

港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE

OF

THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No.1260 December 2012

異なる解析手法による直杭式栈橋の
レベル1地震時の応答特性の比較

小濱 英司
大久保陽介
楠 健吾

独立行政法人 港湾空港技術研究所

Independent Administrative Institution,
Port and Airport Research Institute, Japan

目 次

要 旨	3
1. はじめに	4
1.1 栈橋の耐震性能照査手法	4
1.2 地盤反力係数及び減衰	4
2. 検討条件	6
3. 上部工における加速度の比較	8
3.1 栈橋の固有周期の比較	8
3.2 杭仮想固定点の比較	9
3.3 上部工加速度の算出結果	10
3.4 減衰定数の検討	10
3.5 減衰定数を修正した上部工加速度の算出結果	11
4. 杭に発生する曲げモーメント分布の比較	11
4.1 成層地盤での検討	11
4.2 モデル栈橋断面での検討	11
5. 結論	23
6. おわりに	24
参考文献	24

Comparison between Responses of Pile-supported Wharf during Level-1 Earthquake Motion with Various Analytical Methods

Eiji KOHAMA*
Yosuke OKUBO**
Kengo KUSUNOKI***

Synopsis

Seismic design of pile-supported wharves against the level-one earthquake ground motion is carried out by pseudo-static method using the seismic coefficient calculated with the natural period of piled wharf and the acceleration response spectrum at virtual fixed point of the piles. Meanwhile dynamic analysis is also employed, taking into consideration for the dynamic interaction of piles and ground. These methods focusing the response behavior of pile-supported wharves may sometimes yield different results depending on conditions.

Response behaviors of pile-supported wharves with the pseudo-static and dynamic analyses were compared in this report. N-PIER and FLIP were employed as frame analysis of pseudo-static method and 2-dimensional dynamic finite element analysis, respectively. The analyses were carried out on a typical piled wharf against level-1 earthquake motion under the condition of non-liquefaction and small displacement of landward earth-retaining portion. As the result, it is clarified that discrepancy in of subgrade reaction and the damping factor in the pseudo-static and dynamic analyses causes the difference in the response behaviors of the piled wharf.

Key Words: Pile-supported wharves, subgrade reaction, level-one earthquake ground motion, pseudo-static and dynamic analyses

* Head of Earthquake and Structural Dynamics Group, Geotechnical and Structural Engineering Department
3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan

Phone: +81-46-844-5058 Fax: +81-46-844-0839 e-mail: kohama-e83ab@pari.go.jp

** Pacific Consultants Co., Ltd

1-7-5 Sekito, Tama, Tokyo, 206-8550 Japan

Phone: +81-42-372-6180 Fax: +81-42-372-6398 e-mail: yosuke.ookubo@os.pacific.co.jp

*** NEWJEC Inc

1-12-13 Shin-Ohashi, Koto-ku, Tokyo, 135-0007 Japan

Phone: +81-3-5625-1648 Fax: +81-3-5625-1850 e-mail: kusunokikn@newjec.co.jp

異なる解析手法による直杭式栈橋の レベル 1 地震時の応答特性の比較

小濱 英司*・大久保 陽介**・楠 健吾***

要 旨

直杭式横栈橋のレベル 1 地震動に対する性能照査は、栈橋の固有周期及び杭仮想固定点における加速度応答スペクトルを用いて照査用震度を算出し、算出された外力を用いて静的な骨組解析を実施することにより、杭に発生する応力照査を行う方法が港湾基準に例示されている。一方、杭と地盤の動的相互作用を考慮できる解析手法として、2次元非線形地震応答解析を用いた照査方法がある。これらの方法は、同じ構造物、挙動を対象としているが、方法が異なることから条件によって結果が異なることが見られる。そこで本研究では、これらの骨組解析と 2次元地震応答解析を行った場合の栈橋応答について比較検討を行い、その要因を解明することを目的とした。

骨組解析として N-PIER、2次元解析に FLIP を用いて検討を行った。標準的な栈橋を対象とし、レベル 1 地震動変動状態として液状化は発生せず、護岸変位も大きくない条件で検討を行った。応答スペクトルを用いる骨組解析での地盤反力係数と減衰定数について、2次元解析における杭―地盤間のばね剛性や栈橋全体の減衰と同等にすることにより、上部工加速度や杭曲げモーメントが整合することを確認した。

キーワード：栈橋，レベル 1 地震，地盤反力係数，有限要素解析，加速度応答スペクトル

* 地盤・構造部地震防災研究領域耐震構造研究チームリーダー

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 港湾空港技術研究所

電話：046-844-5058 Fax：046-844-0839 e-mail:kohama-e83ab@pari.go.jp

** パシフィックコンサルタンツ株式会社

〒206-8550 東京都多摩市関戸 1 丁目 7 番地 5

電話：042-372-6180 FAX：042-372-6398 e-mail：yousuke.ookubo@os.pacific.co.jp

*** 株式会社ニュージェック

〒135-0007 東京都江東区新大橋 1-1-2-13 (深鉄ビル)

電話：03-5625-1648 FAX：03-5625-1850 e-mail：kusunokikn@newjec.co.jp

1. はじめに

1.1 栈橋の耐震性能照査手法

構造物の耐震性能の照査法は、設計震度を設定して構造物に静的な水平力を作用させる方法（震度法）と、地震動時刻歴を用いて時間的に変動する挙動を逐次計算する動的な方法に大別される。震度法は計算が容易で、静的な力のつり合いを考慮するだけで構造物の安定性を検討出来ることから、古くからさまざまな施設の耐震設計に用いられてきた。しかし、震度法では地震中の構造物の動的な挙動を考慮することは困難で、そのままでは作用する地震動特性や構造物の動的応答特性を考慮出来ないことから、これらの効果に対応できるよう改良が行われてきた（修正震度法）。動的な手法については、計算手法の発展と計算機能力の向上、さらに、1995年兵庫県南部地震において多くの土木施設が被災したことがきっかけとなり、近年は特に重要構造物の設計において広く用いられている。また、兵庫県南部地震以降における地震動予測手法の技術進展により、設計で考慮する地震作用を加速度時刻歴として扱えるようになりつつあることも、動的な手法の利用頻度の増加に寄与していると考えられる。

直杭式栈橋の耐震性能照査法も同様に静的な手法と動的な手法がある。静的な手法は図-1.1に示すような修正震度法に基づくものであり¹⁾、水平震度から算出した上部工慣性力を用い、静的な骨組解析によって杭の応力照査が行われる。栈橋上部工における加速度（震度）は、栈橋の固有周期及び杭仮想固定点 $1/\beta$ における加速度応

答スペクトルを用いて算出される（以下、応答スペクトル法）。

一方、動的な手法としては、有限要素法による2次元非線形地震応答解析がある。この方法はレベル2地震動に対する耐震性能照査で用いられることが多い。この解析は有限要素法を用いたものであり、栈橋構造及び周辺地盤が一つの解析モデルで表現される。また、解析はモデルの時間的な変動を考慮して動的に行われ、地震中の栈橋の時々刻々の応答が評価される。一般的に地盤パラメータ等の設定は複雑で、計算負荷が高く、解析実施においては経験と時間を要する。この方法は、工学基盤における地震波をレベル1地震動の時刻歴とすることにより、レベル1地震変動状態の性能照査に適用することもできる。

これらの手法は同じ構造物の地震時挙動を対象としているものの、手法・モデル化・パラメータ等の違いにより検討条件によって結果が異なる場合がある。そこで本研究では、特に地盤反力係数、減衰定数の違いに着目して、骨組解析による静的な方法と有限要素法による2次元地震応答解析により栈橋上部工における加速度及び杭に発生するモーメント分布といった設計時に重要となる栈橋応答について比較・検討を行い、それらの結果に差異が生じる要因について考究することを目的とした。

1.2 地盤反力係数及び減衰

静的な手法において上部工加速度を求める応答スペクトル法では、式(1)に示すように栈橋の固有周期を算出す

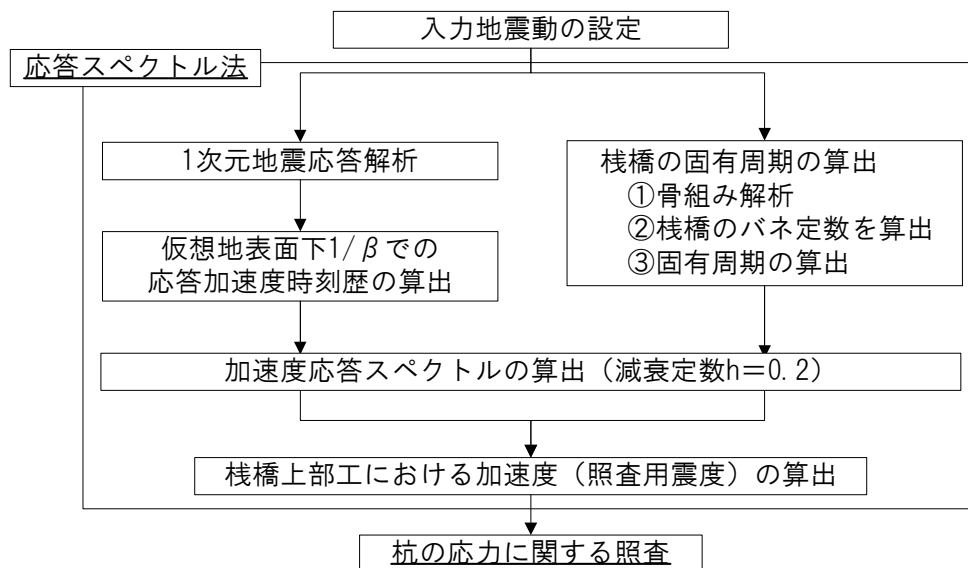


図-1.1 現行の港湾基準における直杭式横栈橋のレベル1地震動に対する性能照査手順

る。

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

ここに、 T_s ：栈橋の固有周期 (s)， W ：自重及び地震時の載荷重 (kN)， g ：重力加速度， K ：栈橋の水平方向バネ定数 (kN/m) である。水平方向バネ定数 K は、栈橋に作用する荷重と栈橋上部工の変位が線形であると仮定し、骨組解析を用いて微小な外力を加えたときの変位との関係から求められる。

この栈橋の骨組解析のモデル化にあたり、港湾基準によれば、杭のハリ要素の節点に接続して杭移動時の地盤反力を表現する地盤バネの地盤反力係数を式(2)に示すように N 値から決定している。

$$k_h = 1500N \quad (2)$$

ここに、 k_h ：水平地盤反力係数 (kN/m³)， N ： N 値である。港湾基準においては、地震応答解析等の動的問題では式(2)で求めた地盤反力係数の2倍程度とするとされている。土は弾性体ではないため、一般に杭に対する水平方向力（地盤反力）と変位の関係は非線形となり、変位が大きくなるとともに水平方向力の傾きが小さくなり、式(1)の平方根内の分母が小さくなることで栈橋の固有周期は長くなることが考えられる。栗原・長尾²⁾によれば、加震時には地震動の大きさに応じて地盤反力係数が低下し、固有周期も地震動の大きさにより変化するとされている。式(2)の N 値による評価では、一般的なレベル1地震動作用時における地盤反力係数が評価されると考えられるが、厳密には、レベル1地震動の大きさにはそれぞれ違いがあり、それによって地盤反力係数も異なると考えられる。

また、杭の仮想固定点は仮想海底面下 $1/\beta$ とされ、式(3)に示すように杭の剛性や地盤反力係数によって定まる。

$$\beta = 4 \sqrt{\frac{k_h D}{4EI}} \quad (3)$$

ここで、 β ：仮想固定点に関するパラメータ (m⁻¹)， D ：杭の直径 (m)， EI ：杭の曲げ剛性 (kN・m²)， k_h ：水平地盤反力係数である。

よって、固有周期と同様、地震動の大きさに応じて地盤反力係数が変化すれば、杭仮想固定点も変化する。

さらに、応答スペクトル法において加速度応答スペクトルを算出する際の減衰定数について、現行の港湾基準によれば20%としてよいと記載されている。これは横田

ら³⁾による1次元全応力解析と2次元全応力解析の比較を

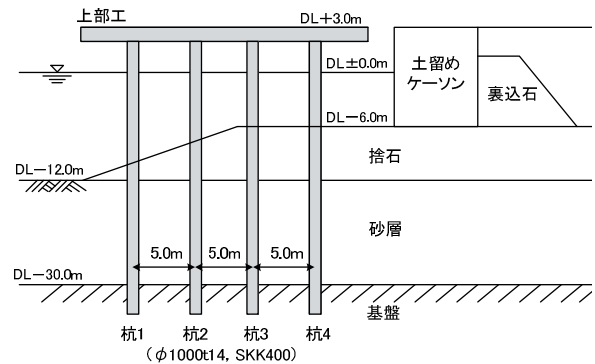


図-2.1 解析モデル図

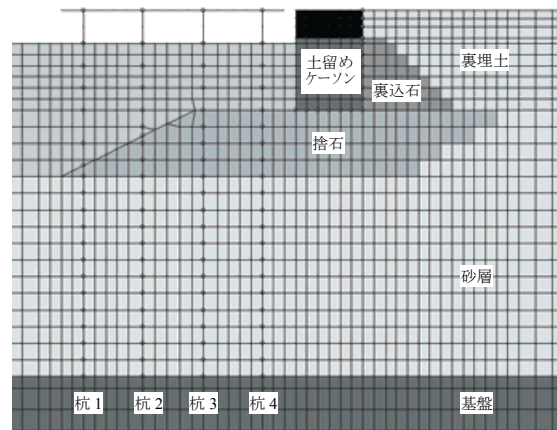


図-2.2 解析モデル図 (FLIP)

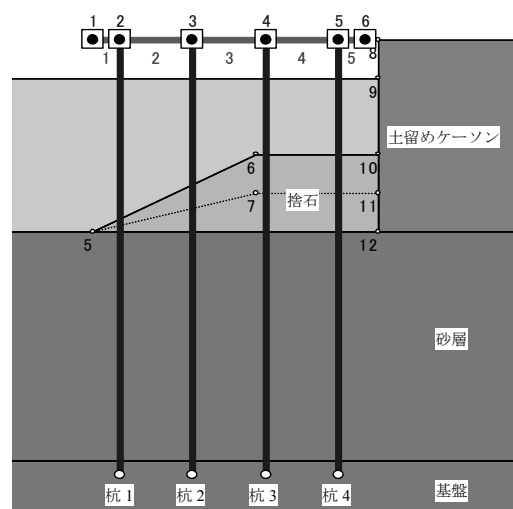


図-2.3 解析モデル図 (N-Pier)

行った成果を反映したものである。また、平成11年度の港湾基準では、地盤の固有周期に応じて減衰係数を10～30%と使い分けることとしている。一方、栗原・長尾²⁾による動的特性を考慮した照査用震度算定手法によれば、

地盤と杭の動的相互作用を考慮すると、震度を求める際の応答スペクトルの減衰定数は5%程度が妥当としているものの、栈橋の減衰定数について検討した事例は少ない。

二次元非線形地震応答解析においては、地盤反力係数や減衰の取り扱いが解析プログラムによって異なる。非線形の地盤反力係数を扱う場合には、その荷重-変位関係を規定するものや、周辺地盤要素の特性やその影響を考慮するものもある。減衰は、動的解析においてはモデル全体にレーレー減衰を適用するものが多いが、要素個別の減衰を設定するものもある。静的な方法で上部工加速度（震度）を求める際に考慮する減衰は、栈橋の構造部だけでなく地盤の非線形の応力-ひずみ関係による減衰も含まれたものであるから、静的方法との比較においては二次元解析での栈橋応答としての減衰を考慮する必要がある。

2. 検討条件

本研究では図-2.1に示すようなモデル栈橋を対象とした。解析コードとしては、動的な二次元解析としてFLIP⁴⁾、

表-2.1 土質条件

土層	γ_t (kN/m ³)	γ' (kN/m ³)	N値	σ_{ma}' (kN/m ²)	G _{ma} (kN/m ²)	K _{ma} (kN/m ²)	拘束圧依存係数	ϕ (°)	c (kN/m ²)
裏埋土	18.00	8.00	11.0	98.00	79270	206700	0.50	39.50	—
裏込石	20.00	10.00	—	98.00	180000	469400	0.50	35.00	20.00
捨石	20.00	10.00	—	98.00	180000	469400	0.50	35.00	20.00
砂層	20.00	10.00	10.0	98.00	75210	196100	0.50	39.30	—
基盤	20.00	10.00	50.0	98.00	188500	491600	0.50	43.27	—

表-2.2 検討に用いたレベル1地震波形

地震波名	最大加速度(Gal)	卓越周期(s)
常陸那珂	159.17	1.042
清水	132.02	1.587
博多	166.07	0.476
八戸	214.20	1.163
石巻	247.61	1.0
岩国	312.27	0.238
四日市	108.05	1.377
千葉	94.97	1.342
舞鶴	380.53	0.216
神戸	274.06	0.356

静的な骨組解析としてN-PIERを用いることとした。図-2.2にFLIPの解析モデル図を示し、図-2.3にN-Pierの解析モデル図を示す。地盤条件は表-2.1に示すとおりであり、栈橋が採用される地盤条件の実績を考慮して緩い砂地盤を設定した。本研究においては静的手法と動的手法における地盤反力の扱い、違いに着目しており、対象としている地震動もレベル1地震動としていることから、液状化は発生しない条件とした。地盤定数については、森田⁵⁾によるFLIPにおいて標準的に用いられている設定方法に従い、設定した。港湾基準において栈橋杭のレベル1地震動に対する性能照査基準は降伏応力以下であることから、骨組解析により杭に発生するモーメントが降伏モーメント以下となるように杭の諸元を設定した。二次元解析として用いたFLIPでは、杭と地盤の動的相互作用を取り扱うため、杭要素と杭間の地盤要素の荷重-変位関係を周囲地盤要素の応力ひずみ関係を参照してモデル化した杭-地盤相互作用ばね要素を用いている。対象地震波形としては表-2.2に示す最大加速度や卓越周期の違うレベル1地震波10波形⁶⁾とした。最大加速度は100~400Gal程度であり、卓越周期は0.2~1.6s程度である。それぞれの地震波形およびフーリエスペクトルを図-2.3および図-2.4に示す。

本検討では、静的な手法である応答スペクトル法・骨組解析と動的な二次元解析の違いを地盤反力係数に着目して実施することが目的である。したがって、二次元解析結果から得られる図-2.6に示すような杭-地盤相互作用ばねの変位と荷重の履歴曲線から得られる割線剛性により地盤反力係数を算出し、算出した地盤反力係数を用いて栈橋固有周期の算出と骨組解析（修正法）も実施した。

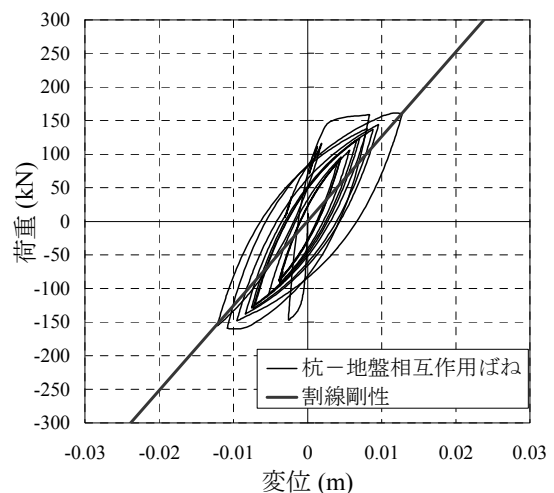


図-2.6 修正法での地盤反力係数の設定

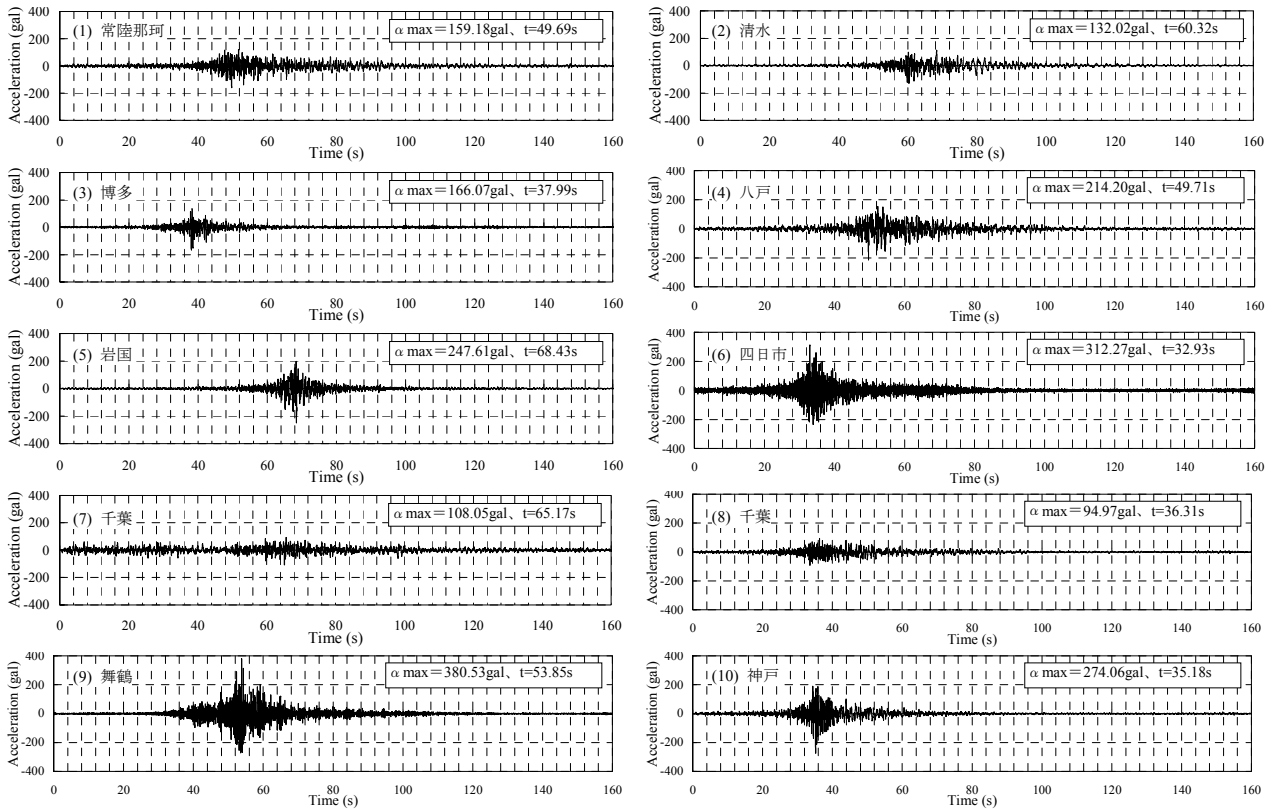


図-2.4 検討に用いた地震波形の時刻歴

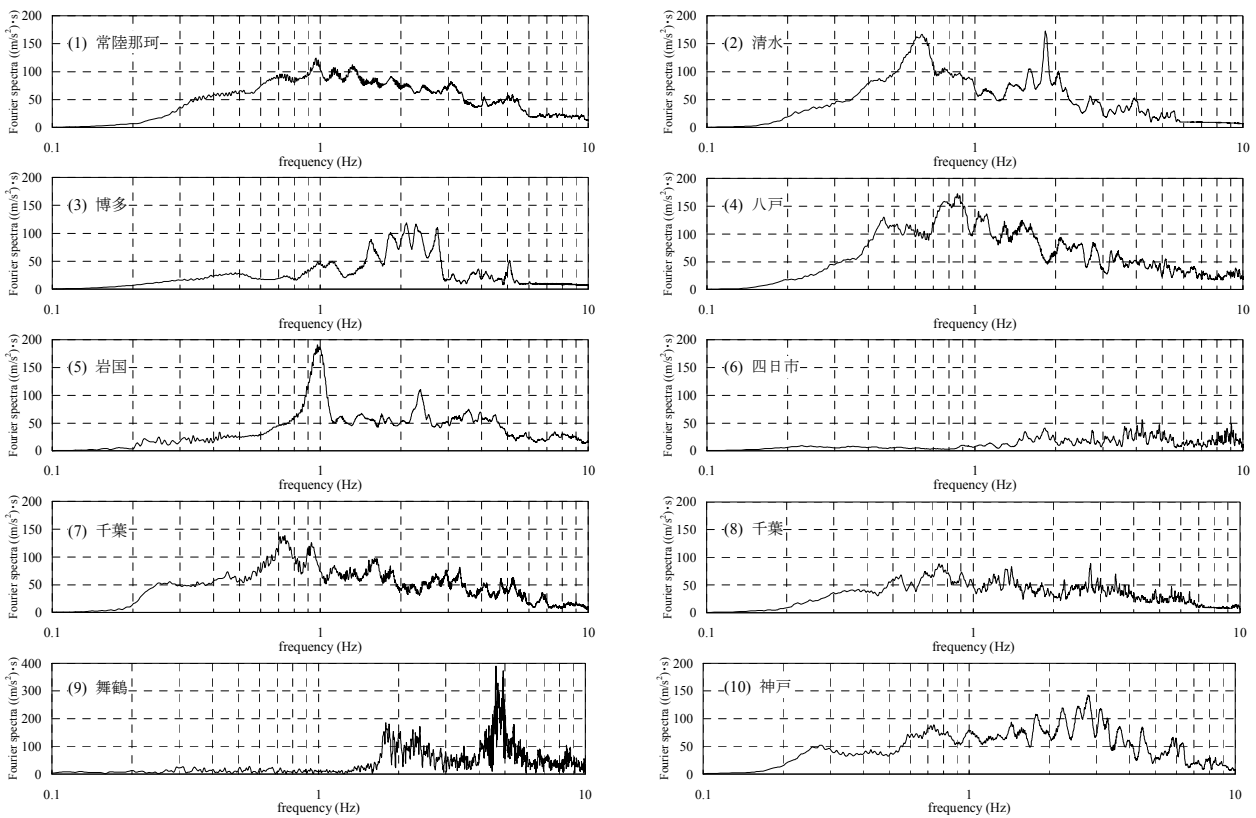


図-2.5 検討に用いた地震波形のフーリエスペクトル

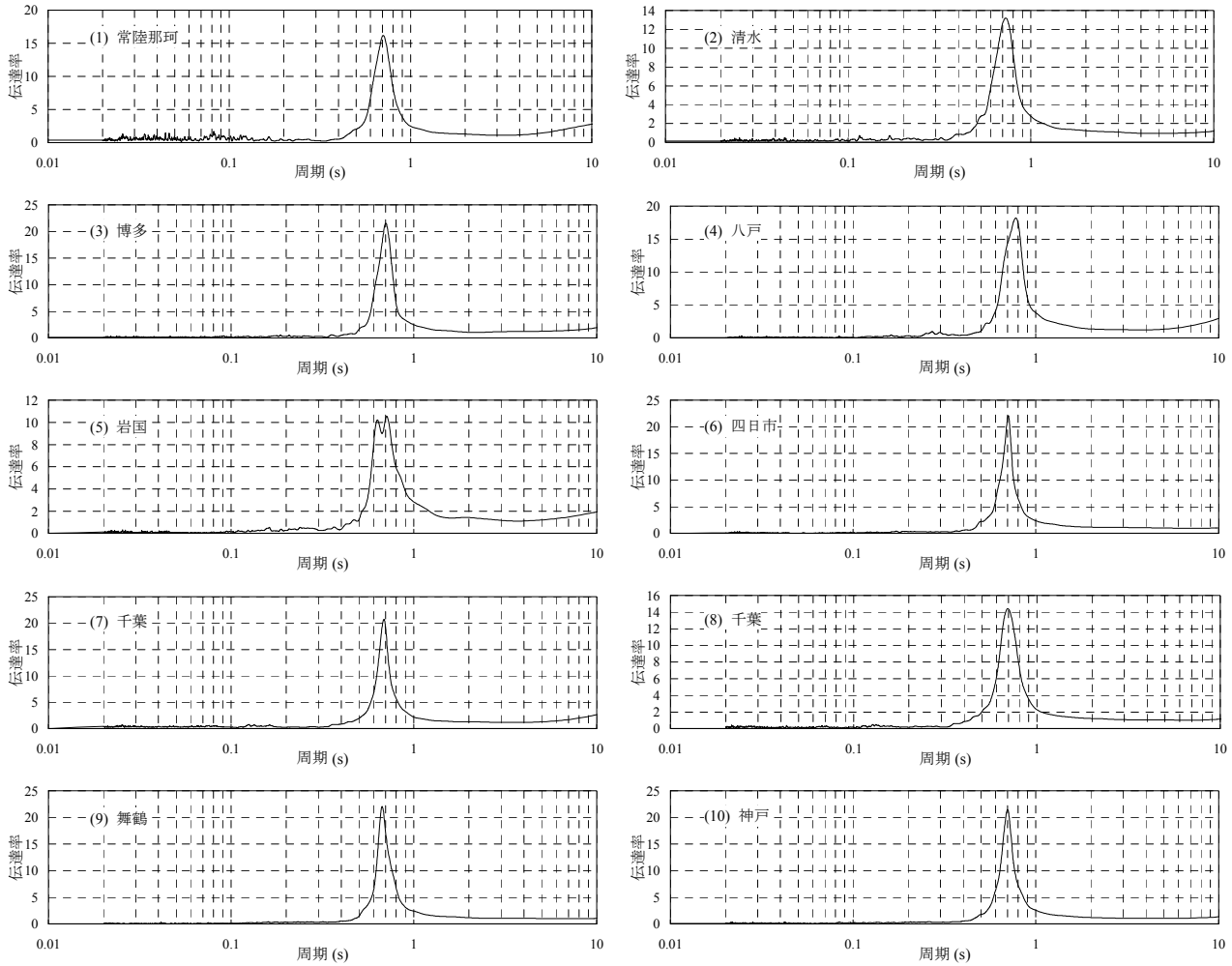


図-3.1 栈橋の固有周期算出 (2次元解析)

3. 上部工における加速度の比較

3.1 栈橋の固有周期の比較

骨組解析により栈橋バネ定数を算出して求めた固有周期と2次元解析で求めた固有周期を比較する。骨組み解析では、栈橋をモデル化して微小な外力を加えることにより栈橋のバネ定数を求め、式(1)に基づき、栈橋の固有周期を算出した。2次元解析では、図-3.1に示すように、レベル1地震動をモデル下面に入力した際の杭仮固定点から栈橋上部工地点までの伝達関数を求め、そのピーク周期を栈橋の固有周期として算出した。加えて、骨組解析では、用いる地盤反力係数(地盤バネ)を2次元解析での杭-地盤相互作用バネの割線剛性に合わせた方法による固有周期も算出した。それぞれの手法で算出した固有周期の比較を図-3.2に示す。同図より、N値から地盤反力係数を設定した骨組解析では、全ケースにおいて2次元解析から求められた固有周期より長くなっていることがわかる。要因としては、式(2)によって設定した地盤

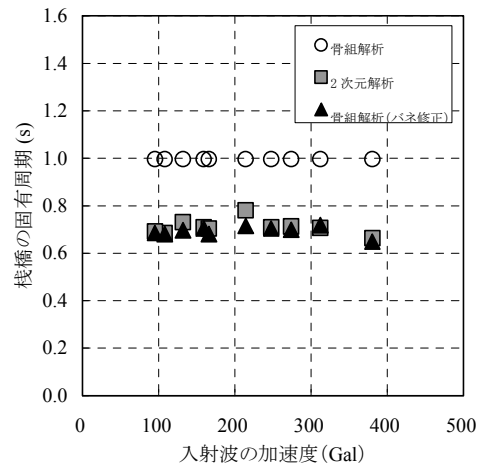


図-3.2 栈橋固有周期の比較

反力係数は2次元解析で用いられるものより小さくなっていることが考えられる。一方、骨組解析において地盤反力係数を2次元解析と合わせた方法では、固有周期は2次元解析とほぼ同様であることが確認できる。よつ

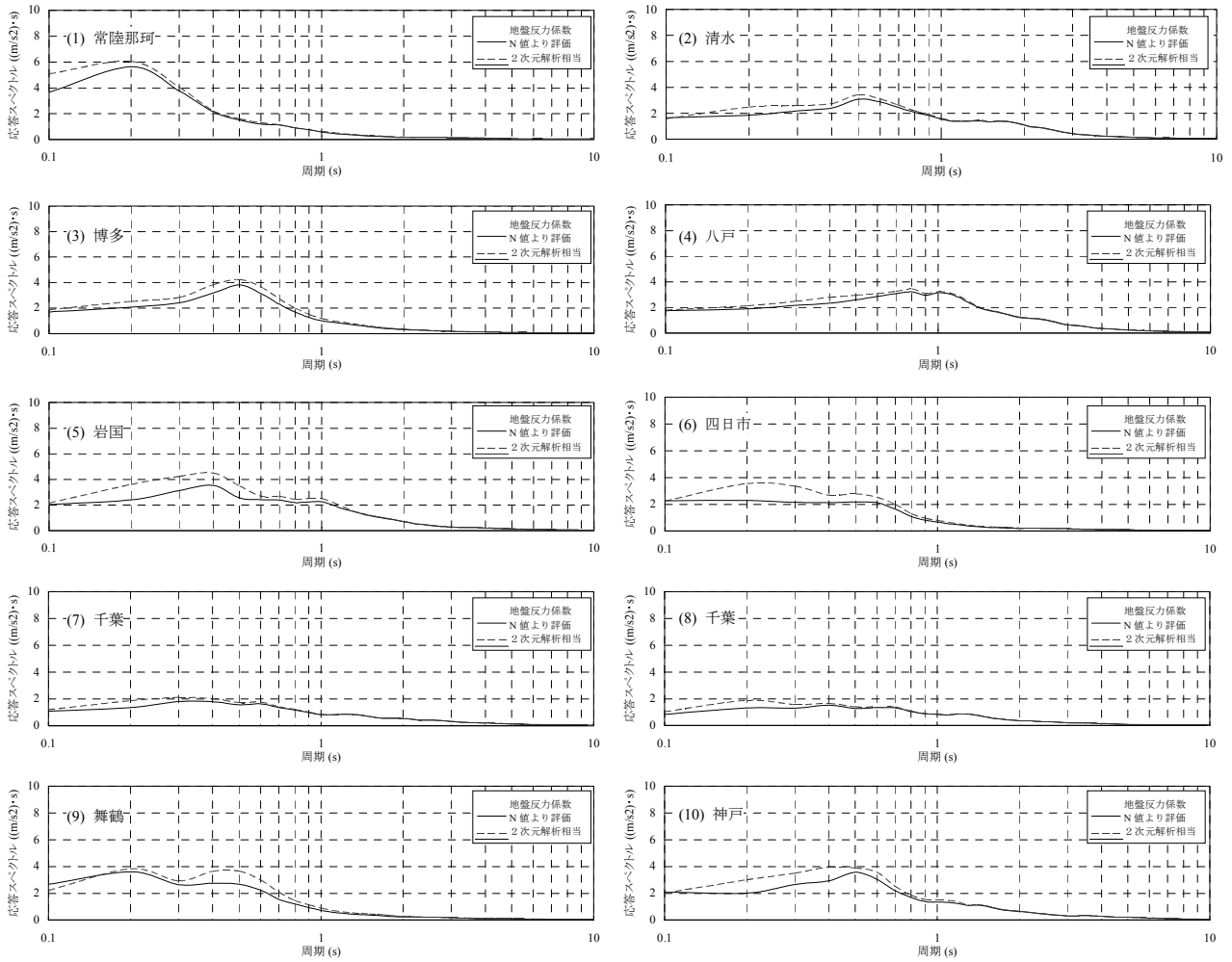


図-3.3 応答スペクトルの比較

て、栈橋の固有周期の算定には、解析手法の違いよりも地盤反力係数の設定の影響が大きいことがわかった。

3.2 杭仮想固定点の比較

式(3)により算出される杭仮想固定点に関するパラメータ $1/\beta$ について、地盤反力係数を式(2)のN値より評価した場合と、2次元解析での杭-地盤相互作用バネから評価した場合での違いについて検討する。図-3.3にそれぞれの方法での仮想海底面下 $1/\beta$ の位置での応答スペクトルの算出結果を比較したものを示す。過去の平成11年の港湾基準では海底面下 $1/\beta$ の位置での応答加速度により応答スペクトルを算出することとされていたが、ここでは現行の港湾基準に従い仮想地表面下 $1/\beta$ としている。

同図より、 $1/\beta$ を算出する際の地盤反力係数を2次元解析に合わせて修正することにより、応答スペクトルがどの周期帯においてもN値より評価した $1/\beta$ でのものより大きくなっていることが確認できる。今回の検討においては、2次元解析の方が地盤反力係数を大きく評価して

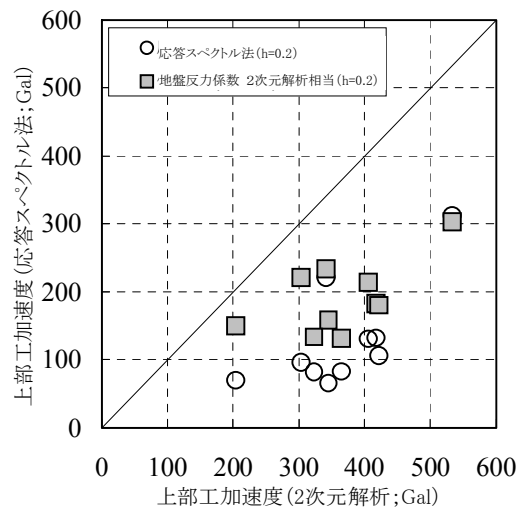


図-3.4 栈橋上部工における加速度の比較

おり、 $1/\beta$ が小さく、杭仮想固定点が浅くなり、応答加速度が大きくなったものと考えられる。

3.3 上部工加速度の算出結果

図-3.4に仮想海底面下 $1/\beta$ での加速度応答スペクトルと栈橋固有周期による栈橋上部工加速度と、2次元解析により算出した上部工最大加速度を比較したものを示す。ここで、応答スペクトルによる加速度については、栈橋固有周期および $1/\beta$ の評価における地盤反力係数について、通常式(3)のN値によるものと2次元解析結果に合わせたものを示した。なお、応答スペクトルによる加速度評価では、減衰定数は現行の港湾基準に則り20%と設定した。同図より、応答スペクトル法で算出した上部工加速度は2次元解析の15~70%程度であり、2次元解析との乖離が大きいことがわかる。また、地盤反力係数を2次元解析結果に整合させた結果では、2次元解析の30~75%程度とスペクトル法よりも2次元解析結果に近づいているものの、未だ2次元解析との明確な乖離が認められる。

3.4 減衰定数の検討

前節の結果より、地盤反力係数を2次元解析結果に合わせた場合における応答スペクトルを用いた栈橋上部工加速度は、2次元解析から算出される栈橋上部工におけるものと整合しないことがわかった。応答スペクトルによる加速度評価では、2次元解析と異なる地盤反力係数以外の影響因子として、減衰定数が考えられる。そこで、2次元解析において発揮されている減衰定数を求めるため、図-2.1に示す栈橋モデル断面に対して2次元解析を用いて基盤層に正弦波1波を与え、栈橋上部工変位の減衰挙動を検討した。

図-3.5に基盤に正弦波1波を入れた場合の上部工変位の時刻歴を示す。図より、上部工は自由振動しており、減衰定数を算出可能であることが確認できる。図-3.5の上部工の変位から振幅を算出し、式(4)に示すように隣り合う振幅の比の自然対数を取り、対数減衰率により減衰定数 h を算出した。

$$h = \text{Ln} \frac{a_1}{a_2} \quad (4)$$

ここに、 h : 減衰定数, a_1, a_2 : 振幅である。

基盤に入力する正弦波の周波数・加速度を変えて減衰定数を算出した結果を図-3.6に示す。同図より、栈橋の変位が大きくなるに従い、減衰定数が増える傾向が確認できる。これは、土のひずみによる減衰効果により変位が大きいが大きな減衰が示したと考えられる。本検討で対象とするレベル1地震波形を図-2.2のモデル栈橋に与えた場合、最大モーメントの発生時における栈橋変位は0.01~0.19mとなる。よって、栈橋の変位に合わせて、図-3.6の対数近似曲線より本検討で用いたレベル1

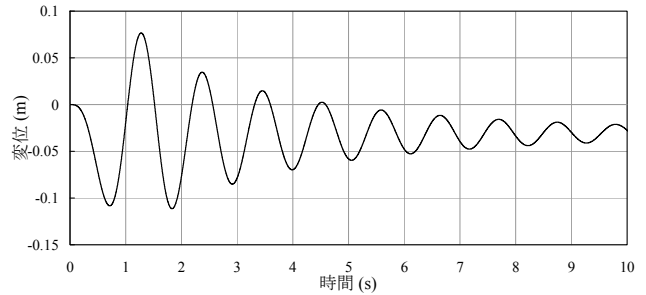


図-3.5 上部工の変位の時刻歴

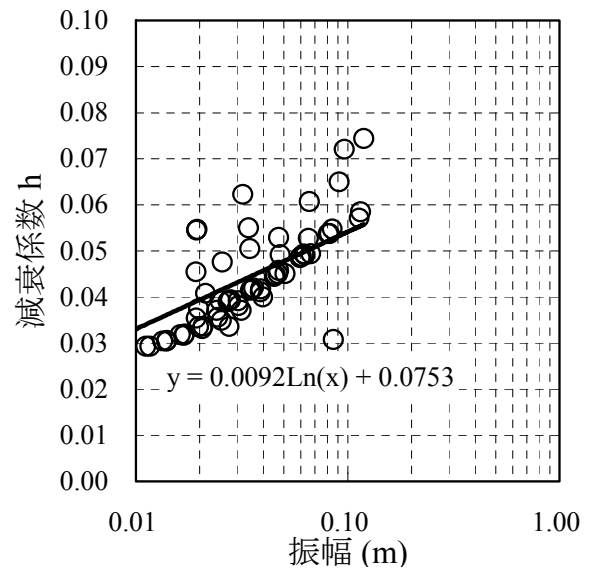


図-3.6 栈橋の減衰定数の算出結果

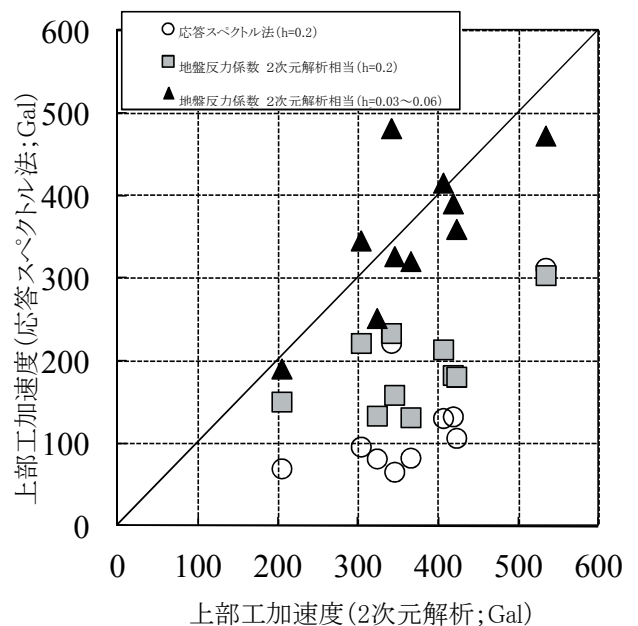


図-3.7 栈橋上部工における加速度の比較

地震動で加振された栈橋の減衰定数は3~6%程度と考えられる。

3.5 減衰定数を修正した上部工加速度の算出結果

前節において本検討で用いたレベル1地震動作用時における栈橋の減衰定数の大きさが確認されたことから、その値を用いて加速度応答スペクトルを設定し、栈橋上部工加速度を検討した。図-3.7において、応答スペクトルと栈橋固有周期を用いて求めた栈橋上部工加速度を縦軸に示し、2次元解析での上部工加速度時刻歴の最大値を横軸として比較したものを示す。ここで、応答スペクトルと固有周期から加速度を求める方法では、前述の地盤反力係数をN値から求めたものと2次元解析結果に合うよう調整したものを示し、さらに、地盤反力係数の調整とともに減衰定数を2次元解析での栈橋最大変位に合わせて3~6%程度としたケースも示した。

地盤反力係数の調整に加えて今回算定した減衰定数を用いたケースでは、2次元解析での栈橋上部工の加速度とほぼ一致していることがわかる。従って、地盤反力係数だけでなく減衰定数も2次元解析結果と整合するよう調整することにより、それぞれの方法での加速度（震度）を一致させることができた。

4. 杭に発生する曲げモーメント分布の比較

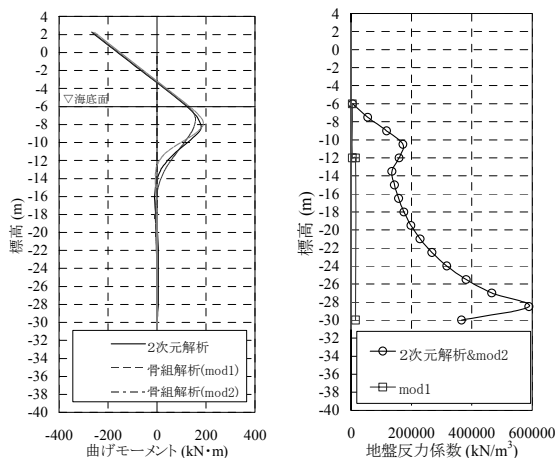
レベル1地震動における変動状態に関する性能評価において、骨組解析で用いる地盤反力係数は、式(2)で求めた地盤反力係数の2倍とすることにより決定される。ここでは、解析手法の違い及び地盤反力係数の違いが杭に発生する曲げモーメント分布に与える影響について検討する。検討ケースとしては、N-Pierによる静的骨組解析とFLIPによる2次元解析を実施した。静的骨組解析における上部工震度算定においては、通常式(2)のN値による地盤反力係数評価と減衰定数0.2を用いるケースと、上部工震度および地盤反力係数を以下のように調節したケースについて検討した。

mod1：2次元解析から得られる栈橋上部工最大加速度と上部工質量の積である慣性力を骨組解析に作用させ、同じ外力条件下とした。なお、仮想地表面を考慮した状態である。

mod2：外力条件を2次元解析と同等としたmod1に加え、地盤反力係数についても2次元解析と同等の値を用いた。なお、仮想地表面は考慮しない。

4.1 成層地盤での検討

地盤反力係数は地盤が変動する影響を受けるため、ま



(a) モーメント (b) 地盤反力係数

図-4.1 成層地盤における栈橋杭の解析結果

ず栈橋の捨石斜面部を考慮せずに成層地盤とし、地盤変動が小さい場合について検討を行った。2次元解析、骨組解析におけるケースmod1, mod2における杭に発生する曲げモーメント分布を図-4.1に示す。なお、2次元解析については、上部工加速度が最大時の曲げモーメント分布を示している。成層地盤であることから、曲げモーメント分布に杭による違いは見られなかったため、ここでは杭2(図-2.1参照)の結果を示す。図-4.1(a)より、杭頭部のモーメントはどのケースもほぼ同程度の値となっているが、地中部の極大モーメントは慣性力のみを2次元解析と合わせたケースmod1の方が小さくなっていることがわかる。また、杭仮想固定点についてもmod1の方がより深い位置となっていることがわかる。杭2に作用する地盤反力係数の鉛直分布を図-4.1(b)に示す。ケースmod2では2次元地震応答解析と同等の地盤反力係数としている。同図より、2次元解析及びmod2で用いている地盤反力係数はmod1で用いる式(2)で決まる地盤反力係数よりも大きくなっているため、杭仮想固定点がmod1の骨組解析よりも上方に位置していると考えられる。

4.2 モデル栈橋断面での検討

次に、捨石斜面部がある図-2.2のモデル栈橋について解析手法・地盤反力係数による杭の曲げモーメント分布の違いについて検討を行った。図-4.2~図-4.31に2次元動的解析と静的骨組解析の、各レベル1地震波での検討結果(杭に発生するモーメント、地盤反力係数、杭の変位)を示す。骨組解析については、通常加速度応答スペクトルから求めた上部工震度と地盤反力係数を用いたケースに加え、上部工震度の外力条件のみを2次元解析に合わせたケースmod1, 及び、外力条件と地盤反力係数

を2次元解析に合わせたケースmod2での計算結果を示した。

杭の発生する曲げモーメントについて、通常の応答スペクトルにより上部工震度の外力条件を設定した骨組解析結果では、2次元動的解析と比較して杭頭・地中部で極大の曲げモーメント値が他の解析結果よりも小さい。これは、前章の上部工加速度の比較で明らかになったように、応答スペクトルから求める上部工加速度が2次元動的解析でのものよりも小さくなったためである。

上部工震度を2次元解析と同等として外力条件を合わせたmod1と2次元解析を比較すると、曲げモーメントの極大値は2次元解析結果により近づいたものの、どの波形においてもmod1の方がより深い位置に地中部の最大モーメントが発生しており、モーメントの分布形状が異なっていることがわかる。一方、上部工震度とともに地盤反力係数を2次元解析に合わせ、仮想地表面を考慮しないmod2の結果は、2次元解析とほぼ同様のモーメント分布となった。図-4.3以降の地盤反力係数の鉛直分布に示されるように、mod1における地盤反力係数は2次元解析での杭-地盤相互作用バネの剛性よりも小さく、また、捨石マウンド上の地表面を前面水深と実斜面との1/2の高さとする仮想地表面を考慮している。よって、ケースmod1よりもmod2のほうが2次元動的解析に近い結果を示したことから、静的骨組解析と2次元動的解析で杭の曲げモーメントについてその極大値だけでなく分布形状も整合させるためには、上部工震度だけでなく地盤反力係数の分布も合わせる必要があることが認識できる。

杭変位の鉛直分布については、2次元解析とそれ以外の骨組解析での変位が一致していないことがわかる。一致しない要因としては、2次元解析結果では、杭の仮想固定点以深についても杭の変位が発生しており、栈橋だけでなく、地盤全体が変動している影響を含んでいることが考えられる。また、解析に用いたN-PIERとFLIPでハリ要素の定式化が異なる。N-PIERでは杭の曲げに対する軸力の寄与を考慮している⁷⁾が、FLIPにおいては軸力ではなくせん断変形のたわみ角への寄与を考慮しており⁸⁾、このような違いも変位の結果が異なることの要因の一つであると考えられる。

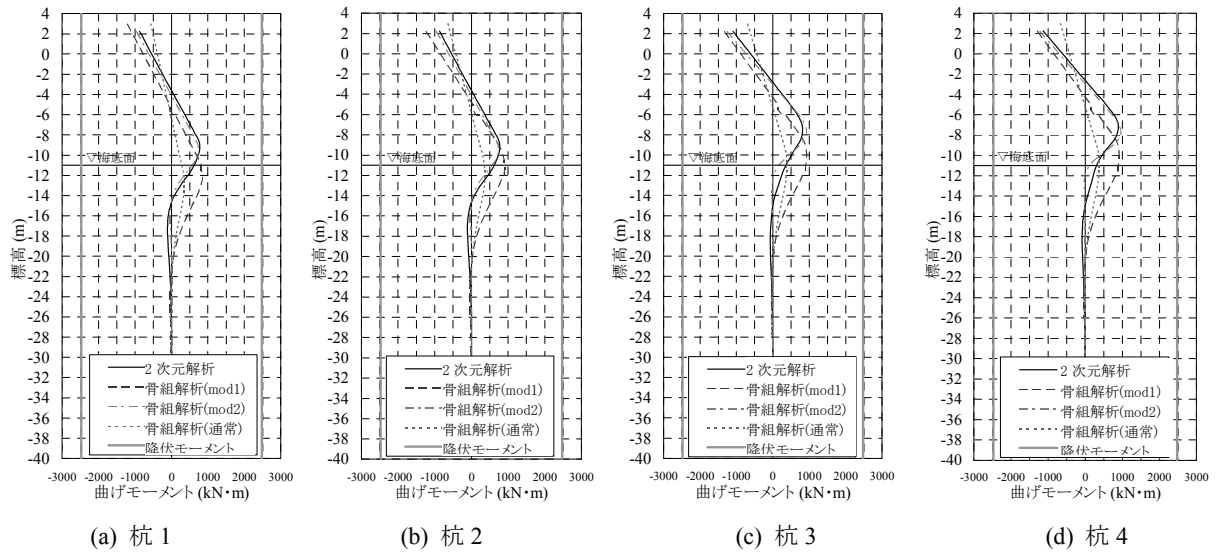


図-4.2 モデル栈橋の杭に作用する曲げモーメントの鉛直分布（常陸那珂）

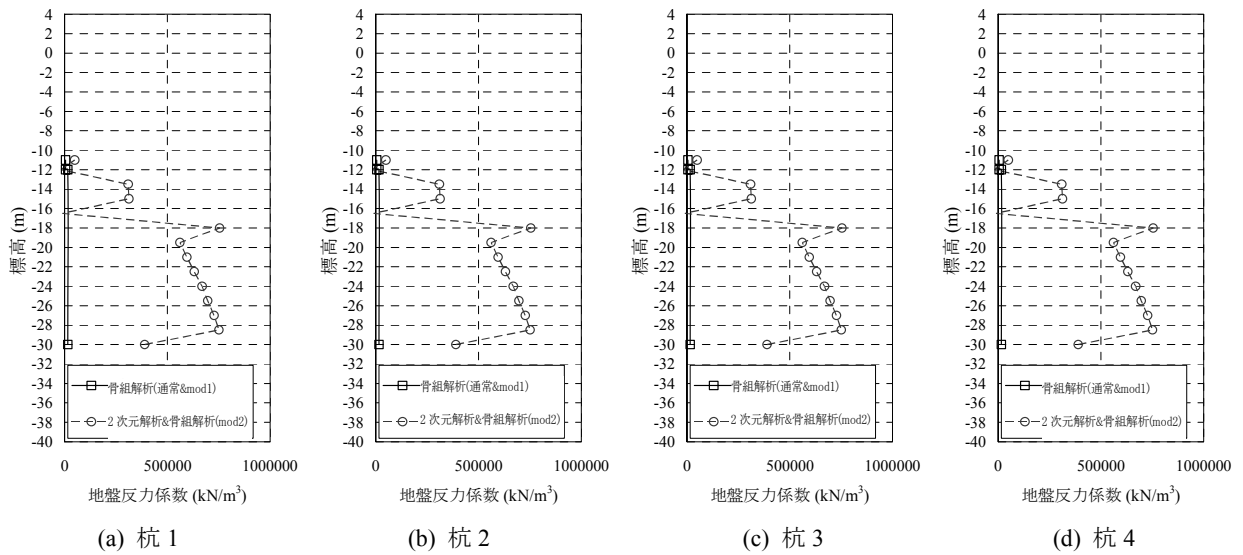


図-4.3 モデル栈橋における地盤反力係数の鉛直分布（常陸那珂）

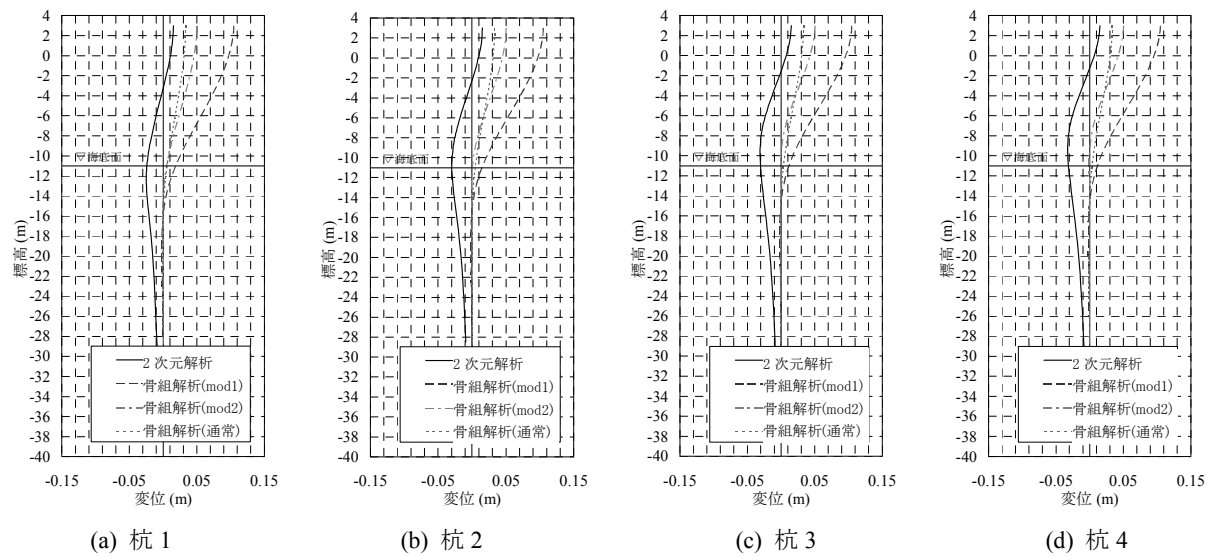


図-4.4 モデル栈橋における杭の変位の鉛直分布（常陸那珂）

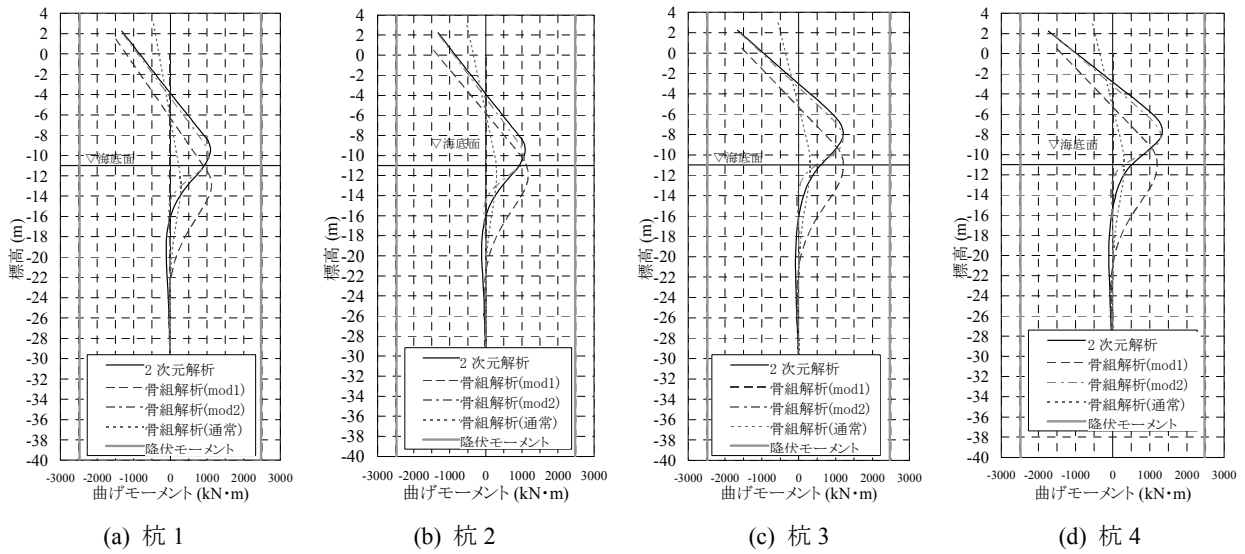


図-4.5 モデル栈橋の杭に作用する曲げモーメントの鉛直分布 (清水)

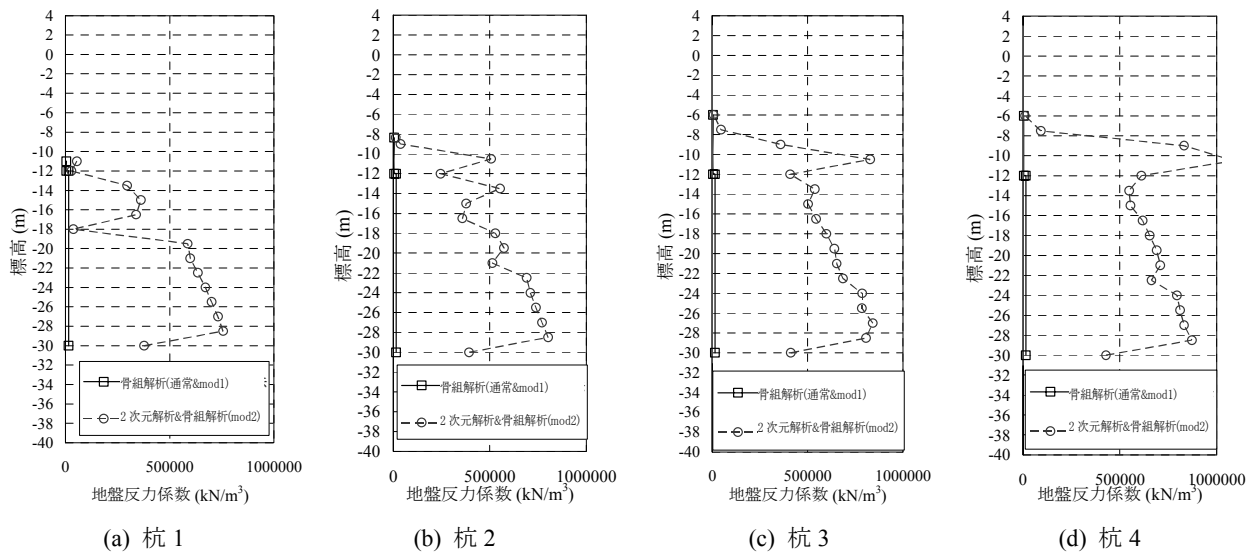


図-4.6 モデル栈橋における地盤反力係数の鉛直分布 (清水)

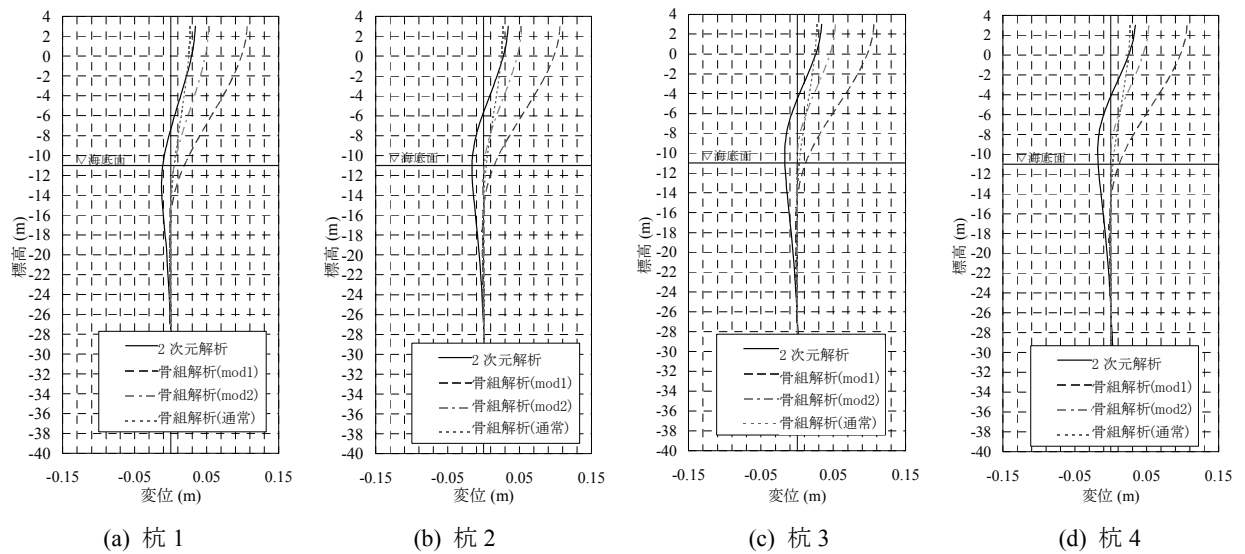


図-4.7 モデル栈橋における杭の変位の鉛直分布 (清水)

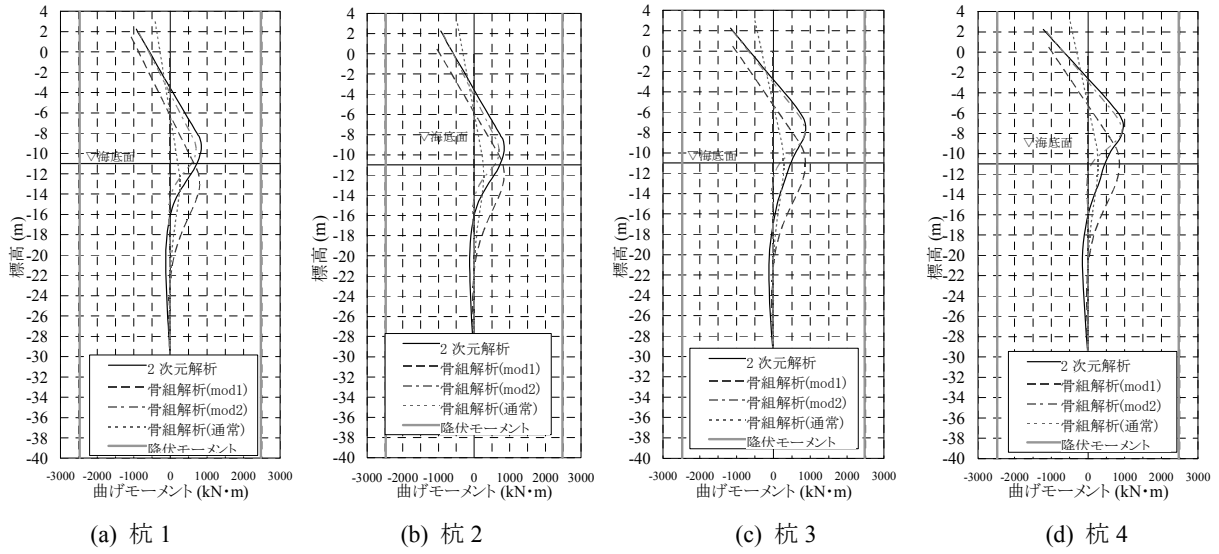


図-4.8 モデル栈橋の杭に作用する曲げモーメントの鉛直分布 (博多)

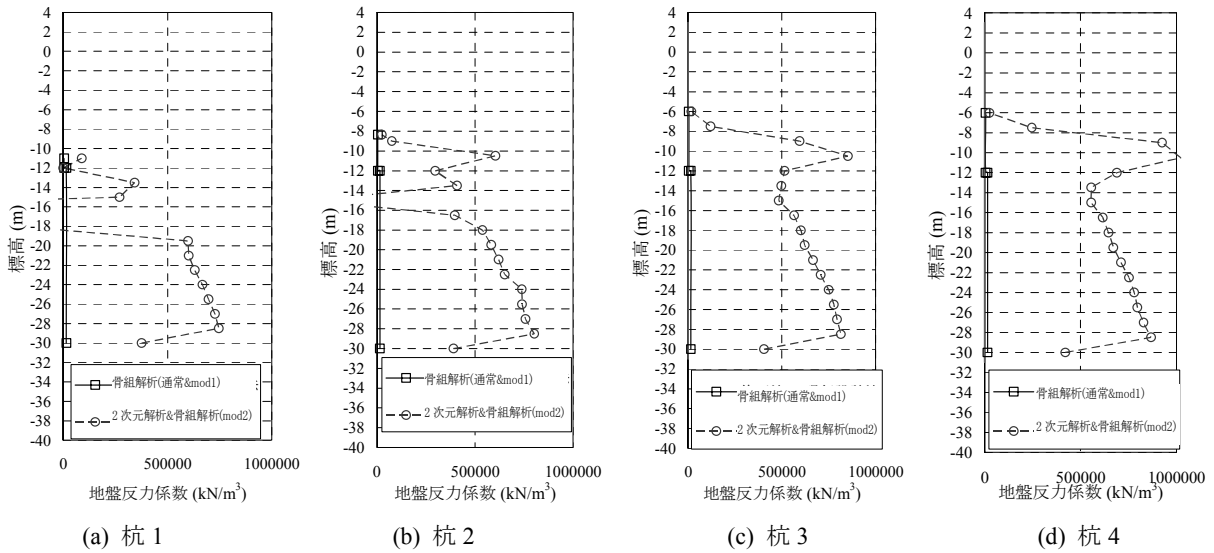


図-4.9 モデル栈橋における地盤反力係数の鉛直分布 (博多)

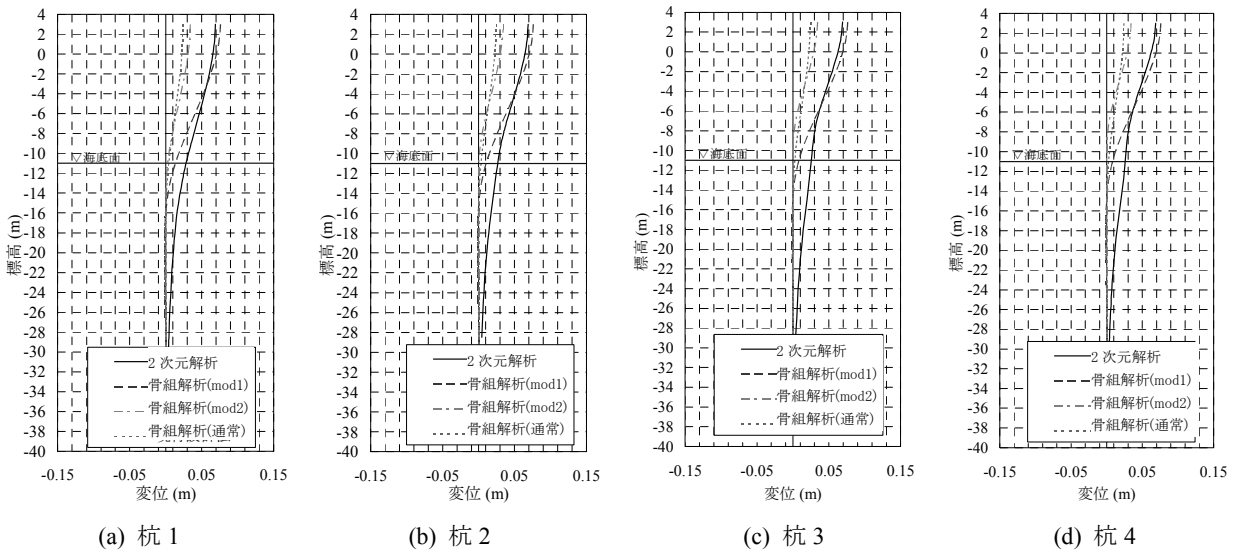


図-4.10 モデル栈橋における杭の変位の鉛直分布 (博多)

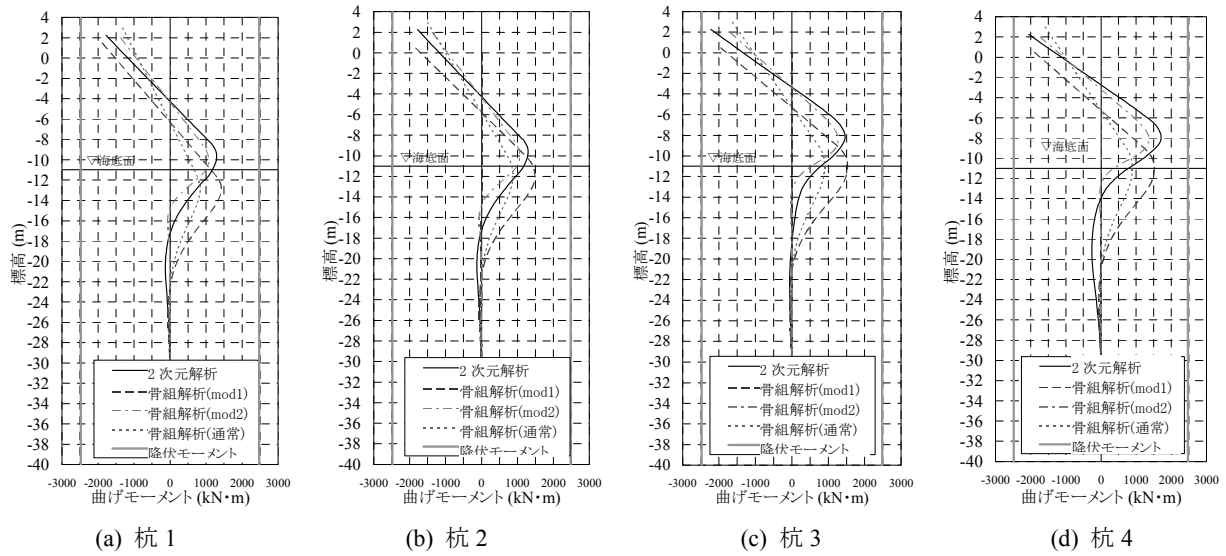


図-4.11 モデル栈橋の杭に作用する曲げモーメントの鉛直分布 (八戸)

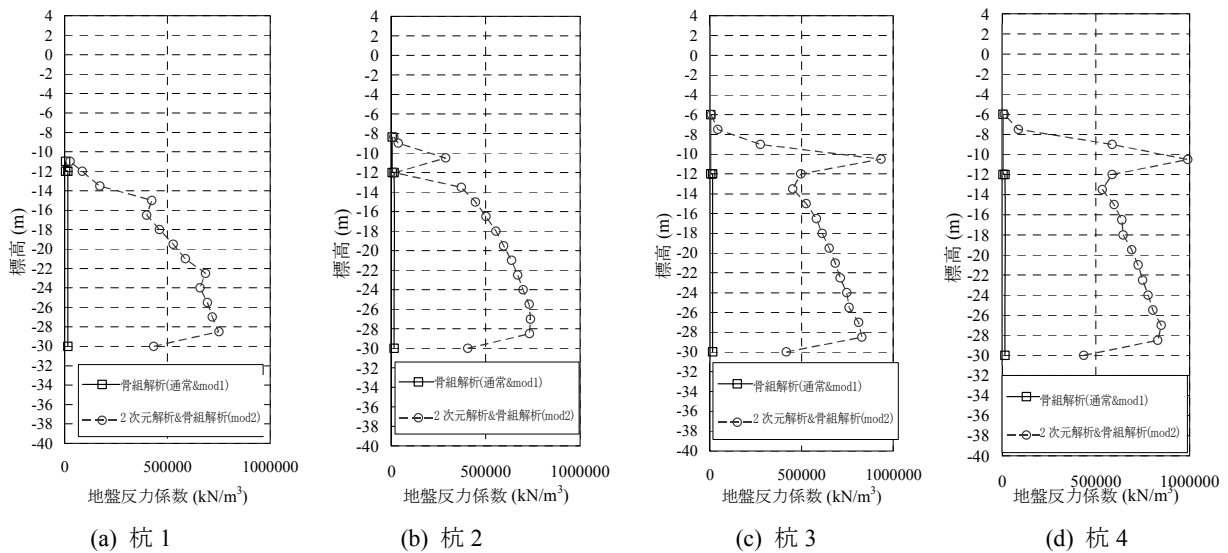


図-4.12 モデル栈橋における地盤反力係数の鉛直分布 (八戸)

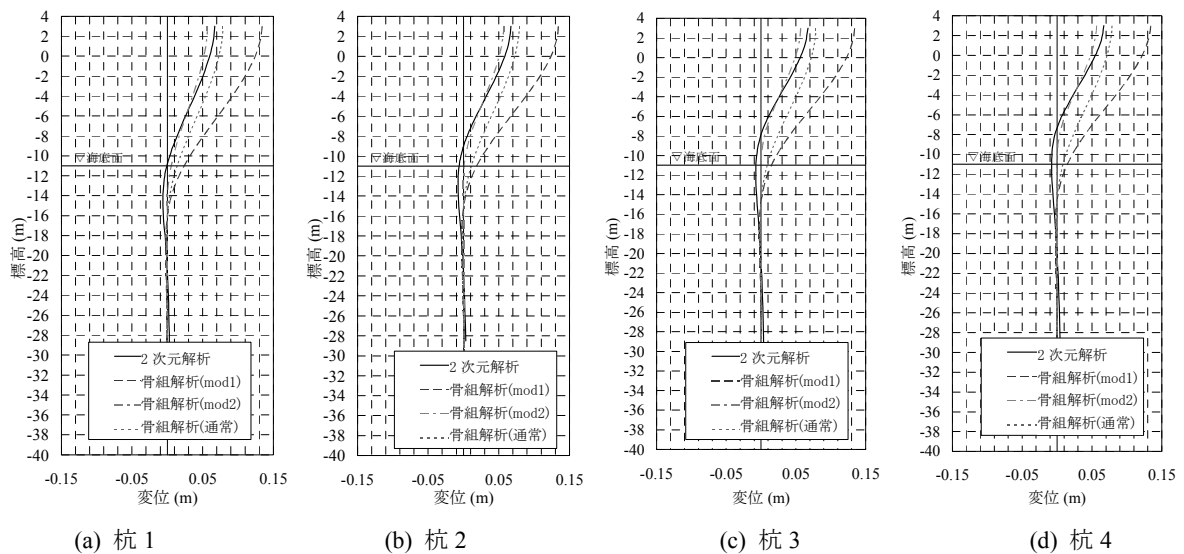


図-4.13 モデル栈橋における杭の変位の鉛直分布 (八戸)

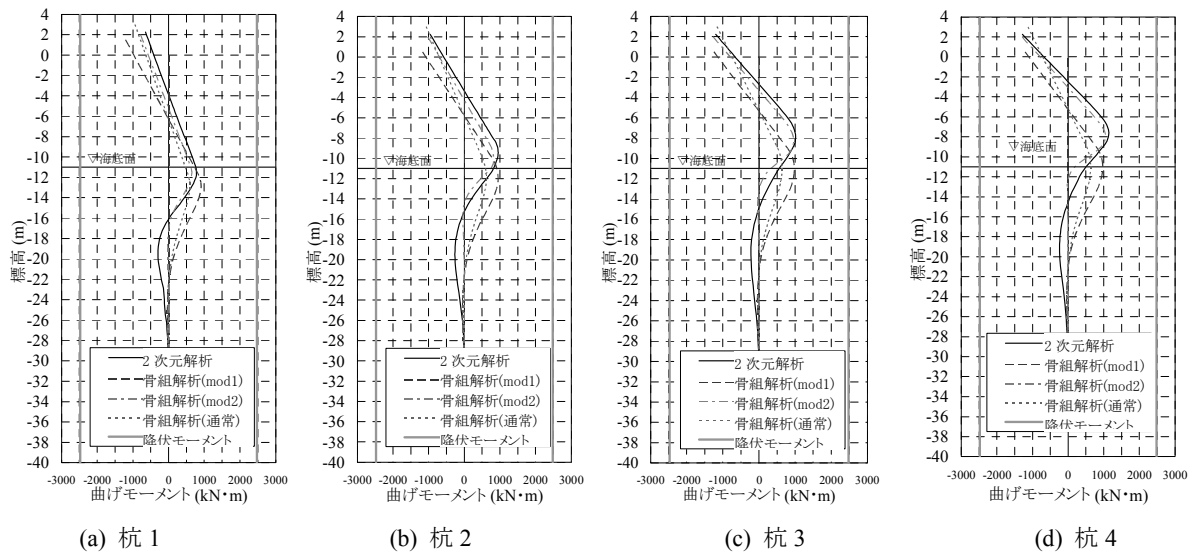


図-4.14 モデル栈橋の杭に作用する曲げモーメントの鉛直分布 (石巻)

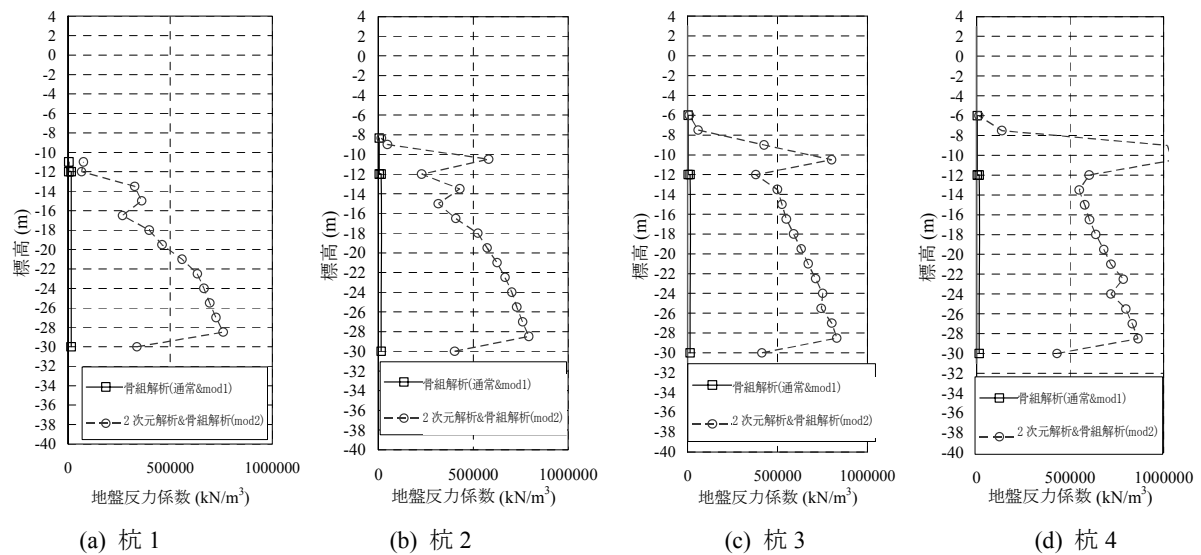


図-4.15 モデル栈橋における地盤反力係数の鉛直分布 (石巻)

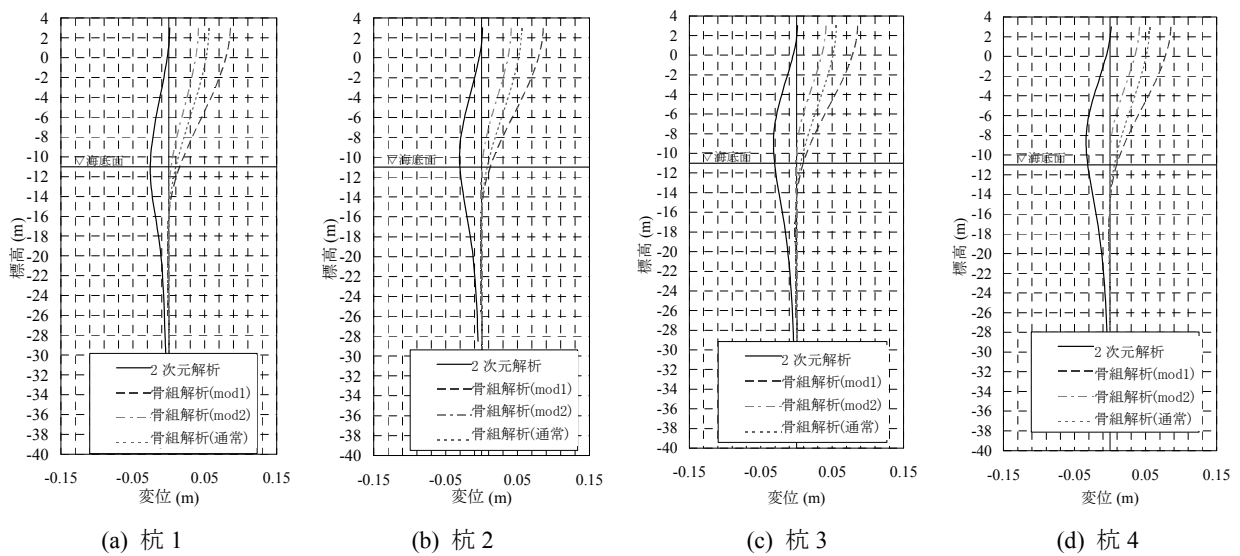


図-4.16 モデル栈橋における杭の変位の鉛直分布 (石巻)

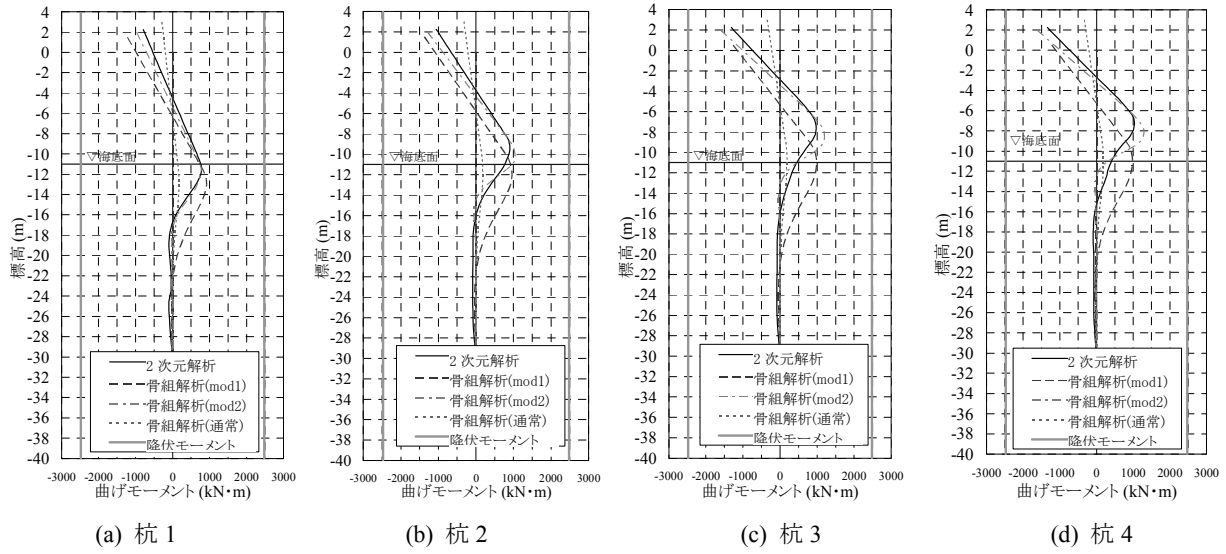


図-4.17 モデル栈橋の杭に作用する曲げモーメントの鉛直分布 (岩国)

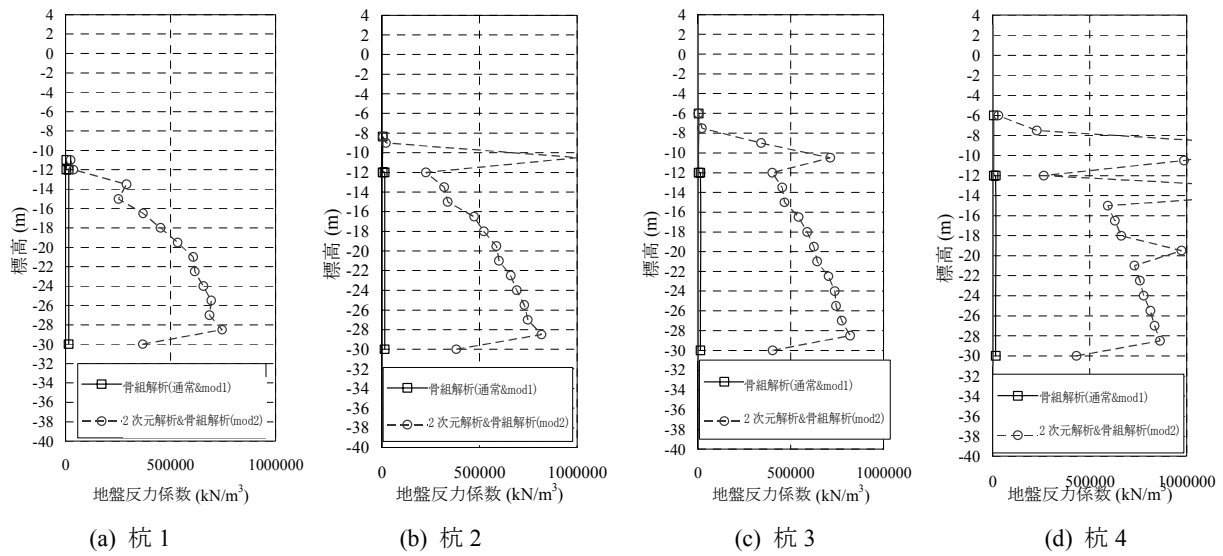


図-4.18 モデル栈橋における地盤反力係数の鉛直分布 (岩国)

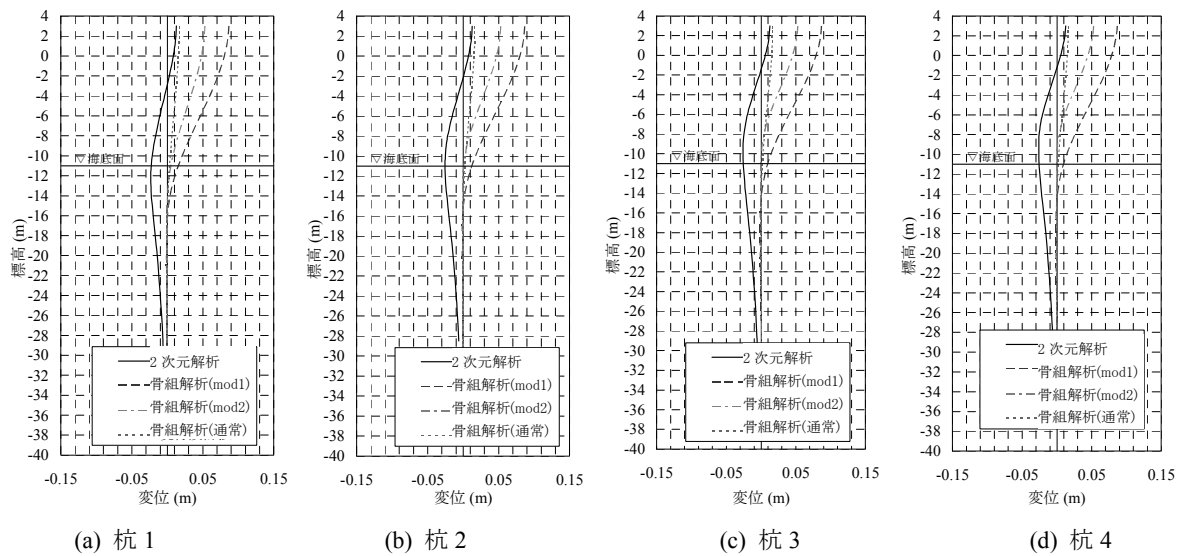
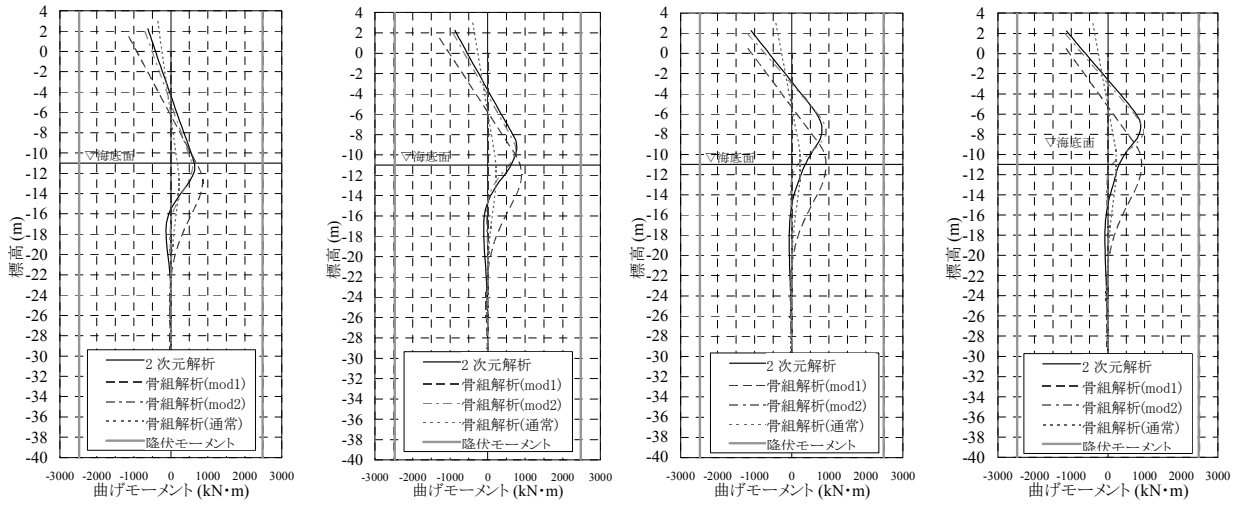
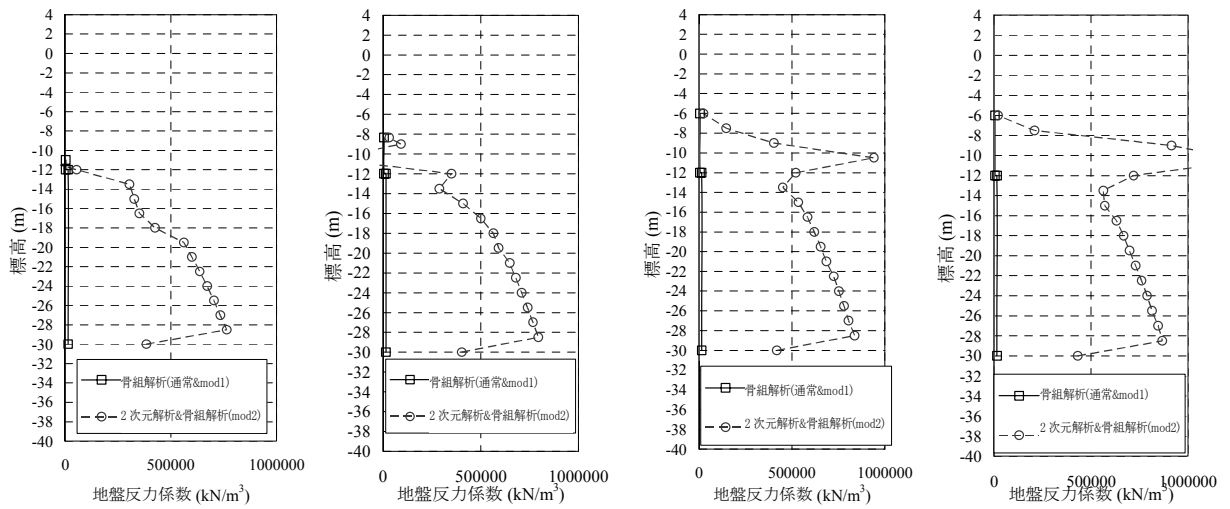


図-4.19 モデル栈橋における杭の変位の鉛直分布 (岩国)



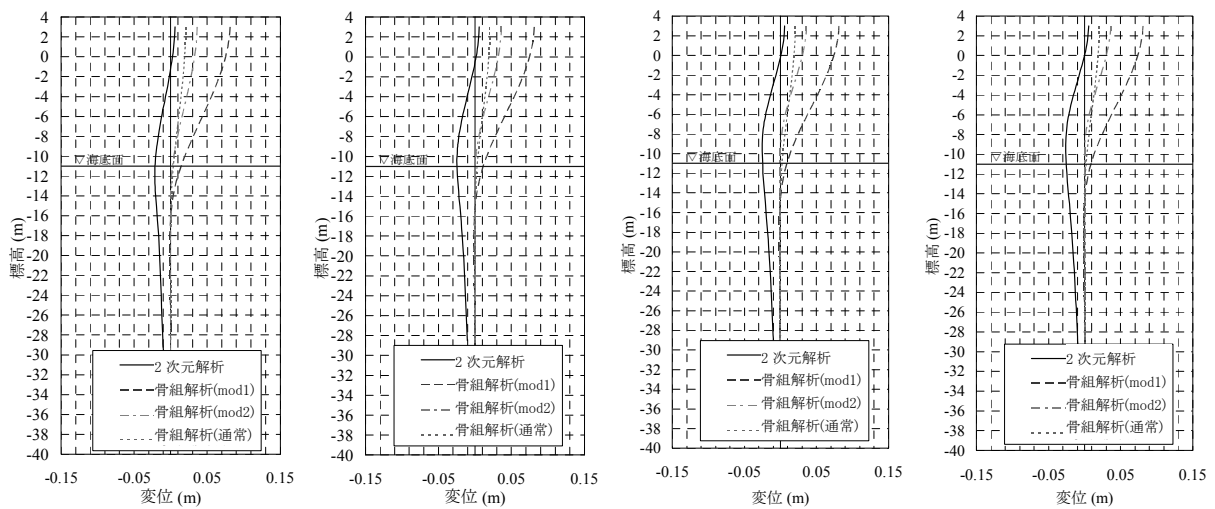
(a) 杭1 (b) 杭2 (c) 杭3 (d) 杭4

図-4.20 モデル栈橋の杭に作用する曲げモーメントの鉛直分布 (四日市)



(a) 杭1 (b) 杭2 (c) 杭3 (d) 杭4

図-4.21 モデル栈橋における地盤反力係数の鉛直分布 (四日市)



(a) 杭1 (b) 杭2 (c) 杭3 (d) 杭4

図-4.22 モデル栈橋における杭の変位の鉛直分布 (四日市)

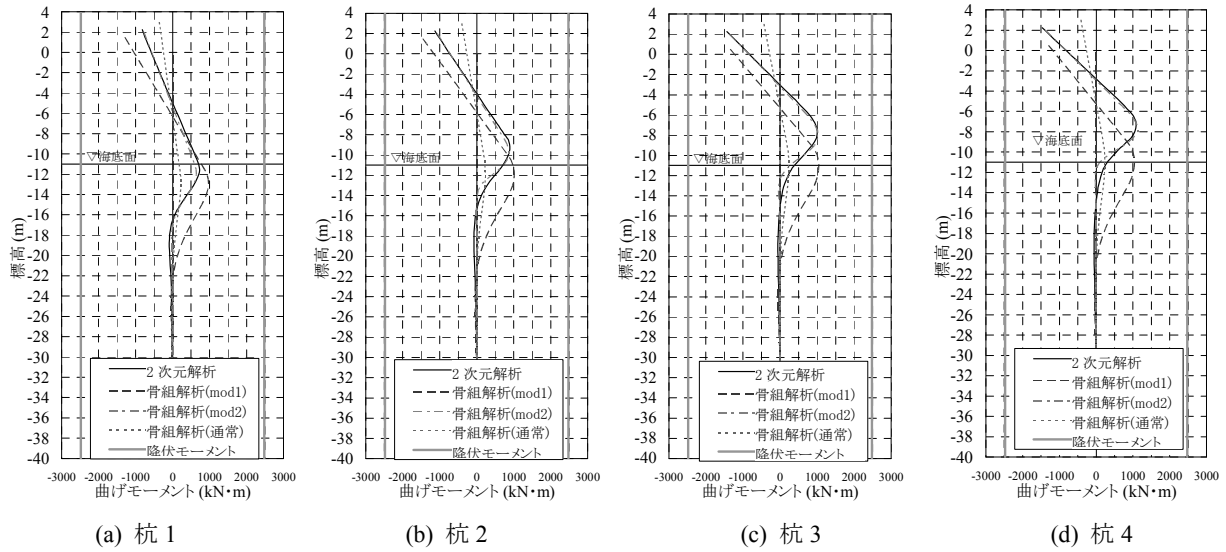


図-4.23 モデル栈橋の杭に作用する曲げモーメントの鉛直分布 (千葉)

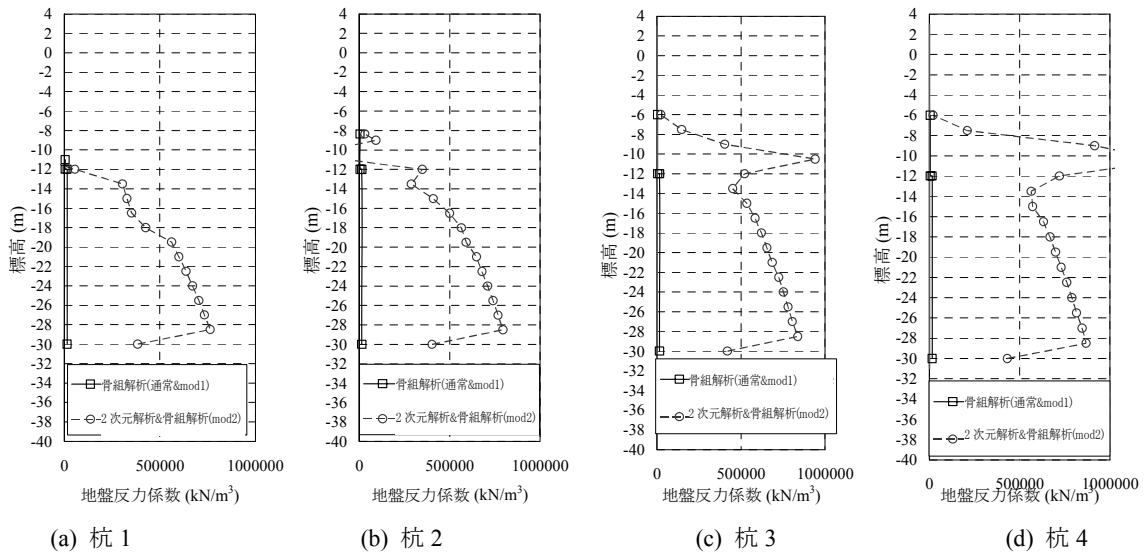


図-4.24 モデル栈橋における地盤反力係数の鉛直分布 (千葉)

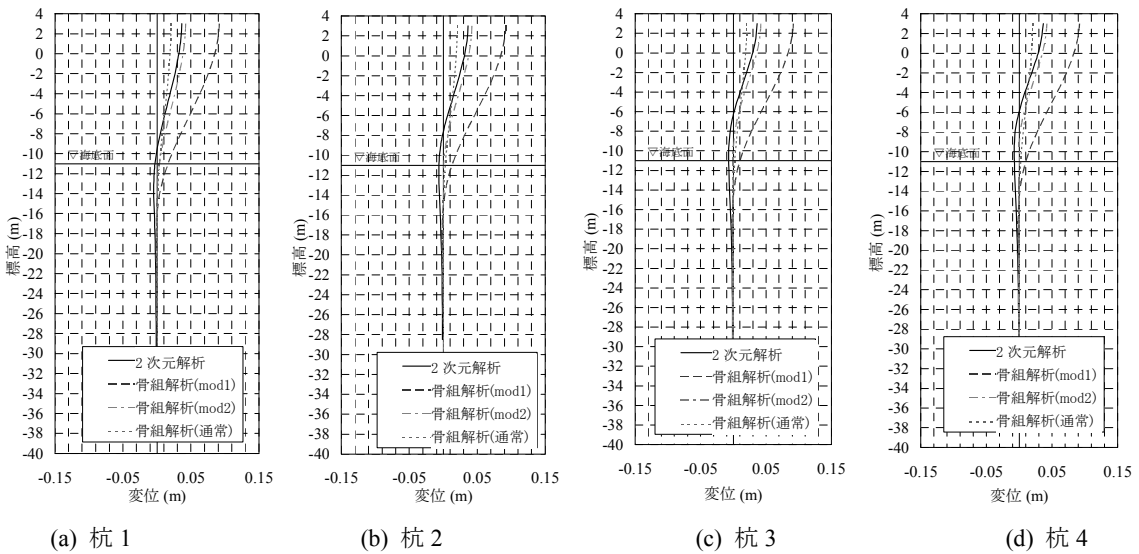


図-4.25 モデル栈橋における杭の変位の鉛直分布 (千葉)

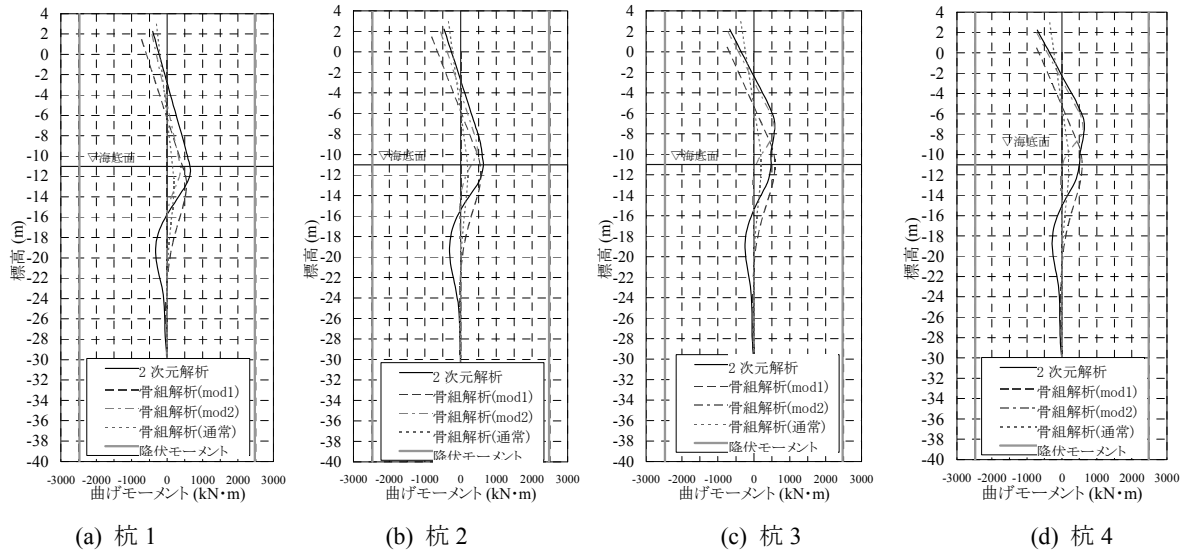


図-4.26 モデル栈橋の杭に作用する曲げモーメントの鉛直分布 (舞鶴)

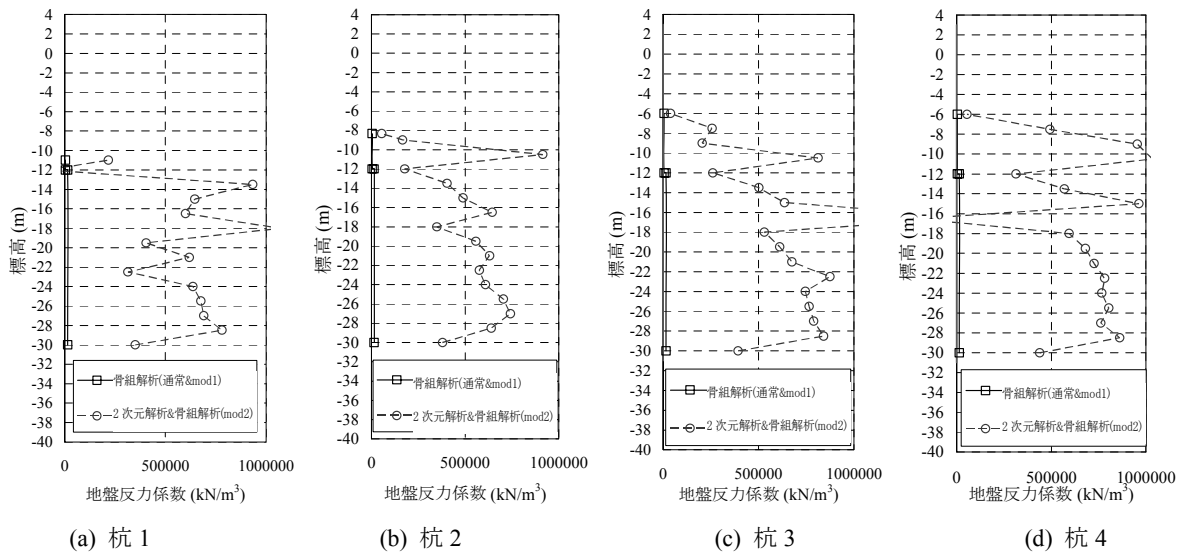


図-4.27 モデル栈橋における地盤反力係数の鉛直分布 (舞鶴)

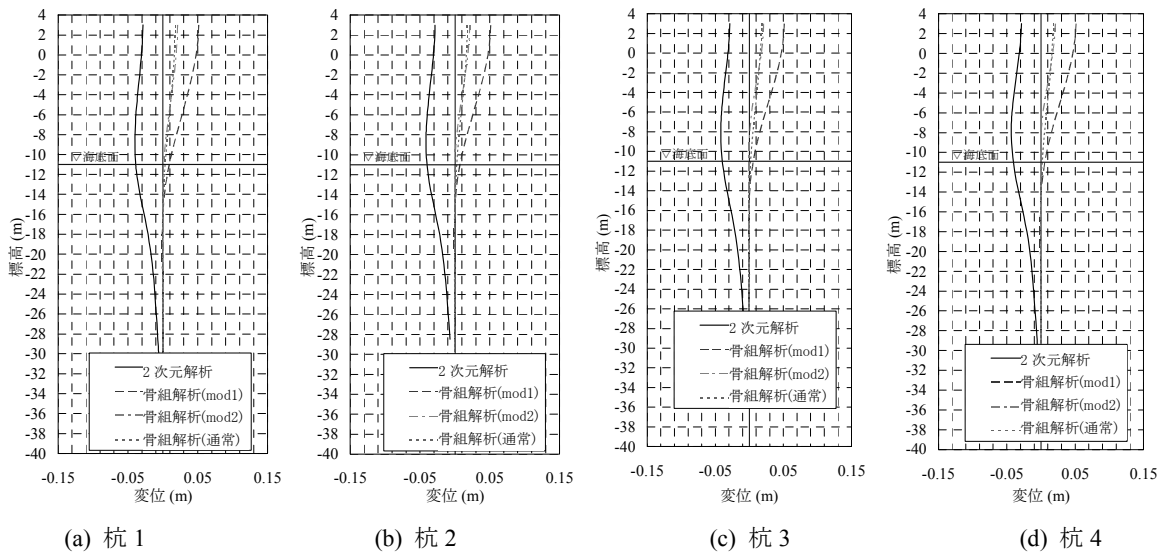


図-4.28 モデル栈橋における杭の変位の鉛直分布 (舞鶴)

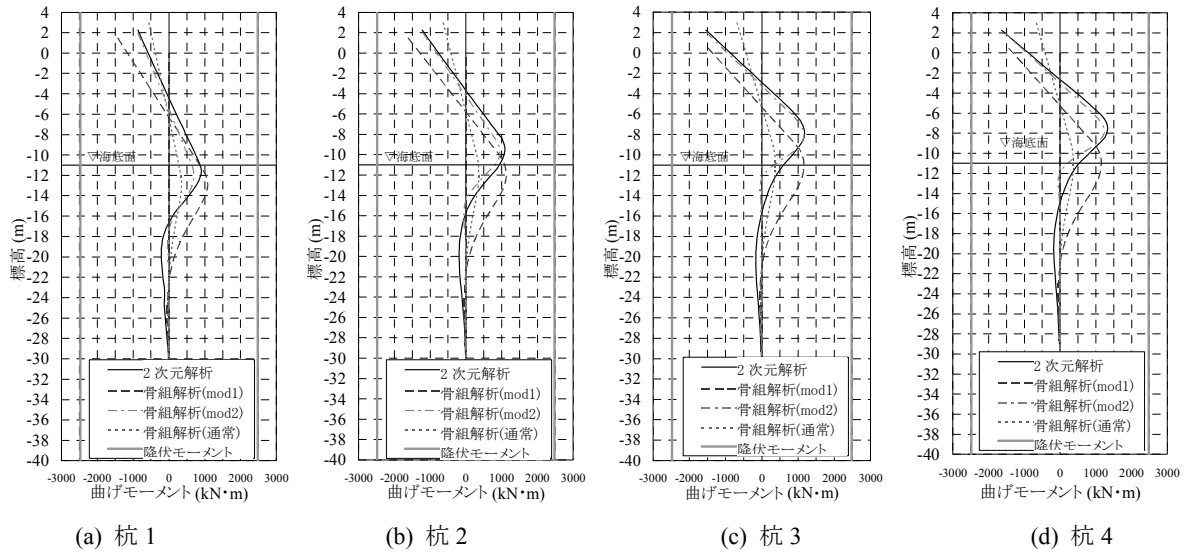


図-4.29 モデル栈橋の杭に作用する曲げモーメントの鉛直分布 (神戸)

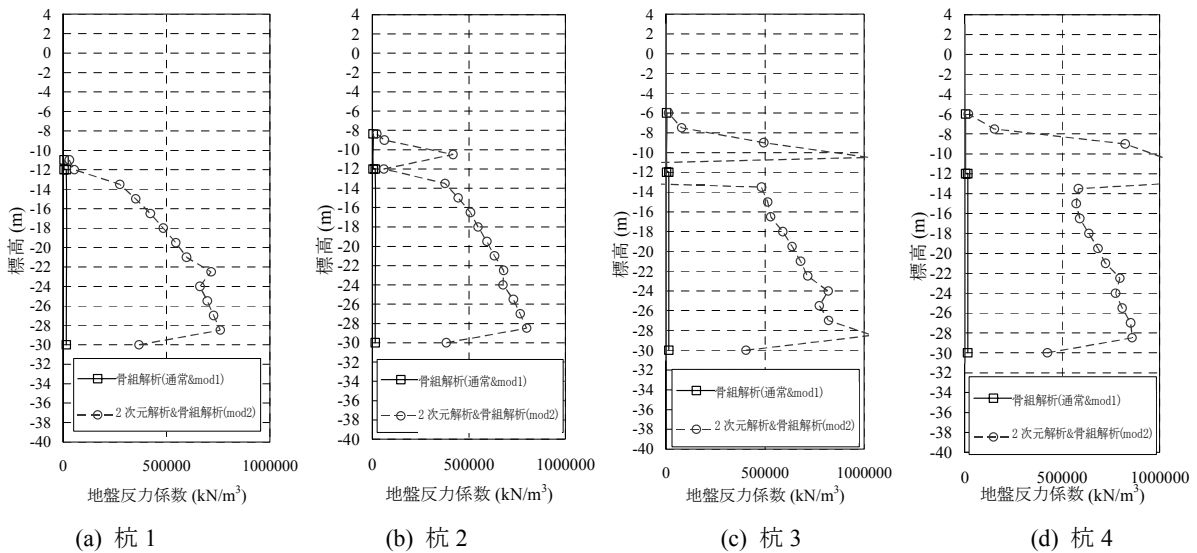


図-4.30 モデル栈橋における地盤反力係数の鉛直分布 (神戸)

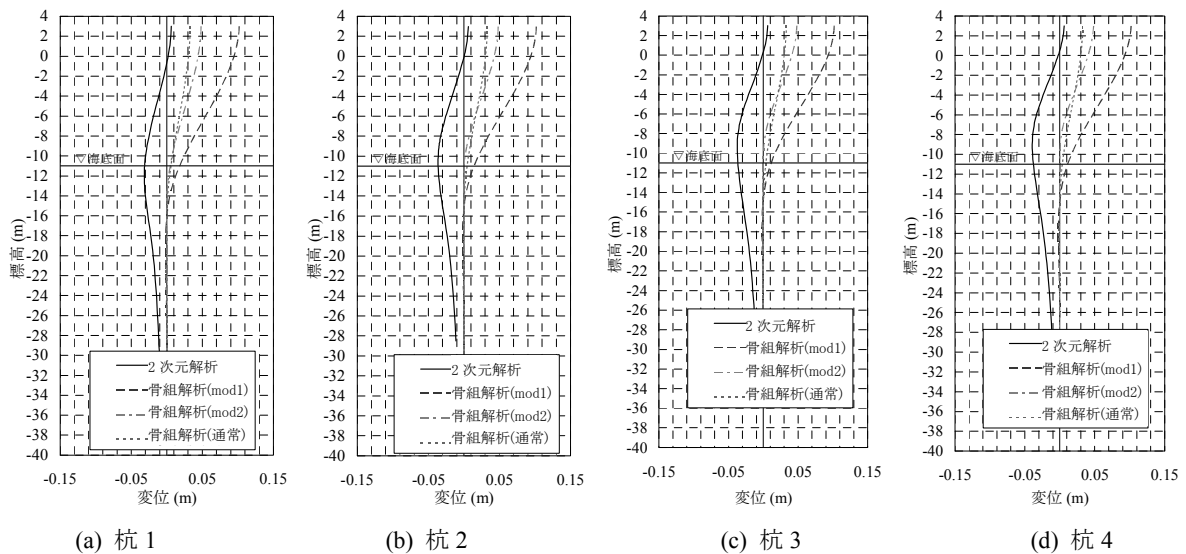


図-4.31 モデル栈橋における杭の変位の鉛直分布 (神戸)

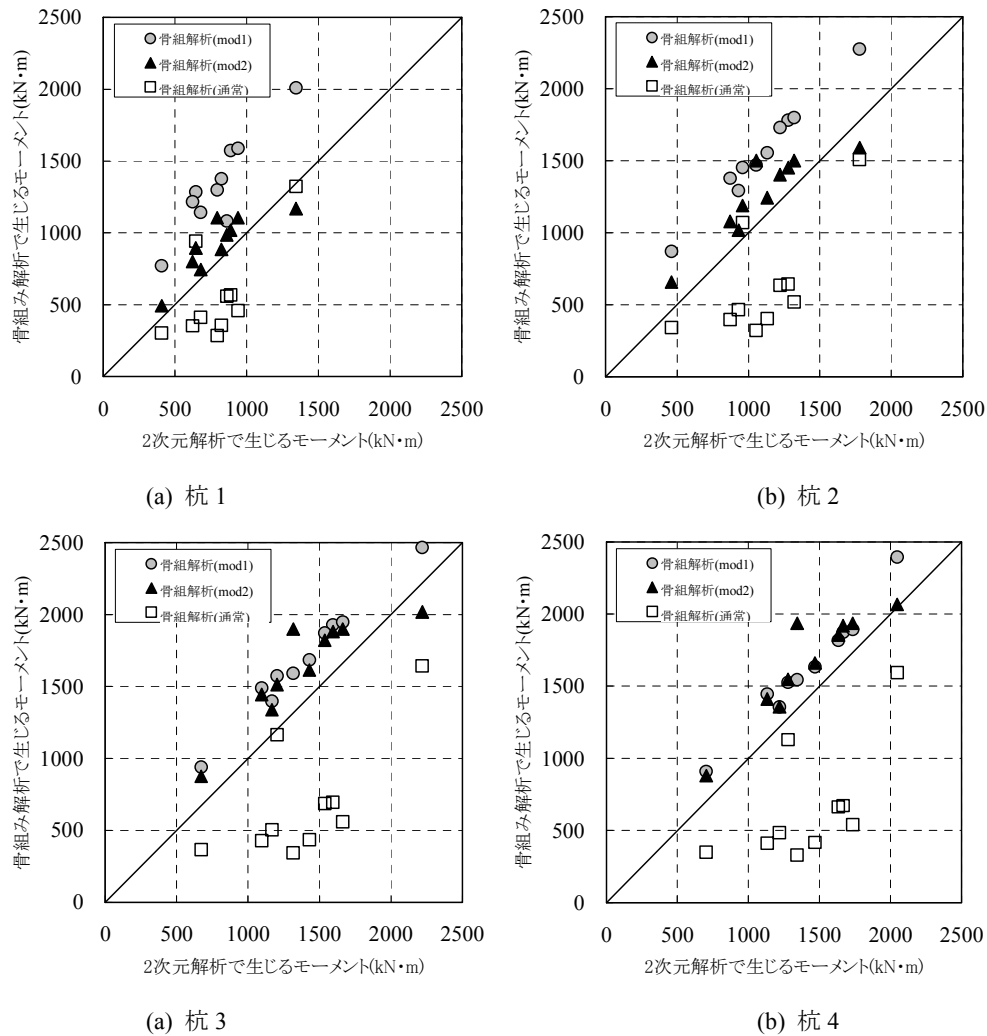


図-4.32 杭頭に作用する曲げモーメントの比較

栈橋杭の応力照査は最大モーメントに対して実施するため、杭1～杭4の杭頭に発生するモーメントについて比較したものを図-4.32に示す。同図より、上部工震度（慣性力）が2次元動的解析結果と同じで地盤反力係数を通常と同様に式(2)のN値から求めたmod1では、2次元解析よりもモーメントが大きくなっており、2次元解析より安全側の結果を示した。また、mod2の結果は2次元解析と近い結果を示しており、その分布はmod1と比べあまり差がみられない。外力条件を通常の加速度応答スペクトルと固有周期を用いて算定した場合の結果は、2次元解析結果の30%程度となっており、2次元解析との乖離が大きいことがわかる。よって、杭に発生する最大モーメントに対しては解析時に用いる地盤反力係数よりも外力条件の影響の方が大きいことが明らかとなった。

また、斜面部である杭1・杭2と成層部である杭3・杭4では若干傾向が違っていることが確認できる。杭1・杭2ではmod1において仮想地表面を考慮しているため、杭3・

杭4より2次元解析と比較して安全側の結果を示していることがわかる。

以上より、設計に際しては、外力条件である上部工加速度最大振幅の簡易な推定方法の確立を図ることができれば、簡便で、2次元動的解析よりも安全側の検討が可能となると考えられる。

5. 結論

本研究で得られた主要な結論を以下に示す。

- 栈橋のレベル1地震動に対する性能照査として、通常の加速度応答スペクトルと静的骨組解析による方法と2次元解析では結果に差が生じることを確認した。検討に用いた複数のレベル1地震動において、杭の曲げモーメントは2次元解析の方が大きく、杭頭から下の曲げモーメント極大値の位置は2次元解析の方が高い

ことがわかった。また、固有周期算定についても差があり、2次元解析の方が短い固有周期を示した。

- 通常の骨組解析を用いて求める固有周期と2次元解析より求まる固有周期の違いは、地盤反力係数の違いによることが大きいことが明らかとなった。
- 通常の加速度応答スペクトルと栈橋固有周期から算出した栈橋上部工に作用する加速度は、検討に用いた複数のレベル1地震動において、2次元動的解析で算出した場合の15～70%程度であった。この要因としては、骨組解析によって栈橋固有周期を算出する際の地盤反力係数及び応答スペクトルでの減衰定数が、2次元解析において発現している値と異なることが原因であることが確認された。
- 杭の曲げモーメント分布より、特にマウンドの斜面部において通常の静的骨組解析と2次元解析で違いがみられた。上部工慣性力を同等とし、仮想地表面を考慮せず、さらに地盤反力係数を2次元解析と同等にすることで、両者のモーメントの分布が概ね一致することが明らかとなった。
- 杭に発生する曲げモーメントの深度方向の極大値については、骨組解析時の地盤反力係数より慣性力の影響の方が大きいことがわかった。
- 静的骨組解析において栈橋上部工加速度を2次元解析と同等とすることができれば、地盤反力係数はN値による評価でも、杭の曲げモーメントの極大値は2次元動的解析よりもやや大きくなり、安全側の検討ができる可能性が示された。

6. おわりに

本研究では、直杭式横栈橋の設計法について、加速度応答スペクトルによる上部工震度評価による静的骨組解析と、2次元動的解析を行った場合の、栈橋上部工における加速度及び杭に発生するモーメント分布について比較・検討を行った。検討結果より、静的骨組解析と2次元動的解析結果の違いは、検討に用いる地盤反力係数及び減衰定数の影響が大きいことが明らかとなった。また、これらを整合させ、上部工加速度が同等になることで、杭応力等も整合させることができた。本件等においては骨組解析にN-PIER、2次元解析にFLIPを用いて比較検討を行い評価結果が異なる要因を解明したが、この結果不整合の要因と整合させるための対応方法は、解析プログラムが異なる場合においても同様であると考えられる。液状化が発生する場合やレベル2地震動については、本検討のように地盤反力係数や減衰定数を合わせることに

より2次元解析結果と骨組解析結果の杭の曲げモーメント分布が一致するかどうかについては、今後の課題としたい。

(2012年8月10日受付)

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，2007年。
- 2) 萩原直範，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。
- 3) 横田弘，竹鼻直人，南兼一郎，高橋邦夫，川端規之：鋼管杭式栈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Vol.37，No.2，pp.75-130，1998。
- 4) Iai, S., Matsunaga, Y. and Kameoka, T. : Strain Space Plasticity Model for Cyclic Mobility, Report of The Port and Harbour Research Institute, Vol.29, No4, pp27-56, 1990.
- 5) 森田年一，井合進，H. 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，港湾技研資料No.869，1997。
- 6) 国土技術政策総合研究所港湾研究部港湾施設研究室，国土技術政策総合研究所 港湾施設研究室HP (<http://www.y.sk.nilim.go.jp/kakubu/kouwan/sisetu/sisetu.html>) .
- 7) Miklos I. Hetenyi.: Beams on elastic foundations: theory with applications in the fields of civil and mechanical engineering, Univ. of Michigan Studies Scientific Series, v.16, Univ. of Michigan Press, p.127, 1946.
- 8) Hinton, E. and Owen, D. R. J.: Finite Element Programming, Academic Press, London, 1977.

港湾空港技術研究所資料 No.1260

2012. 12

編集兼発行人 独立行政法人港湾空港技術研究所

発行所 独立行政法人港湾空港技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号
TEL. 046(844)5040 URL. <http://www.pari.go.jp/>

印刷所 株式会社シーケン

Copyright © (2012) by PARI

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of PARI

この資料は、港湾空港技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は港湾空港技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。



古紙配合率70%再生紙を使用しています