地震動に伴う地盤の非線形性を考慮した 直杭式横棧橋の固有周期算出式に関する研究

勝俣 優¹・福永 勇介²・竹信 正寛³
宮田 正史⁴・小濱 英司⁵

¹ 中央復建コンサルタンツ株式会社 構造系部門 港湾・空港グループ(元国土技術政策総合研究所交流研究員)
(〒533-0033 大阪市東淀川区東中島 4-11-10) E-mail:katsumata_m@cfk.co.jp

² 正会員 国土技術政策総合研究所 港湾研究部(同上)

³ 正会員 国土技術政策総合研究所 港湾研究部(同上)

⁴ 正会員 国土技術政策総合研究所 港湾研究部 港湾施設研究室長(同上)

⁵ 正会員 海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所
地震防災研究領域 耐震構造研究グループリーダー(同上)

平成19年版の港湾の施設の技術上の基準・同解説において、骨組解析より求めた棧橋バネ定数を用いて棧橋の固有周期を算出する手法(以下、現行法)が示されている。しかし、現行法と2次元地震応答解析では算出される固有周期に乖離があり、後者が常時微動観測や強震観測とよく整合することが既往研究より指摘されている。また、現行法は地震動に関わらず一定の値を算出するが、実際には地震作用により棧橋杭周辺の地盤剛性が低下するため、同一の棧橋であっても地震動の強さに応じて固有周期は変化する。

本論文では、地震作用時における棧橋の固有周期や地盤剛性の低下率を地震応答解析により評価し、その関係性を整理することで、2次元地震応答解析と整合するように現行法を補正する手法(以下、補正法)を構築する。

Key Words : open-type wharves on vertically pile, natural period, seismic response analysis

1. はじめに

平成19年版の港湾の技術上の基準・同解説¹⁾(以下、H19基準)において、直杭式棧橋の固有周期を求める手法として式(1)が示されている。

$$T_s = 2\pi \sqrt{W/gK} \quad (1)$$

ここに、 T_s : 棧橋の固有周期(s)、 W : 杭1列が受け持つ自重、載荷重(kN)、 g : 重力加速度(m/s^2)、 K : 棧橋バネ定数(kN/m)であり、棧橋バネ定数は棧橋に作用する荷重と変位の関係が線形であると仮定して骨組解析より求める。

一方、FLIPによる2次元地震応答解析が地震時の棧橋挙動をよく再現することは、観測事例との比較から明らかにされているが^{2,3)}、現行法とは整合しない⁴⁾。また、強い地震動において、杭周辺の地盤剛性が低下することで固有周期が変化することが指摘されている^{4,5)}が、式(1)はこれを再現できない。そこで、本研究では地震作用に伴う固有周期や地盤剛性の変化を地震応答解析により評価・整理することで、現行法を2次元地震応答解析に整合させるための補正法を構築する。なお、本研究は、設計実務を対象に、過大な負荷を伴わない簡易な補正法の

構築が可能であるか検討したものである。メカニズムの定式化を厳密に追求したものではないため留意されたい。

図-1に本研究の流れ図を示す。第2章では微小な地震動について現行法と2次元地震応答解析を比較し、棧橋バネ定数の適切な値を検討する。第3章では、異なる最大加速度の地震動に対する棧橋の挙動を地震応答解析により求め、地盤のせん断剛性比と固有周期の関係を近似により表す。さらに、1次元地震応答解析より得られるせん断剛性比を入力値として、現行法より算出される棧橋の固有周期を地震動の強さに応じて補正する手法を提案する。なお、解析コードはFLIPを用いる。

図-1 本研究のフロー

図-2 検討断面の概要

図-3 入力地震動

図-4 2次元地震応答解析と現行法との固有周期の比較

表-1 杭諸元

水深(m)	杭径(mm)	(断面番号) : 杭肉厚(mm)			
		N=1	N=5	N=10	N=15
10	700	(1):14.9	(2):14.1	-	(3):13.4
	700	(4):10.4	(5):10.0	(6):9.7	(7):9.6
13	800	(8):13.2	(9):12.4	-	(10):11.9
	700	(11):11.5	(12):10.9	(13):10.6	(14):10.5
16	900	(15):12.3	(16):11.5	-	(17):11.0
	800	(18):11.1	(19):10.5	(20):10.2	(21):10.1

2. 微小な地震動に対する固有周期の整理

(1) 検討目的と設計条件の設定

本章では、地盤剛性がほぼ変化しない微小な地震動を対象に、現行法を2次元地震応答解析に整合させる。

検討断面の概要を図-2に示す。設計条件は、骨組解析から求まる栈橋バネ定数への影響を考慮し、設計水深、原地盤N値、杭の剛性について複数の条件を設定した(表-1)。なお、2次元地震応答解析における入力地震動は、八戸港、岩国港、博多港のレベル1地震動⁶⁾を最大加速度10Galに振幅調整した波形とした(図-3)。

(2) 固有周期の算出方法

2次元地震応答解析においては、栈橋上部工および仮想固定点におけるフーリエスペクトルの比を求め、そのピーク周期を栈橋の固有周期とする。

式(1)の栈橋バネ定数は、市販ソフトウェア「横栈橋設計計算2007 Ver2.2.9」による骨組解析から求める。また、仮想固定点について、H19基準は基準面を仮想海底面とするが、実海底面を用いる方が2次元地震応答解析と整合するという指摘もあり⁴⁾、双方を検討対象とした。なお、水平方向地盤反力係数は式(2)より求めるが、捨石については菊池ら⁷⁾の実験結果から $k_{CH}=3500(\text{kN/m}^3)$ とした。

$$k_{CH}=1500N \quad (2)$$

(3) 固有周期の算出結果と比較検討

2次元地震応答解析、および現行法より算出した固有

周期の比較を図-4に示すが、仮想海底面を基準面して仮想固定点を設定すると、現行法は2次元地震応答解析と比較して過大な固有周期を算出する。一方、実海底面を基準面とすると、固有周期は2次元地震応答解析と比較的整合した値となるが、相関係数は非常に低い。これは、実海底面を基準面とすると、基準面から仮想固定点までの土層構成における基礎捨石の割合が高くなり、基礎捨石の配置が算出結果に強く影響するためと考えられる。

(4) 栈橋バネ定数の補正

式(1)の変数 W , g は一定値であるため、固有周期は栈橋バネ定数 K によってのみ変化する。そこで、現行法と2次元地震応答解析が整合するように、骨組解析から算出される栈橋バネ定数に便宜的な補正係数を与える。すなわち、式(1)の固有周期算出式を式(3)のように修正する。

$$T_{Sstat} = 2\pi \sqrt{W/(gM_K K)} \quad (3)$$

ここに、 T_{Sstat} ：微小な地震動に対する栈橋固有周期(s)、 W ：杭1列が受け持つ自重および载荷重(kN)、 g ：重力加速度(m/s^2)、 M_K ：栈橋バネ定数の補正係数、 K ：栈橋バネ定数(kN/m)である。

補正係数 M_K により栈橋バネ定数を補正することで、算出される固有周期を修正する。式(3)を変形すると式(4)となり、2次元地震応答解析から求めた固有周期を代入することで断面ごとの補正係数 M_K を得られる。

$$M_K = (4\pi^2 W)/(g K T_{Sstat}^2) \quad (4)$$

図-5 断面ごとの補正係数算出結果

図-6 2次元地震応答解析と補正法との固有周期の比較

各検討断面の補正係数とその平均値を図-5、表-2に示す。表-2の補正係数と式(3)から求める固有周期は図-6に示すとおりであり、2次元地震応答解析とよく整合する。また、仮想海底面を基準面とする方が整合性はよい。

3. 地盤非線形性を反映した固有周期の補正

(1) 検討目的と設計条件

本章では、地震動に対する地盤のせん断剛性や固有周期の変化を定式化し、地盤剛性の低下率に基づいた式(1)の補正法を検討する。解析コードや検討断面は前章と同様である。また、入力地震動は既往事例⁵⁾に倣い表-3に示す複数のレベル1地震動の最大加速度を振幅調整することで、表-4に示す43波形を入力地震動として設定した。なお、本研究では地盤の液状化を考慮しない。

(2) 2次元地震応答解析結果の整理

本研究では、栈橋上部工の最大加速度を重力加速度で除した値を作用震度と定義する(式(5))。

$$kh_{2D} = a_{2D} / g \quad (5)$$

ここに、 kh_{2D} : 2次元地震応答解析から求めた作用震度、 a_{2D} : 上部工最大加速度(Gal)、 g : 重力加速度である。

図-7に作用震度と固有周期の関係を示すが、作用震度が大きい計算事例ほど固有周期は大きくなる。これは、地震作用に伴い栈橋杭周辺の地盤剛性が低下することに起因すると考えられる。地盤のせん断剛性は式(6)より示せるため、地盤のせん断応力とせん断ひずみの時刻歴を

表-2 栈橋バネ定数補正係数の平均値

基準面	補正係数 M_k の平均値
仮想海底面	3.38
実海底面	0.92

表-3 入力地震動一覧^{5),6)}

波形	最大加速度	卓越周期	波形	最大加速度	卓越周期
八戸	214.20 Gal	1.163s	常陸那珂	159.18 Gal	1.042s
岩国	312.27 Gal	0.238s	千葉	94.97 Gal	1.342s
博多	166.07 Gal	0.476s	四日市	108.05 Gal	1.377s
石巻	247.61 Gal	1.000s	舞鶴	380.53 Gal	0.216s
清水	132.02 Gal	1.587s	神戸	274.06 Gal	0.356s

表-4 入力地震動の振幅調整一覧

最大加速度	波数	入力波形
5 Gal	3	八戸, 岩国, 博多
10 Gal	3	八戸, 岩国, 博多
20 Gal	3	八戸, 岩国, 博多
50 Gal	3	八戸, 岩国, 博多
100 Gal	5	八戸, 岩国, 博多, 石巻, 清水
150 Gal	3	八戸, 岩国, 博多
200 Gal	5	八戸, 岩国, 博多, 石巻, 清水
300 Gal	5	八戸, 岩国, 博多, 石巻, 清水
500 Gal	3	八戸, 岩国, 博多
表-3	10	八戸, 岩国, 博多, 石巻, 清水, 常陸那珂, 千葉, 四日市, 舞鶴, 神戸

地震応答解析により求めることで、せん断応力最大時のせん断剛性 $G_{\max}$ を得ることができる。

$$G = \tau_{xy} / \gamma_{xy} \quad (6)$$

ここに、 G : 地盤のせん断剛性(kN/m²)、 τ_{xy} : 地盤のせん断応力(kN/m²)、 γ_{xy} : 地盤のせん断ひずみである。

L1 地震動に対する仮想固定点周辺地盤のせん断応力とせん断ひずみの時刻歴、およびせん断応力最大時のせん断剛性の一例を図-8に示すが、強い地震動に対しせん断応力最大時のせん断剛性は減少する。このため、せん断応力最大時のせん断剛性 $G_{\max}$ と動的解析開始時のせん断剛性 G_0 の比($G_{\max}/G_0$)により、地盤剛性の低下量を0~1の変数とすることで、作用震度の増加に伴う地盤の剛性低下を表現できる(図-9)。一方、作用震度と固有周期には関係性があり(図-7)、両者の関係性を整理することで、せん断剛性比から固有周期を推定できる。

最大加速度10Galの地震動における固有周期(T_{s10Gal})と各解析事例における固有周期(T_s)の比を固有周期比(R_T)と定義すると、せん断剛性比と固有周期比の関係は図-10に示される。両者の関係を累乗近似することで式(7)、式(8)を得られ、せん断剛性比を入力パラメータとして固有周期比を予測することができる。

$$N=5 \text{ 未満} : R_T = R_{G2D}^{0.0777 \ln(N) - 0.264} \quad (7)$$

$$N=5 \text{ 以上} : R_T = R_{G2D}^{0.0352 \ln(N) - 0.196} \quad (8)$$

ここに、 R_T : 固有周期比、 R_{G2D} : 2次元地震応答解析におけるせん断剛性比($G_{\max}/G_0$)、 N : 仮想固定点周辺地盤の N 値である。

図-7 作用震度と固有周期の関係

図-8 せん断応力・せん断ひずみ時刻歴 (2次元地震応答解析)

図-9 作用震度とせん断剛性比の関係

(3) 1次元地震応答解析による地盤のせん断剛性の整理

前節では、2次元地震応答解析におけるせん断剛性比と固有周期の関係を整理したが、汎用性を考慮すると、地盤剛性は1次元地震応答解析より評価する必要がある。このため、1次元および2次元の地震応答解析から求まるせん断剛性比を比較する。なお、1次元地震応答解析はFLIPを適用し、栈橋中央部の地盤をモデル化する。また、地盤の初期せん断剛性 G_0 は、設計実務における利便性を考慮してID-MAKER[®]より設定される初期せん断剛性 G_{ma} と同値としたため、仮想固定点周辺地盤のせん断応力とせん断ひずみの時刻歴は図-11に示すように原点が初期値となる。したがって、2次元地震応答解析の初期せん断剛性 G_0 (初期自重解析直後、地震応答解析直前のせん断剛性)とは定義が異なるため留意されたい。

図-10 せん断剛性比と固有周期比の関係

図-11 せん断応力・せん断ひずみ時刻歴(1次元地震応答解析)

図-12 せん断剛性比の比較

図-12(左)に各解析事例におけるせん断剛性比とその相関係数を示すが、特にせん断剛性比が大きい解析事例で乖離が生じる。ただし、両者の相関係数は高いため、近似式により補正することが可能である。両者の関係を累乗近似で表すと式(9)(10)となる。

$$N=5\text{未満} : R_{G2D} = 1.385 R_{G1D} \cdot N^{0.0853} \quad (9)$$

$$N=5\text{以上} : R_{G2D} = 1.485 R_{G1D} \cdot N^{0.0434} \quad (10)$$

ここに、 R_{G1D} :1次元地震応答解析におけるせん断剛性比である。式(9)、および式(10)と2次元地震応答解析結果との比較は図-12(右)に示すとおりであり、1次元地震応答解析より求めたせん断剛性比から、2次元地震応答解析におけるせん断剛性比を予測することができる。

図-13 2次元地震応答解析と固有周期算出式の比較

表-5 固有周期(2次元地震応答解析)/固有周期(算出式)の
平均値と標準偏差

		N=1	N=5	N=10	N=15
式(11)	平均値 μ	1.031	1.018	1.019	1.027
	標準偏差 σ	0.133	0.073	0.057	0.057
式(1)	平均値 μ	0.656	0.615	0.607	0.608
	標準偏差 σ	0.124	0.068	0.053	0.052

(4) 補正法の構築

前節までの検討結果を取りまとめ、栈橋の固有周期の動的特性を反映した補正法を構築する。

微小な地震動に対する固有周期は式(3)より求めることができ、2次元地震応答解析の固有周期比は式(7)、および式(8)より、仮想固定点周辺地盤のせん断剛性比から求めることができる。さらに、2次元地震応答解析における仮想固定点周辺地盤のせん断剛性比は、1次元地震応答解析のせん断剛性比および式(9)、式(10)により求めることができるため、式(7)、式(8)に式(9)、式(10)を代入することで、1次元地震応答解析のせん断剛性比から2次元地震応答解析の固有周期比を予測することができる。

$$T_{Sdyna} = R_{TS} \cdot T_{Sstat} \quad (11)$$

$$T_{Sstat} = 2\pi \sqrt{W/(gM_K K)} \quad (12)$$

$$N=5 \text{ 未満} : R_{TS} = (1.3845 R_{G1D} \cdot N^{0.0853})^{0.0777 \ln(N) - 0.264} \quad (13)$$

$$N=5 \text{ 以上} : R_{TS} = (1.4854 R_{G1D} \cdot N^{0.0434})^{0.0352 \ln(N) - 0.196} \quad (14)$$

ここに、

T_{Sdyna} : 地震時における栈橋の固有周期

R_{TS} : 固有周期比 (静的状態を基準とした、地震時における固有周期の変化率)

T_{Sstat} : 静的状態における栈橋の固有周期(s)

W : 杭1列が受け持つ自重、載荷重(kN)

g : 重力加速度(m/s^2)

M_K : 栈橋バネ定数の補正係数(=3.38)

図-14 固有周期に対応する加速度応答スペクトルの一例

図-15 照査用震度の比較

K : 栈橋バネ定数(kN/m)

N : 仮想固定点周辺地盤における N 値

R_{G1D} : 1次元地震応答解析より求めたせん断剛性比である。

図-13に式(1)、式(11)、および2次元地震応答解析から求めた固有周期の比較を示し、表-5に算出式から得られた固有周期と2次元地震応答解析から得られた固有周期の比の平均値と標準偏差を示す。図-13および表-5より、現行法と比較して補正法は2次元地震応答解析とよく整合することが確認できる。

(5) 照査用震度への影響評価

H19基準における直杭式栈橋の照査用震度算出法では、仮想固定点における加速度応答スペクトルについて、栈橋の固有周期に対応する加速度応答を栈橋上部工に生ずる最大加速度 a_{max} として採用する。したがって、図-14に示すように、同一の検討断面および加速度応答スペクトルであっても、固有周期の評価法によって a_{max} は異なる値となる。

表-3に示した10波形について、2次元地震応答解析から算出した固有周期に対応する照査用震度と、式(1)および式(11)から算出した固有周期に対応する照査用震度を整理すると図-15に示すとおりとなる。図-15より、式(1)に基づいて固有周期を算出すると照査用震度を小さく評価する傾向があることが確認できる。

図-16 式(1)と2次元地震応答解析との照査用震度比

図-17 式(11)と2次元地震応答解析との照査用震度比

図-18 各入力地震動の加速度応答スペクトル (周期0.5~1.5s)

図-16、図-17に検討断面および入力地震動ごとの照査用震度の比を示すが、特に舞鶴、岩国、博多を入力地震動とした解析事例において乖離が顕著となる。これは、図-18に示すように、これらの波形は周期ごとの加速度応答スペクトルの変化が大きく、固有周期の算出精度が照査用震度に強く影響するためである。一方で、図-15、図-17に示したように、式(11)から算出される固有周期に対応する照査用震度は2次元地震応答解析とよく整合しており、入力地震動の振動特性を適切に反映した固有周期や照査用震度を得ることができると判断される。

STUDY OF A METHOD OF CALCULATING NATURAL PERIOD OF OPEN-TYPE WHARVES WITH VERTICAL PILE CONSIDERING THE NONLINEARITY OF SOIL STIFFNESS ACCOMPANYING EARTHQUAKE GROUND MOTION

Masaru KATSUMATA, Yusuke FUKUNAGA, Masahiro TAKENOBU,
Masafumi MIYATA and Eiji KOHAMA

Natural period of open-type wharves with vertical pile is estimated from a spring constant of wharves calculated by frame analysis according to 2007 technical standards for port facility. But to this method it is pointed out that the calculation result deviates from the 2D-Seismic Response Analysis. In addition, this method is not affected by seismic motion, although natural period of wharves should be affected by strength of seismic motion because soil stiffness around piles decrease by seismic motion.

In this study, we evaluate the natural period and decreasing rate of soil stiffness by Seismic Response Analysis, and organize the relationship between them. Thereby, we correct the current method to be consistent with the 2D-Seismic Response Analysis.

4. おわりに

本研究では、地震作用に伴う栈橋の固有周期や地盤剛性の変化を地震応答解析より評価し、その関係性を整理した。現段階では物理的なメカニズムの解明とそれに基づく定式化には至っていないが、両者の関係性を統計的に分析することで、比較的簡易な補正で現行法を2次元地震応答解析に整合させることが可能であると示した。

なお、本研究の検討範囲において、せん断剛性比と固有周期比の関係は原地盤N値の大小に大きく影響されたが、設計水深や杭剛性の差異はさほど影響していない。一方で、固有周期に影響する要素として、上部工荷重や上載荷重、渡版の有無、捨石基礎の勾配や配置などが考えられるが、本研究ではこれらの差異が補正法に与える影響について検討できていない。したがって、本研究の検討範囲は、砂地盤に構築された、上載荷重が載加されていない渡版を有さないRC栈橋に留まるため、より広範な設計条件についての検討が必要である。

参考文献

- 1) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，2007
- 2) 長尾毅：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.
- 3) 田代聡一，井合進，一井康二，井福周介，高原裕一：常時微動観測による既設栈橋の振動特性の検討（解析編），土木学会第54回年次学術講演会，pp.166-167，1999.
- 4) 柴原直範，長尾毅：直杭式栈橋の動的特性を考慮した照査用震度の算出方法に関する基礎的研究，国土技術政策総合研究所資料，No.591，2010.
- 5) 大久保陽介，小濱英司，楠謙吾：直杭式横栈橋の異なる照査手法による栈橋応答の比較，土木学会論文集B3，Vol.68，No.2，I438-I443，2012.
- 6) 国土技術政策総合研究所 港湾施設研究室HP，<http://www.ysk.nilim.go.jp/kakubu/kouwan/sisetu/sisetu.html>
- 7) 菊池喜昭，小椋卓美，石丸守，近藤武司：捨石地盤の横方向地盤反力係数，土木学会第53回年次学術講演会，pp.52-53，1998.

(2018.2.8 受付)