Kobe University Repository : Kernel

PDF issue: 2025-07-08

ニューマチックケーソン式横桟橋の耐震性能照査法に関する研究

大石，雅彦
長尾，毅
大内，正敏
佐藤，祐輔
清宮，理

(Citation)
土木学会論文集B3（海洋開発）,69(2):I_155-160

(Issue Date)
2013

(Resource Type)
journal article

(Version)
Version of Record

(Rights)
©2013 公益社団法人 土木学会

(URL)
https://hdl.handle.net/20.500.14094/90002802

土木学会論文集B3(海洋開発), Vol. 69, No. 2, I_155-I_160, 2013.

ニューマチックケーソン式横桟橋の耐震性能照査法に関する研究

大石　雅彦[1]・長尾　毅[2]・大内　正敏[3]・佐藤　祐輔[4]・清宮　理[5]

[1]正会員　オリエンタル白石(株)　施工・技術本部技術部（〒135-0061 東京都江東区豊洲5-6-52）
E-mail:masahiko.oishi@orsc.co.jp

[2]正会員　神戸大学　都市安全研究センター（〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1）
E-mail: nagao@people.kobe-u.ac.jp

[3]正会員　オリエンタル白石(株)　施工・技術本部技術部（〒135-0061 東京都江東区豊洲5-6-52））
E-mail: masatoshi.ouchi@orsc.co.jp

[4]正会員　オリエンタル白石(株)　施工・技術本部技術部（〒135-0061 東京都江東区豊洲5-6-52）
E-mail: yusuke.satou@orsc.co.jp

[5]フェロー会員　早稲田大学建設工学専攻（〒169-8855 東京都新宿区大久保3-4-1）
E-mail: k9036@waseda.jp

ニューマチックケーソンを基礎に適用した既設の港湾施設の横桟橋を対象に，常時微動観測により振動特性を把握し，2次元地震応答解析結果と比較することで振動特性が解析により正確に評価できることを示した．その結果を踏まえ，地盤の１次元地震応答解析により地盤ばねを評価し，これを骨組みモデルに適用することで，本工法を適用した横桟橋のレベル１地震動に対する簡易耐震性能照査を提案した．簡易耐震性能照査法において用いる減衰定数についての提案を行った．

Key Words : *caisson foundation,wharf, natural frequency, earthquake resistant design*

1.　はじめに

我が国の港湾構造物の耐震性能照査法は港湾の施設の技術上の基準[1)]（以下，港湾基準）に記述されているが，本研究で対象とするニューマチックケーソン式横桟橋のケーソン基礎については具体的な方法は示されてない．設計実務では，複数ある構造形式からまず簡易照査によって候補となる構造形式を絞り込んだうえで詳細な検討が行われるため，ケーソン基礎について簡易耐震性能照査法を構築する必要がある．このような背景を踏まえ，筆者らは仮想のケーソン基礎を対象に，ケーソン基礎をモデル化した解析を行うことによりレベル１地震動に対する簡易耐震照査法を提案した[2)]．簡易耐震照査法は，設計実務における簡便性を考慮して，ニューマチックケーソン式横桟橋の固有周期を骨組みモデルを用いて算出し，一次元の地震応答計算結果をもとにしたスペクトル応答加速度によって構造物に作用する断面力を評価するものである．既往の研究により簡易耐震照査法の適用可能性が示されたが，限られた断面での検討であること，実際の構造物を対象とした研究ではないために手法の精度確認の観点で議論の余地があった．

本研究では新たな断面として既設のケーソン基礎を対象に常時微動観測により振動特性を評価するとともに，２次元地震応答解析を行うことで解析精度を確認した．その結果を踏まえ，レベル１地震動に対する簡易照査法の適用性を検討した．特に本研究では，簡易耐震照査法において用いる減衰定数について新たな提案を行った．

2.　固有周期の解析

(1)　解析方法

今回，解析対象としたのは昭和30年代に建設された横桟橋であり，その構造概要を図-1に示す．ケーソン基礎は3.7 m×3.7 mの矩形断面であり，法線方向には14.0 mピッチに設置されている．

動的解析は，２次元有効応力解析プログラムFLIP[3)]を用いて法線直角方向について実施した．解析モデルの主要部を図-2に示す．ケーソン基礎およびRC桁からなる桟橋は線形梁要素でモデル化した．また，土留めとなるRC矢板も線形梁要素でモデル化した．ケーソンと土留

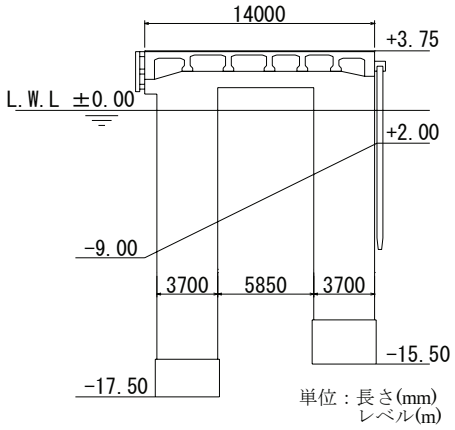

図-1　桟橋構造

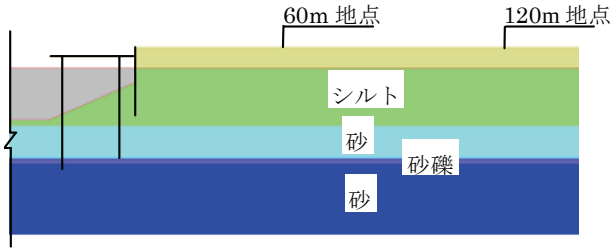

図-2　解析モデル

表-1　地盤パラメータ

標高 (m)	土層名	湿潤密度	基準有効拘束圧	基準初期せん断剛性	粘着力	内部摩擦角
		ρ (t/m^3)	σ_{ma}' (kN/m^2)	G_{ma} (kN/m^2)	c (kN/m^2)	ϕ (°)
-10.0	シルト	1.5	81	11 730	0	30
-15.5	砂	2.0	133	88 200	0	40
-16.5	砂礫	2.0	166	125 000	0	42
-25.5	砂	2.0	238	96 800	0	40

めの間には0.15 mの離隔があり，両者は接触しないものとしてモデル化した．基本的に，解析法は既往の研究の方法[2]と同様としている．

地盤パラメータを表-1に示す．初期せん断剛性は初期有効拘束圧に対応して設定した．これらの地盤パラメータは，森田らの提案する方法[4]に準じて設定した．解析領域の下面は粘性境界，側面は粘性＋反力境界とし，水平方向の解析領域幅は桟橋中央に対して左右それぞれ150 m位置に設定した．入力波は微小振幅（最大0.01 m/s^2）のWhite Noise波を用いた．

一方，解析により推定される固有振動数の精度検証のため，常時微動観測を実施した．常時微動は，桟橋上および桟橋背後の60 mおよび120 mの位置で観測した．常時微動の水平成分について，桟橋上と背後地盤の比（H/Hスペクトル）を取ることで桟橋の固有振動数が推定できることが既往の研究[5,6]により確かめられている．

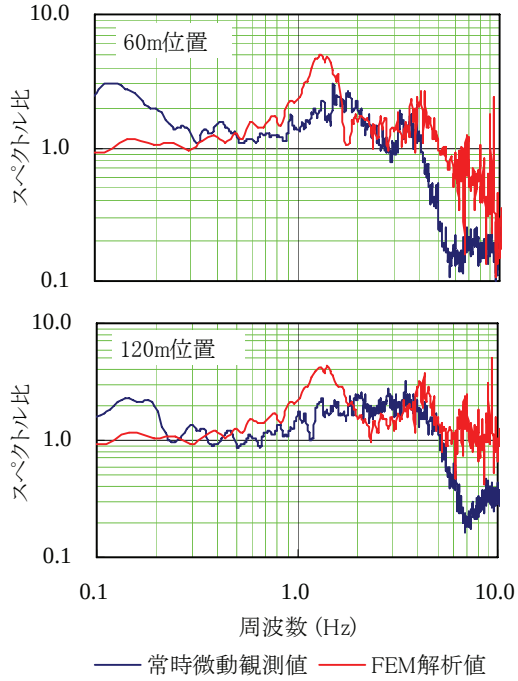

図-3　地盤のスペクトル比

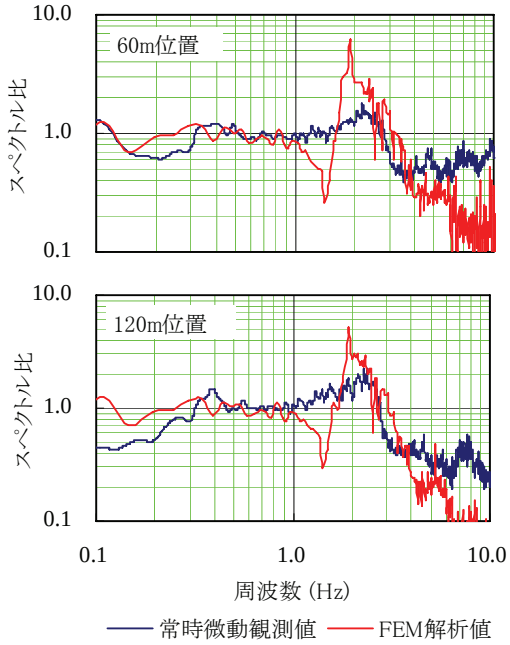

図-4　桟橋のスペクトル比

(2)　解析結果

２次元解析と常時微動観測結果を比較することで，解析法の妥当性を検証することとする．背後地盤のスペクトル比を図-3に示す．ここで常時微動のスペクトル比は，地表面における鉛直方向に対する水平方向の比（H/Vスペクトル）であり，そのピーク周波数が地盤の固有周期に対応することは広く知られている[7]．FEM解析は，地表-1/β位置の水平方向に対する地表水平方向の比である．ここに，βは基礎と地盤の相対的な剛性の比を表わすパラメータで，港湾基準[1]では杭の特性値と呼ばれている．地盤剛性は地盤の初期せん断弾性係数から計算し，本解析では1/βは7.62 mとなっている．両スペクトル比のピ

表-2　卓越周波数(Hz)

	地点	常時微動	FEM解析
背後地盤	60m	1.5, 3.9	1.4, 4.1
	120m	3.2	1.4, 4.1
桟橋	60m	2.0	1.9
	120m	2.1	1.9

ーク値から得た卓越周波数を表-2のうち背後地盤と標記して示す．なお，常時微動では表面波が卓越していると考えられるもののFEM解析では基盤より地震波を鉛直入射したものであるため，スペクトル比の振幅の大きさを直接比較することは適切ではない．図から60 m位置での常時微動H/VスペクトルとFEM解析のスペクトル比の１次のピーク周波数（1.5 Hz付近）は概ね一致している．２次のピークについても4 Hz程度で概ね一致しており，FEM解析における桟橋付近の地盤構造の設定は妥当と考えられる．なお，120 m位置については，常時微動H/Vスペクトルのピーク周波数は3.2 Hzとなり，桟橋位置から内陸にかけて基盤が浅くなっていることが示唆される．一方FEM解析においては水平成層な地盤条件を仮定しているためピーク周波数は60 m位置と変化は無い．

桟橋上のスペクトル比を図-4に示す．ここで常時微動のスペクトル比は，背後地盤の地表面に対する桟橋頂部の水平方向の比（H/Hスペクトル），FEM解析は，地表-1/β位置に対する桟橋頂部の水平方向の比である．背後地盤と同様に，スペクトル比のピーク値から得た桟橋の卓越振動数を表-2のうち桟橋と標記して示す．常時微動とFEM解析によるピーク値は2.0 Hz付近であり，両者はほぼ一致している．

以上から，FEM解析による卓越振動数は常時微動計測結果と概ね一致することから，本解析の妥当性を確認できた．

3.　レベル１地震動に対する耐震性能照査

(1)　固有振動数

本章では，レベル１地震時に相当する入力地震動を用い，２章と同様な解析法により固有振動数を求めることとする．２章では微小振幅時の固有振動数を求めたが，ケーソン式桟橋では地震動の入力レベルが増加すると地盤の非線形化の影響を受けて固有振動数が低周波数化することが既往の研究により指摘されているためである[2)]．

入力地震動の種類は八戸波，大船渡波およびWhite Noise波の３種類の地震波とした．これらの入力地震波に対して振幅調整を行い，最大加速度において，八戸波は1.00 m/s^2，2.00 m/s^2，3.00 m/s^{2}の３ケース，大船渡とWhite Noise波は1.00 m/s^2，3.00 m/s^2，5.00 m/s^{2}の３ケースの

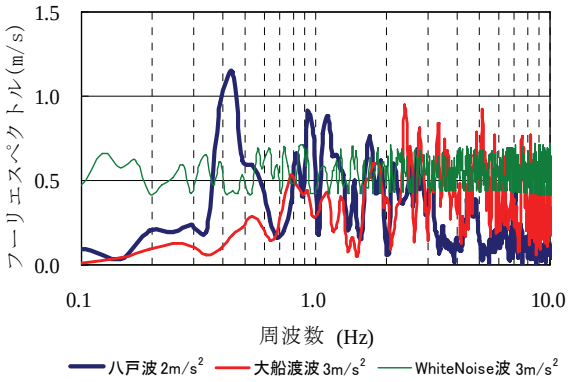

図-5　フーリエスペクトル

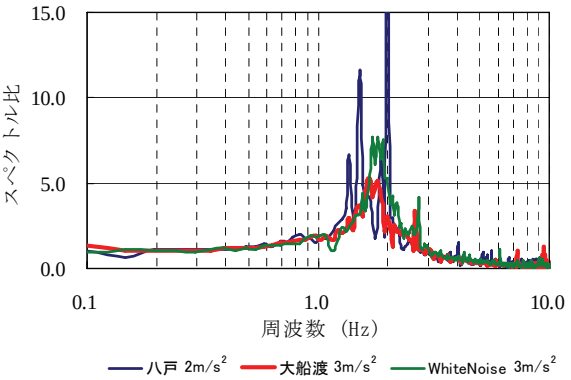

図-6　地盤面-1/βに対する桟橋頂部のスペクトル比

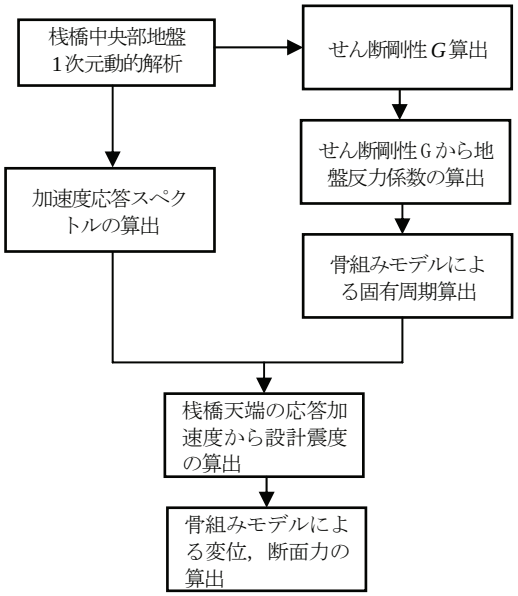

図-7　耐震性能照査の簡易法のフロー[2)]

合計９波で解析することとする．図-5に各波のフーリエスペクトルを示すように，八戸波は低周波領域に，大船渡波は高周波数領域にピークを有し，White Noise波は特定のピークを有さないものとなっている．

図-6に地盤面から-1/β位置に対する桟橋頂部のスペクトル比を示す．図のスペクトル比のピーク値から読み取れる固有振動数は1.6～2.0 Hzとなっている．レベル１地震時レベルの桟橋の固有振動数は，常時微動レベルに比

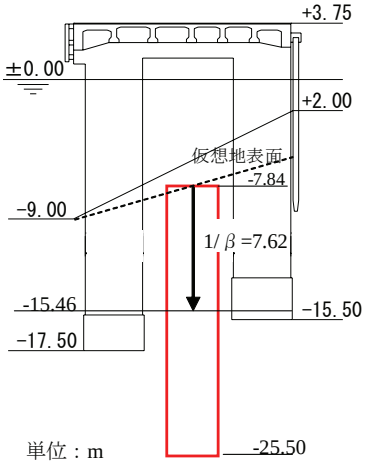

図-8　1次元解析モデル

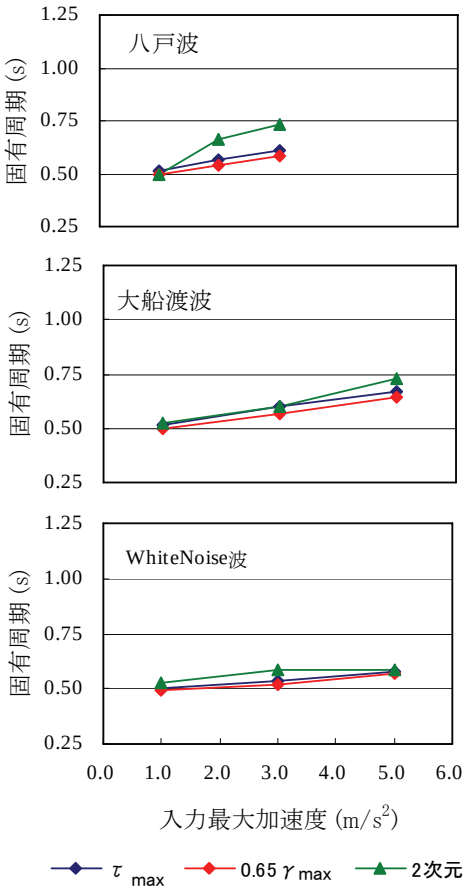

図-9　固有周期の比較

べて同等以下になっている．これは，常時微動に比べてレベル１地震の入力加速度が大きくなり，地盤の非線形の影響によるものと考えられる．

(2)　照査用震度

提案している簡易法のフロー[2)]を図-7に示す．簡易法は，桟橋中央部の地盤を抽出し，図-8に示す１次元動的解析により加速度応答スペクトルを求め，骨組み解析から固有周期を算出して桟橋の最大応答加速度を求めるものである．本節では，２次元FEM解析と提案する簡易法

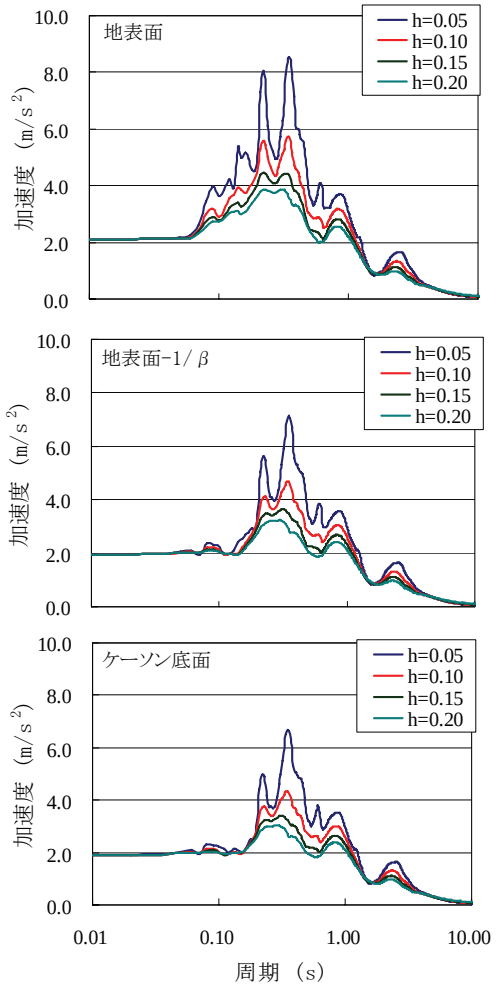

図-10　加速度応答スペクトル

を比較し，解析法の妥当性，留意点を検討することとする．

まず，簡易法の固有周期の算出について検討する．２次元FEM解析と簡易法で求めた固有周期を図-9に示す．図中には，簡易法の骨組み解析に必要な地盤反力係数を計算するためのせん断弾性係数Gの求め方について，最大せん断応力τ_{max}からと，最大せん断ひずみγ_{max}の0.65倍からの２方法から求めた固有周期を示している．既往研究[2)]と同様，せん断弾性係数Gの求め方による固有周期の差はほとんどなく，最大せん断応力からせん断弾性係数を求めることとする．また，２次元解析と簡易法の固有周期は全体的にあまり差がないが，八戸波の場合，２次元FEM解析は簡易法に比べて固有周期が長くなっている．簡易法においても１次元の地震応答計算により地盤の非線形化を考慮した地盤反力係数を用いて固有周期を算出しているが，１次元解析であるため構造物と地盤の相互作用の影響や斜面の影響などは考慮できない．低周波側の振幅の強い八戸波の場合はこれらが地盤の非線形化に及ぼす影響が強く，２次元解析と簡易法の間に差が大きく生じたものと考えられる．

次に，簡易法の１次元動的解析結果における応答加速

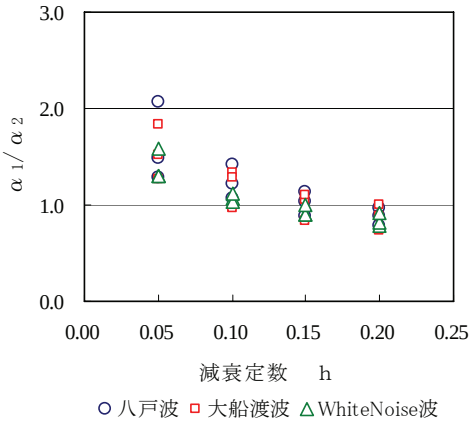

図-11 全波の応答加速度

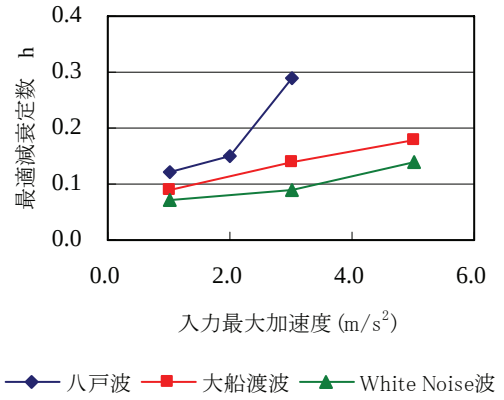

図-12 入力最大加速度と最適減衰定数の関係

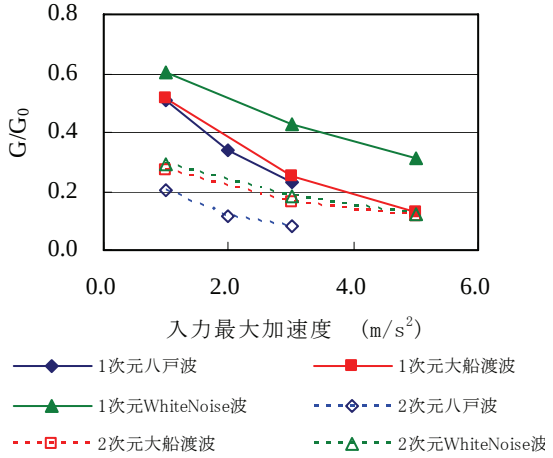

図-13 入力最大加速度と平均 G/G_0 の関係

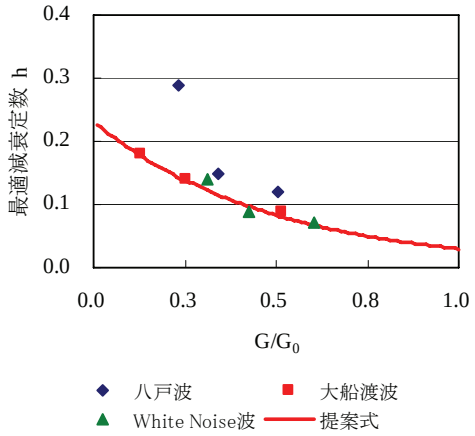

図-14 平均 G/G_0 と最適減衰定数の関係

度の算出位置について考察する．図-10に，八戸波で最大入力加速度2.0 m/s²の場合の１次元動的解析で計算された応答加速度による加速度応答スペクトルを示す．図中には，地表面位置，地表面-1/β位置およびケーソン底面位置から求めた加速度応答スペクトルを示している．地表面-1/β位置とケーソン底面位置の加速度応答スペクトルの差はほとんどなく，既往研究[2]と同様に地表面-1/β位置の応答加速度を使用して加速度応答スペクトルを計算するものとする．本論文では示していないが，他の入力地震動の場合も同様であり，後述する簡易法での桟橋頂部の応答加速度も２次元FEM解析との対応が良いことを確認している．

次に，簡易法における減衰定数hの設定法について考察する．全波形による２次元FEM解析の桟橋最大応答加速度α_2に対する簡易法の応答加速度α_1の比を図-11に示す．ここで簡易法は，これまで検討してきたように，１次元FEM解析結果の最大せん断応力から求めたせん断弾性係数を使用して固有周期を求め，加速度応答スペクトルは地表面-1/β から抽出した応答加速度によるものである．今回の検討範囲では，簡易法で用いる減衰定数hは既往研究の0.05[2]よりも0.10程度が適切であることが分かった．同様な研究として，杭基礎で支持された横桟橋のレベル１地震時の照査用震度に関する横田らの研究があり，簡易法の減衰定数を大きくしないと２次元FEM解析の応答加速度と等しくならない原因として，斜面や背後地盤の影響を挙げている[8]．ただし，地盤の非線形性の影響については考慮されていないため，本研究では，特に地盤の非線形性と簡易法で用いる減衰定数hの関係について検討することとする．

まず，２次元FEM解析と簡易法の応答加速度が等しくなるような加速度応答スペクトルにおける最適な減衰定数を求めた．図-12に入力最大加速度と最適減衰定数の関係を示す．入力加速度が増加するに従って最適減衰定数は増加しているが，特に八戸波の入力最大加速度3.0 m/s²において最適減衰定数が大きく，これは地盤の非線形の影響を強く受けていると考えられる．

次に，地盤の非線形性の具体的な指標として，桟橋中央位置における初期に対するせん断弾性係数の深さ方向平均比G/G_0を求めた．図-13に入力最大加速度と平均G/G_0の関係を示す．２次元解析に比べて１次元解析の方が動的相互作用等の影響を考慮できないため平均G/G_0が大きいが，全体的には１次元解析と２次元解析は同様な傾向を示している．したがって，１次元解析の非線形性を把握すれば２次元解析の非線形の傾向を把握できると

考えられる．

そこで，１次元解析の平均G/G_0と最適減衰定数の関係を**図-14**に示す．特に非線形性が卓越する八戸波3.0 m/s^{2}では他のデータと傾向が異なっているが，全般的には最適減衰定数と平均G/G_0は，ある特定の関係があるといえる．設計の安全側を考慮して最適減衰定数の下限を通る以下の指数関数式を求め，図中にプロットする．

$$h = 0.23 \times 0.13^{G/G_0} \tag{1}$$

簡易法において１次元解析により平均G/G_0を算出し，減衰定数を(1)式により設定すれば，安全側でかつ地盤の非線形性を考慮した比較的精度の良い桟橋の応答加速度が得られると考えられる．

4. おわりに

ケーソン基礎で支持された実桟橋の常時微動を計測し，スペクトル比の比較により本研究で用いている解析法の妥当性を確認した．その解析法を基に，レベル１地震時の簡易な耐震性能照査法を検討した．本研究による主要な結論は以下のとおりである．

1) 簡易法の骨組み解析により固有周期を計算する場合，既往研究[2)]と同様に，加震による地盤のせん断剛性の低下を考慮することにより固有周期を概ね正しく評価できる．
2) １次元地震応答解析で得られた加速度応答スペクトル計算において，既往研究[2)]と同様に，１次元の加速度位置は地表面下1/β を採用すると，２次元解析で得られた桟橋頂部の応答加速度に一致する．
3) 加速度応答スペクトル計算における最適な減衰定数は，地震波の種類によっては地盤の非線形性の影響を強く受けることを確認し，簡易法において新たにG/G_0と減衰定数の関係式を提案した．

今後は，更に検討ケース数を増やすことなどにより提案法の精度を高めていく必要がある．

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) 大石雅彦，長尾　毅，茂木浩二，大内正敏，佐藤祐輔，清宮理：ニューマチックケーソン式横桟橋の地震時挙動および耐震性能照査法に関する研究，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），Vol. 68, No. 4, 2012.
3) Susumu Iai, Yasuo Matsunaga, Tomohiro Kameoka: Strain Space Plasticity Model for Cyclic Mobility, SOILS AND FOUNDATIONS, Vol.32, No.2, pp1-15, 1992.
4) 森田年一，井合　進，Hanlong Liu，一井康二，佐藤幸博：液状化による構造物被害予測プログラム FLIP において必要な各種パラメタの簡易設定法，港湾技術資料, No.869, 1997.
5) 長尾　毅，田代聡一：桟橋式岸壁の耐震性照査手法に関する解析的研究，土木学会論文集，No.710，Ｉ-60，pp.385-398，2002
6) 長尾　毅，岩田直樹，岡田達彦，上田　茂：桟橋式岸壁の船舶接岸時における変形に関する研究，海岸工学論文集，第 50 巻，pp.811-815，2003
7) Kudo, K., Sawada, Y. and Horike, M. : Current studies in Japan on H/V and phase velocity dispersion of microtremors for site char-acterization, Proc. 13WCEE, Paper No.1144, 2004
8) 横田弘，竹鼻直人，南兼一郎，高橋邦夫，川端規之：鋼管杭式桟橋の地震応答解析結果に基づく設計水平震度の考察，港湾技術研究所報告, 第 37 巻第２号, 1998.

A STUDY ON EARTHQUAKE RESISTANT DESIGN METHOD OF AN OPEN TYPE WHARF WITH PNEUMATIC CAISSONS

Masahiko OISHI, Takashi NAGAO, Masatoshi OUCHI, Yuske SATO and Osamu KIYOMIYA

Seismic characteristic of an open type wharf was assesed both by microtremor measurement and two-dimensional earthquake response analysis. It was shown that natural frequencies of an open type wharf estimated by two methods well agreed. Autohrs next studied a simple erthquake resistant design method of an open type wharf using frame model and one dimensional earthquake response analysis considering the applicability to practical design. A setting method of damping coefficient to be used in the simple design method was proposed.