

液状化が上部非液状化砂層に及ぼす影響

液状化 有効応力解析 過剰間隙水圧

ジャパンパイル 正会員 ○小林恒一  
東北学院大学 国際会員 吉田望  
関東学院大学 国際会員 規矩大義

1. はじめに

扇状地のような地盤では、表層の密な砂地盤と下部の粘土地盤の間に液状化する可能性の高い砂地盤が堆積していることは多々ある。杭の設計において、このような地盤で中間層が液状化した場合の上部砂層の取り扱い、各種の設計基準・指針類でも明確に規定されておらず、実務では液状化層より上層の砂層はすべて液状化層と評価し地盤反力係数を低減した設計を行なう事が多いが、これは過剰間隙水圧の消散に伴う二次液状化が評価できないので安全側の設定をしていると考えられる。本論では上部砂層と下部砂層の2層地盤モデルに対して、1次元の全応力・有効応力解析を行い、液状化判定および過剰間隙水圧の消散が上部砂層の応力一ひずみ関係に及ぼす影響を解析的に検討した。

2. 解析概要

地盤モデルを図-1に示す。層厚は42mとし、GL-2.0m～-13.0mを液状化検討対象地盤と考え、上部砂層(GL-2.0m～-9.0m)と下部砂層(GL-9.0m～-13.0m)の2層地盤モデルと考えた。また、その下に約29mの粘性土層

表-1 解析定数

深度(m)	土質	Fc(%)	G <sub>0</sub> (kN/m <sup>2</sup> )	γ <sub>0.5</sub>	mv(m <sup>2</sup> /kN)	k(m/sec)
1.0	表土	0	19760	1.6 × 10 <sup>-3</sup>	2.0 × 10 <sup>-5</sup>	2.0 × 10 <sup>-4</sup>
2.0	表土	0	19760			
3.0	細砂	10	62370			
4.0	細砂	10	68040	0.8 × 10 <sup>-3</sup>	5.0 × 10 <sup>-5</sup>	5.0 × 10 <sup>-5</sup>
5.0	細砂	10	73710			
6.0	細砂	10	81000			
7.0	細砂	10	86670			
8.0	細砂	10	92340			
9.0	細砂	10	96390			
10.0	シルト質細砂	20	38850	mv:体積圧縮係数	k:透水係数	
11.0	シルト質細砂	20	40500			
12.0	シルト質細砂	20	42150			
13.0	シルト質細砂	20	43810			

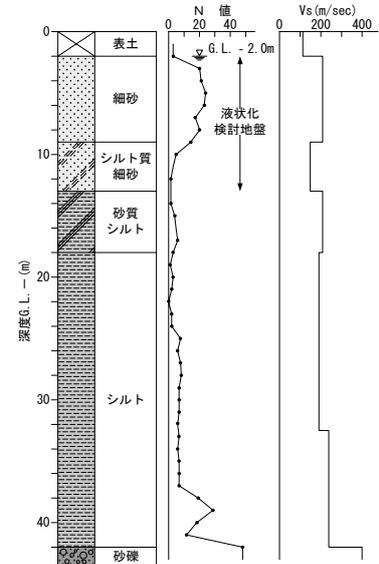


図-1 地盤概要

が堆積する地層構成とした。N値およびせん断波速度Vsは図-1に示す通りである。主な解析定数を表-1に示すが、砂層の初期せん断剛性G<sub>0</sub>は拘束圧依存性を考慮し、それ以深の粘土層の初期せん断剛性G<sub>0</sub>はせん断波速度Vsに対して一定値とした。せん断強度τ<sub>f</sub>は初期せん断剛性G<sub>0</sub>と基準ひずみγ<sub>0.5</sub><sup>1)</sup>から算定し(粘土層の基準ひずみγ<sub>0.5</sub>は1.4 × 10<sup>-3</sup>とした)、砂層の内部摩擦角φはせん断強度τ<sub>f</sub>と有効拘束圧σ<sub>v0'</sub>から求めた。液状化強度は、日本建築学会・建築基礎構造設計指針<sup>2)</sup>を用いて、補正Na値から算定される液状化抵抗比を参考にして評価した。

入力地震動は、平成12年建築基準法告示1461号で示された解放工学的基盤の地震動加速度応答スペクトルに適合するようにして作成された模擬地震波<sup>3)</sup>(図-2参照)とし、2次設計レベルに相当する地震波と考えた。また、加速度振幅を1/5にした地震波を1次設計レベルとして解析に用いた。解析は、1次元有効応力地震応答解析プログラム「YUSAYUSA-2」<sup>4)</sup>を用いて、双曲線モデルを用いた全応力および有効応力解析を行った。なお、有効応力解析において、過剰間隙水圧の消散の影響を検討するため、透水性の有無をパラメータとした2種類の解析を行った。

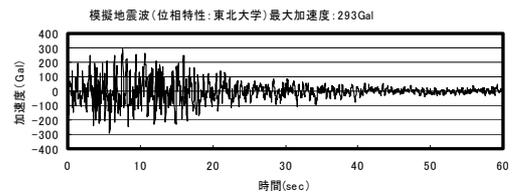


図-2 入力地震動

3. 解析結果

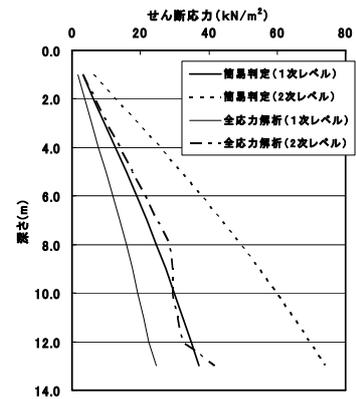
3.1 液状化判定結果

表-2は、1次設計レベルと2次設計レベルにおける液状化判定結果をまとめたものである。簡易判定(F<sub>L</sub>値)は地表面最大加速度を1次設計レベルで200cm/sec<sup>2</sup>、2次設計レベルで400cm/sec<sup>2</sup>として算定したものである。この表から、1次および2次設計レベルともに、全応力解析(F<sub>L</sub>値)は簡易判定(F<sub>L</sub>値)に比べて全体に大きな値を示した。ここで、外力に相当する地中せん断応力分布の比較を、全応力と簡易判定のそれぞれについて図-3に示す。1次、2次設計レベルとも、全応力解析におけるせん断力分布は簡易判定を下回る結果であることがわかる。これは、全応力解析で得られた

表-2 液状化判定結果

深さ(m)	簡易判定(F <sub>L</sub> 値)		全応力解析(F <sub>L</sub> 値)		有効応力解析(過剰間隙水圧比)			
	1次レベル	2次レベル	1次レベル	2次レベル	透水性有り		透水性無し	
					1次レベル	2次レベル	1次レベル	2次レベル
3.0	3.79	1.90	6.26	3.51	0.04	0.12	0.01	0.01
4.0	3.40	1.70	5.54	3.11	0.09	0.31	0.01	0.01
5.0	3.19	1.59	5.12	2.87	0.12	0.43	0.01	0.01
6.0	3.06	1.53	4.85	2.72	0.15	0.52	0.01	0.02
7.0	2.99	1.49	4.67	2.61	0.17	0.59	0.01	0.02
8.0	2.94	1.47	4.54	2.53	0.19	0.65	0.01	0.02
9.0	1.38	0.69	2.13	1.28	0.20	0.70	0.01	0.02
10.0	0.73	0.37	1.13	0.74	0.29	0.97	0.49	0.97
11.0	0.94	0.47	1.46	0.98	0.35	0.97	0.49	0.97
12.0	0.72	0.36	1.12	0.77	0.36	0.97	0.49	0.97
13.0	0.66	0.33	0.99	0.59	0.34	0.97	0.48	0.97

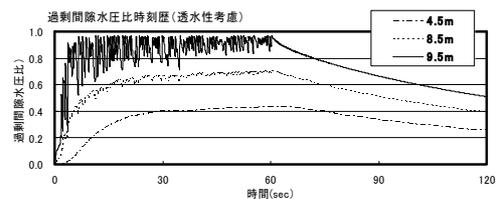
地表面最大加速度が1次設計レベルで約100m/sec<sup>2</sup>、2次設計レベルで約200 m/sec<sup>2</sup>であり、簡易判定で用いた地表面加速度の約半分となり、せん断応力が小さく評価された。また、文献<sup>5)</sup>や既往の研究成果<sup>6)</sup>から、中間層に軟弱層がある場合に地震動の上限値が存在するとの報告もあり、その影響を受けたものと考えられる。また、有効応力解析では、各層の過剰間隙水圧比の値を表—2中に示した。この結果から、1次設計レベルの過剰間隙水圧比( $\Delta u/\sigma_{v0}'$ )は最大0.49となり、2次設計レベルでは下部砂層(GL—9.0～13.0m)が液状化する結果となった。また、透水性に着目した場合、透水性を考慮しない解析では、2次設計レベルでの上部砂層の過剰間隙水圧比( $\Delta u/\sigma_{v0}'$ )は0.02以下であった。一方、透水性を考慮した解析では、上部砂層の過剰間隙水圧比( $\Delta u/\sigma_{v0}'$ )は最大0.7まで上昇しており、間隙水圧の消散の影響で上部砂層の過剰間隙水圧比に差異が見られた。



図—3 せん断応力分布

### 3.2 過剰間隙水圧比およびせん断応力—せん断ひずみの関係

図—4は、透水性を考慮した場合の過剰間隙水圧比の時刻歴波形(2次設計レベル)を示す。図中には、GL-4.5m, 8.5m, 9.5mの3地点の時刻歴波形を示す。GL-9m以深の下部砂層は液状化しているため、上部砂層(GL-4.5m, 8.5m)は下部砂層の過剰間隙水圧の消散に伴い、時間とともに徐々に過剰間隙水圧が上昇している事がわかる。また、図—5はGL-4.5m, 8.5mの2地点のせん断応力—せん断ひずみの関係を示す。この解析結果から、透水性を考慮した場合、過剰間隙水圧の消散の影響を受け、有効応力の低下に伴いせん断剛性が透水性を考慮しない場合に比べて若干低下しているが、液状化層のような急激な変化は見られなかった。また、液状化層の直上の上部砂層のせん断剛性の低下の影響もわずかであった。



図—4 過剰間隙水圧比の時刻歴波形

### 4. まとめ

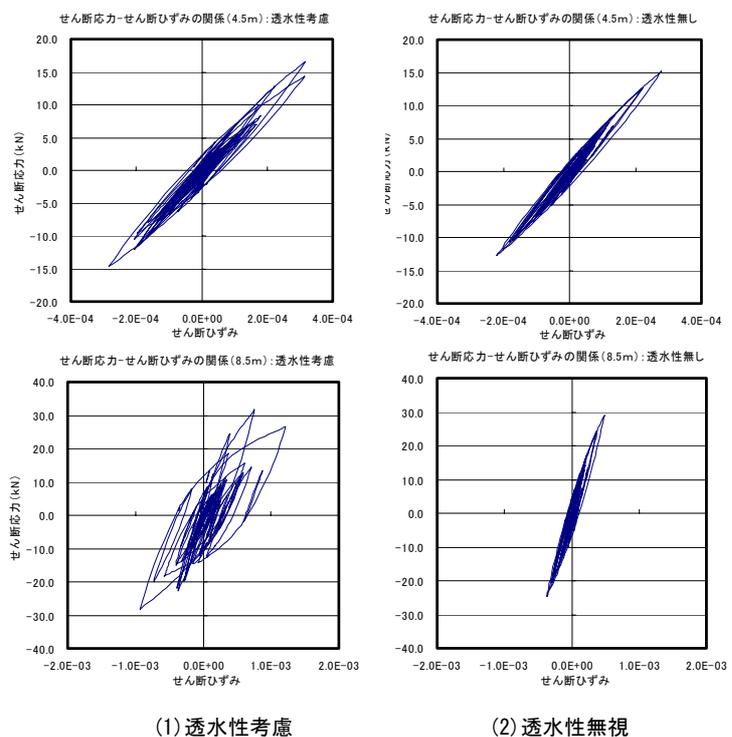
中間層に粘土地盤や液状化する可能性の高い砂地盤が堆積している地盤の場合、文献<sup>5),6)</sup>に記載されているように、軟弱層の非線形化により地表面最大加速度は頭打ちになる傾向が見られた。その結果、通常の簡易な液状化判定は全応力・有効応力解析に基づく判定に比べて、安全側すぎる結果となった。また、文献<sup>7)</sup>では、1次設計レベルにおける液状化検討用の地表面加速度は100 cm/sec<sup>2</sup>程度が適当であると記述されているが、本解析地盤でも、同程度の値が妥当であると考えられる。

さらに、透水性を考慮した有効応力解析から、下部砂層が液状化する場合、上部砂層の過剰間隙水圧は上昇するが、液状化層として評価するほどの大きな剛性低下は見られず、液状化層と評価して地盤反力係数を低減した設計は安全側すぎると思われる。ただし、これらの解析は地盤定数の設定や入力地震動の影響を受けるものと考えられるため、これらの影響を考慮した検討は必要であると思われる。

なお、過剰間隙水圧の消散に伴う間隙水圧の上昇を考慮した砂地盤の要素試験を行い、せん断応力—せん断ひずみの関係を調査し、二次液状化地盤における地盤反力係数のモデル化について検討を行う予定である。

<参考文献>

- 1) 日本防災協会：動的設計用入力地震動の設定に関する検討報告書、平成4年3月。
- 2) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針、2002.4。
- 3) 日本建築構造技術者協会：「建築構造の計算と監理(付 JSCA 波数値データ)」, 2002.6。
- 4) 吉田望, 東畑郁生：YUSAYUSA-2, STIMDL-2 理論と使用法(改訂版 Version2.10), 平成17年7月
- 5) 小林恒一, 吉田望, 規矩大義：地盤の拘束圧依存性が液状化判定に及ぼす影響, 第40回地盤工学研究発表会, pp2263～2264, 2005.7。
- 6) 末富岩雄, 澤田純男, 吉田望, 土岐憲三：地盤動の上限値と地盤のせん断強度の関係, 土木学会論文集, No. 654, I-52, pp.195～206, 2000.7
- 7) 日本建築学会：建物と地盤の動的相互作用を考慮した応答解析と耐震設計, 2006.2。



図—5 せん断応力—せん断ひずみの関係