

歩道橋の動的応答解析について

北海道大学工学部 正 員 小幡 卓司

北海道大学工学部 正 員 林川 俊郎

北海道大学工学部 学生員 今 和也

北海道大学工学部 学生員 桑島 正樹

1. ま え が き

昭和34年、我が国初の交通安全施設としての横断歩道橋が建設されて以来、今日までに約1万橋が全国いたるところに設置された。その間、横断歩道橋設計のためのガイドとして、まず昭和42年に横断歩道橋設計指針が制定され、さらに昭和54年、立体横断施設技術基準・同解説¹⁾(以下基準と称す)が制定され今日に至っている。この基準において、利用者への振動の影響について配慮を加えるよう明記され、具体的には歩道橋の固有振動数が2Hz前後(1.5Hz~2.3Hz)にならないように指示されている。

交通戦争解消の担い手として期待された横断歩道橋は、歩行者の立場からはその利用がかえって不便であることや、美観上の問題から、その新設は、近年減少傾向にある。一方、道路橋に並行して架けられる側道橋、河川や高速道路等で分断された地域の歩行者のための人道橋、また公園内等に架設される遊歩道橋と称される歩道橋は、盛んに建設されている。これらの歩道橋の多くは、長支間で幅員もかなり広く、中には道路橋に匹敵するような大規模なものもある。したがって、もともと横断歩道橋のために作られた現行の基準による振動使用性の照査では、不備点が多く、また避けるべき固有振動数が明記されているため、設計者に強い負担を与える結果となっている。このような振動使用性問題は、日本のみならず海外でも問題となっており、各国において、その照査方法も設計基準として示されるようになってきた。

この種の照査方法は、対象となる構造物の動的応答量を求め、その解と振動じよ限度を比較することによって評価を行うのが、海外では一般的である。まず、振動じよ限度については、日本におけるその主な研究として、小堀・梶川の研究、三輪・米川の研究等があり、著者らも、ファジィ推論を用いたじよ限度の定量的解析法を提案した²⁾。また、動的応答量に関しては、今日では電算機の発達により、計算そのものは特別に困難ではないと思われるが、歩行者の移動周期外力の取り扱いが意外と難しく、歩行者の衝撃力等の決めなくてはならないパラメータも多い。

したがって、本研究では有限要素法を用いた、2次元および3次元動的応答解析を行い、構造物のモデル化や歩行外力の取り扱い等の、このような振動使用性問題における動的応答量の求め方に関する検討を行ったので、その結果を報告するものである。

2. 動的 応 答 解 析

多自由度系の強制振動を解析するための一般的な応答解析法には、モード解析法と呼ばれる方法と、運動方程式をそのまま解く、直接数値積分法がある。本研究では、ニューマークβ法を用いた直接数値積分法を用いて解析を行った。

多自由度系の運動方程式は、

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = F(t) \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、M: 質量マトリックス、C: 減衰マトリックス、K: 剛性マトリックス、F(t): 荷重ベクトルである。ニューマークβ法では、時刻(t+Δt)の速度、変位を以下のように仮定して計算する。

Dynamic Response Analysis on Pedestrian Bridges.

by Takashi OBATA, Toshiro HAYASHIKAWA, Kazuya KON and Masaki KUWAJIMA.

$$\dot{x}(t+\Delta t) = \dot{x}(t) + [(1-\delta) \cdot \ddot{x}(t) + \delta \cdot \ddot{x}(t+\Delta t)] \cdots \cdots \cdots (2)$$

$$x(t+\Delta t) = x(t) + \dot{x}(t) \cdot \Delta t + [(1/2 - \beta) \cdot \ddot{x}(t) + \beta \cdot \ddot{x}(t+\Delta t)] \cdot \Delta t^2 \cdots \cdots \cdots (3)$$

一般に δ は $\delta=1/2$ に固定して用いることが多い。式(2)、(3)を変形して、式(1)に代入すると、

$$\hat{K} \cdot x(t+\Delta t) = \hat{F}(t+\Delta t) \cdots \cdots \cdots (4)$$

ここで、 $\hat{K}$ は有効剛性マトリックス、 $\hat{F}(t+\Delta t)$ は有効外力ベクトルで、

$$\hat{K} = \frac{1}{\beta \Delta t^2} M + \frac{1}{2\beta \Delta t} C + K \cdots \cdots \cdots (5)$$

$$\begin{aligned} \hat{F}(t+\Delta t) = & F(t+\Delta t) + M \{ 1/(\beta \Delta t) \cdot \dot{x}(t) + (1/2\beta - 1) \cdot \ddot{x}(t) + 1/(\beta \Delta t^2) \cdot \dot{x}(t) \} \\ & + C \{ (1/2\beta - 1) \cdot \dot{x}(t) + \Delta t \cdot (1/4\beta - 1) \cdot \ddot{x}(t) + 1/(2\beta \Delta t) \cdot x(t) \} \cdots \cdots \cdots (6) \end{aligned}$$

以上より、式(4)を解いて $x(t+\Delta t)$ を求め、式(2)、(3)を用いて $\dot{x}(t+\Delta t)$ および $\ddot{x}(t+\Delta t)$ を求めることができる。なお、本研究では $\beta=1/4$ 、 $\Delta t=0.01\text{sec}$ として解析を行った。

3. 歩行者の移動周期外力

前述のとおり、歩道橋の動的応答量の計算を行うには歩行者の移動周期外力を求める必要がある。歩行外力の求め方は、各国においていくつかの方法が提案されているが、本研究では以下の2つの方法を用いることとする。

① オーストラリアの Wheeler が提案する歩行外力

Wheeler³⁾ は人間の歩・走行時の床面への衝撃について詳細に検討し、歩行外力を次のように定めた。まず、入力波としては半正弦波を用い、また衝撃力、衝撃作用時間、歩行者の歩幅等は、歩行周期をパラメータとした図によって与えている。図-1(a)に半正弦波を図-1(b)、(c)に歩行外力パラメータを示す。文献3では、オーストラリアのパスにある22橋の歩道橋に対する歩行実験結果と解析結果が比較されており、それらはよく一致していることが示されている。この手法は、有限要素法を用いた動的応答解析を行う場合の外力の取り扱い方として、極めて有効であると考えられるが、決定すべきパラメータが意外と多く、外力の計算がやや煩雑になると思われる。

② $F_0 \cos \omega t$ を歩行外力として用いる方法

梶川⁴⁾ は、歩道橋の振動を考えた場合、その構造が比較的単純であることからその固有振動数や固有モードは容易に求めることができるとし、動的応答量に関しても、歩行者の歩調とあるモードとの共振状態を考えるので、応答計算はいわゆるモード解析法で十分であるとした。歩行外力は歩行時の衝撃力を考慮して、この外力振幅を F_0 、また歩調を $\omega (= 2\pi f, f: \text{歩調、歩/秒})$ として、歩行者の移動周期外力を $F(t) = F_0 \cos \omega t$ で表した。 F_0 は ($F_0 = \text{衝撃係数} \times \text{体重}$) で与えられる。この衝撃係数と移動速度は、小堀・梶川の実験結果や、松本らの研究、BS5400、Blanchard の研究、さらには Wheeler の研究をも参考にしながら、図-2 に示されるようなグラフによって提示されている⁵⁾。この手法は Wheeler の方法と比較して、はるかに簡単で取り扱いも容易であるが、実際の歩行ではあり得ない、床面に対して下から上への、いわば負の荷重が作用する問題点を有している。

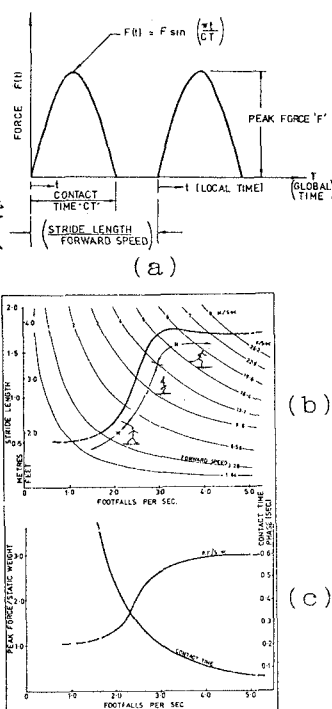


図-1 Wheelerの歩行外力

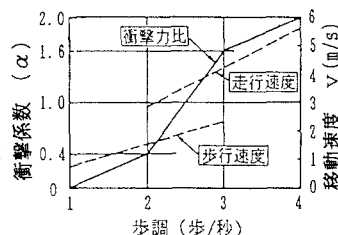


図-2 梶川の歩行外力

4. 解析およびその結果

解析は、図-3に示すような歩道橋実験桁上を体重61kgの歩行者が単独で歩行する場合について、構造物のモデル化等を考慮した以下の6タイプに対して計算を行った。また、振動数の範囲は1.5Hzから5.0Hzとした。

- ① 2次元モデル
- ② 3次元モデル
- ③ 歩み板の剛性を20%考慮した3次元モデル
- ④ 横桁剛性を $I+Ay^2$ とした3次元モデル
- ⑤ ③+足の踏み幅を考慮した偏心载荷モデル
- ⑥ ④+足の踏み幅を考慮した偏心载荷モデル

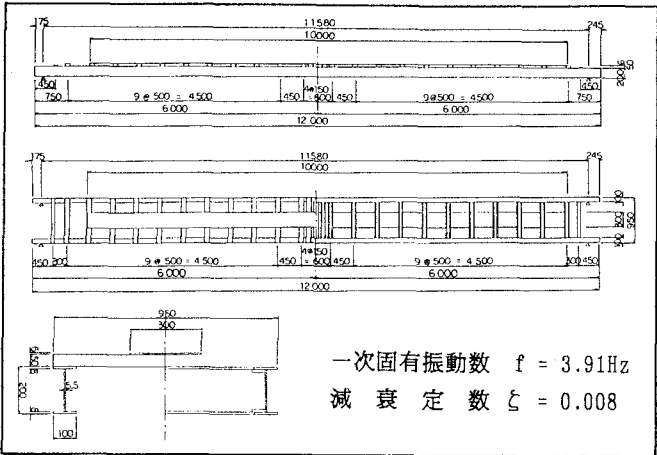


図-3 一般図

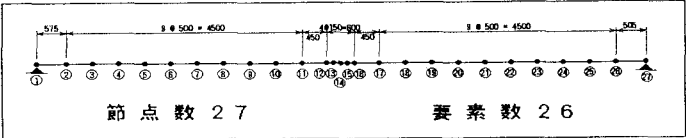


図-4 2次元モデル

なお解析に先立ち、減衰定数を測定するため自由振動実験を行い、一次固有振動数 $f=3.91\text{Hz}$ 、減衰定数 $\zeta=0.008$ を得た。図-4に2次元モデル、図-5に3次元モデルの骨組図を、表-1に各タイプの最大応答変位の計算結果を、また図-6に本解析における代表的な変位応答曲線を示す。

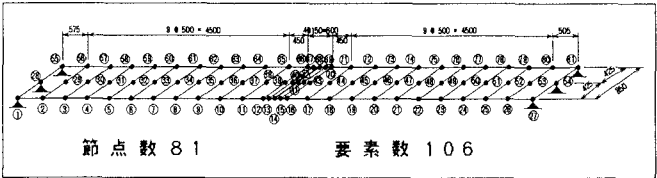


図-5 3次元モデル

表-1 計算結果 (単位 : m)

		1.5 Hz	2.0 Hz	2.5 Hz	3.0 Hz	3.5 Hz	3.8 Hz	4.0 Hz	4.5 Hz	5.0 Hz
type 1	Wheeler	.00389	.00965	.00722	.01093	.02967	.03660	.03203	.01612	.00703
	$F_0 \cos \omega t$	.00354	.00480	.00886	.01783	.05933	.09208	.08064	.03243	.01553
type 2	Wheeler	.00314	.00560	.00837	.01796	.03769	.02893	.02021	.00962	.00510
	$F_0 \cos \omega t$	.00374	.00527	.01090	.03182	.08653	.06328	.04072	.01677	.00930
type 3	Wheeler	.00342	.00813	.00623	.00946	.02267	.03087	.02704	.01367	.00600
	$F_0 \cos \omega t$	.00310	.00414	.00755	.01497	.04978	.07767	.06835	.02755	.01317
type 4	Wheeler	.00305	.00545	.00825	.00310	.03768	.02891	.02020	.00961	.00509
	$F_0 \cos \omega t$	.00363	.00518	.01077	.03159	.08650	.06322	.04068	.01676	.00928
type 5	Wheeler	.00377	.00878	.00637	.00959	.02269	.03102	.02736	.01411	.00630
	$F_0 \cos \omega t$	.00329	.00516	.00755	.01504	.04993	.07797	.06843	.02815	.01342
type 6	Wheeler	.00348	.00634	.00836	.01781	.03795	.02902	.02035	.00987	.00512
	$F_0 \cos \omega t$	.00411	.00684	.01089	.03176	.08689	.06340	.04071	.01690	.00959

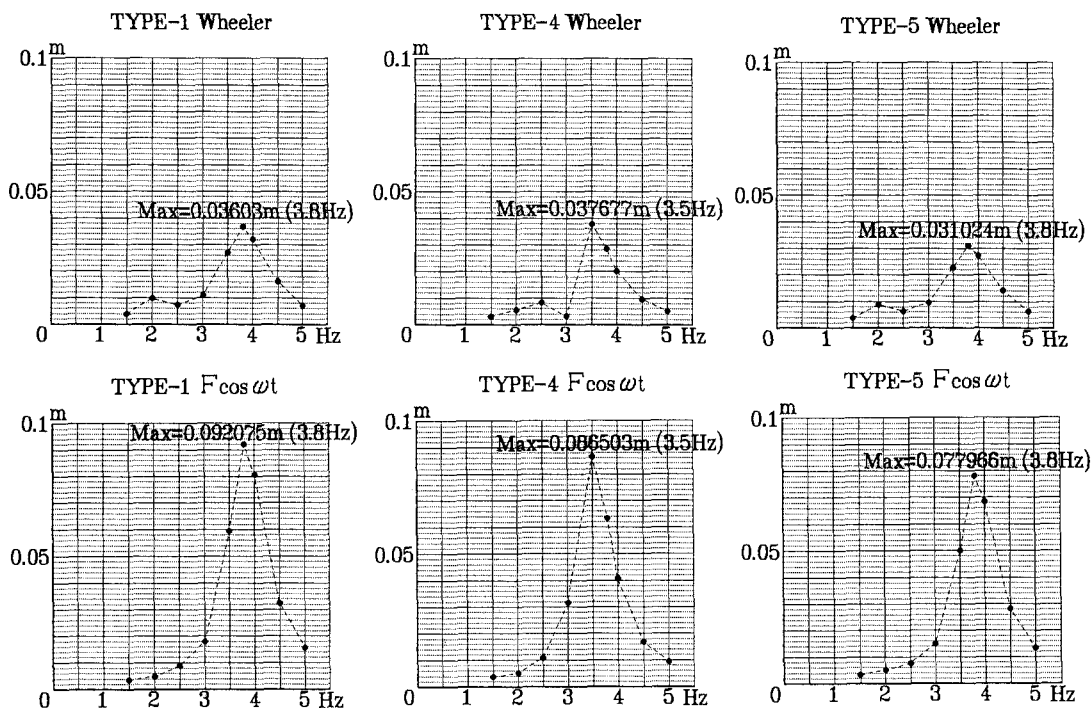


図-6 変位応答曲線

5. あ と が き

本研究では、歩道橋の振動使用性を照査するための動的応答量の求め方に関する検討を行い、次のような結果を得た。

まず、歩行外力では $F \cos \omega t$ を用いた場合、Wheelerの方法に比較して応答量がかなり大きくなった。これは、前述のように、床面に対して下から上へ、負の荷重が作用するためであると考えられる。Wheelerの半正弦波はこのような载荷の影響が無いため、応答量は小さく、実際の歩行状態をよりよくシュミレートしていると思われる。また、2次元モデルと3次元モデルを比較すれば、同一の桁剛性を用いると、3次元モデルでは固有振動数が若干低下する傾向が見られた。したがって、実際の歩道橋について3次元解析を行う場合、高欄、地覆等の剛性のある程度正確に評価する必要があると思われる。横桁の剛性は、本解析ではほとんど影響が無く、さらに偏心载荷の場合は、偏心の無い場合に比して約1mm程度変位が増加し、最大値が主桁上で生じることが判明した。以上の結果より、一般の幅員の狭い横断歩道橋では、2次元解析でもある程度正確に動的応答量を求めることが可能であるが、側道橋、人道橋等の幅員が広く支間も長い歩道橋では、高欄、地覆等の剛性や歩行者の偏心の影響を考慮した、3次元解析を行う必要があると思われる。

<参 考 文 献>

- 1) 日本道路協会：立体横断施設技術基準・同解説，丸善，昭和54年
- 2) 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 pp209～212, 1992.
- 3) J.E.Wheeler.: Prediction and Control of Pedestrian-Induced Vibration in Footbridges., Proc. of ASCE, No ST9 pp2045～2065, 1982.
- 4) 梶川 康男：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 pp23～33, 1982.
- 5) 梶川 康男・津村 直宣・角本 周：PC吊床版歩道橋の振動とその使用性，構造工学論文集 Vol36A pp685～695, 1990.
- 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 講演論文集 pp9～14, 1991.