

I-64

人間の振動感覚に関する

実験と解析について

北海道大学工学部 正員 小幡 卓司

北海道大学工学部 学生員 桑島 正樹

北海道大学工学部 正員 林川 俊郎

北海道大学工学部 正員 及川 昭夫

1. ま え が き

歩道橋はその上を直接人が歩き、あるいは立ち止まる構造物であるため、使用者がその振動を感じやすい。さらに設計荷重が小さいため、道路橋に比べて剛性が低く歩行者の通行によっても振動が生じやすく、その振動使用性が設計における検討項目として世界的に注目されるようになった。このような状況の中、イギリスのBS5400(1978年)、カナダのOntario code(1983年)等、各国において振動使用性に関する照査方法が設計基準として示されるようになり、我が国でも、昭和54年に立体横断施設技術基準・同解説(以下基準と略す)が制定され、歩道橋の固有振動数が人間の平均歩調に近い範囲(1.5Hz~2.3Hz)に入らないようにすることが明示されている¹⁾。

最近では横断歩道橋の新設が減少する一方、人道橋や側道橋、遊歩道橋等と称される単に道路を横断する以外の様々な目的に用いられる歩道橋が多く建設されている。これらの橋梁の傾向としては、その大部分が従来の横断歩道橋に比してスパンがかなり長く、幅員も広い。なかでも支間長が40mを超えるような大規模な歩道橋では、その低次の固有振動数について、基準に示された範囲を避けるのが困難である場合が多い。また、死荷重が150tを超え道路橋と同型式の支承を有するような橋梁では共振周期で歩行しても使用性においては問題が少ないことや、人の走行時の歩調に近い3Hz前後の振動数に関しても注意が必要であることも報告されている²⁾。

以上よりある程度規模の大きい歩道橋の設計においては、人間の歩行による動的応答量を計算し、得られた応答量に対してどの程度の人が不快と感じるかによって使用性の評価をする方が実用的であると思われる。本研究では、人間の歩道橋通行時における振動感覚を明らかにするため、延べ50回にのぼる振動付加実験を行い、それにより得られた結果や過去の研究を参考にしてファジィ推論を用いた解析により歩道橋の振動使用性に関する評価モデルを作成したのでここに報告する。

2. 振動付加実験

2-1. 実験方法

実験は図-1に示すような橋長12mの歩道橋実験桁を用い、所定の振幅、振動数で強制振動させ、桁上を歩行する被験者に対してアンケート調査を行った。

加振装置は、桁の支間中央部に接続したクランクをベルトを介してモーターにより駆動した。振幅の調整はクランクの偏心量を変化させることで行い、振動数は抵抗器による電圧調整およびプーリーの直径比を連続的に変化させることによ

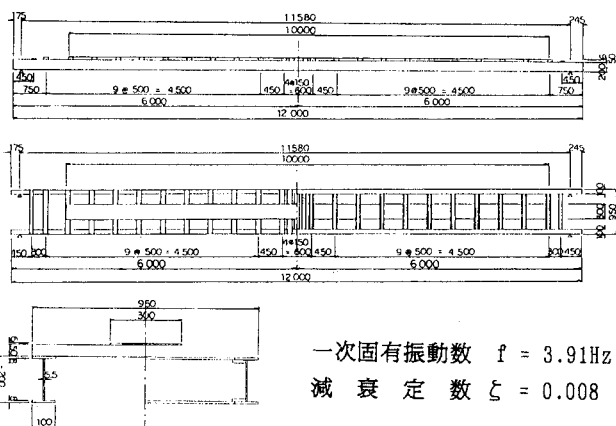


図-1 振動台一般図

Experimental and Analytical Study on Human Vibration Sensibility.

by Takashi OBATA, Masaki KUWAJIMA, Toshiro HAYASHIKAWA and Akio OIKAWA.

り調整した。また桁上に加速度計を設置し、AD変換ボードを用いてパソコンで振動を常時モニターし、人の歩行に起因する振動数の低下などの影響がないことを確認しながら実験を行った。

また、アンケート調査は計量心理学における系列カテゴリ法を用いて行った。系列カテゴリ法とは、被験者に対して予め用意された数段階に順序づけられたカテゴリのなかから、ある刺激がどれに

表-1 振動刺激

振幅(mm)	振 動 数 (Hz)					
0.5	0.8	1.2	2.0	3.5	6.5	11.5
1.0	0.8	1.2	2.0	3.5	6.3	11.3
1.5	0.8	1.4	2.5	4.5	7.8	
2.0	0.6	1.2	2.0	3.9		
3.0	0.8	1.4	2.3	4.3	7.6	
4.0	0.6	1.0	3.3	5.9		
5.0	0.8	1.6	2.7	4.9		

該当するかを評定させる手法である。一般に刺激提示は単一刺激で行うことが多い。データの処理法にはいくつかあるが、本研究では各カテゴリの幅が一定であると見なし、各カテゴリに等差数列をなす重みを与え、度数分布から求めた平均値を心理尺度値の近似と見なす、いわゆる品等法を採用した³⁾。具体的には、前述の実験装置を屋外に設置することにより実際の橋梁上を歩行しているのにより近い状況を設定し、表-1に示した振幅および振動数で順次加振した。被験者には振動に関する情報をいっさい与えず、一人ずつ振動台の上を歩行させ、その際にどのように感じたかを表-2に示す5個のカテゴリのなかから選択し、記録用紙に記入することとした。被験者の歩き方としては特別なものは指定せず、普段現実の歩道橋上を歩いている場面を想定するように依頼した。実験回数としては、15名の被験者に対して複数回行うことにより、延べ50回の測定を行った。

表-2 カテゴリ選択枝

No	カ テ ゴ リ	重 み
①	振 動 を 感 じ ない	1
②	少 し 感 じ る	2
③	明 ら か に 感 じ る	3
④	少 し 不 快 で ある	4
⑤	大 い に 不 快 で ある	5

2-2. 実験結果

各振動刺激に対して被験者がどのカテゴリを選択したか度数分布表を作成し、各カテゴリに設定した重みをもとに算術平均をとった値をその刺激に対する評定値とした。その結果を図-2に示す。各評定値をもとに各カテゴリの境界線を同図に実線で示した。図のA線とB線の間が「振動を少し感じる」のカテゴリ、C線とD線の間が「少し不快である」のカテゴリに相当する。また「少し不快である」に着目して、各振動刺激について何パーセントの人がそのカテゴリ（あるいはそれより上のもの）を選択したかを表す評定率を記入したものが図-3である。図の実線は評定率50%のラインである。

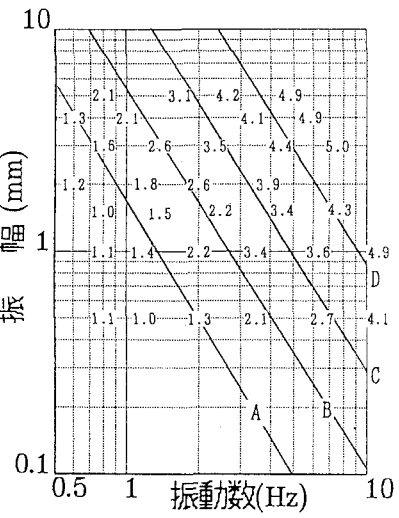


図-2 評定値とカテゴリ境界

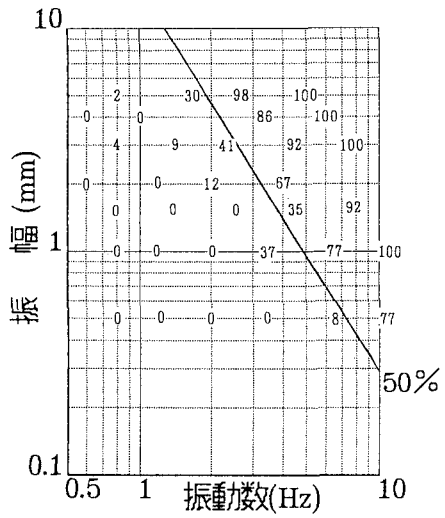


図-3 不快(④)の評定率

さらに、今回の実験結果を評価する際の一助とするため実験終了後に、各被験者が橋梁の振動に対してどのような意識を持っているか、また今回の実験にどのような態度で臨んだかなどについて、聞き取

り形式によるアンケートを行った。それによると、普段の生活でも橋の揺れを経験しているものがほとんどであったが（15人中13人）、そのうちの多くは橋の揺れに対して「特に気にならないので揺れても構わない」（9名）と答え「気持ちのよいものではないので、揺れない方がよい」と答えたのは4名にとどまった。また、どのような揺れを不快と感じるかという質問には「船に乗っているときのように、大きな振幅でゆったりと揺れるもの」を挙げる声や、「脚に震えがくるような速い揺れの方が好ましくない。」と答える者など、様々な感想が上がった。しかしながら、そのような意識の違いは各刺激のカテゴリ判断には明確な違いとして現れず、刺激の弁別や不快かどうかの判断に関してはほぼ同様の評価基準を持っていると思われ、今回の実験の結果は被験者のカテゴリ判断基準の保持に関して十分信頼できるものであると考えられる。

本研究の妥当性を検討するために、過去の代表的な研究との比較を行った。その結果を図-4に示す。図によると、5Hz以上の比較的振動数の高い領域では振幅にして1mm以下の差しかなく、各研究とも似通った値をとっているといえるが、5Hz以下の低振動数領域ではばらつきが大きく、振幅差にして数mmにも及んでいる。この原因としては刺激の提示時間の問題が考えられる。高い振動数では数秒の間に被験者に数多くの振動が繰り返し与えられ、カテゴリ判断が容易であるが、低い振動数では振動の往復の回数が少なくなるため、被験者の判断のばらつきが大きくなったり実験時の環境の影響を受けやすいなど、実験条件が難しくなる傾向にある。

本実験では、低振動数領域で他の研究に比べ鈍い反応を示している。これは被験者のほとんどが男子大学生であったため体力的に優れていることに加え、全員が橋梁学を専攻しており、橋梁の振動に対して予備知識があり恐怖心が少ないことが理由と思われる。実験後のアンケート調査で橋梁の揺れが気にならないと答えたものが多かったのも、このような被験者の構成が少なからず影響しているとみてよいであろう。

3. 界限度の検討

以上を考慮すると、今回の実験結果をそのまま歩道橋の振動の評価モデルに採用すると、特に低振動数領域に対して緩い評価になってしまう恐れがある。そこで低振動数領域で評価値を安全側に評価して、振動が不快であると感じる閾値として（1Hz-8mm）,（8Hz-0.5mm）の点を通る直線を設定した。これを図-4に示す。なお、閾値とは反応が起こる確率が50%となる値である。

4. 解析およびその結果

任意の振幅、振動数の振動刺激について、その刺激に対して何%の人が不快と感じるかを数値で得る手法として、ファジィ推論による解析を用いた。

ファジィ推論を行うためには、メンバーシップ関数と推論規則の設定が必要である。本研究では、入力メンバーシップ関数としては横軸に振幅および振動数をそれぞれ対数座標でとった三角型のものを採用した。推論規則の前件部に関するメンバーシップ関数は振幅、振動数とも9個、後件部に関しては17個作成し、これをもとに81個の推論規則を作成した。関数を離散化表現する際の分割数は33分割とした。各台集合の設定は、前節で決定した不快の閾値を基準として行った。これらを図-5に示す。

これらのメンバーシップ関数と推論規則をもとに、パソコンによるプログラム計算で数値解析を行った。その結果のうち、「少し不快である」に対する評価率が40%に達する振動

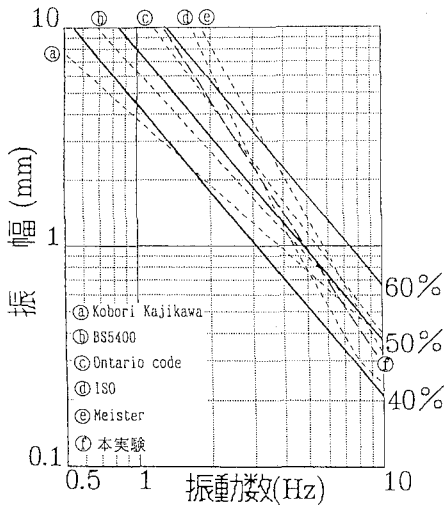


図-4 解析結果

と、60%に達する振動を表す線をそれぞれ図-4に示した。これによると、評定率が40%から60%の範囲に過去の研究の多くが含まれており、したがってメンバーシップ関数の設定が適切であると考えられる。

また、図-5は「少し不快である」に対するメンバーシップ関数であるが、前件部の台集合の数値を適宜変化させることによって、その他の振動感覚に関する評定値を求める推論も行うことができる。表-3に4種類の振動感覚と、それぞれの感覚に関する推論を行うのに必要な台集合の数値の範囲を示す。

5. あ と が き

以上、実験と解析を通して人間の振動感覚に関する評価モデルの作成を試みたが、図-5に示したように、本研究で作成したモデルは過去の研究と比較して、妥当であると思われる。また、本解析手法を用いれば、振幅と振動数を入力することによりその振動に対する評価が数値で与えられるので、設計段階で歩道橋の動的応答量を予測することにより、使用性の判断が可能となる。このため、例えば駅前などの人通りの多い地点に架設される歩道橋では不快の評定値が40%までになるよう抑えたり、逆に通行者は希であるが付近住民の要望などで架設するような橋に対しては、評定値が60%程度まで許容し振動使用性による負担を軽くすることができるなど様々な可能性を有し、応用性の高いモデルであるといえる。

<参 考 文 献>

- 1) 日本道路協会編：立体横断施設技術基準・同解説，昭和54年
- 2) 田中信治・加藤雅史・鈴木森晶：支間40mを超える歩道橋の実振動特性，構造工学論文集Vol.38A P773～780,1992,3
- 3) 中谷和夫：尺度構成法，講座心理学2 計量心理学第5章，東京大学出版会，1969
- 4) 小堀為雄・梶川康男：道路橋の振動とその振動感覚，土木学会論文報告集第222号 P15～23,1974,2
- 5) 小堀為雄・梶川康男：橋梁振動の人間工学的評価法，土木学会論文報告集第230号 P23～31,1974,10
- 6) 梶川康男・加藤雅史：歩道橋の振動と使用性設計，振動制御コロキウムPARTB論文集 P9～14,1991,7
- 7) 小幡卓司・林川俊郎・桑島正樹・金子達哉：ファジィ推論を用いた体感振動解析について 土木学会北海道支部論文報告集第48号 P209～212,1992,2
- 8) 小幡卓司・桑島正樹・林川俊郎：歩道橋の振動使用性問題におけるファジィ推論の適用について 土木学会第47回年次学術講演会概要集 P464～465
- 9) 小幡卓司・桑島正樹・及川昭夫・林川俊郎：歩道橋の振動使用性問題におけるじょ限度の実験的研究 土木学会第47回年次学術講演会概要集 P468～469

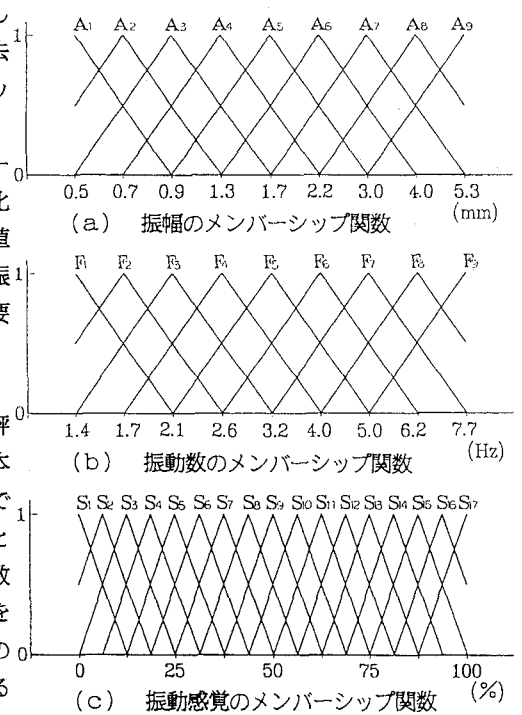


図-5 不快のメンバーシップ関数

表-3 各感覚の解析に用いる台集合

No	カ テ ゴ リ ー	振幅の台集合(mm)	振動数の台集合(Hz)
1	振動を感じはじめ	0.1 ~ 1.1	1.2 ~ 6.2
2	明らかに振動を感じる	0.4 ~ 2.4	1.1 ~ 6.1
3	少し不快である	0.5 ~ 5.3	1.4 ~ 7.7
4	大いに不快である	1.2 ~ 10.7	1.7 ~ 9.1