

入射波を受ける周期連続橋・地盤連成系の 3次元定常応答解析

新潟大学大学院自然科学研究科	学生員	古里 駿
新潟大学工学部建設学科	正会員	阿部 和久
新潟大学災害・復興科学研究所	正会員	Pher Errol Balde QUINAY
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

連続橋に代表される長大構造物では、その長手方向に同一の構造単位が周期的に配置されている。このような構造物が地震波の斜め入射を受ける場合、長手方向に異なる位相の下で加振される恐れがある。したがって、連続橋の耐震設計においては地震動の位相差を考慮することが望ましい。そのため、これまで当該問題に対し多くの検討がなされてきた。

既往の研究では、入射地震波の位相差の影響に着目してはいるものの、構造物は有限長としてモデル化されている。有限長のモデルでは位相差と打ち切り端からの反射波の影響を分離することが困難であり、数値解析で位相差の影響のみ抽出することは不可能である。

そこで、文献1)では無限周期構造を有する構造物・地盤連成系を対象とした解法を構成し、位相差が変位応答に及ぼす影響について検討した。ただし、文献1)では2次元モデルを用いて解析を行っており、一方向に展開された周期構造物と3次元地盤との連成を厳密に考慮できていない。そこで本研究では地盤を3次元成層半無限弾性場としてモデル化し、それと無限周期構造物との連成を解析可能な有限要素解析手法を構成する。

また、具体例として、新潟県の大河津分水旧可動堰を対象に解析を行う。大河津分水は新潟平野を水害から守るために建設された人工河川であるが、そこに設置された本可動堰は長手方向に10径間、全長180mの長さを持つため、入射地震動の位相差が本可動堰の応答に影響を及ぼしていた可能性があり、解析によりそれを検討する。

2. 対象とする問題

(1) 1ユニットの求解方程式

半無限地盤上の無限周期構造が、振動数 ω の下で加振を受ける問題を考える。

周期長 L_x の無限周期構造を持つ連成系に波動が入射する場合、Floquet原理を適用することによって、連成系の力学問題は最小構造単位となるユニットセル(図1)の力学問題に帰着する¹⁾。この問題を解くために、上層地盤内の地盤境界 Γ_3 で囲まれた基礎周辺地盤と上部構造1ユニットから成る部分領域の運動方程式を考え、Floquet原理による周期

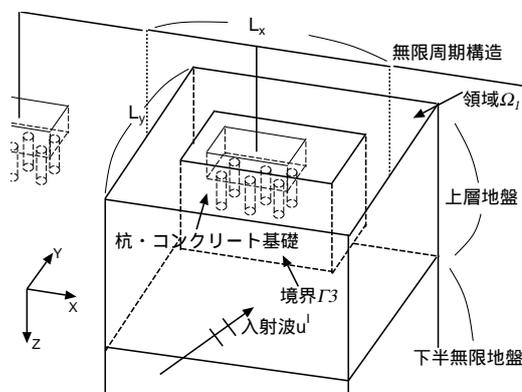


図1 対象とする3次元解析モデルの1ユニット

性、境界 Γ_3 上での適合条件、及び力のつり合い条件を課すことで以下の求解方程式を得る。

$$\begin{bmatrix} \hat{K}'_{LL} & \hat{K}'_{LM} & \hat{K}'_{L3} \\ \hat{K}'_{ML} & \hat{K}'_{MM} & \hat{K}'_{M3} \\ \hat{K}'_{3L} & \hat{K}'_{3M} & \hat{K}'_{33} + \tilde{K}_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_L \\ u_M \\ u_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ \tilde{K}_3 u_3^f - F_3^f \end{Bmatrix} \quad (1)$$

ここで、 $\hat{K}_{ij} = K_{ij} - \omega^2 M_{ij}$ であり、 K_{ij} は剛性行列、 M_{ij} は質量行列、 u_j は各節点変位、 F_j は内部節点力ベクトルである。 \hat{K}'_{ij} は縮約された行列を意味している。下添え字 $(\cdot)_3$ は Γ_3 上の節点、 $(\cdot)_{L,R}$ はそれぞれ1ユニットの左端、右端の節点、 $(\cdot)_M$ は前述した節点以外の当該ユニット内の連続橋と地盤を含む節点ベクトル及び行列成分を意味する。 \tilde{K}_3 は Γ_3 上の節点変位と内部節点力の放射波動成分との関係を与える行列である。 u^f は半無限自由場における入射波成分、 F^f は自由場に対する内部節点力の成分である。

(2) インピーダンス行列 \tilde{K}_3 の導出

境界 Γ_3 上の1つの節点を加振する問題を考える。当該地盤が水平面内に一様とすると、 y 軸方向に任意の周期性を有しているとみなすことができる。そこで、 y 方向に Γ_3 を包含するように周期長 L_y を設定する。その下で y 方向にFloquet変換を適用すると、 y 方向にもBlochの定理を課すことができる。

これにより当該問題は x 方向周期長 L_x , y 方向周期長 L_y の上層地盤底面で切り取られた有限な領域 Ω_1 内の加振問題に帰着する. Γ_3 上の全ての節点に対する節点変位と内部節点力ベクトルを並べた行列の逆 Floquet 変換行列を $[U_3][F_3]$ とおくと, $[\tilde{K}_3]$ は次式により求めることができる.

$$[\tilde{K}_3] = [F_3 \cdot U_3^{-1}] \quad (2)$$

3. 解析条件

大河津分水旧可動堰を対象とした解析モデルを図2に示す. 解析では, 周期長 $L_x = 18(\text{m})$ を1ユニットとする部分構造を離散化する. なお, 対象とする地震波はSH平面波とし, 地表面 x 方向(橋軸方向)の波長が $2L_x$ となる様に設定する. この時定常解は定在波応答となり, 橋脚を節, 桁中央を腹とする変形の場合, 図2のユニット両端の桁変形が大きくなると考えられる.

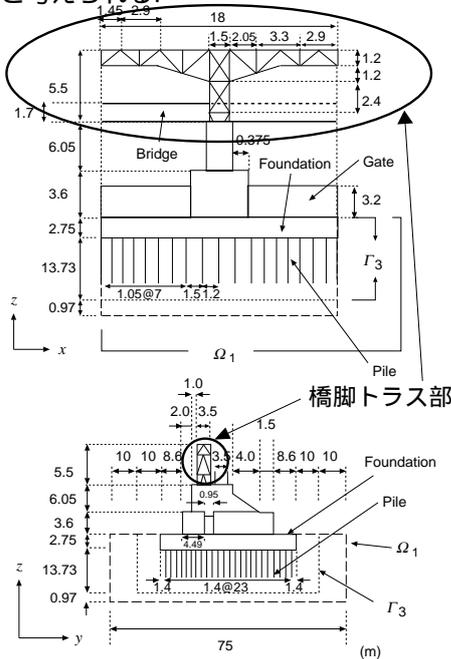


図2 旧可動堰の1ユニット

4. 解析結果

まず, トラス部分を取り出し, 脚部下端を固定条件として分散解析を行った. 結果を図3に示す. 図3中で示す波数・周波数において定在波モードを得た.

入射波の x 方向(橋軸方向)の波長が $2L_x$ となる様に, 条件を設定して応答解析を行う. この場合, x 方向の入射波長 λ_x は次式で与えられる.

$$\lambda_x = \frac{C}{\omega} \times \frac{1}{\sin \phi} \quad (3)$$

ここで C は地盤最下層のせん断波速度, ϕ は z 軸(鉛直軸方向)との入射角である. 式(3)より, 図3の低周波数側から三番目までのバンド端の周波数では $\lambda_x > 2L_x$ となる. そのため本研究では $\lambda_x = 2L_x$ と設定し得る四番目のバンド端周波数 ($\omega = 7.76\text{Hz}$) 付近を対象に連成応答解析を行う.

トラス橋の節点変位の最大値 $|u|_{max}$ を確認すると, $\omega = 8.19\text{Hz}$ (図3中)において共振が発生していることがわかった. なお, 文献2)では, 常時微動の観測結果から, $\omega = 7.4, 7.8$

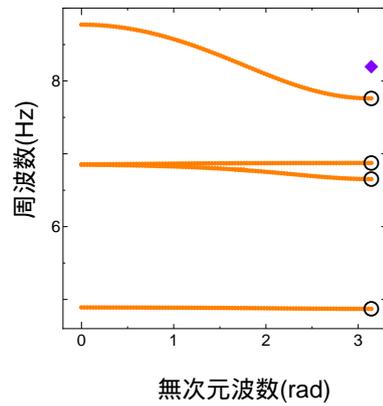


図3 トラス部の分散曲線

, 8.0Hz に卓越周波数が存在することが確認されている. この観測は現在存置されている三径間のうち, 端径間を対象に行われたものである. 観測結果には端部の影響があるため, 本解析の周波数特性と若干の差があると考えられる. なお, 供用当時の中央径間部であれば, 端部からの反射波の影響が少なく, 無限周期構造に近い状態にあったと考えられる.

分散解析 ($\omega = 7.76\text{Hz}$) と応答解析 ($\omega = 8.19\text{Hz}$) によって得られたトラス部の実部の変形を図4(a),(b)に示す. いずれも脚部を節として水平に振りを伴う定在波応答が得られており, 8.0Hz 近傍において地震動の位相差により応答が卓越する可能性を示唆している.

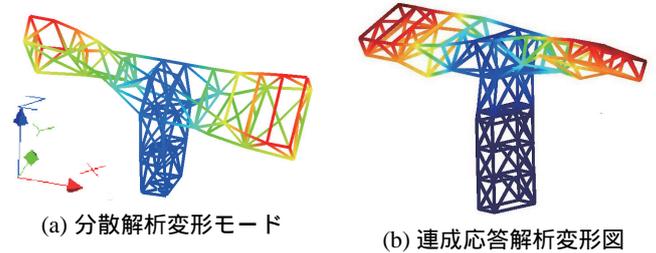


図4 解析結果のトラス部変形図

なお, 2007年に発生した新潟県中越沖地震の際には, 震源との位置関係から, 橋軸方向に位相差を有する地震動の入射を受けた可能性がある. しかし, 本可動堰近傍の観測記録では, 8.0Hz 付近の周波数成分は比較的小さく上述の定在波モードが応答に影響を及ぼした可能性は低いと考えられる. 謝辞

本研究の一部は, 国土交通省北陸地方整備局信濃川河川事務所から委託を受けて, 土木学会・大河津可動堰記録保存検討委員会(委員長:丸山久一長岡技術大学教授)の活動の一環として行ったものである. ここに記し, 謝意を表す.

参考文献

- 1) 田村 建, 阿部和久, 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, 計算数理工学論文集, 11, 47-52, 2011.
- 2) 古川侑大, 宮下剛, 丸山久一:大河津旧可動堰橋脚橋の振動計測, 第31回土木学会関東支部新潟会研究調査発表論文集, 16-19, 2013.