

鋼鐵道橋의 等價疲勞被害에 관한 研究

A Study on the Equivalent Fatigue Damage of the Steel Railway Bridge

張	東	一*
Chang,	Dong	Il
李	鍾	得**
Lee,	Jong	Deuk
鄭	榮	和***
Chung,	Yeong	Wha

Abstract

The dynamic strain-time($\epsilon-t$) curves of the fatal members in three existing steel railway bridges was measured during the selected trains was passing, and was regulated statistically. By the results of these the equivalent fatigue damages of the selected members was calculated in comparison with the allowable stresses, and was examined.

From these the base available in evaluating the stability and the lifeproof of the steel railway bridge was obtained.

In addition to this, the following several properties which could be used available in designing the steel railway bridges.

It was conformed that the fatigue damages was different each other even in the same members, if the unit weight of the trains was same but the weights and the dispositions of the wheels of the trains was different each other.

It was indicated that the fatigue damages was larger in the members which had the defects in components of the materials, the flaws being made during producing and constructing, and the corrossions, etc.

It was considered that more available data could be obtained, if the same studies were continued under the spans and the types of the bridges being changed continuously.

要 旨

3개의 既存 鋼鐵道橋梁의 主要部材에 대해 列車 通過時의 動的인 變形率-時間($\epsilon-t$) 곡선을 測定 統計整理하여 許容應力을 기준으로 한 等價疲勞被害를 算出 檢討하였다.

이로부터 鋼鐵道橋梁의 安全度 및 耐用年限을 推定할 수 있는 중요한 토대가 마련되었다.

아울러, 鋼鐵道橋梁을 설계함에 있어서 참조할 수 있는 다음과 같은 몇가지 중요한 특성을

* 正會員 · 漢陽大學校 工科大學 土木工學科 教授

** 正會員 · 鐵道專門大學 鐵道土木科 助教授

*** 正會員 · 江原大學校 工科大學 土木工學科 助教授

밝힐 수 있었다.

같은 重量의 列車라도 車軸의 重量 및 車輛의 配軸의 차이 등에 따라 疲勞被害가 달라짐을 확인하였다.

部材의 材料成分이나 製作 및 施工 중의 缺陷, 혹은 腐蝕이나 마모 등이 있는 부분에서는 疲勞被害가 큰 것을 알았다.

支間 및 橋梁形式을 여러 가지로 바꾸면서 계속해서 이와 같은 연구가 이루어진다면 더욱 유익한 자료가 얻어질 수 있으리라 사료된다.

1. 머리말

1.1 鐵道橋梁의 荷重의 特性

鐵道橋梁에는 매우 큰 荷重強度를 갖는 列車가 통과하므로 部材에 일어나는 應力의 변동이 크다. 따라서 荷重의 靜的作用과 衝擊作用에 의한 應力뿐 아니라 反復作用에 의해 매우 큰 重疊應力이 일어나게 되고 이로 인하여 部材에 疲勞現象을 일으켜 材料強度를 저하시키게 된다. 이에 따라 외국에서는 이러한 疲勞에 의한 強度低下를 고려하여 構造物의 安全性을 확보하기 위한 방안을 구체적으로 강구하고 있는 바, 예로서 일본 國鐵에서는 部材의 연결형식을 5가지로 분류하고 각 형식마다 200萬回 反復에 대한 疲勞強度를 기준으로 許容應力을 정하고 있다⁽¹⁾.

또한, 우리 나라에서는 既設橋梁은 물론 아직도 鋼鐵道橋梁標準示方書에 규정된 LS荷重體系, 즉 蒸氣機關車牽引 荷重體系를 設計荷重으로 하여 대부분의 鐵道橋梁이 설계되고 있으나 近來에 蒸氣機關車 荷重體系가 아닌 디젤 機關車 荷重體系 또는 電動客車 荷重體系로 바뀌고 있다. 이들 새로운 荷重體系는 LS荷重體系보다 輕量이기 때문에 部材가 받는 動的인 被害가 적은 것으로 생각하기 쉬우나 뒤에서 검토되는 바와 같이 車軸重量 및 車軸配置의 차이 때문에 橋梁支間の 크기에 따라서는 오히려 疲勞의 영향이 더 크게 나타나는 일이 많다⁽²⁾.

1.2 鐵道橋梁의 實動應力波의 特性

列車 통과 중에 鐵道橋梁의 部材에 생기는 應力波形은 풍랑속을 향해하는 선박의 部材, 亂氣流속을 비행하는 항공기의 主날개, 또는 레일 위를 고속으로 질주하는 철도차량의 車軸에 일어나는 應力波形⁽³⁾과는 상당히 다르다. 위의 선박부재, 항공기 要素, 또는 철도차량의 車軸에

일어나는 應力波形은 어느 시간 동안씩 平均水準에 거의 변동이 없고, 極大値와 極小値 사이에 확실한 相關關係는 규명되지 않더라도 그 平均水準을 중심으로 거의 對稱波에 가까운 不規則交番應力波(incompletely reserved stress wave)인 것으로 알려져 있다. 그러나, 鐵道橋梁의 部材에 일어나는 應力波形은 平均水準에 무시할 수 없는 정도의 변동이 있고, 그 平均水準에 대해서 對稱이라고 볼 수 없는 部分脈動應力波(partially pulsating stress wave)로 된다.

例로서, 單純橋의 支間을 여러 가지로 바꾸면서 日本 標準 N荷重을 재하하였을 경우 휨모멘트의 영향선으로 얻어지는 應力波形의 변화를 나타낸 것이 그림 1.1^(2, 4)이다. 가장 支間이 짧은 2m 橋梁에서는 完全脈動波의 특징을 갖고 1 列車 통과동안 波形의 反復回數가 그 列車의 車軸數와 일치한다. 그러나 支間이 길어져서 車軸 사이의 거리보다 커짐에 따라 波形은 점차 等分布荷重의 재하에서와 같은 모양으로 변하여 1 列車 통과동안 波의 골(谷) 사이의 길이가 점차 알아지고 極大値(σ_{max})와 列車의 兩端을 제외한 極小値(σ_{min})의 비가 점차 1.0에 가까와짐을 볼

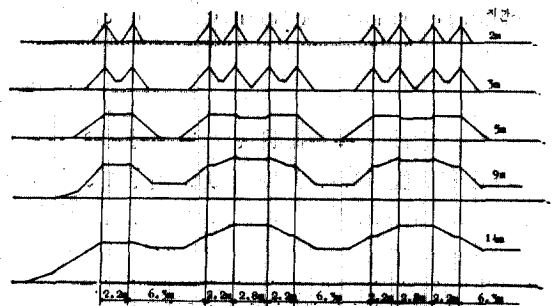


그림 1.1 單純橋에서 活荷重에 의한 靜的 應力波形

수 있다. 뿐만 아니라 波形의 反復回數도 車軸의 數보다 훨씬 적어짐을 볼 수 있다. 波形이 完全脈動波로 되고 波形의 反復回數가 車軸의 數와 일치하게 되는 限界支間은 車軸사이의 거리의 1.3배 정도일 때인 것으로 알려져 있다⁽⁶⁾.

이로부터 鐵道橋梁의 기본적인 應力波形은 支間과 車軸의 配置에 따라 변화함을 알 수 있다. 즉, 들보의 支間에 대한 靜的인 개념과는 반대로 車軸사이의 거리가 큰 電動客車 荷重體系가 機關車 荷重體系보다 더 큰 疲勞被害를 주게 될 것임을 알 수 있다.

뿐만 아니라 列車 통과중에 鐵道橋梁의 部材에 일어나는 實動應力波는 random 性的의 變動應力波로서 靜的인 應力波에 그것의 1/3 정도에 해당하는 2次의 動的인 應力波가 重疊된 것으로 이 重疊 2次波도 疲勞強度에 영향을 주는 것으로 알려져 있다^(6, 7).

또, truss 橋梁의 斜材 등과 같은 部材에 일어나는 實動應力波는 列車의 위치에 따라 應力の 부호가 반대로 되는 交番應力波(reserved 혹은 alternating stress wave)로 되므로 應力の 平均水準이 疲勞現象에 주는 영향은 매우 적은 것⁽⁸⁾을 고려하면 이러한 部材는 疲勞被害를 가장 크게 입게 된다.

鐵道橋梁의 實動應力波의 각 水準의 發生頻度에 대한 여러 연구결과를 검토하면 正規分布 또는 對數正規分布로 나타남을 알 수 있다⁽⁹⁾.

1.3 研究內容

지금까지 항공기, 선박, 혹은 車輛에 일어나는 疲勞現象에 대해서는 상당한 연구가 이루어져 있지만 위에서 보는 바와 같이 鐵道橋梁에 일어나는 應力波形은 이들에 일어나는 應力波形과 다른 特性을 가지고 있으며, 列車의 荷重體系도 많이 변하고 있어서 鐵道橋梁에 일어나는 疲勞現象에 대해서는 아직까지 연구가 매우 빈약한 실정이다. 따라서, 既設되어 있는 鋼鐵道橋梁의 耐用年限을 推定하거나 새로운 鋼鐵道橋梁에 대한 새로운 設計方法을 정립하기 위해서는 精確한 應力波形을 해석하고, 이를 기초로 疲勞被害를 합리적으로 평가하는 일이 매우 중요하다고 본다.

이에 따라 본 연구에서는 鐵道橋梁에 일어나

는 實動應力波의 特性을 해석하고, 이것을 기초로 기준으로 삼은 應力の 反復回數로부터 疲勞被害를 환산하는 식, 즉 等價疲勞被害의 환산식과 이로부터 鐵道橋梁의 供用年限을 推定하는 식을 보였다.

또, 우리 나라의 既存 鋼鐵道橋 上部構造의 主要部材에 대한 變形率·時間($\epsilon-t$) 곡선을 實測하고 이 결과를 range pair 係數法 및 rainflow 係數法⁽¹⁰⁾으로 統計整理하여 이것을 기초로 示方書上의 許容應力을 基準應力으로 하여 等價反復回數를 계산하였다.

이로부터 鋼鐵道橋梁의 耐用性 및 設計特性을 判定하는데 活用할 수 있는 중요한 資料를 제공하도록 한 것이다.

2. 鋼鐵道橋梁의 實動應力波에 의한 疲勞被害의 推定計算 理論

變動荷重을 받는 鋼構造 部材가 破斷에 이를 때까지의 荷重反復回數를 실험결과와 합치하도록 推定할 수 있는 被害法則이 오래 전부터 수없이 행해져서 여러 가지의 法則 및 公式이 제안되어 있다^(11, 12). 이 중에서도 實動應力波의 反復回數를 單純化한 應力波의 疲勞實驗 結果로부터 推定하는 이론으로 線形被害假說이 널리 이용되고 있다. 이 이론에 의해 部材의 破斷壽命을 推定하는 경우에는 應力の pattern에 따라 다음과 같은 두 가지 식을 이용하게 된다⁽¹³⁾.

즉, 抵應力에서 高應力 變換 時,

$$\left. \begin{aligned} \sum_{i=1}^m \frac{n_i}{N_i} < 1.0 \\ \text{高應力에서 低應力 變換 時,} \\ \sum_{i=1}^m \frac{n_i}{N_i} > 1.0 \end{aligned} \right\} (2-1)$$

여기서,

N_i ; i 번제의 應力水準에 해당하는 應力範圍

S_i 에 대한 疲勞破壞壽命

n_i ; S_i 應力範圍에서의 反復回數

위의 관계를 線形으로 修正하기 위하여 指數 疲勞被害度를 도입한 壽命增加假說⁽¹⁴⁾, 部材 중의 潛在 흠의 영향을 고려한 Corten-Dolan의 複線形的 減少假說⁽¹⁵⁾ 등 여러 가지 修正假說이 제안되어 있다. 疲勞龜裂이 발생하여 균열표면을 형성할 때 energy의 發散을 수반하므로 疲勞龜

즉, $N_{eq} \left(\frac{S_i}{S^*} \right)^{1/k}$ 의 平均値를 $\overline{A^*}$, $\left(\frac{S_{ij}}{S^*} \right)^{1/k}$ 의 平均値를 $\overline{B^*}$ 라 하여 식(2-7)에서 $N^*=2 \times 10^6$ 을 기준으로 할 경우

$$T_Y = 2 \times 10^6 / \overline{A^*} \quad (2-11)$$

$$\text{혹은 } T_Y = 2 \times 10^6 / \overline{B^*}$$

으로 된다.

實動應力波를 구할 수 없는 경우는 列車를 靜的으로 재하한 경우의 設計最大應力 S_0 에 換算衝擊係數 I_p 에 의한 영향을 가산하여 다음과 같이 S_i 를 구한다.

$$S_i = S_0(1 + I_p) \quad (2-12)$$

이 때 이 S_i 를 채택함에 있어서 S_i 를 頂點으로 하는 應力分布形과 이것에 對應하는 N_i 의 값으로서 橋梁의 支間이 車軸間 거기의 1.3배 이상인 경우에는 $N_{eq}=1.0$ 으로 취급될 수 있으므로 식(2-7) 및 식(2-8)로 얻어지는 N_i 와 S_i 의 값을 계산 最大値로 사용할 수 있다.

列車系에서 S_i 分布를 對數正規分布로 보고, 이 때 中央値를 S_m , 對數變換의 標準偏差를 S_0 로 나타내면 1年間の 全列車系의 수 N_0 와 年間 等價反復回數 N_{eq}^* 과의 사이에는

$$N_{eq}^* Y = N_0 \exp\left(\frac{S_0^2}{2k^2}\right) \quad (2-13)$$

의 관계가 성립된다. (18)

또, 위의 $N_{eq}^* Y$ 로 供用年限 T_Y 를 환산하면

$$T_Y = \frac{N^*}{N_{eq}^* Y} \left(\frac{S^*}{S_m} \right)^{1/k} \quad (2-14)$$

$N^*=2 \times 10^6$ 을 기준으로 하면

$$T_Y = 2 \times 10^6 (N_{eq}^* Y)^{-1} \left(\frac{S^*}{S_m} \right)^{1/k}$$

로 된다.

3. 應力波의 實測

3.1 대상교량

실측대상으로 선정된 교량은 들보형식으로서 京釜線上的 單純鉸桁橋인 밀양철교(19), 트러스형

식으로서 京釜線上的 라우덴트라켈형인 금강제1철교(20)와 中央線上的 수직재 없는 와렌형인 북한강철교(21) 등이다. 이들 교량의 일반사항은 표 3.1과 같다.

3.2 축점 위치

밀양철교에서는 그림 3.1에서와 같이 徑間 中央단면의 上下플랜지 부분을 택하였다.

금강제1철교에서는 1977년 9월 탈선사고로 파손되어 교체된 부분으로 그림 3.2에서와 같이 徑間 中央格間的 斜材 8, 수직재 4 및 斜材 10의 중앙부를 택하였다.

또, 북한강철교에서는 그림 3.3에서와 같이 斜材와 下弦材, 그리고 하중과 직접 접촉하는 가로

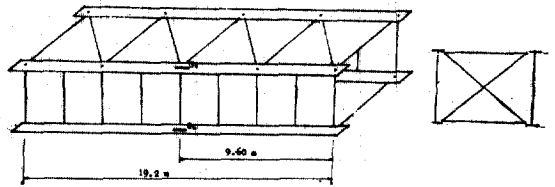


그림 3.1 밀양철교

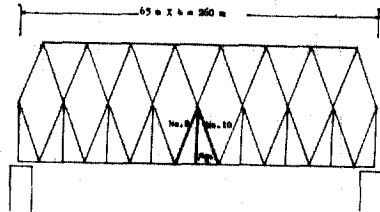


그림 3.2 금강제1철교

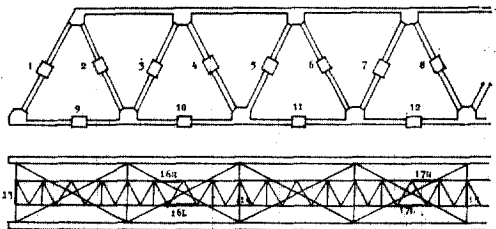


그림 3.3 북한강철교

표 3.1 대상교량의 일반사항

명칭	소재지	가설년도	형식	경간	설계하중	주중하중	연결형식	사용강재	비고
밀양철교	밀양-유천	1930년대	단순판형	19.2 m	LS-20	SD-18	리벳	SB-41	
금강제1철교	매산-신탄진	1940년대초	라우덴트라켈트러스	60.6 m	LS-20	SD-18	리벳	SB-41	
북한강철교	능내-양수리	1977년	와렌트러스	24.2 m 30.0 m	LS-22	E-8000	리벳	SWS-50 SB-41	

보와 세로보의 중앙부를 택하였다. 上弦材 부근에는 고압전선이 통과하므로 측정이 불가능 하였다.

3.3 측정방법

그림 3.4에서와 같은 블록으로 형성되는 動的 變形率 측정체계에 5mm의 전기저항선 스트레인 게이지를 연결하여 貨物列車과 乘客列車가 통과할 경우를 구분하여 實動應力의 變形率-時間($\epsilon-t$) 곡선을 측정하였다.

대표적으로 금강제 1철교에 여객열차가 60 km/hr의 속력으로 통과할 때에 모니터된 $\epsilon-t$ 곡선의 사진을 그림 3.5(上:사재 8, 中:사재 10, 下:수직재 14)에 나타내었다.

대부분의 철도차량은 많은 용량의 전류가 통과하는 전동체계이므로 $\epsilon-t$ 곡선에 雜波(noise)가 混入되는 것을 방지하기 위하여 low-pass filter를 추가한 變形率 增幅器가 사용되었기 때문에 모니터된 $\epsilon-t$ 곡선은 그림에서와 같이 雜波가 없는 단조로운 것으로 나타났다.

4. 測定結果의 정리 및 고찰

4.1 $\epsilon-t$ 곡선의 統計정리

모니터된 實動應力波의 $\epsilon-t$ 곡선에서 負荷順序, 波形 및 形成時間이 疲勞舉動에 아무런 영향을 주지 못한다고 보면⁽¹⁸⁾ 應力水準이 疲勞壽命의 換算에 가장 중요한 자료가 된다.

實動應力波를 應力水準을 위주로 하여 統計정리하는 방법으로는 peak count method, level-crossing count method, fatigue-meter count

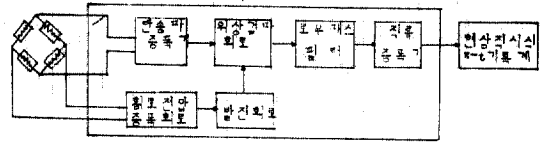


그림 3.4 動的 變形率 測定體系

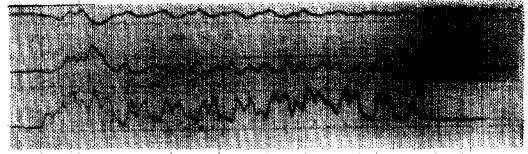


그림 3.5 금강제 1철교에 No.4109 여객열차가 60km/hr의 속력으로 통과할 때 모니터된 $\epsilon-t$ 곡선

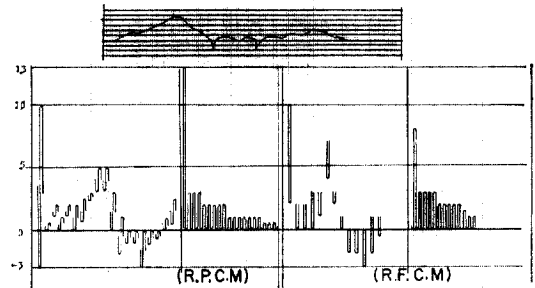


그림 4.1 밀양철교에 화물열차 통과 시 上 flange의 $\epsilon-t$ 곡선과 정리圖

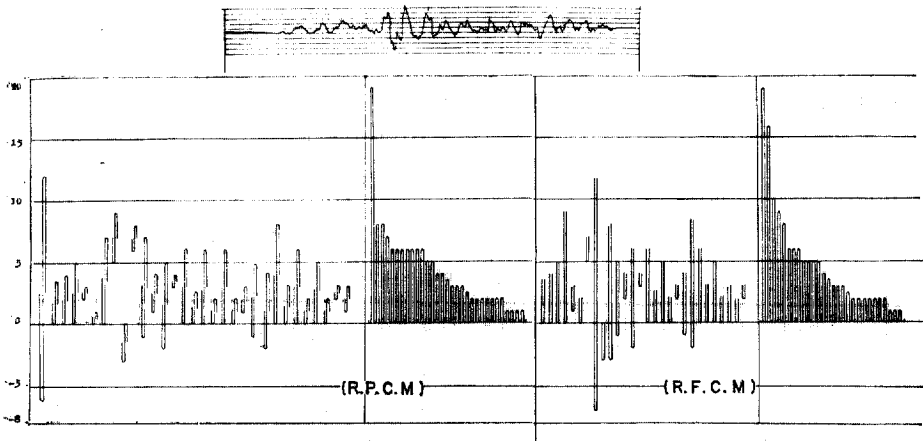


그림 4.2 금강제 1철교에 화물열차 통과 시 斜材 10의 $\epsilon-t$ 곡선과 정리圖

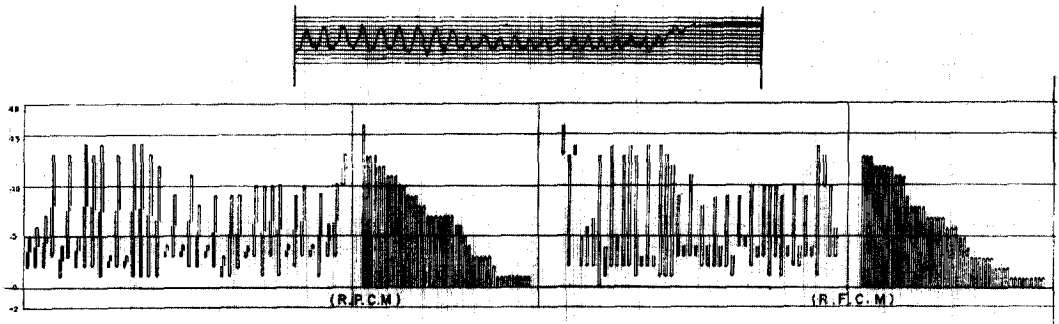


그림 4.3 북한강철교에 화물열차 통과時 斜材 4의 $\epsilon-t$ 곡선과 정리圖

method, amplitude count method, average level count method, range pair count method 및 rainflow count method 등이 있으나^(22,23) 鐵道橋梁의 實動應力波는 脈動應力波이며, 平均應力水準이 疲勞擧動에 아무런 영향을 주지 못한다고 보면⁽⁸⁾ range pair count method와 rainflow count method가 가장 적합한 방법인 것으로 알려져 있다.

본 연구에서는 測定期間 동안 最惡의 荷重으로 보이는 列車 1대에 대한 $\epsilon-t$ 곡선을 택하여 range pair count method(R.P.C.M) 및 rainflow count method(R.F.C.M)로 統計정리하였다. 紙面관계로 각 橋梁別 最惡의 한 測點씩만을 택하여 統計정리한 과정을 그림 4.1, 4.2 및 4.3에 나타내었다.

위 그림 4.1, 4.2 및 4.3 으로부터 最大應力과

표 4.1 統計정리 결과 最大應力 및 最小應力

교량	부재	열차	최대응력 (kg/cm ²)		최소응력 (kg/cm ²)	
			R.P.C.M	R.C.M	R.P.C.M	R.C.M
밀양철교	상플랜지	화차	532	327	20.5	41.0
		객차	450	245	41.0	82.0
	하플랜지	화차	366	316	31.6	31.6
		객차	316	316	31.6	73.2
금강제1철교	사재 8	화차	186	135	16.8	16.8
		객차	152	135	33.8	33.8
	사재 10	화차	299	266	14.0	14.0
		객차	142	94	28.0	14.0
수직재 4	화차	232	199	33.2	33.2	
	객차	299	299	66.3	33.2	

북한강철교	사재 1	화차	229	191	57.3	57.3
		객차	191	191	22.9	38.3
	사재 2	화차	768	768	37	37
		객차	683	683	101.5	101.5
	사재 4	화차	683	683	45.5	45.5
		객차	555	555	37.0	37.0
	사재 5	화차	307	307	23.6	23.6
		객차	330	307	11.8	11.8
	사재 7	화차	180	144	18	18
		객차	162	144	9	9
	사재 8	화차	226	194	32.3	48.5
		객차	162	146	16.2	16.2
	하현재 9	화차	283	270	57	19
객차		243	243	9.5	9.5	
하현재 10	화차	244	157	17.4	17.4	
하현재 11	화차	223	167	74.2	18.6	
가로보 13	화차	455	455	30.3	30.3	
	객차	455	455	30.3	30.3	
세로보 17	화차	420	336	42	42	
	객차	420	294	42	42	

最小應力を 찾아서 정리하면 표 4.1 과 같다.

4.2 基準應力の 設定

본 연구에서는 설계에 적용된 許容應力에서 死荷重에 의한 應力を 減한 可用應力を 基準應力으로 택하였다.

여기에 쓰여진 許容應力으로서는 밀양철교와 금강제 1 철교에 대해서는 이들 교량 설계당시의 設計示方書에 정해진 것으로 疲勞에 관한 고려

표 4.2 각 측정위치의 기준응력 산출표

교 량	부 재	연결형식	σ_0 (kg/cm ²)	k	C	σ_a (kg/cm ²)	死荷重應力 (kg/cm ²)	基準應力 (kg/cm ²)
밀 양 철 교	하플랜지	—	—	—	—	1,300	129	1,171
	상플랜지	—	—	—	—	-1,179	-125	-1,054
금강제 1 철 교	사재 8	—	—	—	—	1,200	157	1,043
	수직재 4	—	—	—	—	1,200	195	1,005
	사재 10	—	—	—	—	-965	-88	-877
북한강철교	사재 1	A	1,800	-0.35	1.0	-1,335	-173	-1,162
	사재 2	A	1,530	0.16	0.7	1,724	332	1,392
	사재 4	A	1,530	0.18	0.7	1,300	246	1,026
	사재 5	A	1,800	-0.87	1.0	-961	-93	-868
	사재 7,8	A	1,800	-1.0	1.0	-900	0	-900
	하현재 9	A	1,530	-0.3	0.7	1,175	151	1,024
	하현재 10	A	1,530	-0.33	0.7	1,151	204	947
	하현재 11,12	A	1,530	-0.33	0.7	1,150	220	930
	가로보 13	A	1,530	-0.28	0.7	1,197	575	622
	세로보 17	A	1,800	0	1.0	1,700	504	1,196

표 4.3 貨物列車 통과의 경우

교 량	부 재	최대응력범위 (kg/cm ²)	應力水準數	總應力波數	基準應力 (kg/cm ²)	等價反復回數 $N_e \times 10^6$	통과가동列車臺數 $N^*/(N_e \times 10^6)$
밀 양 철 교	상플랜지	532	5	19	1,054	3,288	608.3
	하플랜지	366	8	16	1,171	373	5,361.9
금강제 1 철 교	사재 8	186	6	23	1,043	36	55,555.6
	사재 10	299	11	31	877	488	4,098.4
	수직재 4	232	6	22	1,005	136	14,705.9
북한강철교	사재 1	229	9	25	1,162	103	19,417.5
	사재 2	768	8	24	1,392	32,226	62.1
	사재 4	683	14	42	1,054	40,416	49.5
	사재 5	307	11	29	868	3,144	636.1
	사재 7	180	8	24	900	46	43,478.3
	사재 8	226	10	29	900	475	4,210.5
	하현재 9	323	10	23	1,024	1,119	1,787.3
	하현재 10	244	9	26	947	3	666,666.7
	하현재 11	223	8	28	930	444	4,504.5
	가로보 13	485	7	35	622	36,034	55.5
	세로보 17	420	5	12	1,196	620	3,225.8

가 없는 許容應力이 사용되었다. 이에 비해 북한강철교에 대해서는 實動應力波의 特性을 고려하고 反復回數 $N=2 \times 10^6$ 에 대한 Goodman 圖와 非破壞率 95%를 채택하는⁽²⁴⁾ 應力比체감決定法에 의한 現 우리 나라의 鋼鐵道橋標準示方書⁽¹⁾에 정해진 대로 다음과 같은 식으로 계산되는 許容應力을 사용하였다.

$$\sigma_a = \frac{\sigma_0}{1-kC} \quad (4-1)$$

여기서, σ_a : 許容應力(kg/cm²)

σ_0 : 鋼材의 材質 및 連結形式에 固有許容應力(kg/cm²)

c: 鋼材의 材質 및 連結形式에 따른 應力比체감계수

표 4.4 客車 통과 의 경우

교 량	부 재	최대응력범위 (kg/cm ²)	應力水準數	總應力波數	基準應力 (kg/cm ²)	等價反復回數 N _r × 10 ⁶	통과가능한列車臺 數 N*/(N _r × 10 ⁶)
밀 양 철 교	상플랜지	450	3	9	1,054	1,421	1,407.5
	하플랜지	316	5	11	1,171	152	13,157.9
금강제 1 철교	사재 8	152	6	12	1,043	12	166,666.7
	사재 10	142	4	18	877	18	111,111.1
	수직재 4	299	10	22	1,005	808	2,475.2
북한강철교	사재 1	191	8	16	1,162	22	90,909.1
	사재 2	683	6	28	1,392	8,328	240.2
	사재 4	555	8	30	1,054	4,318	463.2
	사재 5	377	6	13	868	1,830	1,092.9
	사재 7	162	8	40	900	2	1,000,000
	사재 8	162	8	21	900	40	50,000
	하현재 9	243	6	12	947	182	10,989.0
	가로보13	455	7	21	622	21,295	93.9
	세로보17	420	4	15	1,196	546	3,663.0

k; 應力比($\sigma_{min}/\sigma_{max}$)

대상교량의 각 측정위치에 대한 σ_0 , k, c 및 σ_a 와 이들로부터 구한 基準應力은 표 4.2와 같다.

4.3 等價反復回數 및 壽命동안 通過가 가능한 列車臺數의 계산

위의 같이 range pair 計數法과 rainflow 計數法으로 統計정리한 program化 實動應力波 중에서 range pair 計數法에 의해 정리한 것으로부터 식(2-6) 및 식(2-7)에 의해 위의 基準應力에 대한 等價反復回數와 逆으로 200萬回 反復, 즉 $N^*=2 \times 10^6$ 을 기준으로 疲勞強度를 잡았을 때 橋梁壽命 동안에 통과가능한 列車臺數를 계산하여 표 4.3 및 표 4.4와 같이 정리하였다. 표 4.3은 貨物列車가 통과할 경우이고, 표 4.4는 乘客列車가 통과할 경우이다.

4.4 考 察

우선, 각 測點別로 1列車 통과 時의 疲勞被害를 基準應力(여기서는 設計時의 許容應力에서 死荷重에 의한 應力을 減한 最大 可用應力)의 反復回數로 환산한 等價反復回數와 橋梁壽命 동안에 載荷가능한 列車臺數를 계산함으로써 鋼鐵道橋梁의 安全度 및 耐用年限을 推定할 수 있는 중요한 기틀을 마련하였다.

또한, 다음과 같은 몇가지 중요한 설계 특성을 밝힐 수 있었다.

첫째로, 貨物列車 통과 時의 疲勞被害, 즉 等

價反復回數가 客車 통과 時의 疲勞被害보다 훨씬 큰 것을 알 수 있다. 그러나, 貨物列車 통과 時와 客車 통과 時 被害크기의 순서가 같지 않음을 볼 수 있는 바, 이로부터 車軸重量 및 車軸配置의 差異 때문에 輕量의 荷重體系에서도 動的인 疲勞被害의 영향이 더 크게 될 수도 있음을 확인할 수 있었다.

둘째, 計算上 應力(즉, 設計應力)이 큰 部材 혹은 位置로부터 應力이 작은 部材 혹은 位置로 갈수록 疲勞被害가 작아지는 것을 볼 수 있다. 즉, 設計된 部材의 斷面에 여유가 적어서 設計應力이 許容應力에 가까울수록 疲勞被害가 커지는 常識的인 현상을 볼 수 있는 것이다. 그런데 設計應力이 똑같은 들보橋梁의 上 flange 와 下 flange 의 疲勞被害가 크게 다르며, 設計應力の 크기와 疲勞被害의 크기가 완전히 비례하지 않고 조금씩 차이가 있음을 볼 수 있는 바 이것은 사용된 材料의 成分이나 製作 및 施工 중의 缺陷有無, 혹은 腐蝕이나 荷重의 직접 접촉 등으로 인한 마모 등의 원인으로 일어나는 현상이라 판단된다. 실제로 荷重이 직접 닿는 부분의 疲勞被害가 대체적으로 매우 큰 것을 볼 수 있다.

세째로, 북한강철교는 架設年度도 얼마 되지 않았고 금강제 1 철교보다 支間도 짧으며 疲勞를 고려한 許容應力을 基準應力으로 삼았음에도 다른 두 교량보다 疲勞被害가 큰 것을 볼 수 있는

바, 이는 橋梁形式의 差異 때문일 수도 있겠으나 북한강철교에는 다른 두 교량에서와 달리 實動荷重體系가 電動荷重體系로 車軸의 重量 및 車軸의 配置가 다른 데 더 큰 원인이 있다고 판단된다.

其他, 들보橋梁과 truss 橋梁을 비교하여 應力波의 形狀, 應力水準數 및 總應力波數 등에 크게 차이가 있는 등 여러가지 特異點들이 있으나 이들은 支間이나 橋梁形式의 차이 등에 기인한 것으로 사료되며, 여기서는 같은 支間일 때 여러 가지 橋梁形式, 또는 같은 橋梁形式일 때, 여러 가지 支間 등으로 구분하여 實驗을 행하지 못하였으므로 더 이상의 특징은 고찰할 수 없었다.

5. 결 론

우리 나라 既存 鋼鐵道橋梁 중에서 單純 들보 橋梁 1 개소와 truss 교량 2 개소를 택하여 上部 構造의 주요부재에 대하여 列車 통과시의 動的인 變形率-時間($\epsilon-t$) 곡선을 實測하고 이 결과를 range pair 計數法 및 rainflow 計數法으로 統計 정리하고 이것을 기초로 許容應力을 基準應力으로 하여 等價反復回數와 橋梁 壽命동안 통과 가능한 列車臺數를 계산하여 鋼鐵道橋梁의 安全度 및 耐用年限을 推定할 수 있는 중요한 토대가 마련되었다.

아울러, 鋼鐵道橋梁을 설계함에 있어서 참조할 수 있는 다음과 같은 몇가지 중요한 특성을 밝힐 수 있었다.

일반적으로 重量이 무거운 荷重體系에 대해 疲勞被害가 크지만 車軸의 重量 및 車軸의 配置가 달라짐에 따라서는 輕量의 荷重體系에 대해서도 疲勞被害가 더 커질 수도 있는 바, 이제 從來의 LS 荷重體系만에 의한 設計를 지양하고 實際 荷重體系를 정확히 파악하여 設計를 행하여야 함을 알 수 있었다.

部材를 만드는 材料의 成分이나 製作 및 施工 중의 缺陷, 혹은 腐蝕이나 荷重의 직접 접촉 등으로 인한 마모 등이 있으면 疲勞被害가 크므로 設計 및 施工 중에 주의를 요하며, 특히 施工前에 材料成分이나 製作 중의 缺陷有無를 檢査하도록 하는 制度가 확립되어야 함을 알 수 있었다.

앞으로, 같은 支間일 때 여러 가지 橋梁形式, 또는 같은 橋梁形式일 때 여러 가지 支間 등으로 구분하여 계속해서 이와 같은 연구가 이루어진다면 鋼鐵道橋梁의 耐用性 및 設計特性을 判定하는 데 있어서 매우 유익한 자료가 얻어질 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 말

本 研究은 峨山社會福祉事業團의 研究費의 뒷받침으로 이루어진 것인 바, 우선 感謝를 드리며, 資料整理를 위해 수고를 아끼지 않았던 漢陽大學校 大學院生 林 鍾均 君에게도 感謝를 드린다.

또한, 많은 資料를 提供하여 준 鐵道技術研究所 關係者 여러분들께도 심심한 感謝를 드린다.

참 고 문 헌

1. 철도청, "鋼鐵道橋 設計 標準示方書", 1980
2. F.P. Drew, "Recorded Stress Hystories in Existing Rail Road Bridges", *Proc. ASCE, ST 12*, 1968
3. H.W. Lin, "Fatigue Damage under Varying Stress Amplitudes", *NASA, TN D-647*, 1960.11
4. 伊藤文人, "鐵道橋り電車荷重による疲勞設計", *JS-SC, Vol. 5-43*, 1967
5. 日本國鐵, "實動荷重による鐵道橋の疲勞推定", 日本國鐵研究報告, No. 676, 1969.6
6. 伊藤文人, "鐵道橋の實動荷重と疲勞設計", *JSSC Symposium*, 1976.2, Tokyo.
7. 田中道七, "重疊波による疲勞", *材料, Vol. 19, No. 202*, 1970.7
8. 多田美朝, "鋼構造物の疲勞設計指針と解説", *JS-SC, Vol. 10-101*, 1974.5
9. M.N. Torrey, "A Study of Statistical Treatments of Fatigue Data", *Proc. ASTM, Vol. 56*, 1956
10. H.O. Fuchs, "Metal Fatigue in Engineering", John Wiley & Sons, 1980., pp.197
11. 石橋正, "金屬の疲勞と破壊の防止", 養賢堂, 1954, pp.118~120
12. 河本實外, "變動荷重による疲勞壽命の算出法", *材料, Vol. 15, No. 156*, 1966
13. 장 동일, "실동하중의 작용을 받는 구조용 강재의 피로강도(I)", *대한토목학회지, Vol.22-2*, 1974.6
14. 장 동일, "실동하중의 작용을 받는 구조용 강재의

- 피로강도(II)”, 대한토목학회지, Vol.25-2, 1977.6
15. H.I. Corten, “Cumulative Fatigue Damage”, Inter. Conf. on Fatigue of Metals, Proc. Part 3, No. 2, 1956
 16. D.I. Chang, “Study on the Estimation of Fatigue Life of Steel Members by Linear Damage Rule”, Tran. JSCE, Vol. 10, 1978
 17. 西村俊夫外, “引張應力に起因する鋼橋梁の變狀”, 日本土木學會誌, 1975
 18. 白石隆義, “熔接設計者のための疲勞常識”, 熔接技術, 1964.1
 19. 鄭 鐵柱外, “密陽江鐵橋應力測定 結果報告”, 鐵道技術研究所 報告, Vol. 1, No. 1, 1966
 20. 朴 權用外, “橋梁 安全度 調査報告”, 鐵道技術研究所 報告, Vol. 12, No. 1, 1978
 21. 이 기홍, “북한강 교량(상부구조) 경환공사 보고” 대한토목학회지, Vol. 25-4, 1977
 22. 田中眞一, “機械の疲勞壽命算出法”, 養賢堂, 1973, pp.66
 23. 장 동일外, “鋼橋梁의 安全性과 信賴性에 관한 研究”, 대한토목학회지, Vol. 27-4, 1979.8
 24. 日本土木學會, “鋼鐵道橋 設計 標準解説”, 1974., pp.81
- (接受 : 1982.11.5)