

栈橋の地震時変形に及ぼす地震動の継続時間の影響について

石原慎太郎*・井合 進**・飛田哲男***・平澤充成****・杉田博章*****・松井 創*****

* 前(財)沿岸技術研究センター 調査部 主任研究員

** 京都大学 防災研究所 教授

*** 京都大学 防災研究所 地盤防災解析分野 助教

**** 国土交通省 近畿地方整備局 神戸港湾空港技術調査事務所 所長

***** 国土交通省 近畿地方整備局 神戸港湾空港技術調査事務所 技術開発課 課長

***** 前(財)沿岸技術研究センター 理事

平成 19 年度に改正された「港湾の施設の技術上の基準¹⁾」は、仕様規定から性能規定に移行し、耐震強化岸壁では、レベル 2 地震動等の偶発作用に対して動的解析により耐震性能照査を行うこととなった。一方、東南海・南海地震による地震動に見られるように、レベル 2 地震動には、継続時間の長い地震動が多くなってきている。しかし、そのような地震動による被災事例が無いことにより、解析結果の評価が難しいのが現状である。本報告では、動的解析と遠心载荷模型実験の比較より、地震波の継続時間や加速度の違いによる被災形態の傾向について述べるものである。

キーワード：耐震性能照査、長時間地震動、動的解析、遠心载荷模型実験、耐震強化施設

1. はじめに

平成 19 年度に改正された「港湾の施設の技術上の基準¹⁾」(以下、技術基準)は、設計手法や構造物の形状・材質といった手段を規定する仕様規定から、性能を規定し設計結果に至るプロセスを規定しない性能規定に移行した。この技術基準改正に伴い、係留施設のうち耐震強化岸壁では、レベル 2 地震動等の偶発作用に対して動的解析により耐震性能照査を行うこととなった。一方、耐震性能照査に用いるレベル 2 設計地震動は、工学的基盤の時刻歴波形を用いることから、周波数特性や継続時間が解析結果に大きく影響する。また、計算された地震動は、「東南海・南海地震波」のように継続時間の長い地震動が多くなってきている。

港湾施設の設計に用いられる動的解析は、阪神・淡路大震災で観測された「神戸 PI 波」のような継続時間の短い地震動においては、被災事例と同様の解析結果が確認されているが、継続時間の長い地震動については被災事例が無いため、解析結果の評価が難しいのが現状である。本報告では、動的解析と遠心载荷模型実験の比較により、地震波の継続時間や加速度の違いによる被災形態の傾向について述べるものである。

時間の違いによる被災形態を測定した。また、実験と同条件で動的解析(FLIP)を行い、図-2 に示すように実験と解析の結果を比較し地震動の継続時間・加速度の違いによる変形について、傾向を分析し考察した。

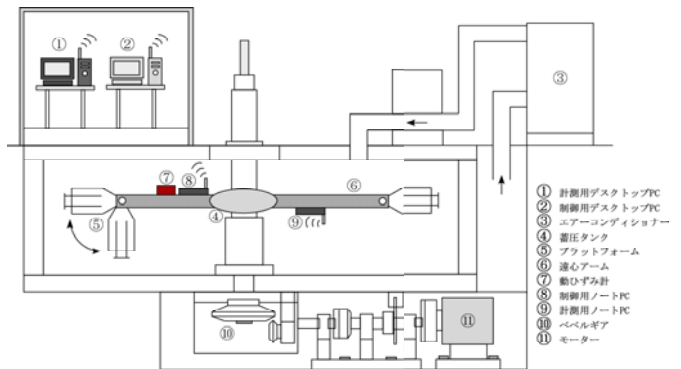


図-1 遠心载荷模型実験装置

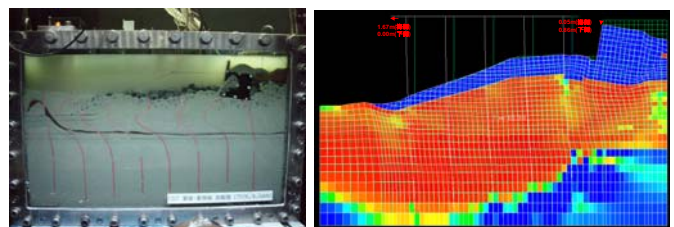


図-2 実験と解析による比較イメージ

2. 検討条件

2.1 概要

2008 年より井合・飛田・石原ら²⁾は、図-1 に示す京都大学防災研究所の遠心载荷模型実験装置により、継続

2.2 地震波形

適用する地震波形は、一般地震動、及び長時間地震動として、表-1 に示す計 2 波形を採用する。なお、実験では、表-1 に示している波形に対し SHAKE を用いて G.L. -8.5m まで引上げた波形を用いるものとする。

表-1 遠心载荷模型実験及び動的解析 (FLIP) 用いた地震動

東南海・南海波形【E-W成分】			
地震波形及びフーリエスペクトル			
主要動	120 秒程度	継続時間	328 秒程度
PGA	121gal	卓越周波数	0.6Hz 付近
地震動種別	長時間地震動		
神戸PI (ポートアイランド) 波形【E-W成分】			
地震波形及びフーリエスペクトル			
主要動	10 秒弱	継続時間	20 秒程度
PGA	718gal	卓越周波数	1.2Hz
地震動種別	一般地震動		

2.3 モデルとした断面

適用する直杭式横棧橋の断面形状は、継続時間の長い「長時間地震動」が及ぼす影響の把握を視野に入れ、図-3に示すバースをモデルとした。

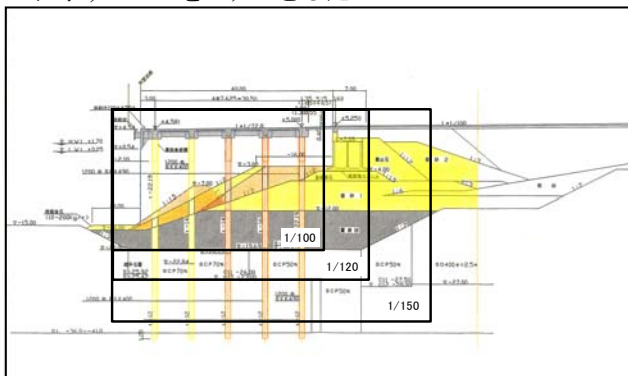


図-3 モデルとしたバース断面図

2.4 比較ケース

遠心模型実験及び動的解析を表-2に示す。2種類の入力地震波、棧橋下部の砂層の相対密度を50%と70%、入力加速度の最大値を変えて12ケース行った。また、実験の断面及び動的解析のメッシュを図-4に示す。

表-2 遠心模型実験及び動的解析を行ったケース

ケース	入力地震波	継続時間	相対密度(%)	粘性(cSt)	入力加速度(m/s ²)
1					4.95
2	東南海・南海	長	50	50	4.06
3					1.95
4	3.34				
5	神戸PI	短			2.60
6			1.81		
7	東南海・南海	長	70		4.60
8					1.79
9	神戸PI	短			3.14
10				1.76	
11	東南海・南海	長	50	114	4.52
12	神戸PI	短			3.14

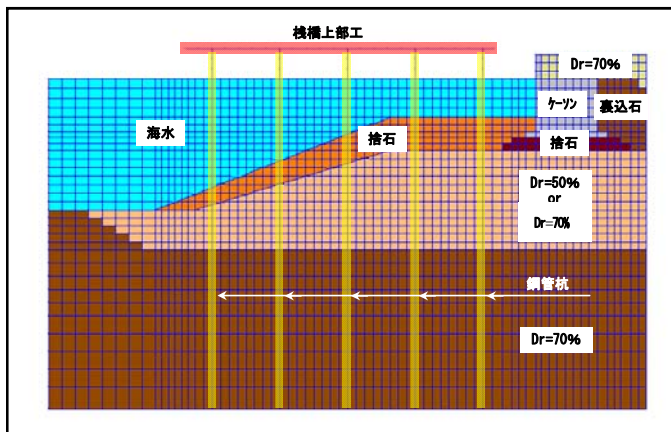
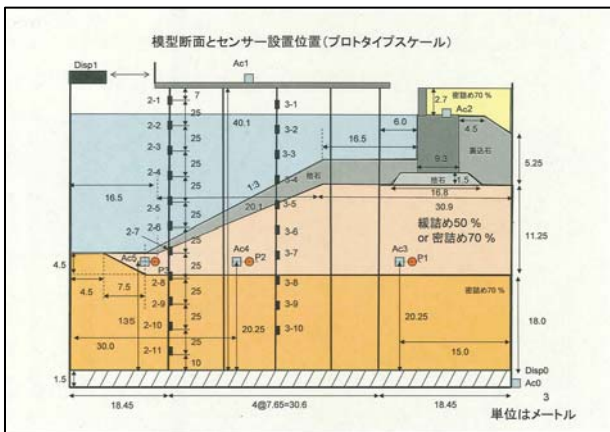


図-4 遠心载荷模型実験に用いた模型の断面図及び動的解析に用いたメッシュの断面図

3. 動的解析と遠心载荷模型実験の比較

3.1 動的解析と遠心载荷模型実験の比較

長時間地震動が作用した際の構造物の変形挙動を精度良く再現する、2次元地震応答解析(解析コード:FLIP)の各種液状化パラメータを設定することを目的として、遠心模型実験結果との比較検討を実施した。

FLIPによる解析は、遠心模型実験を忠実に再現することを目的として、図-5に示す各境界条件を用いて解析モデルを設定する。解析に用いる入力波形については、実験で計測された底面固定境界での加速度波形を用いる。液状化パラメータは中空ねじり試験結果を基にし、表-3に示すパラメータにより動的解析を行った。

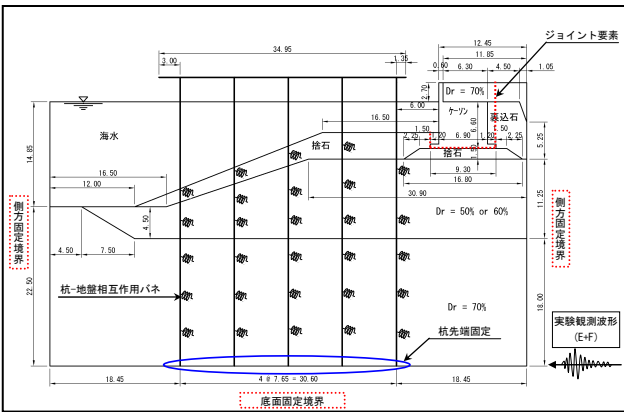


図-5 解析モデルの各境界条件

3.2 変位量について

岸壁法線上の栈橋天端の変位量について、図-6に実験の値、図-7に動的解析の値を示す。残留変位量の実験と動的解析の値を比較すると、概ね2倍以内で動的解析の値が大きい。

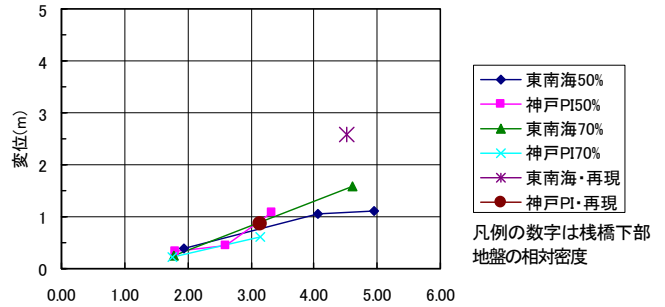


図-6 実験における栈橋天端での残留変位

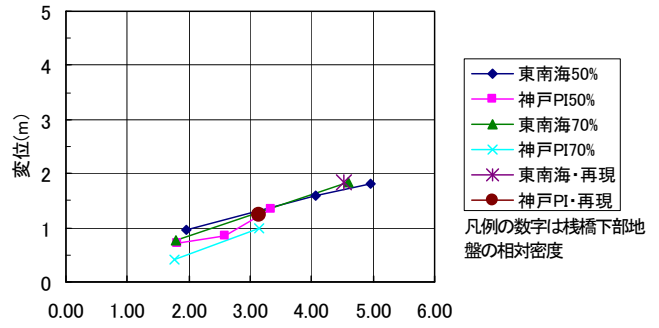


図-7 解析における栈橋天端での残留変位

表-3 解析に用いたパラメータ

マルチスプリング要素		質量密度 ρ	基準有効拘束圧 σ'_{ma}	初期せん断剛性 G_{0a}	体積弾性係数 K_{ma}	有効拘束圧 依存性 m_g, m_k	ポアソン比 ν	間隙率 n
ELEMENT-TYPE	XHED	RHO	SIGM0	G0	RK0	PMK	POI	PN
MULTI-SPR.	Dr50%	1.85	81	21,200	55,290	0.5	0.33	0.45
MULTI-SPR.	Dr70%	1.90	98	116,500	303,700	0.5	0.33	0.45
MULTI-SPR.	基礎捨石	2.00	98	180,000	469,400	0.5	0.33	0.45
MULTI-SPR.	捨石	2.00	98	180,000	469,400	0.5	0.33	0.45

マルチスプリング要素		間隙水の 体積弾性係数	最大減衰定数 h_{max}	粘着力 C	内部摩擦角 ϕ_f	液状化パラメータ					
ELEMENT-TYPE	XHED	WKF	HMAX	COH	PHIF	ϕ_p	S1	W1	P1	P2	C1
MULTI-SPR.	Dr50%	2,200,000	0.24	0.00	39.22	28	0.005	1.47	0.7	0.6	1.55
MULTI-SPR.	Dr70%	2,200,000	0.24	0.00	40.86	28	0.005	3.6	0.8	1	1.62
MULTI-SPR.	基礎捨石	22,000	0.24	20.00	35.00	0	0	0	0	0	0
MULTI-SPR.	捨石	22,000	0.24	20.00	35.00	0	0	0	0	0	0

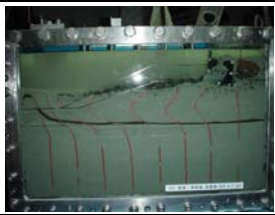

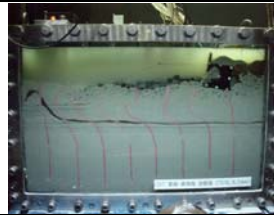
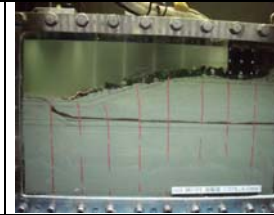
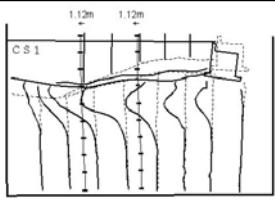
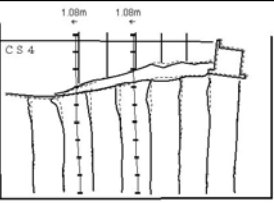
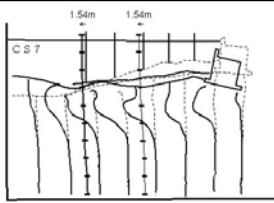
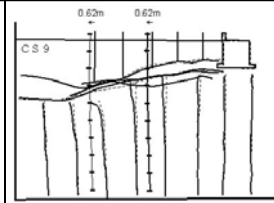
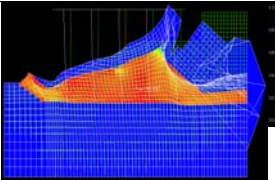
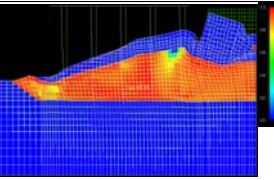
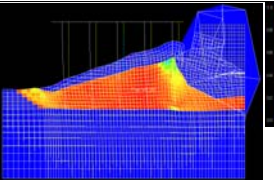
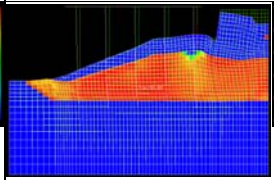
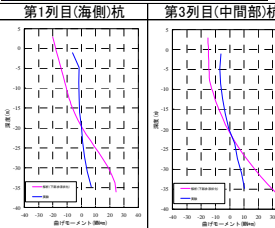
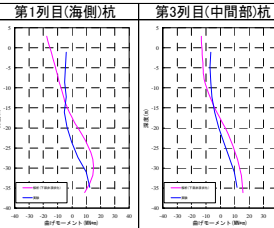
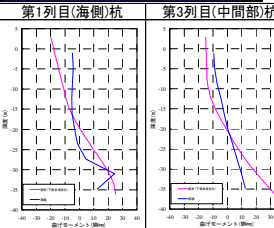
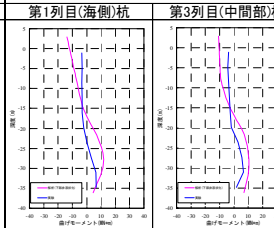
線形平面要素		質量密度 ρ	ヤング率 E	ポアソン比 ν
ELEMENT-TYPE	XHED	RHO	E	POI
LIN-PLANE	ケーソン	2.10	22,000,000	0.17
LIN-PLANE	ケーソン上部工	2.30	30,000,000	0.17

梁要素(線形)		質量密度 ρ	せん断剛性 G	ポアソン比 ν	断面積 A	断面2次モーメント I	有効せん断面積率 e_f
ELEMENT-TYPE	XHED	RHO	GS	POI	AREA	RIN	EFA
LIN-BEAM	栈橋上部工	2.70	44,400,000	0.345	1.10000	1.36760	0.83333
LIN-BEAM	杭No.1~5	2.70	44,400,000	0.345	0.10429	0.00528	0.90000

杭-地盤相互作用パネ		杭の直径 D	杭間隔/杭直径 n	パネ力に 乗ずる係数
ELEMENT-TYPE	XHED	PILEDM	SPACNG	PFACT
PILE-SOIL	杭No.1~5-地盤	0.90	6.78	0.164

ジョイント要素		垂直方向剛性 K_n	せん断方向剛性 K_s	粘着力 C	摩擦角 ϕ_j
ELEMENT-TYPE	XHED	TKN	TKS	CJ	PHIJ
JOINT	ケーソン側面	1,000,000	0	0.00	15.00
JOINT	ケーソン底面	1,000,000	1,000,000	0.00	31.00

表-4 代表的なケースの遠心载荷模型実験と動的解析 (FLIP) の結果比較

ケースNo.	Case1	Case4	Case7	Case9	
入力地震波	東南海・南海地震波 (継続時間:長)	神戸PI波 (継続時間:短)	東南海・南海地震波 (継続時間:長)	神戸PI波 (継続時間:短)	
地盤の相対密度	Dr=50(%)	Dr=50(%)	Dr=70(%)	Dr=70(%)	
最大加速度	4.95(m/s ²)	3.34(m/s ²)	4.60(m/s ²)	3.14(m/s ²)	
遠心载荷模型実験	写真				
	変形モード				
動的解析	変形図				
	曲げモーメント図				

3.3 変形モードについて

変形モードは、遠心载荷模型実験と動的解析を比較すると、変位量は異なるものの、変形モードは同様の傾向を示している。継続時間の違いを比較するため、12 ケース行った中から代表的なケースとして、Case 1 と 4 及び Case7 と 9 について変形モードを表-4 に示す。変形モードに影響を与える要因は、地震動の継続時間がく、下部の相対密度および最大加速度による要因は小さい。

東南海・南海地震波について、杭の変形が1~2mであったが、地盤の変形はCase1 では最大約10mも変形しており、下部の相対密度Dr=70%であるCase7 でも約8m変形している。一方、神戸PI波 Case4, Case9においては、杭と地盤の変形に大きな違いはない。このことから、主要動の継続時間が杭と地盤の変形の違いに影響したと考えられる。また、相対密度が小さいと変位が大きくなるのがわかる。残留変位における曲げモーメントは、解析と実験の結果を比較すると、12 ケースすべてにおいて、同様の結果となった。

3.4 曲げモーメントについて

最大変位における曲げモーメントは、遠心载荷模型実験より、動的解析の方が大きな値となった(表-4 参照)。継続時間の短い地震動では、地盤が液状化すると地盤変位が著しく増加するが、液状化による地盤の剛性低下

の影響はかならずしも大きくなく、地盤が軟弱で液状化しやすいほど、杭に作用する力も増加する。

継続時間の長い地震動では、地盤が軟弱な場合には地盤の液状化が極度に進む。実験において杭間をすりぬける現象が発生し、杭に作用する力がむしろ低下する傾向が確認された。一方動的解析では、すりぬけ現象を表現できないため、杭と地盤が一体となって変形するため、杭に作用する力は大きくなる。

4. まとめ

地震動の継続時間の違いによる栈橋の被災について、遠心载荷模型実験および動的解析の実施により、被災形態の傾向を把握することができた。これにより、耐震強化岸壁のレベル2地震動等の偶発作用に対する解析結果の評価に寄与できれば幸いである。

今後は、様々な構造形式・地盤条件および地震動による動的解析のデータを蓄積していくことが重要であると考える。

参考文献

- 1) 国土交通省港湾局監修, 日本港湾協会: 港湾の施設の技術上の基準・同解説, 2007.
- 2) 石原慎太郎, 井合進, 飛田哲男, 松井創, 第54回地盤工学シンポジウム: 港湾施設におけるレベル2地震動に対する遠心载荷模型実験による被災形態の特徴(投稿中), 2009.