

鐵道橋의 動的 問題 基礎理論

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. 基礎的 概念
 - 2.1 車輛進入으로 橋梁이 急激하게 처지는 要因
 - 2.2 車輛이 發生하는 周期力의 效果
 - 2.3 軌道 또는 車輪不整의 要因
- 3. 研究와 設計衝擊係數
 - 3.1 日本에서의 總合的인 研究
 - 3.2 유럽의 研究
 - 3.3 各國의 設計衝擊係數
- 4. 橋梁의 動的 應答에 관한 其他 理論
 - 4.1 처짐 限界에 관해서
 - 4.2 長大 橋梁에 관해서
 - 4.3 浮上式 鐵道
- 5. 結論

1. 序論

列車가 走行하는 橋梁에서는 필연적으로 振動이 發生한다. 이와 같은 振動이 橋梁強度에

미치는 影響은 通常 「衝擊係數」로 橋梁設計時 취급된다. 또한 橋梁의 처짐 變形에 관해서도, 走行하는 列車의 승차기분이나 走行安全에 관해서도 고려된다. 이와 같은 問題는 以前부터 취급되어 왔으나, 항상 새로운 問題를 내포하고 있는 것이 事實이다. 現在 土木構造物 設計基準을 조정하는 作業이 進行되고 있으나 鐵道構造物의 設計를 생각할 때는 列車走行의 관련을 항상 생각할 필요가 있다. 여기서는 鐵道橋梁의 設計, 補修維持를 위해 참고로 하기 위하여 鐵道橋梁의 動的 問題의 基礎的 事項을 고찰하고자 한다.

2. 基礎的 概念

列車走行에 의한 鐵道橋의 動的 問題의 考察은 그림 1에서 보는 바와 같이 橋梁거더를 移動하는 荷重의 慣性力이다. 移動集中荷重의 強制力에 着眼하는 것으로부터 始作한다. 다음 단계로는 橋梁거더 및 車輛의 質量을 同時에 고려하는 상세한 연구로 넓어진다.

이 運動은 종합적으로 連立微分方程式에 의해

表現된다. 이 경우, 一般의 理論解를 여기서부터 直接 誘導하기는 곤란하다.

實際의 橋梁에 있어서 試驗結果나 이러한 理論研究에 의해, 現在로서는 鐵道橋에 列車走行에 의한 振動要因은 다음과 같이 3가지로 整理할 수 있다. 즉 첫째, 橋梁에 列車가 進入한 直後 橋梁거더의 처짐과 靜的 均衡처짐과의 틀림이 存在하기 때문에 생기는 振動으로, 車輛의 質量과 스프링과의 連合作用과 列車의 軸距의 規則的인 載荷의 影響을 포함한 「列車의 進入으로 橋梁이 急激하게 처지는 要人」, 둘째, 증기기관차의 不均衡 重錘와 디젤기관차의 엔진 周期力 등의 「車輛에 發生하는 周期力의 要因」, 셋째, 軌道틀림과 車輪踏面の 凹凸에 의해서 생기는 車體의 車輪慣性力, 로링과 橋梁에 進入直前의 車輛의 運動에 따른 枕木間의 레일처짐을 車輪이 通過함으로 인한 周期力 등의 「軌道 또는 車輪의 不整要因」이 있다.

各各의 要因에 의한 橋梁의 振動은 橋梁의 支間, 車輛의 走行速度, 橋梁 및 車輛의 振動特性, 軌道와 車輛의 整備狀態에 關聯하여 定해진다.

이상과 같은 現象의 설명을 보다 상세하게 說明하여, 上記要因에 關한 研究의 實狀를 記述한다.

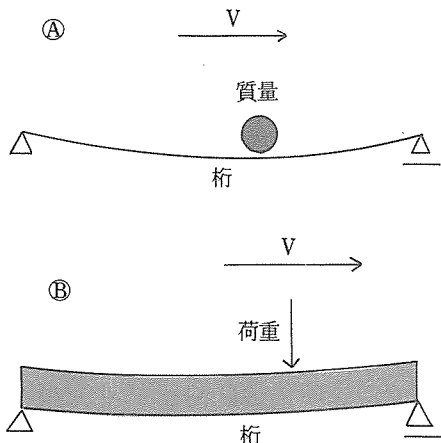


그림 1. 橋梁거더와 荷重

2.1 列車의 進入으로 橋梁이 急激하게 처지는 要因

(1) 基本特性

橋梁의 動的 應答의 基本特性을 明確하게 하기 위하여는 單純支持거더에 移動荷重이 進入載荷되는 경우의 特徵을 一般性을 잃지 않는 程度로 整理하여 표시한다.

그림 2(A)는 支間 L 의 橋梁거더 위를 走行하는 車輛을 1個의 移動集中荷重 P 를 單純化시킨 것이다. 速度 v 로 移動하는 集中荷重에 의해 橋梁거더의 動的 應答을 記述하는 運動方程式은 通常 처짐모드法에 의해 求해진다. 橋梁 어느 點의 動的 처짐 y 를 境界條件으로 滿足시키는 몇개의 처짐모드 形狀과 時間 t 에 關한 미지계수 Y 와의 곱을 더한 것으로 假定하는 것은 通常 이러한 종류의 解析을 채택하는 方法이 있다.

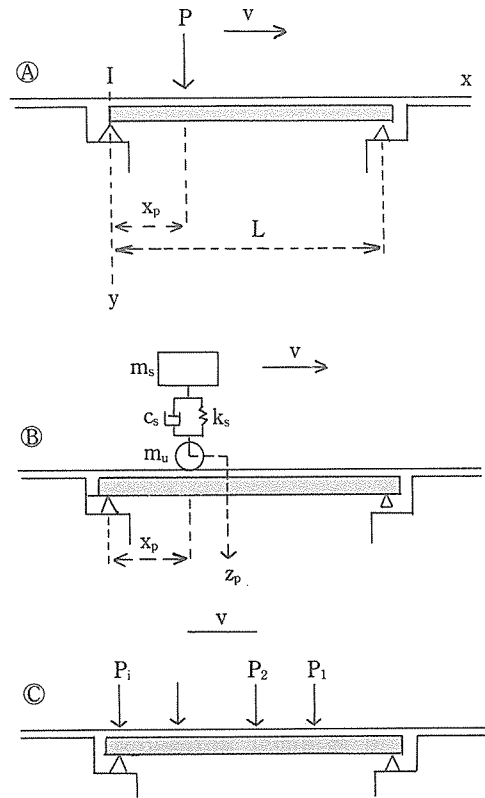


그림 2. 橋梁거더의 荷重모델

가장 간단한 조사식으로서 橋梁거더의 처짐 모드 形狀을 1個의 正弦波로서 처짐을 (1)식으로 표시하고 (2)식에 보여준 動的 조화식이 유도 된다.

$$y = Y \sin \frac{\pi x}{L} \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{d^2 Y}{dt^2} + 2\zeta \omega \frac{dY}{dt} + \omega^2 Y = \frac{P}{m_b} \varepsilon \sin \frac{\pi v t}{L} \dots (2)$$

ε : $0 < \omega t < 1$ 때 ; $\varepsilon = 1$, 기타 ; $\varepsilon = 0$

ω : 橋桁의 基本圓固有振動數※

ζ : 橋桁의 減衰定數

m_b : 橋桁의 等價質量

(2)식의 解는 ζ 는 작으므로 無視하면 (3)식과 같이 된다. 條件이 가장 나쁜 경우를 考慮하면, 이 最大值는 (4)식으로 表示할 수가 있다. 最終적으로 衝擊係數 ϕ 는 (5)식과 같이 된다.

$$y = \frac{y_s}{1 - \alpha^2} \left(\sin \frac{\pi v t}{L} - \alpha \sin \omega t \right) \dots\dots\dots (3)$$

$$y_{\max} = \frac{y_s}{1 - \alpha} \dots\dots\dots (4)$$

$$\phi = \frac{y_{\max} - y_s}{y_s} = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \dots\dots\dots (5)$$

y_s : 橋桁의 靜的 最大처짐

α : 速度 파라메타

$$\alpha = \pi v (\omega L) \dots\dots\dots (6)$$

이와 같이 간단한 모델의 경우에 衝擊係數 ϕ 는 速度 파라미터 α 에 의해 표시된다.

그림 2에서 ㉞는, 車體質量 m_s , 車輻質量 m_a 및 스프링 定數 k_s , 減衰定數 C_s 등 支持要素를 考慮한 重力場 g 로 車輻의 走行을 다루는 것도 있다. 이 경우는 橋桁의 動的 應答를 未知數로, 橋桁의 처짐 및 軌道面의 鐵道變位에 대한 車輻의 應答式을 가해서 解析한다. 즉, (2)식과 車輻의 運動方程式을 (7)식과 連立시켜 해석한

다. (7)식은 車輻의 運動方程式으로, 이것은 桁의 運動方程式 (2)식과 (8)식에 의해 결부된다.

$$m_s \frac{d^2 z}{dt^2} + C_s \frac{dz}{dt} + k_s (z - z_p) = 0 \dots (7)$$

$$P = m_s \left(g + \frac{d^2 z}{dt^2} \right) + m_a \left(g + \frac{d^2 z_p}{dt^2} \right) \dots\dots (8)$$

z : 스프링 위 질량의 변위

z_p : 車輻走行軌跡

이와 같이 그림 2 ㉞에서 보여준 車輻 모델의 경우 (2), (7), (8)식의 3식에 의해 橋桁의 應答解析을 할 수가 있으나, 이 方程式은 時變과 라미터를 가지는 微分方程式(TVP系)이 되므로 더욱 복잡해진다. 그러나 數值積分法을 直接 通用하면 解析은 용이하다. 이와 같은 方程式에 非線型項이 포함되는 경우, 또는 車輻이 레일을 이탈하여 輪重이 돌연 없어지는 경우처럼, 特殊한 運動條件에 대한 解析에서도 困難하지 않다. 그러나 實用的으로는 이러한 스프링 및 감쇠 등 支持構造를 考慮한 車輻의 走行에 대해서는, 載荷時의 固有振動數를 導入함으로써 解析의 簡略化를 도모할 수 있다.

載荷時 固有振動數는 車輻이 橋桁上에 停止하고 있어 支持스프링이 無限히 굳어져 있다고 假定하므로 구할 수가 있다. 즉, 一般圖 2 ㉞와 같이 1車輻의 경우는 그것이 支間 中央에 停止한 경우를 고려한 것이다. 橋桁의 재하시 고유 진동수 f_c 는 非載荷時 固有振動數 f 를 利用하여 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$f_c = f \sqrt{\frac{m_b}{m_b + 2(m_s + m_a)}} \dots\dots\dots (9)$$

그림 2 ㉞는 移動集中荷重이 連續하여 橋桁을 通過하는 경우로, 實際車輻의 載荷條件은 이에 가깝다. (2)식의 右邊을 다음 식과 같이 바꾸어 놓으면 다음과 같은 橋桁의 運動方程式을 얻을 수 있다.

$$\sum_{i=1}^n \frac{p_i}{m_i} \varepsilon_i \sin \frac{\pi v t_i}{L} \dots\dots\dots (10)$$

i : 移動集中荷重 번호
n : 移動集中荷重 總數
p_i : s_i : t_i : 各번호 i에 관한 量

그림 2 ㉔에서 보여준 스프링이 있는車輛이 數個 連續해서 走行하는 경우에도 各各의 車輛에 대한 (7), (8)의 方程式을 誘導하여, (2) 式과 組合시킴으로, 橋桁과 車輛의 相互作用을 記述하는 運動方程式을 유도할 수가 있다.

따라서, 車輛의 엄밀 모델을 이용하여, 橋桁의 振動次數나 처짐 모델 등에 의해 一般化시킬 수 있는 경우에도 같은 모양으로 解析할 수가 있다. 이상의 特性을 基本事項으로 하여 다음과 같이 各 要因에 關한 特性을 整理한다.

(2) 列車 軸距의 影響이 현저하게 나타나는 경우

高速으로 走行하는 列車軸距의 影響은 無視할 수가 없다. 그림 3은 新幹線의 支間 10m 鐵筋

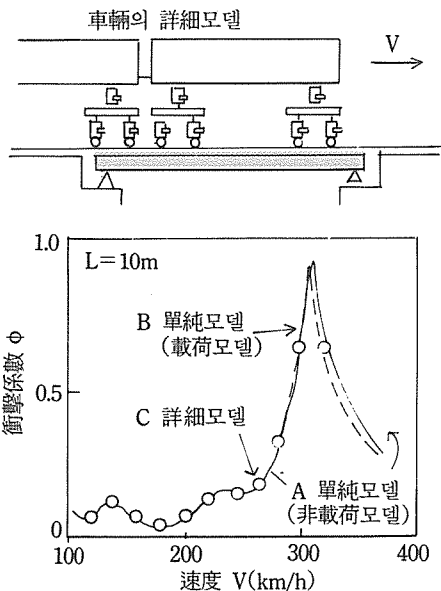


그림 3. 速度가 桁衝擊係數에 미치는 影響

콘크리트 슬래브桁의 列車載荷에 의한 충격계수를 보여주는 것이다. 이 그림에서 單純한 移動荷重列에 의한 解의 結果 A, 載荷時 固有振動數를 適用한 橋桁에 移動荷重을 走行시킨 解의 結果 B 및 車輛의 特性을 考慮한 엄밀차량 모델 走行에 의한 解의 結果 C를 各各 併記한 것이다. 이 解析結果는 速度 300km/h 부근에서 대단히 큰 動的 應答이 나타났으며, 解析結果와 實測結果가 거의 같은 傾向을 보여주고 있다.

또한 3가지 경우가 서로 틀림이 작고 가장 간단한 移動荷重列에 의한 結果 A에서도 충분한 精度가 얻어졌다.

오히려 鐵橋의 경우는 橋桁과 車輛의 質量比가 콘크리트橋의 경우보다 크므로 移動荷重列을 미루어 볼 때 解析은 一般的으로 높은 精度가 얻어지지 않는다. 그림 3과 같이 충격계수의 극대치가 현저한 원인은 (10)式에서 보여주는 荷重項에 포함되어 있는 현저한 周波數成分과 橋桁의 固有振動數가 一致하기 때문이다. 즉 이 경우는 規則的인 荷重載荷에 의해, (10)式은 1/3 車輛길이로 주행하는 시간이 一致하는 周期를 갖는 成分이 현저하고, 이 週期數와 橋桁의 固有振動數가 速度와 一致하는데 이 때의 速度가 約 300km/h의 走行速度이다. 이러한 移動荷重列에 의한 共振發生條件은 一般的으로 (11)式이 成立하는 경우이다.

$$\alpha = \beta / i \dots\dots\dots (11)$$

β : 軸距 파라미터, β = 車輛길이 / (2L)
i : 1, 2, 3 整數

2.2 車輛이 發生하는 周期力의 效果

車輛이 發生하는 週期力의 代表的인 것은, 蒸氣機關車의 軋마브로와 디젤動車의 원심 回轉 偏心力을 들 수 있다.

軋마브로는 과거의 연구과제로서 重要한 것이었으나, 근래는 증기기관차가 쓰여지지 않음

므로 여기서는 취급을 省略한다. 遠心回轉偏心力에 관해서는, 周期力의 影響을 實在의 디젤 動車의 發生周期力을 고려하여 파라미터 解析으로 研究되고 있다. 이 경우는 (10)式에서 보여 주는 荷重 p_i 을 (12)式과 같이 치환하면 1軸의 경우 및 2軸의 경우로 해석하여 그림 4에 보여 주는 結果를 얻을 수 있다.

$$p_i = p_{si}(1 + 0.15 \cos \gamma \omega t) \dots\dots\dots (12)$$

p_{si} : i 番째 荷重의 靜的 荷重
 γ : 周期力의 桁固有振動數에 대한 비율

본그림에서 보는 바와 같이 $\gamma=1$ 의 경우, 즉 周期力의 振動數와 橋桁의 固有振動數가 같은 경우, α 가 적어지므로 큰 衝擊係數 ϕ 가 생기게 되며 α 의 크기가 커지는 곳에서는 周期力의 振動數 틀림에 의해 衝擊係數가 꽤 변화하는 것이 확인되었다. 더한층, 2 荷重의 경우에는 α 가 커지는 곳에서는 여기서 보여준 1荷重의 경우보

다도 큰 衝擊係數는 나타나지 않는다.

2.3 軌道 또는 車輛不整의 要因

軌道의 길이方向의 不整은 고저틀림, 방향틀림 또는 左右 레일의 高低差 등이 있어 각각 車輛의 振動을 誘發한다.

여기서는 橋梁의 鉛直方向의 振動이 가장 우세하므로 高低틀림에 착안한다. 軌道의 高低틀림의 形狀을 $\omega(x)$ 로 표시하면 車輛의 走行軌跡은 (13)式과 같이 된다.

$$Z_p = Y \sin \frac{\pi x_p}{L} + \omega(x) \dots\dots\dots (13)$$

즉, (7)式 및 (8)式에서 쓰여지고 있는 Z_p 를 (13)式에 대신 쓰면 軌道틀림이 있는 경우 橋桁의 動的 應答의 解析을 할 수가 있다.

軌道틀림은 一般的으로 不規則한 特性을 가지고 있다. 이것은 橋梁上에 있어서도 마찬가지라고 생각된다. 이와 같은 軌道를 가지고 있는 橋梁上을 車輛이 走行하는 경우의 橋桁의 動的 應答도 당연히 大단히 複雜하게 된다.

道路橋路面的 凹凸에 의한 橋梁의 動的 應答에 관해서는 非定常不規則振動論을 사용하여 詳細히 研究되어 있으며, 鐵道橋梁의 경우에도 이 手法이 通用된다. 그러나 그 結果는 特性值의 틀림에 의해 鐵道橋에는 그대로 利用할 수가 없다.

鐵道橋의 경우에는 直接 시뮬레이션에 의해 解析하고 있다. 그림 5에서 보여 주는 軌道틀림 파워스펙트럼 密度로부터 軌道틀림 표본 波형을 適當한 數만 抽出하여 (13)式을 利用하여 橋桁의 衝擊係數와 그 分布를 구할 수가 있다.

그 結果로서 衝擊係數의 標準偏差가 0.04~0.13으로, 그 값은 短支間에서는 크고, 長支間에서는 적은 數值의 傾向이 얻어진다.

한편, 위에서와 같은 確率論的인 手法을 써서 確定論的으로 軌道틀림의 效果를 취급하는 研究도 있으나, 이것은 軌道의 高低틀림을 正弦波

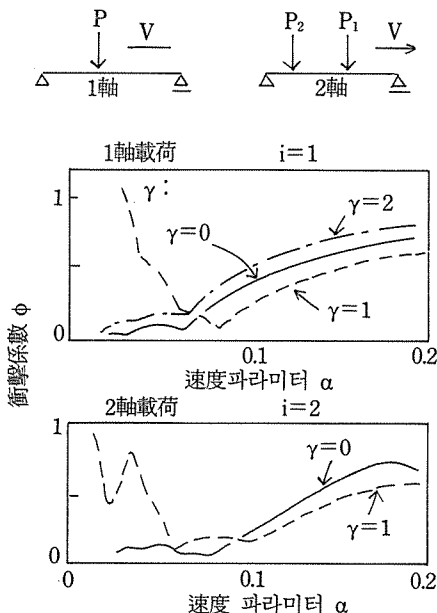


그림 4. 周期力 파라미터

形狀으로 解析하는 것으로서 2.2와 같은 모양의 手法이 쓰여진다.

다음으로 現實의 軌道 및 橋梁의 特性을 考慮해서, 軌道의 彈性特性을 갖는 그 不整 및 車輛의 플랫폼의 영향을 고려한 解析도 可能하다. 그 解析 모델과 結果를 그림 6에서 보여준다.

여기에서 特徵은 軌道의 彈性特性은 線型으로 가정하여 스프링을 설계하여 非接觸 條件도 導入한 것이다.

이 모델의 運動方程式은 매우 複雜하므로 記述을 省略하며 그 大略은 다음과 같다.

즉 (7)式을 대신하여 스프링 위 車輛의 上下方向, 스프링 위 車輛의 回轉, 前輪의 上下方向, 後輪의 上下方向의 運動方程式을 유도한다.

(8)式으로 대신할 수 있는 것은, 軌道彈性과의 關係로 定해지는 論重으로 (14)式으로 나타낼 수 있다. 더욱 本輪 플랫폼은 等價의인 軌道의 不整을 치환해서 解析한다.

$$p_i = k_i \mu_i \dots\dots\dots (14)$$

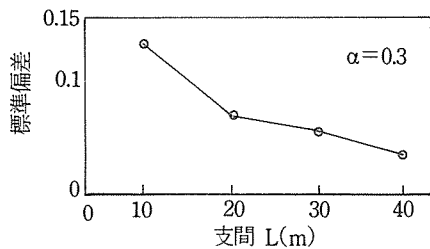
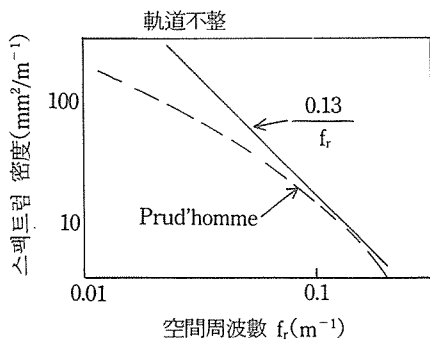


그림 5. 軌道不整 스펙트럼을 이용한 直接시뮬레이션

- k_i : i 番제의 車輪位置의 軌道스프링 定數
- u_i : i 番제의 車輪位置의 軌道스프링 壓縮量
- Z_{pi} : i 番제의 車輪의 走行軌跡(15)式

$$Z_{pi} = Y \sin \frac{\pi x_{pi}}{L} + \omega(x) + \mu_i \dots\dots\dots (15)$$

이와 같은 軌道의 彈性을 考慮한 車輛~橋桁 모델에 의한 解析結果는 다음과 같이 종합된다. 橋桁의 動的 應答은 그림 6에서 보여주는 것과 같이 車輪 후랏트의 效果가 速度 파라미터 α 의 작은 領域에서 特히 커지므로 軌道의 彈性과 不整量이 커지는 程度로 커지며, 스프링 위 質量的 증가보다 스프링 아래 質量 증가의 영향을 크게 받으며, 橋梁進入時의 車輛의 初期振動보다도 橋梁上의 軌道不整의 영향이 커지는 등이 있다.

3. 研究와 設計衝擊係數

鐵道橋의 動的 應答은 많은 要因이 複雜하게

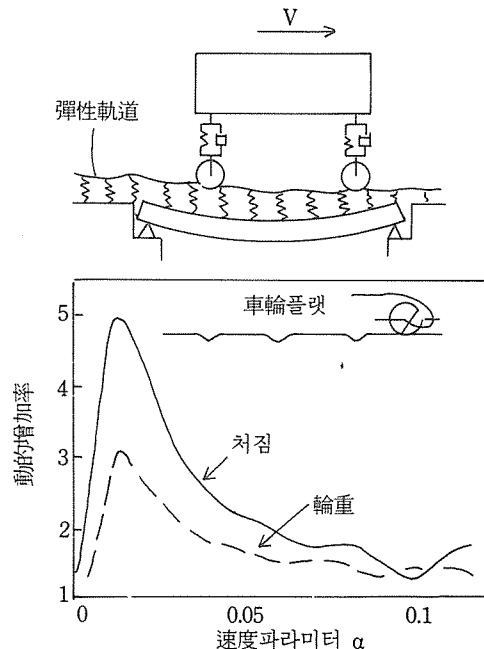


그림 6. 탄성계도와 차륜 플랫폼의 영향

重復되는 現象이다. 上述한 바와 같이 各各의 要因에 關한 現象에 關해서는 詳細한 研究가 이루어져 있으나 個個 要因의 全體 結果 및 기여도에 關해서는 아직까지 不明確 한 點이 많다. 그러므로 鐵道橋의 衝擊係數는 現在 많은 곳에서 實測 데이터의 分析과 上述한 것과 같은 理論的인 研究를 혼합하여 總合的인 研究에 의해 提案되어지고 있다.

이러한 觀點으로부터 要因마다의 研究 以外에 實測데이터를 中心으로 取扱한 總合的인 研究도 重要하다. 아래와 같은 過去에 이루어진 總合的인 研究와 最近의 高速列車의 走行에 대한 實測結果로 設計에 適用하는 方法을 提示한다.

3.1 日本에서의 總合的인 研究

過去에는 鋼橋를 中心으로 한 研究가 많아 速度 100km/h 程度로 支間 30m 以下の 橋梁에 關해서 그 衝擊係數를 (16)式과 같이 생각했다.

$$\phi = k_a \alpha + \phi_1 + \phi_2 \dots\dots\dots (16)$$

k_a : 通過하는 車種, 橋梁形式 등에 의해 決定되는 定數. 通常 $k_a = 1 \sim 4$, $a < 0.15$

ϕ_1 : 蒸氣機關車의 軀架브로에 의한 影響

通常 $\phi_1 = 0.15$

ϕ_2 : 軌道不整 및 車輛振動에 의한 것으로 通常 $\phi_2 = 0.1 \sim 0.2$

그 後, 速度 200km/h를 초과하는 高速列車 走行에 의해 鋼橋 및 콘크리트橋의 實測 및 實用研究가 이루어졌다.

新幹線은 同一 形式의 車輛으로 編成된 列車로, 各 車輛은 力學的으로 比較的 明確한 特性을 갖고 있다.

그림 3에서 보여준 新幹線의 力學 모델에 의하면, 橋梁과 車輛의 動的 相互作用에 關한 運動方程式을 導入했다. 이 모델을 이용하여 實에 하는 橋梁의 特性値와 動的 應答의 檢討를 하여

아래와 같은 結論이 導出되었다.

1) 車輛과 橋梁의 動的 相互作用에 있어서는, 車輛諸元의 影響정도 및 載荷時 固有振動數와 非載荷時 固有振動數와의 틀림은 鋼橋에서는 크며, 콘크리트橋에서는 작다.

2) 橋桁의 衝擊係數는 車輛速度에 따라 速度 파라미터 α 의 增加, 즉 支間길이 또는 橋桁固有振動數가 작을수록 커진다. 또한 車輛의 載荷周期과 橋桁의 固有振動數와 關한 速度로 橋桁은 共振狀態가 되며, 처짐 또는 衝擊係數는 $\alpha > 1/3$ 로 대단히 커지는 傾向이 있다.

3) 軌道高低틀림에 의한 衝擊係數의 영향 및 그 흐트러짐은 短支間 쪽이 長支間의 경우보다 크다.

이러한 結果는 그림 3 및 그림 5에서 보여주는 모델에 의해 解析된 것이다. (11)式에 보여주는 條件은 2)에 記述한 共振의 경우이다.

新幹線의 列車走行試驗에서 얻은 데이터로부터, 衝擊係數는 速度파라미터와 支間に 의해 나타나는 것이 판명되었다.

速度파라미터에 直接 影響을 주는 橋桁固有振動數는 列車 通過 直後의 殘留振動波形式으로부터 取할 수가 있어 다음 式과 같이 나타낸다.

$$f = 70 L^{-0.8} (H_2) \dots\dots\dots (17)$$

이 式으로 (18)式의 第1項이 얻어진다.

(18)式의 第二項은 軌道の 不整 등에 의한 影響으로, 基本 檢討에서 얻은 結果의 分析에 의해 設計衝擊係數는 다음 式과 같이 주어진다.

$$\phi = \frac{k_a \omega}{500L^{0.2}} + \frac{10}{65+L} \dots\dots\dots (18)$$

3.2 유럽의 研究

O.R.E에서는 橋梁設計衝擊式을 새롭게 하기

위해 鋼橋, 콘크리트橋 등의 有道床, 無道床 또는 單線, 複線 등 여러 종류의 實橋梁에서 列車走行에 의한 測定을 計劃적으로 測定했다.

動的 舉動을 詳細하게 檢討하기 위해서는, 模型車輛의 走行에 의한 試驗도 했다. 이 模型試驗에서는, 走行荷重의 特性이나 橋桁의 質量 등을 크게 變化시킨 파라미터 研究 또는 實測과 直接 比較 檢討하기 위해서는 實物과 유사한 模型機關車를 사용하여 走行試驗을 實施했다. 이 結果 衝擊係數의 平均値, 틀림에 대한 標準偏差를 誘導했다.

實測 및 模型試驗으로부터 다음의 結果를 얻었다.

그림 6에서 보여주는 彈性軌道에서 0.25mm 길이의 흠이 레일에 存在하는 경우 詳細모델에 의한 解析의 極大치와, 實測에서 얻은 데이터의 틀림은 거의 같은 값이었다. 그러나 이 部分的인 極大値는 比較的 작은 速度 파라미터 α 의 領域에서 생기며, 高速에서는 軌道の 不整의 影響은 감소하였다. 따라서 模型시험의 結果와 그림 7에서 보여주는 데이터의 中央値와 比較的 가까운 값을 보여준다. ORE 研究의 總合的 結論을 記述하면 다음과 같다.

1) 衝擊係數는 速度 파라미터 α 에 크게 依存

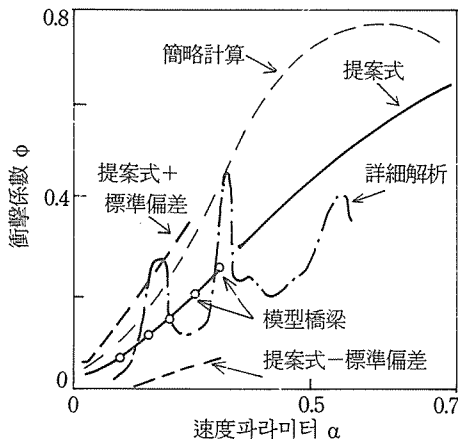


그림 7. ORE의 研究結果

된다.

2) 橋梁上의 軌道の 狀態는 動的 應答에 比較的 큰 影響을 미친다.

3) α 로 整理한 衝擊係數의 平均値는 鋼橋와 콘크리트橋 사이에 크게 相違함을 볼 수 없다. 그러나 實測値의 틀림은 鋼橋 쪽이 크다.

以上の 檢討로부터 ORE는 設計式으로 (19) 式을 提案했다.

$$\phi = \phi_1 + 0.5 \phi_2 \dots\dots\dots (19)$$

$$\phi_1 = \frac{\alpha}{1 - \alpha + \alpha^2}$$

$$\phi_2 = \frac{\alpha}{100} [56e^{-0.01L^2} + 50(\frac{f}{80} - 1)e^{-0.0025L^2}]$$

e : 自然對數의 底

a : 1.0 (v > 22m/s), a : v/22 (v < 22m/s)

a : 速度파라미터

軌道の 不整에 의한 影響에 관해서도 상세한 검토를 하고 있다. 前述한 것과 같은 基礎理論에 의한 檢討와 實驗橋 위의 軌道の 레일 간격이나 레일 파임을 人工적으로 設定하여, 實車走行試驗을 하여, 軌道の 不整이 橋梁의 動的 應答에 크게 影響을 주는 것이 實証되었다.

3.3 各國의 設計衝擊係數

以上과 같은 研究를 基礎로, 設計示方書 등에 採用하고 있는 設計衝擊係數를 그림 8에서 볼 수 있다. 본그림에서 보여주는 것과 같이 各國의 設計衝擊係數는 AREA(미국), JR(日本)의 그룹과 유럽그룹으로 나누어 前者는 長支間에 있어서 값이 後者の 것보다 크고, 短區間에서는 그 반대로 되고 있다.

특히 前者에서와는 달리 유럽의 支間 60m 以上에 있어서 衝擊係數가 Zero가 되는 것에 대해서는, 設計荷重 모델의 相違로부터 생기는 것이다.

4. 橋梁의 動的 應答에 關한 其他理論

4.1 처짐 限界에 關해서

橋梁의 처짐 限界는, 鐵橋의 振動을 抑制하기 위하여, 桁高比制限形으로 設計를 하는 것이 初期 設計法이었다. 그러나 高速列車가 走行하는 橋梁에서는 그 처짐이 軌道틀림에 相當하는 정도 크기의 영향을 車輛에 주기 때문에 走行安全性 또는 乘車感에 關한 檢討가 必要하다. 경우에 따라서는 어느 車輛要素의 固有振動數가 橋梁의 連續의인 처짐의 通過振動數에 一致하며 共振 現像이 생겨 큰 振幅이 成長한다. 이와 같은 觀點으로부터 橋梁의 처짐 限度를 檢討하여 實設計에 사용하고 있다. 콘크리트橋의 경우는 一般的으로 처짐량이 작기 때문에 設計에 영향이 작으나 鋼橋의 경우에는 꽤 큰 영향을 미친다.

4.2 長大橋梁에 關하여

本四架橋에 代表的인 鐵道用 吊橋나 斜張橋 등의 長大橋의 設計時에는 特히 車輛走行에 關聯한 問題가 취급되었다. 長大吊橋나 斜張橋의 衝擊係數에 關해서는 많은 理論解析, 模型實驗을 하여, 設計衝擊係數가 提案되어 있다. 이 研究로부터 吊橋에서는 橋軸方向의 처짐波動的 傳播速度는 一般的으로 列車走行 速度보다 크며, 斜

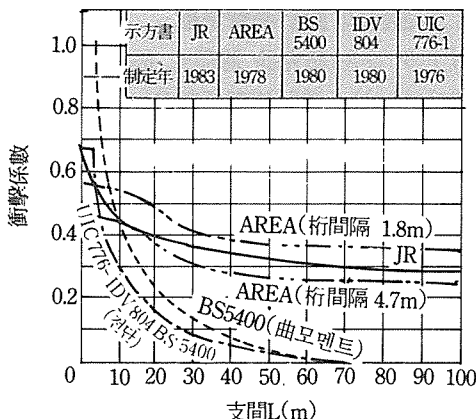


그림 8. 各國의 設計衝擊係數(鋼桁)

張橋에서는 시스템 탬핑 作用이 커지므로 매우 큰 충격계수를 고려할 必要가 없다고 본다. 그러나 斜張橋의 케이블의 橫振動, 超音速鐵道가 走行할 때 길이方向의 波動傳播現象에 關해서는 한층 더 검토할 사항으로 남아 있다.

4.3 浮上式 鐵道

다음으로 浮上式 鐵道の 開發이 進行되고 있는 중이므로, 가이드 웨이와 浮上車輛과의 動的 相互作用에 關해서도 研究되고 있다. 超高速의 경우 移動荷重의 基礎의 問題, 彈性連續支床梁의 限界速度 問題, 浮上力이 欠落한 때의 衝擊荷重의 問題 등이 研究 취급되고 있다.

一般的으로 浮上式 車輛이 輕量化되고, 分布荷重으로 되게 하는 것으로부터 設計活荷重이 從來에 比해 작아지며, 桁의 굴곡 剛性을 작게 할 수 있는 것이 可能해졌다. 이 點에 關해서는 低剛性桁의 動的 舉動에 關해서는 위에서 記述한 波動傳播問題를 포함하여 研究의 모든 分野는 넓다.

5. 結論

車輛走行에 의한 鐵道橋의 動的 應答에 關해서는 現在까지 꽤 複雜한 解析이 可能해졌고 파라미터 檢討도 容易해졌다. 또한 模型試驗 또는 實橋에 있어서 走行試驗의 結果도 꽤 集積되어 있다. 이와 같은 詳細한 解析도 많은 試驗에 의해, 鐵道橋의 動的 應答은 最近 高速走行時의 動的 應答도 포함하여 現象의으로 明確하게 파악이 進行되고 있다. 그러나 鐵道橋의 衝激係數는 軌道不整의 要因에 있어서도 本質的으로 確率論的 性格이 強하고, 定量的으로 그 값을 定하는 것은 困難한 面이 있다. 構造物의 自由度, 車輛의 自由度가 增加하는 데 따른 軌道틀림을 統計的으로 取扱할 때 豫想되는 膨大한 自由도와 時間刻에 대한 미지수의 增大化에 對處하여, 今後에는 計算實驗이 可能한 수퍼컴퓨터에 期待가 크다.