

鉛直振動に対する人間感覚——橋梁の使用性に関連して——

HUMAN-RESPONSE EXPOSED TO VERTICAL VIBRATION
CONCERNING BRIDGE SERVICEABILITY

松本 勝*・白石成人**・福井幸夫***・三澤 彰****

By Masaru MATSUMOTO, Naruhito SHIRAISHI, Yukio FUKUI and Akira MISA WA

In this study, human-response exposed to bridge vertical vibration was investigated through monitoring of 100 persons on Ohshima Bridge and shaking table. In the shaking-table test, the frequency and amplitude of vibration were changed in the range of 0.2-1.0 Hz and of 1.0-10 cm respectively.

The amplitude — frequency characteristic curves for human-response exposed to the vibration obtained here shows the roughly agreements with several previous results.

Keywords: human-response, bridge serviceability, on vibrated bridge, vertical shaking-table

1. 概 説

橋梁の長大化に伴い、歩道を有する橋梁に対しては、終局限界状態に対する検討と同時に、使用性の面で橋梁の比較的低周波領域かつ長時間暴露時間という条件下での振動が人間に与える影響について検討する必要性がでてきている。

振動の人体への影響は、医学の分野を始めとして船舶、列車、自動車、高層建築物関係および振動に対する公害問題として研究が行われている。船舶、列車、自動車関係の分野では、主として乗り物の乗り心地を中心として研究が進められてきた。この研究は1930年代に Reiher & Meister¹⁾らによって始められ、Reiher & Meisterの研究成果はその後の多くの研究に参照されている。船舶の分野においては、低周波数領域における動揺病(俗にいう「船酔」現象)が重要な問題であることから多くの研究がなされており、船体の振動に対する振動基準が造船協会から提案²⁾され、さらにISO³⁾においても振動基

準が作成されている。騒音と振動に対する乗組員の反応に関する大規模なアンケート調査としては藤井・小黒⁴⁾らの報告がある。また、自動車、列車の分野においても研究が行われており、鉄道車両の乗り心地を対象とした Helberg と Sperling⁵⁾の研究、自動車の乗り心地限界を検討した Janeway⁶⁾の研究などがある。高層建築物関係では強風時に発生する水平振動が居住性に影響を与えることから、多くの研究が行われている。この分野では、Hansen & Reed⁷⁾の研究、Wiss & Parmelee⁸⁾の研究、Chang⁹⁾の研究、Chen & Robertson¹⁰⁾の研究、Melaragno¹¹⁾の研究、後藤¹²⁾の研究などがある。橋梁の分野では、昭和40年代に歩道橋の振動問題が発生して以来、その振動と使用性に関する多くの研究がなされており、小堀・梶川らの研究^{13),14)}、梶川らの研究¹⁵⁾、西脇¹⁶⁾の研究などがある。

以上の研究はさまざまな実験、調査をもとに行われてきたが、これらの研究の多くは比較的小振幅のものが多く、大振幅かつ振動数1 Hz以下の長大橋梁の振動に対して、そのまま適用可能か否かは問題を残すところである。

そこで本研究では、歩行者用通路を有する大島大橋(中央支間長560 m)を対象として、約100名の被験者に静止状態さらに歩行状態で、橋梁上での振動を体験しても

* 正会員 工博 京都大学助教授 工学部土木工学科
(〒606 京都市左京区吉田本町)

** 正会員 工博 京都大学教授 工学部土木工学科

*** 正会員 東京湾横断道路(株)(旧・本州四国連絡橋公団企画開発部)

**** 学生会員 京都大学大学院

らい、アンケート調査を行うことで、橋梁上での振動に対する人間感覚についての検討を行った。また、鉛直振動において振幅と周波数の変化に対する人間の感覚反応の閾値（振動を感じ始める点、または振動が不快に感じ始められる点）を調べるために、同一被験者を対象に、大島大橋吊橋桁部近傍に設置された小型トラックを改造した鉛直振動台を用いて、振幅を3段階、振動数を5段階に変化させ、それぞれの振動に対する感覚テストを行った。これら2種類の試験を行うことにより、許容されない振動を推定し、橋梁における歩行者の振動感覚からみた使用性を検討するとともに、年齢差、男女差による人間の感覚の違いについても検討した。さらに従来行われた研究成果との比較検討を行った。

2. 試験方法

年齢・性別の違いが、振動に対する人間感覚に及ぼす影響を検討するため、被験者は、5～15歳、16～25歳、26～35歳、36～50歳、51歳以上の5つのグループから男女各10名程度、全体で約100名を選んだ。被験者の人員構成を表-1に示す。

振動試験の対象となった大島大橋は、本州四国連絡橋の尾道～今治ルートのうち伯方島と大島を結ぶ中央支間560m、両側に140mの高架橋を有する単径間吊橋であり補剛桁に扁平な逆台形断面をもつ鋼床版箱桁を採用した吊橋である。一般図を図-1に示す。

(1) 試験1

大型起振機を図-1に示すように支間1/4点に設置し、表-2に示す4つの振動モード（それぞれ試験1-a, 1-b, 1-c, 1-dとする）を対象として振動限度の調査を行う。歩行者は、起振機による振動が所定の定常振動になった時点で橋梁端のスタート地点より歩行を開始する。支間1/4点まで歩行し、歩行状態での振動に対する感想（以後「歩行時」の感想とよぶ）を図-2に示すアンケート用紙に記入する。次に、支間1/4点で静止立位の状態では振動を受け、再びその感想（以後「静止時」の感想とよぶ）を記入するというものである。試験風景を写真-1に示す。

(2) 試験2

図-3に示すような小型トラックを改造した鉛直振動台装置を用いる。振幅が1cm、5cm、10cmの状態をそれぞれ試験2-a, 2-b, 2-cと定義し、それぞれの振幅で振動数を0.2Hz、0.4Hz、0.6Hz、0.8Hz、1.0Hzと変化させた。また、10cmの振幅に対しては振動数1.25Hzのケースについても試験を行った（表-3参照）。これらの振動を加速度レベル、速度レベルで表わした値を表-4に示す。被験者は図-4に示すアンケート用紙をもち、7名単位でトラックの荷台に立つ。振動

表-1 被験者のグループの構成

年齢	男	女
5～15	12	11
16～25	6	10
26～35	11	10
36～50	10	10
51～	10	10
小計	49	51
計	100	

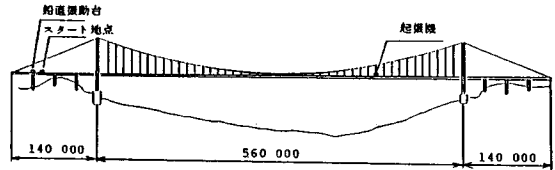
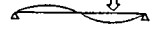
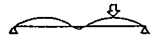

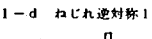


図-1 大島大橋一般図

表-2 振動モード

振動モード	振動数 (Hz)	加速度 (G)	振幅 (m)
1-a 曲げ逆対称1次 	0.186	0.0061	0.044
1-b 曲げ対称2次 	0.323	0.1328	0.316
1-c 曲げ逆対称3次 	0.703	0.1493	0.075
1-d ねじれ逆対称1次 	0.736	0.0910	0.042

試験1-a

グループ () 年齢 () 名前 ()

(1) 歩いたとき振動を

ア. 感じない

イ. 少し感じる

ウ. はっきり感じるが歩ける

エ. はっきり感じて歩きにくい

オ. 歩けない

その他 ()

(2) 静止したままで振動を

ア. 感じない

イ. 少し感じる

ウ. はっきり感じる

エ. はっきり感じて気分が悪い

オ. はっきり感じて耐えられない

その他 ()

*船酔いにかかりやすいか? ()

*静止時と歩行時では、どちらの方が振動をよく感じたか?

図-2 アンケート用紙 (試験1)



写真-1 試験風景 (試験1)

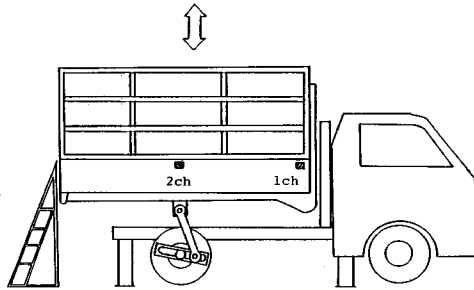


図-3 鉛直振動台装置

表-3 試験2の振動数および振幅

試験	振幅 (cm)	振動数 (Hz)
2 a (1)	1	0.2
(2)	1	0.4
(3)	1	0.6
(4)	1	0.8
(5)	1	1.0
2 b (1)	5	0.2
(2)	5	0.4
(3)	5	0.6
(4)	5	0.8
(5)	5	1.0
2 c (1)	10	0.2
(2)	10	0.4
(3)	10	0.6
(4)	10	0.8
(5)	10	1.0
(6)	10	1.25

数を図-5に示すようなサイクルタイム(20秒強制加振, 15秒停止)で上げていき, 被験者は手すりにつかまるか直立するか状態で振動を受け, その後の停止時(15秒間)で感想を記入する。そして次の振動数の試験が始まり同じように被験者は振動を受ける。試験2では, 特に低振動数領域において視覚により(目の前の景色が上下に動くことで)振動を感じる事がないように0.2 Hz, 0.4 Hzの振動では目を閉じた状態で試験を実施した。またそれ以上の振動数においても, なるべく遠くの方を見た状態で試験を受けるように指導した。試験風景

表-4 試験2の加速度レベルと速度レベル

加速度レベル (G)						
振動数(Hz)	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.25
振幅(m)						
0.01	0.002	0.006	0.015	0.026	0.040	
0.05	0.008	0.032	0.073	0.129	0.201	
0.10	0.016	0.065	0.145	0.258	0.403	0.629

速度レベル (m/s)						
振動数(Hz)	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.25
振幅(m)						
0.01	0.013	0.025	0.038	0.050	0.063	
0.05	0.063	0.126	0.188	0.251	0.314	
0.10	0.126	0.251	0.377	0.503	0.628	0.785

試験2-a

グループ () 年齢 () 名前 ()

(1) 1番目の振動の感想
 (2) 2番目の振動の感想
 (3) 3番目の振動の感想
 (4) 4番目の振動の感想
 (5) 5番目の振動の感想

ア. 感じない
 イ. 少し感じる
 ウ. はっきり感じる
 エ. はっきり感じて気分が悪い
 オ. はっきり感じて耐えられない
 その他 ()

図-4 アンケート用紙 (試験2)

を写真-2に示す。

3. 結果および考察

試験結果をもとに, 橋梁あるいは振動台装置による振動刺激と人間の応答感覚に対していくつかの解析を試みた。

(1) 姿勢による振動感覚の違い

試験1において, 橋梁上を歩行している状態と静止している状態では, どちらの方が振動を強く感じるかについて調査した。その結果を表-5(試験1-aの結果)に示す。この表によれば, 特に女性の場合, 静止時の方が歩行時よりも振動を強く感じる人が多いように思われる。男性の場合は静止時, 歩行時とも, 同程度の振動と感じると回答した人が多かった。よって, 振動感覚は, 静止状態の振動感覚から, 推定可能であると考えられる。

(2) 船酔現象に関する調査結果

被験者と船酔現象 (motion sickness) との関係を調査した結果が表-6である。この表から, 圧倒的に男性の方が女性に比べ, 船酔現象に対して強いことがわかり, この結果は ISO¹⁷⁾あるいは水平振動に対する後藤¹⁸⁾の研

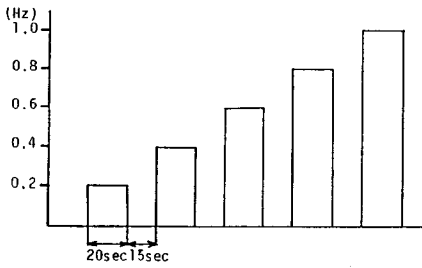
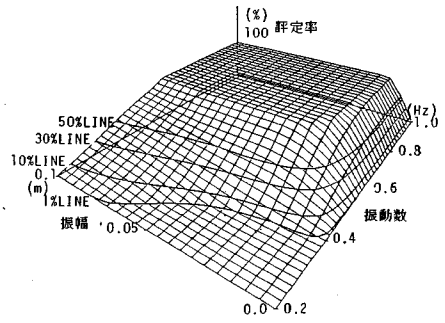


図-5 鉛直振動台装置運転図



(a) “はっきり感じる”に対する評定率の分布

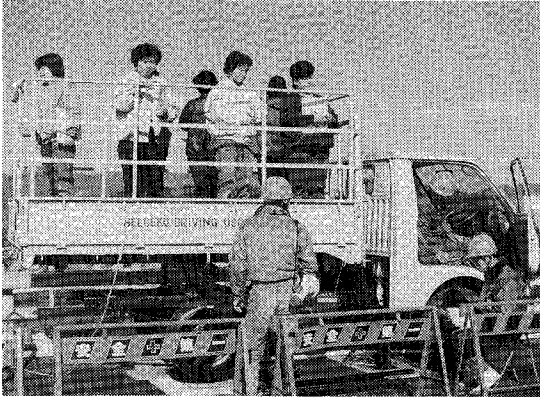
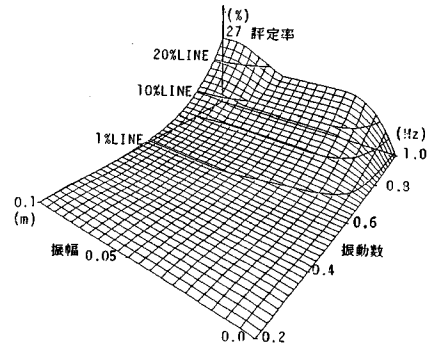


写真-2 試験風景 (試験2)



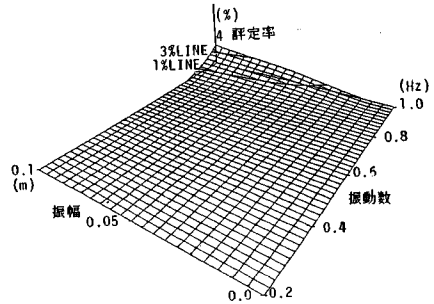
(b) “はっきり感じて気分が悪い”に対する評定率の分布

表-5 歩行時と静止時の振動の感じ方の比較

	歩行時の方が振動をよく感じる	静止時の方が振動をよく感じる	計
男	15	12	27
女	15	27	42
計	30	39	69

表-6 被験者の酔いに対する感想

年 齢	5~15		16~25		26~35		36~50		51~		小 計	計	
性 別	男	女	男	女	男	女	男	女	男	女	男	女	
酔いやすい	1	5	1	6	4	5	2	5	1	3	9	24	33
酔いにくい	11	3	4	4	7	5	7	2	8	4	37	18	55
普通である	0	3	1	0	0	0	1	3	0	3	2	9	11
小 計	12	11	6	10	11	10	10	10	9	10	48	51	
計	2	3	1	6	2	1	2	0	1	9			99



(c) “耐えられない”に対する評定率の分布

図-6

(3) 振動に対する評定率に関する検討

試験2の結果をもとに、各カテゴリーの評定率を3次元図で表現したものが図-6 (a)~(c)である。具体的手法としては x 軸に振動数、 y 軸に振幅をとり試験2の15個のデータ(振幅3ケース、振動数5ケース)を評定率 $z=f(x,y)$ としてプログラムに入力する。そして補間値を求めるプログラム(B-spline二次元補間式)を用いてデータ間の評定率を推定し、それらを結んでいくというものである。図中に示す等感覚点(評定率の等しい点)を結んだ等高線によりそれぞれのカテゴリーの閾値(気分が悪くなり始めるLine, 耐えられな

究とも一致している。

また、自分が船酔いにかかりやすいと答えた人が33人、かかりにくいと答えた人が55人いたが、これらの人たちの何割の人が試験2で「はっきり感じて気分が悪い」または「耐えられない」と答えたか調べてみた。その結果、船酔いにかかりやすい人については42.4%であるのに対して、船酔いにかかりにくい人は10.9%となっており、その人のもっている振動に対する本来の特性が影響してくるものと思われる。

くなる Line など)を知ることができる。図—6 (a) の「はっきり感じる」に対する評定率が、10%の等感覚曲線を用いて検討を行うと、振幅が1 cm 程度以下の振動の場合には、振幅による影響がかなり大きいものと思われる。また、図—6 (a) の「はっきり感じる」に対する評定率が10%の等感覚曲線から、振動数の範囲により、振動に対する人間感覚に影響を及ぼすパラメーターは異なるようである。0.4 Hz 程度以下の範囲においては等感覚曲線は振動数に依存しているようである。0.6 Hz 程度以上の範囲においては振幅に対する依存性が大きいように思われる。また、0.4~0.6 Hz の範囲においては両者の中間的な領域と思われ、速度や加速度を感じて反応しているようである。全体的な傾向としては、振動数が大きくなるにつれて、振動に対する人間感覚に影響を及ぼすパラメーターは振動数→加速度→速度→振幅のように変化している。

(4) 振動暴露時間の影響

実橋上での試験では暴露時間は2分30秒程度であったのに対し、振動台装置による試験では各ケース約20秒であり、振動暴露時間にかなり違いがみられることから、その影響について考慮する必要があるものと思われる。ISO¹⁹⁾では、低振動数領域においては、「たいへん不快 (severe discomfort)」の閾値を考えた場合、 $\dot{y}^2 t = m$ (\dot{y} : 加速度, t : 暴露時間, m : 定数) という関係が成り立つとしているが、本試験でも $\dot{y}^2 t$ の値を個々のケースに対して計算し、試験1と試験2の対応性を調べてみた。その結果、 $\dot{y}^2 t$ の値が試験1-a, 1-c, 1-d に比較的近いものとして、試験2-c の0.2 Hz, 1.0 Hz, 0.8 Hz の3ケースを選んだ(図—7)。この図より、試験1-a, 1-c, 1-d のように適合性の良いものもみられた。

試験1-b (振動数: 0.323 Hz, 振幅: 31.6 cm) の

$\dot{y}^2 t$ の値は2.65であり、この値は試験1-cの値3.34よりも小さい。それにもかかわらず、「気分の悪さ」を訴える人が、試験1-cよりも多く、全体の半数を超えている。これは、試験1-bが振幅31.8 cm という特殊な振動であることから、振動暴露時間以外の影響などの複雑なものがあると思われ、それらの影響の詳細に関しては異なる試験を実施することによって、明らかにしていく必要があるものと思われる。

(5) 実橋振動(静止時)と鉛直振動台の振動の比較

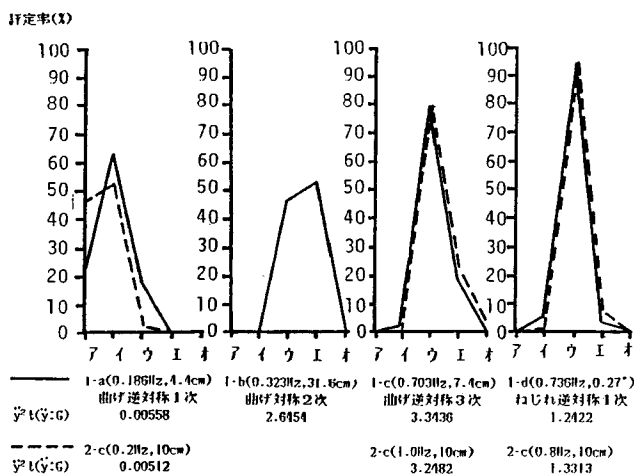
試験2は鉛直振動であり、歩行動作を含まないことから、試験1の静止時に対応するものと考え、実橋の振動(静止時)と鉛直振動台の振動の比較を行う。

試験1-a (振幅: 4.4 cm, 振動数: 0.186 Hz, 加速度: 0.006 G) と試験2-b (振幅: 5 cm, 振動数: 0.2 Hz, 加速度: 0.008 G) は比較的似た刺激であると思われるが、試験1-aで「少し感じる」が82%であるのに対し、試験2-bで「少し感じる」は41%とかなり少ない。また、「はっきり感じる」についても、試験1-aが18%であるのに対して、試験2-bは0%となっている。これは試験1-aが橋梁上の曲げ逆対称1次振動で、試験2-bとはほぼ同じ鉛直振動であることを考えると橋梁上の方がかなり敏感に振動を感じているようである。

試験1-bの振動(振幅: 31.6 cm, 振動数: 0.323 Hz, 加速度: 0.133 G) は被験者全員が振動を感じそのうち53%の人が気分の悪さを訴えている。試験1-cの振動は、試験2-b, 2-cに比べて気分の悪さを訴える人がかなり多く21%となっている。

また、試験1-cと試験1-dの振動数が比較的近い値をとるのに対し、試験1-cの方が「気分の悪さ」を訴える人が多い。

いずれも実橋上の振動の方が鉛直振動台装置の振動よ



図—7 試験1と試験2の対応

りも、強く感じる人が多いという結果を得た。この理由を考察する。

試験1は実橋上における試験であり、試験2は視覚の影響あるいは振動モードの影響を取り除いた試験であり、精神的な反応よりも、むしろ体感的な反応に着目していると考えられ、また試験1の方が比較的暴露時間が長いことから、試験1の方が試験2よりも許容レベルが低くなるのではないと思われる。また、船舶関係で低振動数の振動感覚調査を行った後藤²⁰⁾によれば実船の振動が振動台を用いた振動よりも不快感が強い理由について、実船の動揺の多軸性、振動台の振動が正弦振動であること、振動台試験の被験者は志望者であり、大動揺に暴露される覚悟があることなどを挙げている。同様に本試験においても、振動台を用いた試験では、「試験である以上は、ある程度の振動が生じて安全が保証されている」という先入観から、ある程度大きな振動にも耐えられるものと考えられる。これに対し、「橋は揺れない」という先入観のある人間が大振幅で振動する橋を目の前にすることで、不快感を増大させる効果があるものと思われる。

視覚の影響を考察した場合、試験2は振動台上で遠くの景色を見た状態における振動感覚であり、視覚的な影響は比較的少ない。一方、試験1では振動する実橋の上を歩行状態あるいは静止状態で振動を受け、たとえば試験1-bにおいて被験者は片振幅31.6 cmというきわめて大振幅の2次モードで振動する橋梁を見ることにより、かなり不安感や不快感をもつものと考えられる。また、試験1-cと試験1-dの振動数が比較的近い値をとるのに対し、試験1-cの方が「気分が悪さ」を訴える人が多い結果を得たが、これは鉛直振動する橋梁を橋軸方向に眼の前にした方が(試験1-c)、大きな振動を目前にすることから、橋軸直角方向のねじれ(試験1-d)よりも視覚的にかなり大きな揺れとして認識され、その結果として試験1-cの振動の方が試験1-dの振動よりも「気分が悪い」人が多くなっているものと思われる。

(6) 年齢・性別の違いが振動感覚に与える影響

集計結果によれば、歩行時と静止時の振動感覚および船酔に対する特性には(1)、(2)において指摘したように、性別による違いが現われているようである。しかし、鉛直振動台の振動に対しては、人間感覚に対して性別・年齢が及ぼす影響には特に顕著な傾向はみられないようである。これは後藤²¹⁾らの行った水平振動に対する結果(男性よりも女性の方が年長者よりも青少年の方が振動に敏感である)と異なっている。

4. 他の研究成果および振動基準と本研究結果との比較

他の研究成果として報告されている等感覚曲線、振動基準および本試験結果を図—8(a)、(b)に示す。

図—8(a)は縦軸に最大加速度(G)、横軸に振動数を、図—8(b)は縦軸に最大振幅(m)、横軸に振動数をとっている。また、図中の実線は許容限界曲線を点線は知覚限界曲線を示し、○は振動台のデータであることを、□は大島大橋の振動試験データであることを示している。

1, 2, 3はISO 2631補遺案²²⁾で示された0.1~0.63 Hzの振動数範囲における鉛直振動に対する許容基準である。主としてO'hanlon & McCauleyら²³⁾の研究をもとにしており、成人健康男子の10%が動揺病にかかるレベルである。ISO補遺案は船旅に不慣れた旅客に対するもので、慣れの程度あるいは女性に対しては増減をすることが考えられている。

4, 5, 6はISO 2631²⁴⁾の1~80 Hzの鉛直振動に対し、陸上の乗り物、航空機、船舶、建物までも対象とした振動基準である。

7, 8は造船協会²⁵⁾が提案した許容基準であり、「振動を強く感じ、長時間で不快となり、やっと我慢できる」を許容基準として採用している。

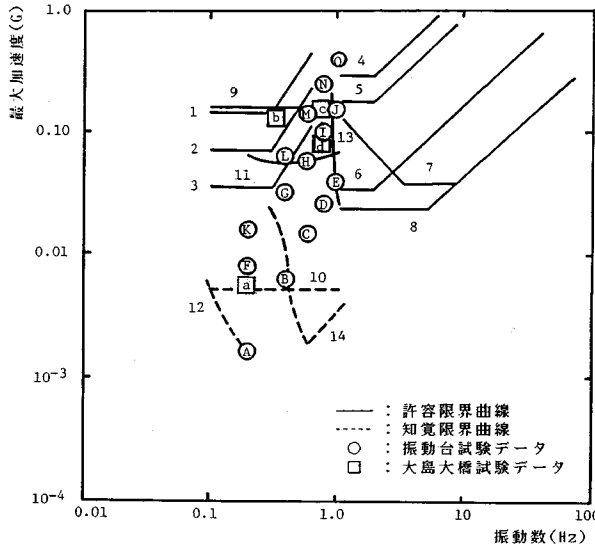
9, 10はMelaragno²⁶⁾の研究による建築構造物の水平振動に関する基準である。Melaragnoは各振動レベルに応じて一律に加速度で基準を提案している。知覚限界、許容限界基準は0.005 g, 0.15 gである。

11, 12は後藤の研究²⁷⁾による水平振動に対する知覚限界および許容限界の平均基準曲線である。対象とする振動は振動数:0.1~1 Hz片振幅:1~50 cmの正弦波水平振動としている。また、後藤は被験者に及ぼす影響をさまざまな実験条件を通して検討し、「性別の違いでは男性よりも女性が、年齢の違いでは年長者よりも若年者が、振動の方向では左右方向よりも前後方向の振動の方が、また姿勢の違いでは立位、腰掛位、座位の順に振動に敏感である」という結果を報告している。

13, 14は本研究で得られた知覚限界曲線(「はっきり感じる」人が10%のときの等感覚曲線を採用)および許容限界曲線(「はっきり感じて気分が悪い」人が10%のときの等感覚曲線を採用)であり、詳細は前章までで説明されている。

図—8(a)より、加速度を基準とした振動基準では各基準間に隔たりがある。この理由としては振動感覚は必ずしも加速度に反応するわけではなく、振動の感じ方に周波数特性があることによると考えられる。

図—8(b)より、振動数と振幅で表現した場合には本研究の限界曲線も全体的には大差ないものと考えられ

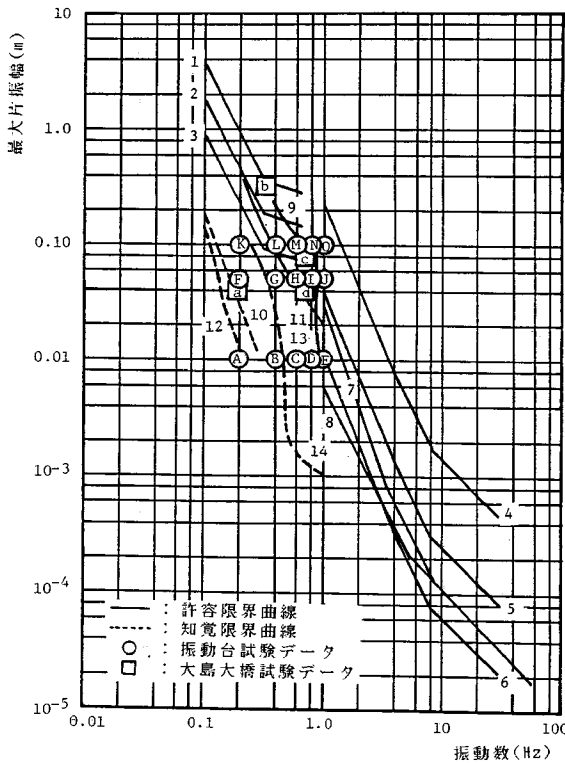


(a) 最大加速度-振動数

- 1 ISO2631・許容限界 鉛直振動(0.1~0.63Hz) 30 min
- 2 ISO2631・許容限界 鉛直振動(0.1~0.63Hz) 2 hour
- 3 ISO2631・許容限界 鉛直振動(0.1~0.63Hz) 8 hour
- 4 ISO2631・許容限界 鉛直振動(1.0Hz~80Hz) 1 min
- 5 ISO2631・許容限界 鉛直振動(1.0Hz~80Hz) 30 min
- 6 ISO2631・許容限界 鉛直振動(1.0Hz~80Hz) 8 hour
- 7 造船協会・許容限界 鉛直振動
- 8 造船協会・許容限界 水平振動
- 9 Melaragno・許容限界 水平振動
- 10 Melaragno・知覚限界 水平振動
- 11 後藤・許容限界 水平振動
- 12 後藤・知覚限界 水平振動
- 13 本研究・許容限界 鉛直振動
- 14 本研究・知覚限界 鉛直振動

点	知覚	許容	点	知覚	許容	点	知覚	許容
a	18	0	A	0	0	I	97	5
b	100	53	B	6	0	J	97	15
c	100	21	C	66	0	K	2	0
d	95	2	D	95	4	L	52	0
			E	96	12	M	96	1
			F	0	0	N	99	7
			G	24	0	O	100	27
			H	94	1			

知覚：はっきり感じる
許容：はっきり感じ気分が悪い



(b) 最大振幅-振動数

- 1 ISO2631・許容限界 鉛直振動(0.1~0.63Hz) 30 min
- 2 ISO2631・許容限界 鉛直振動(0.1~0.63Hz) 2 hour
- 3 ISO2631・許容限界 鉛直振動(0.1~0.63Hz) 8 hour
- 4 ISO2631・許容限界 鉛直振動(1.0Hz~80Hz) 1 min
- 5 ISO2631・許容限界 鉛直振動(1.0Hz~80Hz) 30 min
- 6 ISO2631・許容限界 鉛直振動(1.0Hz~80Hz) 8 hour
- 7 造船協会・許容限界 鉛直振動
- 8 造船協会・許容限界 水平振動
- 9 Melaragno・許容限界 水平振動
- 10 Melaragno・知覚限界 水平振動
- 11 後藤・許容限界 水平振動
- 12 後藤・知覚限界 水平振動
- 13 本研究・許容限界 鉛直振動(0.2Hz~1.0Hz) 20 sec
- 14 本研究・許容限界 鉛直振動(0.2Hz~1.0Hz) 20 sec

点	知覚	許容	点	知覚	許容	点	知覚	許容
a	18	0	A	0	0	I	97	5
b	100	53	B	6	0	J	97	15
c	100	21	C	66	0	K	2	0
d	95	2	D	95	4	L	52	0
			E	96	12	M	96	1
			F	0	0	N	99	7
			G	24	0	O	100	27
			H	94	1			

知覚：はっきり感じる
許容：はっきり感じ気分が悪い

図-8 許容限界および知覚限界

る。1 Hz 付近では各基準間にギャップがあり、必ずしも連続的とはいえ、1 Hz 付近で振動感覚は、かなりセンシティブに変化するようである。本研究では、このセンシティブな帯域について、かなり大人数のモニタリングによっており、このことから、得られた結果はこの振動帯域の人間感覚評価に大いに役立つものと考えられる。

5. 橋梁の使用性についての検討

本試験結果をもとにして使用性の面から橋梁の設計を検討した場合、本試験例をもとにして作成された図—9 (a), (b) のような図を利用すると便利であろう。この図—9 (a), (b) は縦軸に振幅、横軸に振動数を取り、被験者全体の 1%, 10% の人が「はっきり感じる」「はっきり感じて気分が悪い」「耐えられない」と回答した範囲を示したものであり、たとえば橋梁の渦励振応答に対する使用性の視点からの評価に有用な資料となり得るものと考えられる。

図—9 (a), (b) では全体の 1%, 10% の人が感じるレベルについて示しているが、設計の際に注意しなければならないことは、実際に全体の何% の人を対象として使用性の検討を行うのかという問題である。また、どの程度の振動に対する人間感覚レベルを採用するのか

という問題もある。たとえば前出の ISO 2631 では健康な成年男子の 10% が動揺病にかかるレベルを採用している。

試験 1-a のように、振動数が 0.2 Hz 以下で振幅 5 cm 以下のように比較的ゆるやかであると思われる振動であっても、少しでも振動を感じる人は 82% にも達する。したがって、使用性の面から設計を考える場合、知覚限界振動を対象とするよりも許容限界振動を対象とした設計を行う方が望ましいものと思われる。仮に歩行者が精神的な面で不快の念をもつ振動、あるいは体力的、生理的に歩くことが困難になる振動というものが発生する場合であっても、絶対に起こることが許されないというのではなく、そのような振動の発生がごくまれな場合には構造力学的な限界以下のレベルであれば、そのような振動でも許容されるべきものであろう。たとえば、風による橋梁の振動が許容レベルをまれに超える場合には、その場合に限り、歩行者規制という形で対応が可能である。しかし、許容レベルを超える振動が頻繁に発生する場合には振動そのものを低減させるための何らかの対策をとる必要がある。

6. 結 論

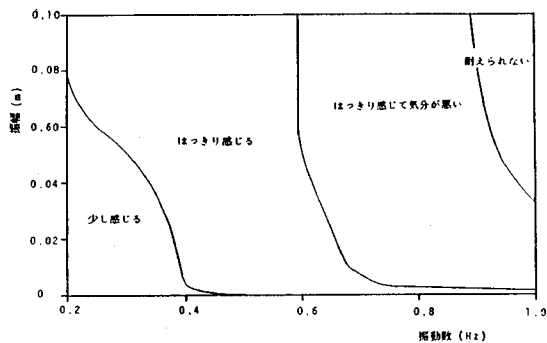
長大橋梁である大島大橋および振動台における振動試験例をもとにして、長大橋梁上の振動に対する人間感覚について検討を試みた。以下にその結論を示す。

(1) 女性の場合、静止状態の方が、歩行状態よりも振動を強く感じると回答した人が多くみられた。男性の場合、女性ほど強い傾向はみられなかった。この結果、歩行時の振動感覚は静止時の振動感覚を用いることにより、ある程度の推定が可能である。

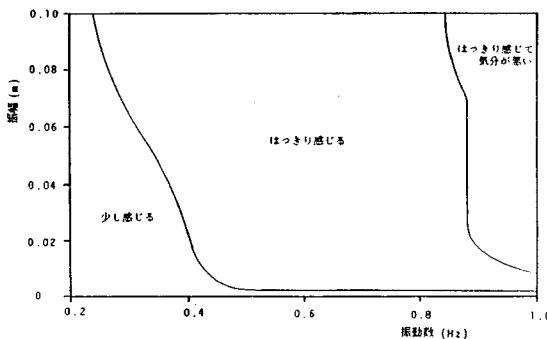
(2) 男性の方が女性よりも船酔現象に対して強いことが確認され、これは ISO の報告とも一致している。

(3) 今回の振動試験範囲（振動数：0.2~1.0 Hz、振幅：1~10 cm）では、振動数の範囲に応じて振動に対する人間感覚に影響を及ぼすパラメーターに違いがみられる。本試験例における「はっきり感じる」の評定率が 10% である等感覚曲線を参考とした場合、全体的な傾向としては、振動数が大きくなるにつれて、振動に対する人間感覚に影響を及ぼすパラメーターは振動数→加速度→速度→振幅のように変化しているようである。

(4) 試験 1 と試験 2 の振動に対する人間感覚に、かなり違いがみられた。これは振動数・振幅以外の要因として、振動暴露時間による影響があるものと思われる。しかし、試験 1-b のようにきわめて大振幅の場合には、その要因はかなり複雑であり、今後の課題として、さらに異なる視点からの試験を実施することにより、それらの複雑な要因を明らかにしていかなければならないと思



(a) 1%



(b) 10%

図—9 試験 2 より得られた等感覚線図

われる。

(5) 今回の試験結果によれば、鉛直振動に対して性別・年齢が振動に対する人間感覚に及ぼす影響に特に顕著な影響はみられなかった。

(6) 他の研究と比較を行った場合、振動数と振幅の関係でとらえた方が全体的な傾向で一致をみるようである。加速度-振動数図上で比較した場合、各基準間にも隔たりが存在するが、これは振動の感じ方に周波数特性があることによるものと考えられる。

謝 辞：最後に、本研究を行うにあたり多大なるご協力をいただいた京都大学工学部助手 白土博通氏、熊谷組 泉 千年氏、四国電力 築山有二氏および京都大学工学部橋梁工学研究室の関係諸氏に対し、深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) Reiher, H. und Meister, F. J. : Die Empfindlichkeit des Menschen gegen Erschütterungen, Forsch. auf dem Gebiete des Ingenieurwesens, Vol. 2, No. 11, pp. 381~386, 1931.
- 2) 日本造船協会船体構造委員会船体振動許容限界小委員会：船体振動許容限界の提案，造船協会誌，Vol. 362，pp. 1~15，1959. 11.
- 3) ISO 4867 Code for the measurement and reporting of shipboard vibration data, 1984. 12.
- 4) 藤井 忍・小黒英男：騒音と振動に対する乗組員の反応に関する研究，船舶技術研究所報告，Vol. 15, No. 4, 1978. 7.
- 5) Helberg, W. und Sperling, E. : Verfahren zur Beurteilung der Laufeigenschaften von Eisenbahnwagen, Organ für die Fortschritte des Eisenbahnwesens, No. 96, Jahrg. Heft 12, pp. 177~181, 1941.
- 6) Janeway, R. N. : Passenger Vibration Limits, S. A. E. Journal, Vol. 63, pp. 48~49, 1948.
- 7) Hansen, R. J., Reed, J. W. and Vanmarcke, E. H. : Human Response to Wind-Induced Motion of Buildings, ASCE, ST 7, pp. 1589~1605, July 1973.
- 8) Wiss, J. W. and Parmelee, R. A. : Human perception of transient vibrations, ASCE Journal of the Structural division, Vol. 100, ST 4, pp. 773~787, April 1974.
- 9) Chan, F. K. : Human Response to Motions in Tall Buildings, ASCE Journal of the Structural division, Vol. 99, ST 6, June 1973.
- 10) Chen, P. W. and Robertson, L. E. : Human Perception of Horizontal Motion, ASCE Journal of the Structural division, Vol. 98, ST 8, pp. 1681~1695, August 1972.
- 11) Melaragno, M. G. : Wind in Architectural and Environmental Design, von Nostrand Reinhold Company, 1982.
- 12) 後藤剛史：居住性に観点を置いた高層建築物に生じる振動の評価に関する研究，日本建築学会論文報告集，No. 237，pp. 109~119，1972. 11.
- 13) 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，No. 222，pp. 15~23，1974. 2.
- 14) 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，No. 230，pp. 183~191，1974. 10.
- 15) 梶川康男・河島良秀・小間井孝吉・沢田寛幸：斜張橋形式歩道橋「雪吊橋」の振動実験，橋梁と基礎，pp. 8~14，1986. 9.
- 16) 西脇威夫：歩道橋における振動感覚の数量化と設計への応用，土木学会論文報告集，No. 257，pp. 1~12，1977.
- 17) ISO 2631 : Guide for the evaluation on human exposure to Whole-Body Vibration, 1974.
- 18) 12) に同じ
- 19) International Standard ISO 2631-1978/Addendum 2 : Guide for the evaluation of human exposure to whole-body vibration, 1982. 5.
- 20) 後藤大三：人体応答よりみた振動限界，日本造船学会誌，No. 583，pp. 10~21，1978. 1.
- 21) 12) に同じ
- 22) International Standard ISO 2631-1978/Addendum 2 : Guide for the evaluation of human exposure to whole-body vibration, 1982. 5.
- 23) O'hlanon, J. F. and McCauley, M. E. : Motion Sickness Incidence as a Function of the Frequency and Acceleration of Vertical Sinusoidal Motion, Aerospace Medicine, 1974. 4.
- 24) ISO 2631 : Guide for the evaluation on human exposure to Whole-Body Vibration, 1977.
- 25) 2) に同じ
- 26) 11) に同じ
- 27) 12) に同じ

(1988. 8. 3・受付)