

## 多点入力系高橋脚橋の地震応答解析

京野大学工学部

正員 山田喜一

岡山大学工学部

正員 竹宮崇和

京野大学工学部

正員 河野健二

### 1. まえがき

連続高橋脚のような長大構造物では多点入力系としての耐震性についても検討を加える必要がある。一般にこのような構造物の地震応答解析は地震入力としては同時同位相入力により行なわれることが多い。しかし構造物の各入力点間の地震波の相違、あるいは位相差を考慮した多点入力系としての地震応答解析を行なう必要の応答特性を把握しておくことは大切である。

一般に地震波は地表層へ垂直に入射するものと着て同時同位相入力として扱われている。これは地震波の多点同時記録に基づいた構造各部に作用する地震波の間の相関について解明されにくい点が多いため工学的な取り扱い易さなどによるものであるが、構造物の長大化とともに多点入力系の位相差を考慮した解析が行なわれるようになった<sup>1) 2) 3)</sup>。これまでの研究から多点入力系構造物としての応答の特性として(1)地震波の波長に比較して構造物の代表的な長さが無視できない程に大きい長大構造物の地震応答解析には構造部で異なる地震入力、あるいは位相差を持つ入力による応答について着察しておく必要があること、(2)多点入力系としての地震入力も考慮した場合の応答と同時入力の場合の応答を比較すると、変位については前者は後者より若干小さく、応力については一般的に前者は後者より小さいが、部材によっては逆の傾向を示すこともあること、(3)多点入力系としての地震入力を考慮した場合の地震応答は、地盤、構造物、地震波などの特性により大きく変化すること、等が示されている。

本研究では高橋脚を有する多径間橋において多点入力系としての地震応答解析を、地震動入力の位相差を考慮して行ない、地震動の位相差が構造物の応答特性に及ぼす影響について検討した。

### 2. 多点入力系構造物の応答解析法

本研究では Fig. 1 に示すように高橋脚を有する3径間橋を解析モデルとして選定、3次元の梁要素を用いた有限要素法による解析を行ない、橋軸を含む鉛直面内の面内振動とそれに直角な方向の面外振動に分離できることを確かめた後、面外振動のみを取り出した。地震動の位相特性を応答スペクトルを用いて解析できる形として地震<sup>1)</sup>入力を各支点ごとに表わし、各支点の入力が構造物の応答に及ぼす影響を影響関数を用いて表わす。そして小坪らにより示されたように進行性地震波による各入力点間の位相差の影響は割数係数に含める方法を用いた。また各支点での入力を実地震波における位相速度の変化として扱う形で表わし、地震応答解析を行なった。

高橋脚橋モデルの運動方程式は入力点を含む拘束点(赤字 b)と、それ以外の自由節点(蓝字 a)に分けて表わせば

$$\begin{bmatrix} M_{aa} & M_{ab} \\ M_{ba} & M_{bb} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_a \\ \ddot{x}_b \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{aa} & C_{ab} \\ C_{ba} & C_{bb} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_a \\ \dot{x}_b \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{aa} & K_{ab} \\ K_{ba} & K_{bb} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_a \\ x_b \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_a \\ F_b \end{Bmatrix} \quad (1)$$

になる。自由節点の変位  $\{x_a\}$  を支点入力による変位と動的応答による変位に分離すると式(1)は

$$[M_{aa}] \{\ddot{x}_a\} + [C_{aa}] \{\dot{x}_a\} + [K_{aa}] \{x_a\} = [P_{ef}] \{\ddot{x}_b\} \quad (2)$$

$$\text{ただし } [P_{ef}] = -[M_{aa}] [K_{aa}]^{-1} [K_{ab}]$$

と表わされる。式(2)の非減衰時の固有値解析からモーダルマトリクス  $[U]$  を求める。非比例形の減衰マトリクスを仮定すると式(2)は次のように変換される。

$$\{\ddot{\xi}\} + [2\beta_i \omega_i] \{\dot{\xi}\} + [\omega_i^2] \{\xi\} = [\bar{A}] \{\ddot{x}_b\}$$

$$\text{ただし } \{x\} = [U] \{\xi\}, \quad [\bar{A}] = [U] [P_{ef}]$$

地震波は伝播速度  $V$  で橋軸直角方向に対して  $\theta$  の角度で橋梁の一端 ( $\mu=1$ ) から進行するとき、着  $\mu$  点における地震波は  $(\mu-1)$  支点における地震波より次の時間だけ遅れる。

$$\varphi = l_{p-1} \sin \theta / C_s \quad (4)$$

ただし  $l_{p-1}$  は第  $p$  支点と第  $(p-1)$  支点間の距離を表わす。2次モードの最大値は速度応答スペクトルを  $S_v$  とすると

$$g_{ij \max} = S_v A_j / \omega_j \quad (5)$$

$$\text{ただし } A_j = \left\{ \left( \sum_p \bar{A}_{jp} \cos \omega_j \varphi \right)^2 + \left( \sum_p \bar{A}_{jp} \sin \omega_j \varphi \right)^2 \right\}^{1/2}$$

となる。最大応答  $g_{ij \max}$  を求めた後、座標変換を行えば各節点の最大変位を求めることができる。また同様にして各断面の最大断面力を求めることができる。

一方、実地震波が入力する場合の応答解析は時間領域で行われることが多い。この方法は構造物の動的応答に対して低次の固有振動モードの影響が大きい、それにより応答が支配される場合は、非常に効果的である。一方構造物系の応答に地盤を含む基礎の振動特性が大きい影響を持つ場合には、地盤の振動特性が一般に振動数に依存しているため振動数領域での応答解析が必要になる。本研究では地盤の振動特性を考慮してはいるが、FFTを利用して振動数領域での応答解析を行う。式(3)で求めた各次モードに対する運動方程式に関してFFTによる周波数領域での応答を求め、時間領域に変換し、さらに座標変換することにより各節点での応答を求める。一般に全モードに対する応答を求める必要は無く応答に大きく寄与するモードのみを考慮する。式(3)より

$$\{ \dot{x} \} = \int_{-\infty}^{\infty} \{ \ddot{x}_0 \} e^{-i\omega t} dt, \quad \{ \ddot{x}_0 \} = \int_{-\infty}^{\infty} \{ \ddot{x}_0 \} e^{-i\omega t} dt \quad (6)$$

と変換される。ここで各支点の入力地震動に位相差がある場合、第  $p$  点と第  $(p-1)$  点との間の入力の間には、

$$\ddot{x}_{pp} = e^{i\omega \varphi} \ddot{x}_{(p-1)} \quad (7)$$

の関係がある。地震波の位相速度が一定であれば、各振動数に対して同一の位相差を考慮することになる。また分散性の波は各振動数成分に関して異なる位相速度を与えて計算されるが本研究では位相速度は一定として扱う。このように振動数領域での応答計算は、モーダルマトリクスによる自由度の低減と組み合わせると、非常に効果的、経済的に行なうことができる。

### 3. 多点入力系高橋脚橋の地震応答解析

Fig. 1に示すような径間連続高橋脚橋に関して地震入力の位相差が応答特性に及ぼす影響について検討した。解析の対象とした各モデルのスパン長、面外モードの固有振動数を Table 1 に示す。各モデルで固有振動数の接近が見られるが、それぞれは異なる振動モードは異なり、ガタとギヤの連続した形となっている。Fig. 2は各次モードの刺激係数と入力の位相差の関係を表(5)により求めたものである。Sモデルでは地震波の位相速度が0.7~1.0 km/s の時、2次、3次、6次の刺激係数  $\Delta_j$  が極大となり、それよりも大きい速度ではほぼ一定となっている。また1次の  $\Delta_j$  は位相速度とともに大きくなり、一定値に近づいている。

Mモデルでは1次、2次、3次の  $\Delta_j$  は位相速度とともに増加し、1.0 km/s を越えると一定値に漸近している。また4次の  $\Delta_j$  は位相速度が0.7 km/s で極小となり、その後は増加し1.0 km/s で極大になった後減少する。また5次の  $\Delta_j$  は位相速度が0.5 km/s で極小となった後、1.0 km/s まで増加し、その後逆に減少する。

MODEL	S	M	L	
LENGTH OF SPAN (m)	84	120	180	
EIGEN-VALUE (rad/s)	1st	11.20	8.22	4.75
	2nd	11.59	8.22	5.54
	3rd	11.92	8.22	5.54
	4th	13.14	9.96	5.55
	5th	13.16	10.70	5.68
	6th	13.42	12.32	7.58

Table 1

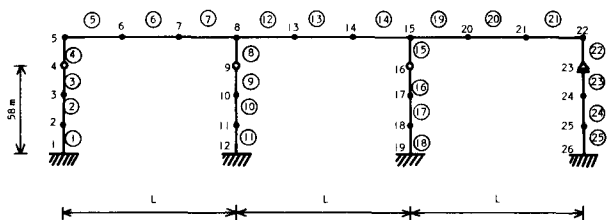


Fig. 1 Analytical Model

4次, 5次モードの割数係数は他のモードに比べ大きいので, 応答に及ぼす位相差の影響は卓越するものと考えられる。また L モデルでは 1 次モードの  $\Delta_j$  は位相速度が 0.3~2.0 km/s の範囲で位相速度の増加に対して減少するが, これを越えると逆に増加する。5 次モードでは位相差の増加とともに  $\Delta_j$  は減少するが, その他の  $\Delta_j$  は位相速度の増加に対して

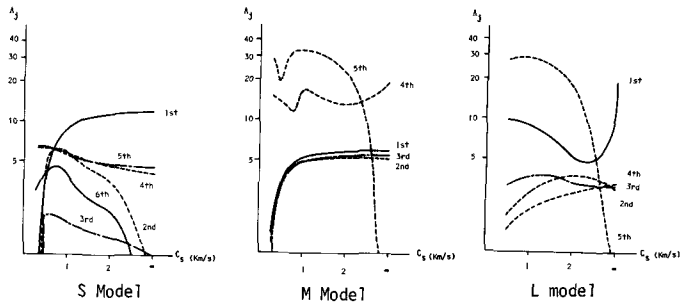


Fig. 2 Relations between Phase Velocity and Participation Factor

漸増する。Fig. 3 は応答スペクトルにこれらの割数係数を用いて求めた最大応答変位を任意の節点について示したものである。地震波が橋軸方向に一定の位相速度で進行し, 最大加速度は橋軸垂直方向で 200gal, 橋軸方向 100gal としている。応答スペクトル曲線は土木学会木造耐震小震のものを用いている。S モデルでは位相速度が 0.5 km/s で変位が極小となり, 1.0 km/s まで漸増し, それを越えるとはほぼ一定の変位応答を示す。M モデルでは位相速度が 0.5 km/s 付近で変位応答が極小となり, それを越えると, スパン中央部では変位がほぼ

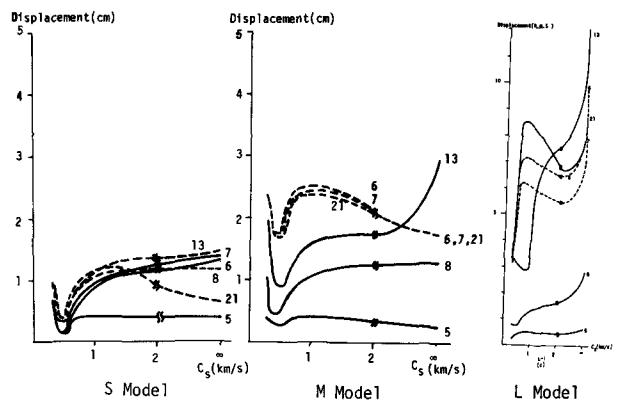


Fig. 3 RMS Displacement by Response Spectrum

一定値に漸進し, サイドスパンでは減少している。また L モデルでは位相速度が 0.5 km/s 付近で変位応答が極小になり, それを越える位相速度では, スパン中央部では変位がほぼ一定値に漸進し, サイドスパンでは減少している。増加するがサイドスパンでは逆に減少する傾向を示している。

これらの変位応答に関する入力の位相差の影響は固有振動モード, 振動数, 位相差および割数係数の大きさから理解される。すなわち応答に及ぼす影響の最も大なる振動モードに対して, 入力する地震波の位相速度に応じて卓越する波の入力方向は異なってくる。従ってこの卓越する振動モードに対する入力波が各点で同位相であれば応答は卓越し, 逆位相の場合は応答は小さくなる。本解析において S モデルでは 4 次, M モデルでは 5 次, L モデルでは 5 次の振動モードが位相速度の小さい時, 応答に大きく影響しているが, 位相速度が 0.5 km/s の場合, これらの振動モードに対して入力は逆位相になるため応答変位が小さくなるものと考えられる。

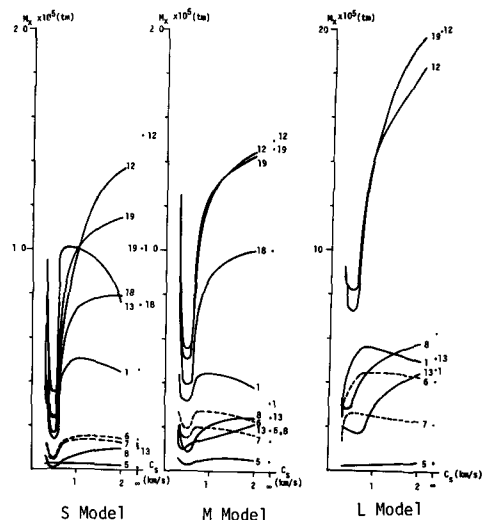


Fig. 4 RMS Bending Moment by Response Spectrum

Fig. 4 は入力地震波の位相差が断面力応答に及ぼす影響を示したものである。橋軸面内の鉛直軸周りの曲げモーメントに関して S モデルでは, ガー部分の断面力は位相速度が 0.5 km/s 位で極小となり, 1.0 km/s 位まで漸増し, それを越えるとサイドスパンでは逆に減少する傾向がある。またセー部分では地震波の位相速度が 0.5 km/s 位で極小になり, 中央

部の橋脚では、漸増した後一定値に近づくが、両端の橋脚では逆に減少する傾向を示している。Mモデルでは断面力の応答は位相速度が0.5 km/sで極小になり、その後増大し1.0 km/sを超えてさらに増加する節点と減少する節点に分かれる。その傾向はSモデルに類似している。またLモデルに関しては、ガーガー部の断面力は位相速度が0.7 km/s位で極大となる後減少する。同様にピヤ一部においては地震波の位相速度が0.5~0.7 km/sで極小になった後増大する中央部の橋脚はガーガー部と類似した挙動を示す両端部の橋脚と異なる。Fig. 5は入力地震波としてTAFT EW(1952)を用

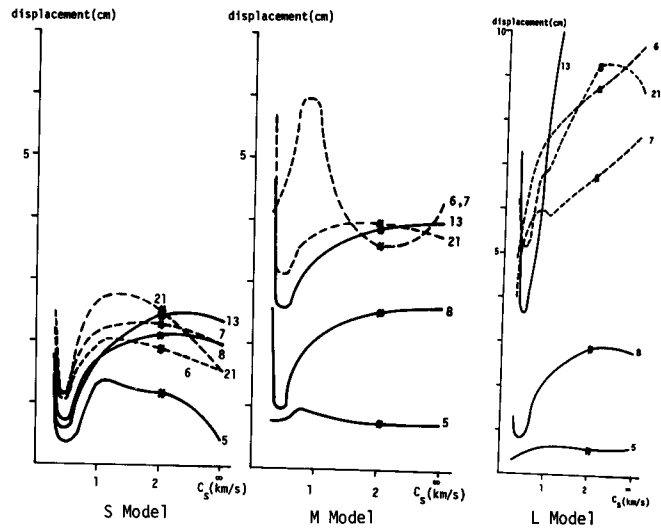


Fig. 5 Maximum Displacement by TAFT EW(1952)

いた場合の変位応答を示したものである。全体的な傾向は応答スペクトルによる解析結果と類似しているが、入力力の振動数成分による影響も表われていることもわかる。以上の解析結果を要約すると次のようになる。

1) 高橋脚橋の地震応答解析に及ぼす入力地震動の位相差の影響は、橋梁の全長、スパン、固有振動数、振動モード、各次振動モードの割係係数、大きさ、位相差によって表わされる。すなわち応答に及ぼす影響の卓越する振動モードに関して各支点の入力波が逆位相であれば小さく、逆に同位相であれば大きくなることわかる。したがって全長が300m~500m程度の高橋脚橋では地震動の位相速度が0.3 km/s~1.0 km/sの間で特に入力力の位相差の影響が大きい。

2) Sモデルの最大応答変位は同時同位相入力の場合と比べて入力の位相差を考慮すると、位相速度が約1.0 km/sで最大となる時でも約1割程度小さくなる。しかし局所的であるが、サイドスパンでは位相速度が約1.0 km/sで位相差を考慮しない場合より約5割程度大きくなる場合もある。またピヤ一部の最大曲げモーメントは位相差を考慮しない場合に比べて位相速度が約1.0 km/sで約2割増加している。一方ガーガー部の最大曲げモーメントは位相差を考慮しない場合とほぼ同程度か小さくなる。また位相速度が0.5 km/s付近で変位および曲げモーメントとも大きな変動を示しているため耐震応答解析にあたっては位相差をとり入力に関する検討を加える必要があると考えられる。

3) Mモデル、Lモデルに関して入力の位相差を考慮するとサイドスパンのガーガー部等部分的に同時同位相入力の場合と比べ応答の増大が示される。しかし一般に入力の位相差を考慮すると応答は同程度か小さくなる。

#### 4. あとがき

本解析では位相速度をパラメータとしており、高橋脚橋の各支点での地震動入力力の位相差による影響は局所的には同時同位相入力に比べ大きくなる場合もある。しかしながら実際には位相速度の正確な評価を行なわねばならず表面波の分散性を考慮した位相差の影響についても検討する必要があると考えられる。

#### 参考文献

- 1) 小坪; 野村; 園田, '進行性地震波による橋梁応答解析への応答スペクトルの利用', 工学論文報告集, 第270号, 1978年2月
- 2) 工岐; 久保, '多点異入力を受ける長大橋の非線形地震応答', 第5回日本地震工学シンポジウム, 1978年11月
- 3) M. Dibay and J. Penzen, 'Response of earth dams to travelling seismic waves' Proc. ASCE, SM2, 1969