

液状化による地盤の流動の 簡易解析法に及ぼす影響要因の検討

三輪 滋¹・嶋本栄治²・池田隆明¹

¹正会員 飛鳥建設株式会社 技術研究所 地盤耐震研究室 (〒270-0222 千葉県東葛飾郡関宿町木間ヶ瀬 5472)

²正会員 飛鳥建設株式会社九州支店中岳ダム作業所(〒899-8600 鹿児島県會於郡末吉町南之郷 10855-1)

液状化による地盤の流動を簡易に評価する手法に液状化した地盤の剛性を考慮した静的FEMによる自重解析法がある。本検討では、様々なパラメータが評価結果に及ぼす影響を兵庫県南部地震で被災した護岸を対象として比較検討した。検討したパラメータは、液状化層厚、液状化層のせん断剛性の低下程度、背後地盤のモデル化領域の大きさ、液状化層の上の非液状化層のせん断剛性、などである。その結果、液状化層のせん断剛性や層厚は変位量に大きな影響を及ぼすこと、液状化層に対して液状化層上部の非液状化層のせん断剛性の比率が大きいと背後地盤の遠方にまで地盤変位の影響が及ぶことなどがわかった。また、2つの地点の実測値はこれらの検討で評価できるが、パラメータの設定が重要であることがわかった。

Key Words : liquefaction, lateral flow, shear module, quay wall, strong ground motion

1. はじめに

護岸近傍で液状化が生じた場合には、地盤の流動により護岸および背後地盤に水平変位、鉛直変位が発生し、被害に結びつく。最近では、液状化による地盤の流動を簡易に評価する手法として液状化した地盤の剛性を考慮した静的FEMによる自重解析が行われることが多い。ここでは、様々なパラメータが評価結果に及ぼす影響を、兵庫県南部地震で被災した護岸を対象として比較検討した。検討したパラメータは、液状化層の下の粘性土層のせん断剛性、液状化層厚、液状化層のせん断剛性の低下程度、液状化層上部の非液状化層のせん断剛性、モデル化領域の大きさ、液状化層のポアソン比などである。

表-1(a) 地盤Aの非液状化時の地盤物性

箇所		弾性係数 E(×9.8 kN/m ²)	ポアソン比 ν	有効単位体積重量 γ' (×9.8kN/m ³)
背後地盤 (埋土層)	地下水位上	2800	0.33	1.80
	地下水位下	2800	0.33	0.77
置換部	背後側	2800	0.33	0.77
	海側	2800	0.33	0.77
粘性土層	背後側	2400	0.45	0.57
	海側	9300	0.45	0.57
砂礫層1	背後側	19500	0.33	0.77
	護岸構造直下	26000	0.33	0.77
	海側	8000	0.33	0.77
砂礫層2	背後側	44000	0.33	0.77
	海側	25000	0.33	0.77
マウンド部	背後側	2800	0.33	0.77
	護岸構造直下	2800	0.33	0.77
	海側	484	0.33	0.77
護岸構造物	地下水位上	2.5×10 ⁶	0.167	2.20
	地下水位下	2.5×10 ⁶	0.167	1.17

表-1(b) 地盤Aの液状化後の地盤物性

箇所	液状化に 対する抵抗率の平均値 F _l	せん断剛性 低下率 C _g /C _{g0}	せん断剛性 E _g (kN/m ²)	弾性係数 E ₀ (kN/m ²)	ポアソン比 ν	
背後地盤(埋土層)地下水位上		1/3	352,700	938,10	0.330	
背後地盤(埋土層)粘土層上	0.79	1/448	2,086	6,25	0.499	
地下水位下	0.84	1/374	2,497	7,49	0.499	
置換部	背後側	0.97	1/133	7,016	21,03	0.499
	海側	0.63	1/752	1,241	3,72	0.499

表-1(c) 地盤Bの初期地盤物性

地質番号	土質名	層厚 H(m)	最下層深さ G.L.(m)	単位体積重量 γ (×9.8kN/m ³)	せん断波速度 Vs(m/s)
1	埋立土	2.0	2.0	1.8	125
2	埋立土	3.0	5.0	1.8	125
3	埋立土	3.5	8.5	1.8	170
4	砂	1.7	10.2	1.8	200
5	砂	1.7	11.9	1.8	250
6	砂質シルト	4.4	16.3	1.7	120
7	礫質砂	3.5	19.8	1.9	310
8	礫質砂	10.7	30.5	1.8	350

2. 検討対象の地盤

検討対象は1995年兵庫県南部地震で被災した神戸市東灘区の二つの護岸・岸壁である¹⁾²⁾。それぞれを地盤A¹⁾、B²⁾とする。被災の概要などは、それぞれの参考文献に譲る。図-1に示すような護岸および地盤のうち、地盤のみをモデル化する。基本的には、それぞれ表-1に示す地盤物性値を与え、様々な影響要因を考慮するため表-2のような検討ケースを考えた。以下では、解析結果の評価は、それぞれの検討ケースについて護岸からの距離と地表面の水平変位の関係に注目して検討する。

3. 影響要因の検討

(1) 粘性土層のせん断剛性の影響

地盤Aに関して、液状化層の下に位置する粘性土層のせん断剛性を初期値の1/16とした場合(粘性土層と液状化層のせん断剛性の初期値はほぼ同程度であり、基本ケースでは粘性土層は初期剛性を用いている)について基本ケースと比較して図-2に示す。粘性土層のせん断剛性の違いによらず、水平変位はほぼ同様の値を示し、影響はほとんどないと考えられる。液状化層の剛性が初期値の1/600程度であること、粘性土層はせん断剛性の低減があっても相対的には大きな剛性を示していることから、粘性土層の剛性の影響が表れにくいと考えられる。

(2) 液状化層厚の影響

地盤Aに関しては、基本モデルは液状化層が置換砂層の上端よりも深い位置に設定されている。液状化層厚の影響を見るため、埋立層と粘土層の境界を置換砂層の上面レベルと同等とした解析を実施した。結果を基本モデルと比較して図-2に示す。液状化層境界を変えたモデルでは、全体に水平変位は抑制される。液状化層厚が16mから11mと約2/3になると、地盤の水平変位も3mから2mと約2/3となることから、液状化層の層厚の違いは液状化層のせん断剛性がほぼ一定であれば、地盤の水平変位の累積にはその層厚にほぼ比例して影響すると考えられる。このように、層厚の違いは水平変位量に関しては大きな影響要因と考えられる。一方、護岸変位を基準とした護岸遠方の変位分布は、やや早く減衰する傾向となるものの、大きな違いはない。液状化層厚は水平変位と護岸からの距離の関係を支配する大きな要因ではないことがわかる。

(3) 液状化層のせん断剛性の影響

地盤Aにおいて、液状化層の剛性を3倍とした場合の結果を図-3に示す。液状化の剛性を3倍としたことで水平変位は反比例的に約1/3に抑制される。水平変位には液状化層の剛性の影響が大きく、液状化した層の剛性の評価が重要であることがわかる。しかし水平変位と距離の関係を護岸変位で基準化すると液状化層の剛性が1/3の場合とは、ほとんど違いがない。

図-4に地盤Bにおける、液状化層のせん断剛性が地盤の変形に及ぼす影響を比較して示す。この比較では表層の非液状化層のせん断剛性はいずれのケースも液状化層のせん断剛性の10倍の一定値としている。護岸および背後地盤の変形は液状化層の剛性低下の程度に依存して増加する。一方、護岸の変位で変位を基準化すると、どの場合も護岸からの距離と変位の減少の関係は同じとなる。護岸背後地盤への影響は同程度であり変位もほぼ同じ地

表-2(a) 地盤Aの検討の組み合わせ

A-0	基本モデル
A-1	A-0の粘土層のGを1/16
A-2	A-0のデータで埋土層と粘土層の境界を置換砂上に変更
A-3	A-0の液状化層のGを3倍
A-4	A-0のデータで護岸から123.3mの位置までのモデル
A-5	A-0のデータで非液状化層を液状化層の100倍のせん断剛性
A-6	A-0のデータで非液状化層を液状化層の10倍のせん断剛性
A-7	A-0のデータで非液状化層を液状化層と同じせん断剛性

表-2(b) 地盤Bの検討の組み合わせ(せん断剛性の低下率)

埋立土 非液状化層	B-1 1/10	B-2 1/10	B-3 1/1000	B-4 1/100	B-5 1/10	B-6 1/50	B-7 1/100	B-8 1/500	B-9 1/10	B-10 1/50	B-11 1/60	B-12 1/300
埋立土 液状化層	1/100		1/1000			1/500				1/300		
砂層	1/100		1/1000			1/500				1/300		
砂質シルト						1/10						
礫質砂						1/2						
礫質砂						1/2						

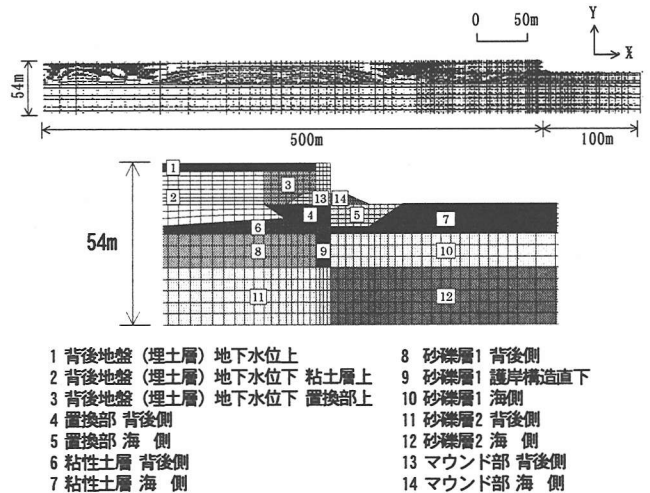


図-1(a) 地盤Aの解析モデル

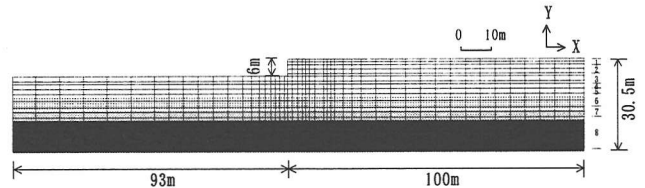


図-1(b) 地盤Bの解析モデル

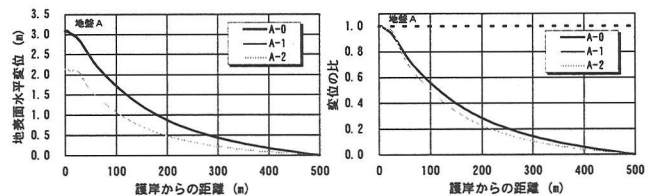


図-2 液状化層下の粘性土層のせん断剛性、液状化層厚の影響

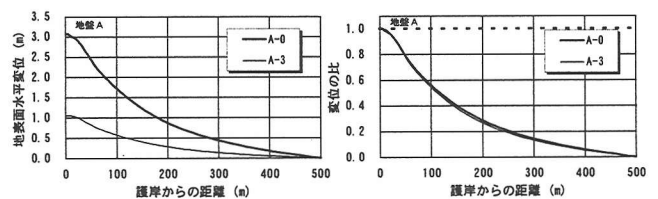


図-3 液状化層のせん断剛性の影響

点で収束することになる。水平変位量の絶対値は、液状化層のせん断剛性に大きく影響を受けること、また、背後地盤の変位分布形状(変位の減衰傾向)は、液状化層とその上の非液状化層のせん断剛性比によってきまることがわかる。なお、図示できないが、深さ方向の変位分布も同様である。

(4) モデル化領域の影響

地盤Aに関して、モデル化領域の影響を見るため、護岸から120mまでのモデルの検討を実施した。結果を図-5に示す。護岸から120mまでのモデルでは、120mで水平変位が収束し、境界位置まで直線的に減少している。境界が500mのモデルでは変位は120mでは収束せず、遠方まで及んでいる。また、境界位置が近い場合には護岸での変位そのものも小さくなっており、境界の影響が大きいことがわかる。特に、変位が遠方までおよぶ水平変位分布があらわれている場合は、側方の境界位置を十分に大きく取る必要があることを示している。図-6に示す、地盤Bの結果でも同様である。

(5) 液状化層上の非液状化層のせん断剛性の影響

地盤Aの基本モデルは、液状化層上の非液状化層のせん断剛性を液状化層の約170倍と大きくとっている。そこで非液状化層のせん断剛性の影響の検討を行った。その結果を図-7に示す。護岸付近の地表変位は液状化層上部のせん断剛性が大きいほど小さくなっている。しかし、液状化層のせん断剛性がその値にほぼ比例して水平変位量に影響するのに対し、液状化層上部の非液状化層のせん断剛性はオーダーの違いに比例して影響するほど大きな影響はない。一方、護岸から50m程度以上はなれると、逆に液状化層上部のせん断剛性が大きいほど地表の変位が大きくなり、変位が遠方までおよぶ。これを護岸変位で基準化してその距離減衰を比較するとその傾向はより鮮明となる。液状化層上部の非液状化層のせん断剛性が液状化層と同程度あるいは10倍程度では変位の影響は100m~200m程度で収束するが、100倍あるいは170倍というオーダーになるとその影響は400m~500mまでおよぶ。境界をさらに遠くにおけば、これ以上に影響がおよぶ可能性もあることがわかる。

地盤Bの結果を図-8に示すが、同様の傾向を示す。上部の非液状化層のせん断剛性が液状化層と同じ場合は60m付近で変位が収束するが、10倍の場合は100m付近まで影響がおよぶ。さらにそのせん断剛性が大きくなると遠方の変位が大きくなり、この解析では100m位置に境界を設けているためその境界条件で変位がゼロとなっている。液状化層のせん断剛性が初期剛性の1/1000の場合も1/500の場合も、液状化層に対する非液状化層のせん断剛性の比が同じであれば、護岸変位で基準化した護岸

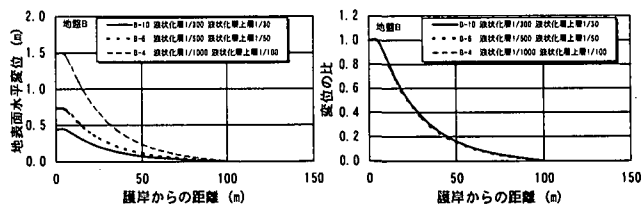


図-4 液状化層のせん断剛性の影響

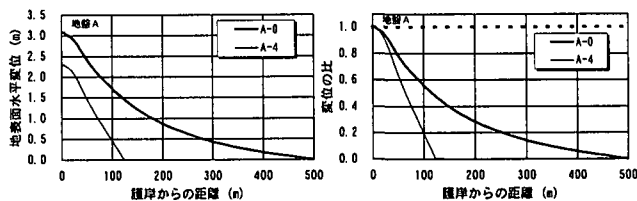


図-5 モデル化領域の影響

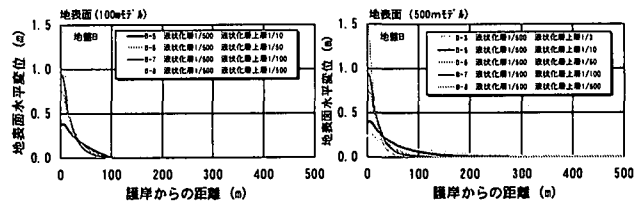


図-6 モデル化領域の影響

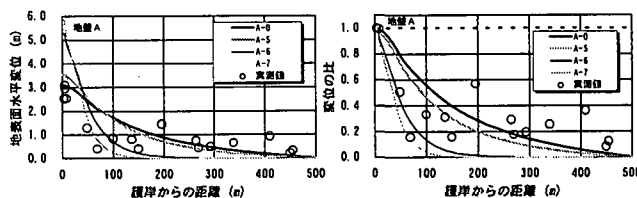


図-7 液状化層上の非液状化層のせん断剛性の影響

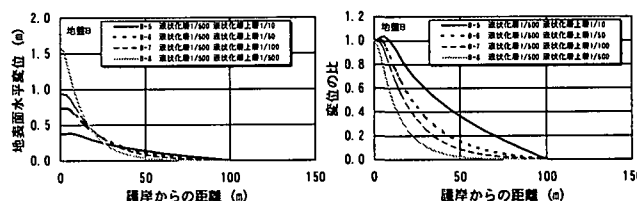


図-8 液状化層上の非液状化層のせん断剛性の影響

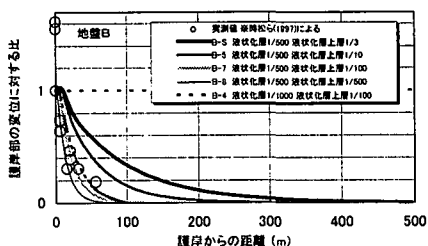


図-9 地盤Bの実測値との比較

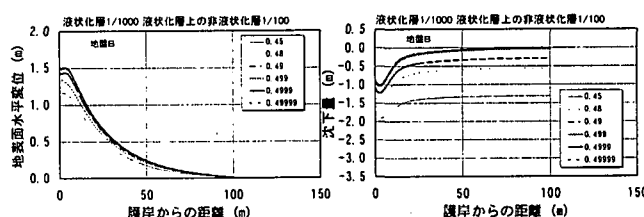


図-10 液状化層のポアソン比の影響

からの距離と変位の関係は同じである。ただし、非液化化層のせん断剛性が、液状化層のせん断剛性の100倍程度と極めて大きい場合には、相対的に小さな液状化層のせん断剛性については倍半分程度の変動は、水平変位量の絶対値には影響するものの、背後地盤の変位分布形状への影響は小さくなる。

モデルの境界が護岸から100mの位置では境界の影響が見られることから境界位置を500mとしたモデルを作成して検討した。非液化化層が初期剛性の1/500のケースの結果を図-6に示す。非液化化層のせん断剛性が非液化化層の10倍程度までは背後のモデル化の距離によらず護岸から100m程度で変位が収束するが、50倍では200mまで、150倍では400mまで影響がおよぶことがわかる。このように液状化層上の非液化化層のせん断剛性が液状化層に比べ大きくなるにしたがい、護岸背後への影響範囲が大きくなる事がわかる。

図-7に地盤Aの実測変位との比較を示す。この場合にはデータのばらつきがあるものの、遠方での変位を説明するには、非液化化層のせん断剛性が液状化層のせん断剛性の100倍から200倍程度とする必要があることがわかる。図-9に地盤Bの実測変位との比較を示す。この地点では護岸近傍の変位しかないが、護岸からの距離による変位の減衰傾向を見れば、非液化化層のせん断剛性は液状化層の10倍程度とした場合と整合的である。ただし、遠方でも同程度の変位が見られるとすれば、非液化化層のせん断剛性はもう少し大きい可能性もある。

表層の非液化化層のせん断剛性の設定に関しては、実測の地表面地盤変位に、液状化層の流動変位以外の成分（たとえば深い地盤構造での変位など）が含まれる可能性などを含め、さらに検討の余地がある。

(6)ポアソン比の違いの影響

液状化地盤のせん断剛性が初期値の1/1000、液状化層上の非液化化層が1/100（液状化層の10倍）の場合についてポアソン比を変えた場合の影響について検討した結果のうち、地表面の水平変位、地表面鉛直変位（沈下量）と護岸からの距離の関係を図-10に示す。水平変位に関してはポアソン比が0.49以上(特に0.499)であればほとんど違いが見られない。沈下量に関して見ると、0.49ではすべての地点で違いが見られる。護岸のない側の境界付近は理想的には側方の影響がなく自由地盤と考えられ、非排水では沈下が生じない。この部分については、鉛直変位は、0.499以上であればほとんどゼロであるが、0.49以下では30cm以上の値を示している。これらの結果から、液状化層のポアソン比については、0.499以上を設定すればよいものと考えられる。

4. まとめ

①液状化層の下の粘性土層のせん断剛性の影響

粘性土層のせん断剛性は液状化層に比べ大きいため、その変位に及ぼす影響は小さい。

②液状化層厚の影響

液状化層厚は液状化層の水平変位量に及ぼす影響が大きい。背後地盤の変位分布の減衰傾向への影響は小さい。

③液状化層のせん断剛性の影響

液状化層のせん断剛性は液状化層の水平変位に及ぼす影響が大きい。表層の非液化化層のせん断剛性が大きい場合には、背後地盤の変位分布の減衰傾向への影響は小さい。

④モデル化領域の影響（背後地盤側）

特に背後地盤の変位が遠方に及ぶ場合にはその影響が大きい。側方境界を十分遠くに設定する必要がある。

⑤非液化化層のせん断剛性の影響

液状化層上部の非液化化層のせん断剛性は、護岸背後地盤の変位の護岸遠方への変位分布に影響が大きい。液状化層上部の非液化化層のせん断剛性と液状化層のせん断剛性の比が、変位分布形状に大きく影響するが、表層のせん断剛性が100倍程度以上大きいときは、相対的に小さな液状化層のせん断剛性の影響は水平変位の絶対値には影響するものの、変位分布形状には影響は小さい。2地点の事例から、非液化化層と液状化層のせん断剛性の比は異なり、地盤Aでは100～200倍程度、地盤Bでは10倍程度を想定したとき、遠方での地盤変位と調和的である。

⑥ポアソン比は0.499以上を設定した場合には、変位分布は水平・鉛直とも、ほぼ同じ値となった。

謝辞：図表の作成に関しては鈴木重良氏の協力を得た。記して感謝いたします。

参考文献

- 1)東拓生,田村敬一：地盤の流動が橋梁基礎に及ぼす影響の解析的検討,土木技術資料,第43巻,2号,pp.52-57,2001.2.
- 2)大岡弘,飯場正紀,阿部秋男,時松孝二：孔中内視カメラと弾性波非破壊試験を併用した建物基礎の地震調査,土と基礎,Vol.44, No.3, pp.28-30, 1996.3.
- 3)時松孝次,大岡弘,社本康広,浅香美治：兵庫県南部地震の側方流動による杭の破壊・変形モード,日本建築学会構造系論文集,第495号, pp.95-100, 1997.5.