

(78) 多スパン連続高架橋のランダム地震応答解析

— 入力位相効果について —

京都大学工学部 正員 山田 善一  
 岡山大学工学部 正員 竹宮 滋和  
 鹿児島大学工学部 正員 河野 健二

1. まえがき

構造物の地震応答解析においては、地震波は地表層へ垂直に入射するものと仮定同時同位相入力として扱われることが多い。しかし連続高架橋のような長大構造物では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いその応答特性を把握しておくことは大切である。

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が考えられる。特に地盤が軟弱になり地盤と構造物の固有周期が接近すると地盤と構造物の動的相互作用が大きくなりその影響を明確にすることが必要となる。したがって多点入力系の地震応答解析においても上部構造-基礎-地盤の動的相互作用を導入して検討を加えるのが適切であると考えられる。さらに構造物の地震応答解析に際しては、架設地点の地盤特性を反映した地震波を用いることが望まれる。

本研究では地盤の振動特性を念頭に入力地震動のパワースペクトルを用いて連続高架橋脚橋の地震応答解析を行なった。サブストラクチャ法を用いて地盤-構造物系の動的相互作用を導入し、入力地震動の位相遅れが構造物の応答特性に及ぼす影響について検討を加えた。

2. 入力地震動の位相差

Fig.1 に示すような連続高架橋脚橋において、各橋脚基礎に作用する地震波は同一のものでなく何らかの相違が示されると考えられる。各橋脚基礎の入力地震波形の相関性は明確でないが、本研究では特に基礎から入射する地震波の伝播特性に注目して、その橋軸方向に殆ど進行性の地震波も考えている。つまり同一の地震波がある位相差をもって各橋脚基礎に作用するものとして解析を行なっている。一般に上部構造物の応答に卓越した影響を及ぼす振動数の範囲は限られており、このような範囲では地震波の分散性は考慮せず位相遅延が一定なものとして扱うことができる。本研究では地盤を上層と下層の二層に分割してより低い地震波は下層地盤内を伝播し、上層地盤を通して上部構造物の各橋脚基礎に入力するものと考えられる。さらに下層地盤から入射する波動が上層地盤内を伝播する時間は、ほぼ同一であり深さ方向の位相遅れを問題にしないならば、この地震波は位相差を有する波動と考えることができる。したがってSH波の波動特性を用いて入力地震動の位相差を導入することにする。基礎上に厚さ一様の上層地盤が存在する場合、基礎からの入力加速度のパワースペクトル強度関数は、基礎の振動特性を考慮して求められる。さらに上層地盤の振動特性を考慮すると、入力加速度のパワースペクトル強度関数は

$$G_s(\omega) = B(\omega) G_B(\omega) \quad (1)$$

と表わされる。ただし  $B(\omega)$  は上層地盤の振動特性を、 $G_B(\omega)$  は下層地盤の振動特性を表わす。基礎から入射し上層地盤を伝播した入力地震波  $\ddot{z}(t)$  の自己相関関数  $R_{\ddot{z}\ddot{z}}(\tau)$  は波動伝播による入力点間の時刻差、 $\tau = t_j - t_k$ 、の関数であり、Wiener-Khinchin の関係を用いると、

$$R_{\ddot{z}\ddot{z}}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} G_s(\omega) e^{i\omega\tau} d\omega \quad (2)$$

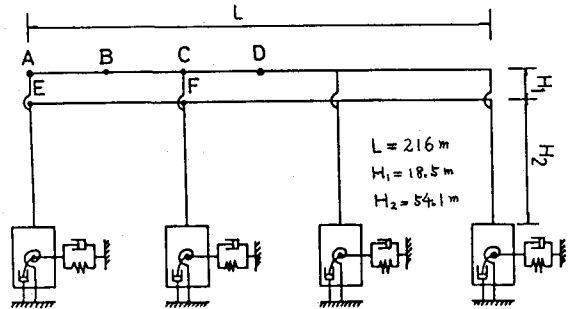


Fig.1 Soil-Footing-Structure System

と表わされる。この積分を行なうと、基礎からSH波が任意の入射角をもって表層地盤へ入射する場合の入力加速度の自己相関関数が求められる。すなわち、

$$R_{\dot{z}_j \dot{z}_k}(\tau) = E[\dot{z}_j(t) \dot{z}_k(t_k)] = A_0 \exp(-\alpha_j \omega_j \tau) [e_1 \cos \omega_j \tau + e_2 \sin \omega_j \tau] \quad (3)$$

$$\text{ただし } \tau = t_j - t_k, \quad \alpha_j = \omega_j \sqrt{1 - \beta_j^2}$$

と表わされる。ここに  $\alpha_j, \omega_j$  は基礎の減衰定数および卓越振動数を表わす。また  $A_0$  は入力地震波のパワースペクトル強度などからなる定数であり、 $e_1$  および  $e_2$  は上層地盤の厚さ、せん断波速度、地震波動の入射角などからなる定数である。いま橋脚の  $j$  と  $k$  なる入力点間に位相差  $\tau_0$  を考慮すると、表層における入力地震波の自己相関関数は  $\tau + \tau_0$  と置くことにより表わされる。

### 3. 入力の位相差を考慮した地震応答解析法

Fig. 1 に示した連続高橋脚橋の解析モデルは、上部構造は三次元的なものであるが、上部構造物の振動性状は橋軸を含む面内振動とそれに直角な面外振動に分離される。そこで高橋脚橋の耐震解析上重要な面外振動のみ注目する。有限要素法による上部構造物の解析においては、各スパン毎に上段桁、下段桁とも4つの要素に、また各橋脚は6つの要素にそれぞれ分割した。また上部構造物の質量マトリックスは、集中質量によって表わす。したがって上部構造物の運動方程式は、

$$[M_{aa}]\{\ddot{x}_a\} + [C_{aa}]\{\dot{x}_a\} + [K_{aa}]\{x_a\} = -[M_{aa}][\beta]\{\ddot{x}_b\} \quad (4)$$

と表わされる。ただしサブスクリプト  $a, b$  はそれぞれ自由節点、拘束節点を表わしている。ここに自由節点の変位  $\{x_a\}$  は拘束点の変位に相当する  $\{x_b\}$  による準静的変位とそれに付加される動的変位  $\{x_d\}$  とに分離される。さらに式(4)の  $[\beta]$  は

$$[\beta] = -[K_{aa}]^{-1}[K_{ab}] \quad (5)$$

と表わされる。また上部構造物に関する減衰マトリックス  $[C_{aa}]$  は比例形として扱うことにする。非減衰時のモーダルマトリックス  $[E]$  を用いると式(4)は、

$$\{\ddot{\xi}\} + [2\zeta_j \omega_j]\{\dot{\xi}\} + [\omega_j^2]\{\xi\} = -[\Delta]\{\ddot{x}_b\} \quad (6)$$

ただし  $\{x\} = [E]\{\xi\}, \quad [\Delta] = [E]^T [M_{aa}][\beta]$

と表わされる。橋脚基礎を固定した場合の地震応答解析は式(6)を用いて行なわれる。波動の伝播にもなる位相の遅れや表層地盤の影響をとり入れた地震動入力の自己相関関数は式(3)の形で表わされるので、これを用いて応答解析を行なうことができる。式(6)から得られる5次モードおよび6次モードに関する応答から、共分散応答は求められる。したがって多点入力系における上部構造物の共分散応答は式(6)から求めた応答を座標変換することによって得られる。すなわち、

$$E[\{x_a\}\{x_b\}^T] = [E](E[\{\xi\}\{\xi\}^T])[E]^T \quad (7)$$

と表わされる。

### 4. 動的相互作用を考慮した地震応答解析法

構造物の動的挙動をより正確に把握するためには、構造物だけでなく上部構造-基礎-地盤を一連の系としてとらえ、構造物と地盤との地震時における動的相互作用を考慮した地震応答解析が必要である。本解析では地盤-構造物系の地震時における動的相互作用を導入し、地盤-基礎系と上部構造物系を別々にとり扱い、接合面である橋脚基礎での連続条件を用いて両者を結合す

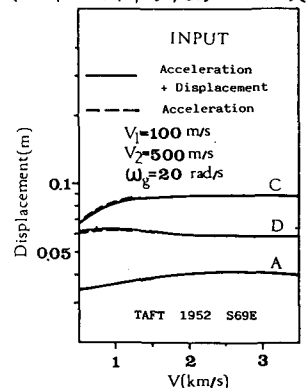


Fig. 2 Displacement Response by Earthquake Inputs

るサブ・ストラクチャ法を用いて行なった。Fig. 1 に示すように各橋脚基礎は表層地盤中に埋め込まれ、底面が下層地盤に達する剛体ケーソンを想定し、ケーソン頂部に橋脚ピヤが剛結されているものとする。地震時に地盤からケーソンに作用する反力を表すオインセーダンス関数を用いて、振動数を独立なバネ・ダンシポット系に変換することにより相互作用系へのモデル化を行なう。ケーソンの振動は橋脚直交方向の並進と重心をわりのロツマングの2自由度を考慮する。上部構造物の運動方程式は式(4)で表わされるため、動的相互作用を考慮した地盤-基礎-上部構造物の全体系の運動方程式は、

$$\begin{bmatrix} [M_{aa}] & [M_{aa}][\tilde{\beta}] \\ [\tilde{\beta}]^T[M_{aa}] & [\tilde{M}_f] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\ddot{x}_a\} \\ \{\ddot{x}_f\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [C_{aa}] & [0] \\ [0] & [C_f] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\dot{x}_a\} \\ \{\dot{x}_f\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [K_{aa}] & [0] \\ [0] & [K_f] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{x_a\} \\ \{x_f\} \end{Bmatrix} = - \begin{Bmatrix} [M_{aa}][\tilde{\beta}]\{\ddot{z}_g\} \\ [\tilde{M}_f]\{\ddot{z}_g\} + [K_g]\{z_g\} \end{Bmatrix} \quad (8)$$

と表わされる。ただし  $[\tilde{M}_f] = [M_f] + [\alpha]^T([M_{bb}] + [\rho]^T[M_{aa}][\beta])[\alpha]$   
 $[K_f] = [K_f] + [\alpha]^T([K_{aa}] + [K_{ba}][\beta])[\alpha]$   
 $[K_g] = -[\alpha]^T([K_{bb}] + [K_{ba}][\beta])$   
 $[\tilde{\beta}] = [\beta][\alpha]$

ここで  $[M_f]$ ,  $[C_f]$ ,  $[K_f]$  はそれぞれ地盤を含む下部構造の質量、減衰、および剛性マトリックスを表す。また  $[\alpha]$  はケーソン頂部の重心に対する相対変位を表すマトリックスである。応答解析は初めに式(6)で求めたモーダルマトリックス  $[\alpha]$  を用いて  $\{x_a\}$  の座標変換を行ない式(8)の自由度の低減を行なう。この変換された系に対して再び固有値解析を行ない共分散応答を求める。この応答の座標変換を行なうと、動的相互作用を考慮した全体系の共分散応答を求めることができる。

### 5. 多点入力系高橋脚橋の地震応答解析

入力の位相遅れが軟弱な地盤上に基礎をもつ連続高橋脚橋の動的応答に及ぼす影響を明らかにするため、本州四国連絡橋のうち春ノ洲高架橋を参考にして Fig. 1 に示すような三径間二層府の高橋脚橋のモデルを設定した。本解析では SH 波速度が 100 m/s ~ 200 m/s 程度の上層地盤と 400 m/s 以上の下層地盤を考えた。基礎のケーソンの高さは 25 m、半径は 17 m、根入れは 20 m として底面は下層地盤に支持されているものとする。また地盤の地震波のパワースペクトル密度関数においては、卓越振動数  $\omega_g$  として 20 rad/sec を考え、減衰定数  $\gamma_g$  は 60% としている。また上部構造物の減衰定数としては 2% を用いている。地盤-構造物系の動的相互作用解析にサブ・ストラクチャ法を適用する際、上部構造物は 10 次までの振動モードを用いて自由度の低減を行なっている。Table は橋脚の基礎部分に地盤に固定された場合と、地盤-構造物の動的相互作用を考慮した場合の固有振動数を示したものである。一般に動的相互作用を考慮すると、表層地盤の影響をうけて基礎が振動しやすくなり全体系の固有振動数が低下する。また上層地盤が一定の場合、下層地盤の剛性ととも全体

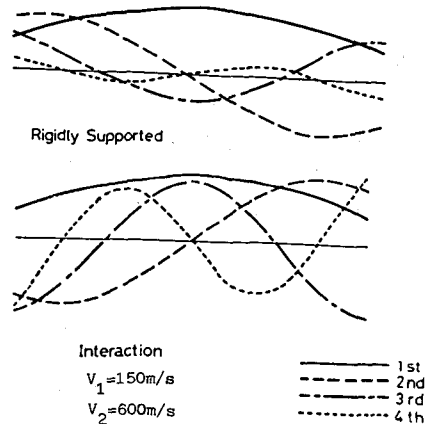


Fig. 3 Vibration Modes (Upper Girder)

MODE	Rigidly Supported	(rad/s)		
		Pier $V_1=100m/s$ $V_2=400m/s$	$V_1=100m/s$ $V_2=500m/s$	$V_1=100m/s$ $V_2=600m/s$
1	9.76	5.65	6.65	7.16
2	11.24	6.29	7.41	7.96
3	14.20	7.87	8.95	9.47
4	19.31	11.36	11.69	11.79
5	26.71	11.92	12.54	12.66

Table  
Natural Frequencies

系の固有振動数も増加するこゝがわかる。

Fig. 3は橋脚の基礎を地盤に固定した場合との動的相互作用を考慮した場合の上段桁の振動モードの一例を示したものである。これらの振動モードを見よと、橋脚の基礎が固定された場合、上段桁では橋脚の影響をほとんど受けていない。地盤との動的相互作用を考慮した場合、振動モードは橋脚の基礎を固定した場合と類似した傾向を示すが、橋脚の振動が基礎を固定した場合と異なるため各振動モードの重みは相違が見られる。多点入力系構造物において、基礎-地盤との動的相互作用を考慮すると式(2)に示すように入力地震動の変位成分の影響が外力として加わる。Fig. 2は地震波の表層入力が大谷に及ぼす影響を示したものである。入力変位は位相速度が小さいとき、変位大谷に若干の影響を及ぼすが、一般に著せざる程度のものであると考えられる。そこで以下の解析では外力として加速度のみを用いるものとする。

Fig. 4は地盤-上部構造物の動的相互作用を考慮したとき上層地盤が上段桁の応答変化に及ぼす影響を示したものである。下層地盤のSH波速度を一定にして、上層地盤のSH波速度が100 m/sと200 m/sの場合の応答を示している。入力の位相差による応答特性は上層地盤が変わってもほぼ同様の傾向を示している。上層地盤が軟らかくなると、橋桁部の変位応答は一般に大きくなっており、表層地盤による偏中が示されている。特に橋桁中央部では同位相入力の場合最大となり、橋桁端部では位相差入力において最大の応答を示す傾向は表層地盤にかかわらず同様のものである。

Fig. 5は上層地盤の変化にもなる動的相互作用特性が、上段橋桁部の橋軸直交方向の曲げモーメント応答に及ぼす影響を示したものである。下層地盤のSH波速度が500 m/sの場合、上層地盤のSH波速度が小さくなると、曲げモーメント応答が増加するこゝが示されている。一般に上層地盤が軟らかくなると基礎が振動しやすくなり応答の増加がみられるが、入力の位相差が応答に及ぼす影響は、上層地盤が変わってもほぼ同様の傾向を示している。下層地盤のSH波速度が500 m/sの場合、上層地盤のSH波速度が100 m/sにおける最大応答は、それを200 m/sの場合に比べ、橋桁中央部で約1.3倍、橋桁端部で約1.2倍をそれぞれ示している。さらに入力の位相差がある場合の最大曲げモーメント応答は最小値の約2倍の大きさがある。このため入力の位相差が応答に及ぼす影響は、上層地盤の振動特性の変化が応答に及ぼす影響に比べ大きくなるこゝも考えられる。

### 6. おわりに

地盤-構造物系の動的相互作用を考慮した連続高橋脚橋を多点入力系構造物として取り扱った入力地震動の位相差が応答に及ぼす影響を調べた。その結果、動的相互作用を考慮すると、橋桁中央部では同位相入力の場合最大となり、橋桁端部では位相差があるとき最大値となっている。また断面力応答は一般に位相差があるとき最大値を示している。これは位相差入力の場合、二次以上の振動モードが応答に及ぼす影響が卓越することによるものであると考えられる。このため入力の位相差と卓越振動モードの関係を把握することにより、動的相互作用特性も含めて構造物の地震応答特性の評価ができることと考えられる。

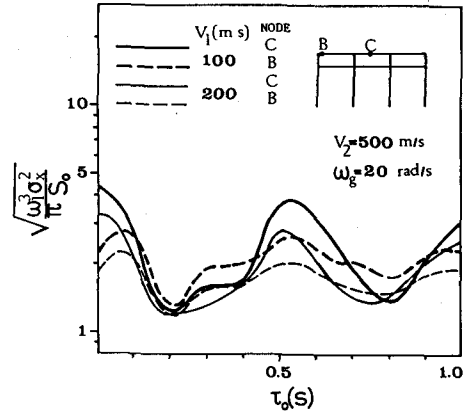


Fig. 4 rms Response vs Phase Lag

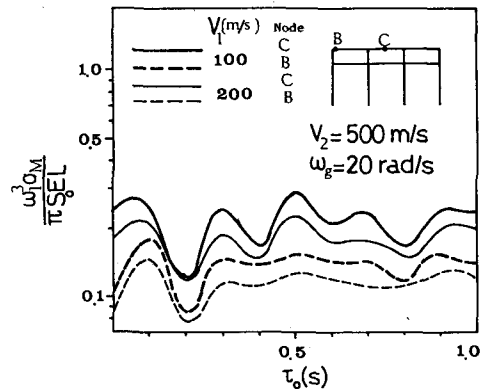


Fig. 5 Bending Moment vs Phase Lag