

浮体橋の振動使用性

VIBRATION SERVICEABILITY OF FLOATING BRIDGE

川谷充郎*, 丸山忠明**, 川村幸男***, 岸本俊雄****, 三輪宜弘*****

Mitsuo KAWATANI, Tadaaki MARUYAMA, Yukio KAWAMURA, Toshio KISHIMOTO and Yoshihiro MIWA

* 工博	大阪大学助教授 工学部土木工学科	(〒565 吹田市山田丘 2-1)
**	大阪市建設局土木部橋梁課課長代理	(〒530 大阪市北区梅田 1-2-2-500)
***	大阪市建設局土木部橋梁課第2設計係長	(〒530 大阪市北区梅田 1-2-2-500)
****	日本技術開発(株)大阪支社構造部部長	(〒531 大阪市北区豊崎 5-6-10)
*****	大阪大学大学院工学研究科前期課程土木工学専攻	(〒565 吹田市山田丘 2-1)

In Osaka a new project of a floating bridge has been progressed to connect artificial islands, Yumeshima and Maishima. Floating bridges are economical and effective in deep lake or sea, or on poor subsoil. Floating bridges are apt to heave up and down due to changes of tide and to be swayed by waves and wind. The displacement due to moving vehicles is larger than that of fixed bridges. Consequently moving vehicles are easy to vibrate, so vibration serviceability of the floating bridge has to be examined.

Dynamic response of moving vehicles on the floating bridge is analyzed. Furthermore, the questionnaire about riding comfort is conducted on long-span bridges and viaduct bridges in urban expressway, together with measuring acceleration of moving vehicle. Vibration serviceability of the floating bridge is examined from a viewpoint of riding comfort of moving vehicle.

Key Words: floating bridge, moving vehicle, riding comfort, vibration serviceability

1. まえがき

大阪市では、臨海部が 21 世紀の大阪の新都心として機能するよう、「テクノポート大阪」計画をはじめとした様々なウォーターフロント開発を推進している。その拠点となっている臨海部の埋め立て地である夢洲と舞洲を結ぶため、夢洲～舞洲連絡橋（仮称）を計画している。

夢洲と舞洲の間は緊急航路に指定され、事故などで近くの主航路が閉鎖された場合は大型船が迂回してくる。このとき、固定橋だと水面からの高さが 50 m 以上必要になり、取付橋梁部が長くなるなどで建設費がかさむ。一般的に、浮体橋は水深が深く、地盤が軟弱なところで有効であり、例えば、米国のシアトルに近いワシントン湖のような場所では、浮橋の建設費は通常の橋やトンネルに比べて経済的になると言われている¹⁾。このような実情をふまえて、本橋においても、数種の可動橋を検討した結果、経済性、メンテナンスコストおよび埋立地特有の地盤変形に対する配慮から、浮体橋方式を採用する。

本橋は兩岸の固定部分を含めて橋長 940m、幅 39m、水面からの高さは 24 m の浮体式旋回可動橋で、千トン以下の船はそのまま航行できる。2 つの台船が長さ 410m、6 車線の浮体橋部分を支え、大型船が通る際はドアが開くよ

うに、橋の片側をタグボートで押して航路を確保する。本橋の側面図を Fig.1 に示す。

浮体橋は、同規模の固定橋と比べて次のような相違がある。a) 潮位変動により緩衝桁部の路面の縦断勾配が変化する。b) 風や波浪による浮体橋の動揺により緩衝桁～浮体橋～緩衝桁部の路面の縦断勾配および横断勾配等が変化する。c) 活荷重載荷によるポンツーンの吃水変化により緩衝桁～浮体橋～緩衝桁部の路面の縦断勾配および横断勾配が変化する。以上のことから、本浮体橋を走行する車両の乗り心地の観点から、利用者に不快感を与えないことの検討を行う必要がある。

自動車の大規模橋梁走行時の乗り心地に関する基準等は特に定められていないので、本浮体橋を走行する自動車の乗り心地等に関する検討は下記の手順によって行う。① 潮位変動、風や波浪による動揺、活荷重によるたわみおよび路面凹凸を考慮して走行車両の動的応答シミュレーションを実施し、自動車の振動加速度を算出する。② 橋梁等に自動車を走らせ、車上の振動計測と自動車の乗り心地調査を行う。③ ①において算出した本浮体橋上の車上の振動加速度の推定値と②における車両振動加速度と乗り心地の感覚反応値との相関結果から、本橋の振動使用性を総合的に評価する。

2. 動的応答シミュレーション

本浮体橋は、前述のように同規模の固定橋と比べて特異点があり、それが走行車両の車上振動鉛直加速度にどのような影響を与えるかを検討するため、浮体橋上走行車両の動

的応答解析を行う。

自動車の乗り心地に関しては、自動車のピッチングの影響が大きく、ピッチングの発生と継ぎ目目地通過時の加速度、いわゆる「目地ショック」が同時に発生することが多い。このことは、目地通過時の最大加速度が乗り心地に大

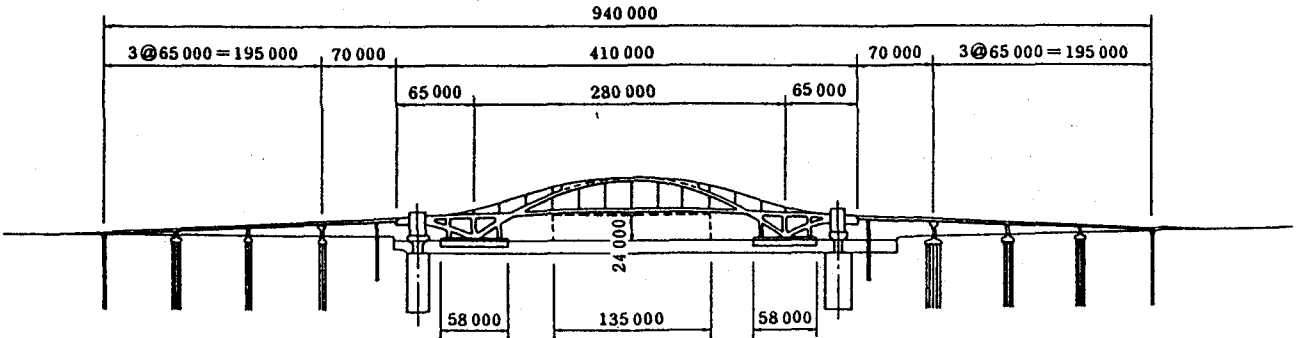


Fig.1 General view of floating bridge

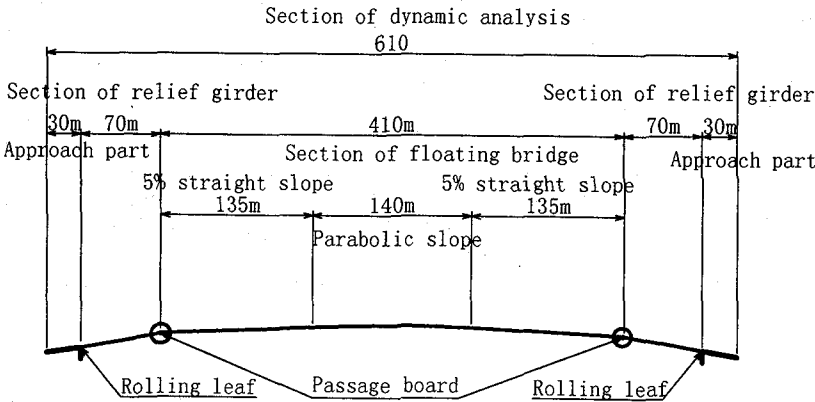


Fig.2 Floating bridge model

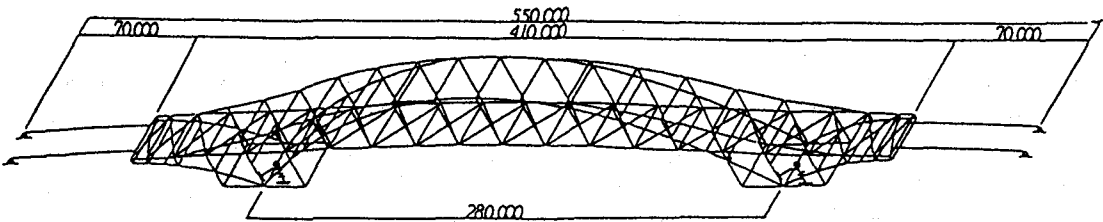


Fig.3 3-dimensional analytical model of floating bridge

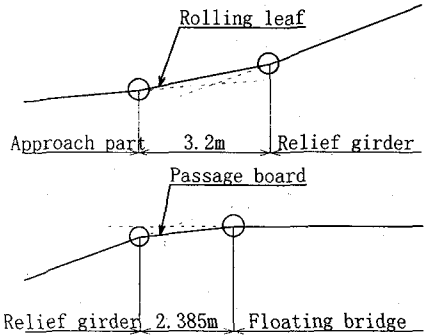


Fig.4 Expansion joint model

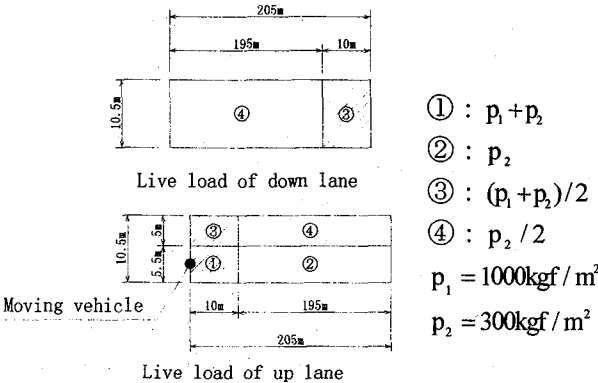


Fig.5 Moving live load model

大きく影響されるものと推測される。また、乗り心地との関連で自動車前部における床の鉛直加速度に着目していることを参考に²⁾、ここでも主にその加速度に着目する。

2.1 解析方針

走行車両の動的応答に路面凹凸状態の影響が大きいいため、車両の鉛直加速度の算出は次の2段階に分けて行う。まず、路面の凹凸を考慮せずに、路面の縦断勾配（潮位変動を含む）、橋体の風と波浪による動揺、活荷重によるたわみを考慮してシミュレーション解析を行い、次に路面の凹凸を考慮して同様の解析を行う。

2.2 解析条件

(1) 橋梁モデル

緩衝桁～浮体橋～緩衝桁の550mに両端の取り付け部30mずつ加え、全長610mとし、片側3車線10.5mの上り線、下り線のある橋桁を想定する(Fig.2参照)。Fig.3に示すように、浮体としてのばね定数を考慮して、これを立体骨組系モデル化する。

伸縮継手（パッセージボード、ローリングリーフ）はFig.4に示すようにヒンジ結合としてモデル化する。

(2) 活荷重と着目車両モデル

走行シミュレーションに使用する活荷重は、道路橋示方書(平成6年)のL活荷重（B活荷重、L>130m）に基づき³⁾、Fig.5に示すようなものとする。主載荷荷重の位置を上り線の外側幅5.5mとし、残りをすべて従載荷荷重とする。上り線と下り線にそれぞれ幅10.5m、長さ205mの等分布荷重を載荷する。着目車両位置を主載荷荷重の先端中央部に設ける。

着目車両はFig.6に示すように2軸系でモデル化し、タイヤおよび懸架系のばねと減衰係数を考慮して、車両本体の上下変位および回転変位から、車両の鉛直加速度を算出する。車両の構造諸元をTable 1に掲げる。

(3) 橋上路面凹凸の設定

竣工当初の路面および竣工後の路面の損傷の程度を設定して、走行車両のシミュレーション解析を行う。

路面凹凸スペクトルを次式によりモデル化する^{4),5)}。

$$Sr(\Omega) = \frac{\alpha}{\Omega^n + \beta^n}$$

ここに、 $Sr(\Omega)$ ：路面凹凸スペクトル

Ω ：路面周波数

α ：路面の平坦性を表す平滑度パラメータ

n ：周波数によるパワーの分布を示す指数

β ： Ω が0のとき、 $Sr(\Omega)$ が無限大に発散しないための分布形状パラメータ

① 竣工当初の路面凹凸として、名神高速道路の完成直後の野洲川橋において測定された路面凹凸スペクトルを使用することにする⁵⁾。各パラメータ値は、 $\alpha = 0.001\text{cm}^2/(\text{m}/\text{c})$ 、 $\beta = 0.05\text{c}/\text{m}$ 、 $n = 2.0$ とする。

② 竣工後の路面の損傷が進んだ状態として、阪神高速道路の実測データに基づいた路面凹凸スペクトルを使用することにする⁴⁾。各パラメータ値は、 $\alpha = 0.003\text{cm}^2/(\text{m}/\text{c})$ 、 $\beta = 0.01\text{c}/\text{m}$ 、 $n = 2.0$ とする。

(4) 車両走行状態の設定

伸縮継手の上に活荷重が来るとき、最も走行条件が悪くなると予想される（最大たわみ発生）。最も悪条件における車両の鉛直加速度を求めるため、先の上り線の活荷重が発進してから、下り線の活荷重を出発させ、上りと下りの活荷重列の先頭が伸縮継手の上ですれ違うようにする(Fig.2参照)。このときの走行速度は設計速度の60km/hとする。

2.3 解析方法

(1) 浮体橋の動的変位

まず、浮体橋の動的変位を次のようにして求める。風と波浪による浮体橋の動揺値は、風速 $V_{10}=10\text{m}/\text{sec}$ の動揺シミュレーション値を使用する。この際、浮体橋を剛体として、その重心点の変位が計算されているため、着目車両位置での動揺値を算出する。なお、緩衝桁部に着目車両が位置するときの動揺値は浮体橋橋端部のヒープ値から、着目車両位置での動揺値を算出している。さらに、立体骨組系モデル(Fig.3参照)に活荷重列(Fig.5参照)を移動載荷し、着目車両位置での橋体の静的弾性たわみ（浮体としてのトリム、ヒールを含む）を算出する。そして、これらの和を

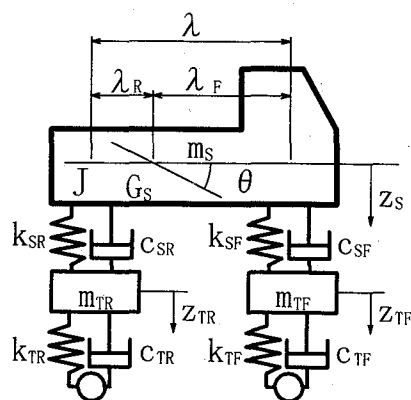


Fig.6 Model vehicle

Table 1 Structural properties of model vehicle

m_s	1,835.5kgf.s ² /m
J	6,100.0 kgf.s ² /m
λ_R	1.50m
λ_F	2.50m
k_{SR}	480,000kgf/m
k_{SF}	120,000kgf/m
C_{SR}	2,000 kgf.s/m
C_{SF}	500 kgf.s/m
m_{TR}	163.1 kgf.s ² /m
m_{TF}	40.8 kgf.s ² /m
k_{TR}	960,000 kgf/m
k_{TF}	240,000 kgf/m
C_{TR}	2,400 kgf.s/m
C_{TF}	600 kgf.s/m

浮体橋の動的変位とする。

(2) 車両の動的応答

次に、着目車両の動的応答を求める。着目車両の位置での浮体橋の動的変位を強制変位の形で入力して車両の応答を求め、運転席にほぼ近いと考えられる前軸直上の鉛直加速度を算出する。この際、数値積分は Runge-Kutte 法による直積積分法を用いる。この解析では、車両の上下動やピッチングの固有周期が 0.5 秒程度であるので、時間刻み幅 Δt を 0.05 秒とする。また、解析時間は、上り荷重列が緩衝桁～浮体橋～緩衝桁を通過するのに必要な時間 33 秒であり、これを 1 サイクルとする。動揺シミュレーションが 30 分間で計算されているため、30 分 $\times$ 60/33=54 サイクルの繰り返し計算を行う。

2.4 車両走行シミュレーション結果

(1) 路面凹凸を考慮しないケース

伸縮継手部の潮位による角折れの影響をみるため、平均水面(M.S.L. DL+0.95m)、朔望平均干潮位(L.W.L. DL+0.05m)、朔望平均満潮位(H.W.L. DL+1.70m)三つの状態について計算を行う。この 3 ケースについて、それぞれの 54 サイクルの動的応答解析のうちで車両の加速度が最大となった応答波形を Fig.7 に順に示す。伸縮継手を車両が通過するときに加速度が最大となり、その後、振動が減衰している。鉛直加速度両振幅の最大値は順に 2.195 m/s²、4.220 m/s²、3.442m/s²となっており、干潮位、満潮位、平均潮位の順に走行状態が悪くなっていることが分かる。次の路面凹凸を考

慮して解析を行う際は、最も走行状態が悪かった干潮位と最も良かった平均潮位について計算を行うこととする。

車両走行シミュレーションに使用した動揺のデータ数として不足がないかどうかの検証を行うため、平均水面時(M.S.L.)の最大加速度(標本数 54)の分布を照査する。その結果を Fig.8 に示す。おおむね正規分布になっており、動揺データ数としてはほぼ妥当と考えられる。

(2) 路面凹凸を考慮する場合

干潮位について路面凹凸スペクトルの種類の違う 2 ケースの応答波形を Fig.9 に示す。継手部通過時に振幅が大きくなり、さらに通過後も振動が継続し、その振幅が路面凹凸の程度に依存していることが確認できる。平均潮位についても計算を行い、各計算ケースごとの鉛直加速度両振幅の最大値および 0.1g(0.98m/s²)以上の平均値を求める。この結果を Table 2 に掲げる。このうち竣工当初の凹凸スペクトルと路面損傷がある凹凸スペクトルでの干潮位と平均潮位のそれぞれの項目の最大値を本浮体橋の走行状態として採用する。

3. 乗り心地調査

3.1 測定調査概要

(1) 自動車振動測定

大阪市内の長大橋、都市内高速道路高架橋および一般道路(14 地点)を走行速度 30km/h～65km/h で走行する自動車(大型バス、52 人乗り、三菱 P-MS729S)の振動加

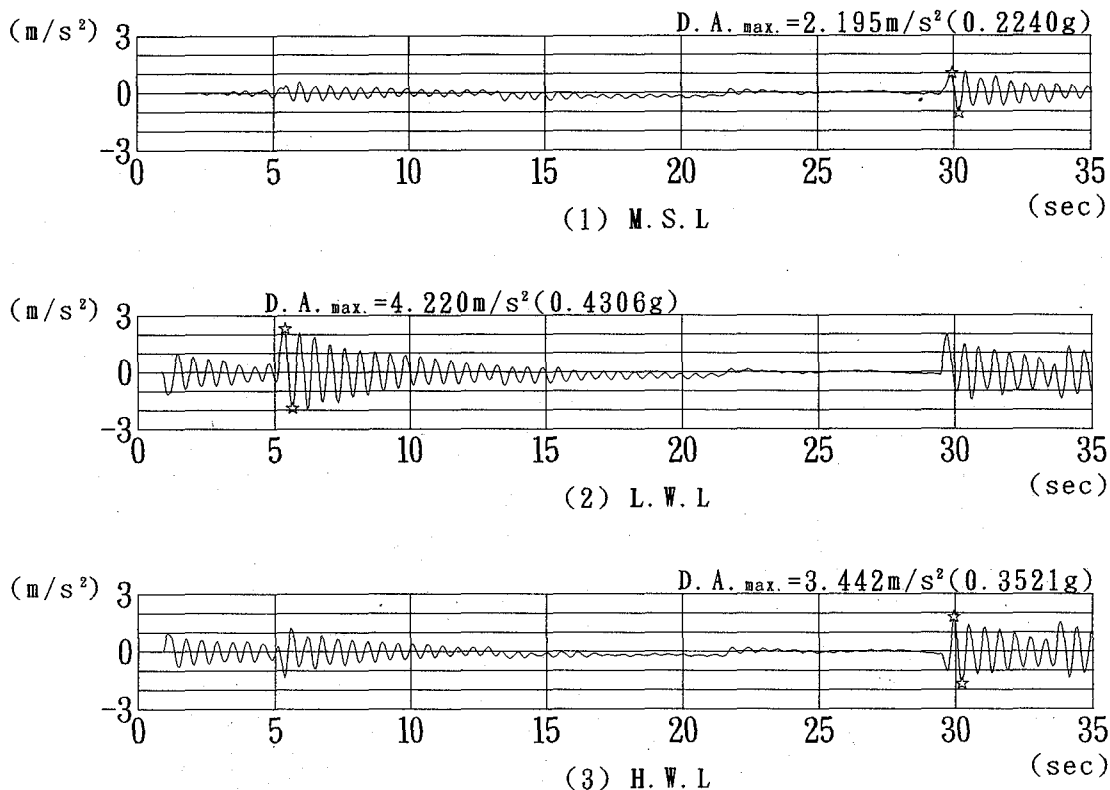


Fig.7 Acceleration of moving vehicle (without road roughness)

速度を前輪と後輪位置の車内床上で測定する。車内の座席配置図を Fig.10 に示す。加速度測定位置は座席番号 1 と 33 である。加速度の測定は、乗り心地に最も影響する方向として鉛直方向とする²⁾。

(2) 自動車乗り心地アンケート調査

自動車の乗り心地のアンケート調査の選択肢を次に示すように 5 段階に分け、乗り心地の良い方から悪い方に 1 から 5 までの番号を割り振り、数量化する。

〈感覚反応値の番号〉

- 乗り心地として問題ない
- 1 : 特異な振動を感じない。
- 2 : 多少の振動を感じるが、特に問題ない程度である。
- 乗り心地として問題がある
- 3 : 明らかに特異な振動を感じる。
- 4 : かなりの振動を感じ、少し不快である。
- 5 : 振動が非常に大きく、不快感、不安感を感じる。

アンケート対象者は次に示す 36 名である。

学生	22 名 (女性 1 名)	平均年齢	23.4 歳
社会人	14 名	平均年齢	44.6 歳
計	36 名	平均年齢	31.6 歳

学生は、土木工学科の学部生、大学院生および留学生であり、社会人は橋梁設計に携わる技術者である。女性は少ないが、自動車乗り心地の感覚に関しては一般市民とさほど差異は無いと考える。

乗り心地感覚に座席位置の影響が予想されるため、測定の前半と後半では、アンケート対象者の座席を大幅に変更する。

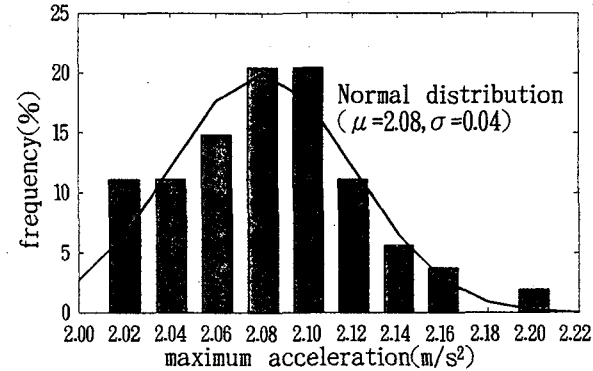
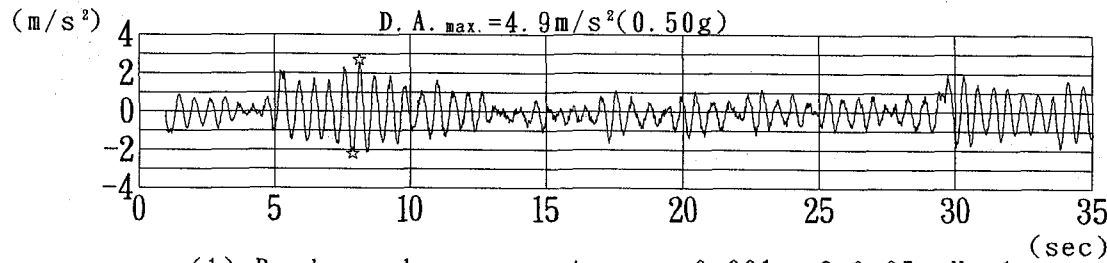
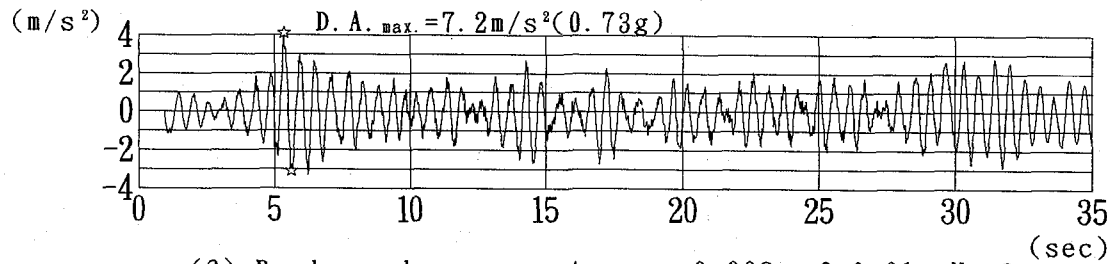


Fig.8 Histogram of max. acceleration of moving vehicle



(1) Road roughness spectrum $\alpha=0.001$, $\beta=0.05$, No.1



(2) Road roughness spectrum $\alpha=0.003$, $\beta=0.01$, No.3

Fig.9 Acceleration of moving vehicle (tide: L.W.L, with road roughness)

Table 2 Result of Dynamic response of moving vehicle

Case No.	Road roughness spectrum	Road roughness sample No.	Tide level	D.A.max(g)	D.A.mean(g)
1	$\alpha=0.001$, $\beta=0.05$, $n=2.0$	1	M.S.L.	0.31(3.0m/s²)	0.18(1.8m/s²)
2		1	L.W.L.	0.50(4.9m/s²)	0.23(2.3m/s²)
3		2	M.S.L.	0.36(3.5m/s²)	0.19(1.9m/s²)
4		2	L.W.L.	0.56(5.5m/s²)	0.26(2.5m/s²)
5	$\alpha=0.003$, $\beta=0.01$, $n=2.0$	3	M.S.L.	0.52(5.1m/s²)	0.30(2.9m/s²)
6		3	L.W.L.	0.73(7.2m/s²)	0.33(3.2m/s²)
7		4	M.S.L.	0.52(5.1m/s²)	0.31(3.0m/s²)
8		4	L.W.L.	0.76(7.4m/s²)	0.32(3.1 m/s²)

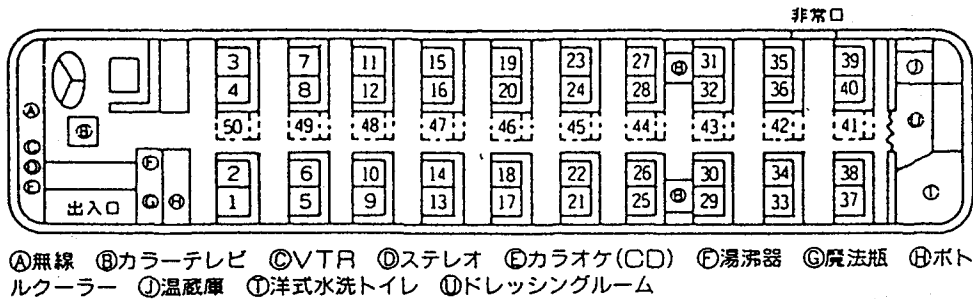
3. 2 測定調査結果

(1) 自動車振動加速度

アンケート調査を行った内、乗り心地感覚の平均値が最大を示す南港大橋の前輪位置の床上振動加速度の波形を

Fig.11 に例として示す。

測定した加速度を次の3通りの方法で評価する。乗り心地に関しては、自動車のピッチングの影響が大きいことより、最大両振幅鉛直加速度 (D.A.max.) を求める。不規則



な路面凹凸上を走行する自動車のピッチングは不規則振動となり、その定量的な評価はR.M.S.を用いるのが通常である。そこで、Fig.11 で示す南港大橋における前輪の加速度のスペクトルを算出し(Fig.12 参照)、これよりR.M.S.を求める。一般に振動数が1~2Hz のばね上振動、10~15Hz のばね下振動による車体の弾性振動が現れるとされているが⁶⁾、Fig.12 から同様の傾向が認められる。さらに、0.1g 以上の両振幅加速度の平均値 (D.A.mean) も求める。

上記のD.A.max., D.A.mean, R.M.S.をTable 3 に掲げる。

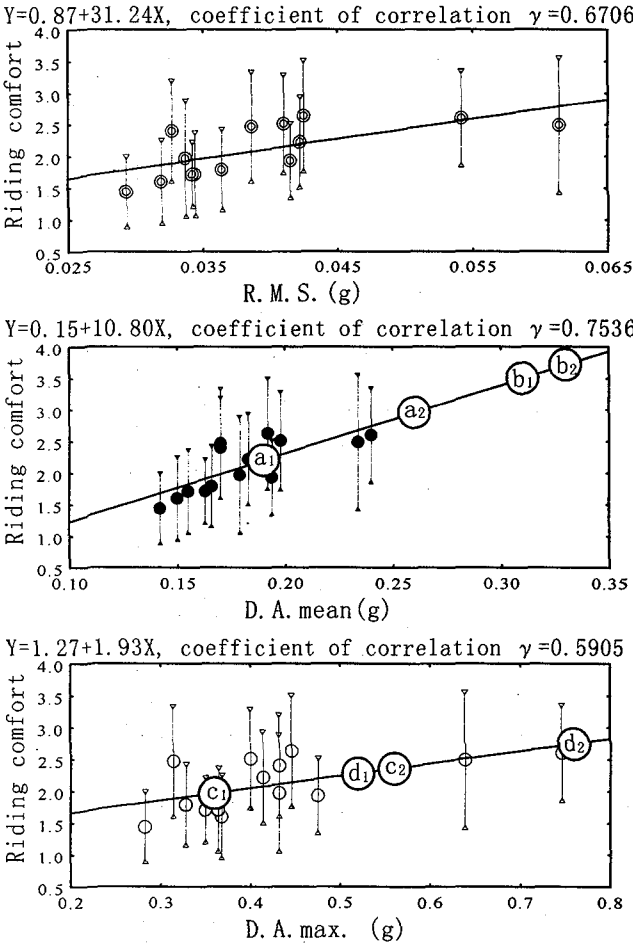


Fig.13 Relation of riding comfort at front point

これらより、平均的に自動車前部と後部の加速度に大きな差異のないことが分かる。

(2) 自動車乗り心地アンケート調査

学生と社会人とで乗り心地の感覚を比較すると(乗り心地感覚反応値平均、学生 2.05 : 社会人 2.13)、若干、社会人の方が敏感に反応しているが、有意な差異が無いので、アンケート対象者全体の平均と標本標準偏差を用いて感覚反応を評価する。すなわち、標本数 36 の標本標準偏差 σ を算出して、その評価として平均値に $+1\sigma$ 加算した値

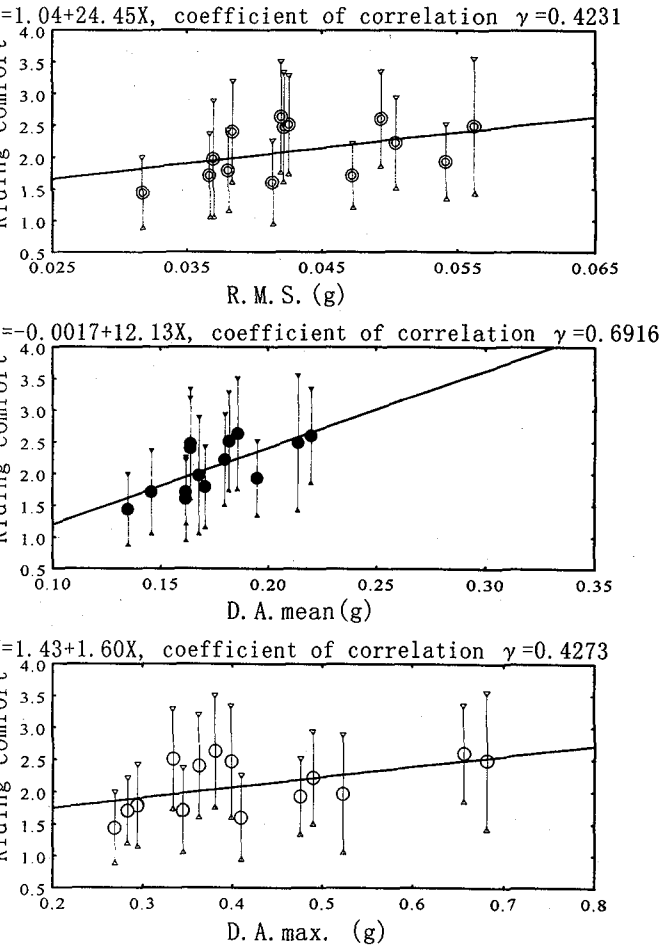


Fig.14 Relation of riding comfort at rear point

Table 4 Relation of riding comfort

Road roughness	Tide level	Sign in Fig.13	D.A.mean (g)	Riding comfort
①	M.S.L.	a1	0.19	2.202
	L.W.L.	a2	0.26	2.958
②	M.S.L.	b1	0.31	3.498
	L.W.L.	b2	0.33	3.714

Road roughness	Tide level	Sign in Fig.13	D.A.max. (g)	Riding comfort
①	M.S.L.	c1	0.36	1.965
	L.W.L.	c2	0.56	2.351
②	M.S.L.	d1	0.52	2.274
	L.W.L.	d2	0.76	2.737

Road roughness ① : $\alpha=0.001$, $\beta=0.05$, $n=2.0$

Road roughness ② : $\alpha=0.003$, $\beta=0.01$, $n=2.0$

で評価する。これらの値を Table 3 の右欄に掲げる。

3.3 走行車両の乗り心地評価

一般道でのデータが1ケースのみであるが、走行自動車の乗り心地は、橋梁上において一般道路上より悪いことはなく、悪くても「多少振動を感じるが、特に問題ない程度である」と「明らかに特異な振動を感じる」との間である。

自動車前部における床上の鉛直加速度の $D.A._{max}$, $D.A._{mean}$ および R.M.S.値と乗り心地の感覚反応値との関係を Fig.13 に示す。同様に自動車後部の加速度との関係を Fig.14 に示す。相関係数に着目すると、 $D.A._{mean}$ と乗り心地評価の相関が最も大きいことが分かる。また、前輪と後輪の加速度との相関を比べると、前輪の方が良好となっていることが分かる。これは、自動車の乗り心地に関する文献2)に一致している。

大阪市内の長大橋、都市内の高速道路高架橋および一般道路上を走行調査した結果から、 $D.A._{max}$, $D.A._{mean}$ および R.M.S.が Fig.13, 14 に示す程度であれば、個人差もあるが乗り心地の感覚反応値は最大でも3.5程度で、その乗り心地は、最も悪い場合でも特異な振動を感じるが、不快までは行かない程度と推察される。

4. 浮体橋上走行自動車の乗り心地評価

前輪鉛直加速度の最大両振幅および 0.1g 以上の両振幅の平均値に着目し、感覚反応値の相関図 (Fig.13) に、車両走行の動的応答シミュレーションにおいて算出した平均水面時 (M.S.L.) および最も条件の悪い干潮時 (L.W.L.) の本浮体橋の車両の鉛直加速度の推算値をプロットし、その値を Table 4 に掲げる。この結果、竣工当初の本浮体橋の乗り心地を推察すると、『最も悪い場合でも特異な振動を感じるが、不快まではいかない』程度と推察される。さらに、路面損傷があると、その程度に依存するが、かなり車両の走行状態が悪くなり、『かなりの振動を感じ、少し不快である』に近づく と推察される。

5. 結論

本研究では、夢洲～舞洲連絡橋に浮体橋方式を採用する際、その走行車両の乗り心地から振動使用性を検討した。

- (1) 浮体橋を走行する車両の鉛直振動は、朔望平均干潮位の状態のときに最も大きくなる。これは、伸縮継手部の影響を最も受けやすい状態にあるためである。

- (2) 走行車両の鉛直加速度には、一般の固定橋と同様に路面凹凸状態の影響が大きく、凹凸の設定が重要な意味を持つ。
- (3) 走行車両の感覚反応値は車両の鉛直両振幅加速度の最大値、R.M.S.および 0.1g 以上の平均値と正の相関がある。その中でも車両前部の加速度の 0.1g 以上の平均値との相関が最も大きい。
- (4) 竣工当初の乗り心地は、『最も悪い場合でも特異な振動を感じるが、不快まではいかない』程度と推察される。さらに、路面損傷があると、その程度に依存するが、かなり車両の走行状態が悪くなり、『かなりの振動を感じ、少し不快である』に近づく と推察される。しかし、これは伸縮継手部の限られた区間のみであり、また、潮位の干満差や風波による動揺の最大時であり、通過時の走行には問題がないと考られる。

謝辞

浮体橋の動揺シミュレーション解析を実施された日立造船(株)、自動車の乗り心地アンケート調査項目を教示頂いた北海道大学の小幡卓司氏、アンケート結果および自動車加速記録を整理して下さった大阪大学大学院生の今枝拓也氏 (現、大成建設(株)) にはこの場を借りて深く感謝致します。

参考文献

- 1) 横山功一：浮体橋の事例 (アメリカ合衆国&ノルウェー), (財)海洋架橋調査会, 海峡横断, 第2号, pp.24-25, 1995.7
- 2) 大沢 洋・宮崎清明・安井博文：大型バスの乗り心地に関する一考察, 自動車技術会, 学術講演会前刷り集, pp.231-216, 1993.10.
- 3) (社)日本道路協会：道路橋示方書.同解説, I 共通編, pp.10-15,平成6年2月
- 4) 川谷充郎・米島幹雄・小松定夫：道路橋の自動車走行による不規則振動解析に基づく路面平滑度維持基準の評価法, 構造工学論文集, Vol.38A, pp.789-795, 1992.3.
- 5) 川谷充郎・小林義和・高森和恵：曲げとねじりを考慮した桁橋の走行荷重による非定常連成不規則振動解析, 橋梁交通振動に関するコロキウム論文集 PART B, pp.249-256, 1995.11.
- 6) (社)日本機械学会：機械工学便覧.改訂第6版, 15 章, pp.7-10, 1977.7.

(1996年9月6日受付)