

II-31 鉄道吊橋に関する基礎的検討

東京大学工学部 正員 平井 敦
同 上 正員 O伊藤 学

吊橋は他の型式の橋梁にくらべて比較的剛性が低く活荷重による変形が大きい上に、その動的性状もかなり特異性を有している。そのために従来吊橋は鉄道橋としての安全性に疑問があると考えられ、現在本格的な鉄道吊橋は世界的にも見当らない現状である。しかしながらスパン 600 m 以上の長大径間を渡る橋梁型式としては構造理論上並びに経済上の見地から吊橋以外にはほとんど考えることができず、これがため道路橋としては既にスパン 1000 m を超える長大橋が存在するにもかかわらず鉄道橋のスパンの限界はかなり低い値を余儀なくされている。そこで、ここではごく一般的に長径間吊橋の鉄道橋としての幾つかの問題点について検討を加える。

[1] 静的変形 ……鉄道橋の場合勾配制限のために吊橋の活荷重による撓み変形とかなり厳しく抑えねばならない。いま等分布活荷重を対象として許容最大撓み角を ν_0' とおけば補剛トラス高 d とスパン l との比を定める近似的な目安として次式が得られる。

$$\frac{d}{l} = F(C, \alpha) \cdot \frac{T_{\max}}{E} \cdot \frac{1}{\nu_0'}$$

ここに $F(C, \alpha)$ は 2 つの無次元量 $C = l \sqrt{H/EI}$ および $\alpha = (l^2/Hwl)(EAc/LE)$ に関する双曲線函数を含む函数であり、長径間吊橋の場合 α の値は大体 1.5 ~ 2.5 の範囲にあり、また $C \equiv \rho = l \sqrt{Hw/EL}$ とおいても結果に大差はない。この ρ の値は吊橋の静的および動的特性に最も影響ある重要なパラメータで、従来の資料から推してもスパンと共に増大し $l > 500$ m には多くの場合 $\rho > 10$ と考えられ支えきれない。

上式で $T_{\max} = 1200 \text{ kg/cm}^2$ とすれば、スパン 500 ~ 1200 m の長径間吊橋においてたとえば $20/1000$ の最大撓み勾配を確保するために必要な d/l の値はおおよそ $1/80 \sim 1/40$ と考えられる。

[2] 栈間車の鋸打作用 ……近年電気栈間車、ディーゼル栈間車などが蒸気栈間車に代って用いられる傾向にあるが、従来鉄道橋の衝撃の最大原因を占めるものは栈間車付輪の不平等衝撃による鋸打作用（ハンマーブロー効果）とされてきた。しかし長径間吊橋の場合その基本固有振動周期がきわめて長いために 3 次以下の低次固有振動数に共振する栈間車の共振速度は 5 km/hr 以下となり、そのような場合には鋸打力自体も小さく動的効果は僅かである。たとえば鋸打作用による単径間吊橋の最大撓みは近似的には

$$\eta_{\max} \approx 0.6 \left(\frac{R}{v_{\max}} \right)^2 \frac{P}{m l}$$

P : 栈間車重量, R : 車輪径, $v_{\max}$: 走行最大速度, m : 吊橋単位長さ重量
であり、最大静的撓みに比して無視できる量である。一方、吊橋の高次固有振動数と周期的鋸打作用が共振する場合を考えると δ を吊橋の対数減衰率として、上記の動的最大撓みは

$$\eta_{\max} = \frac{0.6\pi}{\delta} \left(\frac{R}{v_{\max}} \right)^2 \frac{P}{m\ell}$$

となり衝撃率は数%以下である (δ の値如何によるが)。

[3] 平滑走行荷重による動的効果……一般のケタの弾制振動解析と同様に response を現準振動の項に展開すれば r 次の固有振動数を ω_r 、 $\varphi = \pi \cdot v/\ell$ とおいて $r\varphi = \omega_r$ が平滑走行荷重の共振速度を求める関係式となる。長径両吊橋の場合最も影響の大きいのは基本固有振動形に対応する $r=2$ の場合である。前記 ρ の値が比較的大きいとき ω_2 はほぼスパンの平方根に逆比例するので、比較的小スパン ℓ が短く、しかも ρ の大きい吊橋では振動減衰性を考慮に入れても集中荷重の高速走行によってかなり大きな動的効果を生じる場合があり得る。しかしながら分布荷重の平滑走行による動的効果は集中荷重の場合に比してかなり小さく、二三の例について計算した結果では最高 120 km/hr. の走行速度で動的増率は 10% 以下である。

他の原因から生ずる衝撃と比較して、吊橋においては平滑走行荷重による動的効果が最も大きいことが予想され、またこれが 500m 程度のスパンにおいて著しいことは注目すべき事柄である。たゞしこれは先の ρ の値によって左右されることはもちろんである。

なおケタの撓みの変化によって生ずる慣性力に起因するいわゆる Zimmermann 効果は、スパンの大きい割合に剛性の小さい吊橋上を集中荷重が高速走行する場合にもその影響は小さい。単純支持ケタにおけるこの種の動的効果は近似的に

$$i = \frac{1}{\frac{g_0}{g} - 3}, \quad \alpha_0 = \frac{6EJ}{E\ell} \frac{\delta}{v^2} \quad (i \text{ in } \%)$$

で与えられているが、これを一応の目安を得る目的で吊橋においてほぼ最大の撓みを生じる $1/4$ 点に注目し、吊橋の換算撓み剛性として $EJ = EI(1 + \rho^2/4\pi^2)$ を用いれば $\ell > 500\text{m}$ では i は 2% 以下に過ぎない。

[4] その他の原因による動的効果……車両のバネ作用について言えば、吊橋の基本固有振動数が低いために原則的にはバネ上荷重の鉛直加速度がバネの摩擦力を克服するに至ることはまずないと考えられる。たとえ車両のバネ作用が発現したとしても、その固有振動数が吊橋のそれと比べて高いので結果としてはバネ作用を考慮しない場合と変りないとしてよい。

レール継ぎ目における衝撃、および列車の横揺れによる衝撃はいずれも周期的衝撃力による強制振動として解析できるが鋸打作用の場合と同じような理由でその動的効果はきわめて小さい。

以上ごく一般的かつ概念的に鉄道橋としての吊橋の性質について検討したが何分問題が非常に広範囲にわたり、また実験的研究に触れることができないので別に機会を得てその詳細を発表するつもりである。吊橋全体としての剛性を増大せしめることはこの問題に関連して望まれる所であり、ケーブルと補剛ケタをスパン中央で緊結する構造あるいは Diagonal stay の採用などがその対策として考えられる。

なお本研究は文部省科学試験研究費の補助を受けたことと附記する。