



直杭式横棧橋の地震時断面力信頼性に関する簡易評価法

平井, 俊之
長尾, 毅

(Citation)

神戸大学都市安全研究センター研究報告, 24:166-175

(Issue Date)

2020-03

(Resource Type)

departmental bulletin paper

(Version)

Version of Record

(JaLCD0I)

<https://doi.org/10.24546/81013268>

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/81013268>



直杭式横棧橋の地震時断面力信頼性に関する 簡易評価法

A simplified bending moment reliability estimation method for pile-supported wharf by earthquake

平井 俊之¹⁾
Toshiyuki Hirai
長尾 毅²⁾
Takashi Nagao

概要:信頼性設計法の導入により、港湾構造物の耐震性を破壊確率等の指標に基づいて設計することが可能となっている。棧橋の耐震性を評価するためには、変形量だけでなく、棧橋杭の曲げモーメント等断面力の評価が重要である。杭の断面力を確率論的に評価するためには、地震動の強さ等のばらつきの影響を考慮した2次元の地震応答解析を多数実施する必要がある、現状では多くの労力が必要である。本研究では、棧橋を対象として、入力地震動のばらつきにより生じる杭の断面力のばらつきを簡易的に評価する手法について検討を行った。その結果、入力地震動のフーリエ振幅の二乗和(SSFA: Summed Squared Fourier Amplitude)を指標として、平均及び平均±標準偏差のサイト増幅特性を用いた計3ケースの地震応答解析を行うことによって簡易的に評価できることの可能性が示された。

キーワード:棧橋、曲げモーメント、耐震信頼性、簡易評価

1. はじめに

主要な港湾構造物の1つである棧橋は、港湾の施設の技術上の基準・同解説¹⁾(以下、「港湾基準」と略記する)に基づいて設計されている。港湾基準においては、レベル1地震動に対する耐震設計には信頼性設計法が導入されており、作用側の設計用値(S_d)と耐力側の設計用値(R_d)のばらつきを考慮して破壊確率を用いた安全性の確認が行われている。

地震動の特性は、大きく震源特性、伝播経路特性、サイト増幅特性に分けることができる²⁾。特に地震基盤から工学的基盤までの地盤の特性であるサイト増幅特性は、地震動の周波数特性の主要因の1つであり、棧橋に対して、その固有振動数との関係から地震時の挙動に大きな影響を与える。多くの地震観測記録の分析等によって、サイト増幅特性はばらつきを有することが分かっているが、現在の港湾基準ではサイト増幅特性のばらつきは考慮されておらず、平均的な特性を用いて設計を行っている。そこで、棧橋の安定性をより精度よく確率論的に評価する場合、地震動のサイト増幅特性のばらつきの影響を考慮に入れることは重要である。

地震時の棧橋の安定性を評価する指標としては、棧橋法線の変形量や棧橋杭の断面力がある。特に、棧橋の場合、杭の断面力は重要であり、地震後の水平変形量が耐震強化施設の許容値の目安である1m以内に収まっても杭が損傷して安定性を確保できない状況が想定される。そこで、ここでは棧橋の安定性の評価指標として杭の断面力である曲げモーメントに着目する。サイト増幅特性のばらつきを考慮して棧橋の安定

性を確率論的に評価する場合、モンテカルロシミュレーション^{3),4)}に代表される多数回の2次元地震応答解析を行って、杭の曲げモーメントの確率密度分布を求める必要がある。しかし、2次元地震応答解析は計算負荷が高いため、設計実務において多数回の試行を行うことは現実的ではない。これに対して、数回の地震応答解析結果から1次近似2次モーメント法等によって破壊確率を簡易的に求める方法が提案され^{5),6)}、検討がなされている。また、数回の地震応答解析により重力式岸壁の耐震信頼性を評価する方法について研究が行われている^{5),7)}。さらに、同様の手法により栈橋の残留変形量を評価する方法についても研究が行われている⁸⁾。本研究では、数回の地震応答解析によって栈橋杭の曲げモーメントの確率密度分布を評価する方法について検討した。

2. 検討方法

(1) 入力地震動

地震動の震源特性、伝播経路特性、サイト増幅特性のうち、ここでは、栈橋の地震応答に影響が大きいと考えられる地震動の周波数特性に深い関係があるサイト増幅特性のばらつきに着目して検討を行った。

入力地震動は確率論的地震ハザード解析⁹⁾によって算定された熊本港のレベル1地震動と仙台塩釜港のレベル1地震動を元にした。仙台塩釜港では、レベル1地震動は図1(a)に示すMYG012の平均的なサイト増幅特性¹⁰⁾を用いて設定されている。MYG012とMYG013では、スペクトルインバージョンによってサイト増幅特性が求められており、ここではMYG012とMYG013の同時地震観測記録ごとに次式によりMYG012のサイト増幅特性を求め、元の平均的なサイト増幅特性と入れ替えることによって136個の入力地震動を作成した。

$$G_{j,t}(f) = G_{j,r}(f) \frac{O_{ij,t}(f)R_{ij,t}}{O_{ij,r}(f)R_{ij,r}} \quad (1)$$

ここに、 f は周波数であり、サイト j のサイト増幅特性を G_j 、地震 i のサイト j における観測記録のフーリエ振幅を O_{ij} 、震源距離を R_{ij} とする。 t は対象地点(MYG012)、 r は参照地点(MYG013)を示している。同時観測記録はマグニチュード4から7程度で震源距離が200km程度以下までの SN 比が良好な記録を対象とした。同様に、図1(b)に示すKMM06の平均的なサイト増幅特性を用いて算定された熊本港のレベル1地震動に対し

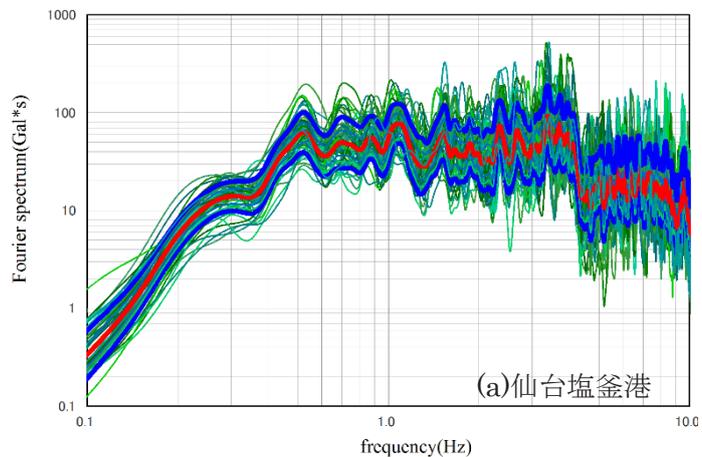


(a)仙台塩釜港付近

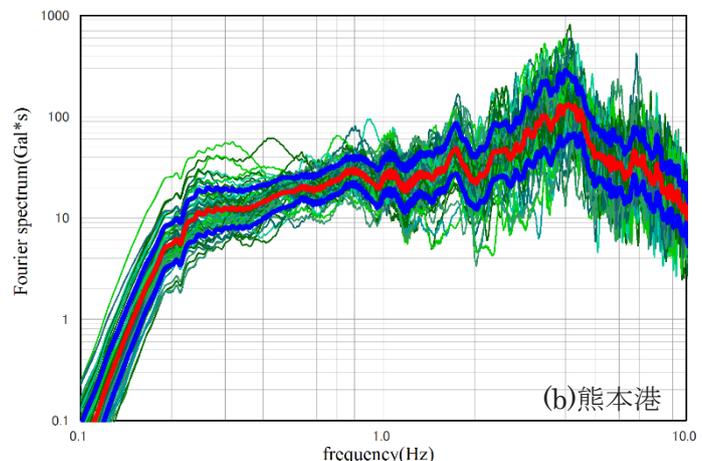


(b)熊本港付近

図1 レベル1地震動の評価に用いられた強震観測点とその近傍の強震観測点の位置関係



(a)仙台塩釜港



(b)熊本港

図2 入力地震動のフーリエ振幅スペクトル

て、KMM06とKMMH16との同時地震観測記録から、57個の入力地震動を作成した。同時観測記録はマグニチュード3.5から6程度で震源距離が150km程度以下までのSN比が良好な記録を対象とした。図2に各入力地震動のフーリエ振幅スペクトルを示す。赤太線が平均を、青太線が平均±標準偏差を示している。図3に元のレベル1地震動の波形を示す。

(2) 対象栈橋

栈橋にはいくつかの種類があるが、一般的な直杭式横栈橋を検討対象とした。熊本港と仙台塩釜港のレベル1地震動に対して、港湾基準に基づいて照査用震度を算定し耐震設計を行った。図4に栈橋の解析モデルを示す。栈橋周辺を拡大して示しているが、FEMモデルは左右に約100m広げて境界の影響が少なくなるようモデル化している。地震応答解析にはFLIP¹¹⁾を用いた。想定した地盤物性値を表1及び表2に示す。

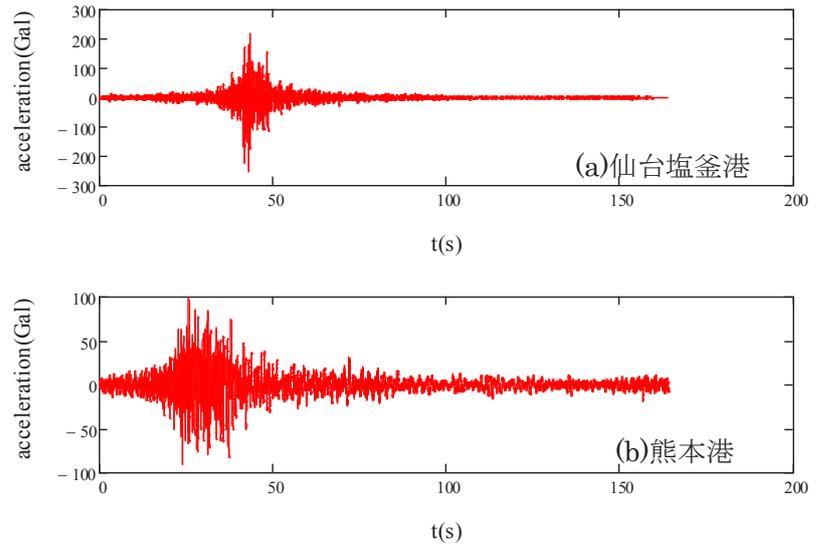


図3 レベル1地震動の波形

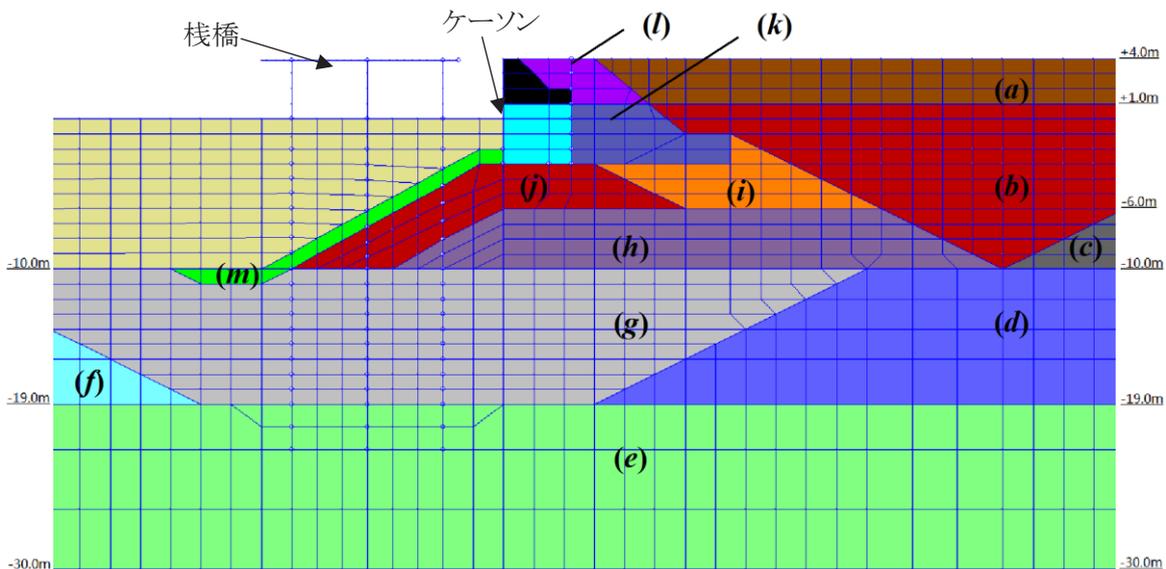


図4 栈橋のモデル

表1 地盤物性値

層名	密度 ρ (t/m ³)	間隙率 n	初期せん断 剛性 G_{ma} (kN/m ²)	基準拘束圧 力 σ'_{ma} (kN/m ²)	内部摩擦角 ϕ_f (°)
(a)埋立土(水面上)	1.45	0.45	6797	98	30
(b)埋立土(水面下)	1.45	0.45	10100	98	30
(c)粘土陸側1	1.45	0.55	14880	98	30
(d)粘土陸側2	1.45	0.55	14880	98	30
(e)基盤	2.00	0.45	249218	98	44
(f)粘土海側	1.45	0.55	17170	98	0
(g)置換砂	1.84	0.45	38930	39.4	41.2
(h)盛砂	1.84	0.45	38930	39.4	41.2
(i)裏込砂	1.84	0.45	38930	39.4	41.2
(j)基礎石	2.00	0.45	180000	98	35
(k)裏込石(水面下)	2.00	0.45	180000	98	40
(l)裏込石(水面上)	1.80	0.45	180000	98	40
(m)張石	2.00	0.45	180000	98	35

栈橋杭の杭剛性の変化による地震応答の違いを把握するため、作用耐力比が異なる杭条件を 4 ケース設定した。表 3 に各杭の全塑性モーメントを示す。case1 が港湾基準に基づいて設計した通常の諸元である。各ケースの栈橋の作用耐力比と固有振動数を表 4 に示す。

表 2 液状化が想定される土層の液状化パラメータ

層名	液状化パラメータ				
	w_1	p_1	p_2	c_1	S_1
(g)裏込砂	4.2	0.5	0.845	1.93	0.005
(h)盛砂	4.2	0.5	0.845	1.93	0.005
(i)置換砂	4.2	0.5	0.845	1.93	0.005

表 3 杭の全塑性モーメント (kN・m/m) (左：仙台塩釜港、右：熊本港)

	重防食部	水中	土中		重防食部	水中	土中
case1	487.3	411.3	482.5	case1	487.3	411.3	482.5
case2	366.6	361.6	366.4	case2	183.4	180.9	183.2
case3	243.1	239.8	243.0	case3	91.7	90.4	91.6
case4	160.2	158.0	160.1	case4	61.8	61.0	61.8

表 4 各ケースの栈橋の作用耐力比と固有振動数

		case1	case2	case3	case4
仙台	作用耐力比(S/R)	0.5	0.7	1.0	1.5
	固有振動数(Hz)	1.23	1.00	0.88	0.73
熊本	作用耐力比(S/R)	0.2	0.5	1.0	1.5
	固有振動数(Hz)	1.12	0.83	0.60	0.50

(3) 地震動の大きさの指標

地震動の違いによる構造物の応答の違いを評価するためには、入力地震動の大きさを評価する指標が重要である。平井・長尾⁷⁾では、岸壁の変形に主に寄与するとされる 0.5Hz～5.0Hz の区間のフーリエ振幅の和 (SFA : Summed Fourier Amplitude) を用いているが、Nagao and Lu⁸⁾において、フーリエ振幅の二乗和 (SSFA : Summed Squared Fourier Amplitude) の方がより栈橋杭の残留変形量と相関が高いことが示されている。このため、本論文でも地震動の大きさの指標として SSFA を用いる。二乗和を行う周波数区間は、地震動の特性によって適切に設定すべきであり、エネルギーの主要な部分を構成する区間を抽出するという観点から、累積確率が 0.02～0.90 の範囲に設定した。結果として図 5 に示すように、仙台塩釜港の地震動では 0.5Hz～4.6Hz の区間、熊本港の地震動では 0.4Hz～3.7Hz の区間となった。

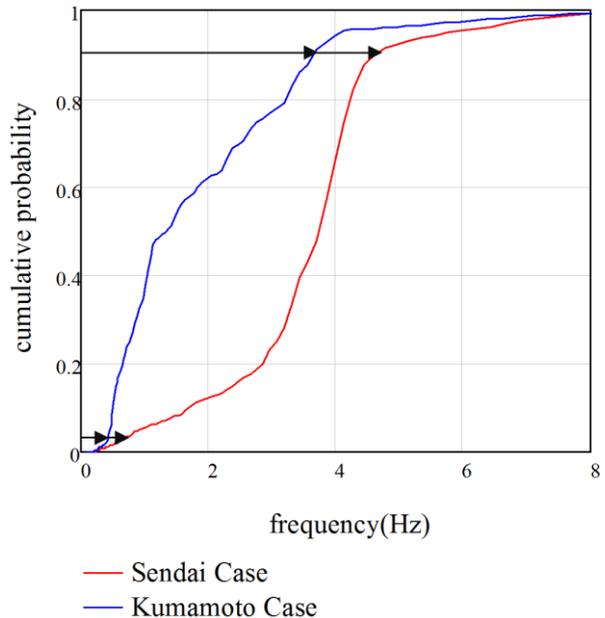


図 5 フーリエ振幅の累積確率と抽出区間の両端(矢印)

3. 検討結果

(1) 地震応答解析結果

仙台塩釜港の平均のサイト増幅特性の地震動を用いた場合の残留変形図+最大過剰間隙水圧比分布を地震応答解析結果の例として図 6 に示す。栈橋前面の置換砂の過剰間隙水圧比が上昇していることが分かる。また最も海側の栈橋杭の置換砂と粘性土の境界部で最大曲げモーメント $59\text{kN}\cdot\text{m/m}$ が発生している。

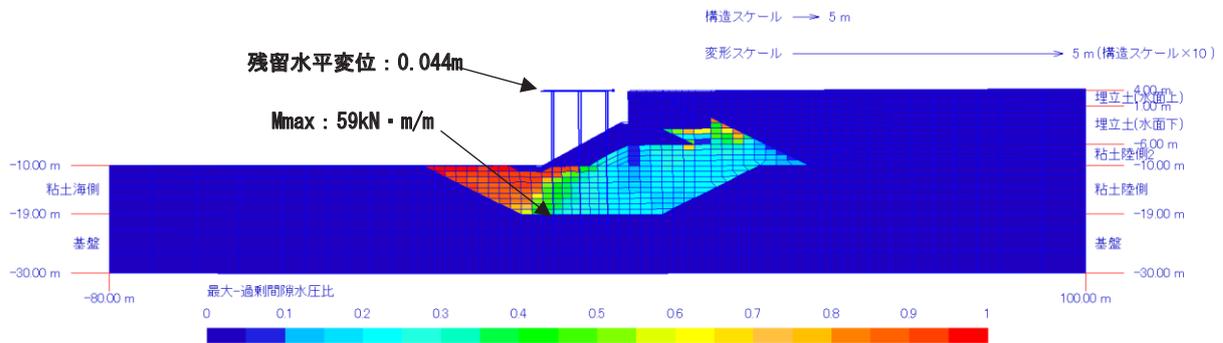


図 6 地震応答解析結果の例(赤い部分は過剰間隙水圧が上昇)

サイト増幅特性にばらつきを与えた地震動に対する地震応答解析結果を図 7～図 14 に示す。各図とも左側に SSFA と栈橋杭の最大曲げモーメントの関係、右側に杭頭の最大曲げモーメントと地中部の最大曲げモーメントの関係を示す。赤丸は各地震動の応答解析結果を示し、青四角は平均のサイト増幅特性と平均 $\pm 0.5\sigma$ 、平均 $\pm 0.75\sigma$ 、平均 $\pm \sigma$ の計 7 つの地震動による地震応答解析結果である。例えば仙台塩釜港の case1 をみると、SSFA が大きい地震動は最大曲げモーメントも大きく相関関係にあることがわかる。また、杭頭部よりも地中部の方が曲げモーメントが大きくなる傾向にあることがわかる。一方熊本港の case1 をみると、仙台塩釜港よりも SSFA と最大曲げモーメントとの関係のばらつきが大きい。また、右側の図から地中部で最大曲げモーメントになる地震動と杭頭部で最大曲げモーメントになる地震動とが混在していることがわかる。地中部で最大曲げモーメントが生じる場合は、栈橋杭が地盤変形の影響を大きく受けているといえ、杭頭部で最大曲げモーメントが生じる場合は、栈橋上部工の慣性力の影響が大きいといえる。地震動の特性と地盤や栈橋の応答特性の影響によってこのような異なった応答性状が生じると考えられるが、詳細な分析は今後の課題である。

多数回の地震応答解析の試行による最大曲げモーメントの確率分布を数回の地震応答解析結果から推定する。平井・長尾⁷⁾や Nagao and Lu⁸⁾と同様の手法により、平均的なサイト増幅特性の地震動と平均 $\pm \sigma$ のサイト増幅特性の地震動の計 3 つの代表地震動の結果を用いて 3 点近似を行った。代表地震動が全サンプルの地震動に対してどのくらいの大きさにあたるのかを SSFA により次式で評価した。

$$x' = \frac{\text{amp} - \mu_{\text{amp},n}}{\sigma_{\text{amp},n}} \quad (2)$$

ここで、 amp は平均 $\pm \sigma$ のサイト増幅特性の地震動の SSFA であり、 $\mu_{\text{amp},n}$ 、 $\sigma_{\text{amp},n}$ はそれぞれ全 n 個のサンプルのサイト増幅特性の地震動の SSFA の平均値と標準偏差である。横軸に x' を、縦軸に最大曲げモーメントをとって 3 つの代表地震動の結果をプロットし線形近似すると、 $x'=0$ の時の縦軸が平均値の曲げモーメントに、 $x'=1$ の時の縦軸が平均値+標準偏差の曲げモーメントとなる。

図 15 および図 16 にそれぞれ仙台塩釜港と熊本港の各ケースの地震応答解析結果のヒストグラム、対数正規分布(青点線)、3 点近似により推定した対数正規分布(赤線)を示す。3 点近似は、おおむねもとの対数正規分布を推定することができていると評価できる。熊本港の case2 と case4 で推定線が左にずれていることが目立つが、発生モーメントを大きめに見積もった安全側の評価となっている。

4. おわりに

サイト増幅特性のばらつきを考慮した多数の入力地震動を用いて、栈橋を対象として FLIP による地震応答

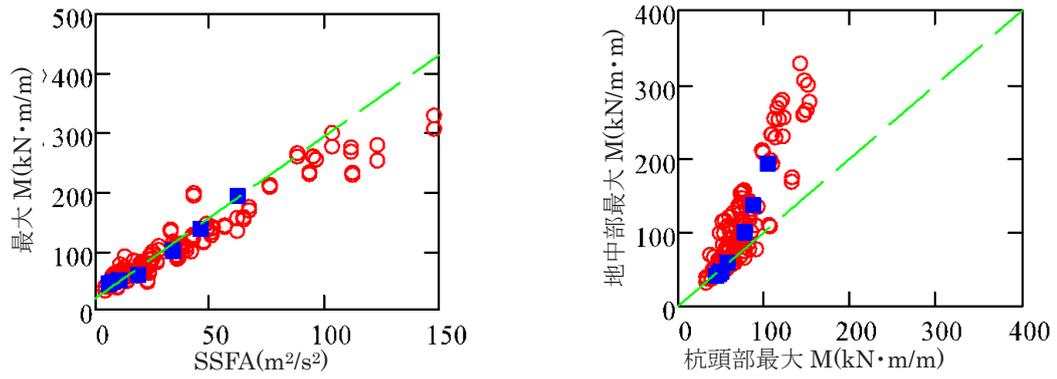


図 7 仙台塩釜港 case1 の地震応答解析結果(M:曲げモーメント)

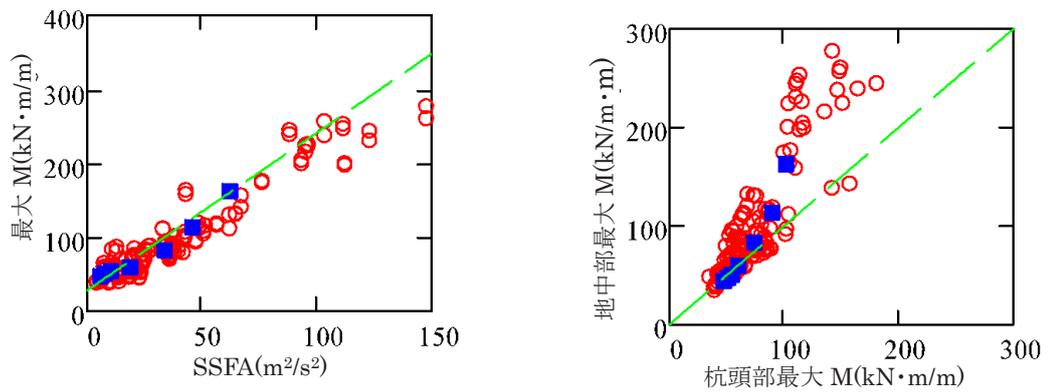


図 8 仙台塩釜港 case2 の地震応答解析結果(M:曲げモーメント)

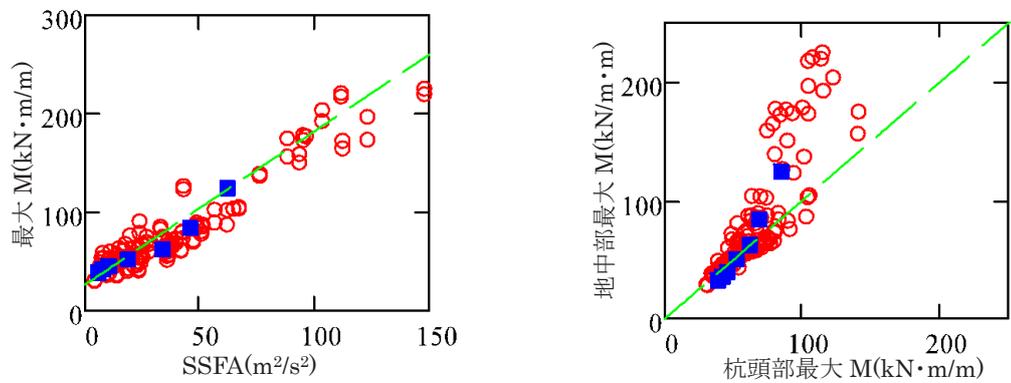


図 9 仙台塩釜港 case3 の地震応答解析結果(M:曲げモーメント)

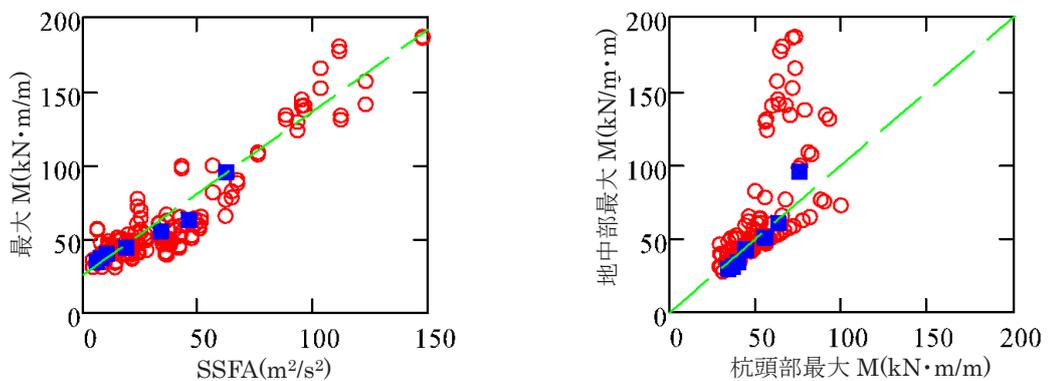


図 10 仙台塩釜港 case4 の地震応答解析結果(M:曲げモーメント)

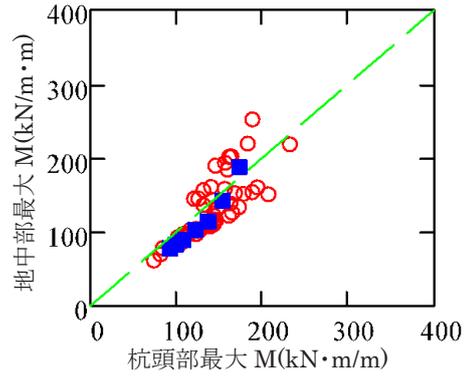
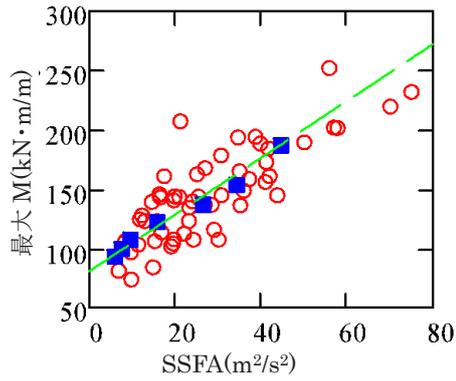


図 11 熊本港 case1 の地震応答解析結果(M:曲げモーメント)

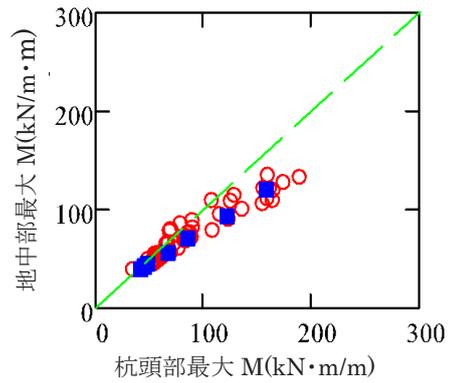
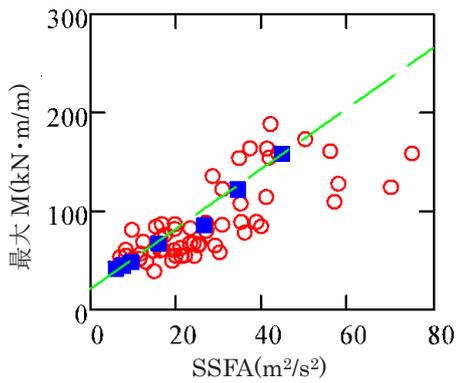


図 12 熊本港 case2 の地震応答解析結果(M:曲げモーメント)

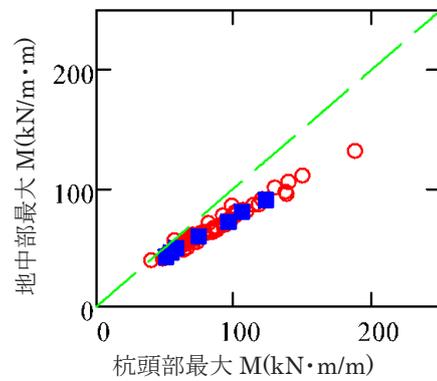
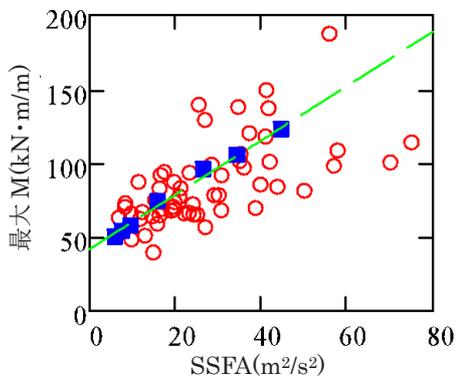


図 13 熊本港 case3 の地震応答解析結果(M:曲げモーメント)

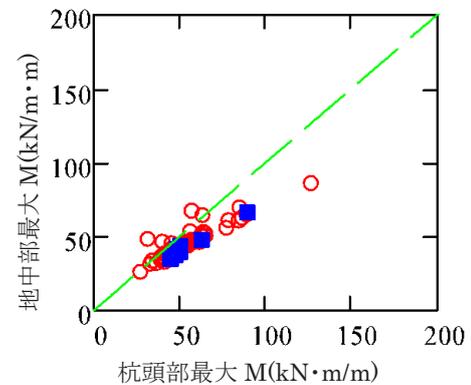
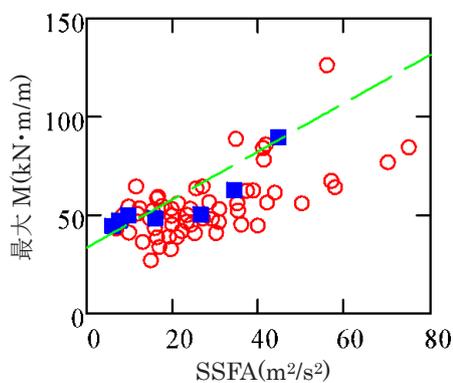


図 14 熊本港 case4 の地震応答解析結果(M:曲げモーメント)

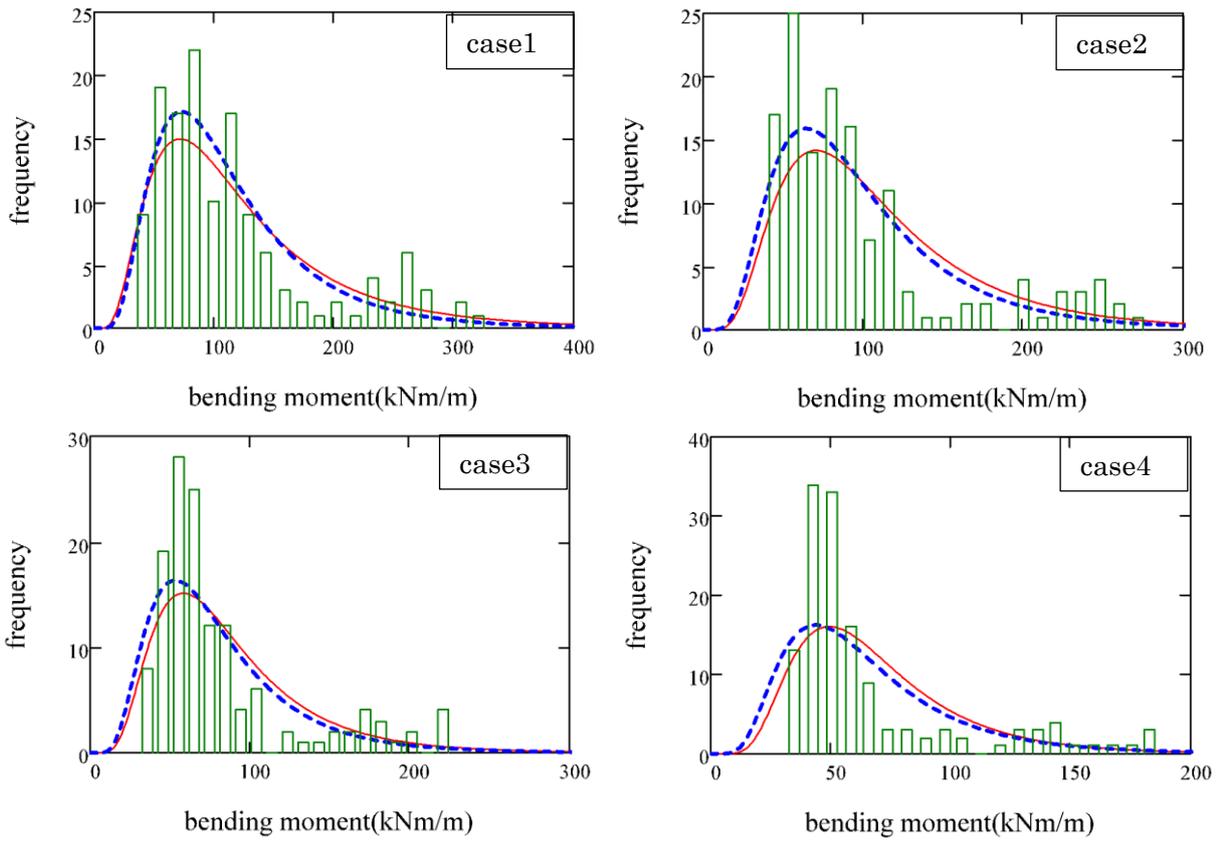


図 15 最大曲げモーメントの簡易評価結果(仙台塩釜港)

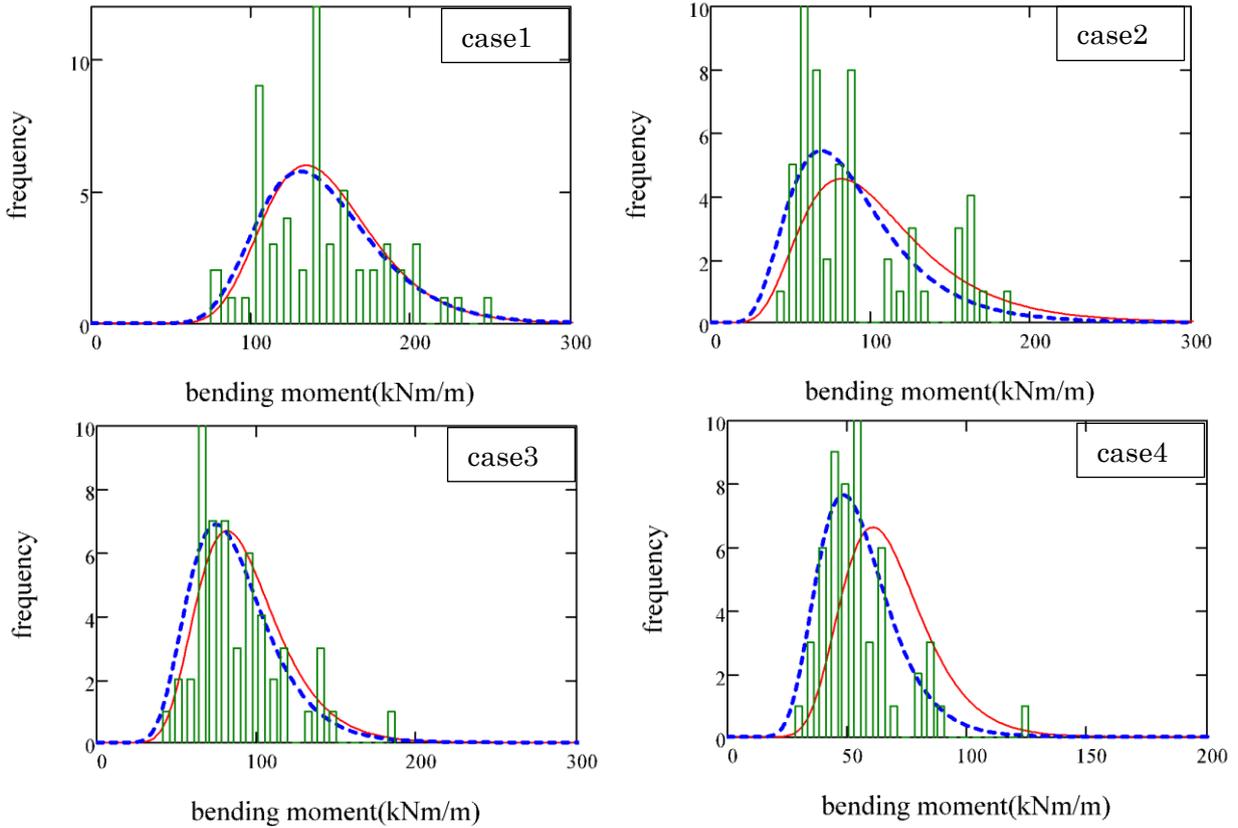


図 16 最大曲げモーメントの簡易評価結果(熊本港)

て3点近似を行い、簡易的に評価することができた。

今後の課題として、地中部で最大曲げモーメントが生じる地震動と杭頭で最大曲げモーメントが生じる地震動とがあるため、これらの結果を合理的、統一的に評価するための検討を行っていく必要がある。

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、2018.
- 2) 岩田知孝、入倉孝次郎、観測された地震波から震源特性、伝播経路特性及び観測点近傍の地盤特性を分離する試み、地震2、第39巻、pp.579-593、1986.
- 3) 大鳥靖樹、村上通章、石川博之、武田智吉、土構造物の地震時信頼性評価システムの構築、第5回構造物の安全性及び信頼性に関する国内シンポジウム、JCROSSAR2003 論文集、pp.691-694、2003.
- 4) 松本敏克、澤田純男、杉浦邦征、坂田勉、渡邊英一、空間的ばらつきを有する地盤に埋設された地中RC構造物の地震時挙動、構造工学論文集、Vol.52A、pp.1149-1158、2006.
- 5) 長尾毅、岸壁の残留変形量に関する地震時信頼性指標の簡易評価法、構造工学論文集 Vol.53A、pp.351-359、2007.
- 6) 松本敏克、澤田純男、大鳥靖樹、坂田勉、渡邊英一、非線形挙動の著しい地中構造物の地震時損傷確率評価、構造工学論文集、Vol.52A、pp.1159-1168、2006.
- 7) 平井俊之、長尾毅、岸壁の残留変形量に関する地震動のばらつきの影響の簡易評価、土木学会論文集 B3(海洋開発)、Vol.68、No.2、I_468-I_473、2012.
- 8) Nagao, T., Lu, P., A simplified reliability estimation method for pile-supported wharf on the residual displacement by earthquake, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 129, 105904, 2020.
- 9) 長尾毅、山田雅行、野津厚、フーリエ振幅と群遅延時間に着目した確率論的地震ハザード解析、土木学会論文集、No.801/I-73、pp.141-158、2005.
- 10) 野津厚、長尾毅、スペクトルインバージョンに基づく全国の港湾等におけるサイト増幅特性、港湾空港技術研究所資料、No.1112、2005.
- 11) Iai, S., Matsunaga, Y., Kameoka, T., Space Plasticity Model for Cyclic Mobility, Report of Harbour Research Institute, Vol.27, No.4, pp.27-56, 1990.

筆者:1) 平井俊之、株式会社ニュージェック;2) 長尾毅、都市安全研究センター、教授

A simplified bending moment reliability estimation method for pile-supported wharf by earthquake

Toshiyuki Hirai
Takashi Nagao

Abstract

It is necessary to conduct two-dimensional nonlinear earthquake response analysis many times in order to evaluate probabilistic characteristic of bending moment of a pile-supported wharf. We aim at proposing a simplified estimation method of earthquake ground motion variation effects the bending moment of piles. Variations in input strong-motions are considered as variations in site amplification factors. As the result, the distribution of maximum bending moment of piles by many earthquake ground motions is simply estimated with maximum bending moments by three earthquake ground motions.

©2020 Research Center for Urban Safety and Security, Kobe University, All rights reserved.