軟弱層を含む海上埋立人工地盤の地震応答解析

名古屋大学大学院　　国際会員　中井健太郎，野田利弘，中野正樹，浅岡顕

1. はじめに

海上人工島や埋立地などの人工地盤は，長い年月かけて堆積した自然堆積地盤に比べ，軟弱であることが多い．近年，重要な土木構造物は，空港や高速道路，新幹線を始めとして，このような人工地盤上に建設されることが多い．日本の重要な社会資本は，地震被害が懸念される軟弱地盤上に多く蓄積されており，地震被害を最小限にとどめるためには耐震性能を的確に照査することが不可欠である．耐震設計法は仕様規定型から性能規定型へと変化しており，地震中の安定問題だけでなく，地震中に加え地震後の圧密を伴う変形挙動の予測までも視野に入れた性能照査が求められる．地震被害というと砂質地盤の液状化ばかりが注目されがちであるが，軟弱な粘性土地盤においては，地震中～地震後の大変形挙動や不安定挙動が観測されている[1)]．本報では，海上埋立人工地盤を例に，護岸直下の基礎地盤に介在する軟弱層が，砂の場合と粘土の場合の地震中／地震後の変形挙動の違いについて，数値解析結果を示す．解析は，土の骨格構造の働きに着目して広範な土の力学挙動を記述できる弾塑性構成式（SYS カムクレイモデル[2)]）を搭載した水～土連成有限変形解析[3),4),5)]で，静的も動的も区別なく扱うこともできる．

2. 人工地盤のモデル化

解析に用いた海上埋立人工地盤の有限要素メッシュを図-1 に示す．強固な第三紀泥岩と N 値 30 程度の洪積砂，N 値 10 以下の軟弱層が互層となっている自然堆積地盤上に，捨石マウンド式護岸を建造した後，砂質土で埋立を行った．捨石マウンド作成および埋立ての各過程は，水～土二相系の弾塑性有限要素を載荷することにより再現している．捨石マウンド上のコンクリート護岸は埋立完了後，一相系弾性体でモデル化した．

解析に用いた弾塑性性状（材料定数と初期値）の一覧を表-1 に示す．これらは SYS カムクレイモデルを用いて，当該地域から採取した不撹乱試料の力学試験結果を再現することによって決定している．今回着目する軟弱層は，対象断面近傍から採取された砂質土；Case1 と粘性土；Case2 の 2 パターンを想定した．軟弱層の非排水せん断挙動と SYS カムクレイモデルによる再現結果を図-2 と図-3 に示す．実験結果と再現結果から，砂質土は典型的な中密砂であることがわかった．粘性土はピーク強度を迎えた後に，ひずみ軟化挙動を示しており，軟弱であることがわかる．

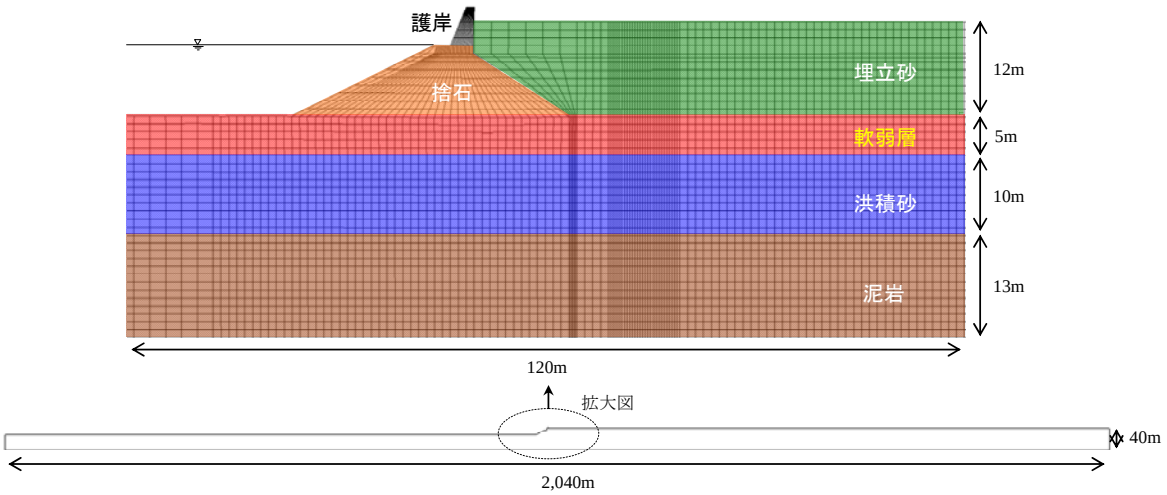

図-1　海上埋立人工地盤のモデル化（有限要素メッシュ）

Seismic response analysis of soft layer mediated artificial reclaimed ground

Nakai, K., Noda, T., Nakano, M., Asaoka, A. (Nagoya University)

表-1　解析に用いた弾塑性性状の一覧

		泥岩	洪積砂	捨石	軟弱層砂	軟弱層粘土	埋立砂
弾塑性	限界状態定数 M	0.60	1.10	1.7	1.10	1.60	1.10
	NCL の切片 N	2.10	1.989	1.895	1.989	2.51	1.989
	圧縮指数 $\tilde{\lambda}$	0.17	0.05	0.105	0.05	0.21	0.05
	膨潤指数 $\tilde{\kappa}$	0.003	0.0002	0.0005	0.0002	0.02	0.0002
	ポアソン比 ν	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
発展則	$-D_v{}^p$ と $\|D_s{}^p\|$ の割合 c_s	1.0	1.0	1.0	1.0	0.3	1.0
	構造劣化指数 a	0.01	5.0	2.0	5.0	0.6	5.0
	正規圧密土化指数 m	10.0	0.12	1.20	0.12	5.0	0.12
	回転硬化指数 br	0.001	3.0	1.0	3.0	0.001	3.0
	回転硬化限界面 m_b	1.0	0.9	0.001	0.9	1.0	0.9
物性	土粒子密度 ρ_s (g/cm^3)	2.707	2.675	2.60	2.675	2.754	2.675
	透水係数 k (cm/s)	1.0×10^{-7}	4.0×10^{-3}	1.0×10^{-3}	4.0×10^{-3}	2.0×10^{-7}	4.0×10^{-3}
初期値	初期比体積 v_0	1.70	1.80	1.60	1.94	2.95	1.92
	初期応力比 η_0	0.545	0.545	0.0	0.0	0.545	0.0
	初期構造の程度 $1/R^*_0$	50.0	1.4	1.0	1.4	9.0	1.4
	初期異方性の程度 ς_0	0.0	0.545	0.0	0.545	0.545	0.7

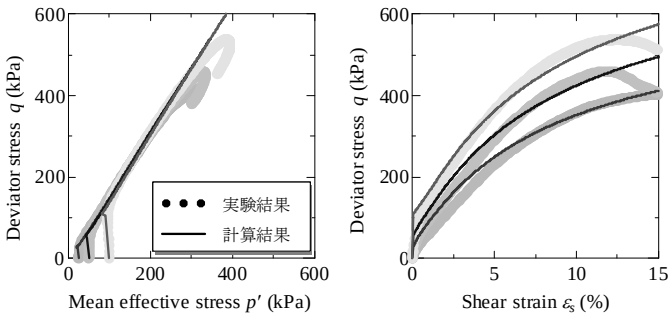

図-2　砂の非排水せん断挙動

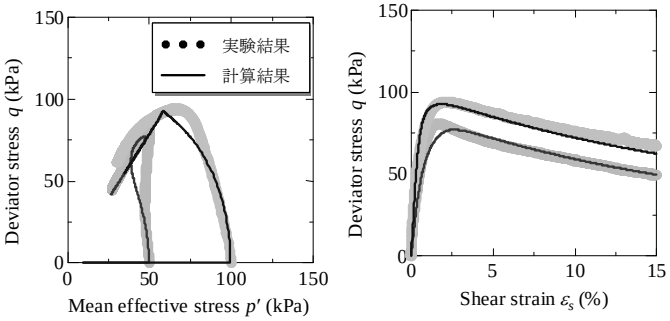

図-3　粘土の非排水せん断挙動

各層での比体積と構造の程度は均一と仮定し，土被り圧に応じて過圧密比を分布させた．コンクリート護岸の重量や剛性は，実在の構造物を参考に，等価重量・等価剛性となるように決定した．水面より上の地表面は水圧を常にゼロ（大気圧条件），水面より下の地表面は静水圧分の水圧が作用した排水境界とし，地盤の側面と底面は非排水境界とした．地震動は，地盤底面の全有限要素節点の水平方向に，当該地域で想定される東海・東南海・南海 3 連動型地震 [6]を入力した（図-4）．地盤下端節点は PS 検層結果をもとに，底面粘性境界（Vs=600m/sec）を設定した．また，地盤両側端要素には，側方境界要素単純せん断変形境界 [7]を設けている．地震後は地盤変形が収まるまで，圧密放置計算を実施した．

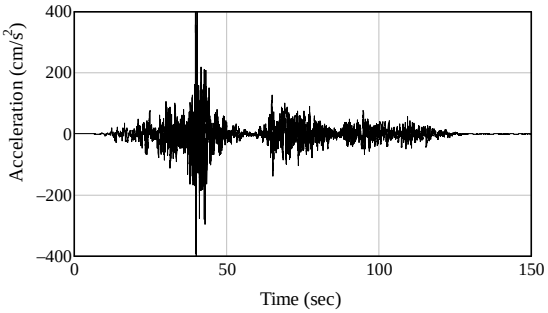

図-4　入力地震動

3. 地震中～地震後の地盤変形挙動

図-5 に，①地震発生前，②地震発生から 30 秒後，③地震発生から 150 秒後，④地震発生から 10 年後の平均有効応力の経時変化を Case1 と Case2 を並べて示す．Case1 を見ると，埋立砂と軟弱層（砂）は地震発生とともに平均有効応力がゼロとなり，液状化を示す．地震継続時間が非常に長いので，洪積砂においても平均有効応力の低下が見られる．地震後は蓄積した過剰水圧の消散とともに圧密変形する．続いて Case2 を見ると，砂質土では地震中の平均有効応力の低下が見られる．軟弱層（粘土）においても，長時間の繰返し載荷によって，砂ほどではないものの平均有効応力が低下している．図-6 には，図-5 と同時刻歴におけるせん断ひずみの経時変化を示す．Case1，Case2 ともに，護岸直下の軟弱層で特にせん断ひずみが卓越する．Case1

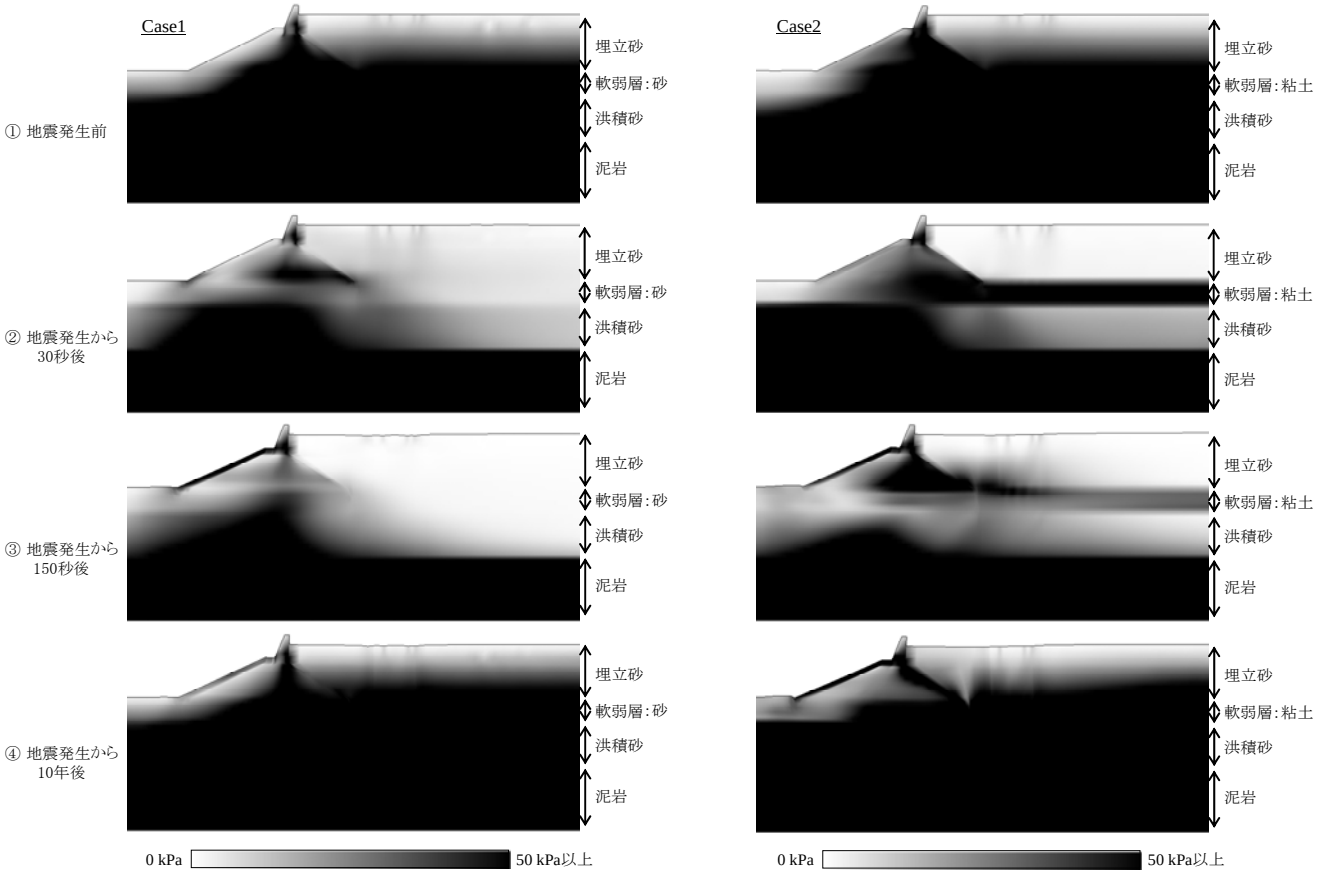

図-5　平均有効応力の経時変化

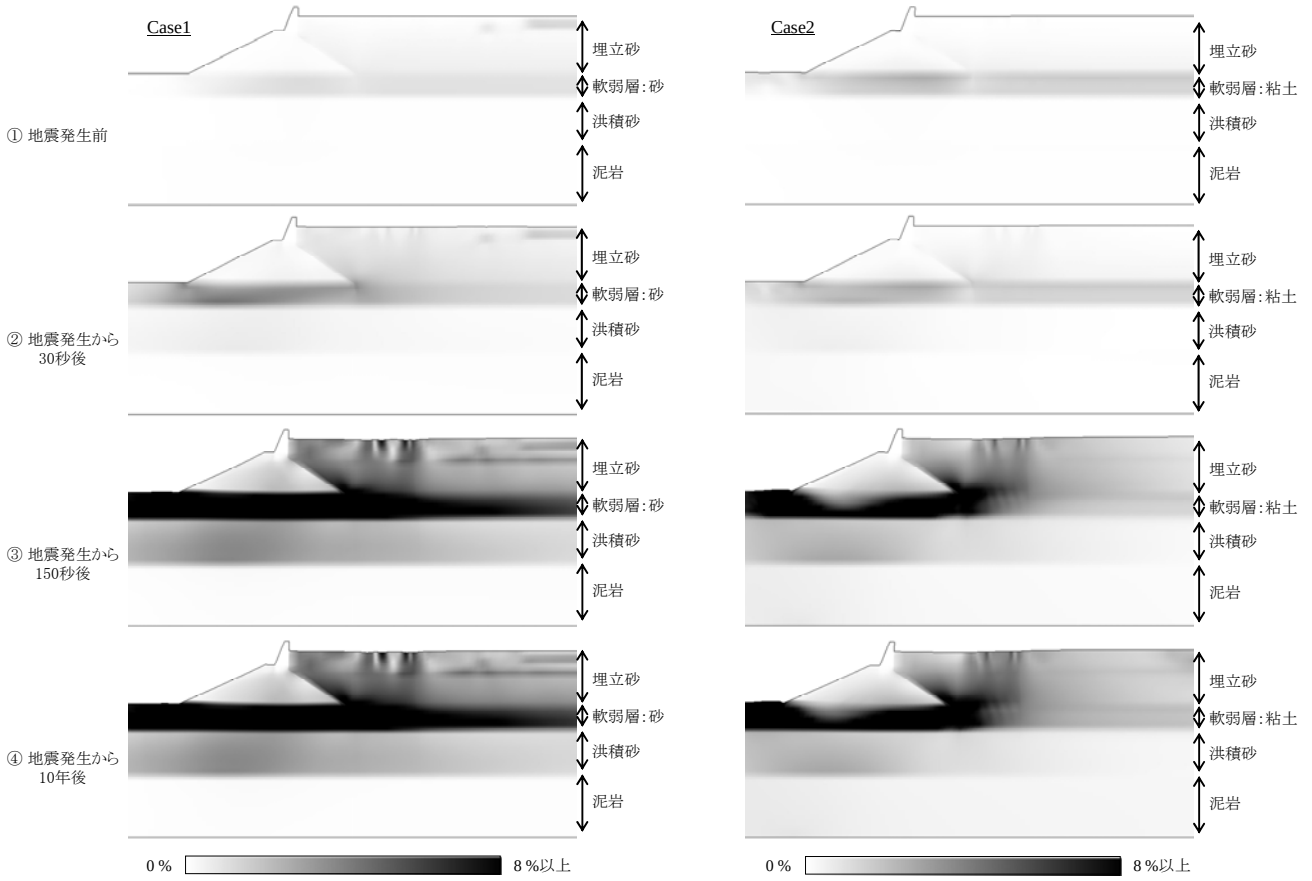

図-6　せん断ひずみの経時変化

では軟弱層全域が液状化してしまうため，液状化に起因する変形によって護岸直下だけでなく，水平地盤上においてもせん断ひずみが卓越するが，Case2 では，水平地盤上のせん断ひずみはさほど大きくない．護岸直下のように上載荷重によって偏心載荷を受ける場所では，地震動によって地盤が乱されてしまい，大きなせん断ひずみが発生したと考えられる．

図-7 に，護岸から 200m離れた水平地盤上での層別沈下を示す．地震中は大きな沈下を示さないが，砂層は地震直後から数時間で，粘土層は地震発生 1 日後から約 3 年かけて沈下する．全層合計沈下量は，Case1 が 37cm，Case2 で 14cm であり，Case1 の方が 2 倍程度大きい．その差は主に軟弱層で生じており，Case2 の軟弱層（粘土）はほとんど沈下していない．なお，図中の数字は体積ひずみ量であるが，液状化した砂層は層厚の 1～3%程度の沈下を生じている．続いて図-8 に，護岸直下での層別沈下を示す．水平地盤とは異なり，全層合計沈下量は Case2 の方が大きくなっており，軟弱層（粘土）の沈下増大が顕著である．図-6 でも述べたが，水平地盤とは異なって護岸直下では上載荷重によって大きなせん断力が作用し，地震中に粘土層が乱されたことが原因だと考えられる．

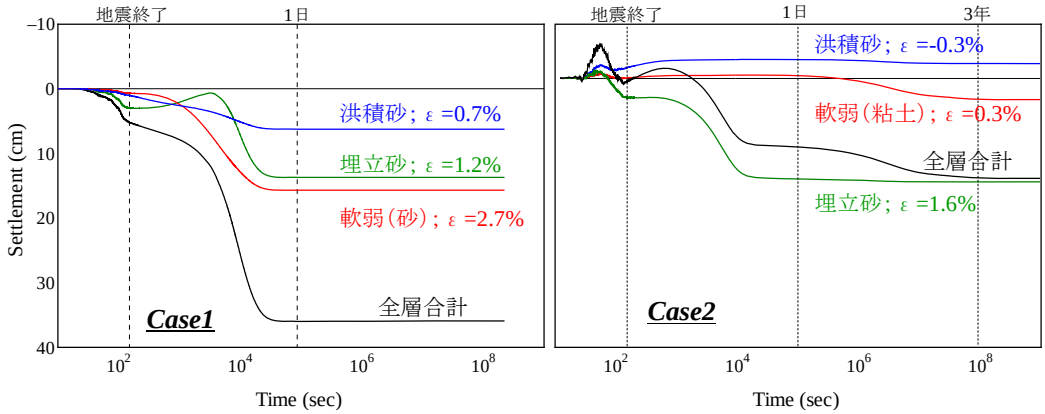

図-7　水平地盤における層別沈下量

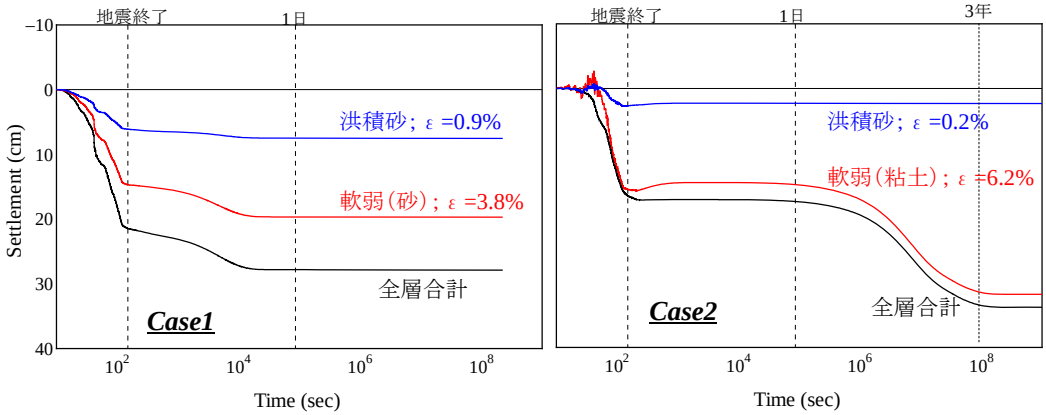

図-8　護岸直下における層別沈下量

4. まとめ

地震時被害というと，砂質土の液状化現象ばかりが注目されがちである．本報では数値解析によって，軟弱砂の液状化現象を再現するとともに，上載荷重が作用している軟弱粘土層は，地震中の乱れによって地震後に長期にわたる大沈下を生じる危険性があることを示した．

参考文献　1) 安原一哉他: 粘性土の動的性質, 土と基礎, 講座, 平成10年5月～平成11年4月号　2) Asaoka, A. et al. (2002): An elasto-plastic description . . ., *S & F*, 42(5): 47-57.　3) Asaoka, A. and Noda, T. (2007): All Soils All States All Round. . ., International Workshop on Constitutive Modeling. . ., Hong Kong, pp.11-27.　4) Asaoka, A et al. (1994): Soil-water coupled behavior . . ., *S & F*, 34(1), 91-106.　5) Noda, T. et al. (2008): Soil-water coupled finite deformation analysis. . ., *S&F*, 48(6), 771-790.　6) 内閣府 (2004): 東南海、南海地震公開データ　7) 吉見吉昭, 福武毅芳(2005): 地盤液状化の物理と評価・対策技術, 技報堂出版.