

中央大学 学員。小川慶策
東大生研 正員 片山恒雄

1. はじめに

これまでの橋梁構造物の設計における振動に対する配慮は、種々の荷重によって起る振動に十分抵抗できる剛性を確保することをオーの目的としてきた。現行の示方書では、最小細長比によって各部材の剛性を、たわみ制限により橋全体の剛性を確保し、活荷重による衝撃に対しては衝撃係数を考慮している。これらの条件を満足しているなら、十分な構造剛性と振動減衰が得られると考えられているわけである。しかし、最近種々の面での発展が状況を変えつつある。例えば、電子計算機の急速な発達に伴った構造解析の進歩や材質の改良進歩あるいはPC構造とか合成構造または全溶接構造などの幅広い使用であり、それらに加えて車輛はより速くより重くなっているし、橋梁に対してもより美しくスマートな構造が要求されてきている。これらの要因が極限設計へと向わせ、より揺れやすい橋梁を造り出す傾向になりつつある。水路橋などのように、人間の使用しない橋の場合には、構造的に安全であるならば振動数及び加速度の制限はあまり必要ないと思われる。しかし、歩道橋や道路橋のように人間の使用する橋の場合には、振動に対する何らかの設計基準の提案が必要であろう。このような基準は利用者である人間の振動に対する知覚限界、不快限界に根本的に基づくべきものと考えられる。本小文では、各方面での振動感覚及び振動限度に対する研究を調査し、それらの問題点をあげ、橋梁における振動限度について多少の考察を述べることにする。^(1,2)

2. 振動の人体感覚に関する既往の研究

人体に対する振動の影響の問題は、医学の分野を始め各方面で研究されてはいるが、まだ物理的に不明確な点も多く、大部分の研究が主として振動感覚の面から進められている。振動の影響は、生理学的影響と心理学的影響の両面からとらえられるべきであろうが、個人差が大きく、特に後者はそれが著しい。このことが問題をより難しくしている。

人体の振動感覚の問題は、船舶⁽³⁾、列車⁽⁴⁾、自動車関係あるいは、工場・建設工事現場付近の公害問題、労働衛生問題などに関連して研究されている。船舶工学の分野では、船体各部に生じる振動の航海機器への影響、乗客・乗務員の乗心地の面から問題とされているが、長期の居住性、問題とすべき振動の複雑さなどから、短い時間の振動を対象とした橋梁の場合へそのまま持込むことは必ずしも適切ではないと思われる。造船協会の鉛直振動許容限界線を参考として図-2に示した⁽³⁾。また、列車、自動車の分野でも乗心地の面から振動が問題とされている。最近特に大きな問題となっているのは、工場・建設工事現場付近の振動公害問題である。これらの問題に対しては、各自治体でそれぞれ条令、指導基準などを設けているほか、建築の分野でも建物の振動防止に関する研究が進められている。⁽⁵⁾しかし、公害問題が対象としている振動は日常の生活の場で長時間連続するものであり、これらの基準を橋梁の場合へそのまま応用することには無理がある。

人体の振動感覚に関する研究は次のような代表的なものがある。これらの感覚限界曲線は図-1と図

2にまとめて示してある。図-1は変位振幅と振動数の関係で、また図-2は加速度と振動数の関係で示したものである。

Reher と Meister^(1,2,4,5) は25名の成人を振動台に乗せ、「立つ」、「座る」、「寝る」の三通りの姿勢について、振動数と振幅の異なる鉛直及び水平振動を数分間与えた。振動感覚は、「感じない」、「漸く感じる」、「よく感じる」、「強く感じる」、「不快を感じる」、「非常に不快を感じる」の6段階に分類されている。Janeway^(6,7) は Meister などの実験結果を総合して、鉛直振動に対する乗心地曲線を以下のよう

に提案した。(a) 低振動数範囲 $f = 1 \sim 6 \text{ Hz}$ $\Delta = 2/f^3$ (変位振幅 Δ の単位は in.) この範囲では振動は振動の衝撃的効果(変位の時間に関する3次微分)に比例する

(b) 中振動数範囲 $f = 6 \sim 20 \text{ Hz}$ $\Delta = 1/3f^2$ 振動感覚は振動加速度に比例する

(c) 高振動数範囲 $f = 20 \sim 60 \text{ Hz}$ $\Delta = 1/60f$ 振動感覚は振動速度に比例する

Janeway の基準は Meister の基準よりやや厳しくなっている。Dieckmann⁽⁶⁾ は、「立つ」、「座る」の2つの姿勢について、約5~10分程度の鉛直及び水平振動を振動台上の被験者に与えて、振動感覚が加速度、速度、変位に比例する振動数範囲を表-1のように求めている。さらに、Dieckmann は感覚度を表わすのにK値という値を導入し、有感限界を $K=0.1$ 、仕度の時間仕事が可能程度の限界を $K=1$ 、ほんのわずかの時間のみ仕事が可能程度の限界を $K=10$ 、普通の人の忍耐限界を $K=100$ と定義している。Dieckmann の実験によると、振動台上の被験者に鉛直振動を与えると、振動数が4~5Hz付近の場合に、腰・肩・頭各部で特に著しい振幅の増大が測定されている。Goldman⁽¹⁾ が提案した感覚限界は「感じる」、「不快」、「我慢できない」の3段階に分類されており、やはり5Hz付近の加速度には注意が必要であると述べている。

以上の研究のすべては比較的長い時間振動を受ける場合についてであり、橋梁の振動限度を決めるために必要と思われる短時間の振動に関する実験結果としては、英国、Road Research Laboratory (以下 RRL と略す) で行われた実験をおげられる。⁽¹⁾ 実験の対象とされたのは20才から72才までの40人であり、長さ10.5mの歩道橋を歩いて渡った場合(恐らく10秒間程度)、スパン中央に約1分間立った場合の2通りについて起振機により鉛直振動を与えて、振動数と変位振幅及び振動数と加速度の関係で、人体感覚に関する限界線を得ている。実験に用いられた振動数範囲は1~14Hzであり、振幅は0.003 in. ~ 0.2 in. までである。

3. 既往の研究の問題点と橋梁の振動限度

図-1および図-2に基づいて橋梁の振動限度の基準を求めようとする際注意すべき点として次の三つを考える必要がある。まず、各種の限界線の定義の仕方が異なるということである。振動感覚の違いは、はきり判別できるものではなく、ある程度の範囲を持つものであり、例えば同じ「不快」という言葉で表現された限界線でも、かなりの幅を持つと解釈すべきであろう。例えば、被験者が実験を意識したために、通常の場合と比較して振動感覚が鋭くなるといった心理的影響を無視することはできない。文二番目は、振動を受けている時間の長さによる感覚の違いである。さらに、振動を受ける人間の姿勢が各実験で異なっていることを考慮する必要もある。

このように、各々の提案による限界線を一律に求めることにはいろいろな問題とすべき点があると思われるが、ここで、橋梁の振動限度に関する一つの基準を求めるところを考へてみる。Dieckmann

のK値に対しては、4段階のうちでK=10を一応の許容限界と考える。Goldmannの基準は3段階にわけて提案されているが、「不快」と「我慢できない」の中間付近に許容限界があるものと仮定する。RRLの実験結果では、歩いている場合と立っている場合の2つの限界線のうちで、より一般的状态であって、ゆるい限界を示した歩いている場合の限界線を基準とする。RRLの限界線は、歩いている場合の限界線を基準としてもなお2Hz以下の低振動数域においては、他の限界線に比較してきわめて厳しい値を示している。しかし、船舶・列車など長い時間を考えている限界線さえ、RRLの限界線に比べて大きな加速度を許容していることから判断して、RRLの限界線の許容値は低振動数域ではあまりに小さすぎると考えられる。(しかし、一方では船舶や列車はある程度揺るのだからで、それに対し道路の一部である橋梁は揺れないはずであるという一般の先入観念も無視できない)

橋梁構造物において、振動の問題となるのは比較的たわみやすい構造の場合と考えてよいだろう。振動数が10Hzを超える橋は、極端に短いか、または非常に剛性に富んだ橋のどちらかであると思われるので、振動数が10Hz以下の範囲に着目してみる。各種の限界線に対する前述の考案から、かなり大胆ではあるが、許容できるかできないかの境界の加速度が0.05g~0.1gの間にあると仮定してみる。この領域を図2に斜線で示した。これを振動数と変位振幅の関係にすると

$$\Delta = g/80 \pi^2 \cdot f^2 \sim g/40 \pi^2 \cdot f^2 \quad \dots\dots ①$$

この基準によって、これまでの実測値がどのように判断されるかを検討してみる。Oehler⁽⁷⁾は単純桁橋、連続桁橋、ゲルバー橋の三型式について、弾簧で、トラック走行による変位を測定している。またRRLでは、歩道橋、道路橋合わせて8橋の振動測定を行っている。これらの結果を図3にプロットした。Oehlerは彼自身の行った測定値をJanewayの乗心地曲線と対比させて、この境界を越えた橋が多くあるにもかかわらず、特に振動に対する苦情はなかったとしている。なおRRLの②で示したものは歩道橋を故意に共振状態にして測定した値であり、これらはすべて不快と判断された。しかし同じ歩道橋でも通常の歩行状態ではすべて基準よりかなり低い値を示している。また道路橋では共振状態においてさえ、特に不快であるとは判断されなかった。上記の実測値を許容できるかできないかの境界を与える範囲の限界線と比較してみると、少数の例外を除いて許容範囲に入っている。通常の使用時には特に問題を起こしていないことから判断して、加速度が0.05~0.1gという限界は少なくとも、振動数が2~10Hz当りでは、比較的妥当な結果を示しているように思われる。これまでも橋梁の振動制限に対する提案はいくつかなされているようであり、文献(1)にその数例が紹介されている。なお、British Standard, G117 (Composite Construction in Structural Steel and Concrete), Part 2. (Beams for Bridges), 1967の付録では「約20tの車輛通過に伴う最大加速度をA (in./s²), 最大変位をΔ (in.)としたとき AΔ = 5 (in²/s²) を起さないようにするのが望ましい」としている。この関係を振動数と変位で表わしてみると

$$\Delta = \sqrt{5/2\pi} \cdot f \quad \dots\dots ②$$

この関係も図3に示されているが、かなり緩い基準であることがわかる。

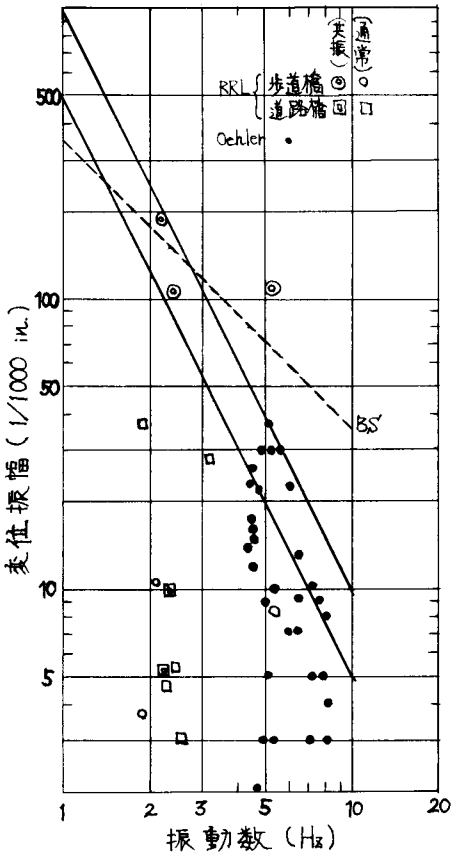
また、きわめて長周期の橋に対する資料の検討は不十分であるので、図3のその範囲における基準線が正確かどうかは疑問である。さらに以上の考案はほとんど道路橋を中心として述べたものであり、歩道橋に因りてはもっと厳しい基準が必要かもしれない。

参考文献

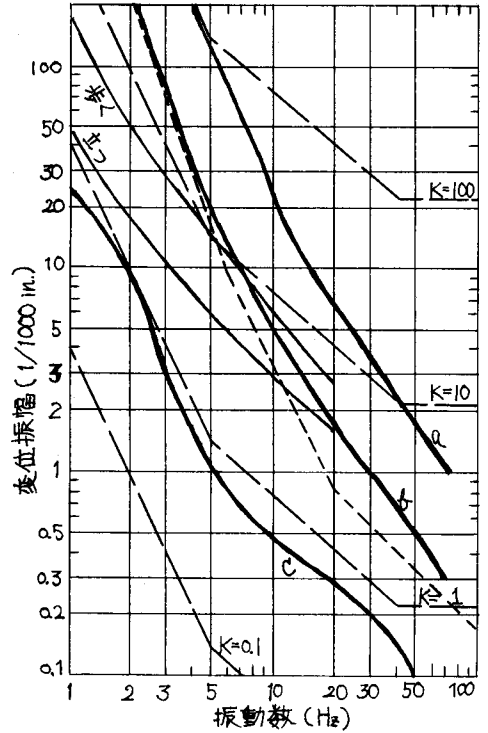
1. D.R. Leonard, Road Research Laboratory Report, No.34, 1966
2. 沢井広之, 橋梁と基礎, Vol.3, No.8, 1969
3. 神田 寛, 労働科学, Vol.38, No.3, 1962, Vol.40, No.9, 1964
- 5 島山直隆, 土木学会 関西支部 騒音振動 公開講習会テキスト, 1972
- 4 松井信夫, 交通技術, No.44, 1955
6. D. Dieckmann, Ergonomics, Vol. I, No.4, 1958
7. Oehler, L.T. Proc. ASCE, Vol. 83, paper 1318, 1957

振動感覚に 比例する量	振動数の範囲	
	鉛直振動	水平振動
加速度	5 Hz 以下	2 Hz 以下
速度	5~40 Hz	2~25 Hz
変位	40 Hz 以上	25 Hz 以上

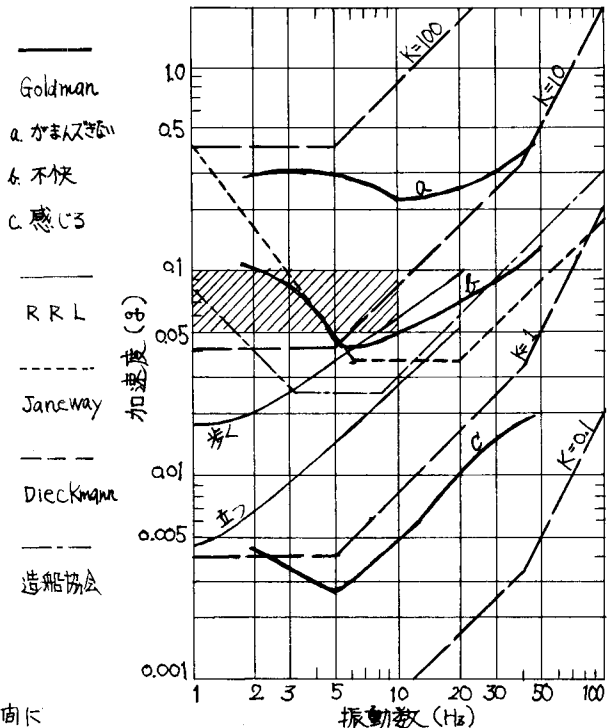
表-1 Dieckmann の振動感覚



(図-3) 許容限界の加速度が0.05~0.18の間に
あると仮定した基準とBSの基準及び実測値



(図-1) 振動の知覚及び許容限界線



(図-2) 振動の知覚及び許容限界線