

液状化地盤における杭基礎橋脚の非線形を考慮した地震応答解析

盛岡義郎¹・砂坂善雄²・宮本裕司³・酒向裕司⁴

¹正会員 工修 鹿島建設(株) 土木設計本部設計技術部 (〒107 東京都港区赤坂 6-5-30)

²正会員 工修 鹿島建設(株) 土木設計本部設計技術部 (〒107 東京都港区赤坂 6-5-30)

³工博 鹿島建設(株) 小堀研究室 (〒107 東京都港区赤坂 6-5-30)

⁴工修 鹿島建設(株) 小堀研究室 (〒107 東京都港区赤坂 6-5-30)

液状化地盤中の杭支持橋脚について地震応答解析を行い、地震時の橋脚の応答と杭応力の基本的性状について考察を行った。解析では、地盤のひずみの増大、有効応力の減少による非線形性及び橋脚と杭体の非線形性を考慮する。入力地震動の最大加速度レベル、地盤の液状化及び橋脚・杭の非線形性が橋脚-杭基礎-地盤系の動的相互作用、橋脚の応答及び杭応力に与える影響を明らかにする。

Key Words: earthquake response analyses, non-linearity, liquefied soil, effective stress analyses, pile stress

1. はじめに

地盤に液状化が生じると、液状化により地盤の剛性が低下し、液状化層と非液状化層の境界で地盤変位が急激に増大する。このため、液状化地盤では、杭頭付近だけではなく、液状化層と非液状化層の境界付近でも大きな応力が生じることが指摘されている。兵庫県南部地震の杭基礎の被害も地盤の液状化とそれに伴う側方流動が主たる原因と考えられてい

表-1 解析用地盤物性値

地盤区分 GL(m)	N値	γ_s (tf/m^3)	V_{s0} (m/s)	τ_{max} (tf/m^2)	k_v (cm/s)	Parameters of DESRA GL-0m~GL-19m: C1=1.0, C2=0.4, C3=0.161, C4=0.5~0.32, m=0.43, n=0.62, k2=0.012~0.046 GL-27m~GL-33m: C1=1.0, C2=0.4, C3=0.161, C4=0.32, m=0.43, n=0.62, k2=0.046
∇ -2.5	5~7	1.90	79	0.3	3.5E-03	
Fg -19.0						
Ac -27.0	4	1.60	180	18.9	3.0E-06	
Ag -33.0	14	1.80	245	23.5 ~25.0	1.5E-02	
Da -50.0 -61.0	37	1.85	305	40.2 ~45.5	1.5E-02	
	52	1.80	350	37.5 ~39.1	1.5E-02	
Dc -79.0	12	1.70	303	35.7	3.0E-06	
Dg -83.4	68	1.90	320	50.7 ~53.0	1.5E-02	

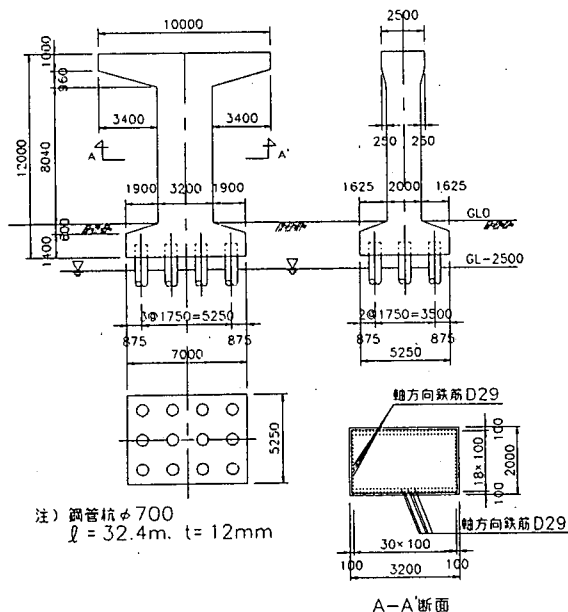


図-1 解析対象橋脚

る¹⁾。大地震時における非線形・液状化地盤中の杭基礎及び橋脚の安全性を検討するためには、地震応答解析が有効な手段であると考えられる。本論文では、杭で支持された橋脚を対象として地震応答解析を行い、非線形・液状化地盤における地震時の橋脚の応答と杭応力の基本的性状について考察した結果を報告する。

2. 解析条件

本論文では、図-1に示す杭支持橋脚について解析を行った。地盤モデルは、ポートアイランド観測地点の地盤調査結果²⁾をもとに設定した。解析に用いた地盤物性値を表-1に示す³⁾。橋脚は、打ち込み鋼

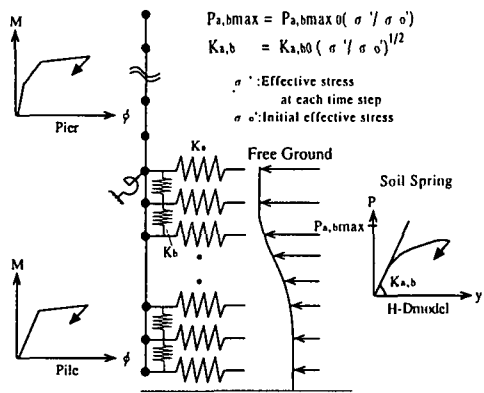


図-2 解析モデル

管杭（直径 700mm, 厚さ 12mm, 杭長 32.4m）12本で支持されている。杭の支持層はGL-33mの洪積砂礫層で、杭頭部はフーチングに剛接合されている。入力地震動は、兵庫県南部地震時にポートアイランドの地盤中GL-83.4mで観測されたNS方向地震波とし、最大加速度を679gal（原波）及び300galとした場合について検討する。

3. 解析手法

橋脚—杭基礎—地盤系の地震応答解析モデルを図-2に示す。橋脚及び杭基礎は、質点系にモデル化し、上部工重量を橋脚天端に付加する。杭基礎の質点系モデルは、群杭を1本の多質点曲げせん断棒にモデル化し、杭頭位置に回転ばねと各質点に杭と地盤の相互作用ばねを取り付けたモデルである⁴⁾。1次元有効応力解析 DESRA⁵⁾を用いて自由地盤の地震応答解析を行い、得られた自由地盤の各質点深さでの変位応答波形と過剰間隙水圧波形を相互作用ばねを介して全体系モデルに入力することにより全体系の地震応答解析を行う。相互作用ばねは、群杭効果を考慮し3次元薄層要素法によりばね定数を評価し、杭と地盤との相対変位により生じる非線形性と、液状化層では更に過剰間隙水圧の発生による有効応力の低下による非線形性を考慮している^{3),4)}。本解析では橋脚、杭体は、曲げのみに非線形性を考慮する。橋脚の曲げモーメントMと曲率φの関係（M—φ関係）は、道路橋示方書・同解説V耐震設計編（平成2年）に基づき求めた。コンクリートの圧縮強度は240kgf/cm²、最大圧縮ひずみは0.35%とし、鉄筋の引張強度は3500kgf/cm²とした。復元力特性は橋脚の高さに応じて3折れ線のDegrading Tri-linearモデルを用いる。鋼管杭のM—φ関係は、長期軸力を考慮し、Bi-linearモデルを用いる。また基礎の根入れ

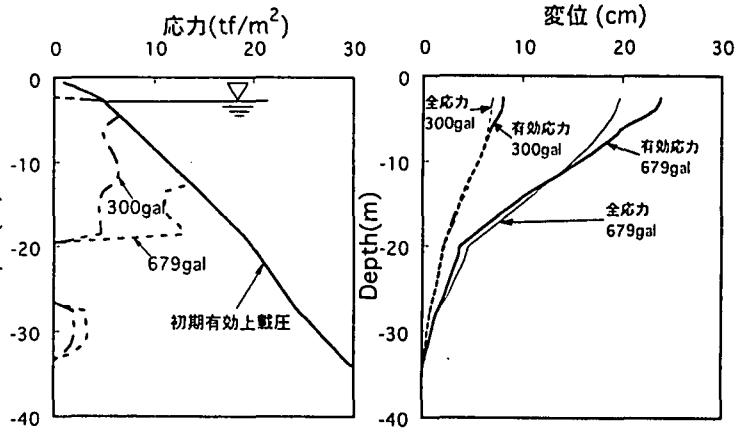


図-3 過剰間隙水圧

図-4 地盤の最大相対変位

は2.0mと浅いことから、基礎の根入れ効果は考慮しない。

4. 解析結果

(1) 自由地盤の地震応答解析

図-3に、有効応力解析による過剰間隙水圧の最大値分布を初期有効上載圧とともに示す。最大加速度679gal入力の場合では、GL-19m以浅で過剰間隙水圧の上昇が著しく、GL-13m以浅の範囲でほぼ液状化している。300gal入力の場合では、GL-5m以浅の範囲でほぼ液状化している。図-4に、全応力解析と有効応力解析によって得られた、杭下端位置を基準とした地盤の最大相対変位を示す。679gal入力では、地盤の応答変位は過剰間隙水圧の上昇が著しいGL-19m以浅の埋土層で急激に増加し、杭頭付近で全応力解析では約20cm、有効応力解析では約24cmの変位が発生している。300gal入力では、全応力解析、有効応力解析とも679gal入力と比較して、GL-19m以浅の埋土層の応答変位の急激な増加は見られない。

(2) 橋脚—杭基礎—地盤系の地震応答解析

a) 杭応力について

図-5に、橋脚及び杭体に非線形性を考慮した時の杭の最大曲げモーメントの深さ方向の分布を示す。入力レベルに拘わらず、杭頭部で大きな曲げモーメントが発生している。特に、679gal入力では、全塑性モーメント(My)134tf・mを超える値となっている。また、液状化層と非液状化層の境界であるGL-19mにおいても、679gal入力ではMyは超えないものの大きな値となるが、300gal入力では679gal入力の1/4程度の値となっている。これは、679gal入力ではGL-19m付近で地盤の応答変位が急激に増加しているが、300gal入力では応答変位の急激な増加が見

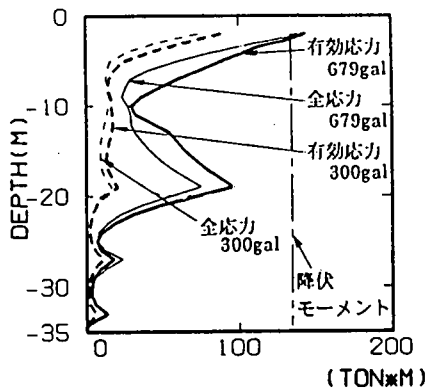


図-5 杭応力の比較
(杭：非線形)

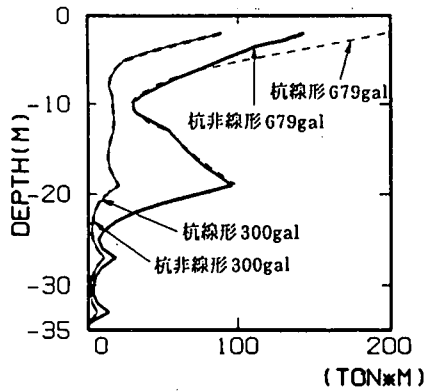


図-6 杭応力の比較
(有効応力解析)

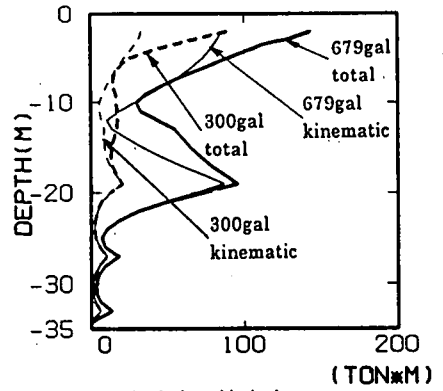


図-7 地震時の杭応力
(有効応力解析、杭：非線形)

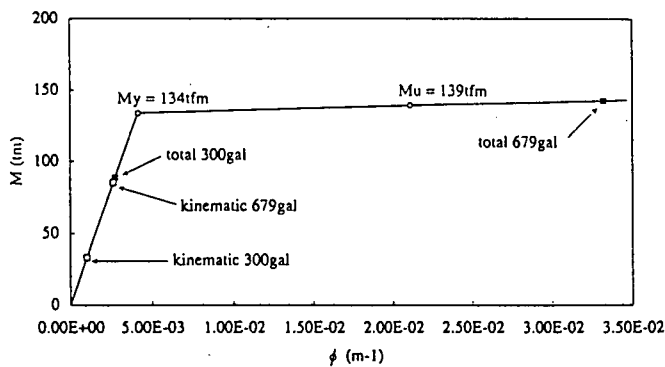


図-8 杭頭における最大曲げモーメントと曲率の関係
(有効応力解析)

られないためである。

また、全応力解析と有効応力解析を比較すると、杭の曲げモーメントの大きさは、有効応力解析が全応力解析よりも大きい値となっている。これは、有効応力解析と全応力解析において、図-4に示した地盤の変位応答に差があること、及び有効応力解析では過剰間隙水圧の上昇により地盤剛性が低下し、相互作用ばねの値も低下していることによる。

次に、図-6に有効応力解析における、杭体を線形とした時の杭の最大曲げモーメントの深さ方向の分布を、杭体を非線形とした場合と比較して示す。300gal入力では杭体が線形域であるため、杭体の線形と非線形による差はないが、679gal入力では杭頭部で線形とした時の曲げモーメントが大きくなっている。

図-7に、有効応力解析において、橋脚の質量をゼロとして求めた地盤震動のみによる杭応力(kinematic)と、全体系モデルの杭応力(total)の比較を示す。679gal入力では、杭頭部において、地盤震動による応力と橋脚の慣性力による応力は同程度となる。一方、GL-19m以深では地盤震動による応力がそのほとんどを占めている。300gal入力では、杭頭部においては、橋脚の慣性力による応力が大きくな

るが、GL-19m以深では地盤震動による応力が最大杭応力の値となっている。

図-8に、杭頭部におけるM-φ関係を示す。ここで、Muは局部座屈を生じるときのモーメントである。679gal入力では、地盤震動のみによる曲げモーメント(kinematic)はMyを超えないが、全モーメント(total)はMuを超えるモーメントが発生している。なお、300gal入力では、Myを超えていない。

b)橋脚の応答について

図-9、図-10に、橋脚の最大曲げモーメント分布及び最大加速度分布を示す。図-9より、橋脚が塑性化する高さを比べると、全応力解析679gal>全応力解析300gal>有効応力解析679gal>有効応力解析300galの順で高くなっている。これは、図-10に示す橋脚の最大加速度の大きさの順と一致している。入力レベルの違いにより、杭応力には顕著に差が現れていたが、橋脚の応力には大きな差は見られない。

また、679gal入力では、全応力解析と有効応力解析の応答差が大きくなっている。これは、図-11に示す橋脚の質量をゼロとした場合の杭基礎の応答から求めた橋脚への有効入力動の加速度応答スペクトル(h=0.05)の比較から、300gal入力では地盤の全応力解析と有効応力解析による応答の差が小さいが、679gal入力の有効応力解析では、液状化による地盤の加速度応答の低減により、基礎入力動も全応力解析に比べて小さくなったためである。

次に、図-12に有効応力解析において杭体を線形及び非線形とした時の橋脚の最大加速度分布を示す。橋脚の加速度応答は、300gal入力では杭体が線形域であるため両結果に差はないが、679gal入力では杭体の非線形性により、橋脚の応答は低減することが分かる。

図-13に、橋脚天端にかかる荷重Pと変位δの関係を表す3折線上に、地震応答解析結果より求まる

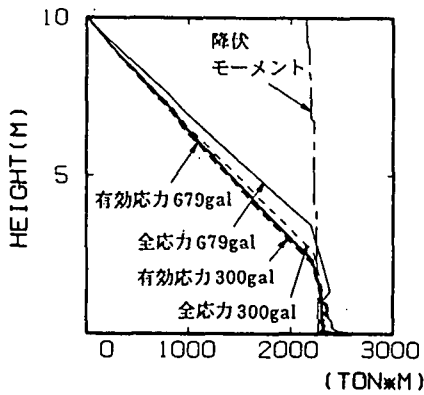


図-9 橋脚応力の比較
(杭：非線形)

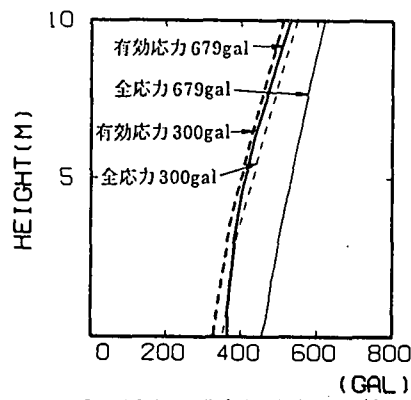


図-10 橋脚の最大加速度の比較
(杭：非線形)

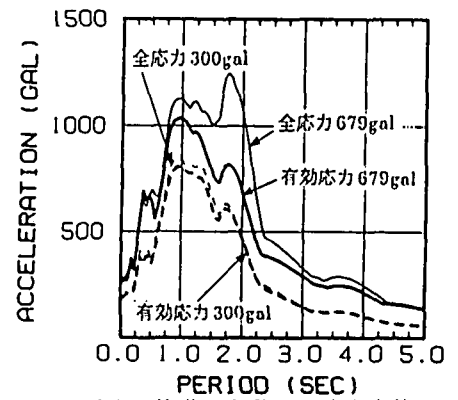


図-11 基礎入力動の加速度応答スペクトル (杭：非線形)

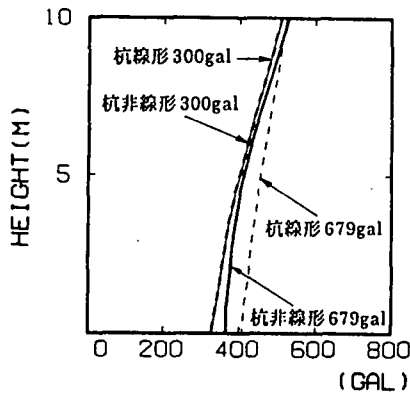


図-12 橋脚の最大加速度の比較 (有効応力解析)

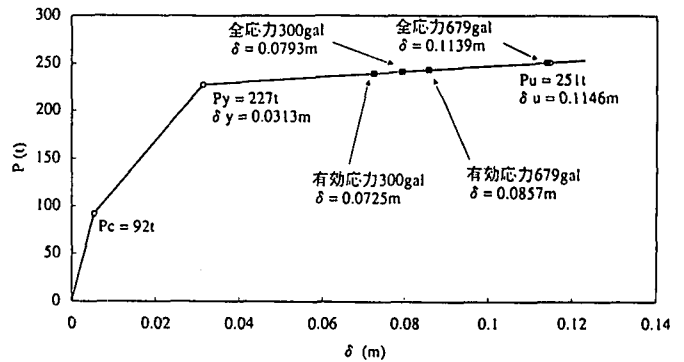


図-13 橋脚天端における水平力と水平変位の関係

橋脚天端と橋脚下端の変位差の最大値をプロットして示す。ここで、 P_c はコンクリートにひび割れが発生するときの応力、 P_y は鉄筋が降伏するときの降伏耐力、 P_u はコンクリートが圧縮縁において終局ひずみに達するときの終局耐力を示している。これより、300gal 入力時、679gal 入力時とも橋脚の応力は降伏耐力を越えているが、終局耐力以下であることが分かる。また、679gal 入力においては、有効応力解析による塑性率 $\mu = 2.73$ は、安全率 $\alpha = 1.5$ とした場合の許容塑性率 $\mu_s = 1 + (\delta_u - \delta_y) / \alpha \delta_y = 2.78$ より小さくなるが、全応力解析による塑性率 $\mu = 3.64$ は許容塑性率を越えていることが分かる。

5. まとめ

非線形・液状化地盤中の杭支持橋脚の地震応答解析を実施し、大地震時の杭応力と橋脚の応答について検討した。本研究から得られた主な結論は以下のとおりである。

- ① 入力レベルの違いにより、地盤の液状化範囲及び程度が異なる。入力レベルが大きくなると地盤の応答変位の増大及び有効応力の低下により、杭応力と橋脚の応答に大きな影響を及ぼす。
- ② 杭応力は、過剰間隙水圧が上昇し地盤変位が大きくなる液状化地盤で大きくなる。一方、橋脚の

応力及び加速度応答は、過剰間隙水圧の上昇を考慮しない方が大きくなった。

- ③ 液状化地盤では、杭応力は杭頭部及び液状化層と非液状化層の境界付近で大きくなる。杭頭部での杭応力は、地盤震動による応力と橋脚及び上部工の慣性力による応力の占める割合はほぼ同程度である。また、地盤中の液状化層と非液状化層の境界付近の杭応力は、地盤震動による応力がそのほとんどを占める。
- ④ 杭の非線形性を考慮すると、杭を線形とした場合に比べて、杭応力及び橋脚の応答は小さくなる。

参考文献

- 1)地盤工学会：阪神・淡路大震災調査報告書(解説編)，1996.3. 2)関西地震観測研究協議会：関西地震観測研究協議会による報告 3)宮本裕司ほか：1995年兵庫県南部地震の観測記録を用いた液状化地盤における杭基礎構造物の応答に関する解析的検討，日本建築学会論文報告集，第493号，pp.23～30，1997.3. 4)宮本裕司ほか：非線形，液状化地盤における杭基礎の地震時応答性状に関する研究，日本建築学会構造系論文報告集，第471号，pp.41～50，1995.5. 5)Finn W.D.L.ほか：An Effective Stress Model for Liquefaction, Jour. of the Geotechnical Eng. Division, ASCE, Vol.103, No.GT6, pp.517～533, 1977.