

栈橋の管内水・付加質量が固有周期に及ぼす影響の評価と予測モデルの構築

国土技術政策総合研究所 正会員 ○菅原 法城, 竹信 正寛, 宮田 正史
 沿岸技術研究センター 正会員 福永 勇介 (元 国土技術政策総合研究所)
 港湾空港技術研究所 正会員 野津 厚, 長坂 陽介
 株式会社ニュージェック 正会員 江口 拓生, 曾根 照人

1. 背景と目的

港湾施設である栈橋の設計では、固有周期の算定が必要となる。現行港湾基準¹⁾においては、栈橋の固有周期を算定する際に、管内水・付加質量の考慮が必要となる条件や考慮方法が明示的ではない。著者らは、既報²⁾において、管内水・付加質量のモデリング方法を示し、さらに、レベル1地震動相当の地震動3波を入力した結果から、設計水深に対する栈橋の固有振動数の増減率等の関係について示した。しかし、当該検討では、栈橋の固有振動数の算出のために、その加速度が時々刻々と変化する地震動を用いたため、H/H スペクトルにおいて栈橋の1次の振動モードを示すピーク位置が不明瞭な結果も多かった。これは、地盤を構成する要素のばねの非線形化等が要因と考えられた。また、解析結果の一覧を示したことに留まっており、設計における管内水・付加質量の具体的な考慮方法を提示するには至らなかった。今回の検討では、Impulse 波を入力して栈橋上部工中央位置で出力した加速度時刻歴から算出したフーリエ振幅スペクトルから固有周期の特定を行った。その上で、実務設計での便に供するように、固有周期の変化を示す比と重量比の関係を定式化し、重量比から固有周期の変化を示す比を予測するモデルを構築した。

2. 栈橋固有周期の推定方法とその結果

全国から収集した耐震強化岸壁の設計事例(20断面のFLIP データ、全て栈橋のうち5断面がジャケット式)を検討対象の断面とした。FLIP³⁾での管内水、付加質量(動水圧相当)のモデル化は既報のとおりであり、節点集中質量要素を使用して管内水・付加質量(実海底面から海水面の間で考慮)を栈橋杭(はり要素)に一定間隔で貼り付けるように追加的にモデル化した。地盤の過剰間隙水圧の上昇や液状化は考慮していない。

既報では、地震動を入力した結果のH/H スペクトルから固有振動数の読み取りを試みたが、前述のとおり、1次の振動モードを示すピーク位置が特定しづらい場合も多かったため、本検討では、Impulse 波(10gal)を入力し、上部工中央位置で出力した加速度時刻歴から計算したフーリエ振幅スペクトルを用いて、栈橋の固有周期を示すピーク位置を読み取ることにした。栈橋上部工中央位置のフーリエ振幅スペクトルだけでは、栈橋の一次の振動モードを示すピーク位置を特定できなかった場合(図-1中の施設5,7,14が該当)は、背後地盤上(土留め部法線から20m陸側に離れた位置)で出力した加速度時刻歴から算出したフーリエ振幅スペクトルと、上部工中央位置でのフーリエ振幅スペクトルの比で表現されるH/H スペクトル⁴⁾⁵⁾を用いて栈橋の固有周期を特定した。なお、本検討では、レベル1地震動相当の地震波3波(既報と同じ地震動)を入力した結果から求めたH/H スペクトルの結果も確認した上で、固有周期を特定した。

特定した固有周期の一覧を図-1に示す。以後、管内水・付加質量を考慮した場合を「Case ON」、考慮していない場合を「Case OFF」と表記する。固有周期の変化を示す比(「Case ON」での固有周期/「Case OFF」での固有周期)で見ると施設8,15,20で大きな変化となったが、これらはいずれもジャケット式栈橋であった。

3. 固有周期の変化を示す比と重量比の関係の定式化と予測モデルの構築

現行港湾基準¹⁾では、栈橋の設計において、管内水・付加質量を考慮する必要性を判断する指標として重量の比について言及されているため、本研究では、重量比を説明変数として固有周期の変化を予測することを試みた。重量比は、「Case ON」の場合の総重量(上部工重量+杭全長分の重量+管内水・付加質量)を「Case OFF」の場合の総重量(上部工重量+杭全長分の重量)で除した値として本検討では定義する。予測モデルを構築するためには、その関数形を仮定する必要がある。ここで、栈橋の耐震設計で照査用震度を求める際に用いられ

キーワード 港湾施設, 栈橋, 固有周期, 管内水, 付加質量, MCMC
 連絡先 〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1 国土技術政策総合研究所 TEL046-844-5006

る一自由度系の単振動の固有周期 T [s] の理論解を (式-1) に示す.

$$T_s = 2\pi\sqrt{\frac{M}{K}} \tag{式-1}$$

M は考慮する栈橋の質量[t], K は栈橋のバネ係数[kN/m]を示す. さらに, 管内水・付加質量を考慮する前後の固有周期[s]をそれぞれ T, T' , 質量[t]を m, m' と表し, $y=T'/T, x=m'/m$ と文字を置き直し, 管内水・付加質量の固有周期を延ばす効果が理論どおり全て発揮されるとすると, 固有周期の変化を示す比と重量比について(式-2) の関係式が得られる. この時注意するのは, 管内水・付加質量の有無により, 栈橋のバネ係数は変化しないということである.

$$y = \sqrt{\frac{m'}{m}} = \sqrt{x} \tag{式-2}$$

一方で, 実際の解析結果を確認すると, 全ての点がこの曲線より下に位置する結果 (図-2) となっていた. これは, 管内水・付加質量の重心が上部工の重心より低いため, 管内水・付加質量の固有周期を延ばす効果は必ずしも 100%発揮されないためと考えられる. そこで改めて, 管内水・付加質量を Δm とし, これに α を乗じた分だけの質量が固有周期を延ばすことに寄与すると考えると, (式-2) は以下のようになる.

$$y = \sqrt{\frac{m + \alpha\Delta m}{m}} \tag{式-3}$$

ここであらためて, $(m + \Delta m)/m$ を x と置き, Δm を式中から消去すると, (式-4) が導かれる. なお, この関数は, 重量比が 1 の時に固有周期の変化を示す比が 1 となることを満たしている.

$$y = \sqrt{1 + \alpha(x - 1)} \tag{式-4}$$

なお, 固有周期の算定結果には様々な誤差が含まれているものと考え, 本検討では, 解析結果から算出した固有周期比は, (式-4) の予測値 y に正規分布ノイズを加えたものとするモデルを仮定した. ここでは, 上記の α と正規ノイズの標準偏差 σ を推定することとした. 各信頼度に基づく予測区間を容易に算出できること等の理由から, ベイズ推論により推定を行うこととし, MCMC の一つであるハミルトニアン・モンテカルロ法⁶⁾ を実装した Stan を用いて行い, 事後期待値(EPA)として, α は 0.3497, σ は 0.0220 を得た. この予測モデルを用いることで, 重量比から, 固有周期の変化を示す比が求められることになる. この推定結果を図-2 に図示する. 観測ノイズを含んだ各信頼度のベイズ予測区間も図中に示しており, 興味ある信頼度の下で固有周期の変化を予測することも可能になる.

参考文献

- 1) 国土交通省港湾局監修:港湾の施設の技術上の基準・同解説, 日本港湾協会, 2018. 2) 菅原法城, 宮田正史, 福永勇介, 江口拓生, 曾根照人:栈橋の2次元地震応答解析結果に及ぼす鋼管部材の管内水・付加質量の影響検討, 令和3年度土木学会全国大会, 2022. 3) Iai, S., Matsunaga, Y. and Kameoka, T: Strain Space Plasticity Model for Cyclic Mobility, 港研報告 Vol.29, No.4, pp.27-56, 1990. 4) 長尾毅, 田代聡一:栈橋式岸壁の耐震性照査手法に関する解析的研究, 国土技術政策総合研究所資料 No. 61, 2003. 5) 菅原法城, 竹信正寛, 宮田正史, 福永勇介, 野津厚, 長坂陽介:常時微動観測による実栈橋固有周期の推定手法に関する基礎的検討, 国土技術政策総合研究所資料 No. 1082, 2019. 6) S. Duane, A.D. Kennedy, B. J. Pendleton, D. Roweth: Hybrid Monte Carlo, Physics Letters B(195), 1987.

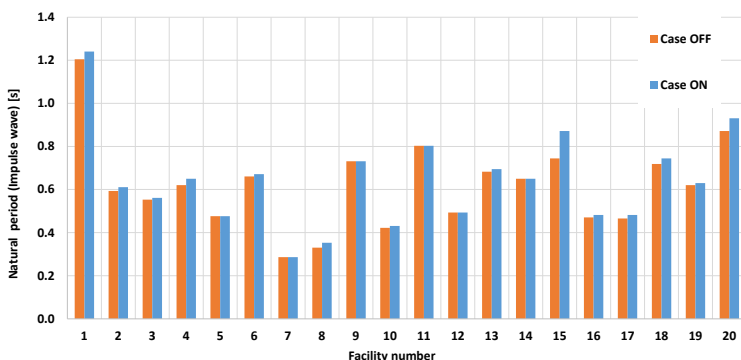


図-1 固有周期の特定結果の一覧

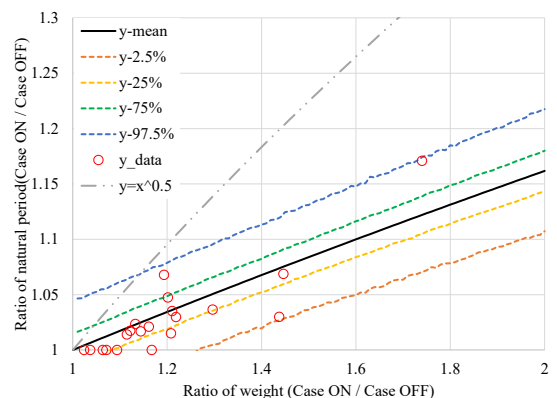


図-2 重量比を用いた固有周期の比の回帰モデル