

浦安市地盤の弾塑性性状のモデル化とその一次元地震応答解析

室内試験, 粘性土, 構造 名古屋大学 ○中井健太郎, 中野正樹, 野田利弘, 山田正太郎, 村上孝弥, 村瀬恒太郎
(公財)地震予知総合研究振興会 浅岡顕

1. はじめに

著者らは東日本大震災で発生した甚大かつ非一様な浦安市の液状化被害のメカニズムを解明するために、陸側から海側へと基盤層が傾斜している地層構成に着目した多層系地盤の地震応答解析を実施してきた。そして、均質な地盤を仮定しても、地層構成/傾斜によって地盤変状が局所的かつ不均一に発生することを、仮想的な材料定数を用いて示し、多次元有効応力解析の必要性を強調してきた¹⁾。同時に、浦安市内の南北2地点(図1中のA, B地点)において、ボーリング調査および不攪乱試料の採取を行い、上述の数値解析と並行して、浦安地盤の物理特性・力学特性の把握を試みてきた^{2), 3)}。本稿では、調査・実験結果をもとに浦安地盤の弾塑性性状を把握するとともに、一次元地震応答解析を実施し、モデル化の妥当性を評価する。用いた解析コードは、砂から中間土、粘土までを同じ理論的枠組で記述する弾塑性構成式(SYSカムクレイモデル⁴⁾)を搭載した水～土骨格連成有限変形解析コード **GEOASIA**⁵⁾である。

2. 室内試験結果

浦安市内各所で実施されたボーリング調査の結果をまとめると⁶⁾、地層構成は表層から、浚渫・埋立土(B層)、沖積砂層(As層)、沖積粘土層(Ac層)、その下に洪積層と順に堆積している。各層の不攪乱試料および再構成試料を用いて物理試験および力学試験(非排水せん断, 非排水繰返しせん断, 変形特性試験, 標準圧密試験)を実施した。粒度分布を図2に示す。浦安市の特徴とも言える厚く堆積した沖積粘土層については、深度ごとに細かく標準圧密試験を実施して検討した結果、圧縮特性の違いから2種類に分割できることがわかった(図3)。また上部沖積粘土層(図3(a))については、端部で初期比体積が小さいのに対し、中央部では初期比体積が大きく「嵩張り」を有するため、さらに初期状態が異なる2層に分割した。材料定数(弾塑性パラメータ, 発展則パラメータ)はSYSカムクレイモデルを用いて、同一材料の複数の試験結果を一組の材料定数群で再現できるように、骨格構造の初期値とともに試行錯誤的に決定した。この時、原位置からの(理想的な)サンプリング過程も模擬する(乱れの影響を考慮する)ことで、単に室内試験結果の再現を行うだけでなく、自然堆積時の状態量も推定した⁷⁾。再現結果の例を図3～図5に、弾塑性性状の一覧を表1, 2に示す。

3. 一次元地震応答解析

2.の結果をもとに、図6に示すA, B地点を想定した鉛直方向の一次元モデルを作成した。初期状態に関しては、骨格構造の程度(構造, 過圧密, 異方性)や初期応力比は各層で均一とし、比体積を土被り圧に応じて分布させた。またA地点とB地点で材料定数は等しく、同一層内であれば骨格構造の程度は等しいとしてモデル化している。同図には観測結果および弾塑性定数から算出されるVsが併記してあるが、両地点ともに比較



図1 埋立て年代と液状化の有無

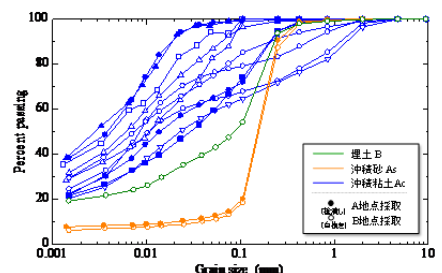


図2 粒径加積曲線

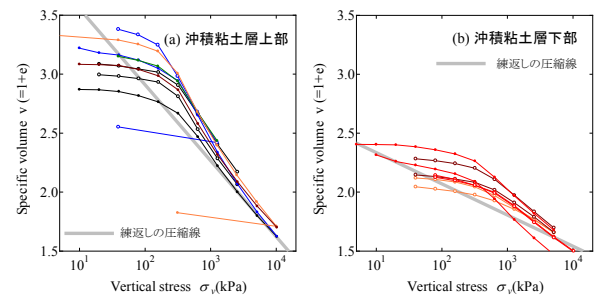


図3 Ac層上部と下部の標準圧密試験結果

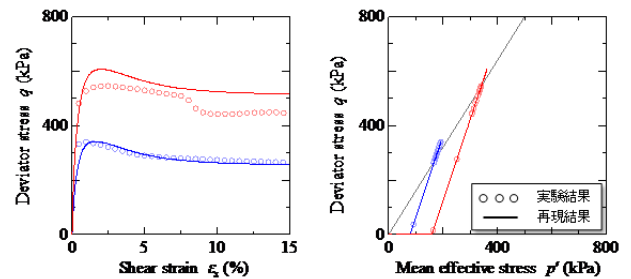


図4 Asの排水せん断挙動

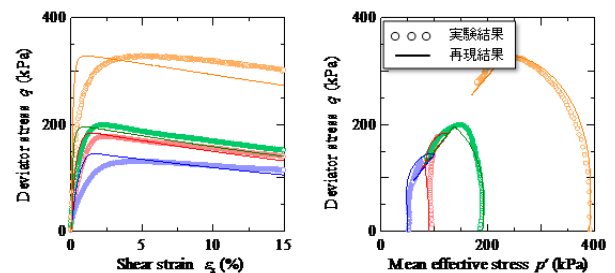


図5 Ac2の非排水せん断挙動

Elasto-plastic modelling of Urayasu ground and it's one-dimensional seismic response analysis

Nakai, K., Nakano, M., Noda, T., Yamada, S., Murakami, T. (Nagoya University) and Asaoka, A. (ADEP)

的良い整合性が取れている。水理境界は、地表面が水位面と一致するよう水圧ゼロとし、下端面は透水係数の小さい不透水層の存在を考慮して、両側面と合わせて非排水境界とした。入力地震波は、東京都港湾局品川地震観測所の G.L.-36m 付近での観測波⁷⁾を 2E 波として、地盤底面の水平方向に等しく入力した。地震時は周期境界を設定し、地盤底面には現地計測結果に基づいて Vs=400m/s に相当する粘性境界を用いた。

層境での加速度応答を図 7, 8 に示す。地表面での最大加速度に大きな差異はないが、粘土層厚の薄い A 地点比べて、厚い B 地点では粘土層通過後にやや長周期成分における地震波の増幅が顕著である。紙幅の都合上、図面は省略するが、長周期の揺れに伴う大きなせん断変形によって、A 地点では液状化を示さなかった埋土が B 地点では液状化した。図 7 には K-net 浦安で観測された実際の地表面加速度波形も重ねて示している。A 地点と浦安観測所はともに埋立て年代の古い元町エリアに位置するが、加速度特性がよく似ていること、ともに液状化しなかった点で一致しており、解析結果と実測結果はよい整合性を示している。

4. おわりに

本稿では、原位置調査結果および室内試験結果をもとに浦安地盤の弾塑性性状を把握するとともに、一次元地震応答解析を通じてモデル化の妥当性を評価した。多次元地震応答解析については、別報を参考にされたい⁸⁾。

本稿は、地盤工学会東日本大震災対応調査研究委員会「地盤変状メカニズム研究委員会（委員長：浅岡顕）」に関連する研究報告である。

参考文献 1) Asaoka and Nakai (2013): Dependency of nonuniform ground surface..., Proc. of 18th ICSMGE, pp.1419-1422. 2) 中井他 (2012): 浦安市の地盤から採取された沖積粘性土の..., 第 47 回 JGS, 267-268. 3) 村上他 (2013): 厚く堆積した浦安市沖積粘性土層における..., 第 48 回 JGS, 437-438. 4) Asaoka et al. (2002): An elasto-plastic description of ..., S&F, 42(5), 47-57. 5) Noda et al. (2008): Soil-water coupled finite deformation analysis..., S&F, 48(6), 771-790. 6) 浦安市液状化対策技術検討調査委員会. 7) Noda et al. (2009): Co-seismic and post-seismic behavior of ..., S&F, 49(5), 739-756. 7) 東京都港湾局 HP 8) 浅岡他 (2014): 不整形な境界から発生した表面波によって拡大した埋立地盤..., 第 49 回 JGS, 投稿中.

表 1 材料定数(弾塑性・発展則パラメータ)

	埋土 B	沖積砂 As	沖積粘土 Ac1,2	沖積粘土 Ac3	
弾塑性	限界状態定数 M	1.40	1.43	1.40	1.40
	NCL の切片 N	2.45	2.01	2.82	2.00
	圧縮指数 $\bar{\epsilon}$	0.09	0.07	0.280	0.115
	膨潤指数 \bar{e}	0.005	0.002	0.02	0.012
	ボアソン比 ν	0.10	0.25	0.10	0.10
発展則	構造劣化の塑性尺度 (IREV)	4	4	4	4
	$-D_v^*$ と $ D_v^* $ の割合 c_v	0.80	1.00	0.40	0.40
	構造劣化指数 a ($b=c=1.0$)	0.10	8.00	0.65	0.65
	正規圧密土化指数 m	8.00	8.00	20.0	20.0
	回転硬化指数 br	0.50	3.00	0.20	0.20
回転硬化限界面 m_b	0.70	0.50	1.00	1.00	
物性	土粒子密度 ρ_s (g/cm ³)	2.677	2.787	2.690	2.690
	透水係数 k (cm/s)	1.0×10^{-5}	1.0×10^{-4}	1.0×10^{-7}	1.0×10^{-7}

表 2 初期状態

	埋土 B	沖積砂 As	沖積粘土 Ac1	沖積粘土 Ac2	沖積粘土 Ac3	
初期値	初期比体積 v_0	2.602	1.900	3.000	3.294	2.078
	初期鉛直応力 σ_v^* (kPa)	32.65	108.0	189.0	236.0	335.0
	初期応力比 η_0	0.545	0.545	0.545	0.545	0.545
	初期構造の程度 $1/R_0^*$	2.785	1.20	4.550	13.30	12.13
	初期過圧密比 $1/R_0$	1.900	6.50	1.55	1.14	1.90
	初期異方性の程度 c_0	0.13	0.00	0.40	0.33	0.35

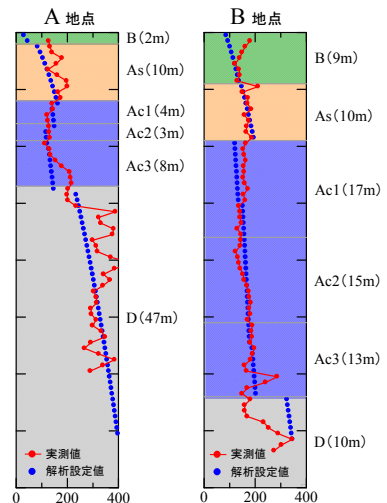


図 6 A, B 地点の一次元モデル

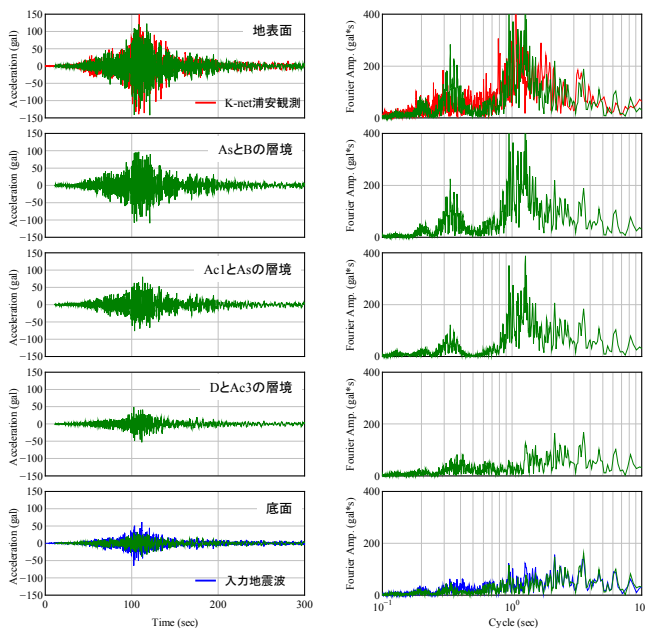


図 7 層境の加速度応答 (A 地点)

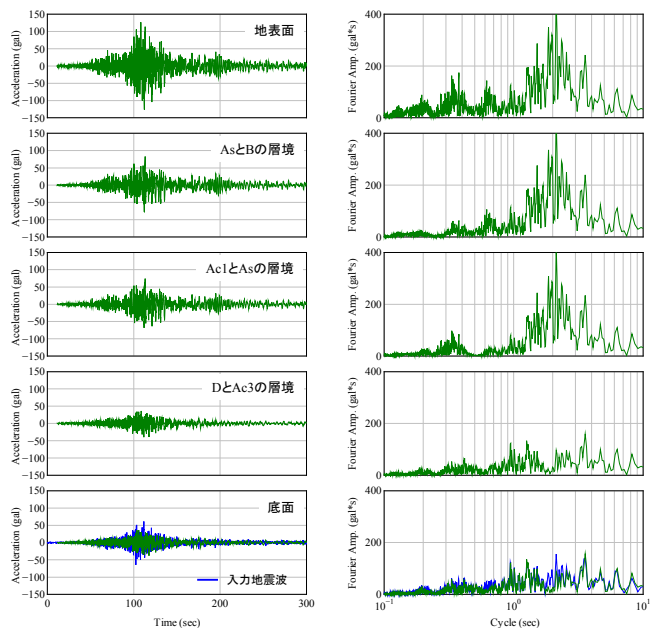


図 8 層境の加速度応答 (B 地点)