

動的有効応力解析を用いた液状化地盤における杭基礎の設計法の検討

Examination of the design method of pile foundation during liquefaction using dynamic effective stress analysis

高橋千明*, 蔡飛**, 鵜飼恵三***

Chiaki TAKAHASHI, Fei CAI and Keizo UGAI

地盤と構造物の動的相互作用を考慮した解析が実設計に適用され、最近まで研究レベルで行われていた地盤の動的有効応力解析も取り入れられるようになってきた。しかしながら、液状化パラメータの設定や解析結果の評価が困難であり、解析コストが増大するなどの問題点から未だ適用例は少ない。本研究では、地盤の動的有効応力 FEM 解析コード UWLC を適用することにより液状化時の地盤-基礎-構造物系の挙動を把握するとともに、動的全応力 FEM 解析を実施して杭に発生する断面力の比較・検討を行った。その結果として、慣性力、地盤変位、地盤の剛性低下、過剰間隙水圧を直接考慮できる動的有効応力解析の有効性を示した。

キーワード：杭基礎，液状化，動的有効応力解析，耐震設計，有限要素法

piles, liquefaction, dynamic effective stress analysis, seismic design, finite element method

1. はじめに

兵庫県南部地震において、埋立て地盤の液状化による甚大な被害が報告された。その被害は、建築物、橋梁、ライフライン、港湾構造物など多岐の構造物に及び、大規模地震時の液状化を考慮した構造物設計や液状化対策工の必要性を示唆した。それらの被災事例を鑑み、道路橋示方書¹⁾やコンクリート標準示方書²⁾、鉄道構造物等設計標準³⁾など、多くの主要な耐震設計基準類が改定され、1次元地震応答解析による液状化詳細判定や2次元のFEM解析を用いた設計手法も取り入れられるようになった。

地盤-構造物系の動的有効応力 FEM 解析は、最近まで研究レベルで行われていた解析手法であるが、液状化時の地盤と構造物の動的相互作用を確認できる理論的に最も優れた手法であることから次第に実設計にも適用されるようになってきており、中でも土構造物である河川堤防や道路盛土への適用事例が増加している。一方、杭基礎の設計では、2次元および3次元の動的相互作用解析が結果の評価にあたって高度な技術的判断を必要とすることから、実設計への適用事例は未だ少なく、自然地盤の1次元動的有効応力解析を行うことにより地盤変位や慣性力を算出し、応答変位法により杭の設計を実施するという方法が採用されている。地盤、基礎、および構造物を一体として扱う動的有効応力 FEM 解析と解析結果の評価方法については、現在研究が進められているところである。

以上のような背景から、本研究では大規模地震時の液状化地盤中の杭に作用する地震外力に着目し、2次元動的有効応力 FEM 解析とともに適用実績の多い動的全応力 FEM

解析を行い、動的相互作用ならびに解析手法の違いが照査結果に及ぼす影響について検討を行った。

2. 研究の目的

液状化地盤中の杭の設計で考慮すべき地震外力として、地震時慣性力と地盤変位が挙げられる。これらは、地震発生から液状化に至る過程において経時的に変化する。震度法や地震時保有水平耐力法では、液状化による地盤の剛性低下を考慮するために地盤反力の低減係数を用い、同時に最大慣性力を載荷して設計する方法を採用している。しかし、最近の研究では、最大慣性力と最大地盤変位は同時に作用しないことや、地盤と構造物の位相差の影響によりそれらが同方向に作用しない可能性があることが分かっている。合理的な杭の設計を実施するためには、液状化過程を考慮して構造物と基礎に作用する地震外力を評価しなくてはならない。

地震時慣性力と地盤変位の組み合わせを考慮する設計法として、1次元地震応答解析の結果に基づき基礎-構造物系に作用する液状化時の荷重を算出し、静的な骨組み解析により杭に発生する断面力を求める応答変位法が広く採用されている。³⁾⁴⁾しかし、応答変位法では地盤反力をバネで表現しなくてはならないことや、慣性力、地盤変位および地盤の剛性低下を適切に評価する手法が未だ確立されていないことなど、検討課題が残されている。

そこで本研究では、数種の波形を用いて RC 単柱式橋脚の杭基礎を対象とした動的有効応力 FEM 解析および動的全応力 FEM 解析を実施し、慣性力、地盤変位、地盤の剛

* 株式会社フォーラムエイト

FORUM8 Co., Ltd

** 群馬大学工学部 助手

Research Associate, Department of Civil Engineering, Gunma University

*** 群馬大学工学部 教授

Professor, Department of Civil Engineering, Gunma University

性低下が杭の断面力に及ぼす影響について検討を行い、地震外力の相互関係を把握することを目的とした。

3. 地盤条件とRC 単柱式橋脚モデル

3.1 地盤条件

兵庫県南部地震において液状化鉛直アレー強震記録が観測されている神戸ポートアイランドの地盤条件を用いた。神戸ポートアイランドの地層構成を表-1 に示す。

ここで、杭の支持層は GL-33~-50m の洪積砂礫層とした。この砂礫層では、10 前後の N 値が観測されている部分があるが、平均 N 値が 36.5 と測定されていることから便宜的に支持層として選定した。また、当該地点での工学的基盤面は、GL-83m とした。なお、当該地盤の卓越周期は、 $T_g=1.296$ 秒である。

表-1 神戸ポートアイランドの地盤プロフィール^{5),6)}

土質名	Depth (GL m)	N (回)	γ (kN/m ³)	Vs (m/s)
砂礫 (埋土)	0.0~-5.0	5.2	17.64	170
砂礫 (埋土)	-5.0~-12.6	6.5	17.64	210
砂礫 (埋土)	-12.6~-16.8	6.5	17.64	210
礫混り砂 (埋土)	-16.8~-19.0	6.5	17.64	210
沖積粘土 (Ma13)	-19.0~-27.0	3.5	16.17	180
沖積砂	-27.0~-33.0	13.5	17.15	245
洪積砂礫	-33.0~-50.0	36.5	18.13	305
洪積砂礫	-50.0~-61.0	61.9	18.13	350
洪積粘土	-61.0~-79.0	11.7	16.66	303
洪積砂礫	-79.0~-83.0	68.0	23.52	320
基盤	-83.0~	-	-	-

3.2 モデル橋脚

図-1 に示す道路橋を想定した。検討対象橋脚を P1 橋脚とし、橋軸方向の検討を行った。P1 橋脚の構造一般図を図-2 に示す。

3.3 解析モデル

3.3.1 橋脚および杭基礎

橋脚天端に 6000kN の上部工分担重量を質点として設け、橋脚重量は頂部と柱部で分布質量として考慮した。柱部については、重量を 3 等分して 3 つの質点を設けた。

橋脚躯体と杭基礎は、梁要素でモデル化した。橋脚柱部および杭の断面諸元を表-2 に示す。なお、構造物の慣性力と地盤変位の作用を明らかにするため、梁要素は全て弾性体とした。

橋脚頂部の張出し部とフーチングは、剛体とみなした。

表-2 橋脚と杭の断面定数

断面	A(m ²)	I(m ⁴)	E(kN/m ²)
橋脚柱部	13.20	6.34	2.35×10^7
杭(3 本分)	3.39	0.31	2.50×10^7

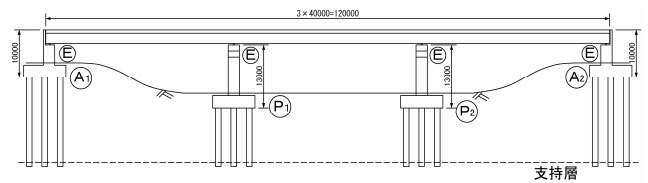
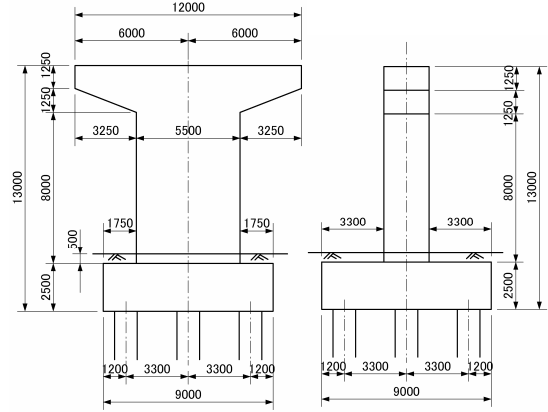


図-1 対象橋梁の縦断図⁷⁾



(a)正面図 (b)側面図

場所打ち杭 $\phi=1200, L=32.0m, n=3 \times 3=9$ 本

図-2 モデル橋脚の構造一般図⁷⁾

3.3.2 FEM モデル

動的有効応力 FEM 解析および動的全応力 FEM 解析には、図-3~4 に示す解析モデルおよび FEM メッシュを用いた。

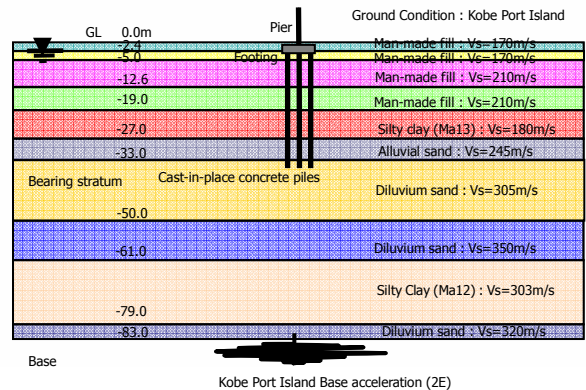


図-3 解析モデル

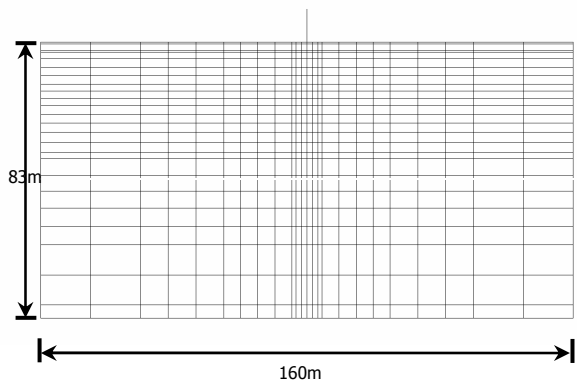


図-4 FEM メッシュ

4. 解析手法

4.1 動的有効応力 FEM 解析

地盤の動的有効応力解析コード UWLC を用いた。

UWLC の主な特長を(1)～(5)に示す。

- (1) 初期応力解析プログラムならびに有効応力法構成モデルのパラメータを同定する要素試験シミュレーションプログラムを備えている。
- (2) 有効応力法の構成モデルとして、Zienkiewicz らの研究グループが開発した一般化塑性モデル (Pastor-Zienkiewicz モデル) を採用している。
- (3) 地盤の透水現象を考慮できる。
- (4) 8 種類の構成モデルを自由に組み合わせて混在する

ことができる。

- (5) 有効応力法適用材料と全応力法適用材料の混在が可能である。

一般的に適用されている液状化予測手法の種類として、表-3 に示す(A)～(D)が挙げられる。UWLC を用いた動的有効応力解析は、表-3 に示す液状化予測法の中で、解析精度が高く理論的に最も優れた方法である(D)に相当する。

4.2 動的全応力 FEM 解析

動的全応力 FEM 解析にも UWLC を用いた。動的全応力 FEM 解析は、表-3 に示す手法の中で最も適用実績の多い(A)に相当する。

表-3 詳細な液状化予測法⁷⁾

予測法の種類		予測法の特徴		適用性
		有効応力と土の応力-ひずみ関係	過剰間隙水圧消散(透水)	
全 応 力 解 析	(A) 地盤の透水を考慮しない方法	過剰間隙水圧の上昇、消散による有効応力の変化にかかわらず、土の応力-ひずみ関係は一定である。したがって、地震応答解析と液状化解析とは別々に行われる。	考慮しない	理論的には有効応力解析に劣るが、手軽で適用実績も多い。
	(B) 地盤の透水を考慮する方法		考慮する	
有 効 応 力 解 析	(C) 地盤の透水を考慮しない方法	過剰間隙水圧の上昇、消散による有効応力の変化に応じて土の応力-ひずみ関係を時々刻々と変化させる。したがって、地震応答解析に液状化解析も含まれる。	考慮しない	手間は(D)と大差ないが、(D)の方がより精度の高い結果が得られるのでほとんど用いられていない。
	(D) 地盤の透水を考慮する方法		考慮する	

5. 地盤の構成モデルおよびパラメータ

動的有効応力解析の適用構成モデルを表-4 に示す。一方、動的全応力解析では全ての地盤に修正 Hardin-Drnevich モデル (HD モデル) を適用した。解析に用いたパラメータを表-5～6 に示す。

表-4 動的有効応力解析の適用構成モデル

No.	土質名	構成モデル	間隙水圧モデル
1	砂礫 (埋土)	PZ-Sand	全応力
2	砂礫 (埋土)	PZ-Sand	有効応力
3	砂礫 (埋土)	PZ-Sand	有効応力
4	礫混り砂 (埋土)	PZ-Sand	有効応力
5	沖積粘土 (Ma13)	HD	全応力
6	沖積砂	PZ-Sand	有効応力
7	洪積砂礫	PZ-Sand	有効応力
8	洪積砂礫	PZ-Sand	有効応力
9	洪積粘土	HD	全応力
10	洪積砂礫	HD	全応力

表-5 Pastor-Zienkiewicz モデルのパラメータ

No.	1	2	3	4	6	7	8
K_{ev0}	2211	2852	3234	4104	5073	7988	10378
G_{es0}	1327	1711	1940	2462	3044	4793	6227
m_v	0.8	0.8	0.8	0.8	0.5	0.5	0.5
m_s	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
M_g	1.500	0.900	0.900	0.900	1.200	1.615	1.615
M_f	1.000	1.370	1.370	1.370	1.500	1.900	1.900
α_g	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45
α_f	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45
β_0	4.0	4.0	4.0	4.0	5.0	10.0	10.0
β_1	0.12	0.12	0.12	0.12	1.00	5.20	5.20
H_0	600	600	600	600	330	300	300
H_{v0} (kPa)	6000	6000	6000	6000	6000	6000	6000
γ	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	15.0	15.0
γ_U	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	10.0	10.0

※PZ-Sand : 砂の Pastor-Zienkiewicz モデル

表-6 Hardin-Drnevich モデルのパラメータ

No.	G_0 (kN/m ²)	σ'_m (kN/m ²)	m	ν	C (kN/m ²)	ϕ (°)
1	52528	15.680	0.5	0.25	0	25
2	67751	39.853	0.5	0.25	0	25
3	76832	73.173	0.5	0.25	0	25
4	97503	118.907	0.5	0.25	0	25
5	55337	158.107	0.5	0.30	0	30
6	120540	196.000	0.5	0.25	0	40
7	189793	271.133	0.5	0.25	0	45
8	246568	362.600	0.5	0.25	0	45
9	166927	457.333	0.5	0.30	0	45
10	216972	529.200	0.5	0.25	0	50

なお、Pastor-Zienkiewicz モデルのパラメータは、神戸ポートアイランドの鉛直アレー強震記録を逆解析して同定したものである。^{8),9)}

6. 入力地震動波形と解析ケース

6.1 入力地震動波形

表-7 に示す 4 種類の加速度波形を用いて検討を行った。それらの時刻歴を図-5～8 に示す。

表-7 検討に用いた加速度波形

略称	説明
PI 基盤波	神戸ポートアイランド N-S 基盤波形 (2E)
EL-NS 波	エルセントロ N-S 波形
正弦波 1	周期 1.0 秒、振幅 200gal の正弦波 10 波
正弦波 2	周期 0.2 秒、振幅 200gal の正弦波 10 波

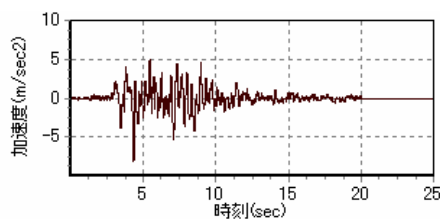


図-5 PI 基盤波の加速度波形

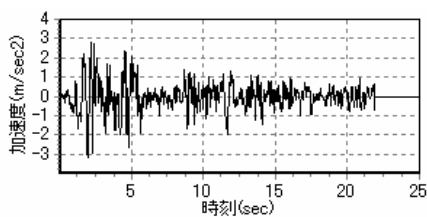


図-6 EL-NS 波の加速度波形

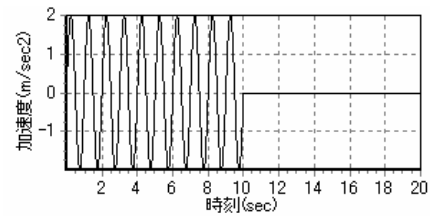


図-7 正弦波 1 の加速度波形

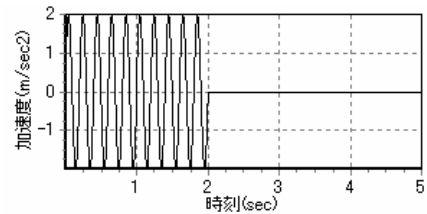


図-8 正弦波 2 の加速度波形

PI 基盤波および EL-NS 波のフーリエスペクトルをそれぞれ図-9、図-10 に示す。

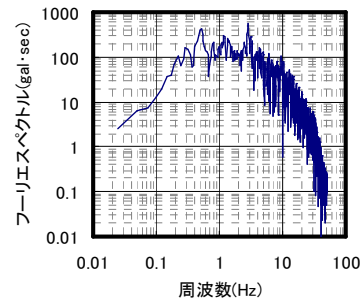


図-9 PI 基盤波のフーリエスペクトル

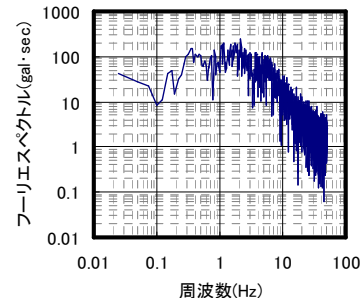


図-10 EL-NS 波のフーリエスペクトル

6.2 解析ケース

実施した解析ケースを表-8 に示す。

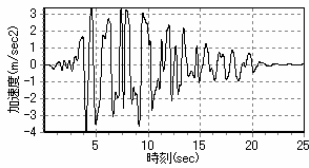
表-8 解析ケース

Case	解析手法	入力地震動波形
Case1-1	有効応力解析	PI 基盤波
Case1-2		EL-NS 波
Case1-3		正弦波 1
Case1-4		正弦波 2
Case2-1	全応力解析	PI 基盤波
Case2-2		EL-NS 波
Case2-3		正弦波 1
Case2-4		正弦波 2

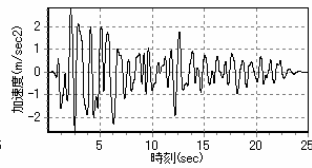
7. 解析結果

解析結果を図-11~18に示す。上部工慣性力と地盤変位の相互作用が杭の断面力に与える影響を確認するために、上部工慣性力作用位置である橋脚天端の応答加速度、

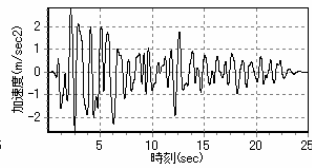
地表面の水平地盤変位および杭頭曲げモーメントのそれぞれの時刻歴波形を整理した。また、動的有効応力解析については、過剰間隙水圧比の時刻歴波形を出力し、過剰間隙水圧上昇過程と地震外力の関係を示した。



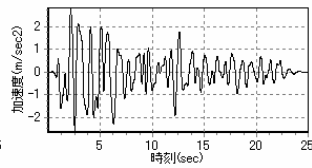
(a) 橋脚天端の加速度の時刻歴



(b) 地表面地盤変位の時刻歴

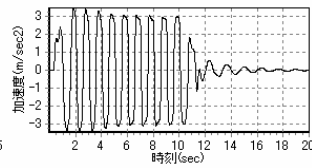


(c) 杭頭モーメントの時刻歴

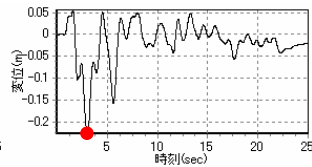


(d) 過剰間隙水圧比の時刻歴

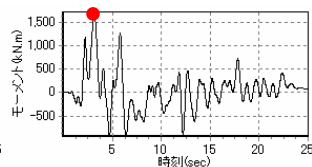
図-11 Case1-1の解析結果



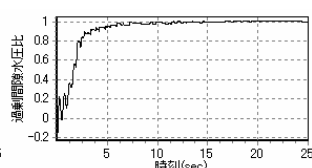
(a) 橋脚天端の加速度の時刻歴



(b) 地表面地盤変位の時刻歴

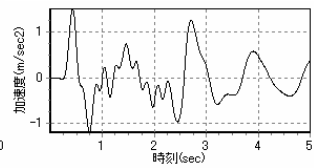


(c) 杭頭モーメントの時刻歴

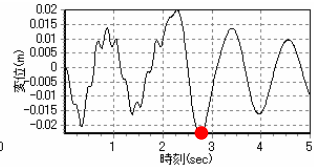


(d) 過剰間隙水圧比の時刻歴

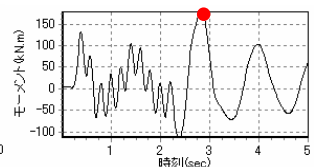
図-12 Case1-2の解析結果



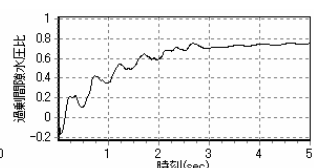
(a) 橋脚天端の加速度の時刻歴



(b) 地表面地盤変位の時刻歴



(c) 杭頭モーメントの時刻歴



(d) 過剰間隙水圧比の時刻歴

図-13 Case1-3の解析結果



(a) 橋脚天端の加速度の時刻歴



(b) 地表面地盤変位の時刻歴

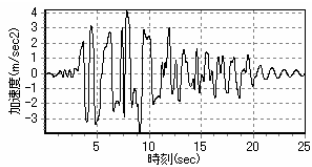


(c) 杭頭モーメントの時刻歴

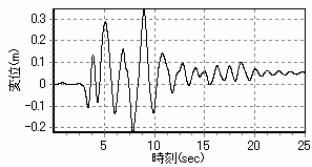


(d) 過剰間隙水圧比の時刻歴

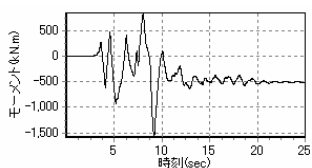
図-14 Case1-4の解析結果



(a) 橋脚天端の加速度の時刻歴

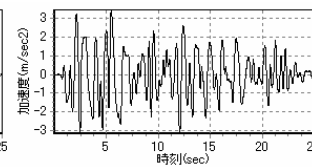


(b) 地表面地盤変位の時刻歴

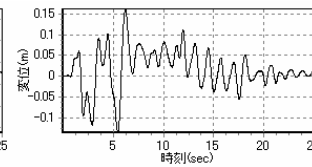


(c) 杭頭モーメントの時刻歴

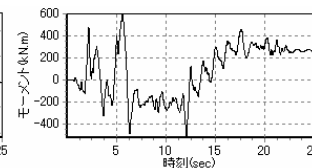
図-15 Case2-1の解析結果



(a) 橋脚天端の加速度の時刻歴

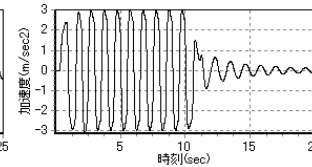


(b) 地表面地盤変位の時刻歴

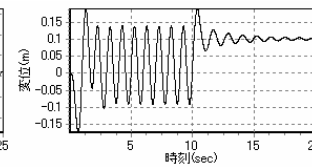


(c) 杭頭モーメントの時刻歴

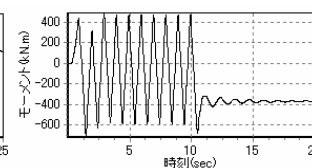
図-16 Case2-2の解析結果



(a) 橋脚天端の加速度の時刻歴

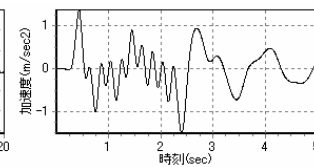


(b) 地表面地盤変位の時刻歴

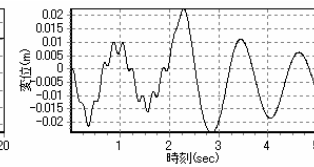


(c) 杭頭モーメントの時刻歴

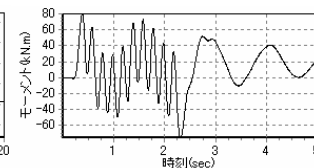
図-17 Case2-3の解析結果



(a) 橋脚天端の加速度の時刻歴



(b) 地表面地盤変位の時刻歴



(c) 杭頭モーメントの時刻歴

図-18 Case2-4の解析結果

以上の解析結果から、①～⑦のことが把握できる。

- ① 図-11～14 において点で強調して示したように、有効応力解析では、杭頭曲げモーメント最大の時刻と地表面地盤変位最大の時刻がほぼ同時刻であり、このときの上部工慣性力は最大値の80～90%である。
- ② 図-15～18 より、全応力解析では、Case2-2を除き、杭頭曲げモーメント最大の時刻と地表面地盤変位最大の時刻がほぼ同時刻であり、このときの上部工慣性力も最大値の80～90%である。
- ③ 最大杭頭曲げモーメントは、過剰間隙水圧上昇後に発生し、このときの過剰間隙水圧比は約0.8～0.9である。
- ④ 全応力解析は、有効応力解析と比較して杭頭曲げモーメントを20 (PI基盤波)～50% (他の三つの波形)過小に評価する傾向がある。
- ⑤ PI基盤波およびEL-NS波では、有効応力解析より全応力解析の方が大きな上部工慣性力が発生している。一方、正弦波1および正弦波2では、これとは反対の結果が得られている。
- ⑥ 全応力解析は、有効応力解析と比較して地盤変位が小さく上部工慣性力が大きくなる傾向がある。
- ⑦ 全ての解析ケースにおいて、残留変位があり、これにより地震後でも、杭に曲げモーメントが存在している。

9. おわりに

本研究で実施した解析では、最大地盤変位の発生とほぼ同時に最大杭頭曲げモーメントが発生することが多く、このときの上部工慣性力は、最大値の8～9割程度と比較的大きいことがわかった。

また、有効応力解析と全応力解析の比較では、解析結果に異なる傾向が見られ、液状化時の杭の挙動を検討する際には、全応力解析を適用することが困難であるという結果が得られた。

液状化地盤中の杭に対して地盤変位が支配的に作用することが確認できたが、応答変位法を適用する際の上部

工慣性力と地盤変位の組み合わせ方法を把握するには至っておらず、他の地盤条件や異なる固有周期の構造物を対象に更に検討を深めたい。また、構造物の非線形性を考慮した解析を取り入れ、より実際の現象に則した検討を行う必要があると考える。

謝辞: 神戸ポートアイランド波をご提供頂いた独立行政法人港湾空港技術研究所地盤・構造部の関係者の皆様に深く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 日本道路協会 (1997) : 道路橋示方書・同解説V耐震設計, 日本道路協会
- 2) 土木学会 (1997) : コンクリート標準示方書 耐震設計編, 土木学会
- 3) 鉄道総合技術研究所, 運輸省鉄道局 (1999) : 鉄道構造物等設計標準 耐震設計, 丸善株式会社
- 4) 土木学会地震工学委員会耐震基準小委員会 (2001) : 土木構造物耐震設計ガイドライン (案) - 耐震基準作成のための手引き - (耐震基準小委員会活動報告) [URL:http://www.jsce.or.jp/committee/eec2/taih/guidline.html](http://www.jsce.or.jp/committee/eec2/taih/guidline.html)
- 5) Zienkiewicz, O.C., Chan, A.H.C., Pastor, M., Schrefler, B.A., Shiomi, T. (1999) : Computational Geomechanics with Special Reference to Earthquake Engineering, JOHN WILEY & SONS
- 6) 岡二三生 (2001) : 地盤液状化の科学, 近未来社
- 7) 鹿島建設土木設計本部 (2003) : 新・土木設計の要点-⑩ 耐震設計法/性能設計, 鹿島出版会
- 8) Takahashi, C., Cai, F., Ugai, K. (2004) : Effect of Dynamic Analysis Methods on Response of Piles in Liquefiable Sandy Grounds, ICCI2004
- 9) 株式会社フォーラムエイト (2004) : UC-1/地盤の動的有効応力解析(UWLC)を利用した液状化詳細判定 <http://www.forum8.co.jp/product/uc1/jiban/pdf/uwlc.pdf>