

(77) 入力地震波の波動伝播を考慮した連続高架橋の地震応答解析

岡山大学工学部 正員 竹宮宏和
岡山大学大学院 学生員 〇甲斐史朗

1. まえがき

軟弱地盤上に建設された高橋脚をこつ連続高架橋は、通常の連続橋と異なり、地震時に複雑な振動性状を示すことが予想される。しかも、基礎構造物が深い根入れを有すると、地盤と構造物の動的相互作用の検討が重要となる。また、入力地震動について波動の地盤内伝播を考えると、多点入力系としての解析対象構造物は各入力の位相差効果を同時入力時と比較して把握しておくことが肝要である。今回の報告は、下部構造のインピーダンス効果を考慮した3径間連続高架橋(図1)について、橋軸直角方向の地震時挙動を対象に、地盤と基礎との動的相互作用解析における下部構造インピーダンスを評価した場合の有効入力問題、および、多点入力系としての各基礎への位相差入力問題について検討を行った。定式化には動的サブストラクチャ法を適用している。

2. 定式化

本解析では、地盤・杭・フーチング部を下部構造、ピア・ガーダー部を上部構造と称し、下部構造と上部構造を合わせて全体系とする。

[仮定] (1)上部構造を通常の3次元はり要素で離散化する。(2)各杭は弾性はりで、先端は支持層に剛結、また杭頭はフーチングに剛結状態とする。(3)杭の縦振動と横振動を独立して扱う。(4)フーチングは並進と回転運動をする剛体とする。(5)地盤は剛基盤上の層状粘弾性とする。

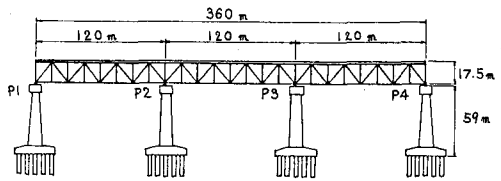


図1. 解析対象構造物

[下部構造] 単杭の杭頭インピーダンスは、一般に、

$$[K_{pile}] = \begin{bmatrix} (E_p I_p / H^3) F_{xx} & (E_p I_p / H^2) F_{y0} & 0 \\ (E_p I_p / H^2) F_{0x} & (E_p I_p / H) F_{00} & 0 \\ 0 & 0 & (E_p A_p / H) F_x \end{bmatrix} \quad (1)$$

ここに、 $E_p I_p$ 、 $E_p A_p$ はそれぞれ杭の曲げ剛性、および軸力剛性、 H は全杭長、 F_{ij} は変位階数で添字 j は力の作用方向、 i は変位方向を示す。支持層での入力(基盤入力)に対して、群杭およびフーチングからなる下部構造の運動方程式は、フーチング重心で並進と回転の2自由度系として、

$$[M]_F \{\ddot{x}\}_F + \sum [\alpha]_p^T [K_{pile}] [\alpha]_p \{u\}_p = [\alpha]_p^T \{F\}_p + [\alpha]_p \{R\} \quad (2)$$

ここに、 $[M]_F$ は質量マトリックス、 $[\alpha]_p$ 、 $[\alpha]_p^T$ はそれぞれフーチングの重心から各杭頭位置への変位影響マトリックス、および同重心からその頂部への変位影響マトリックス、 $\{F\}_p$ 、 $\{R\}$ はそれぞれ地盤振動と杭の変位に起因する外力ベクトル、およびフーチング頂部の断面力ベクトル、 $\{x\}_F$ は絶対変位ベクトル、 $\{u\}_p$ は相対変位ベクトルを示す。

式(2)は、図2に示すような杭基礎の等価剛性・粘性減衰を定義することにより、

$$[M]_F \{\ddot{x}\}_F + [C]_F \{\dot{x}\}_F + [K]_F \{x\}_F = [\alpha]_p^T \{F\}_p + [\alpha]_p \{R\} + [C]_F \{\dot{x}_g\} + [K]_F \{x_g\} \quad (3)$$

ここに、 $\{x_g\}$ は基盤変位ベクトルを示す。

[上部構造]

マトリックス構造解析より、運動方程式は一般に、

$$[M]_{sup} \{\ddot{x}\}_{sup} + [C]_{sup} \{\dot{x}\}_{sup} + [K]_{sup} \{x\}_{sup} = \{F\} \quad (4)$$

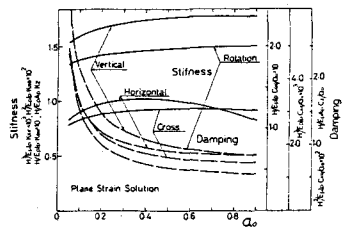


図2. 杭基礎の等価剛性・粘性減衰 (Baranov解)

と与えられる。ここで、 $[M]_{sup}, [C]_{sup}, [K]_{sup}$ はそれぞれ質量、減衰、剛性マトリックス、 $\{x\}_{sup}$ は絶対変位ベクトル、 $[F]$ は外力ベクトルである。

絶対変位ベクトル $\{x\}_{sup}$ を下部構造との境界節点の色の $\{x_j\}_{sup}$ とそれ以外の自由節点の色の $\{x_i\}_{sup}$ に分割し、それに応じて係数マトリックスを分割マトリックスで表わすと、式(4)は、

$$\begin{bmatrix} [M_{ii}] & [M_{ij}] \\ [M_{ji}] & [M_{jj}] \end{bmatrix}_{sup} \begin{Bmatrix} \{x_i\} \\ \{x_j\} \end{Bmatrix}_{sup} + \begin{bmatrix} [C_{ii}] & [C_{ij}] \\ [C_{ji}] & [C_{jj}] \end{bmatrix}_{sup} \begin{Bmatrix} \{x_i\} \\ \{x_j\} \end{Bmatrix}_{sup} + \begin{bmatrix} [K_{ii}] & [K_{ij}] \\ [K_{ji}] & [K_{jj}] \end{bmatrix}_{sup} \begin{Bmatrix} \{x_i\} \\ \{x_j\} \end{Bmatrix}_{sup} = \begin{Bmatrix} \{0\} \\ \{F_j\} \end{Bmatrix} \quad (5)$$

ここに、 $\{F_j\}$ は下部構造との境界節点に働く断面力ベクトルである。

いま、 $\{x_i\}_{sup}$ を境界を拘束したときの動的変位 $\{x_i^c\}_{sup}$ と、拘束を解除したことによる準静的変位との和と考えるならば、

$$\{x_i\}_{sup} = \{x_i^c\}_{sup} + [\beta]_{sup} \{x_j\}_{sup} \quad (6) \quad \text{ただし、} [\beta]_{sup} = -[K_{ii}^{-1}] [K_{ij}]$$

また、剛性マトリックスの対称性、および減衰マトリックスにおける仮定から、

$$\left. \begin{aligned} [\beta]^T [K_{ii}] [\beta] + [k_{ji}] [\beta] + [\beta]^T [K_{ij}] + [k_{ji}] &= [k_{ji}] [\beta] + [K_{jj}] \\ [K_{ii}] [\beta] + [K_{ij}] &= [0] \quad [\beta]^T [K_{ii}] + [K_{ji}] = [0] \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

$$\left. \begin{aligned} [\beta]^T [C_{ii}] [\beta] + [c_{ji}] [\beta] + [\beta]^T [C_{ij}] + [C_{ji}] &= [0] \\ [C_{ii}] [\beta] + [C_{ij}] &= [0] \quad [\beta]^T [C_{ii}] + [C_{ji}] = [0] \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式(6)の右辺の変位ベクトル、および式(7), (8)を使うと、式(5)は次のようになる。

$$\begin{bmatrix} [M_{ii}] & [M_{ii}] [\beta] + [M_{ij}] \\ [\beta]^T [M_{ii}] + [M_{ji}] & [\beta]^T [M_{ii}] [\beta] + [M_{ji}] [\beta] + [\beta]^T [M_{ij}] + [M_{jj}] \end{bmatrix}_{sup} \begin{Bmatrix} \{x_i^c\} \\ \{x_j\} \end{Bmatrix}_{sup} + \begin{bmatrix} [C_{ii}] & [0] \\ [0] & [0] \end{bmatrix}_{sup} \begin{Bmatrix} \{x_i^c\} \\ \{x_j\} \end{Bmatrix}_{sup} + \begin{bmatrix} [K_{ii}] & [0] \\ [0] & [k_{ji}] [\beta] + [K_{jj}] \end{bmatrix}_{sup} \begin{Bmatrix} \{x_i^c\} \\ \{x_j\} \end{Bmatrix}_{sup} = \begin{Bmatrix} \{0\} \\ \{F_j\} \end{Bmatrix} \quad (9)$$

[全体系]

上部構造と下部構造を連成するためのフーチング天端の適合条件およびつり合い条件は、図3を参照すると、

$$\begin{Bmatrix} x_{FF} \\ \phi_{FF} \\ 0 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & z_c \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_{\alpha} \\ \phi_{\alpha} \end{Bmatrix} = [\alpha]_F \{x\}_F \quad (10)$$

$$\begin{Bmatrix} F_y \\ F_x \\ F_z \end{Bmatrix} = - \begin{bmatrix} Q_y \\ M_x \\ 0 \end{bmatrix} = [R] \quad (11)$$

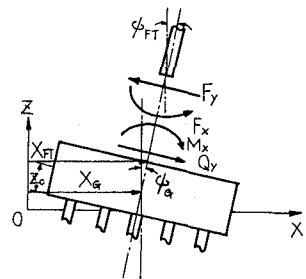


図3. 境界節点の力のつり合い状態

これより、複数の下部構造と上部構造との切断面での連続条件式は、

$$\{x_j\} = [\tilde{\alpha}]_F \{\tilde{x}\}_F \quad (12) \quad \text{ただし、} [\tilde{\alpha}]_F, [\tilde{x}]_F, [R] \text{ はそれぞれ複数の } [\alpha]_F, [x]_F, [R] \text{ を合わせたもの}$$

$$\{F_j\} = \{\tilde{R}\} \quad (13)$$

式(12), (13)を用いて下部構造と上部構造を連成し、全体系とする。このとき、上部構造の自由度を低減するための固有モード分解を行う。すなわち、 $\{x_i^c\}_{sup} = [Z] \{\psi\}$ として、以下の直交性を仮定する。

$$[Z]^T [M_{ii}] [Z] = [I] \quad [Z]^T [C_{ii}] [Z] = [-2\zeta_i \omega_i] \quad [Z]^T [K_{ii}] [Z] = [-\omega_i^2] \quad (14)$$

ただし、 $[Z]$ は固有モードマトリックスである。

以上より、全体系の運動方程式は次式となる。

$$\begin{bmatrix} [I] & [Z]^T ([M_{ii}] [\beta] + [M_{ij}]) [\tilde{\alpha}]_F \\ [\tilde{\alpha}]_F^T ([\beta]^T [M_{ii}] + [M_{ji}]) [Z] & [\tilde{\alpha}]_F^T ([\beta]^T [M_{ii}] [\beta] + [M_{ji}] [\beta] + [\beta]^T [M_{ij}] + [M_{jj}]) [\tilde{\alpha}]_F \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\psi\} \\ \{\tilde{x}\}_F \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [-2\zeta_i \omega_i] & [0] \\ [0] & [C]_F \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\psi\} \\ \{\tilde{x}\}_F \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [-\omega_i^2] & [0] \\ [0] & [R]_F + [\tilde{\alpha}]_F^T ([K_{ii}] [\beta] + [k_{ji}]) [\tilde{\alpha}]_F \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\psi\} \\ \{\tilde{x}\}_F \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{0\} \\ [\tilde{\alpha}]_F^T \{F\}_s + [C]_F \{\tilde{x}\}_g + [R]_F \{\tilde{x}\}_g \end{Bmatrix} \quad (15)$$

〔入力位相差〕波動伝播モデルとして図4に示すように、せん断波(SH波)が鉛直に対して α の角度をなして入射してくる場合、見かけ上の波動が水平方向に伝播することになる。そして、水平距離 D_i 離れた各基礎に対する位相遅れ時間 τ_i は、

$$\tau_i = \frac{\sum_{k=1}^i D_k}{V_s} \sin \alpha \quad (16)$$

と与えられる。ただし、 V_s は基礎のせん断波速度である。

よって、式(15)の外力項において、各基礎の入力に式(16)に従う位相差が存在することになり、 i 番目の基礎に作用する外力は次のように表わされる。

$$x_{gi}(t) = x_g(t - \tau_i) \quad \dot{x}_{gi}(t) = \dot{x}_g(t - \tau_i) \quad (17)$$

3. 解析結果

図1に示す解析対象物の上部構造について、図5に示すような要素分割を行い、完全固定系として固有モード分解を行った。その各次固有振動モードを図6に示す。この図より、解析対象構造物は、低次振動モードにおいてはねじれが少なからず現われており、高次(4~6次)振動モードでは曲げが卓越している様子がうかがえる。

今回の応答解析では、地震動の振動数成分が高々10Hzまでこの予測から最初の30モードのみを採用している。これは入力地震動の振動数成分が低振動数領域にのみ分布していることを考慮すると、上部構造の応答に支配的な固有振動モードの採用数は自ら限定されてくるからである。またこれによって、連成系の自由度数の低減を効果的に計ることが可能となる。各次固有モード減衰定数は $\delta = 0.02$ を採用している。

今回解析対象とした地盤(番, 州地盤)は、宮城県沖地震 関北橋TR記録最大加速度100galで非線形応答解析した結果を採用している。入力地震波は関北橋TR記録(継続時間18.80秒使用)の最大加速度100galに修正したものをを用いている。(図7参照)

枕頭インピーダンス関数の評価には次の3つの解析手法を行った。

- (1) Baranovの平面歪解(振動数全域にわたる遠散減衰のみ含む)
- (2) 平面歪解(地盤の内部減衰と振動数全域にわたる遠散減衰を含む)
- (3) 修正平面歪解(地盤振動を考慮した3次元解で、地盤の内部減衰の増加と共に等価剛性は低振動数領域で一定値に漸近し、また等価粘性減衰は地盤の基本固有振動数

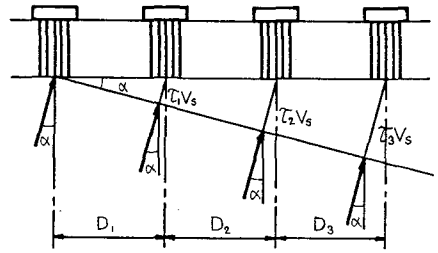


図4. 波動伝播モデル

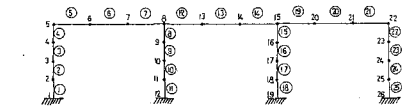


図5. 上部構造の要素分割(節点番号1~26, 部材番号①~⑳)

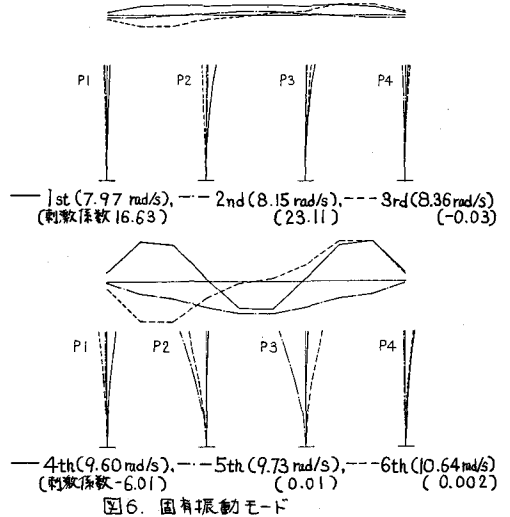


図6. 固有振動モード

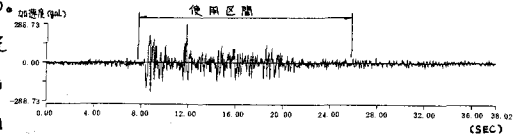


図7. 入力地震波(加速度振幅, Max 288.73gal)

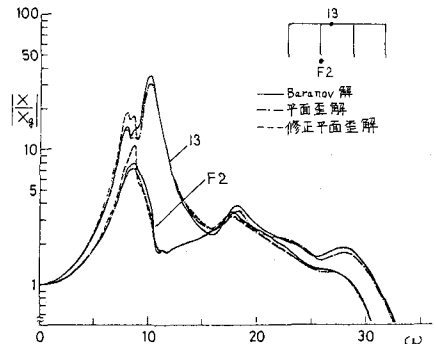


図8. 振動数応答関数

までは遠散減衰を考慮せず内部減衰のみとし、それより高振動数領域において両者を考慮する)

応答計算結果について、振動数応答関数を図8に、また、表1、2に上部構造の最大加速度および最大変位を示す。これらより、枕頭インピーダンス評価法において、平面歪解とBaranov解との差は等価粘性減衰係数にその差となって現われていたが、これは構造物応答には出て来ない。つまり、上下部構造系の慣性力による連成はほとんどないことになる。修正平面歪解と平面歪解の差は、前者ではその特性上、地盤の基本固有振動数付近で応答が大きくなっている。しかし、上部構造の応答結果は、どの場合でも大きな差はみられない。

地盤と構造物の動的相互作用を評価するために、地盤振動、完全固定系としての上部構造、およびBaranov解を用いた有効入力による全体系の代表点の振動数応答関数を図9に示す。また、それらの変位時刻歴応答を図10に示す。これより、フーチングの並進応答は、地盤振動に近い振動数応答性状を示しており、上部構造は地盤の影響として低振動数領域では固有振動数を変化させる慣性連成系としての効果は見られず、むしろ、地盤振動が完全固定系の上部構造に加算された減相であることがわかる。同様のことが並進時刻歴応答にもみられる。

有効入力の場合の同時入力および位相差入力の結果について、変位時刻歴応答を図11に、また、最大加速度および最大変位の応答値分布を図12、13に示す。図12、13には、近似入力による結果を合わせて示す。この近似入力法は、基礎入力による地盤のみの解析から地表面応答を求め、これを枕頭インピーダンスを有する地盤-構造系に入力するものである。これより、位相差入力の場合、固有振動モードとの関連で最大応答値分布が同時入力の場合と異なり、断面によっては高次モードが増中され応答が大きくなる可能性があるのがわかる。また、近似入力は有効入力と比較して安全側の応答評価を与えることがわかる。

表1. 最大加速度応答値

解法	F1		F2		5		7		8		13	
	最大値 (cm/s ²)	発生時刻 (sec)	最大値 (cm/s ²)	発生時刻 (sec)	最大値 (cm/s ²)	発生時刻 (sec)	最大値 (cm/s ²)	発生時刻 (sec)	最大値 (cm/s ²)	発生時刻 (sec)	最大値 (cm/s ²)	発生時刻 (sec)
Baranov平面歪解	211.1	1.06	196.3	1.06	348.4	1.12	453.7	1.26	289.2	1.26	392.9	1.20
平面歪解	206.0	1.06	196.1	1.06	340.7	1.12	444.1	1.26	283.1	1.26	386.9	1.20
修正平面歪解	214.5	1.06	207.4	1.06	350.5	1.10	414.9	1.26	262.7	1.26	383.7	1.20

表2. 最大変位応答値

解法	F1		F2		5		7		8		13	
	最大値 (cm)	発生時刻 (sec)	最大値 (cm)	発生時刻 (sec)	最大値 (cm)	発生時刻 (sec)	最大値 (cm)	発生時刻 (sec)	最大値 (cm)	発生時刻 (sec)	最大値 (cm)	発生時刻 (sec)
Baranov平面歪解	3.03	1.10	3.02	4.14	3.88	1.12	6.24	1.26	5.16	1.24	5.64	1.22
平面歪解	2.99	4.14	3.00	4.14	3.80	1.12	6.14	1.26	5.07	1.24	5.53	1.22
修正平面歪解	3.15	1.08	3.05	1.08	4.03	1.12	5.83	1.24	4.90	1.24	5.51	1.20

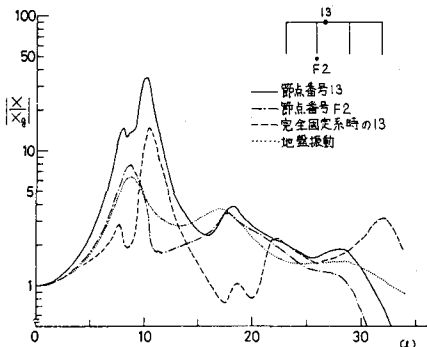


図9. 振動数応答関数

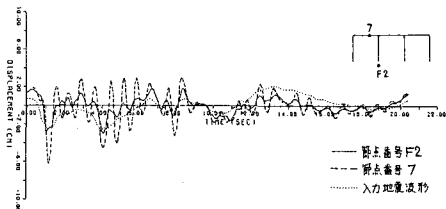


図10. 変位時刻歴応答

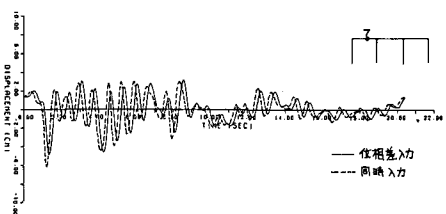


図11. 変位時刻歴応答

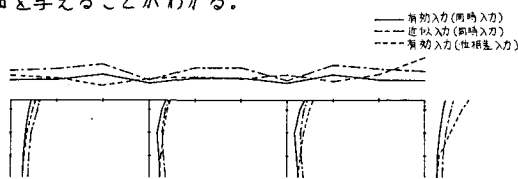


図12. 最大加速度応答値分布

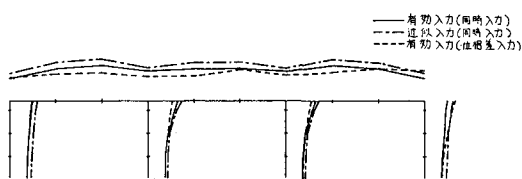


図13. 最大変位応答値分布

参考文献 D Takemiya, H. and Yamada, Y., "Layered Soil-Pile-Structure Dynamic Interaction", J. Earthq. Eng. & Struct. Dyn., Vol. 9, 2) 甲斐, 竹宮, "動的付加ストラクチャ法による地盤-構造物系の地震応答解析", 第35回土木学会年次学術講演概要集 I-267, 1980, 3) 甲斐, 竹宮, "入力位相差を考慮した連続高層橋の地震応答解析", 第33回土木学会中国四国支部学術講演概要集 I-24, 1981