

SH波の入射を受ける周期連続橋の構造の違いが 共振特性に及ぼす影響

新潟大学大学院自然科学研究科 学生員 田村 建
新潟大学工学部建設学科 正会員 阿部 和久
新潟大学大学院自然科学研究科 正会員 紅露 一寛

1. はじめに

連続橋のような一方に長く伸びた構造物が地震動の入射を受ける場合, その基礎や橋脚は異なる位相の下で加振される. したがって, 連続橋の耐震設計において入射する地震動の位相の違いを考慮することが望ましい.

既往の研究で用いられている手法では, 連続橋は打ち切り端を持つ有限な構造物としてモデル化されている. この時の動的挙動は位相差だけではなく, 打ち切り端からの反射波の影響も受けることとなる.

そこで, 本研究では位相効果の影響のみについて調べるため, 多径間連続橋を半無限地盤上の無限周期構造物としてモデル化してきた. なお, これまでの研究¹⁾では, 本手法を用いた解析により, 上層地盤の剛性の違いが連続橋の共振特性にほとんど影響しないことがわかった. そこで本研究では, 連続橋の構造の違いが共振特性に及ぼす影響について検討する.

2. 運動方程式

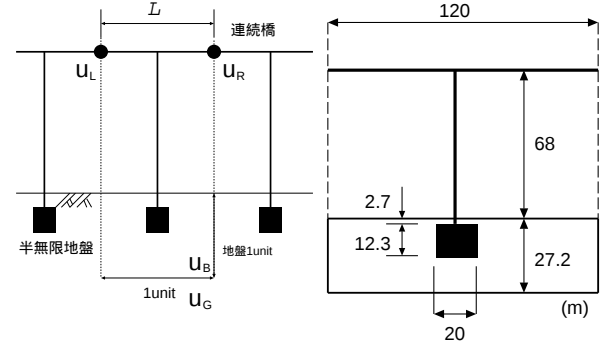
図1(a)のような, 周期長 L の無限周期構造物と半無限成層地盤からなる連成系に面外波動が入射する問題を考える. この連成系に Floquet 原理を適用することで, 本問題は自身を構成する最小の単位構造(ユニットセル)上で定義された有限領域の力学問題に帰着する. また, ユニット内の地盤にインピーダンス行列を適用することにより, 地盤の深さ方向についても有限な力学問題に帰着して解く. この1ユニットの運動方程式は次式で与えられる.

$$\begin{bmatrix} \hat{K}_{LL} & \hat{K}_{LR} & \hat{K}_{LM} & \hat{K}_{LB} \\ \hat{K}_{RL} & \hat{K}_{RR} & \hat{K}_{RM} & \hat{K}_{RB} \\ \hat{K}_{ML} & \hat{K}_{MR} & \hat{K}_{MM} & \hat{K}_{MB} \\ \hat{K}_{BL} & \hat{K}_{BR} & \hat{K}_{BM} & \hat{K}_{BB} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_L \\ u_R \\ u_M \\ u_B \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_L \\ F_R \\ 0 \\ F_B \end{Bmatrix} \quad (1)$$

ここで, $\hat{K}_{ij} = K_{ij} - \omega^2 M_{ij}$ である. なお, K_{ij} は剛性行列, M_{ij} は質量行列, ω は円振動数であり, u_j は各節点変位, F_j は内部節点力である. 下添字 L, R, B, M は1ユニット左端・右端・下端・それ以外の節点であることを意味する.

入射波動の水平波数成分を k_x とすると, Floquet 原理により次式が成り立つ.

$$u_R = e^{-ik_x L} u_L, \quad F_R = -e^{-ik_x L} F_L \quad (2)$$



(a) 連成系モデルの前景 (b) 解析する 1unit

図1 半無限地盤と連続橋からなる連成系モデル

式(2)を式(1)に代入して u_R, F_R を消去すると次式を得る.

$$\begin{bmatrix} \hat{K}'_{LL} & \hat{K}'_{LM} & \hat{K}'_{LB} \\ \hat{K}'_{ML} & \hat{K}'_{MM} & \hat{K}'_{MB} \\ \hat{K}'_{BL} & \hat{K}'_{BM} & \hat{K}'_{BB} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_L \\ u_M \\ u_B \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ F_B \end{Bmatrix} \quad (3)$$

3. 求解方程式の導出

式(3)の F_B を求めるために, ユニットセル底辺と半無限地盤との結合面について考える. 結合面での変位の適合条件と力のつりあい条件は次式で与えられる.

$$u_B = u_G, \quad F_B + F_G = 0 \quad (4)$$

ここで, u_G, F_G は地盤境界面での変位と節点力である. 入射波動場の変位と力を u_G^I, F_G^I , 反射波動場の変位と力を u_G^R, F_G^R とすると, u_G, F_G は次のように分離できる.

$$u_G = u_G^I + u_G^R, \quad F_G = F_G^I + F_G^R \quad (5)$$

ここで, 当該半無限場上面と, それを補完する上半無限場下面のインピーダンス行列²⁾を, それぞれ K_D, K_U とすると, F_G^I, F_G^R は次式により与えられる.

$$F_G^I = -K_U u_G^I, \quad F_G^R = K_D u_G^R \quad (6)$$

式(4),(5),(6)を(3)に代入して次の求解方程式を得る.

$$\begin{bmatrix} \hat{K}'_{LL} & \hat{K}'_{LM} & \hat{K}'_{LB} \\ \hat{K}'_{ML} & \hat{K}'_{MM} & \hat{K}'_{MB} \\ \hat{K}'_{BL} & \hat{K}'_{BM} & \hat{K}'_{BB} + K_D \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_L \\ u_M \\ u_B \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ [K_D + K_U] u_G^I \end{Bmatrix} \quad (7)$$

Key Words: 連続橋, SH波, 位相差, Floquet 原理, 杭基礎, ヒンジ支承

連絡先: 950-2181 新潟市西区五十嵐二の町 8050 番地 TEL 025 (262) 7028 FAX 025 (262) 7021

表 1 連続橋の各種物性値

物性値	桁	橋脚
曲げ剛性 ($GN \cdot m^2$)	16150	126970
捩り剛性 ($GN \cdot m^2$)	1223	529
単位長さ当たりの質量 (kg/m)	42100	116500
質量慣性モーメント ($kg \cdot m^2$)	1239000	103000

表 2 地盤の各種物性値

地盤の層	地盤の厚さ (m)	S 波の伝播速度 (m/s)	単位体積重量 (kg/m^3)
1	5.0	91.24	2.05×10^3
2	6.0	76.42	2.05×10^3
3	4.0	178.03	1.85×10^3
4	2.6	219.51	2.05×10^3
5	3.3	261.64	1.90×10^3
6	6.3	296.80	1.90×10^3
7	Half-space	339.88	2.20×10^3

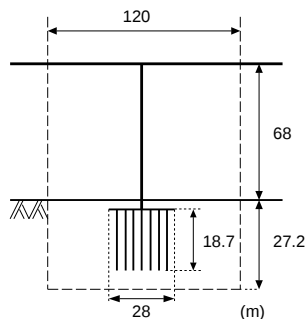


図 2 杭基礎の寸法

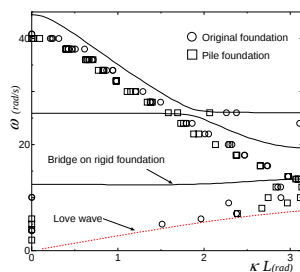


図 3 杭基礎の場合の解析結果

4. 解析条件と解析結果

文献¹⁾では、ケーソン基礎により支持された連続橋を対象とした。その際、寸法及び各種物性値は文献³⁾を参考にそれぞれ図 1(b)、表 1,2 のように設定し、基礎と地盤を四辺形要素、桁と橋脚をはり要素により離散化した。本研究では、基礎を杭基礎に変更した場合と、桁支持をヒンジ支承に変更した場合について検討する。なお、入射波には SH 平面波を用いる。

(1) 杭基礎の場合の解析結果

図 2(a) に示す様な杭基礎を対象とする。杭の条件は表 3 のように設定し、解析を行う際には奥行き方向にある杭も考慮して曲げ剛性に補正をかけるものとする。また、橋梁と地盤の物性値はこれまでの研究と同様、表 1,2 の値を用いる。

表 3 杭の物性値

物性値	杭
杭径 (m)	1.6
曲げ剛性	$7.27 \times 10^{10} N \cdot m^2$
せん断弾性係数	$1.5 \times 10^8 N/m^2$
断面二次極モーメント	$9.3m^4$
単位長さ当たりの質量	$1.13 \times 10^4 kg/m$

表 4 ヒンジ支承の物性値

物性値	ヒンジ支承
曲げ剛性 ($GN \cdot m^2$)	126970
捩り剛性 ($GN \cdot m^2$)	1.0×10^{-7}
単位長さ当たりの質量 (kg/m)	116500
質量慣性モーメント ($kg \cdot m^2$)	103000

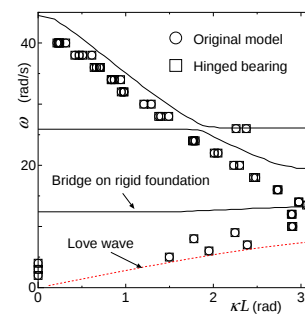


図 4 分散曲線と共振点

なお、フーチング及び杭ははり要素として離散化した。得られた共振点の分布と文献¹⁾で得られたケーソン基礎の結果を図 2(b) に示す。

図中の四角形のプロット点が杭基礎を用いたモデルの共振点であり、丸のプロット点がケーソン基礎の場合の共振点である。また、図の実線は剛基盤上の当該連続橋の分散曲線で、破線は当該地盤における Love 波の分散曲線である。図より、基礎形式を変更してもほとんど変化がないことがわかる。したがって、当該連成系の共振特性は基礎形式の影響をほとんど受けないものと考えられる。

(2) ヒンジ支承の場合の解析結果

支承をヒンジとする以外、連成系の寸法や各種物性値は文献¹⁾と同様とし、図 1(b)、表 1,2 の値を用いる。結果を図 3 に示す。図より、支承の違いは応答にほとんど影響しないことがわかる。これは、橋脚の捩り剛性が比較的低く、ヒンジの有無による差異が小さいことによるものと考えられる。なお、橋脚の高さがより低く、捩り剛性が比較的高い場合は、より明確な差が認められると思われる。

参考文献

- 1) 阿部和久, 田村建, 紅露一寛: SH 波の入射を受ける連続橋・半無限地盤連成系の定常応答解析, 計算力学論文集, Vol11,12,2011.
- 2) 阿部和久, 中山悠, 紅露一寛: 中間層を有する周期複合材の弾性波動解析, 応用力学論文集, 13,1041-1048,2010.
- 3) 竹宮宏和, 甲斐史郎: 深い杭基礎を有する多径間連続高架橋の地震応答解析, 土木学会論文報告集, 第 332 号, 1-10,1983.