

I—6 5径間連続V橋脚ラーメン橋の動的振動解析

備 橋梁設計事務所	正会員	松井義孝
備 橋梁設計事務所		下川俊克
開発局 土木試験所	正会員	吉田敏一
室蘭開発建設部		山内敏夫

1、はじめに

動的振動解析により橋梁の耐震設計をする際には、強震記録による地震波、最大加速度そしてスペクトル曲線等による入力地震動の設定が重要な要因となる。

本文では、5径間連続V橋脚ラーメン橋をモデルとして動的振動解析を、応答スペクトル法と時刻歴応答解析の手法を用いて道路橋示方書におけるスペクトル曲線が、強震記録の地震波から作られるスペクトル曲線とが入力地震動の設定として、どの程度差異があるか、又ここで作った地震波がどの程度の再現期間に相当するかを検討した。

更に、本架橋地点は入力地震動として設定した震源地より 25 kmのところに位置しているので、鉛直成分についても検討した。

2、モデルと解析方針

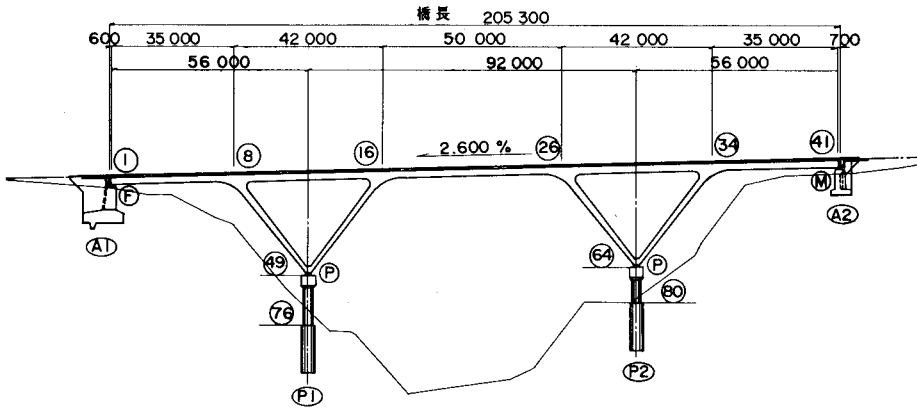


図-1 モデル図

本モデルは、上部構造鋼5径間連続箱桁V橋脚ラーメン橋、橋脚は鉄筋コンクリートラーメン橋脚である。

支点条件は、橋軸方向についてA1は固定支点、P1、P2はピン支点、A2は可動支点であり、橋軸直角方向については、全て固定支点とした。

基礎地盤は、砂岩及び粘板岩帯であり、A1、A2橋台は直接基礎とし、P1、P2は深礎杭基礎を採用した。

解析は、多質点系モデルとしてモーダルアナリシス法を用い、減衰定数は 2 %とした。

固有振動解析は、Subspace Iteration法（実固有値解法）を用い、応答解析においては、モーダル法応答解析によった。

応答スペクトルによる応答解析は、想定応答スペクトルにより、各質点の刺激係数を考慮した各モードの応答値を求め、全モードについて2乗和の平方根として、各質点の応答値を求めた。

時刻歴応答解析は、地震波により各質点の刺激係数を考慮した各モードの応答値を求める。各モードの運動方程式は、Newmark-β法の積分法によって解いた。

3、入力地震動の設定

安全な構造物を設計する為には、地震の再現期間をどの程度に設定すべきか、かつ、応答スペクトル法を用いる場合、いかにその橋に適合したスペクトルを作るかによるものと思われる。

3-1 地震記録の選定

理科年表には、有史以来の大地震の記録が整理されており、本橋に影響を与えるだろう記録を、図-2に抽出して検討した。

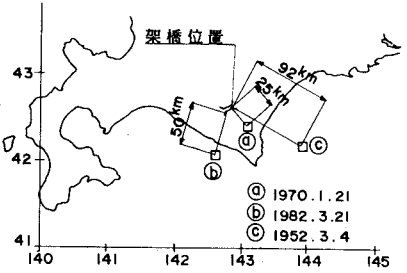


図-2 地震記録

- (a) 昭和 45 年 1 月 21 日 (1970) 日高山脈南部地震 M = 6.7 , L = 25 km
- (b) 昭和 57 年 3 月 21 日 (1982) 浦河沖地震 M = 7.1 , L = 50 km
- (c) 昭和 27 年 3 月 4 日 (1952) 十勝沖地震 M = 8.2 , L = 92 km

3-2 応答スペクトル法における入力地震動の決定

最大入力地震動の設定は、一般的には道路橋示方書より求めているが、最近の土木技術資料による強震計の短周期補正を施した推定式が出されており、それら第1種地盤の場合として式-1、式-2に列記し、表-1にまとめ入力地震動を決定する。

道路橋示方書 $A_{max} = 46 \times 10^{0.208M} (\Delta + 10)^{-0.686}$ ----- (式-1)

SMA C強震計の短周期補正を施した最大加速度の推定式（土木技術資料 25-11）

$A_{max} = 987.4 \times 10^{0.216M} (\Delta + 30)^{1.218}$ ----- (式-2)

地震名	道路橋示方書	土木技術資料
日高山脈南部地震	100 gal	210 gal
浦河沖地震	83 gal	162 gal
十勝沖地震	98 gal	170 gal

表-1 入力地震動としての比較

以上、式-1、式-2にマグニチュードと震央距離を代入し最大入力加速度を計算した結果、表-1で明らかな様に日高山脈南部地震（A = 210 gal）を選定した。

3-3 時刻歴応答解析における入力地震波

震源地より太平洋岸に 40 km 離れた所に位置する幌満橋に設置されている SMA C-B 2強震計により記録された波を用いる。

地震波の選定については、架橋地に一番近い日高山脈南部地震を選定した。

3-4 日高山脈南部地震における三成分地震波

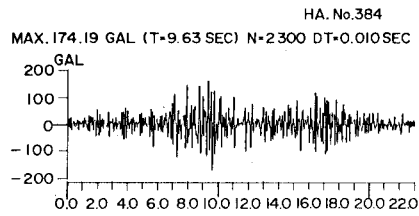


図-3 橋軸方向水平成分地震波

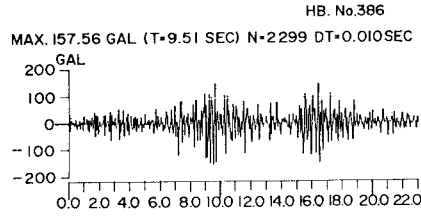


図-5 橋軸直角方向水平成分地震波

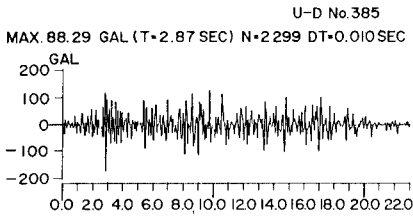


図-4 鉛直成分地震波

4、解析結果

4-1 入力地震動の判定

モデルの構造解析に先立ち、道路橋示方書スペクトル倍率と地震記録（図-3～図-5）を用いた地盤のスペクトル倍率を図-6に示し、加速度スペクトル曲線を図-7に示した。

図-6において、道路橋示方書スペクトル曲線は図-

3～図-5の地震波と近似的な形を示している様である。

図-7において、刺激係数が有効に関与する固有周期 $T = 0.3 \text{ sec}$ 附近をみると道路橋示方書加速度スペクトル曲線と図-3、図-5の地震波加速度スペクトル曲線では同程度の加速度を得る事から、本モデルの入力地震動 $A = 210 \text{ gal}$ が本橋の場合適応値であると考えられる。

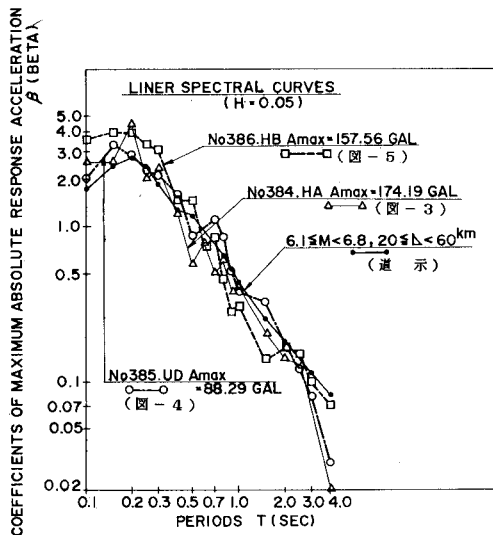


図-6 加速度応答スペクトル倍率

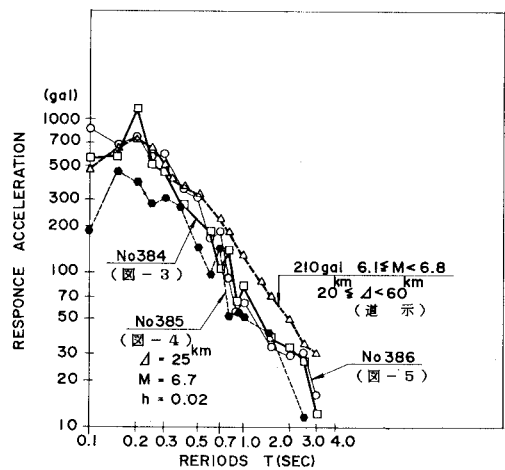


図-7 加速度スペクトル曲線

図-8において、最大入力加速度 $A = 210 \text{ gal}$ がどの程度の再現期間に相当するかを、図-7における図-3～図-5の地震波の加速度スペクトル曲線と重ね合わせてみると、どの位の期待値に相当するかわかる。

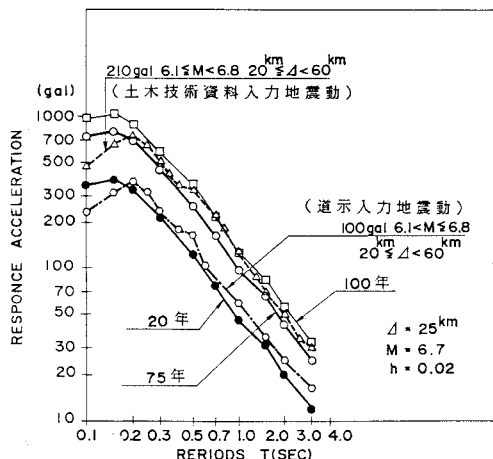


図-8 再現期間を考慮した加速度スペクトル曲線

図-8にある再現期間を考慮したスペクトルについては、式-3を用いて求めた。

応答スペクトル法にて用いている入力地震動 $A = 210 \text{ gal}$ は、図-8より 75年～100年の期待値に相当する事がわかる。

地震波(図-3、図-5)の水平成分についても同様に 75年～100年に相当すると思われる。

$$P = \left(1 - \frac{1}{T_r}\right) TD \quad \begin{matrix} TD = 50 \text{ 年} \\ T_r = 20, 75, 100 \text{ 年} \end{matrix}$$

$$\approx 0.1(20 \text{ 年}), 0.5(75 \text{ 年}), 0.6(100 \text{ 年})$$

$$SA(T, h) = \{I_1(T) \times \{I_2(T) \times \{I_3(h) \times \{I_4\} \times \{SA(T, 0.05)\}$$

$$\begin{matrix} I_1 = 1.0 & I_2 = 0.48, 1.0, 1.3 \\ I_3 = 1.33 & I_4 = 1.0 \end{matrix}$$

$$\{SA(T, 0.05) = a(T, GC) \times 10^{b(T, GC) M_x (\Delta + 30)^{-1.178}}$$

----- (式-3)

4-2 固有周期

振動モードの重ね合わせについては、全次数についての重ね合わせをする必要はなく低次のものから任意の数個を重ね合わせる事で充分精度を得られるので、ここでは 20 次迄とした。

表-2、表-3は、10次迄の数値を、図-9、図-10は、有効質量に關与する刺激係数の大きなモード

のみを計上した。

次 数	固有周期	刺激係 数		有効質量とその累計	
MODE	PERIOD	MODAL PARTICIPATION FACTOR		EFFECTIVE MASS (%) (SUMMATION)	
N0	(sec/m)	X	Y	X	Y
1	0.52472	1.271	1.255	0.80 (0.80)	0.80 (0.80)
2	0.40540	-0.749	0.511	0.30 (1.10)	0.10 (0.90)
3	0.38391	-3.235	0.318	5.10 (6.20)	0.00 (0.90)
4	0.33018	4.301	-1.723	8.80 (15.00)	1.40 (2.30)
5	0.28260	-7.576	5.048	27.20 (42.20)	12.20 (14.50)
6	0.25355	3.515	7.448	5.90 (48.10)	26.50 (41.00)
7	0.23578	3.164	4.920	4.70 (52.80)	11.60 (52.60)
8	0.20006	5.027	0.402	12.00 (64.80)	0.10 (52.70)
9	0.18891	3.240	0.882	5.00 (69.80)	0.40 (53.10)
10	0.18201	-4.492	0.540	9.60 (79.40)	0.10 (53.20)
20	0.0709	0.433	0.016	0.10 (87.70)	0.00 (61.90)

表-2 橋軸方向解析固有周期

次 数	固有周期	刺激係 数	有効質量とその累計
MODE	PERIOD	MODAL PARTICIPATION FACTOR	EFFECTIVE MASS (%) (SUMMATION)
N0	(sec/m)	Z	Z
1	1.04862	10.290	50.60 (50.60)
2	0.48022	0.094	0.00 (50.60)
3	0.25300	4.721	10.60 (61.20)
4	0.15234	4.716	10.60 (71.80)
5	0.14909	0.542	0.10 (71.90)
6	0.10686	-5.037	12.10 (84.00)
20	0.01671	1.553	1.20 (94.70)

表-3 橋軸直角方向解析固有周期

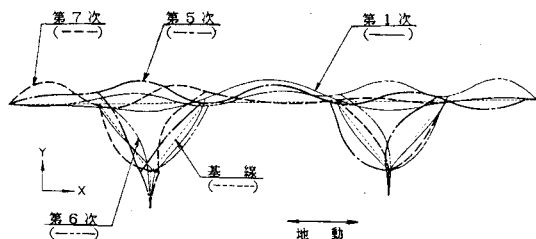


図-9 橋軸方向モード図

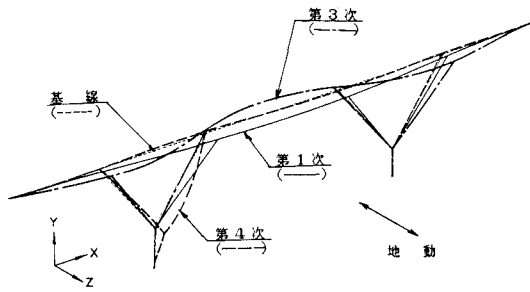


図-10 橋軸直角方向モード図

4-3 応答加速度

モデルの応答加速度を、橋軸方向について図-11の格点④6、④9、⑤2について着目し、表-4の加速度の結果を得た。

RESPONSE ACCELERATION

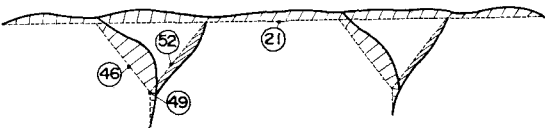


図-11 橋軸方向応答加速度図

		(m/sec ²)	
応答スペクトル法	pt46	12.70	10.00
	pt49	4.31	0.07
	pt52 (MAX)	14.81	10.49
時刻歴応答解析	pt46	21.20	16.40
	pt49	5.17	0.11
	pt52 (MAX)	23.87	17.80

表-4 橋軸方向応答加速度表

4-4 応答部材力

応答部材力は、応答スペクトル法（水平2成分）、時刻歴応答解析法（水平2成分、鉛直1成分）について、上・下部工の接点④9、⑥4、橋脚基部⑦6、⑧0の応答値について比較した。

RESPONSE ELEMENT FORCE

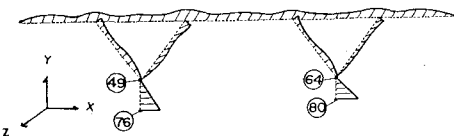


図-12 応答値符号図

	格点	FX(TON)	FY(TON)	MZ(T-M)
応答スペクトル法 水平	pt 49	210.4	72.1	0
	pt 64	153.4	145.2	0
	pt 76	211.6	121.2	1486.7
	pt 80	154.2	188.8	1718.8
時刻歴応答解析 水平	pt 49	284.0	84.6	0
	pt 64	186.3	288.5	0
	pt 76	286.0	140.0	1727.0
	pt 80	187.1	337.8	3482.0
時刻歴応答解析 鉛直	pt 49	91.6	27.9	0
	pt 64	130.2	34.4	0
	pt 76	92.3	49.0	599.0
	pt 80	130.7	41.1	386.6

表-5 橋軸方向応答力

	格点	FZ(TON)	MX(T-M)	MY(T-M)
応答スペクトル法 水平	pt 49	70.0	275.4	836.7
	pt 64	71.7	366.6	790.4
	pt 76	152.6	275.4	1353.0
	pt 80	114.9	366.6	1242.9
時刻歴応答解析 水平	pt 49	80.2	215.2	1102.2
	pt 64	108.0	281.0	767.9
	pt 76	177.7	215.2	1489.2
	pt 80	176.1	281.0	1376.5

表-6 橋軸直角方向応答力

4-5 鉛直成分について

水平成分と鉛直成分の最大加速度の発生状態を図-13、図-14においてみると、最大値が同時刻に発生せず、表-5における鉛直反力も道路橋示方書で云う負反力の発生には至らなかった。

図-13 橋軸方向水平成分

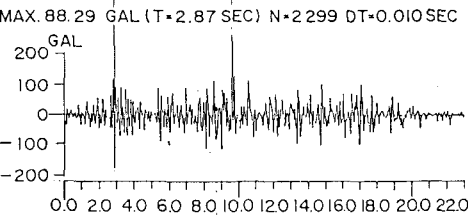
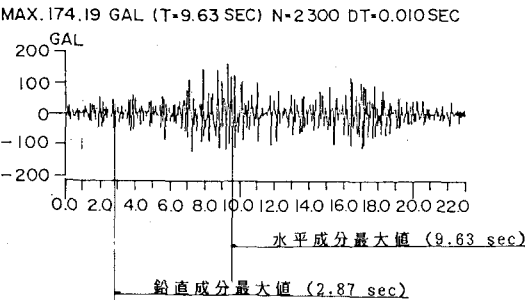


図-14 橋軸方向鉛直成分

5、まとめ

5 径間連続 V 橋脚ラーメン橋を例に動的振動解析を述べてきたが、要約すると以下の通りである。

- (1) 最大加速度の算定については、道路橋示方書算定式 $A = 100 \text{ gal}$ 、土木技術資料方式 $A = 210 \text{ gal}$ では地震波を用いて得た結果、 $A = 210 \text{ gal}$ の値に近い値を示しており土木技術資料方式の方が良いと思われる。
但し、この時のスペクトル倍率曲線は道路橋示方書にて行っている。
- (2) スペクトルの設定については、図-6 加速度応答スペクトル倍率から道路橋示方書と地震波（図-3、図-5）を見ると、ほぼ近似的な形であり道路橋示方書スペクトル倍率を用いても充分良い精度の結果を得られると思う。
- (3) 図-7 における $A = 210 \text{ gal}$ の応答加速度曲線、地震波による応答加速度曲線は、図-8 から 75 年～100 年の再現期間に相当する。
- (4) 代表的固有周期については、刺激係数、有効質量の大きいところから橋軸方向 (X) 第 5 次 ($T = 0.283 \text{ sec}$)、鉛直成分 (Y) 第 6 次 ($T = 0.254 \text{ sec}$)、橋軸直角方向 (Z) 第 1 次 ($T = 1.049 \text{ sec}$) であった。
- (5) 鉛直成分について、どの程度、構造に影響を及ぼすかを最大加速度、部材力からみるならば、図-13、図-14 の比較の中では水平成分の最大値と同時刻に起こる事はなかった。
又、最大加速度 $A = 88 \text{ gal}$ であり、負反力の発生に至らなかった。

以上、一般的判断とはならないが、最近強震記録による耐震問題の研究が多く行われている様であるので、今後耐震設計上有効なデータを発表される事を希望し、その意味でも本報が今後設計上の一助になれば誠に幸いである。

謝 辞

本論文にあたり、北海道開発局道路建設課高松橋梁係長、専修大学金子助教授には有益な御助言を賜り厚く御礼を申し上げる次第である。

参考文献

- 1) 日本道路協会；道路橋示方書（耐震設計編）
- 2) 土木技術資料シリーズ（財団法人、土木研究センター）
 - 1、川島、相沢、高橋；強震記録の統計解析に基づく加速度応答スペクトルの推定式
 - 2、川島；設計地震力と耐震設計
 - 3、川島、相沢、高橋；地震記録の重回帰分析による地震動の最大加速度、最大速度及び最大変位の推定式
 - 4、荒川、川島；動的解析における入力地震動の設定法
 - 5、川島、相沢、高橋；長周期構造物の耐震設計に用いる長周期地震動の特性
 - 6、荒川、川島、相沢；応答スペクトル特性を調整した時刻歴地震応答解析用入力地震動波形
- 3) 川島、相沢、高橋；数値化精度を考慮した S M A C - B 2 型強震計記録の計器補正法および変位計算法（土木学会論文集第 325 号、1982-9）
- 4) 金子孝吉；三成分地震入力による地盤と構造物の解析に関する研究・1983
- 5) 土木研究所報；土木構造物における加速度強震記録
- 6) 松井、下川；耐震設計－主に曲線橋に関する一試例（土木学会北海道支部第 41 号）