

平成 25 年度（一財）港湾空港総合技術センター 研究開発助成報告書

助成番号 ：平成 27 年 1 月 27 日付 第 13－3 号

研究開発項目：（指定②）港湾，海岸及び空港における大規模災害発生後の対応に関するもの

栈橋の地震被災後の 供用可能性判定手法の開発

平成 27 年 4 月 30 日

神戸大学 都市安全研究センター

長尾 毅

目 次

1. はじめに	1
2. 栈橋の固有周期の評価法	
(1) 対象栈橋	1
(2) 入力地震動	4
3. 栈橋の固有周期の評価法	6
4. 杭の損傷に伴う固有周期の変化	
(1) 解析結果	7
(2) 杭の損傷位置の影響	11
5. 残留変形量と杭の損傷度との関係	12
6. まとめ	13
参考文献	14

1. はじめに

大震災発生後には緊急支援物資の輸送が必要である。港湾の係留施設は緊急支援物資の輸送のために重要な拠点となるが、大地震の発生後には沿岸域の係留施設も被災している可能性が高い。係留施設のうち重力式の構造物は、主要な被災モードは変形であるため、大地震発生後には残留変形量等から供用の可能性を判定しやすいといえる。しかしながら、本研究で対象とする栈橋については杭の損傷度を速やかに判定することは容易ではない。

兵庫県南部地震発生時、神戸港で旅客輸送に使われていたT栈橋は、解体撤去後の調査で地中部などで杭の座屈が生じていたことが分かった¹⁾。仮に大規模な余震が生じていれば大災害が生じていた可能性があったといえる。栈橋の杭の被災後の健全性評価は綿密な現地調査を行う必要があるため、緊急支援物資の輸送が最も望まれる大震災発生直後に栈橋の被災程度を速やかに判定する方法の開発が望まれる。

栈橋は大地震発生による被災によって固有周期が長くなると想定されるが、既往の研究により、常時微動観測により栈橋の固有周期を推定することが可能と報告されている。例えば、長尾ら²⁾は横浜港及び川崎港の強震観測が実施されている栈橋を対象に、強震観測記録による栈橋の固有周期と常時微動観測をもとにした固有周期を比較した結果、栈橋と背後地盤の常時微動の水平方向スペクトル比 (H/H スペクトル) より、栈橋の固有周期を求めることが可能と報告している。 H/H スペクトルを用いるのは、栈橋と背後地盤の水平方向スペクトルの比をとることで、常時微動記録中に含まれる表面波等の影響をキャンセルすることが期待できるためである。また、大石ら³⁾はニューマチックケーソン式横栈橋をモデル化し、二次元有効応力解析結果と常時微動観測結果の比較を行い、常時微動の栈橋上と背後地盤の比 (H/H スペクトル) より求めた栈橋の固有周期が二次元有効応力解析結果とほぼ一致するという結果を得ている。

従って、大地震発生直後に栈橋の固有周期を常時微動観測により評価することで、栈橋の被災程度を推定できる可能性がある。以上の背景のもと、本研究では、大震災発生時の栈橋の固有周期の変化度から栈橋の被災程度を推定する方法について検討した。

2. 検討条件

(1) 対象栈橋

K港、N港における実際の建設事例をもとに解析モデルを設定した。図-1に各港の解析モデルを示す。K港は法線直角方向に杭3列、N港は4列の断面である。水平方向の解析範囲は栈橋上部工を中心とする200m程度の範囲で、鉛直方向はモデル下端に工学的基盤を設定している。

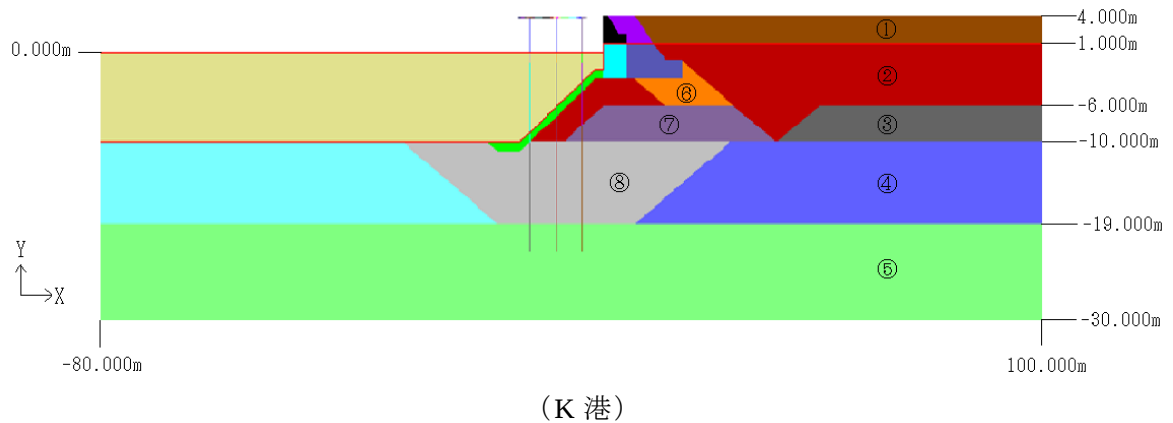
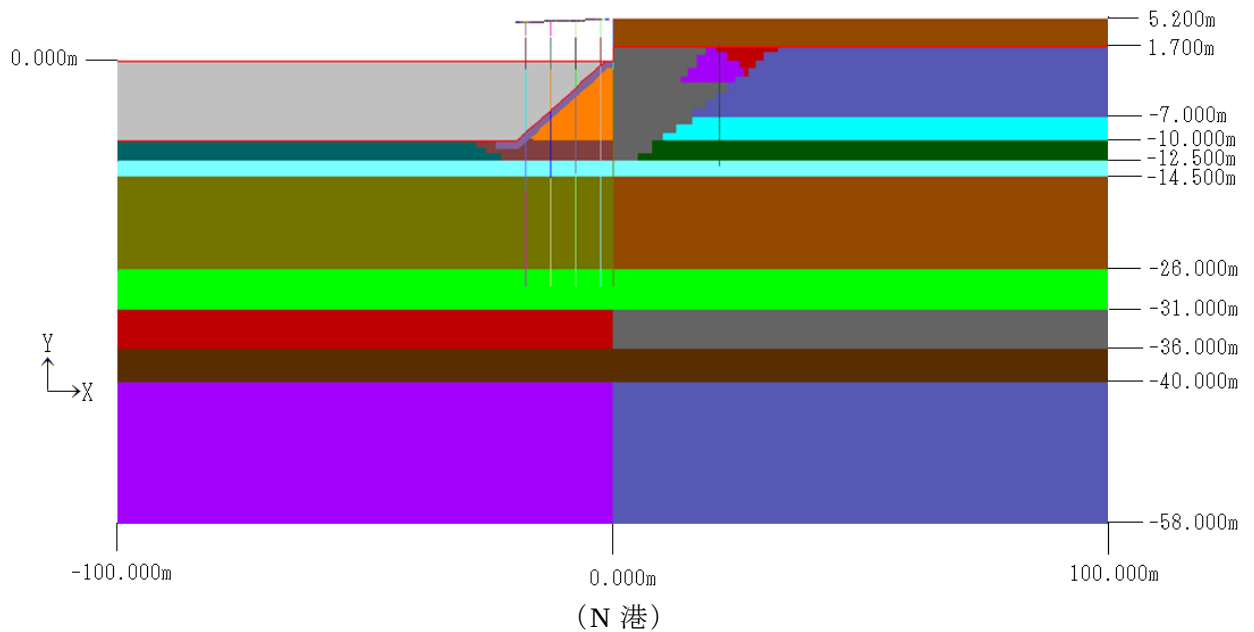


図-1 解析モデル

地盤条件は表-1 に示す通りである．地盤の変形が栈橋の被災程度に大きな影響を及ぼすことが想定されるため，様々な地盤変形のパターンが生じるように設定している，それぞれ **case1** は原地盤条件であり，K港の **case2** は原地盤における工学的基盤相当の⑤層のS波速度を減少させ，堆積層厚を厚くした．また，⑥～⑧層でS波速度を減少させるとともに，液状化パラメータを設定する層を増やすなど，**case1** よりも全体的に軟弱な地盤にした．**case3** は全体的にS波速度を増加させて地盤剛性を高めた．ただし，②層に液状化パラメータを設定することで，海底面より上の地盤の変形が大きくなるよう設定した．N港の **case2** は原地盤における工学的基盤相当のg，⑩層のS波速度を減少させ，堆積層厚を厚くした．**case3** は全体的にS波速度を増加させて地盤剛性を高め，液状化パラメータを③層のみに設定し，地中部での変形が小さくなるようにした．液状化パラメータについては，K港の **case1** は⑥，

⑦，⑧層，case2 は②，⑤，⑥，⑦，⑧層，case3 は②層に，N港のcase1 は③，⑤，b層に，case2 は③，⑥，c層に，case3 は③層に設定した．液状化パラメータは本研究で用いる解析コードFLIP⁴⁾における標準的な方法⁵⁾で設定している．例を(c)に示す．地盤の非線形特性はFLIP解析の標準として双曲線モデルを用いている．本研究では地盤条件のcase1～case3を簡単のためG1～G3 と呼ぶ．

表-1 地盤条件

(a)K 港

層名	層厚 H (m)	case1			case2			case3		
		密度 ρ (t/m ³)	内部摩擦角 ϕ (°)	S波速度 V_s (m/s)	密度 ρ (t/m ³)	内部摩擦角 ϕ (°)	S波速度 V_s (m/s)	密度 ρ (t/m ³)	内部摩擦角 ϕ (°)	S波速度 V_s (m/s)
①	3	1.45	30	43.5	1.45	30	43.5	1.84	38.4	120
②	7	1.45	30	67.9	1.84	37.5	54.3	1.84	28	120
③	4	1.45	30	89.8	1.45	30	96.4	1.84	38	150
④	9	1.45	30	96.6	1.45	30	102.1	1.84	37.8	150
⑤	11	2	44	382.2	1.84	37.5	131.1	1.84	39	250
⑥	3	1.84	41.2	162.7	1.84	38	130.2	1.84	38	162.7
⑦	4	1.84	41.2	175.1	1.84	38	140.1	1.84	38	175.1
⑧	9	1.84	41.2	163.8	1.84	38	131.1	1.84	39.4	200

(b)N 港

		case1					case2				case3			
		層名	層厚 H (m)	密度 ρ (t/m ³)	内部摩擦角 φ (°)	粘着力 c (kN/m ²)	S波速度 V_s (m/s)	密度 ρ (t/m ³)	内部摩擦角 φ (°)	粘着力 c (kN/m ²)	S波速度 V_s (m/s)	密度 ρ (t/m ³)	内部摩擦角 φ (°)	粘着力 c (kN/m ²)
陸側	①	3	1.84	37.7	0	88.6	1.84	37.7	0	88.6	1.84	38.4	0	120
	②	8.7	1.59	30	0	110.4	1.59	30	0	110.4	1.59	38.4	0	145
	③	3	2.04	38.4	0	138	2.04	38.4	0	138	2.04	39	0	190
	④	2.5	1.59	30	0	127.5	1.59	30	0	127.5	2.04	39.8	0	250
	⑤	2	2.04	38.4	0	148.3	2.04	38	0	148	2.04	39.6	0	250
	⑥	11.5	1.58	30	0	146.8	2.04	38	0	160	2.04	39.2	0	250
	⑦	5	2.04	40.5	0	262.9	2.04	38	0	180	2.04	38.9	0	250
	⑧	5	1.94	0	479.6	274.8	1.94	37.8	0	180	1.94	38.8	0	250
	⑨	4	2.04	40.5	0	267.4	2.04	37.8	0	180	2.04	38.8	0	250
	⑩	18	1.94	0	479.6	279.2	1.94	37.5	0	180	1.94	38.4	0	250
海側	a	2.5	1.59	0	17.1	249.3	1.59	0	17.1	249.3	2.04	39.8	0	135.4
	b	2	2.04	38.4	0	92.7	2.04	38	0	92.6	2.04	39.6	0	169
	c	11.5	1.58	0	9.4	108.1	2.04	38	0	127.9	2.04	39.2	0	203.1
	d	5	2.04	40.5	0	218.7	2.04	38	0	156.2	2.04	38.9	0	218.4
	e	5	1.94	0	479.6	289.8	1.94	37.8	0	160.1	1.94	38.8	0	223.3
	f	4	2.04	40.1	0	236.8	2.04	37.8	0	162.6	2.04	38.8	0	226.6
	g	18	1.94	0	479.6	289.9	1.94	37.5	0	166.6	1.94	38.4	0	231.8

(c)液状化パラメータ例 (N 港 case1)

	w_1	p_1	p_2	c_1	S_1
地盤 C	5	0.5	1.01	2.2	0.005
地盤 E	5	0.5	1.01	2.2	0.005
地盤②	5	0.5	1.01	2.2	0.005

表-2 杭剛性条件

(a)K 港

		case1			case2			case3		
		杭①	杭②	杭③	杭①	杭②	杭③	杭①	杭②	杭③
重防食 (水面上)部分	剛性 EI ($\text{kN}\cdot\text{m}^2$)	84490	84490	84490	52476	52476	52476	103463	103463	103463
	全塑性モーメント Mp ($\text{kN}\cdot\text{m}$)	2436.5	2436.5	2436.5	1500	1500	1500	3000	3000	3000
重防食 (水中)部分	剛性 EI ($\text{kN}\cdot\text{m}^2$)	84490	84490	84490	52476	52476	52476	103463	103463	103463
	全塑性モーメント Mp ($\text{kN}\cdot\text{m}$)	2436.5	2436.5	2436.5	1500	1500	1500	3000	3000	3000
水中部分	剛性 EI ($\text{kN}\cdot\text{m}^2$)	71060	71060	71060	52476	52476	52476	103463	103463	103463
	全塑性モーメント Mp ($\text{kN}\cdot\text{m}$)	2056.5	2056.5	2056.5	1500	1500	1500	3000	3000	3000
土中部分	剛性 EI ($\text{kN}\cdot\text{m}^2$)	83640	83640	83640	52476	52476	52476	103463	103463	103463
	全塑性モーメント Mp ($\text{kN}\cdot\text{m}$)	2412.5	2412.5	2412.5	1500	1500	1500	3000	3000	3000

(b)N 港

		case1				case2			
		杭①	杭②	杭③	杭④	杭①	杭②	杭③	杭④
重防食部分	剛性 EI ($\text{kN}\cdot\text{m}^2$)	101900	101900	126000	149500	40146	40146	40146	40146
	全塑性モーメント Mp ($\text{kN}\cdot\text{m}$)	1903.5	2552	3166	3771	1000	1000	1000	1000
水中部分	剛性 EI ($\text{kN}\cdot\text{m}^2$)	54060	54060	78140		40146	40146	40146	
	全塑性モーメント Mp ($\text{kN}\cdot\text{m}$)	1017	1363	1977.5		1000	1000	1000	
土中部分(上)	剛性 EI ($\text{kN}\cdot\text{m}^2$)	88680	88680	112700	136300	40146	40146	40146	40146
	全塑性モーメント Mp ($\text{kN}\cdot\text{m}$)	1659.5	2224.5	2838.5	3442.5	1000	1000	1000	1000
土中部分(下)	剛性 EI ($\text{kN}\cdot\text{m}^2$)	64040	64040	88680	112700	40146	40146	40146	40146
	全塑性モーメント Mp ($\text{kN}\cdot\text{m}$)	1194	1601	2224.5	2838.5	1000	1000	1000	1000

また、杭の剛性は表-2 に示すとおり設定した。case1 は原設計条件であり、case2, 3 は剛性を変化させたものである。杭剛性条件 case1~case3 を本研究では P1~P3 と呼ぶ。杭は海側から①, ②...と番号を付している。杭及び上部工は非線形はり要素でモデル化し、非線形特性は栈橋を対象とした FLIP 解析の標準モデル化としてそれぞれバイリニア、トリリニアモデルを用いている。上部工と杭の接合部には剛域を設定している。栈橋と土留めの境界条件については、一般的な栈橋と土留めがフリーな条件とした。なおこの解析では、地震動の作用により杭頭等に生じる微小なひび割れの影響等については考慮できない。また非排水条件の解析であり、地震後の排水挙動等も対象外である。

(2) 入力地震動

入力地震動は 1968 年十勝沖地震における八戸波(case1)を基本とし、卓越周波数を栈橋の固有周期(case2)及び土留めの固有周期(case3)に一致させた波形を用いた。地震波形の後続波として周波数特性がフラットなホワイトノイズを用い、後述するようにホワイトノイズ部分の応答より固有周期を求めている。case2, 3 の地震波は、八戸波の卓越周波数 0.4Hz がそれぞれの固有周期に一致するように、対数軸上でフーリエ振幅スペクトルを平行移動することで設定している。地震波 case1~case3 を本研究では S1~S3 と呼ぶ。入力加速度最大値は 100, 200~600Gal に設定した。図-2 に case1~case3 の時刻歴波形の例を示す。

また、図-3 に case1, case2 を例としてフーリエスペクトルの例を示す．卓越周波数が変化していることがわかる．

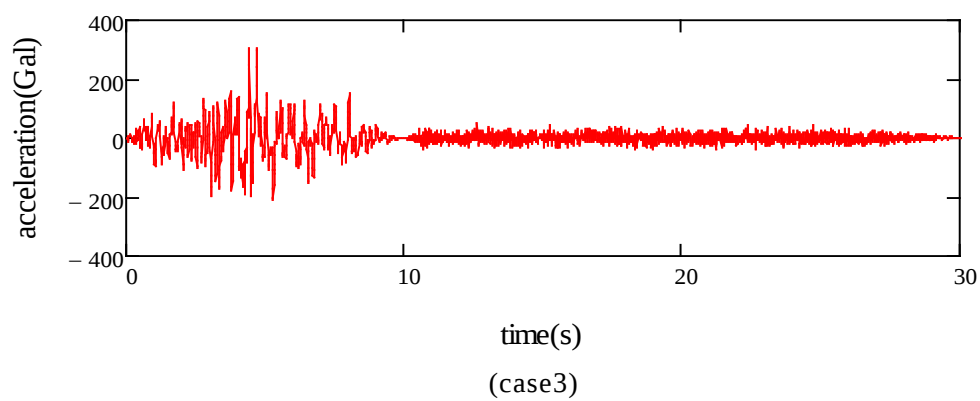
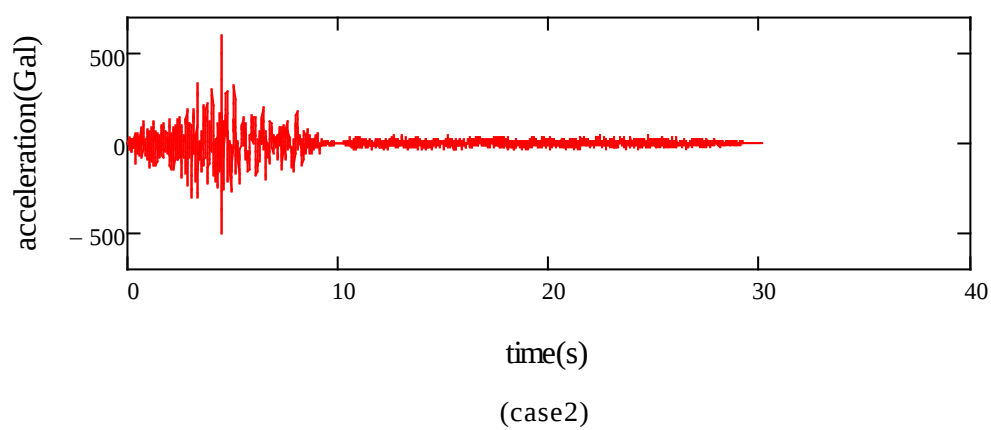
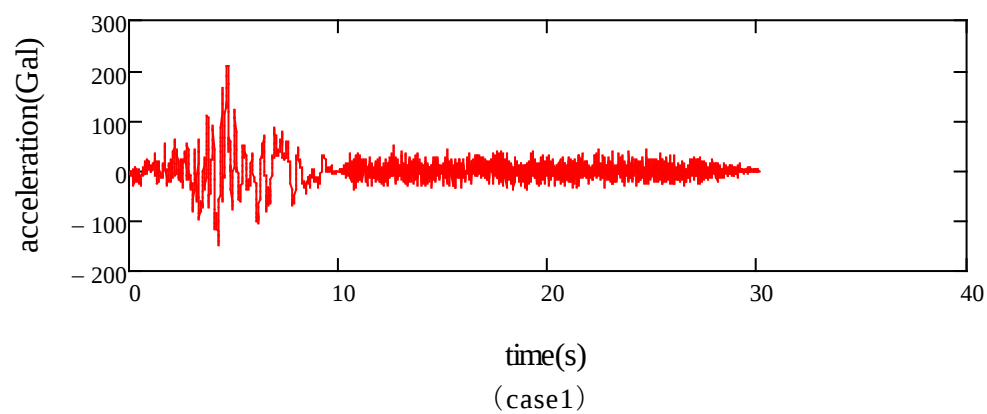
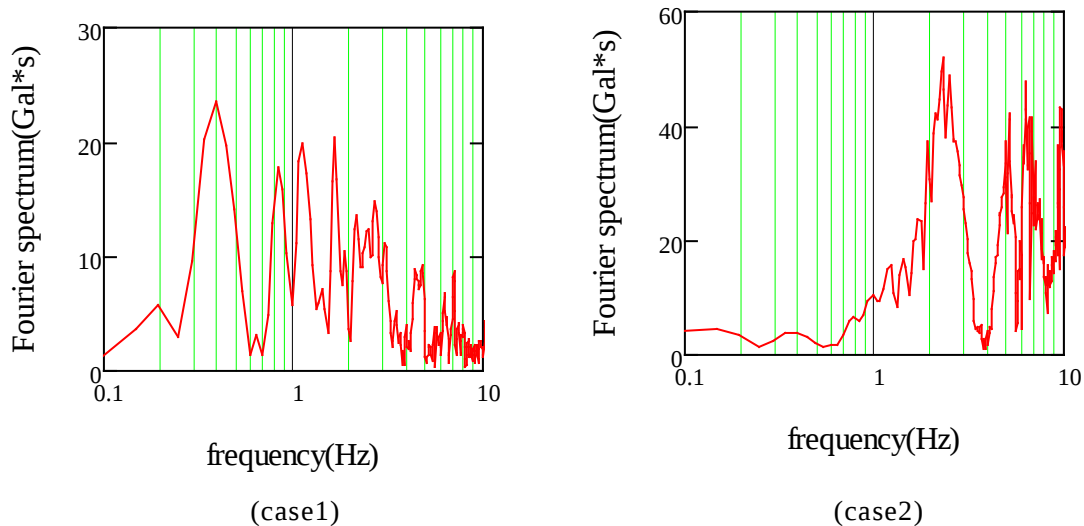


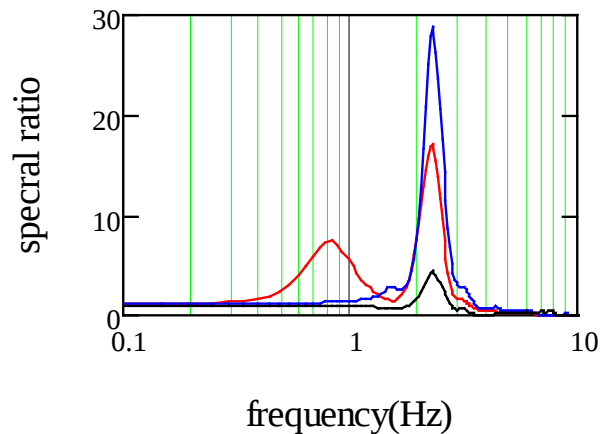
図-2 地震波形の例



図－3 フーリエスペクトルの例

3. 栈橋の固有周期の評価法

栈橋の固有周期評価法として，設計時には栈橋のばね定数と質量より評価することが一般的である．そして，栈橋のばね定数は，杭の曲げ剛性から求めるか，または骨組み構造の荷重－変位関係より求めることが多い．ただしこれらの方法では，地震動により損傷を受けた栈橋の固有周期の評価は困難である．このため本研究では，2次元地震応答解析結果より固有周期を評価する．上述のように入力地震動のうちホワイトノイズ部分の応答におけるスペクトル比のピーク周期より固有周期を評価するが，その場合，①栈橋上部工/基盤入力，②栈橋上部工/仮想固定点，③栈橋上部工/土留め天端の3種類のスペクトル比が考えられる．**図-4**にN港P2G1S1における100Gal入力時のスペクトル比の比較を示す．①の0.8Hz程度のピークは地盤による増幅と考えられ，それを除くと何れも2.3Hz付近にピークが認められる．このうち最も安定的に固有周期を判定できる条件として，本研究では②栈橋上部工/仮想固定点のフーリエスペクトル比のピークより固有周期の評価を行う．なお仮想固定点の位置は杭ごとに変化するが，本研究では上部工の中央部分の仮想固定点に相当する要素位置を対象としている．また，背後地盤の固有周期は，土留め天端/基盤入力のフーリエスペクトル比より評価した．100Gal入力時の応答より評価した各条件の固有周期初期値は**表-3**に示すとおりである．



— : ① — : ② — : ③

図-4 スペクトル比の比較

表-3 固有周期初期値（単位：秒）

K港	P1	0.890	G1	1.078
	P2	0.975	G2	1.365
	P3	0.788	G3	0.640
N港	P1	0.310	G1	1.138
	P2	0.436	G2	1.078
			G3	0.819

4. 杭の損傷に伴う固有周期の変化

（1）解析結果

解析結果から、K 港 P3G1S1、N 港 P2G1S1 を例に、入力加速度最大値に対する固有周期の変化を図-5 に示す。Ts は栈橋固有周期、Tg は地盤の固有周期である。入力地震動の最大加速度の上昇に伴い、杭に生じる断面力が増加するために栈橋の固有周期は増加し、地盤は非線形化の影響を受けるために背後地盤の固有周期も増加するが、固有周期の変化度は条件ごとに異なっている。他のケースについても、入力地震動の振幅増加に伴って固有周期が増大するという傾向は共通して認められた。

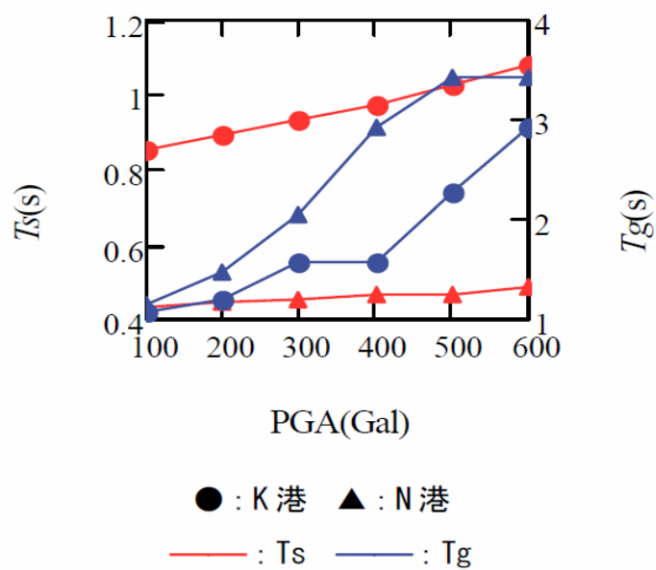


図-5 固有周期変化の例

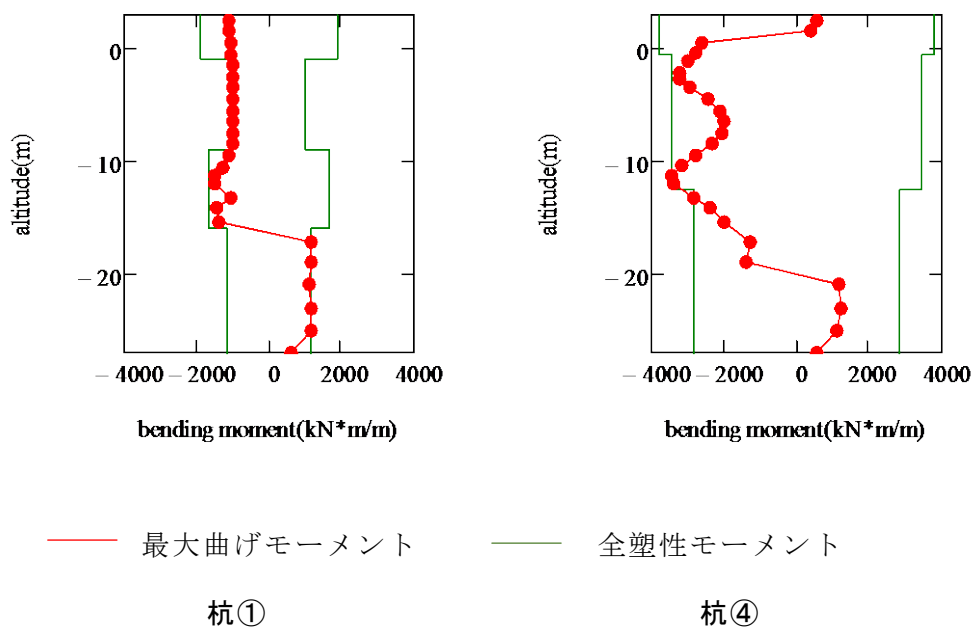


図-6 曲げモーメント深度分布(N 港 P1G1S1)

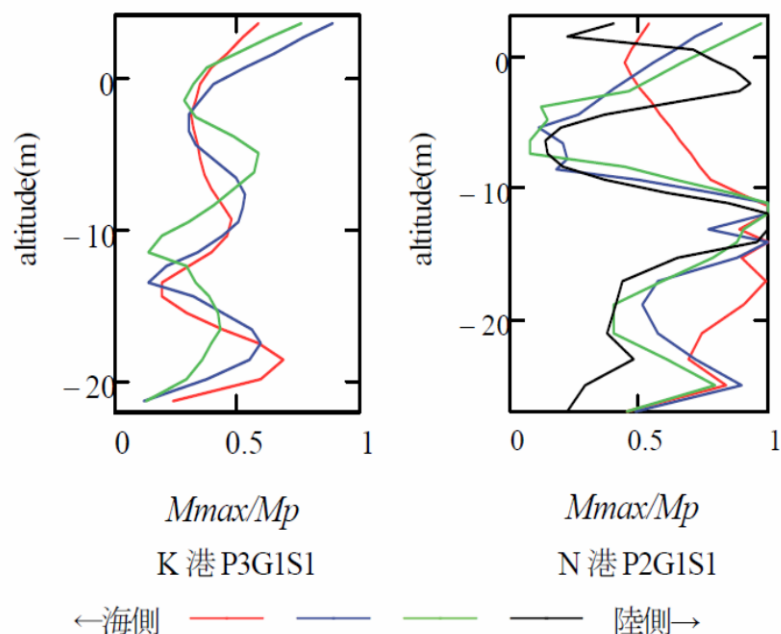


図-7 曲げモーメント深度分布

N 港 P1G1S1 の杭①及び杭④について、600Gal 入力時を対象に、杭の曲げモーメント最大値の震度分布を図-6に示す。さらに、K 港 P3G1S1 および N 港 P2G1S1 の 400Gal 入力時を対象に、各節点における曲げモーメント最大値を全塑性モーメントで除した値の深度分布を図-7に示す。

杭頭や地中部など、様々な箇所で断面力が生じ、その分布も設計で想定する分布とは異なっている。これは、栈橋の杭に生じる断面力は質点系の振動に起因したものばかりではなく、地盤変形の影響を強く受けているためである。特に地盤剛性のコントラストが強い箇所で、地震時に液状化層と非液状化層の境界等地盤変形が一様でない場合に、地中部で大きな断面力が生じる。このため、図に示した N 港については、杭頭よりも地中部で塑性化する杭が多いことが分かる。なお、杭の位置は図の凡例のように色分けして示しているが、K 港については杭が 3 列であるため、緑色の杭が最も陸側の杭となる。

図-8 には、図-7 と同じ条件の K 港 P3G1S1 および N 港 P2G1S1 について、杭の塑性化節点数の変化に伴う固有周期の変化を示す。水平軸は地震後の固有周期を初期値で除した固有周期変化度(rTs)、鉛直軸は杭の塑性化節点数を全節点数で除した損傷率(rP)である。図より、杭の損傷率がゼロの範囲でも、杭に断面力が生じることで固有周期は増加すること、さらに損傷率の増加と固有周期の増加程度は一定ではないことが分かる。

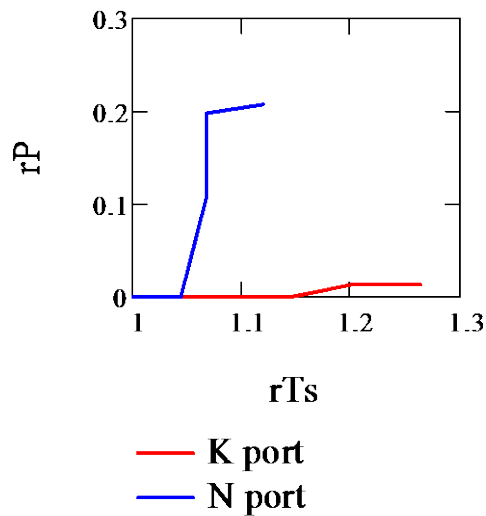


図-8 固有周期と損傷率の関係

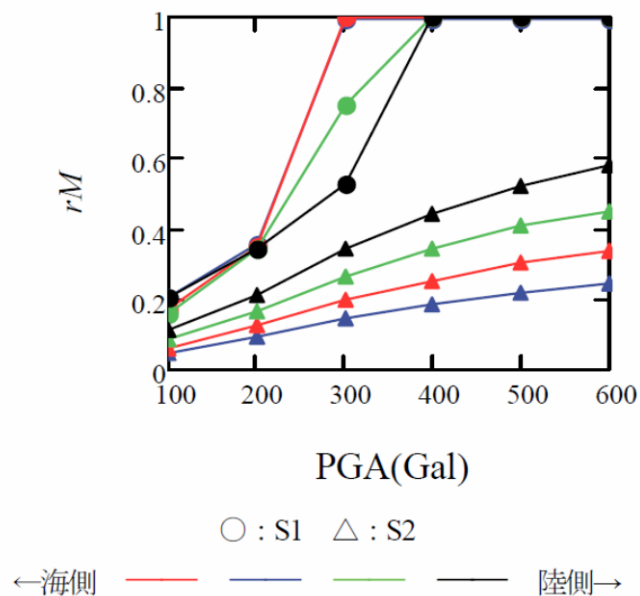


図-9 曲げモーメント比最大値

図-9 には、N 港 P2G2 を対象に、入力地震動の卓越周波数を八戸波オリジナル (0.4Hz) とした条件(S1)と栈橋の固有振動数に一致させた条件(S2)について、杭に生じる曲げモーメント最大値を全塑性モーメント M_p で除した値の最大値 (曲げモーメント比最大値：以下 rM) の変化を示す。図より分かるように、S1 では 300-400Gal で杭の塑性化が生じているが、S2 では 600Gal の入力でも杭に塑性化は生じなかった。従って、上述した 2 つの杭の断面力発生原因のうち、地盤変形の影響がより強いといえる。質点系の解析では共振によ

る断面力を評価するため、S2 では比較的早い段階で杭が塑性化するはずであるが本研究の解析結果では塑性化が生じていないことから、質点系の解析だけでは大地震発生時の杭の損傷を正確に評価できないことを示しているといえる。

(2) 杭の損傷位置の影響

杭の塑性化の発生位置が固有周期に及ぼす影響を検討するため、杭の仮想固定点以浅または以深で塑性化が先行するケースを抽出し、曲げモーメント比(rM)と固有周期の変化度(rTs ：地震後の固有周期を初期値で除した値)との平均的な関係を調べた。結果を図-10 に示す。地中部先行塑性のケースでは rM の変化に対して rTs の変化度が小さく、 $rTs=1.1$ 程度で平均的に全塑性に達する杭があり、固有周期の測定誤差を考慮すると仮想固定点以深で杭に大きな損傷が生じても固有周期の変化からその損傷程度を評価することは比較的困難である。これに対して仮想固定点以浅の塑性化については、比較的 rTs の変化が大きく、栈橋の固有周期の変化から杭の損傷を検出しやすいといえる。なお塑性化のパターンは事前解析で推定可能と考えられる。

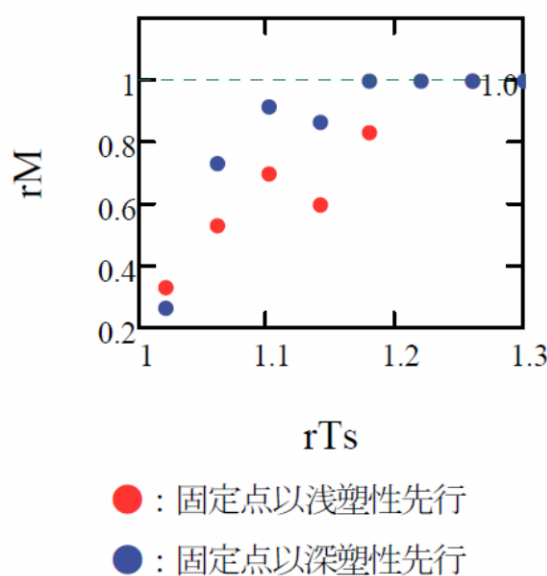


図-10 rTs と rM の関係

rTs に対する仮想固定点以浅の曲げモーメント比最大値の平均値の変化($rM1$)を図-11 に示す。本研究の範囲では概ね $rTs = 1.2$ 程度で全塑性モーメントに達する結果となった。なお、ここで図示した平均値は、 rTs について 0.04 刻みの範囲における曲げモーメント比を平均化した結果である。

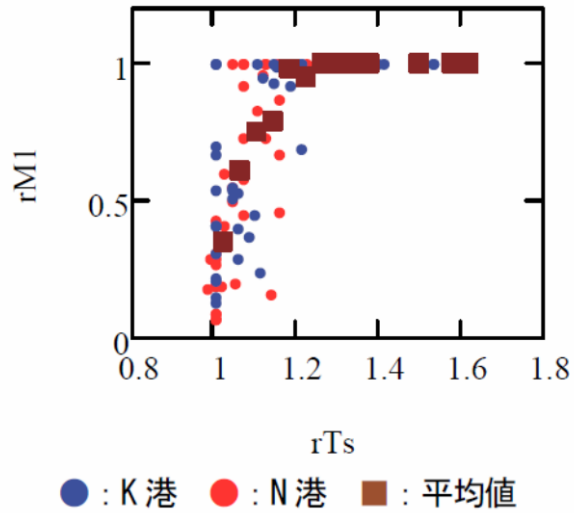


図-11 rTs と $rM1$ の関係

次に rTs に対する仮想固定点以浅の各杭の曲げモーメント比最大値の平均値の変化 ($rM2$)を図-12 に示す．杭の何れかの地点で全塑性モーメントに達する $rTs = 1.2$ 程度では、曲げモーメント比平均値は 0.7 程度であり、塑性化していない箇所においても大きな曲げモーメントが作用していることが分かった．

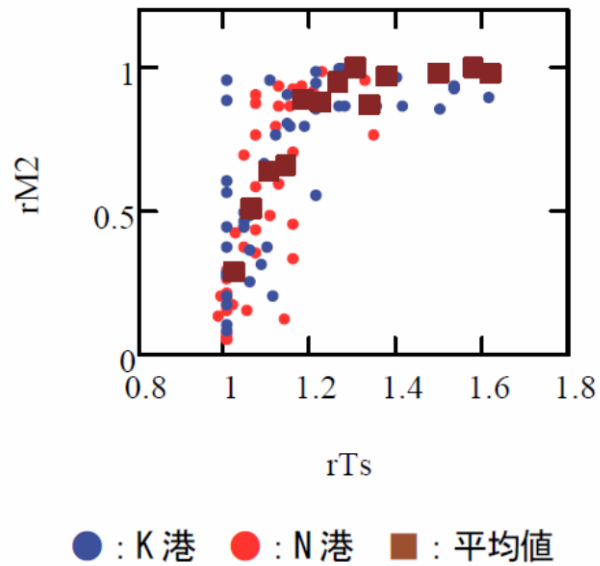


図-12 rTs と $rM2$ の関係

5. 残留変形量と杭の損傷度との関係

これまで、固有周期の変化と栈橋の損傷度の関係を議論してきた．大地震発生後には、

まず施設に生じた残留変形が現地調査されることが多いと考えられる．ここまでの議論のように，栈橋の杭に生じる断面力の発生原因として地盤変形の影響が強いのであれば，栈橋の残留変形量から杭の損傷度を推定できる可能性がある．

図-13 に，栈橋の残留変形量に対する曲げモーメント比($rM1$)の関係を示す．残留変形量の増加に伴い $rM1$ は増加するが，特に入力地震動の卓越周波数を栈橋の固有周期と一致させた N 港 P2G2S2 では残留変形量が小さい範囲で大きな曲げモーメントが発生しており，このため曲げモーメント比に対する関係としては，残留変形量と固有周期変化度を比較すると，前者はややばらつきが大きいといえる．

P2G2S2 のように作用する地震動が高周波成分を強く含み，地盤変形はあまり生じないものの共振により杭の断面力が生じるようなケースについては，栈橋の損傷度を残留変形量から評価することは比較的困難であるといえる．地盤変形が大きく生じるケースについては，本研究の範囲では栈橋の残留変形量が 1m 程度の場合に杭が全塑性に達するといえる．なお本研究では非排水条件での検討であるが，変形量と杭損傷度の関係は排水挙動時にも大きな変化は無いと考えられるため，本研究の結果は排水挙動時にも概ね適用できるものと考えられる．

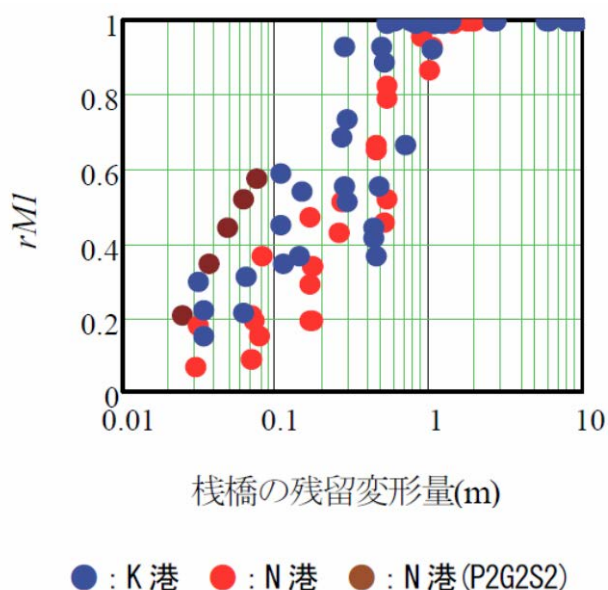


図-13 栈橋の残留変形量と $rM1$ の関係

6. まとめ

本研究では，大地震発生後の栈橋の供用可能性判定に資するため，栈橋の固有周期の変化から栈橋の損傷度を評価する手法について検討した．本研究による主要な結論は以下の通りである．

- ①地震動の入力加速度最大値を増加させると栈橋の固有周期は増加する．ただし本研究の範囲では，杭の断面力発生には地盤変形の影響が強い結果となった．
- ②杭の塑性化の発生位置が固有周期に及ぼす影響としては，固定点以深で塑性化が先行するケースでは固有周期の変化度は小さいため，固有周期の変化からその損傷程度を評価することは比較的困難である．これに対して仮想固定点以浅の塑性化については，比較的固有周期の変化が大きく，栈橋の固有周期の変化から杭の損傷を検出しやすい．本研究の範囲では固有周期が概ね初期値の 1.2 倍程度で全塑性モーメントに達する結果となった．
- ③栈橋の残留変形と杭の損傷度についても相関が認められ，残留変形量が 1m 程度の場合に杭が全塑性に達する結果となった．ただし，作用する地震動が高周波成分を強く含み，地盤変形はあまり生じないものの共振により杭の断面力が生じるようなケースについては，栈橋の損傷度を残留変形量から評価することは比較的困難であるといえる．

参考文献

- 1) 南兼一郎，高橋邦夫，園山哲夫，横田弘，川端規之，関口宏二，辰見ター：神戸港における横栈橋の被害調査と動的相互作用解析，第 24 回地震工学研究発表会，pp.693-696，1997
- 2) 運輸省港湾局監修，日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，1999
- 3) 長尾毅，田代聡一：栈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
- 4) 大石雅彦，長尾毅，大内正敏，佐藤祐輔，清宮理：ニューマチックケーソン式横栈橋の耐震性能照査法に関する研究，土木学会論文集，B3（海洋開発）Vol.69，No.2，pp155-160，2013
- 5) Iai, S., Matsunaga, Y. and Kameoka, T. : Strain Space Plasticity Model for Cyclic Mobility, Report of The Port and Harbor Re-search Institute, Vol.29, No.4, pp.27-56, 1990.
- 6) 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ータの簡易設定法，港湾技研資料 No.869，1997