

# 地盤との動的相互作用を考慮した道路橋橋脚の 周期と減衰定数に関する理論的研究

原田隆典\*・山下典彦\*\*・坂梨和彦\*\*\*

地盤—基礎—橋脚系の動的相互作用を理論的に検討し、橋梁の基本周期と減衰定数が地盤—基礎系および橋脚のどのようなパラメータに関係しているかを実務設計で用いることができる程度までに簡略化した推定式として提案する。本研究で用いる橋梁のモデルは最も簡単なものであるが、地盤—基礎—橋脚系の等価ばねと等価入力という新しい考え方を導くことができ、この考え方に基づくと、地盤—基礎—橋脚系の下部工が1つのばねと入力に置き換えられるので、極めて簡単に上部工の動的特性値が計算できることになる。

**Key Words** : dynamic soil structure interaction, seismic design of bridge

## 1. 序 論

橋梁の基本周期と減衰定数は地震時の最大応答を支配する重要な動的特性値であり、その評価は耐震設計において重要である。しかし、これらの動的特性値は上部構造—橋脚—基礎—地盤との連成振動の結果として定まる物理量であるため、これらを解析的に評価するには、地盤を含めた全体系モデルの動的特性を検討する方法か、または、いわゆる地盤と構造物の動的相互作用の効果をあらかじめ評価しておき、基礎固定条件のもとでの上部構造—橋脚系の動的特性値に動的相互作用の影響を考慮する方法のいずれかの方法によらざるを得ないであろう。本研究では、通常規模の道路橋の一般的な耐震設計体系になじみ易いと思われる後者の方法による立場から、地盤との動的相互作用の効果を考慮して道路橋橋脚の周期と減衰定数を評価する方法を提案する。

耐震設計における地盤と構造物の動的相互作用の研究は、建築物に関連して、1936年妹沢と金井<sup>1)</sup>、1957年 Housner<sup>2)</sup> によって始められ、上部構造の振動エネルギーが基礎を通し周辺地盤に吸収されるいわゆる地下逸散減衰の重要性が指摘された。この地下逸散減衰を評価するには地盤—基礎系の地盤インピーダンス(複素ばね)またはコンプライアンス(複素ばねの逆数)の評価が必要となるため、その後の研究の多くは地盤の複素ばねの合理的評価に向けられ、多くの研究成果により地盤の複素ばねの評価が行えるようになった。直接基礎に対する複素ばねの評価式を利用して、1973年 Jennings ら<sup>3)</sup> や 1974年 Veletsos<sup>4)</sup> は、上部工に比べ基礎の質量が相対的に小さい建築物を対象に、上部工の基本周期と減衰定

数におよぼす地盤との動的相互作用の効果を簡易に表現することに成功した。これらの研究成果は現在、米国の建築物の暫定的耐震基準 ATC-3<sup>5)</sup> に反映されている。

しかし、橋梁では、建築構造物に比べ基礎形式や構造形式が多様であり下部工の質量が相対的に大きいこと、また、根入れの深い基礎に対する地盤の複素ばねの評価に関する研究が少ないこと、更に、設計の段階でどのくらいの根入れを見込んで地盤の複素ばねを評価するのか等の問題点もあるため、橋梁における動的相互作用の効果がどのようなものであるかを簡易に表現できるまでに至っていない。

そこで、本研究では、一般的な道路橋の橋脚と基礎—地盤系を最も簡略化した上部1自由度、基礎2自由度(水平および回転)の振動モデルを用いて、地盤—基礎—橋脚系の動的相互作用を理論的に検討し、橋梁の基本周期と減衰定数が地盤—基礎系および橋脚のどのようなパラメータに関係しているかを実務設計で用いることができる程度までに簡略化した推定式として提案する。本研究で用いる橋梁のモデルは最も簡単なものであるが、地盤—基礎—橋脚系の等価ばねと等価入力という新しい考え方を導くことができ、この考え方に基づくと、地盤—基礎—橋脚系の下部工が1つのばねと入力に置き換えられるので、極めて簡単に上部工の動的特性値が計算できることになる。免震支承が存在するような場合は、本研究で提案する等価ばねと直列につないで免震支承の効果を導入することもできる。また、連続橋への応用もできる。このような等価ばねと等価入力の考え方の応用に関しては別の論文で述べる<sup>15)</sup>。

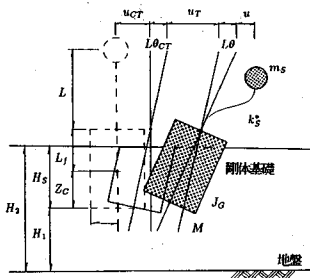
## 2. 解析モデルと等価ばね、等価入力の考え方

一般道路橋あるいは建築構造物を最も簡略化した振動モデルとして、図—1に示すような上部工の水平1自由度と基礎の水平・回転の2自由度(地盤—基礎系は

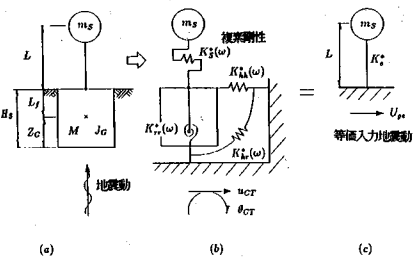
\*正会員 工博 宮崎大学工学部助教授 土木環境工学科  
(〒889-21 宮崎市学園木花台西1-1)

\*\*学生会員 工修 京都大学大学院博士課程学生

\*\*\*正会員 (株)長大



図一 解析モデルとその記号



図二 基礎上面における地盤との動的相互作用モデル

Sway-Rocking モデル (SR モデル) とする) を有する合計 3 自由度モデルを考察する。

基礎周辺地盤が地震時に基礎一橋脚へ及ぼす効果は次のように定義される有効地震動  $u_{CT}$ ,  $\theta_{CT}$  および地盤の複素ばね  $K_{hh}^*$ ,  $K_{rr}^*$ ,  $K_{hr}^*$  ( $=K_{rh}^*$ ) によって表すことができる。

- ・有効地震動：地盤—基礎系モデルにおいて基礎の質量を零としたときの基礎の地震応答値。地表面レベルでの無質量基礎の地震応答値の水平、回転成分を  $u_{CT}$ ,  $\theta_{CT}$  とする。
- ・地盤の複素ばね：地盤—基礎系モデルにおいて、無質量基礎に単位の変位を与えるために必要な力。地表面レベルでの複素ばねの水平、回転成分およびそれらの連成成分を  $K_{hh}^*$ ,  $K_{rr}^*$ ,  $K_{hr}^*$  ( $=K_{rh}^*$ ) とする。

この有効地震動は周辺地盤から基礎一橋脚へ入力される地震動を表すものであり、一方、地盤の複素ばねは基礎一橋脚の振動に対する地盤の抵抗や振動エネルギーの周辺地盤への逸散を代表する。もちろん、上記のように定義される有効地震動と複素ばねを用いれば、有限要素法などによって地盤—基礎—橋脚—上部構造の全体系解析をした場合と同じ結果が得られる<sup>61-63</sup>。したがって、図一の解析モデルは図二 (b) に示すようなばね・質点系モデルに置き換えられる。

図二 (b) に示すように基礎上面 (=地表面レベル) および上部質点を力のつり合を考慮する位置とすると、振動数領域における 3 自由度系の運動方程式は次のように表わされる。

$$\begin{bmatrix} -m_s\omega^2 + K_s^*(\omega) & -m_s\omega^2 \\ -m_s\omega^2 & -(m_s + M)\omega^2 + K_{hh}^*(\omega) \\ -m_sL\omega^2 & -(m_sL - ML_f)\omega^2 + K_{rr}^*(\omega) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ u_r \\ \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_s\omega^2 \\ (m_s + M)\omega^2 \\ (m_sL - ML_f)\omega^2 \end{bmatrix} u_{CT}$$

$$+ \begin{bmatrix} m_sL\omega^2 \\ (m_sL - mL_f)\omega^2 \\ (m_sL^2 + J_G + ML_f^2)\omega^2 \end{bmatrix} \theta_{CT} \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 $\omega$  = 振動数、 $m_s$  = 上部質点の質量、 $M$  = 基礎の質量、 $J_G$  = 基礎重心回りの質量モーメント、 $K_s^* = k_s + i\omega c_s$  = 橋脚の複素ばね、 $k_s$  = 橋脚のばね係数、 $c_s$  = 橋脚の減衰係数、その他の記号に関しては、図一に示すようである。

式 (1) を橋脚の相対変位  $u$  に関して解くと、次のように整理することができる。

$$[-m_s\omega^2 + K_s^*] U_e = m_s\omega^2 U_{ge} \quad \dots \dots \dots (2)$$

ここに、

$$K_e^* = \frac{K_s^* A}{A + K_s^* B}, \quad U_e = \frac{K_s^*}{K_e^*} u \quad \dots \dots \dots (3)$$

$$U_{ge} = \frac{C}{A} u_{CT} + \frac{D}{A} L \theta_{CT} \quad \dots \dots \dots (4)$$

また、

$$A = MJ_G\omega^4 - [J_G K_{hh}^* + ML_f(L_f K_{hh}^* + 2K_{hr}^*) + MK_{rr}^*] \omega^2 + (K_{hh}^* K_{rr}^* - K_{hr}^{*2}) \quad \dots \dots \dots (5)$$

$$B = -[J_G + M(L + L_f)^2] \omega^2 + (K_{rr}^* + K_{hh}^* L^2 - 2K_{hr}^* L) \quad \dots \dots \dots (6)$$

$$C = -[J_G K_{hh}^* + M(L + L_f)(L_f K_{hh}^* + K_{hr}^*)] \omega^2 + (K_{hh}^* K_{rr}^* - K_{hr}^{*2}) \quad \dots \dots \dots (7)$$

$$D = -\left[ \frac{J_G K_{hr}^*}{L} + \frac{M(L + L_f)}{L^2} (L_f K_{hr}^* + K_{rr}^*) \right] \omega^2 + (K_{hh}^* K_{rr}^* - K_{hr}^{*2}) \quad \dots \dots \dots (8)$$

ここに、 $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$  は地盤—基礎系の諸定数 (基礎の質量  $M$ ,  $J_G$ , 地盤—基礎系の複素ばね  $K_{hh}^*$ ,  $K_{rr}^*$ ,  $K_{hr}^*$ , 基礎重心点から基礎上面までの距離  $L_f$ ) と上部 1 質点系の高さ  $L$  のみの関数として与えられ、これらには上部 1 質点系の質量とばね係数および減衰係数は含まれない。したがって、式 (2) は図二 (c) に示すような基礎固定の 1 自由度系に地震動が作用するときの振動数領域での運動方程式であり、 $K_e^*$ ,  $U_{ge}$  および  $U_e$  は地盤と基礎および橋脚の動的相互作用を考慮した橋脚の複素ば

ね、橋脚への入力地震動および橋脚の相対変位であると解釈することができる。以後、これらを等価複素ばね、等価入力、等価相対変位と呼ぶ。したがって、等価複素ばね  $K_e^*$  と等価入力  $U_{oe}$  を調べることににより、1 質点系に及ぼす動的相互作用の影響が検討できることになる。

式(3)と式(4)で定義される等価複素ばねと等価入力は、また、次のような物理量として定義することができる。

- ・等価入力：図-1において、上部1質点の質量を零としたときの上部1質点の地震応答絶対変位。
- ・等価複素ばね：図-1において、地震入力のない状態で、上部1質点の質量を零とし、この点に単位の水平変位を与えるのに必要な力。

このような物理的定義は有効地震動と地盤の複素ばねの定義を導いたのとまったく同じ考え方より<sup>6)~8)</sup>、導くことができるが、上記の定義に従って式(1)を展開すると、式(3)と式(4)で定義される等価複素ばねと等価入力が求められる。なお、等価相対変位  $U_e$  は実際の相対変位  $u$  と式(3)の関係にあるので、橋脚に作用する力は等価相対変位と等価複素ばねの積として与えられる。また、上部質点の地震応答絶対変位は  $U_{oe} + U_e$  として与えられ、これは等価モデルの上部質点の地震応答絶対変位に等しい。

式(2)から、動的相互作用を考慮した上部1質点系の固有周期  $T$  と減衰定数  $h$  は次のように表される。

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m_s}{Re(K_e^*)}} \dots \dots \dots (9)$$

$$h = \frac{Im(K_e^*)}{2\omega \sqrt{m_s Re(K_e^*)}} \dots \dots \dots (10)$$

ここに、 $Re(K_e^*)$  と  $Im(K_e^*)$  は等価複素ばねの実数部と虚数部を表す。等価複素ばねは振動数の関数であるため、式(9)で与えられる固有周期は繰り返し計算によって収束したときの振動数に対応する周期を意味する。この振動数の時の式(10)の値として減衰定数が与えられる。

式(9)と式(10)の周期と減衰定数および式(4)の等価入力が、地盤-基礎-上部構造系の特性によってどのようになるかが解れば、応答スペクトルを用いた現行の耐震設計の手順の中に動的相互作用の効果が簡単に取り込めることになる。

### 3. 等価複素ばねと等価入力の特性

等価複素ばね  $K_e^*$  と等価入力  $U_{oe}$  の振動数特性がどのようなものであるかを調べるために、一般道路橋を対象に種々の地盤-基礎系および上部構造系をモデル化した数値計算を行った。数値計算では、若原ら<sup>10)</sup>が地下逸散減衰の特性を調べるために用いた一般道路橋(道路橋示方書で設計が取り扱われる支間200m以内、橋脚高

さ20m未満)の橋脚・基礎構造系の橋軸方向の水平振動モデルをそのまま用いた。すなわち、基礎は剛体基礎とし、埋設深さが極浅い場合を直接基礎、ある程度埋設深さが深くなった場合はケーソン基礎として取り扱うことにした。橋脚は橋桁重量  $W_u$  と橋脚重量  $W_p$  を考慮した質量  $m_s$  の1質点の集中質量系にモデル化し、基礎上面位置から橋脚天端までの高さ  $L$  の位置に設けることにした。また、橋脚のばね係数  $k_s$  は基礎固定時の橋脚の基本固有周期  $T_s$  から求めることとした。また、基礎固定時の橋脚の減衰定数  $h_s$  は0.02と0.05の二通りを仮定した。

$$m_s = (W_u + W_p) / 3 / g \dots \dots \dots (11)$$

$$k_s = m_s (2\pi / T_s)^2 \dots \dots \dots (12)$$

地盤の複素ばねに関しては、現在では、有限要素法、境界要素法、あるいは弾性波動理論を用いてかなり厳密に評価できるが、これらの精密な方法は数多くの地盤-基礎系に対するパラメータ解析を必要とする本研究には適さないので、原田ら<sup>9)</sup>による3次元弾性波動理論に基づく近似的評価式を用いることとした。この近似式は円柱剛体基礎という条件があるが、既往の有限要素法や弾性波動理論から厳密に求められるものと比較され、よい近似を与えること、起振機実験結果をうまく説明することが確かめられている。

解析ケースは基礎の埋設深さ  $H_s$  に関して5種類、橋脚の種別に関して9種類、上部工の減衰定数に関して2種類の合計  $5 \times 9 \times 2 = 90$  ケースである。その詳細は以下のようなものである(図-3、表-1参照)。

#### (1) 地盤のデータ

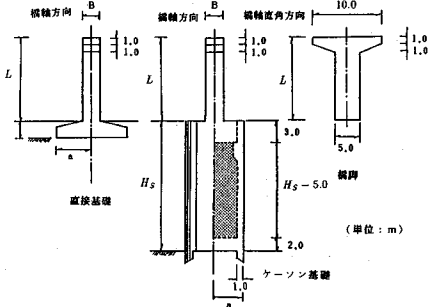
解析で対象とした地盤は基礎が定着する支持地盤と表層地盤からなるものとした。表層地盤のせん断波速度  $V_{ss} = 80$  m/sec、基礎の高さ  $H$  は直接基礎に対して5m、ケーソン基礎に対して10m、20m、30m、および40mとした。また、支持地盤のせん断波速度  $V_s = 500$  m/secとした。更に、表層地盤の単位体積重量は  $1.5$  tf/m<sup>3</sup>、ポアソン比0.45とし、支持地盤では、単位体積重量  $1.8$  tf/m<sup>3</sup>、ポアソン比0.3を用い、表層の地盤材料の減衰定数  $D_s$  は無視することにした。

#### (2) 基礎のデータ

基礎形式は前述のとおり直接基礎とケーソン基礎とし、いずれも半径  $a = 5$  mの円筒剛体とする。図-3に示すように直接基礎は中実断面であり、ケーソン基礎は中詰砂で充填された中空断面とした。基礎底面は支持地盤に接しており基礎の埋設深さ  $H_s$  は基礎の高さ  $H$  と等しく、直接基礎に対して5m、ケーソン基礎に対して10m、20m、30mおよび40mとした。更に、基礎の単位体積重量は  $2.5$  tf/m<sup>3</sup>、ケーソン基礎の中詰砂の単位体積重量は  $1.5$  tf/m<sup>3</sup> である。

表—1 橋脚の解析定数

橋脚種別 Case	3径間固定橋脚			単純固定橋脚			単純可動橋脚		
	A	B	C	D	E	F	G	H	I
橋脚高さ $H_s$ (m)	10.0	15.0	20.0	10.0	15.0	20.0	10.0	15.0	20.0
橋軸方向の橋脚幅 B(m)	2.2	2.6	3.0	1.8	2.0	2.2	1.6	1.7	1.8
橋桁重量 $W_s$ (tf)	900.0	900.0	900.0	300.0	300.0	300.0	0.0	0.0	0.0
橋脚重量 $W_p$ (tf)	316.3	536.3	806.3	258.8	412.5	591.3	230.0	350.7	483.8
断面2次 モーメント I(m <sup>4</sup> )	4.44	7.32	11.25	2.43	3.33	4.44	1.71	2.05	2.43
変形量 $\delta_s$ (m)	0.0289	0.0625	0.1040	0.0201	0.0551	0.1099	0.0052	0.0220	0.0612
固有周期 $T_1$ (sec)	0.34	0.50	0.65	0.28	0.47	0.67	0.15	0.31	0.50



図—3 解析に用いた橋脚と基礎の諸元

(3) 橋脚のデータ

解析の対象とした道路橋橋脚は、その橋桁として支間長 30 m、幅員 10 m、単位長さ当りの橋桁重量 10 tf/m<sup>3</sup> の鋼製橋桁を考え、また、橋脚としては、3径間固定、単純固定、単純可動橋脚を考えた。この場合のおおのの橋脚の高さは 10 m、15 m および 20 m の 3 種類である。

図—4 は表—1 の単純固定橋脚の橋脚高さ  $L=10$  m の場合の等価ばね係数 (等価複素ばねの実数部) の振動数特性をプロットしたものである。基礎の埋設深さはそれぞれ 5, 10, 20, 30, 40 m である。また、図—5 は等価減衰定数 (式(10)と同じ) の振動数特性を示す。

図—4 に示すように、等価ばね係数は基礎のみの 1 次固有振動数より低い振動数領域では、振動数 = 0 の時の値とほぼ同じであるのに対して、高い振動数領域では、基礎固定時の橋脚のばね係数 (剛性) の値をとることがわかる。さらに、直接基礎 (図—4, 5 m の場合) では、基礎の質量が小さいので基礎のみの固有振動数が高くなって、等価ばね係数は振動数 = 0 の時の値で近似できる。一方、動的相互作用を考慮した減衰定数は、図—5 に示すように、基礎のみの 1 次固有振動数の時にピークを有する。このことは、基礎が振動し易いときに上部構造系は振動し難くなるという、いわゆる基礎によるダイナミックダンパーの効果が現れていることを意味している。直接基礎では、基礎の質量が小さいので基礎のみの固有振動数が高くなって、減衰定数は振動数 = 0 の時の値で近似できる。

図—6 は等価入力の変達関数  $|C/A|$  の振動数特性を示すが、基礎の減衰固有振動数において、わずかな増幅を示し、この振動数より高い振動数では伝達率は減少する。図を省略するが、伝達関数  $|D/A|$  の振動数特性も  $|C/A|$  と同様である。この様な等価入力の変達関数の振動数特性は基礎の振動による地震波の増幅と低減によるが、周辺地盤への振動エネルギーの逸散 (地下逸散減衰) が大きいために、基礎の固有振動数においてもわずかな増幅のみが生じる。等価入力のこのような振動数特性は入力地震動のスペクトル特性に関する興味深い問題を含むが<sup>13),14)</sup>、本論文では、等価複素ばねに関係する橋梁の基本周期と減衰定数の推定式のみを扱うものとする。

そこで、図—4 と図—5 のような等価ばね係数と減衰定数の振動数特性を次のようにモデル化するものとする。すなわち、等価ばね係数は基礎のみの減衰 1 次固有振動数よりも低い振動数領域では、振動数が零での値を用い、高い振動数領域では、基礎固定時の橋脚のばね係数とする。また、減衰定数は基礎の根入れ部の地盤の固有振動数よりも低い振動数領域では、振動数 = 0 の時の値を用いて、これより高い振動数領域では、基礎の減衰 1 次固有振動数のときにピークを持ち、さらに高い振動数では基礎固定時の橋脚の減衰定数に収束するようにモデル化する。

4. 動的相互作用を考慮した周期と減衰定数

以上の等価ばねと減衰定数の振動数特性のモデル化に従うと、式(9)と式(10)で与えられる、地盤との動的相互作用を考慮した道路橋の固有周期  $T$  と減衰定数  $h$  は次のように近似できる<sup>11)</sup>。

(1) 直接基礎、抗基礎を含み基礎の質量が大きくない場合は、

$$T = R_1 T_s, \quad h = h_s \left( \frac{1}{R_1} \right)^3 + h_1 \dots \dots \dots (13)$$

ここに、 $T_s$ ,  $h_s$  は基礎固定時の橋脚の固有周期と減衰定数で、また、 $R_1$ ,  $h_1$  は次式のように地盤—基礎系の静的ばね係数と減衰係数および基礎固定時の橋脚の静的ばね係数から決まる定数である。

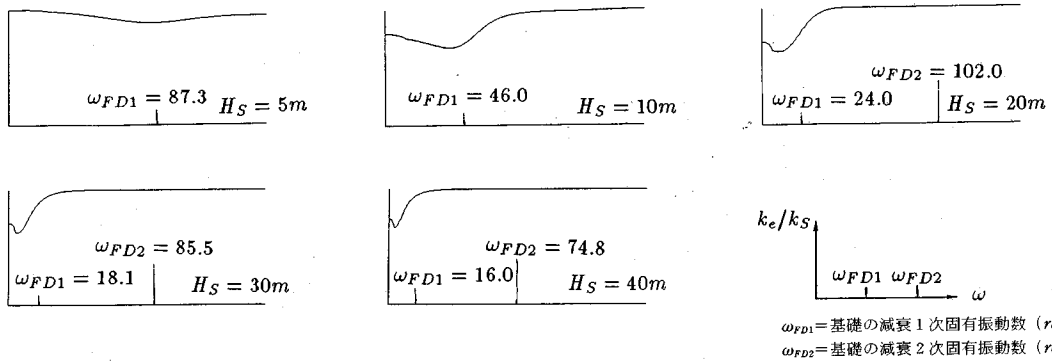


図-4 等価ばね係数の振動数特性の例 (単純固定橋脚 橋脚高 10m 基礎固定橋脚のばねで規準化)

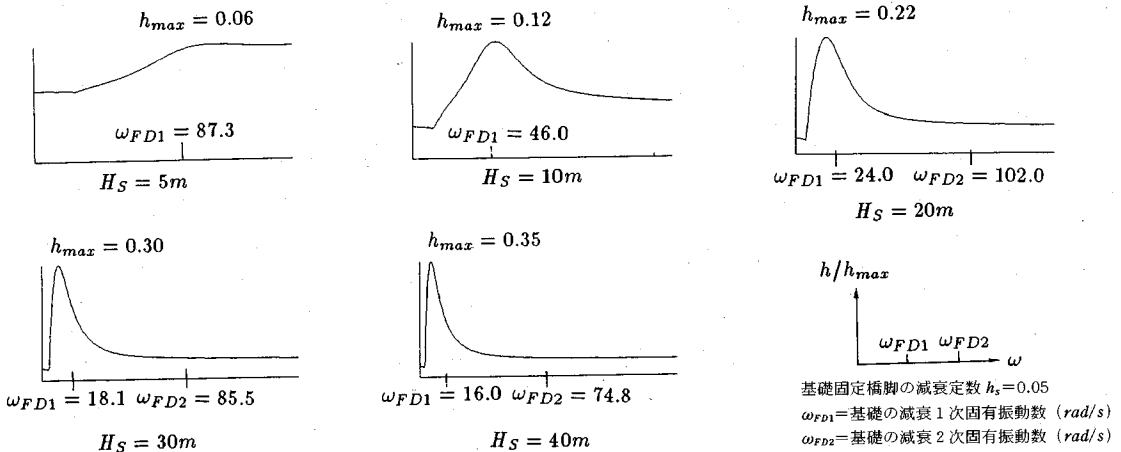


図-5 減衰定数の振動数特性の例 (単純固定橋脚, 橋脚高 10m)

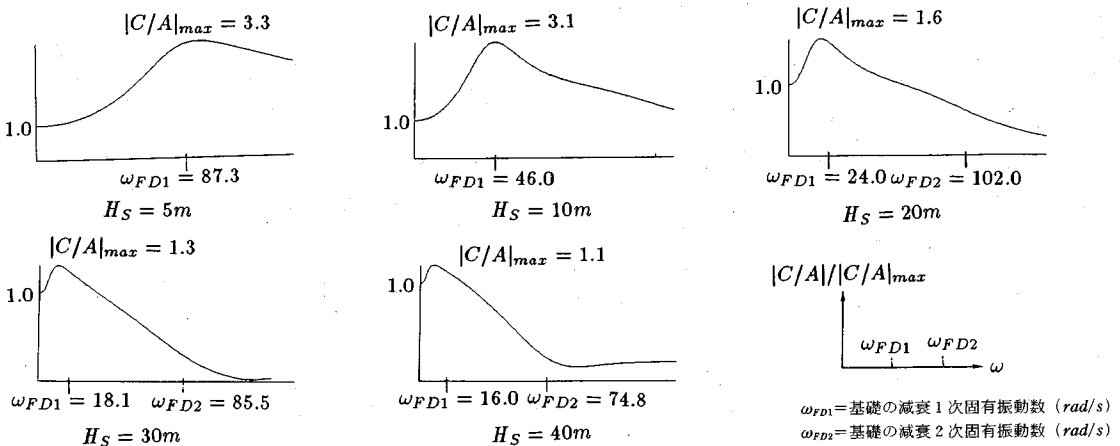


図-6 等価入力の変達関数|C/A|の振動数特性の例 (単純固定橋脚, 橋脚高 10m)

$$R_1 = \sqrt{1 + k_s \left( \frac{L^2}{k_{rr}} + \frac{1}{k_{hh}} \right)} \quad \dots \quad (14)$$

$$T_h = 2\pi \sqrt{\frac{m_s}{k_{hh}}}, \quad T_r = 2\pi \sqrt{\frac{m_s L^2}{k_{rr}}} \quad \dots \quad (16)$$

$$h_1 = \left( \frac{1}{R_1} \right)^3 \left[ h_h \left( \frac{T_h}{T_s} \right)^3 + h_r \left( \frac{T_r}{T_s} \right)^3 \right] \quad \dots \quad (15)$$

$$h_h = \frac{c_{hh}}{2\sqrt{m_s k_{hh}}}, \quad h_r = \frac{c_{rr}}{2\sqrt{m_s L^2 k_{rr}}} \quad \dots \quad (17)$$

式 (15) のパラメータは,

ここに,  $c_{hh}$ ,  $c_{rr}$ ,  $k_{hh}$ ,  $k_{rr}$  は地盤の減衰係数と動的ばね係数 ( $\omega=0$ の値) の並進, 回転成分を意味する。なお,

直接基礎や杭基礎では、フーチングの根入れが浅いので、地盤の複素ばねにおける連成項  $K_{rr}^*$  が小さい。そこで、式(14)と式(15)では連成項を落としている。なお、数値計算では、杭基礎について具体的検討をしていないが、基礎の質量効果は小さいので、杭基礎に対しては、直接基礎と同じ上記の近似式が成り立つものと思われる。

(2) 埋設深さ 5 m 以上の深いケーソン基礎を有する場合は、

$$T = \begin{cases} R_2 T_s & T \geq T_{FD} \\ T_s & T < T_{FD} \end{cases}, \quad h = h_s + h_2 \dots \dots \dots (18)$$

ここに、 $R_2$ 、 $h_2$  は次式のように地盤の静的ばね係数と減衰係数および基礎固定時の橋脚の静的ばね係数および基礎の減衰固有周期  $T_{FD}$  から決まる定数である。また、 $T_s$  は表層地盤の固有周期である。ケーソン基礎のように埋設深さが深い場合には、基礎の質量効果が無視できなくなり、基礎の固有周期が橋脚の固有周期と減衰定数に影響してくるために、式(18)のように表される。

$$R_2 = \sqrt{1 + k_s \left[ \frac{k_{rr} + k_{hh} L^2 - 2 \operatorname{sgn}(k_{hr}) L |k_{hr}|}{k_{hh} k_{rr} - k_{hr}^2} \right]} \dots \dots (19)$$

ここに、 $k_s$  = 基礎固定時の橋脚の曲げ剛性、 $k_{rr}$  = 地盤の回転ばね係数、 $k_{hh}$  = 地盤の水平ばね係数、 $k_{hr}$  = 地盤の連成ばね係数、 $T_{FD}$  = 基礎の減衰固有周期、

$$\operatorname{sgn}(k_{hr}) = \begin{cases} 1 & k_{hr} > 0 \\ -1 & k_{hr} < 0 \end{cases} \dots \dots \dots (20)$$

基礎の減衰固有周期は次式から算定される。

$$T_{FD} = \frac{T_F}{\sqrt{1 - h_F^2}} \dots \dots \dots (21)$$

$$T_F = 2\pi \sqrt{\frac{2MJ_G}{b_T - \sqrt{b_T^2 - 4MJ_G(k_{hh}k_{rr} - k_{hr}^2)}}} \dots \dots (22)$$

ここに、

$$b_T = J_G k_{hh} + ML_f(L_f k_{hh} + 2k_{hr}) + Mk_{rr} \dots \dots (23)$$

$$h_F = 1 - \exp \left[ -2.0 \left( \frac{H_s}{40} \right)^2 \right] \dots \dots \dots (24)$$

ここに、 $M$  = 基礎の質量、 $J_G$  = 基礎の慣性質量モーメント、 $L_f$  = 基礎重心点から基礎上面までの距離、 $H_s$  = 基礎の根入れ深さ。

式(18)の  $h_2$  は、動的相互作用によって橋脚の減衰定数に付加される減衰定数で、次式で与えられる。

$$h_2 = \left[ 0.7 \frac{1}{2} \left( \frac{T_{FD}}{R_2 T_s} \right) \sqrt{R_2^2 - 1} - h_s \left( 1 - \frac{0.7}{R_2} \right) \right] H(T) \dots \dots \dots (25)$$

ここに、 $T_{FD}$  = 基礎の減衰 1 次固有周期、 $T_s$  = 基礎固定時の 1 質点系の固有周期、 $R_2$  = 動的相互作用による固有周期の補正係数。また、 $H(T)$  は図-5 のような減衰定数の振動数特性を次式のように近似した関数である。

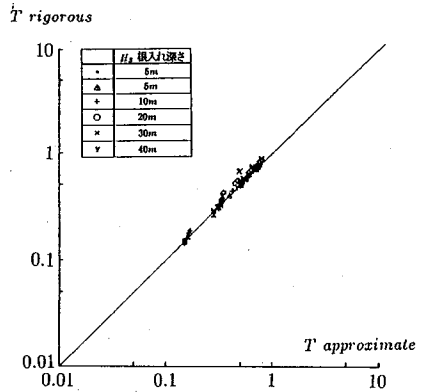


図-7 厳密および推定式による周期の比較

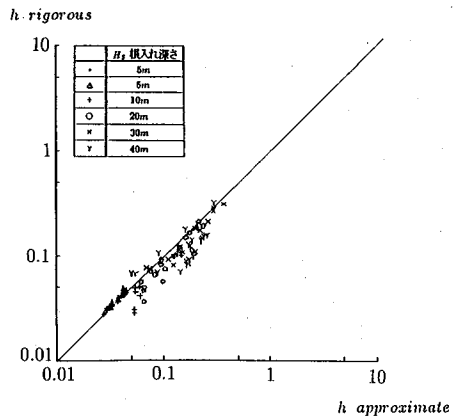


図-8 厳密および推定式による減衰定数の比較

$$H(T) = \frac{rXe^{-X}}{(1-X)^2 + rXe^{-X}} \dots \dots \dots (26)$$

$$X = \frac{T_{FD}}{T} \frac{T - T_s}{T_{FD} - T_s}, \quad r = 10 \left( \frac{H_s}{40} \right)^2 \dots \dots \dots (27)$$

ここに、 $T_s$  = 基礎の根入れ深さに相当する地盤部分の固有周期。

5. 近似式と数値解析および経験式との比較

式(13)、(18)による近似値と式(2)を直接解いて、最大応答を与える振動数とその振動数における式(10)より求められる厳密な減衰固有周期と減衰定数を比較すると、図-7、8に示すように両者はよく一致している。

また、橋脚の減衰定数に関しては、経験式として、 $h = 0.02/T$  と言うように橋脚の固有周期に反比例して減衰定数が小さくなることが知られているが<sup>12)</sup>、図-9に示すように本研究の近似式(13)、(18)によってもそのような傾向がみられる。ただし、ばらつきは大きい。このことは経験式のように橋脚の固有周期のみの関数では、減衰定数は表しきれず、式(13)、(18)に示すようなパラメータの関数とする方がより厳密であることを意味して

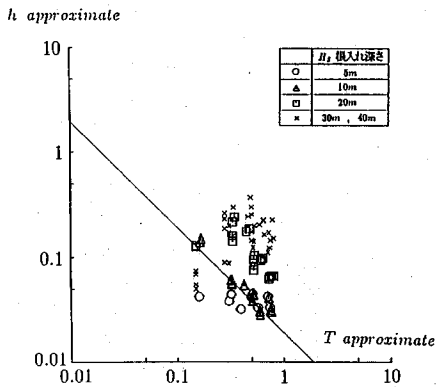


図-9 推定式による減衰定数と経験式(実線  $h=0.02/T$ )の比較

いる。

## 6. 結 論

本論文では、道路橋を主な対象構造物として、地盤との動的相互作用の効果を耐震設計指針に盛り込めるように、この効果を簡潔に表現することを目的として、橋梁を最も単純化した上部1自由度、基礎2自由度(水平および回転)の振動モデルを用いて、地盤-基礎-橋脚系の動的相互作用の効果を理論的に検討した。以下に本研究で得られた成果をまとめる。

1. 本研究で用いる橋梁のモデルは最も簡単なものであるが、地盤-基礎-橋脚系の等価ばねと等価入力という新しい考え方を導くことができ、この考え方に基づくと、地盤-基礎-橋脚系の下部工が1つのばねと入力に置き換えられるので、極めて簡単に上部工の動的特性値が計算できる。等価ばねは橋梁の基本周期と減衰定数に関係し、他方、等価入力地震入力に関係する。
2. 等価ばねと等価入力の考え方をを用いて、橋梁の基本周期と減衰定数が地盤-基礎系および橋脚のどのようなパラメータに関係しているかを実務設計で用いることができる程度までに簡略化した推定式として提案した。
3. 提案した橋梁の基本周期と減衰定数の推定式は、直接基礎や杭基礎などのように基礎の質量が上部工に比べて小さい場合には、ATC-3<sup>51</sup>のものと一致する。ケーソン基礎などのように基礎の質量効果が無視できない場合には、新たにパラメータとして、基礎の減衰1次固有振動数が加わる。振動数が基礎の減衰(1次)固有振動数に等しいときに、橋梁の減衰定数は最も大きな値となる。
4. 提案した橋梁の基本周期と減衰定数の推定式は、ここで用いた解析モデルより厳密に得られるものと比較し、その精度のよいことを確認した。

5. 橋梁の減衰定数に関しては、橋梁の基本周期に逆比例するという経験式があるが、本研究の推定式はこの経験式の大局的特性を表現できる。しかし、減衰定数は橋梁の基本周期のみで整理するとばらつきが大きくなり、このばらつきは提案する推定式により地盤-基礎および橋脚の諸特性の関数として説明できる。
6. 等価入力地震は、基礎の減衰固有振動数において、わずかな増幅を示すが、これより高い振動数では、振動数とともに減少する。したがって、橋梁を基礎固定の1自由度系としてモデル化し、応答スペクトルによって地震力を算定する場合、基礎の減衰固有振動数より高い振動数の地震波は等価入力の特性によって低減される。等価入力のモデル化や応答スペクトルの低減率に関しては、今後の問題とするが、本研究によると、橋梁を基礎固定の1自由度系としてモデル化し、応答スペクトルによって地震力を算定する場合、自然地盤の地震波の応答スペクトルには、基礎寸法と地震波の空間的変動の割合より決まる有効地震動および基礎の質量効果の2つの効果による高振動数の地震波の低減効果が含まれることとなる。
7. なお、本研究で述べた地盤-基礎-橋脚系の等価ばねと等価入力の考え方は、免震支承が存在するような場合には、本研究で提案する等価ばねと直列につないで免震支承の効果を導入することもできる。また、連続橋への応用もできる。このような等価ばねと等価入力の考え方の応用に関しては別の論文で述べる<sup>15)</sup>。

謝 辞：本研究を進める過程で、京都大学防災研究所の土岐憲三教授および佐藤忠信助教授、さらに、清水建設(株)技術研究所の若原敏裕氏および京都大学大学院博士課程学生の盛川仁氏には、貴重な意見を頂いた。ここに、記して深謝の意を表わす次第である。

## 参 考 文 献

- 1) Sezawa, K. and Kanai, K. : Improved theory of energy dissipation in seismic vibrations of a structure, Bulletin of the Earthquake Research Institute, University of Tokyo, Vol.14, 1936.
- 2) Housner, G.W. : Interaction of building and ground during an earthquake, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.47, No.3, pp.179-186, 1957.
- 3) Jennings, P.C. and Bielak, J. : Dynamics of building-soil interaction, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.63, No.1, pp.9-48, 1973.
- 4) Veletosos, A.S. and Meek, J.W. : Dynamic behaviour of building-foundation systems, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.3, pp.121-138, 1974.

- 5) Applied Technology Council : Tentative provisions for the development of seismic regulation for buildings, National Bureau of Standards, Special Publication, 510, 1987.
- 6) Kausel, E., Whitman, R. V., Murray, J. P. and Elsabee, F. : The spring method for embedded foundation, Nuclear Engineering and Design, Vol.48, pp.377~392, 1978.
- 7) Harada, T., Kubo, K. and Katayama, T. : Dynamic soil-structure interaction analysis by continuum formulation method, 東京大学生産技術研究所報告, Vol.29, No.5, 1981.
- 8) 原田隆典・久保慶三郎・片山恒雄：地中埋設剛体構造物の地震応答解析モデルの考え方, 土木学会論文報告集, 334号, pp.173~176, 1983.
- 9) 原田隆典・久保慶三郎・片山恒雄・広瀬利光：地中円筒剛体基礎の動的ばね係数と減衰係数, 土木学会論文報告集, 339号, pp.79~88, 1983.
- 10) 若原敏裕・川島一彦：剛体基礎で支持される道路橋橋脚の地下逸散減衰, 土木学会論文報告集, 432号, pp.145~154, 1991.
- 11) 原田隆典・山下典彦：地盤と基礎の動的相互作用を考慮した橋脚の周期と減衰定数の評価, 宮崎大学工学部研究報告, 第37号, pp.51~63, 1991.
- 12) 栗林栄一・岩崎敏男：橋梁の耐震設計に関する研究(Ⅲ)一橋梁の振動減衰に関する実測結果一建設省土木研究所報告, 第139号, 1970.
- 13) Kashima, N., Kawashima, K., Harada, T., Isoyama, R. and Masuda, S. : Soil-Structure interaction and its implication for seismic design of structures, Proceedings of the 9th World Conference on Earthquake Engineering, Vol.3, pp.570~512, Tokyo-Kyoto, 1988.
- 14) 加島延行・川島一彦・原田隆典・磯山龍二：地盤と基礎の動的相互作用を取り入れた応答スペクトル法の考え方と試算例, 第18回地震工学研究発表会講演概要集, 土木学会耐震工学委員会, pp.309~312, 1985.
- 15) 原田隆典・坂梨和彦・Gorges, W. : 地盤との動的相互作用を考慮した連続橋の周期と減衰定数の評価方法, 土木学会論文報告集, No.489/I-27, pp.235~242, 1994. (1993.5.8受付)

## THEORETICAL STUDY ON FUNDAMENTAL PERIOD AND DAMPING RATIO OF BRIDGE PIER-FOUNDATION SYSTEM

Takanori HARADA, Norihiko YAMASHITA and Kazuhiko SAKANASHI

The prediction of the fundamental period and damping ratio of bridge pier-foundation system is of importance in seismic design of bridges. An analytical approach, based on linear simple superstructure of mass and height supported by a rigid embedded foundation with mass and mass moment of inertia having two degree of freedom with swaying and rocking motions, has been described. Although the model used in this study is simple, a concept of the equivalent complex spring and the equivalent input motions of soil-foundation and pier systems has been presented. This concept makes it possible to assess the dynamic soil-structure interaction effect on seismic responses of bridges and to obtain closed form formulas for the fundamental period and damping ratio of bridge pier-foundation system.