守限界 레벨」 및 構造物이 破壞 등에 의해 物理的으로 그 機能을 상실한 「物理的 限界 레벨」을 보여준다.

기타 損傷에 대한 經費의 投入面으로부터 생각하면 膨大한 數의 構造物 全體가 「管理上 保守限界」에 達하는 것은 現實的으로 不可能하므로, 一般的으로는 投資의 平準化를 도모하고 있다. 그래서 그 時期는 一般的으로 「管理上의 保守限界」보다 早期가 되며, 이것을 「經費投入 標準 레벨」로서 그림에서 보여준다.

이와 같은 構造物의 性能은, 供用中에 時間과

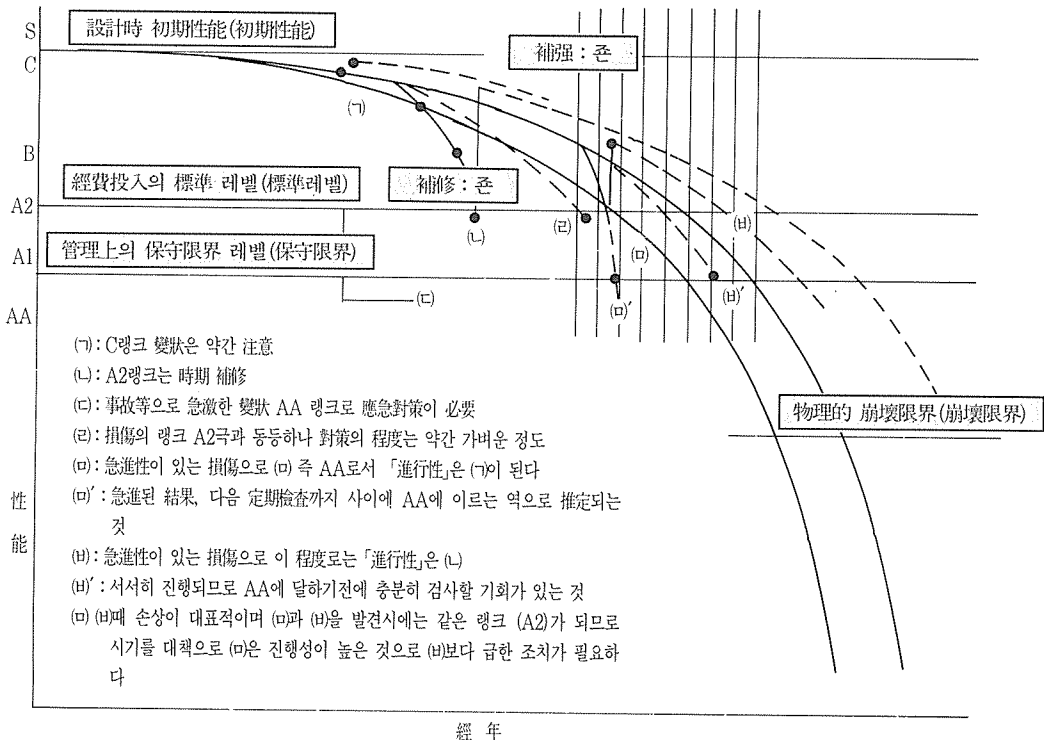


그림 1. 構造物의 性能과 經時變化

함께 低下되는 劣化曲線으로 볼 수가 있다. 그림 中의 縱軸에 性能의 區分으로서 現行 健全度 評價區分을 보여준다.

構造物은 劣化됨으로써 使用發生이 된다고 해석하지 않고, 要求되는 性能을 충분히 滿足하면 供用에 견디게 된다. 즉 本來 構造物의 健全度는 단순히 變狀劣化의 程度만으로부터 決定되지 않고 그 構造物에 要求되는 性能이나 機能에 대한 適用性(耐用性)도 고려에 넣는 것이 적절하다. 그래서 그 程度를 표시하는 것이 本來의 「健全度」라고 할 수 있다. 즉 鋼橋의 健全度 評價는 다음에 보여 주는 것과 같이 단순히 「損傷」만으로도 아니라 「耐力·耐久性」 및 「使用性」의 面으로부터도 判斷할 수가 있다.

- ① 損傷度 : 構造物의 劣化의 程度
- ② 耐力·耐久性 : 어느 정도의 하중에 견딜 수 있어 어느 정도 耐久性을 가지고 있는 것
- ③ 使用性 : 使用上의 利便性이나 合理性 및 利用者側의 要求性能에 대한 適應性

### 3. 損傷度의 評價

#### 3.1 損傷 패턴

鋼橋의 損傷 패턴은 다음과 같은 두가지로 볼 수 있다.

- ① 外面으로 나타나는 損傷 : 變形, 볼트이완, 破斷 등으로 주로 육안으로 발견 가능한 것
  - ② 内部에 潛在한 損傷 : 累積피로 등 內在的으로 進行하는 데메지, 末期까지 表面으로 나타나지 않는 육안으로 발견하기 곤란한 것
- 중래 健全度 診斷의 對象으로 損傷의 主는 ①의 外面으로 나타나는 損傷이었다

그러나 ②와 같이 겉으로 나타나지 않아도 一端 表面에 나타나 急進되어 構造物에 重大한 影

響을 줄 可能性이 있다. 結果적으로 「進行性」이 빠른 種類의 損傷은 ①의 경우보다 그 취급이 어려운 것이 있다.

따라서 그 種類의 損傷에 대해서는 內在的 兆候(累積疲勞 등)中에 檢知하여 對處할 필요가 있다. 이와 같은 것에 대한 檢知는 병원 등에 일정 기간 入院하여 건강상태를 조사하는 정밀검사에 상당하는 검사로 발견할 수 있는 것으로, 豫防·保全的 維持管理가 可能하다.

#### 3.2 損傷 評價의 흐름

그림 2 및 그림 3에서 損傷度 評價의 具體的인 흐름을 全般檢査와 個別檢査에 관해서 보여준다.

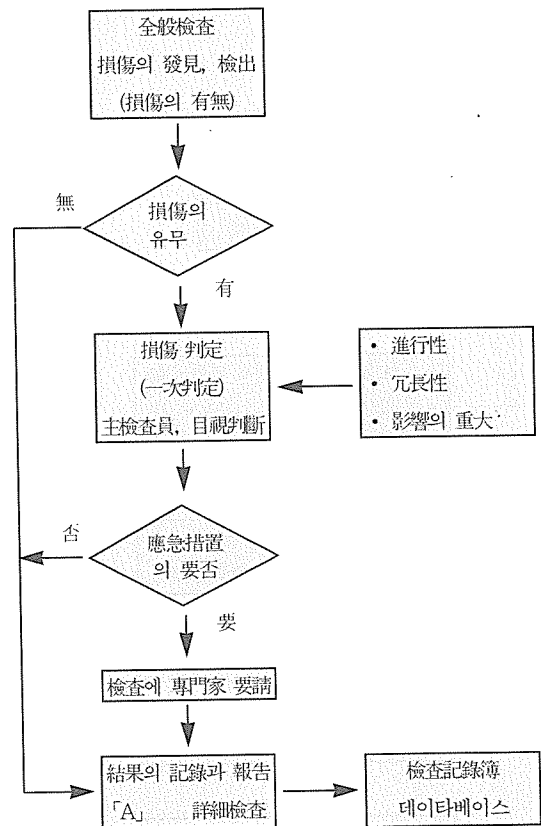


그림 2 全般檢査(定期檢査)

### 3.3 損傷度의 評價

「損傷度」의 評價는 다음과 같은 項目에 關해서 시행한다.

- ① 進行性
- ② 冗長性
- ③ 變狀이 주는 影響

다음으로 「進行性」, 「冗長性」 및 「變狀이 주는 影響」에 대하여 詳細하게 기술한다.

#### (1) 損傷의 進展性

이것은 방금 發見된 損傷이 進展되면 어느 정도 的 期間에 該 部材의 性能은, 機能을 잃은 狀態가 된다.

#### (2) 冗長性(쓸데 없음)

損傷에 의해 構造物 全體가 崩壞되는 것은, 機

能을 잃지 않은 能力을 表示하는 尺度라고 말할 수 있다.

즉 構造物의 冗長性은, 發見된 損傷이 진전하여 破斷狀態에 達했을 때, 崩壞 等 構造物으로서의 性能이 機能을 잃지 않은 것인지 어쩐지를 評價하는 것이다. 따라서 「冗長性이 있다」는 것은 상당히 崩壞에 이르고 있는 것을, 「冗長性이 없다」고 하는 것은 構造的 崩壞에 빠지기 쉬운 것을 말한다.

#### (3) 變狀이 주는 影響

예를 들면, 작은 損傷으로 對策이 容易하여 빨리 바르게 고칠 수 있는 것과 같은 變狀對策時期에 대해 웨이트가 붙은 것

## 4. 現有耐力의 評價

### 4.1 現有耐力의 算定

鋼鐵道橋의 경우, 既存構造物의 耐力은 「現有應力比率」 또는 「現有耐力」으로 評價되며 評價式은 式(4.1)에 의한다.

$$\text{現有應力比率(SR)} = \sigma_m / \sigma \times 100\% \dots\dots (4.1)$$

여기서

$\sigma_m$  : 保守限度應力數

$\sigma$  : 當該線區의 許容最適速度로 車輛이 入線할 때에 部材에 發生하는 最大應力度

$$(\sigma = \sigma_3 + \sigma_j + \sigma_i + \sigma_c)$$

部材에 生기는 最大應力度는 該時點에 있어서 斷面狀態에 實動荷重이 作用할 때이다. 또한 斷面缺損의 影響은 局部的인 腐蝕에 關해서는 구멍 찢김과 같은 모양으로 面積比로 評價하나, 斷面缺損이 보 全長에 미치는 경우는 中立軸도 變化하는 것으로 計算한다

「保守限度應力度( $\sigma_m$ )」는 기존 구조물을 評價할

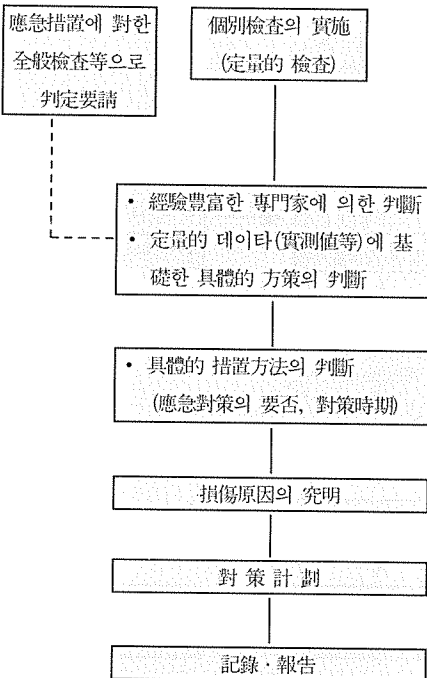


그림 3 個別檢査(詳細檢査)에 있어 評價의 흐름

때 사용되는 許容應力度이다.

鋼鐵道橋에서는, 耐力에 대한 하나의 評價方法으로 전에는 「實耐率」을 計算하여 入線可能한 列車重量이나 速度를 判斷하여 하였다. 그러나 이 「實耐率」은 本來, 列車의 入線은 安全을 判斷하는 것으로, 필히 網橋의 健全度를 評價하는 데 쓰였다.

여기서 보다 合理的인 健全度診斷을 하기 위하여, 1987년에 새로이 梁의 耐力를 評價하는 指標로서 「現有應力比率: SR值」가 定해졌다.

兩者의 強度評價에 對해 고려하는 方法은 基本的으로는 그것보다 차이가 없으나, 새로운 指標는 다음과 같이 생각하는 方法에 기초를 두고 있다.

① 「實耐率」은 梁의 健全度에 대해 走行速度가 定해지나(構造物이 主役), 「SR值」는 처음에 構造物의 使用條件(列車重量, 速度, 列車回數 등)에 대한 要求가 표시되고 그것에 대한 適用性을 評價하여 「健全度」로서 判定할 수 있는 것이다(列車가 主役).

② 從來, 필히 明確하게 보여주었던 保守限度應力을 構造部材의 強度와 使用條件에 의해 定했다.

## 4.2 現有耐力의 判定區分

現有耐力(現有應力比率)의 評價結果는 現時點에서 必要한 荷重에 대한 耐荷力을 표시하는 것이다.

이것을 어느 程度 豫防·保全的인 對應을 취할 수 있는 可能한 判斷의 기준이 필요하다. 現行의 保守標準은 明確한 基準은 나와 있지 않으나 여기서는 표 1에 하나의 基準으로 보여준다. 또한 이 표에서는 단순한 比較일 뿐 適當한 것은 아니므로 參考值로서 現行의 SR值에 대한 舊實耐率(β)의 大략值를 보여 준다.

## 4.3 BMC 시스템에 의한 現有耐力 算定의 흐름

現有耐力(現有應力比率)의 算定은 그림 4에서 보여주는 흐름으로 실시한다.

## 4.4 시스템에 의한 處理

### (1) 評價에 쓰이는 하중의 入力

評價에 쓰이는 荷重으로서는, 列車荷重, 기타 死荷重, 衝擊荷重 및 遠心荷重이 있다. 이 중에서, 列車荷重은 各各 列車에 관해서 軸重과 軸距를 데이터베이스에 登錄해두고 計算時 꺼내서 入力한다. 다른 荷重은 計算時 入力한다.

### (2) 作用하는 斷面力의 計算

構造形狀에 관해서는 各 部材의 斷面力을 計算한다. 여기서 處理할 수 있는 構造는 아래와 같이 한다.

- ① 單純桁(上路플레이트거더-主桁)
- ② 下路플레이트 거더, 트러스 床組
- ③ 特別한 構造

特別한 構造로는 트러스 主構, 斜角桁, 曲線桁, 格子桁 등이 있다. 단, 이를 위해서는 別途, 進行荷重載荷에 대한 「構造解析 모듈(음선)」을 이 용할 필요가 있다.

표1 現有耐力 比率에 대한 健全度 判定區分の 基準

健全度 判定區分	現有應力比率 (SR %)	舊實耐率·參考值
AA	SR ≤ 100	대강 80% 以下
A1 또는 A2	100 < SR ≤ 120	대강 80~100%
B	120 < SR ≤ 150	대강 100~120%
C 또는 S	SR > 150	대강 120%를 넘는 것

# 철도안전관리

## (3) 各 部材 斷面形狀의 入力

착안하는 部材의 斷面形狀과 부식 등에 의한 斷面缺損이나, 供用中에 시행한 補強斷面의 특성은 예비도면으로부터 얻어낸다든지 實橋에 있어

서 斷面測定을 하여 구한다. 시스템 中의 데이터베이스에 登錄할 수가 있다.

計算時에는 그 데이터베이스로부터 취하여 實行한다.

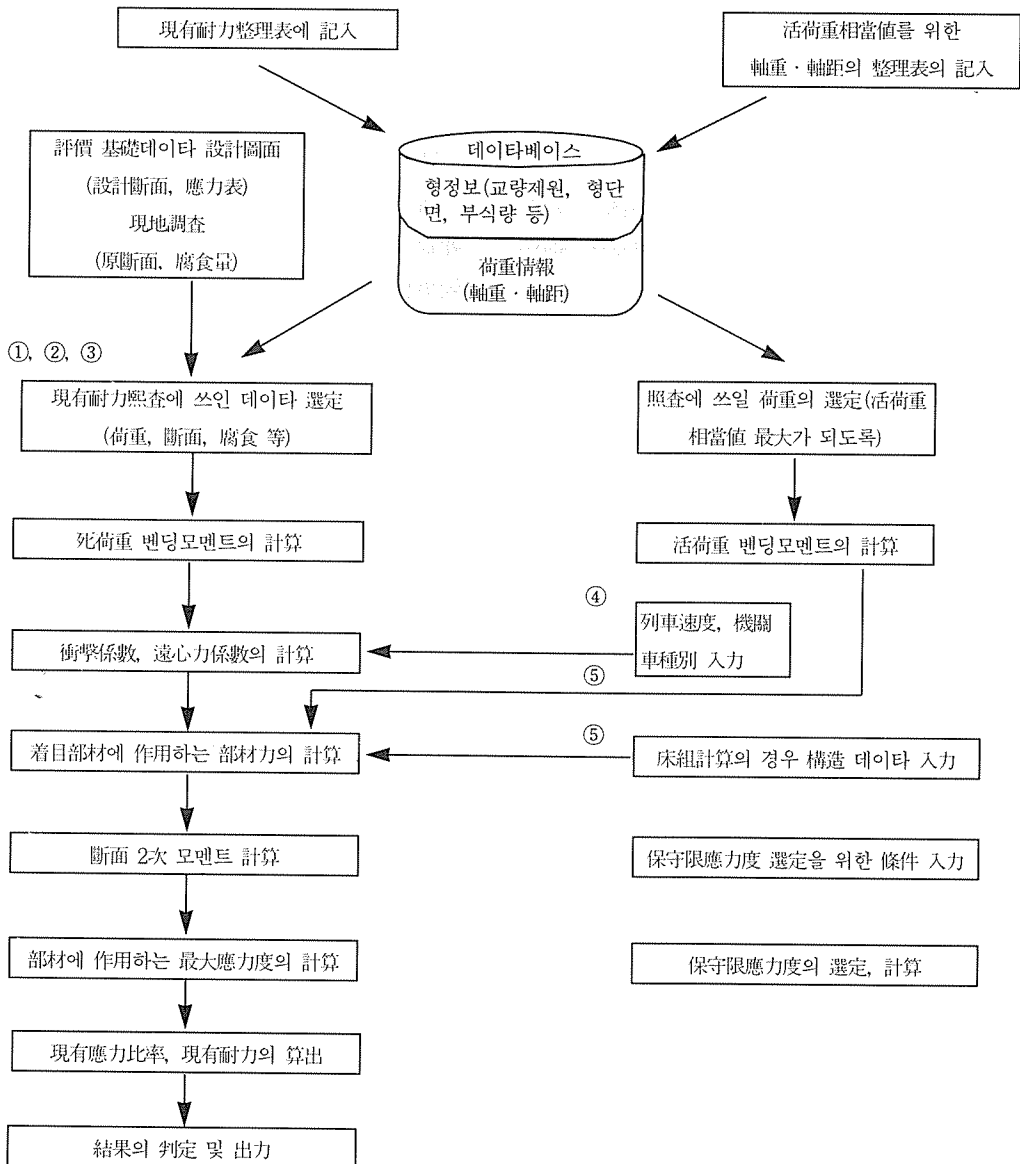


그림 4 耐力評價 算定흐름

(4) 保守限度應力度の 選定

耐力評價를 할 때 許容應力度로서는 保守限度應力度を 쓴다. 이 값은 그 部材의 材質과 使用條件으로부터 依次的으로 定해져 있다. 그를 위해서는 事前에 그 鋼材의 製作年代를 조사한다든지 實橋에 火花試驗을 하든가 하여 材質을 特定化할 必要가 있다. 그래서 實行時에는 더욱더 使用條件이 되는 열차의 種別, 速度 및 그 線區의 通過噸수를 入力하게 된다.

(5) 入力데이터

實行時에 필요한 主要한 入力데이터는 아래와 같다.

- ① 橋梁諸元
  - ② 荷重에 관한 것(偏軌, Cant量, 遠心力, 軸안위치)
  - ③ 斷面(原斷面 및 補強斷面), 腐植量
  - ④ 保守限度應力度 및 衝擊荷重 算定을 위한 데이터(列車速度, 機關車種別)
  - ⑤ 床組計算의 경우 構造데이터
- 耐力的 評價計算의 흐름과 데이터 入力 關係를 그림 4에서 보여준다.

5. 耐久性(余壽命)의 評價

5.1 余壽命이란

使用中의 鋼橋에서, 耐久性으로서의 物理的 壽命을 決定하는 것으로는 主로 腐食(摩擦)과 疲勞를 생각할 수 있다.

이 中에서, 腐食에 관해서는 前述한 耐力評價에 의해 그 時點에서 評價된다. 그러나 疲勞에 관해서는 微視的인 損傷이 차차 累積되어 그 결과 龜裂이 발생하여 表面에 나타난다. 그 中에는 다

른 損傷에서는 발견되지 않은 急進性을 지닌 것도 있다.

따라서 疲勞에 관해서는 그 累積된 정도를 「疲勞損傷度」로서 정하고 있다.

그래서 疲勞에 의한 部材의 機能이 상실될 때까지의 時間「余壽命」으로 定義한다. 通常, 維持管理에서 하는 余壽命 評價는 다음의 두가지 케이스가 있다.

- ① 하나는 部材나 이음에서 일어나는 疲勞龜裂의 發生時期를 알아내는 경우
- ② 構造物의 壽命, 즉 대체시기를 判斷하는 것과 같은 경우

이중에서 ②의 경우는, 그 構造物 中에서 壽命을 決定하는 데 사용하는 決定方法으로 致命的 變狀을 定할 때, 그 部材의 主안으로서 ①과 같은 評價를 한다. 이러한 방법은, 모두 歐美에서는 실무에서 취급되고 있다.

5.2 BMC시스템에 의한 余壽命 評價의 흐름

余壽命 評價의 理論的인 흐름이나 判斷에 쓰이는 基準은 參考文獻3을 參考한 것으로서, 여기서는 處理 순서를 中心으로 설명을 가한다. 처음으로, 余壽命 處理에 必要로 하는 데이터는 다음 3가지가 있다.

- ① 착안하는 이음의 疲勞強度
  - ② 착안부에 作用하는 應力과 活荷重과의 關係
  - ③ 착안部材에 作用하는 活荷重履歷
- 이에 대한 算出의 흐름을 그림 5에서 보여준다.

5.3 入力 데이터

(1) 착안하는 이음의 疲勞強度

착안하는 이음의 疲勞強度는 鐵道橋의 경우, 現行의 設計標準의 疲勞條件에서 보여주는 이음

# 철도안전관리

의 강도를 사용하는 것을 原則으로 한다. 단, 여기에 표시되어 있지 않은 것에 대해서는 鋼橋造物의 疲勞設計指標 : 同解説에 따른다.

## (2) 착안하는 이음에 작용하는 應力

疲勞의 評價에 쓰이는 應力은 「實動應力」을 原則으로 한다.

그러나 使用開始로부터 대체시기에 이르는 數十年 또는 數百年 以上에 이르기까지 이와 같은 實動應力을 把握하는 일은 不可能하다. 따라서 과거의 이력이나 장래 작용하는 應力을 實動應力으로 쓰기 위해서는 어느 정도 工夫가 필요하다. 一般的으로는 過去の 活荷重 이력이나 금후 가정되는 活荷重條件을, 現時點에서 定義할 수 있는 代表的인 列車의 軸重·軸距를 活荷重으로 假定하여(특히 定한 것이 없는 경우에는 現行荷重이 계속하는 것으로 한다) 이 荷重을 사용하여 시뮬레이션을 한 것에 의한 應力波形을 구한다.

여기서 계산된 應力과형을 그때 그때 實動應力

으로 사용하여도 좋으나, 實際에 作用하는 應力은 設計値보다 작고 一般的으로 安全側이 되므로, 될 수 있으면 計算해서 얻은 應力波形에 實應力比을 곱한 것을 實動應力으로 쓰는 것을 권장한다.

여기서 實應力比( $\alpha$ )는, 軸重·軸距가 이미 알고 있는 列車의 載荷에 의해 計算된 最大應力範圍를  $\sigma_{cs}$ , 같은 조건下에서의 實測値를  $\sigma_{ms}$ 라고 하면 다음과 같이 表示된다.

$$\alpha = \sigma_{ms} / \sigma_{cs}$$

따라서 評價에 사용되는 實動應力波形은 評價에 쓰이는 計算應力波形에  $\alpha$ 를 곱하여 얻는다.

實應力比는 現行的 設計에서도 이미 쓰여지고 있다.

## (3) 活荷重 履歷

累積疲勞의 評價에서는, 活荷重履歷(또는 應力履歷)이 필요하다. 그러나 이러한 데이터를 얻는 것은 대단히 어려움이 많다.

鐵道橋에서는 活荷重 履歷으로서 다음의 세가지 방법을 이용하는 것을 인정하고 있다

- ① 年間通過噸수의 履歷을 이용하는 경우(標準的方法)
- ② 全 列車의 種別, 回數로부터 얻는 경우(高精度 評價)
- ③ 그 線區의 計劃噸수와 경과年수를 알지 못하는 경우(設計와 같음)

이것의 入力方法에 관해서는 시스템 中에 入力 데이터의 정리표가 있으므로 이것을 사용함으로써 自動時 處理가 가능하다

## 6. 使用性(主로 走行性)의 評價

前述한 「損傷度」나 「耐力, 耐久性(余壽命)」은 鋼橋의 基本的인 強度性能에 대한 것에 대해 「使

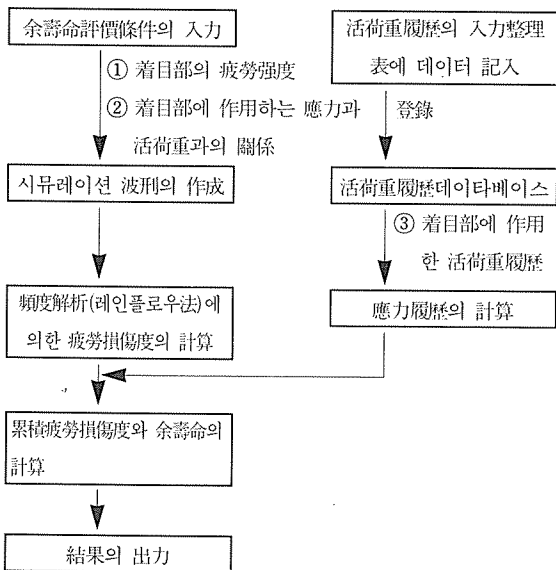


그림 5 余壽命 評價 算定흐름



用性」의 評價는, 走行性 등의 橋梁으로서의 使用性能에 대한 것이다. 다음에 그 事例를 보여준다.

- ① 速度向上의 判斷
  - ② 速度制限과 速度制限의 解除
- 또한 評價에 쓰이는 主된 데이터는 다음과 같이 통한다.
- (a) 構造物의 初期 처짐(캠바)
  - (b) 動的인 처짐과 振動數(載荷時, 無載下時)
  - (c) 로링(模動搖)
  - (d) 列車通過時 車輛에 생기는 加速度와 振動數
- 이러한 데이터를 사용하여 다음과 같은 內容에 關於하여 評價한다.

(1) 처짐의 檢討

처짐( 처짐比)과 速度, 스패너의 關係에 대한 限界值 以內에 드는지를 確認하여 鉛直方向의 列車에 대한 檢討를 한다.

(2) 模振動 · 檢討

模振動量과 振動數의 關係로부터 橋梁의 模振動 特性을 파악하여, 模方向의 列車走行性에 關해서 判斷할 資料를 出力한다.

走行성에 대한 評價는 一般的으로 꽤 專門的인 解析을 必要로 하지만, 鐵道橋에서는 一般的으로 松浦의 提案手法을 基準으로 사용한다.

### 7. BMC 시스템의 活用事例

BMC 시스템의 利用에 의한 個個의 鋼橋의 健全度를 定量的으로 파악하는 것이 可能하다. 그 以外에도 다음과 같은 活用方法이 있다.

- ① 老朽桁의 余壽命 評價
- ② 檢査의 效率化

다음에 각각의 內容에 關해서 說明한다.

#### 7.1 老朽桁의 余壽命 評價

使用年數 60年(現行設計基準으로 假定한 設計耐用年數)을 超過한 桁의 安全이 위험하다든지 保守費의 增大를 염려하는 경향이 많다.

그러나 단지 設計에서 假定한 耐用年數를 초과하였어도 安全에 支障을 주지는 않는다.

그러나 그것을 證明하는 方法이 없기 때문에 경제성을 포함한, 또한 충분히 使用할 수 있는 耐久性을 가진 橋梁도 어느 하나의 損傷이 發生된 契機로 대체한다든지 必要 以上의 修繕費를 지불

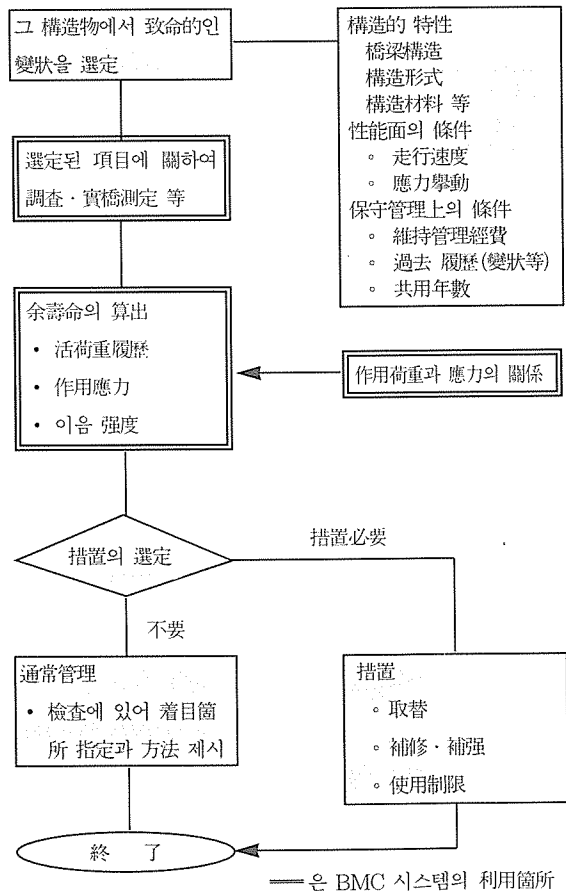


그림 6 余壽命 算出과 活用的 흐름

하는 경우도 적지 않다.

反面, 損傷이 發生하지 않은 橋梁에서도 疲勞의 累積 등 눈으로 보이지 않는 곳에서 老朽化가 進行되고 있는 것과 관계없이 알아차리지 못하는 것도 있다.

從來와 같이 단순히 外面에 나타나는 變狀의 육안 檢査나 健全度 評價뿐으로는 이와 같은 경우 충분하지 못한 面도 있다.

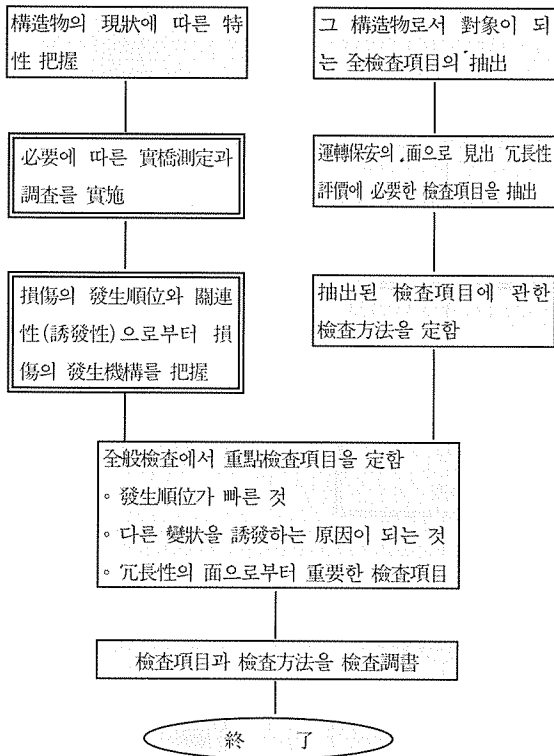
BMC 시스템을 사용하여 余壽命의 評價를 하는 것에 의하면 이러한 老朽桁의 대체시기의 判

斷을 보다 適切하게 할 수가 있다. 그림 6은 余壽命을 算出處現하는 프로젝트이다.

## 7.2 檢査의 效率化

最近構造物에 대한 使用條件이 엄격해지는 한편, 鋼橋의 檢査의 專門家가 적어지는 傾向이 있다.

BMC 시스템을 이용하므로, 構造物의 特性이나 要求되는 性能을 定量的으로 파악하는 것을 效率的으로 하여, 檢査項目을 專門家가 하는 것과 같이 選出하는 것이 可能하다. 그림 7은 그 處理의 一例를 보여준다.



— 은 BMC 시스템의 利用箇所

그림 7. 全般檢査手法의 適正化

### 參考文獻

- 1) 日本土木學會：建造物報保守管理의 標準(案)·同解説·鋼構造物, 1987. 2
- 2) 阿部, 杉錐, 小芝：經年劣化한 鋼鐵道橋의 材料特性, 鐵道總合研報告, 第5卷 第1號 1991. 1
- 3) 三木千壽：構造物의 耐用年數, 土木學會誌, 1983. 10.
- 4) 阿部, 內藤, 小芝, 阪本：鐵道橋의 維持管理에 있어서 疲勞의 評價, 鐵道總研報告, 第6卷 第4號, 1992. 4
- 5) Federal Highway Administration, Inspection of Fracture Critical Bridge Members, Rep. No. FHWA-IP-86-26, September 1986.
- 6) Federal Highway Administration, Bridge Inspector's Training Manual 90.
- 7) 松蒲：新幹線橋梁에 있어서의 橋桁의 鉛直 휨의 許容限度, 鐵道技術研究報告, No. 894. 1974. 3