

I-7 振動感覚を考慮した側道橋の設計

(株)アリアス設計コンサルタント 正会員 田 所 洋 一
札幌市建設局土木部道路建設課 佐々木 利 幸

1. まえがき

最近、車道巾員の狭い道路橋に並行して支間の長い側道橋（歩道橋）が数多く設置されるようになった。従来から支間 40 m を越えると、たわみ振動により歩行者に与える不快感が問題となっており、設計時に種々の検討がなされている。

本報告における橋梁は図-1 に示す通り支間 43.40 m + 56.048 m、有効巾員 2.00 m で、1 部曲線が入った 2 径間連続曲線鋼床版箱橋である。詳細設計の結果、桁高の制限（桁下が国道、河川のクリアランス）と、既設下部構造の安定性（上部工反力の制限）から断面を大きくすることができず、固有振動数がいわゆる共振歩調の範囲 1.5Hz ~ 2.3Hz をさけることができなかった。このため、歩行者荷重による動的応答解析結果から使用性の照査を行ない、動吸振器（TMD）の設置についても概略検討したので報告するものである。

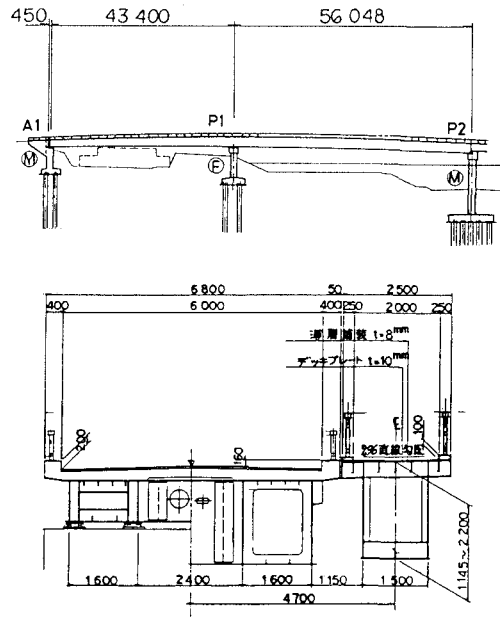


図-1 一般図

2. 固有振動解析

固有振動数、一般化質量を算出するために固有振動解析を行なった。解析にあたり構造系を立体骨組にモデル化し（図-2 参照）、質量については格点に集中質量とし、縦断面配、回転慣性についてはその影響が小さいと考えられるため無視した。表-1 に格点の座標を示す。

表-1 格点座標

Pt	X(m)	Y(m)	Pt	X(m)	Y(m)
1	0.000	0.000	11	54.025	0.000
2	4.300	0.000	12	59.824	-0.089
3	10.100	0.000	13	65.614	-0.416
4	15.900	0.000	14	71.386	-0.982
5	21.700	0.000	15	77.130	-1.787
6	27.500	0.000	16	82.835	-2.829
7	33.300	0.000	17	88.492	-4.107
8	39.100	0.000	18	94.091	-5.617
9	43.400	0.000	19	98.706	-7.027
10	48.225	0.000			

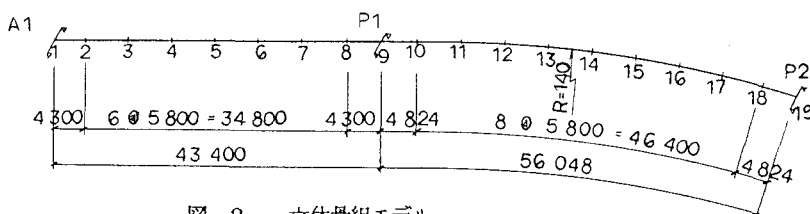


図-2 立体骨組モデル

2-1 剛度及び自重

本橋の断面性能及び自重を表-2に示す。

表-2 剛度及び自重

格点番号	断面積 (m^2)	断面2次モーメント (m^4)		ねじり定数 (m^4)	自重 (t/m)
		面内	面外		
1-2	0.091	0.0205	0.0476	0.0223	1.058
2-4	0.100	0.0487	0.0532	0.0396	1.218
4-6	0.107	0.0770	0.0570	0.0526	1.288
6-8	0.110	0.0878	0.0583	0.0570	1.288
8-10	0.111	0.0907	0.0586	0.0578	1.288
10-19	0.110	0.0878	0.0583	0.0570	1.288

2-2 解析結果

固有振動数及び固有振動モードを各々表-3、図-3に示す。表-3の結果より基本固有振動数が、いわゆる歩行者の共振域に含まれていることがわかる。

表-3 固有振動数とモード

次数	固有振動数 (Hz)	卓越モード
1	2.135	鉛直1次
2	3.429	面外1次
3	3.805	鉛直2次
4	5.623	面外2次

(a) 鉛直振動モード

1次



2次



(b) 面外振動モード

1次



2次

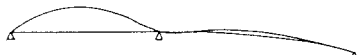


図-3 固有振動モード

2-3 一般化質量

一般化質量 (M) は、次式で定義される。

$$M = \int \phi^2(x) W(x) dx / g \dots\dots (1)$$

ここで、 $\phi(x)$ …… 固有振動モード
 $W(x)$ …… 分布重量
 g …… 重力加速度

具体的には、式1)より離散的に次式で計算する。

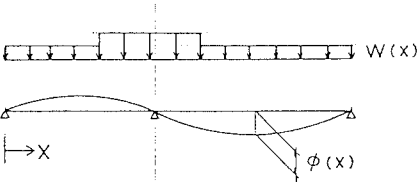
$$M = \sum_i \phi_i^2 W_i / g$$

ここで、 ϕ_i ; 格点iにおける固有振動モード
 W_i ; 格点iの集中重量

以上の結果を表-4に示す。但し、重量表示となっている。

表-4 一般化質量 (重量表示)

格点番号	部材長 (m)	$V(x)$ (t/s)	W_i (t)	ϕ_i	$\phi^2 W_i$ (t)
1	2.150	1.058	2.275	0.000	0.000
2	2.150	1.058	2.275	-0.149	0.051
2	2.900	1.218	3.532	-0.149	0.078
3	5.800	1.218	7.064	-0.319	0.719
4	2.900	1.218	3.532	-0.428	0.647
4	2.900	1.288	3.735	-0.428	0.684
5	5.800	1.288	7.470	-0.454	1.608
6	5.800	1.288	7.470	-0.430	1.381
7	5.800	1.288	7.470	-0.326	0.794
8	2.900	1.288	3.735	-0.160	0.096
8	2.150	1.288	2.769	-0.160	0.071
9	4.562	1.288	5.876	0.000	0.000
10	2.412	1.288	3.107	0.211	0.138
10	2.900	1.288	3.735	0.211	0.166
11	5.800	1.288	7.470	0.482	1.735
12	5.800	1.288	7.470	0.729	3.970
13	5.800	1.288	7.470	0.912	6.213
14	5.800	1.288	7.470	1.000	7.470
15	5.800	1.288	7.470	0.976	7.116
16	5.800	1.288	7.470	0.838	5.246
17	5.800	1.288	7.470	0.600	2.689
18	5.312	1.288	6.042	0.289	0.571
19	2.412	1.288	3.107	0.000	0.000
Σ	99.448		126.284		41.443



3. 使用性の照査法について

歩行者の歩調は老若男女を問わず、ほぼ2Hz（1秒間2歩）である。このため、主桁のたわみ振動の固有振動数が2Hzに近い場合には、歩行者の周期力により共振し振幅が大きくなり、歩行者に不快感を与えることになる。設計にあたっては、2Hzにならないようにすることが必要であるが、2Hz前後になった場合にはより詳細な検討を実施し、使用性の確認を行わなければならない。

使用性の照査法については、現在まで多くの研究があるが、いずれも動的応答量Sを振動じょ限度Rと比較し、 $S < R$ を確認するものである。

立体横断施設技術基準の解説 1) には、次の様な照査法が提案されている。

松本ら 2) 「1人/m程度の歩行者が2歩/秒の歩行を行なったとき、その最大加速度が0.1gを越えないこと」-----〔1〕

小堀・梶川・城戸 3) 「2歩/秒の歩行者1人が通行した時に、歩行者が受ける応答速度の実効値が0.42 cm/sec 以下であること」-----〔2〕

しかし〔1〕については、駅前に設置される歩道橋のように多数の歩行者が通行する場合の検討方法と考えられ、本橋のように少数載荷の場合は外力の設定に問題がある。〔2〕については単独歩行についての照査法であり、群集載荷についての照査はできない。そこで動的応答量として、単独歩行の最大変位振幅から近似的に振動速度の実効値を求め、単独歩行状態、群集載荷状態、単独走行状態の3つのパターンについて使用性の照査法について論じた梶川の方法 4) により検討を行なった。

以下に、文献 4) の照査法を示す。

$$\gamma_S \gamma_f S^* \leq \gamma_R R^* \text{ ----- (2)}$$

S^* : 歩行者が受ける振動刺激量（振動速度値）の基準値

- γ_S : 基本状態としての単独歩行時以外の状態（複数載荷）での載荷状態係数
- γ_f : 橋梁の固有振動数と歩調との共振の可能性を考慮する振動数係数
- R^* : 振動じょ限度の基準値（ S^* に対応した振動速度値）
- γ_R : 振動じょ限度の変動性を考慮する反応係数

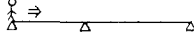
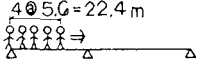
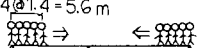
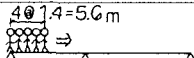
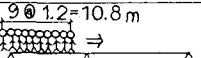
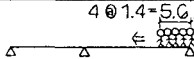
4. 動的応答解析

使用性の照査を行なうため、図-2に示す骨組モデルに対し時刻歴応答解析を行ない、応答量（振動刺激量）を求めた。以下では、計算条件及び応答解析を示す。

4-1 歩行ケース及び荷重条件

歩行者の動的荷重については、移動荷重として正弦波で表わすものとし、荷重振幅については24kg 4) とした。表-5に歩行ケース及び載荷条件を示す。

表-5 歩行ケース及び載荷条件

ケース	載 荷 条 件	ケース	載 荷 条 件
1-1		5-3	
1-2		5-4	
5-1		10-1	
5-2		---	---

- 荷 重 ----- $P = 24\text{kg} \cdot \cos(2\pi ft)$
- 歩 調 ----- $f = 2\text{Hz} (2.135\text{Hz})$
- 歩行速度 ----- $V = 1.4 \text{ m/sec} (1.495 \text{ m/sec})$
- 固有振動数 ----- $\omega = 2.135 \text{ Hz}$

4-2 解析結果

各荷重ケースにおける応答量を表-6に示す。表中No. 15と16は、本橋が共振するケースである。また、各ケースの速度実効値を図-4に示す。さらに、共振歩調ケースNo. 15と16の応答波形を図-5に示す。

表-6 応答量一覧表

No.	歩行 ケース	着目点	歩行 速度 (m/sec)	変位 (mm)	速度 (cm/sec)	加速度 (cm/sec)
1	1-1	Pt 14	1.4	0.109	0.14	1.72
2	1-2	"	"	0.109	0.14	1.72
3	5-1	"	"	0.524	0.66	8.31
4	5-2	"	"	0.524	0.66	8.31
5	5-3	"	"	0.444	0.56	7.03
6	5-4	"	"	0.454	0.57	7.19
7	10-1	"	"	0.994	1.25	15.80
8	1-1	歩行者	"	0.090	0.11	1.42
9	1-2	"	"	0.090	0.11	1.42
10	5-1	"	"	0.446	0.56	7.07
11	5-2	"	"	0.446	0.56	7.07
12	5-3	"	"	0.402	0.51	6.36
13	5-4	"	"	0.282	0.35	4.45
14	10-1	"	"	0.872	1.10	1.38
15	1-1	Pt 14	1.495	0.863	1.15	15.50
16	1-2	歩行者	"	0.369	0.49	6.59

数値は実効値を示す。

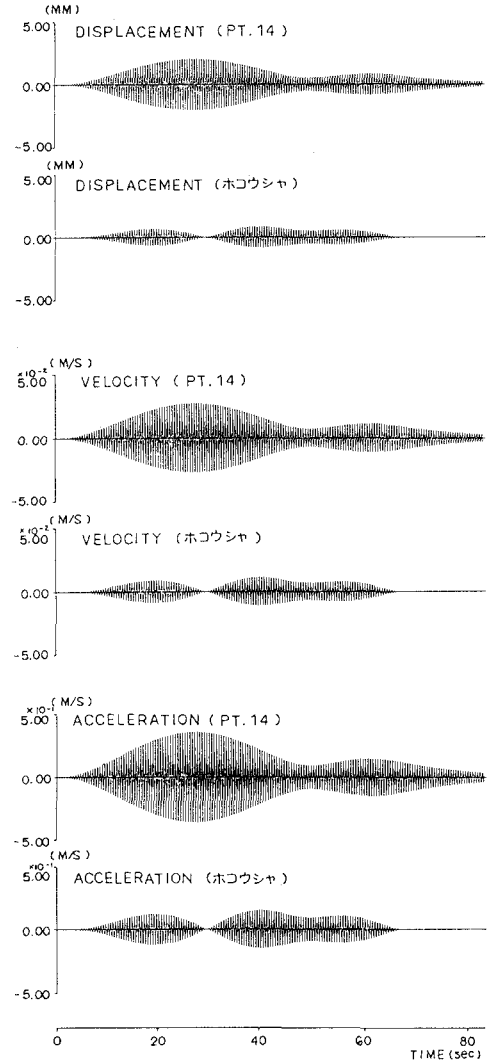


図-5 応答波形 (No.15, 16)

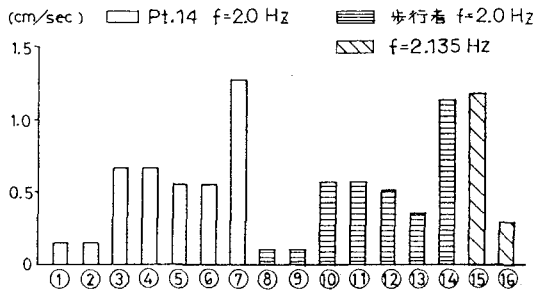


図-4 振動速度実効値の比較図

4-3 解析結果の考察

- (1) No.1と2及びNo.3と4との比較より、歩行方向による応答量の違いは極めて小さい。
- (2) No.3と5の比較から、歩行者数が同じ場合は歩行間隔の小さい方が応答量は大きくなる。
- (3) No.1と3との比較から応答倍率はほぼ人数倍(5倍)になる。1と7の比較からいえる(10倍)。
- (4) No.3と6の比較では、片側からの歩行の場合が若干大きい。

(5) Pt 14 (長径間中央位置) と歩行者位置との応答比較では、Pt14の方が大きい。

(6) No. 1 と 15 の比較より、Pt14における最頻歩調と共振歩調の応答倍率の比は約 8 倍である。

(7) No. 8 と 16 の比較より、歩行者位置における最頻歩調と共振歩調の応答倍率の比は約 4 倍である。

5 使用性の照査

動的応答解析結果より得られた振動速度の実効値 $S = 0.49 \text{ cm/sec}$ (No.16) を使用し、文献 4) により使用性の照査を行なう。

5-1 単独歩行状態

$$\gamma_S = 1.0, \gamma_f = 0.92, S^* = 0.49 \text{ cm/sec}$$

$$\begin{aligned}\gamma_R &= 1 - k_R V_R \\ &= 1 - 0.84 \times 0.35 \quad (\text{反応率 } 5\%) \\ &= 0.706\end{aligned}$$

$$R^* = 1.7 \text{ cm/sec}$$

$$\begin{aligned}\gamma_S \gamma_f S^* &= 1.0 \times 0.92 \times 0.49 \\ &= 0.451 \text{ cm/sec}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\gamma_R R^* &= 0.706 \times 1.7 \\ &= 1.20 \text{ cm/sec}\end{aligned}$$

$$\gamma_S \gamma_f S^* < \gamma_R R^* \quad \text{OK}$$

5-2 群集載荷状態

γ_S ;

$$\lambda T \leq 5 \quad \gamma_S = 1 + \lambda T / 6$$

$$\lambda T > 5 \quad \gamma_S = \sqrt{(1 + \alpha \beta V_S^2)(\lambda T + 1)} / 5$$

$$\gamma_f = 0.92, \quad S^* = 0.49 \text{ cm/sec}$$

γ_R ;

$$\begin{aligned}\lambda T \leq 5 \quad \gamma_R &= 1 - k_R V_R \\ &= 1 - 0.84 \times 0.35 = 0.706\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\lambda T > 5 \quad \gamma_R &= \sqrt{1 - \alpha \beta V_R^2} \\ &= \sqrt{1 - 0.85 \times 1.65 \times 0.5} = 0.547\end{aligned}$$

$\gamma_R R^*$;

$$\lambda T \leq 5, \gamma_R R^* = 0.706 \times 1.7 = 1.20 \text{ cm/sec}$$

$$\lambda T > 5, \gamma_R R^* = 0.547 \times 1.7 = 0.93 \text{ cm/sec}$$

λT (平均到着数) が 1 ~ 30 人について刺激量とじょ限度との関係を図-6 に示す。

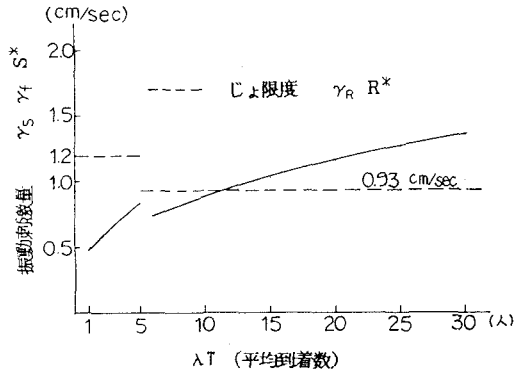


図-6 振動刺激量と平均到着数

5-3 単独走行状態

f_0 (外力振幅) は直線補間して求める。

$$f_B = 2.0 \text{ Hz のとき} \quad f_0 = 0.4 W_B$$

$$f_B = 2.5 \text{ Hz のとき} \quad f_0 = 1.0 W_B$$

$$\begin{aligned}f_0 &= 0.562 W_B \\ &= 0.562 \times 0.06 = 0.0337 t\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}S^* &= 0.49 \times 0.562 W_B / 0.4 W_B \\ &= 0.49 \times 0.0337 / 0.024 = 0.69 \text{ cm/sec}\end{aligned}$$

$$\gamma_S = \gamma_f = \gamma_R = 1.0$$

$$\gamma_S \gamma_f S^* = 0.69 \text{ cm/sec}$$

$$\gamma_R R^* = 2.70 \text{ cm/sec}$$

$$\gamma_S \gamma_f S^* < \gamma_R R^* \quad \text{OK}$$

6. TMDの概略検討

前項の使用性の照査により、単独歩行状態と単独走行状態では刺激量が、じょ限度を下廻るが、群集載荷状態においては、 λT (平均到着数) が約10人以上になると $\gamma_S \gamma_f S^*$ (歩行者が受ける刺激量) が $\gamma_R R^*$ (じょ限度) を上廻る。そこで制振対策としてTMDの設置について概略検討を試みた。

6-1 基本理論

主振動系(主桁)を減衰をもった1質点系とし、TMDを取付けたことにより、2自由度系の強制振動を考える。計算モデルは図-7のように表わされる。

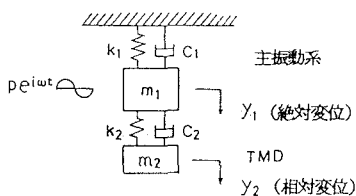


図-7 計算モデル

図-7に示す振動系の微分方程式は、以下の通り与えられる。

$$\begin{aligned} m_1 \ddot{y}_1 + c_1 \dot{y}_1 + k_1 y_1 - c_2 \dot{y}_2 + k_2 y_2 &= P e^{i\omega t} \\ m_2 (\ddot{y}_1 + \ddot{y}_2) + c_2 \dot{y}_2 + k_2 y_2 &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

ここで m_i, c_i, k_i は各々質量、減衰係数、バネ定数を表わし、添字 $i = 1$ は主振動系、 $i = 2$ はTMDに関する量を表わす。Pは外力の振幅、 ω は外力の円振動数である。

式(3)より、動的応答倍率は以下の通りになる。

$$\begin{aligned} L_1 &= \frac{|y_1|}{y_{st}} = \left(\frac{\alpha^2 + \beta^2}{\gamma^2 + \zeta^2} \right)^{1/2} \\ L_2 &= \frac{|y_2|}{y_{st}} = \left(\frac{r^2}{\gamma^2 + \zeta^2} \right)^{1/2} \end{aligned} \quad (4)$$

$$y_{st} = P / k_1 \quad (\text{静的変位})$$

$$\alpha = f^2 - r^2 \quad \beta = 2 h_2 f r$$

$$\gamma = f^2 (1 - r^2) - \mu f^2 r^2 - r^2 (1 - r^2) - 4 h_1 h_2 f r^2$$

$$\zeta = 2 h_2 r f (1 - r^2 - \mu r^2) + 2 h_1 r (f^2 - r^2)$$

$$\mu = m_2 / m_1 \quad (\text{質量比}) \quad f = \omega_2 / \omega_1 \quad (\text{同調比})$$

$$r = \omega / \omega_1 \quad (\text{強制振動数比}) \quad h_i \text{ は減衰定数を表わす。}$$

6-2 TMDの概略設計

TMDの設計においては設計到着数 (λT) によって、その諸元が決まるものと考えられるが、 λT を一義的に決定することは困難である。したがって、TMDの箱内への設置の容易さ、ダンパーの温度依存性 Tuningの精度等を考慮し、以下に示すパラメーターを決定した。

$$\mu = m_2 / m_1 = 0.01$$

$$\text{TMDの重量 } W_T = 0.01 \times 41.443 = 0.414 \text{ t}$$

$$f = \omega_2 / \omega_1 = 1 / (1 + \mu) = 0.99, \quad h_2 = 0.1$$

$$\text{この時の応答倍率} \quad L_1 = 16, \quad L_2 = 81$$

今、仮に $\lambda T = 10$ 人とした場合のTMDの最大振幅を求めてみる。

$$P = 0.4 \times 10 \text{ 人} \times 60 \text{ kg/人} = 240 \text{ kg}$$

$$\text{この時の静的変位 } y_{st} = 0.34 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$\begin{aligned} y_{\max} &= L_2 y_{st} \\ &= 81 \times 0.34 \times 10^{-3} = 0.028 \text{ m} \end{aligned}$$

よってTMDのストロークは30~40mm考えればよい。

TMD設置後の主振動系の対数減衰率は次式で示され、結果は以下の通りとなる。

$$\delta_{\text{eff}} = 2 \pi (0.005 - \mu r T / 2)$$

$$\text{ここで } T = \frac{-2 h_2 r^3 f}{(f^2 - r^2) + 4 h_2^2 f^2 r^2}$$

$\delta_{\text{eff}} = 0.188$, 設置なし $\delta = 0.03$ となり、約6倍の減衰効果がある。

7. あとがき

以上、側道橋について振動感覚を考慮し、使用性の照査を行なった設計について報告した。TMDについては、歩道橋の制振対策としては有効な方法であると思われる。現在、本橋は工場製作中であるがTMD設置については架設後、振動実験を実施し詳細な検討を行なう予定である。また、動的応答解析の結果から、実験にあたっての荷重載荷方法について資料が得られたと考える。

本論文をまとめるにあたり御指導頂いた、北海道大学の林川先生に深謝の意を表します。

(参考文献)

- 1) 立体横断施設技術基準・同解説 1979
- 2) 松本ら：歩行者の特性を考慮した歩道橋の動的設計に関する研究、土木学会論文報告集 第205号 1972
- 3) 小堀、梶川、城戸：振動感覚を考慮した歩道橋の設計、橋梁と基礎 8巻12号 1974
- 4) 梶川：振動感覚を考慮した歩道橋の使用性照査法に関する考察 土木学会論文報告集 第325号 1982
- 5) デン・ハルトック：機械振動論 コロナ社 1986