

斜め組杭式栈橋の振動特性と応答スペクトル

Vibration characteristics of a wharf with coupled raking piles and its response spectrum during earthquake

濱田純次*, 横田弘**, 大熊弘行***, 佐藤博****, 芥川博昭*****

Junji HAMADA, Hiroshi YOKOTA, Hiroyuki OHKUMA, Hiroshi SATO, and Hiroaki AKUTAGAWA

*正会員 工博 (株)竹中工務店 技術研究所(〒270-1395 千葉県印西市大塚 1-5-1)

**フェロー会員 工博 独立行政法人港湾空港技術研究所(〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1)

***正会員 東電設計(株) 第二土木本部(〒110-0015 東京都台東区東上野 3-3-3)

****正会員 工博 東京電力(株) 技術開発研究所(〒230-8510 神奈川県横浜市鶴見区江ヶ崎町 4-1)

*****鋼管杭協会(〒103-0025 東京都中央区日本橋茅場町 3-2-10)

Vibration characteristics of a wharf with coupled raking piles were investigated by a series of linear numerical analyses. The results showed that the vibration response at the top of a wharf with coupled raking piles during earthquakes was caused by not only the ambient ground surface motion but also base ground motion at the pile toe. This tendency was different from that of a wharf with all-vertical piles. Therefore, a simple two mass and three springs model was proposed to make clear these characteristics including the ground motion effects. This simple model was effective to make an accurate estimation of the response of a wharf with coupled raking piles.

Key Words: coupled raking piles, interaction, seismic ground motion, mass-spring model

キーワード: 斜め組杭, 相互作用, 地盤震動, 質点ばねモデル

1. はじめに

兵庫県南部地震(1995)以降, 港湾構造物は, 耐震性をより高める必要性が叫ばれると同時に, より低コスト, 短工期であることのニーズが高まってきている。さらに, 今後大型コンテナ船の増加に伴い大水深コンテナバースの需要も増加し, 地震時等の水平荷重に対して水平変位や杭頭曲げモーメントを小さくできる斜め組杭式栈橋(ここでは, 斜杭式栈橋とよぶ)の需要は非常に大きい。

耐震設計法として, 日本では, 直杭式栈橋に関しては, 実験および解析^{1),2),3)}を通じ, 1999年4月の港湾基準⁴⁾の改定によりレベル1およびレベル2地震動⁵⁾に対する耐震性能の照査方法が確立・導入されている。しかし, 斜杭式栈橋については, 軸力で破壊した場合の杭靱性の評価の問題や, 杭の引抜き抵抗, 地盤の支持力等の大きさにより破壊パターンが異なるという問題があり, レベル1, レベル2地震動に対して何を照査指標にすべきかが定まっていない。そのため, 地震応答特性・破壊形式など現象解明を行った上で, 直杭式栈橋との整合性を考慮した耐震設計法の導入が強く要請されている。

これに対し, 斜杭式栈橋の模型振動実験⁶⁾や弾塑性解析^{7),8)}が行われている。振動実験結果より, 斜杭式栈橋

の地震時応答特性は, 直杭式と異なり, 地表面のみならず基盤(杭先端)からの入力の影響も大きく, 杭材の曲げモーメントには, 地盤震動の影響が大きいことが明らかにされている。また, 弾塑性解析より, 斜杭の引抜きが生じた以降に上部工の水平変位および杭頭曲げモーメントが増大すること, エネルギー一定則とプッシュオーバー解析の組み合わせにより耐震性能を十分に予測できることが示されている。さらに, 模型斜杭式栈橋の破壊実験⁹⁾では, 斜杭の軸力により杭頭部の鉄筋コンクリート(RC)上部工が損傷して杭頭結合部の拘束度合いが低下した後に杭頭曲げモーメントが増大する破壊過程が示されている。また, 斜杭を有する構造物の地震時に対する解析的研究は, 斜杭の振動特性に関する研究^{10),11),12)}, 斜杭断面力および組杭の水平抵抗に及ぼす地盤の非線形性に関する研究^{13),14),15)}などがあるが, 設計で用いるための上部工の応答加速度(作用震度)を算定する方法や, 応答加速度に対する杭の傾斜角および地盤震動の影響が十分には明らかにされていない。

そこで, 本論文では, 以下の手順により, 斜杭式栈橋の上部工の応答加速度を算定する方法について検討する。

まず地盤と栈橋との動的相互作用が解析可能な梁-ばね-質点でのモデル(以下, 梁ばねモデル)による解

析を行い、模型振動実験結果との比較から解析モデルの妥当性を示す。

次に、その梁ばねモデルによる動的解析を行い、上部工の水平変位や杭断面力に及ぼす「杭の傾斜角」、「地盤震動」、「杭周囲摩擦」の影響について検討する。

梁ばねモデルと1質点系モデルでの加速度応答スペクトルを比較することにより、斜杭式栈橋への入力地震動の伝わり方が、直杭式栈橋とは異なることを示す。そして、1質点系モデルでは考慮できない地盤の影響を考慮して斜杭式栈橋の上部工の応答スペクトルを推定できる2質点3ばねモデルを提案する。このモデルは、梁ばねモデル解析で得られた斜杭式栈橋に及ぼす地盤震動の影響を考慮したものであり、このモデルを用いて斜杭式栈橋の応答メカニズムを明らかにする。

さらに、応答変位法により地盤震動の影響を設計に考慮する際、上部工の慣性力と地盤震動の位相差について、梁ばねモデルおよび2質点3ばねモデルによる検討を行う。

なお、組杭の地震時挙動は、引抜きが生じるまではほぼ線形的な挙動を示す^{7),8)}ため、本論文での解析は、組杭の引抜きが生じたり側方流動が生じる以前の現象に注目して全て線形解析としている。また、本論文では、固有周期と応答倍率の関係を広義に応答スペクトルと称する。

2. 模型振動実験

解析対象とする模型振動実験⁹⁾の概要を述べる。図-1に示すように、斜杭式栈橋模型と直杭式栈橋模型を同一地盤上に設置し、同時に加振実験を行っている。

実験に用いた斜杭式栈橋模型は、せん断波速度 77m/s に相当する軟弱地盤層厚 24m、水深 16m、上載荷重 39.2kN/m²、水平震度 0.25 といった条件で設計されたものを 1/30 スケールでモデル化したものである。実物想定 の杭は、直径 1m、厚み 19mm の鋼管杭である。この斜杭式栈橋の構造諸元は、既往の栈橋建設事例の中では、大水深で、かつ耐震強化された栈橋に相当する。

栈橋模型の杭材料には、曲げ剛性縮尺および軸剛性縮尺を合わせるように、直径 32mm、厚さ 1mm のアルミ製パイプを用い、上部工には重量 352.8N の鉄板を用い、上載荷重には鉄板 4 枚 (計 705.6N、実物 39.2kN/m²) を用いている。

斜杭は傾斜角 25° の組杭とし、この組杭を平面的に 90° 方向にずらした配置としている。栈橋模型の上部工は 0.6m×0.9m、杭長は直杭 1.64m、斜杭 1.8m であり、側壁や模型同士の影響が無いように 2.2m×3.5m の土槽内に設置している。

地盤模型は、厚さ 0.3m の固化した支持層と 0.8m の砂層からなる。支持層は重量比約 3% のセメントを事前配合したセメント混合砂を用いて固化している。また、砂

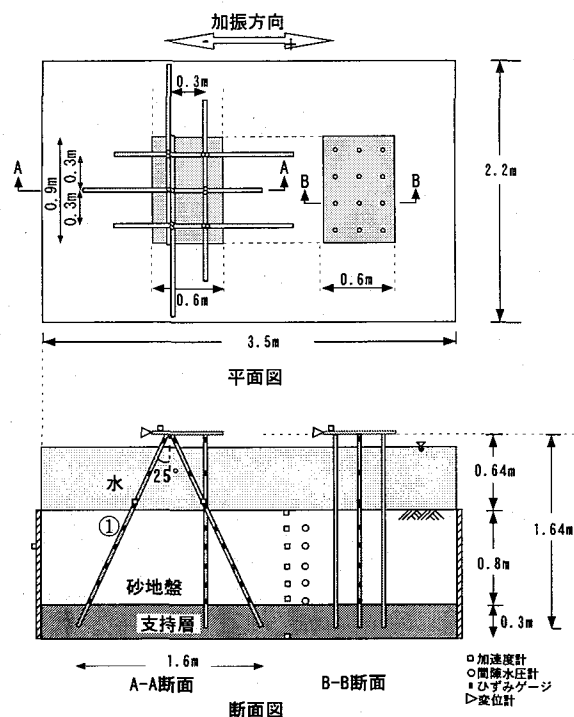


図-1 斜杭式栈橋と直杭式栈橋の模型振動実験

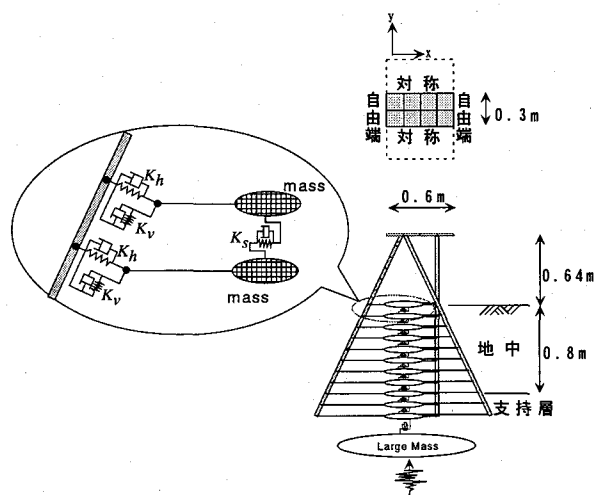


図-2 解析モデル

層は相馬珪砂 6 号を用い、相対密度が約 30% のゆる詰め地盤である。杭は、固化した支持層に約 0.2m 埋め込まれており、杭先端は固定条件に近い状態である。

栈橋の固有周期は上部工に載せた鉄板の枚数を変えて調整し、入力加振波はスペクトル特性の異なる 3 種類の実測波 (神戸波、八戸波、大船渡波) を用いている。

3. 梁ばねモデル解析

3.1 解析モデル

解析に用いる斜杭式栈橋モデルは、図-2に示すように杭材料や杭長など模型振動実験に用いた模型 (長さ縮尺比 1/30、変位縮尺比 1/455.8、時間縮尺比 1/21.35) と一致させた梁ばねモデルとする。このモデルは、実験の模

型が6組(12本)の組杭により構成されていたのに対し、中央の2組(4本)のみモデル化している。境界条件として上部工の振動方向(x方向)の端部は自由端とした。また、振動直角方向(y方向)の端部はy方向変位とx軸周りの回転を拘束した軸対称条件とした。また、地盤は、11層からなる質点(内3層は、杭先端部の支持地盤)でモデル化し、自由地盤間は、せん断ばね K_s で繋がっている。杭-地盤間の相互作用ばねは、杭軸直角方向ばね K_h と杭軸方向ばね K_v に分離してモデル化する。地盤の大きさは、自由地盤となるように、栈橋の重量に比較して十分大きくしている(平面積 $3\text{m} \times 3\text{m}$)。また、地盤の下端に Large Mass を設け、入力地震動は、Large Mass $\times$ 入力加速度となる荷重を Large Mass に作用させた。

3.2 解析条件

解析に用いた地盤定数および杭の材料係数を表-1に示す。模型振動実験結果より、地盤の固有周期が表層地盤 0.8m に対して約 20Hz となったので平均的にこの状態を再現できるようにせん断剛性分布を地盤中央(深度 0.4m)で 4900kN/m^2 となる三角形分布とした。また、杭軸直角方向の地盤反力係数および杭軸方向地盤反力係数は、式(1)および式(2)より算定した。

$$k_h = E_s / D \quad (1)$$

k_h : 杭の水平方向地盤反力係数(kN/m^3)

E_s : 地盤の弾性係数(kN/m^2)

D : 杭径(m)

$$k_v = frk \times 0.16\alpha E_s / D^{-3/4} \quad (2)^{16)}$$

k_v : 杭の周面地盤反力係数(kN/m^3)

$frk = 1$

$\alpha = 2$

解析プログラムは、MSC-NASTRAN¹⁷⁾を用い、数値積分法は、Newmark- β 法で行った。また、動的解析に用いた減衰は、地盤のばねと栈橋に4で示す周波数比例型減衰を考慮した。

4. 振動実験結果の数値解析

数値解析は、表-2のように地盤および栈橋の減衰を変えて検討した。また、地震波は、実験(時間縮尺 $1/23.4$)の際、振動台上で計測されたものの高周波成分(斜杭式栈橋の3次の固有振動数 44Hz より大きい 50Hz 以上)をカットした3波を用いた。

4.1 固有値

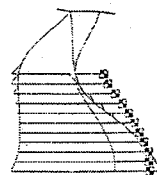
固有値解析結果を図-3および図-4に示す。斜杭式栈橋の固有振動数は約 34Hz 、直杭式栈橋では約 5.5Hz 、地盤

表-1 解析に用いた材料特性

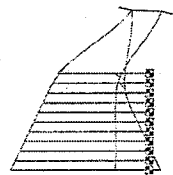
区分	名称	記号	値	単位	備考
地盤	支持地盤				
	単位体積重量	γ_d	14.55	kN/m^3	
	せん断波速度	V_s	136	m/s	ゆる詰め地盤下端の10倍の剛性とした
	せん断剛性	G	27567	kN/m^2	
	ポアソン比	ν	0.3	-	
	ゆる詰め地盤				
	単位体積重量	γ_d	12.25	kN/m^3	
	せん断波速度	V_s	63	m/s	
	せん断剛性	G	4900	kN/m^2	
	ポアソン比	ν	0.3	-	
	上部工				
	寸法		$600\text{mm} \times 300\text{mm} \times 6\text{mm}$		実験で用いたものの1/3
栈橋模型	弾性係数	E	2.058×10^8	kN/m^2	
	単位体積重量	γ	3.23	kN/m^3	
	材質		スチール		
	材質		アルミ		
	外径	ϕ	32	mm	
	管厚	t	1	mm	
	弾性係数	E	7.06×10^7	kN/m^2	
	ポアソン比	ν	0.345	-	
	断面積	A	974	mm^2	
	断面2次モーメント	I	1.1711×10^4	mm^4	
	比重	G_p	2.66	-	

表-2 実験結果の数値解析ケース

ケース	地盤の減衰	栈橋の減衰	地震波	地盤のせん断剛性	備考
E1	20.0%	2.0%	神戸波	4900kN/m^2	減衰の影響
E2		4.0%			
E3	10.0%	2.0%			
E4	20.0%	2.0%	八戸波		地震波種類の影響
E5			大船渡波		

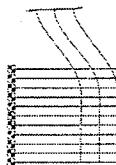


a) 1次(地盤 21Hz)

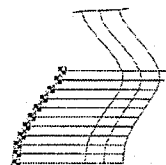


b) 2次(34Hz)

図-3 固有振動モード図 (斜杭式栈橋)



a) 1次(5.5Hz)



b) 2次(地盤 21Hz)

図-4 固有振動モード図 (直杭式栈橋)

は約 21Hz であった。自由振動実験の結果は、斜杭式栈橋 34Hz 、直杭式栈橋 7Hz であり、数値解析結果と大略一致している。また、地盤なしの条件における斜杭式栈橋の固有振動数は 31Hz であり、杭の周面摩擦の効果により、固有振動数が地盤なしの状態より1割程度上昇していることが認められた。これは、斜杭式栈橋は構造物に作用する水平荷重を主に杭軸力に負担する構造であるため、表層地盤が液状化したような場合でも本モデルでは固有振動数が1割程度しか低下しないことを示している。

4.2 時刻歴波形

斜杭式栈橋の上部工加速度と地表面変位について解析結果と実験結果(50Hz 以上カット)を比較する。一例として、神戸波を入力したときの時刻歴応答波形を図-5に

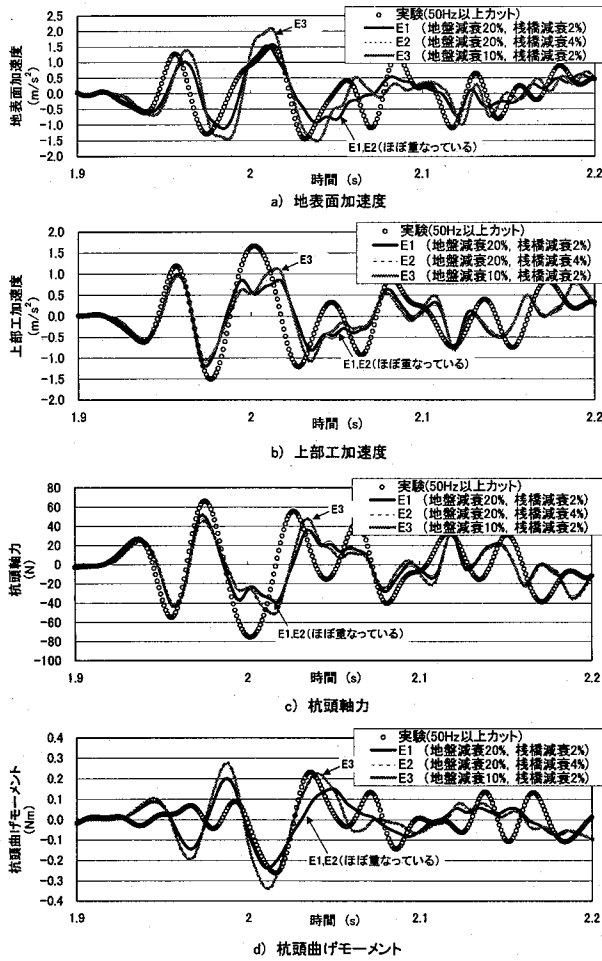


図-5 減衰定数の違いによる比較（神戸波加振）

示す。いずれもピーク値および位相において必ずしも十分に再現できているとはいえないが、最大値に注目した場合、減衰定数の変化による差はそれほど大きくない。そこで、地盤の減衰を20%、栈橋の減衰を2%としたときを代表として、以下の計算ではこの減衰定数を用いることにする。

4.3 杭頭断面力と加速度・変位の相関

杭頭軸力および杭頭曲げモーメントに対する上部工応答および地盤応答の相関について検討する。

図-6および図-7は、八戸波加振時の杭頭断面力と上部工および地盤応答の相関図であり、解析と実験結果(50Hz以上カット)を比較している。実験は○、解析は実線である。変位は、入力位置(杭先端)との相対変位を示している。実験と同様に杭頭軸力と上部工加速度には高い相関があること、また、杭頭曲げモーメントと地表面変位にも比較的高い相関があることが分かる。これに対して、軸力と地表面変位および、杭頭曲げモーメントと上部工加速度には、顕著な相関は見られなかった。この結果より、杭軸力は主に上部工の慣性力に支配され、杭の曲げモーメントは主に地表面変形に支配されていることが分かる。

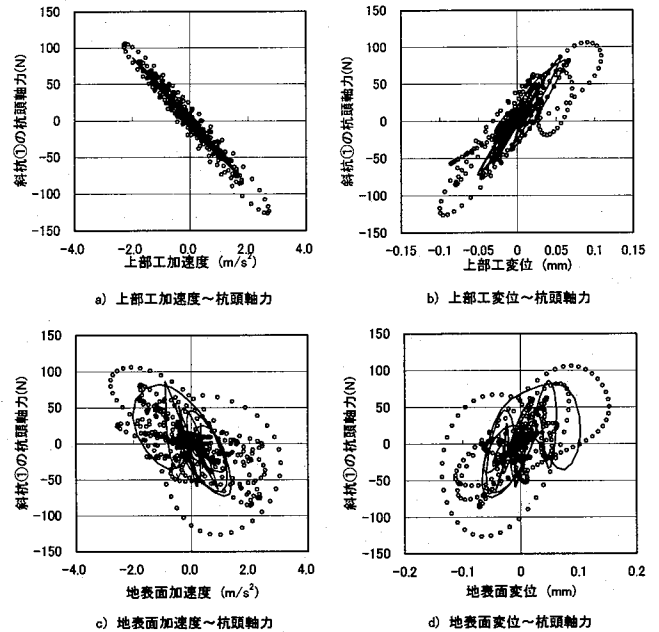


図-6 杭頭軸力～上部工および地盤応答の相関(八戸波)

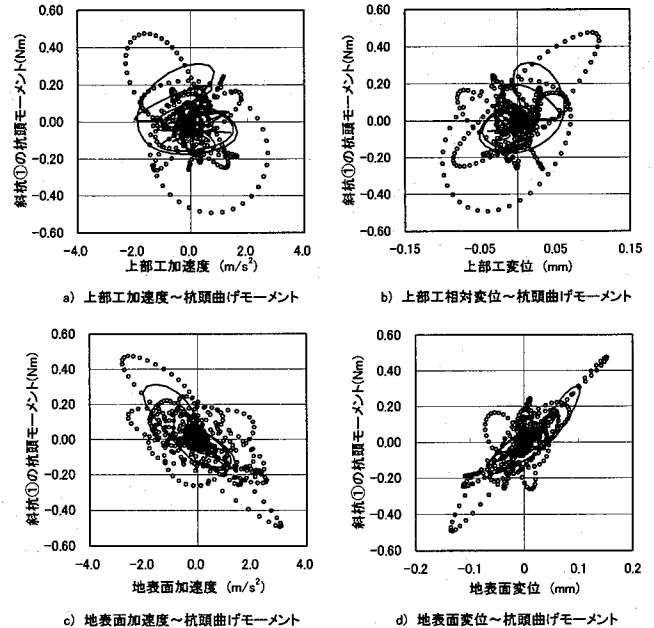


図-7 杭頭曲げモーメント～上部工および地盤応答の相関（八戸波）

5. 栈橋の構造諸元が振動特性に与える影響

5.1 解析ケース

本章では、3.1で示した解析モデルを用い、動的解析による構造諸元の影響を考察した結果について示す。解析ケースは表-3に示すとおりである。ケースD1は杭の傾斜角の影響について検討したものであり、ケースD2～D7は、傾斜角25～0度の栈橋について上部工の質量を変化させて栈橋の固有周期を変化させ、加速度応答スペクトルを計算したものである。また、地盤震動の影響をみるために、地盤が基盤と同様の挙動をするようにした場

表-3 構造緒元の影響に関する数値解析

ケース	傾斜角	杭-地盤 反力ばね	杭-地盤 摩擦ばね	地盤の せん断剛性	上部工質量	備考
D1	0~25	剛性1倍		1倍	1倍	斜杭傾斜角の比較
D2	25	1倍		1倍	1/20~50倍	加速度応答スペクトル の比較
D3	20	1倍		1倍	1/29~34倍	
D4	15	1倍		1倍	1/49~20倍	
D5	10	1倍		1倍	1/101~10倍	
D6	5	1倍		1倍	1/309~3倍	
D7	0	1倍		1倍	1/1005~1/75倍	
D8	25	1倍		無限大	1倍	地盤動かず
D9	25	なし		なし	1倍	枕梁のみ
D10	25	1倍		1倍	0倍*	上部工慣性力なし
D11	25	1倍	なし	1倍	1倍	杭周面摩擦なし
D12	25	1倍		0.25倍	1/20~50倍	地盤の固有周期2倍
D13	25	1倍		4倍	1/20~50倍	地盤の固有周期1/2倍
D14	25	1倍		25倍	1/20~50倍	地盤の固有周期1/5倍

*上部工の質量なし

合をケース D8, 地盤がないものとした場合をケース D9 とし, 実験結果をシミュレートした通常の地盤が存在する場合(表-2 のケース E1) と比較する。また, 地盤変位が杭の断面力に及ぼす影響をみるために, 上部工の質量を 0 とすることで上部工の慣性力がない場合(ケース D10), 杭周面摩擦の影響をみるために, 杭の軸方向ばね定数をなしとした場合(ケース D11)についても解析した。解析で用いる地震波は, 振動台で計測された神戸波の高振動数成分(50Hz 以上)をカットしたものである。

5.2 杭の傾斜角の影響

上部工の応答加速度に及ぼす杭の傾斜角の影響(ケース D1)を図-8に示す。傾斜角が10度の時, 上部工の応答加速度が最も大きくなっている。これは, 傾斜角10度の斜杭式栈橋の固有周期は, 実規模換算で $1/15.33\text{Hz} \times 21.35$ (時間縮尺比) $=1.39\text{s}$ であり, 地震波の卓越周期(実規模換算1.94s)に近かったためと考えられる。直杭式栈橋や傾斜角の小さい斜杭式栈橋では長周期の構造物になり, 変位は大きくなるものの加速度は小さくなる。また, 傾斜角が大きい場合も固有周期が短いため, 応答加速度が小さくなっている。

図-9に杭の傾斜角による杭頭軸力を示す。傾斜角10度で杭頭軸力が最も大きくなっており, 図-8の上部工の加速度とよく対応し, 杭軸力が主に上部工の慣性力に支配されていることをこの結果でも示している。

図-10に杭の傾斜角による杭頭曲げモーメントを示す。傾斜角15度までは杭の傾斜角の増大とともに杭頭曲げモーメントは急激に減少し, 傾斜角15度以上では, ほぼ一定の値を示している。このことから, 傾斜角15度以上の斜杭に関しては, 杭頭曲げモーメントは上部工の応答によらないと考えられる。これは, 地盤変形が傾斜角によらず一定であるために, 傾斜角15度以上で, 地盤変形により支配された杭頭曲げモーメントが作用しているものと推察される。

次に, 図-11にケース D2~D7より得られた杭の傾斜

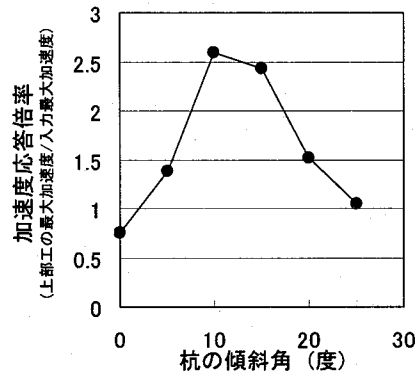


図-8 杭の傾斜角による上部工の加速度応答倍率

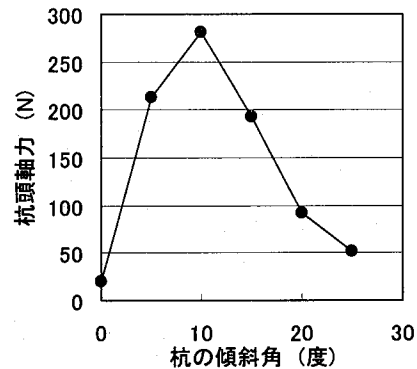


図-9 杭の傾斜角による杭頭軸力

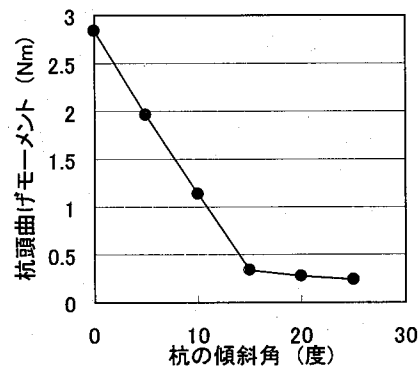


図-10 杭の傾斜角による杭頭曲げモーメント

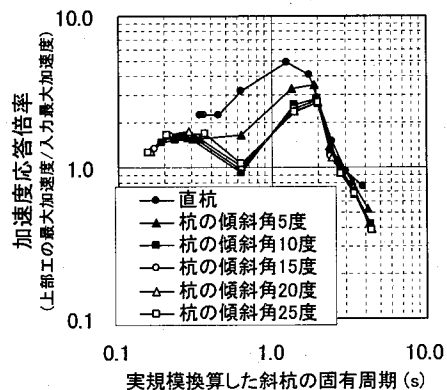


図-11 杭の傾斜角による上部工の加速度応答スペクトル(神戸波)

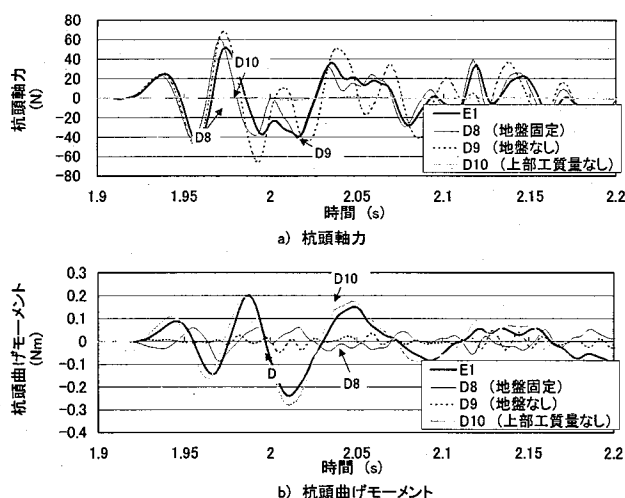


図-12 杭断面力に及ぼす上部工の慣性力および地盤の影響

角による入力（杭先端の加速度）に対する上部工の加速度応答スペクトルを示す。横軸の栈橋の固有周期は、上部工の質量を変化させることにより調整しており、実規模換算(21.35 倍)して示している。傾斜角 0 度および 5 度では、杭の傾斜角の影響は生じているものの、傾斜角 10 度以上の上部工の応答スペクトルは、ほぼ同様の傾向となっている。6.1 で詳しく考察するが、直杭式栈橋は地表面加速度が卓越する 1.0s 付近(地盤の固有振動数 21Hz より $1/21 \times 21.35$ 倍=1.02s)で応答が大きくなるが、傾斜角 10 度以上の斜杭式栈橋は杭先端付近の入力波の卓越周期の影響を受けている。これは、同じ固有周期をもった栈橋でも傾斜角 0 度(直杭)～10 度(斜杭)では地震動の建物へのエネルギーの入力ポイント(以下、コントロールポイントと称する)が異なり、15 度以上ではコントロールポイントが同じ深さであるものと推察される。

5.3 地盤震動の影響

上部工の応答や杭の断面力に及ぼす地盤震動の影響を明確にするため、実際には起こらない条件であるが、以下に列挙する個々の要素について検討する。

- 1) 地盤が動かない場合に相当するように地盤のせん断剛性を無限大として地盤変位=支持層変位とした場合(ケース D8)。これにより、上部工の慣性力による影響のみを取り出すことができる。
- 2) 斜杭式栈橋のみでの応答に相当するように地盤を取り除いた場合(ケース D9)。
- 3) 栈橋の慣性力がない場合に相当するように上部工および杭の質量を 0 とした場合(ケース D10)。これにより、地盤の応答の影響成分のみを取り出すことができる。

以上のケースを通常の場合(ケース E1)も含め、比較したものを図-12 に示す。地盤なしの場合や地盤固定の場合、杭頭曲げモーメントがかなり小さくなっており、

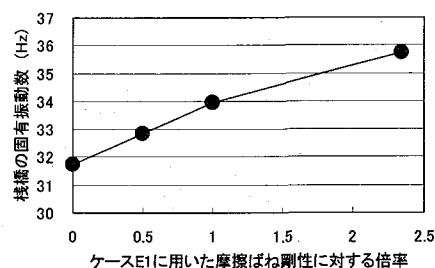


図-13 杭と地盤の周面摩擦による栈橋の固有振動数

地盤震動の影響による杭頭の曲げモーメント成分が大きいたことが類推できる。また、杭頭軸力は、上部工質量なしの場合のみ小さくなっており、上部工の慣性力による軸力成分が大きいたがこの結果からも類推できる。

5.4 杭周面摩擦の影響

杭周面摩擦の影響を検討するため、杭軸方向のばねがない条件で動的解析を行った(ケース D11)。図-13 は、杭の周面摩擦を種々に変化させた場合の結果であり、杭周面摩擦の大きさとともに固有振動数が高くなる状況が読みとれる。

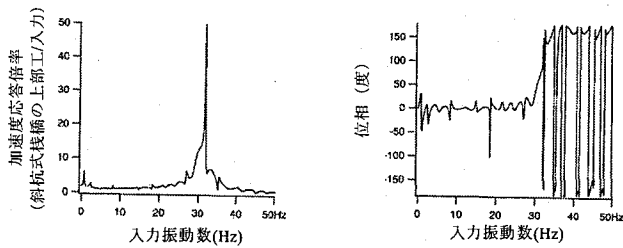
また、図-15、図-16 に摩擦ばねなし(ケース D11)、摩擦ばねあり(ケース E1)の周波数応答倍率および位相特性を示す。摩擦ばねありの場合は、摩擦ばねなしの場合に比べ、地盤の固有周期(20Hz 近傍)でもわずかに応答(応答倍率 2～3)しており、位相特性も 20Hz～30Hz で位相が 50 度程度になっており摩擦ばねなし(ケース D11)と状況は異なる。これについては 6.2 で詳しく検討する。

6. 斜杭式栈橋の加速度応答スペクトル

5.2 では、上部工質量を調整することで固有周期を変化させ、上部工の加速度応答スペクトルを梁ばねモデル解析により求めた。ここでは、1 質点系モデルおよび 2 質点系モデルを用いて、加速度応答スペクトルを求め、先の梁ばねモデルでの解析結果と比較し、斜杭式栈橋の応答を推定する。

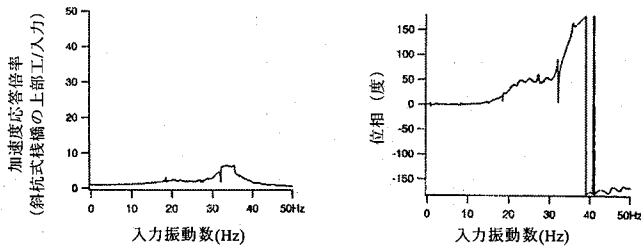
6.1 1 質点系モデルによる応答スペクトル

直杭式栈橋と斜杭式栈橋の入力位置(コントロールポイント)を推定するため、1 質点系モデルを用いて加速度応答スペクトルを求める。梁ばねモデル解析における杭の傾斜角 0 度(直杭)と 25 度(斜杭)の加速度応答スペクトル(図-11)(地盤 20%減衰、栈橋 2%減衰)、模型振動実験結果、ならびに入力基盤波(2%減衰)、地表面波(6%減衰)を用いた 1 質点系加速度応答スペクトルを重ねて図-16 に示す。1 質点系加速度応答スペクトルで用いる減衰は、地盤の減衰と栈橋の減衰とその相互作用に



a) 周波数応答倍率 b) 位相特性

図-14 周波数応答倍率および位相特性
(摩擦ばねなし (ケース D11))



a) 周波数応答倍率 b) 位相特性

図-15 周波数応答倍率および位相特性
(摩擦ばねあり (ケース E1))

よって生じる応答に対して等価な減衰を設定する必要があるが、ここでは解析結果との定性的な傾向を比較することに主眼をおいたため、解析結果と比較して妥当と考える減衰定数を採用している。すなわち、地表面波を用いる場合は、地盤震動の影響を含んでおり、通常、応答が基盤より大きくなるので、ここでは大きめの減衰（通常の構造減衰の3倍として6%）を採用し、基盤波を用いる場合は、基盤から直接杭に入力されるであろうから、杭の減衰（2%）を採用している。

図-16の縦軸は、上部工の最大応答加速度／入力基盤波（杭先端位置の波形）の最大加速度であり、横軸は、実規模換算した杭橋の固有周期である。

斜杭式杭橋の場合、梁ばねモデル解析結果は、固有周期0.4s以下では地表面波を用いた加速度応答スペクトルと近い応答値を示しているが、固有周期0.6s付近で応答が小さくなる点などは、入力基盤波を用いた加速度応答スペクトルとよく似た傾向を示しており、地表面のみならず基盤からの入力の影響も大きいものといえる。一方、直杭式杭橋の場合、地表面加速度波形を用いた加速度応答スペクトルの方が、基盤波から算定したものよりも梁ばねモデル解析値と良く一致しており、地表面震動の影響の方が大きいと考えられる。

入力基盤波を用いた1質点系加速度応答スペクトルは、梁ばねモデル解析結果と比較して、杭橋の固有周期 T_g が0.6s付近で応答が小さくなる点などの傾向は似通っているものの、1秒以下では応答倍率が大きくなっている。そこで、地盤の固有周期 T_g を変化させた梁ばねモデル解析（ケースD12～D14）を実施し、その結果を図-17に示す。地盤の固有周期 T_g が0.2秒（せん断波速度約490m/s

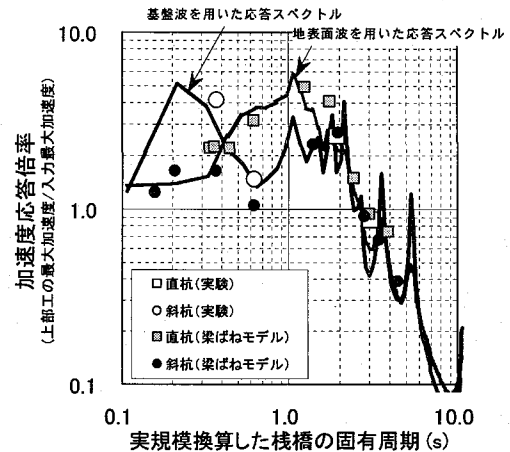


図-16 1質点加速度応答スペクトルと
梁ばねモデルの比較（神戸波）

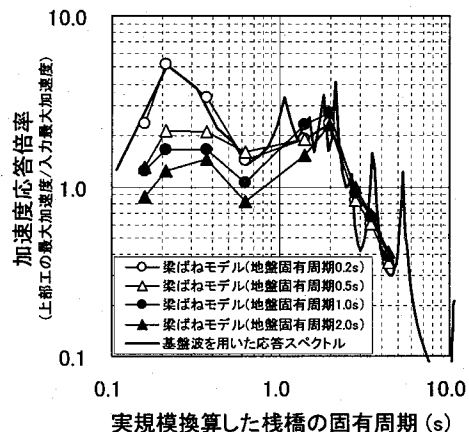


図-17 地盤の固有周期による
1質点モデルの適応性

に相当)の時は、ほぼ基盤波からの1質点系加速度応答スペクトルと一致するものの地盤の固有周期が長くなる($T_g > T_s$)ほど、低周期の斜杭式杭橋で、1質点系加速度応答スペクトルとのずれが生じてくる。この要因は、 T_g が大きくなると、地表面付近の地盤震動が大きくなり、入力基盤波のみを用いた応答スペクトルでは地盤震動の影響を考慮できていないためと考えられる。

同様の目的で、FEM解析と1質点応答解析を比較した解析的検討¹⁸⁾では、 $T_s > T_g$ の時、地表面付近(1/β下、βは杭の特性長)の波を用いた場合にFEM解析結果と良く一致し、 $T_g > T_s$ の時、杭先端の入力基盤波を用いた方がFEM解析結果と対応が良かったという1例を挙げている。その要因として $T_s > T_g$ 時には地表面付近の増幅した地盤震動の影響を挙げている。

以上の結果を総合すると、 T_s と T_g の大小関係のみならず、入力地震波の周波数特性により増幅される地盤変形の大きさも1質点系モデルで上部工の応答を推定するためのコントロールポイントに影響を及ぼすものと考えられる。耐震設計においては、精度良く上部工の応答加速度を推定することが大切ではあるが、安全側の評価が出

来れば良いとの考え方もある。その場合、直杭式栈橋と同様に応答が増幅されやすい地表面付近をコントロールポイントとして応答スペクトルを求めることで対応可能と判断できる。

6.2 2質点3ばねモデルによる応答スペクトル

斜杭式栈橋は地表面付近の地震波を用いた応答スペクトルで安全側の応答値を示す場合が多いが、基盤からの入力成分の影響も大きく、正確にはコントロールポイントを1点に定めるのは困難である。

ここでは、図-18に示すような建物や重力式岸壁に対して振動特性を十分表現できることを示されている2質点3ばねモデル^{19),20),21),22)}を栈橋に対して用い、地盤震動の影響を考慮した栈橋の振動性状を表現することを試みる。

f_s を地盤の無い場合の栈橋の固有振動数、 f_g を地盤の固有振動数とし、地盤と栈橋間のばね k_i は、地盤と杭の周面摩擦などの表層地盤と杭間の相互作用ばねとする。この場合、栈橋の固有振動数は、 $f_s' = f_s \sqrt{(1+k_i/k_s)}$ となり、杭と表層地盤間のばねの影響で高くなる性質をもつ。振動実験では、斜杭式栈橋の固有振動数が、地盤が無い場合31Hzであり、地盤作製後34Hzであった。梁ばねモデル解析でも同様の傾向を杭軸方向ばねにより表現しており、図-13に示した結果となっている。2質点3ばねモデルでは、 $k_i/k_s = 0.2$ とすることにより、 $f_s = 31\text{Hz}$ に対して $f_s' = 34\text{Hz}$ となる。

m_s : 上部工の質量

m_g : 地盤の質量

k_s : 栈橋の水平ばね

k_i : 地盤と栈橋の相互作用ばね

k_g : 地盤のせん断ばね

c_s : 栈橋の減衰係数

c_i : 相互作用ばねの減衰係数

c_g : 地盤の減衰係数

$$f_s = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_s}{m_s}} \quad (3), \quad f_g = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_g}{m_g}} \quad (4)$$

図-19は、2質点3ばね系の伝達関数である。地盤の固有周期近傍でも栈橋の応答は増幅しており、解析で示した応答(図-15)と同様の傾向を示している。

図-20に2質点3ばねモデルでの加速度応答スペクトルと1質点系の加速度応答スペクトルおよび梁ばねモデルでの解析結果を示す。用いた地震波は、模型振動実験で用いた神戸波であり、地盤の減衰は20%、栈橋の減衰は2%として計算している。ここで設定した減衰定数は、梁ばねモデル解析で採用したものと同一とし、栈橋の減衰は、基盤波が直接杭に入力されることに対応させている。

1質点モデルと2質点3ばねモデルの差異は、栈橋の

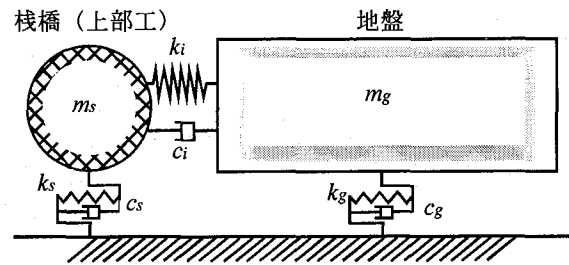


図-18 2質点3ばねモデル

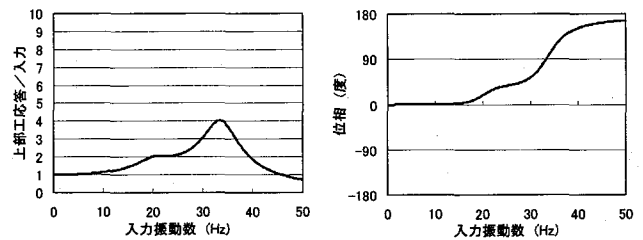
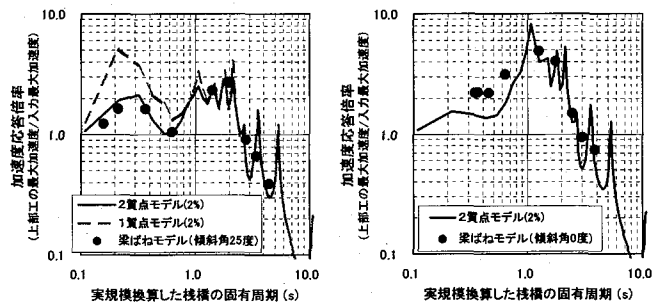


図-19 2質点3ばねモデルでの上部工の伝達関数



a) 斜杭式栈橋

b) 直杭式栈橋

図-20 解析モデルによる上部工の加速度応答スペクトルの比較（神戸波）

固有周期が1秒程度以下の領域で見られ、2質点3ばねモデルの方が、1質点モデルより梁ばねモデルでの解析結果とよく似た傾向を示し、地盤の影響をより適切に考慮した応答スペクトルが得られている。直杭式栈橋の加速度応答スペクトルも同2質点3ばねモデルを用いて計算できる(図-20b))。

図-21は、図-17に示した地盤の固有周期を変えた梁ばねモデル解析結果に対し、2質点3ばねモデルを用いて計算した結果と比較したものである。2質点3ばねモデルは、極めてよく梁ばねモデル解析結果を表現できていることから、2質点3ばねモデルは地盤震動の影響を考慮した上部工の応答を表現できると言える。

7. 上部工慣性力と地盤の位相特性

上部工の慣性力と地盤変位には位相差があり、設計に応答変位法を導入する際にその影響を考慮することが望ましい。この章では、梁ばねモデルおよび6.2で提案した2質点3ばねモデルにより、上部工と地盤の位相差に及ぼす地震波周期、栈橋の固有周期および地盤の固有周

期の関係が求められるので、以下にその一例を示す。

図-22 に上部工の慣性力が最小時の地盤変位 δ の最大地盤変位 $\delta_{\max}$ に対する比を示す。また、図-23 は、上部工の慣性力が最大時の地盤変位 δ の最小地盤変位 $\delta_{\min}$ に対する比である。横軸は、栈橋の固有周期 T_s と地盤の固有周期 T_g の比である。

$\delta/\delta_{\max}$ あるいは $\delta/\delta_{\min}$ が正の場合は同位相、負の場合は逆位相となる。0 の場合は、上部工と地盤の位相が 90 度ずれていることを示している。杭の傾斜角によらず、 $\delta/\delta_{\max}$ あるいは $\delta/\delta_{\min}$ は、ほぼ同様の傾向を示しており、栈橋の固有周期が地盤の固有周期の 2 倍以上 ($T_s/T_g \geq 2$) の場合、上部工と地盤は、逆位相になっている。

地盤変位を考慮した設計を行う必要がある場合、上部工の慣性力が最大となる時の地盤変位量をどの程度と考えて応答変位法を行うかは重要な問題である。自由地盤の最大変位量は一次元の重複反射理論による解析で求めることができ、その何割の変位量を杭に外力として作用させるべきかにこの結果を用いることができる。

8. 結論

斜杭式栈橋の動的解析により、杭の傾斜角や地盤震動の影響を検討し、上部工の応答を算定する方法について述べた。得られた主な知見は、以下のとおりである。

- 1) 斜杭式栈橋の杭頭部の曲げモーメントには、上部工の慣性力よりも、地盤変位が大きな影響を与える。そのため、杭の傾斜角を変化させると、上部工の加速度応答や、斜杭に発生する軸力は変化するものの、傾斜角 15 度^{注)}以上では、杭頭曲げモーメントは、傾斜角を変えても地盤変位が変化しないのであまり変化しない。
- 2) 地表面変位と杭頭曲げモーメントは、極めて高い相関が見られるが、杭頭軸力に対しては、主に上部工の慣性力と相関が高く、地盤変位は比較的影響しない。
- 3) 1 質点系モデルで上部工の応答加速度を推定するには、杭先端の入力波か地表面付近の応答波を用いることによりある程度可能であるが、どちらの波を用いた方が高精度であるかは、栈橋や地盤の固有周期や入力波の特性により異なる。設計時には、安全側の結果が得やすい地表面付近をコントロールポイントとすることにより対応できる。
- 4) 地盤もモデル化した 2 質点 3 ばねモデルにより、上部工の応答加速度が精度よく推定でき、2 質点 3 ばねモデルで上部工慣性力と地盤変位の位相差を求めることができる。

注) ここで示した杭の傾斜角は、杭の剛性や地盤と栈橋の固有周期の関係によっても変化する数値であると

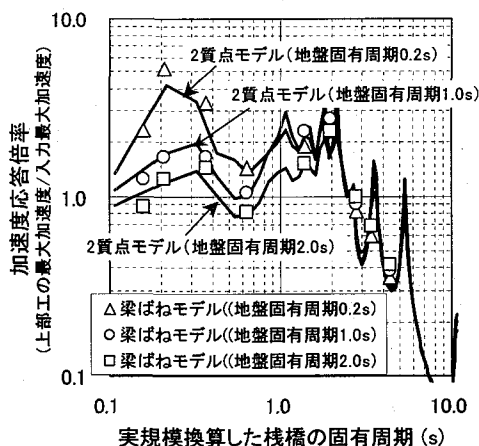


図-21 2 質点 3 ばねモデルによる
加速度応答スペクトル

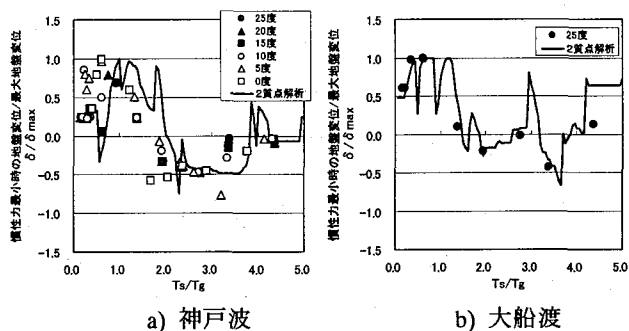


図-22 栈橋の固有周期/地盤の固有周期
～地盤変位 (上部工の慣性力最小時)

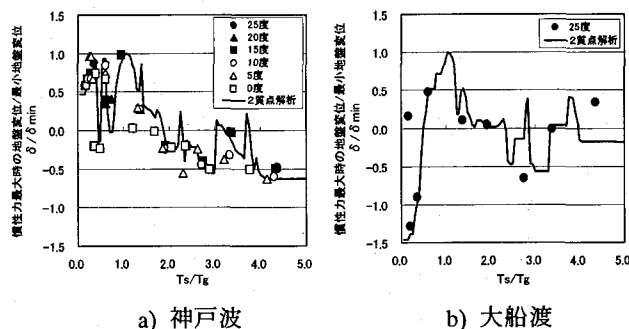


図-23 栈橋の固有周期/地盤の固有周期
～地盤変位 (上部工の慣性力最大時)

考えられるが、ここで検討対象とした斜杭式栈橋は、耐震補強された一般的な栈橋であり、一応の目安となる。

謝辞: 斜杭式栈橋の振動解析に関して、鳥取大学上田茂教授、港湾空港技術研究所基礎工研究室菊池喜昭室長、同構造振動研究室菅野高弘室長、東電設計(株)樋口豊久氏、杉澤政敏氏、鋼管杭協会金井文男氏、川端規之氏、麻生川学氏、竹中土木津國正一氏に助言を頂きました。ここに、謝意を表します。

参考文献

- 1) 横田弘, 竹鼻直人, 南兼一郎, 川端規之: 鋼管杭式横
 棧橋の耐震設計法に関する考察, 構造工学論文集,
 Vol.44A, pp.1613-1622, 1998.3.
- 2) 横田弘, 川崎進, 菅原亮, Hazem El-Bakry, 川端規之:
 鋼直杭式棧橋の地震時保有耐力に関する実験および
 解析, 港湾技術研究報告, 第 38 巻第 2 号, pp.223-255,
 1999.6.
- 3) 竹鼻直人, 横田弘, 宮田正史, 菅野高弘: 横棧橋の地
 震時挙動に関する模型振動実験, 土木学会第 53 回
 年次学術講演会講演梗概集, I-B-265, pp.530-531, 1998.
- 4) 日本港湾協会: 港湾の施設の技術上の基準・同解説,
 1999.4.
- 5) 土木学会耐震基準等基本問題検討会議: 土木構造物の
 耐震基準等に関する提言, 土木学会誌, Vol.80, No.8,
 1995.7.
- 6) 濱田純次, 菅野高弘, 上部達生, 上田茂, 横田弘: 斜
 杭式棧橋の地震時挙動に関する模型振動実験, 土木学
 会論文集, No.682/I-56, pp.101-113, 2001.7.
- 7) 横田弘, 濱田純次, 大熊弘行, 麻生川学, 佐藤博: 斜
 め組杭式棧橋の地震応答特性と耐震性能照査, 構造工
 学論文集, Vol.48A, pp.479-488, 2002.3.
- 8) 横田弘, 濱田純次, 大熊弘行, 杉澤政敏, 芥川博昭,
 津國正一, 佐藤博: 斜め組杭式棧橋の地震時挙動に
 関する数値解析と耐震性能照査法の提案, 港湾空港技術
 研究所報告, 第 42 巻, 第 2 号, pp.87-132, 2003.6.
- 9) 横田弘, 岩波光保, 築地健太郎, 井上譲: 斜め組杭式
 棧橋の破壊過程に関する実験および解析, 港湾空港技
 術研究所資料, No.1049, p.24, 2003.6.
- 10) 大平彰, 田蔵隆, 若原敏祐, 小坪清真, 高西照彦:
 斜杭を有する杭基礎の地震応答, 九州大学工学集報,
 第 59 巻, 第 2 号, pp.133-140, 1986.
- 11) 麻生稔彦, 成富勝, 烏野清, 小坪清真: 斜杭を有す
 る棧橋-地盤系の振動特性, 土木学会年次学術講演会
 講演概要集, 第 I 部, Vol.42, pp.840-841, 1987.
- 12) 上田茂, 河原林英彰, 濱田純次, 山田弘道, 西中川
 剛: 斜杭式人工島の耐震解析, 土木学会第 51 回年次
 学術講演会講演概要集, I-B-326, pp.652-653, 1996.
- 13) 勝見雅: 地盤の非線形的性質を考慮した組杭の水平
 抵抗に関する一解法, 土木学会論文集, 第 229 号,
 pp.87-97, 1974.
- 14) 野田文久, 中村光宏, 伊藤利昭, 黒田輝夫: 斜め組
 杭に関する一構造計算法, 土と基礎, Vol.35, No.8,
 pp.31-36, 1987.
- 15) 大石善啓, 大川賢紀, 岡部俊三, 亀井宏之, 木村亮:
 ジャケット型鋼管杭基礎の支持力特性-斜杭の水平
 支持力-, 第 33 回地盤工学研究発表会発表講演集,
 pp.1497-1498, 1998.
- 16) 運輸省鉄道局, 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等
 設計標準・同解説, 基礎構造物・抗土圧構造物,
 pp.208-210, 1997.
- 17) 日本エムエスシー(株): MSC/NASTRAN ユーザーズガ
 イド基礎動解析(V68), 1996.
- 18) 濱田純次, 横田弘, 大熊弘行, 杉澤政敏, 津國正一,
 佐藤博, 麻生川学: 簡易質点解析における斜め組杭式
 棧橋の地震時挙動と耐震性能照査法の提案, 第 6 回地
 震時保有耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関
 するシンポジウム講演論文集, pp.249-256, 2003.1.
- 19) 徐挺, 杉村義広: 単純化モデルによる地盤と構造物
 の地震時動的相互作用のメカニズムに関する基礎的
 研究, 構造工学論文集, Vol.43B, pp.433-440, 1997.3.
- 20) 風間基樹: 土圧を受ける重力式港湾構造物の地震時
 安定性に関する研究, 港湾技研資料, No.752, 1993.6.
- 21) 小濱英司, 三浦均也, 岡宣克, 笹島隆彦, 大塚夏彦:
 重力式岸壁の地震時挙動の振動台実験, 第 31 回地盤
 工学研究発表会, pp.1199-1200, 1996.
- 22) 濱田純次, 宮田正史, 菅野高弘: ケーソン式岸壁の
 入力地震力による動的特性とそのメカニズムの一考
 察, 構造工学論文集, Vol.44A, pp.611-620, 1998.3.

(2005 年 9 月 10 日)