

造成過程を考慮した広域埋立地盤の地震応答解析

名古屋大学 国際会員 山田英司, 野田利弘, 中野正樹, 浅岡 顕

1 はじめに

本論文では、名古屋港内の埋立地盤に着目し、骨格構造（構造・過圧密・異方性）の変化を記述できる SYS Cam-clay model¹⁾ を搭載した動的／静的水～土連成有限変形解析プログラム GEOASIA²⁾ を用いて、はじめに 1800 年頃（江戸時代）の干拓から約 200 年におよぶ現在までの履歴を考慮して埋立地盤の造成過程を再現した。続いて、今後 30 年間に発生する確率が高いと言われている想定東南海・東海連動型地震に対する埋立地盤の地震中・地震後の変形挙動を調べた。なお、解析は 2 次元平面ひずみ条件で行った。

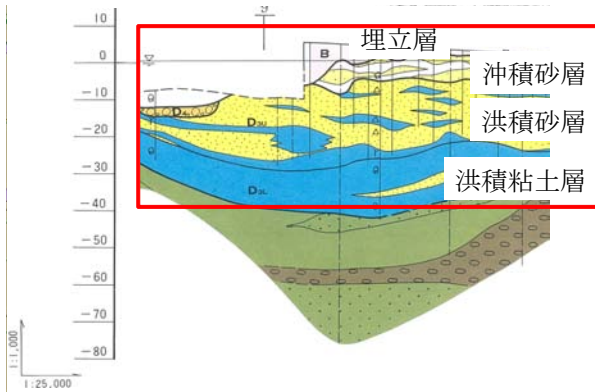


図-1 地質断面図

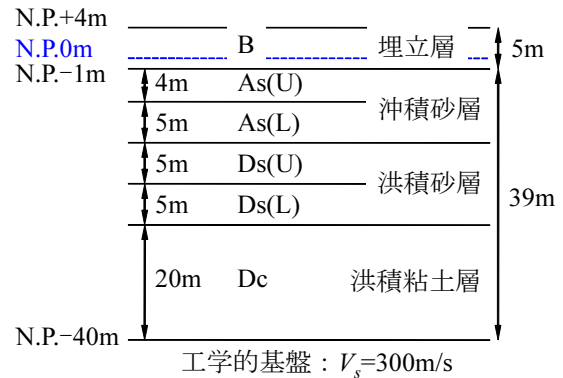


図-2 初期地盤のモデル化

2 解析条件

図-1 に対象地域の地質断面図を示す。上から埋立層 (B 層), 沖積砂層 (As 層), 洪積砂層 (Ds 層), 洪積粘土層 (Dc 層), 砂礫層の順に堆積しているが、B 層～Dc 層を解析対象とする。名古屋港築港以前、対象地域には N.P. (名古屋港基準面) 0 ～ -2m 程度の遠浅の海が広がっていた。そこで、図-2 に示すように、本論文での初期地盤は、水深 N.P.-1m の水平堆積地盤とし、沖積砂層、洪積砂層はそれぞれ状態の違いによって 2 つに分割した。埋立層は N.P.-1m～N.P.+4m までとする。また、工学的基盤を N.P.-40m 以深の砂礫層とし、粘性境界 ($V_s=300\text{m/s}$) を設定した。

対象地域で過去に実施された地盤調査から得られている地盤データは N 値と柱状図のみで、力学試験は実施されていない。対象埋立地盤の砂および粘土は、力学試験が実施されている近隣地区の砂および粘土³⁾ とほぼ同じ物理特性を示していることから、同じ材料と判断した。また、B 層, As 層, Ds 層のいずれの砂もほぼ同じ物理特性を示す。

表-1 解析に用いた材料定数

<弾塑性パラメータ>	砂	粘土
圧縮指数 λ	0.05	0.18
膨潤指数 κ	0.0002	0.019
限界状態定数 M	1.1	1.6
NCL の切片 N (at $p'=98.1\text{kPa}$)	1.989	2.22
ポアソン比 ν	0.3	0.3
<発展則パラメータ>		
正規圧密土化指数 m	0.12	3.0
構造劣化指数 a	5.0	0.3
b	1.0	1.1
c	1.0	1.0
c_s	1.0	0.4
回転硬化指数 b_r	3.0	0.001
回転硬化限界定数 m_b	0.9	1.0
透水係数 k (cm/s)	4.0×10^{-3}	1.0×10^{-7}
土粒子密度 ρ_s (g/cm ³)	2.68	2.71

表-2 砂層の N 値

層	B	B	As(U)	As(L)	Ds(U)	Ds(L)
	気中	水中				
N 値	5	7	9	15	25	42

Numerical analysis on seismic behavior of reclaimed ground in consideration of a construction history:

Yamada, E., Noda, T., Nakano, M., and Asaoka, A. (Nagoya Univ.)

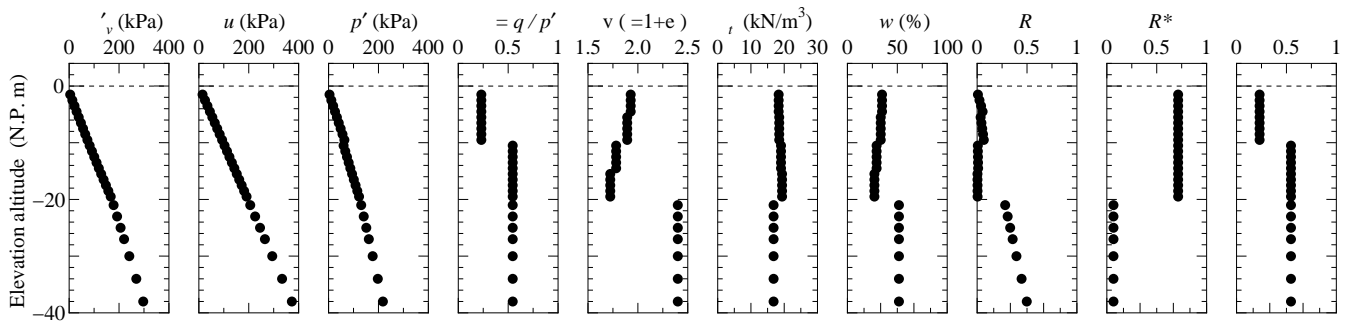


図-3 初期状態分布

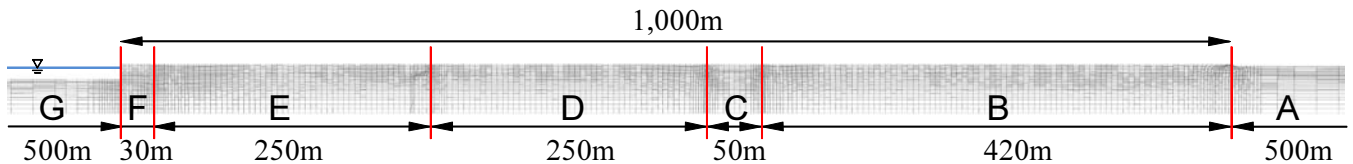


図-4 解析領域

表-1 に解析に用いた砂および粘土の材料定数を示す。地盤の初期状態は表-2 に示す N 値を参考に設定した。その初期状態分布を図-3 に示す。

図-4 に解析領域を示す。埋立地盤の領域は 1,000m で、海側に 500m、陸側に 500m の領域を加えた合計 2,000m を解析領域とする。地盤両側端要素には側方境界要素単純せん断変形境界⁴⁾を設定した。また、造成過程の違いによって埋立地盤を埋立地 B~F に分割する。

図-5 には、埋立地盤の地震応答解析において工学的基盤面に入力した想定東南海・東海連動型地震の加速度時刻歴（最大加速度 259gal，継続時間 120 秒）を示す。

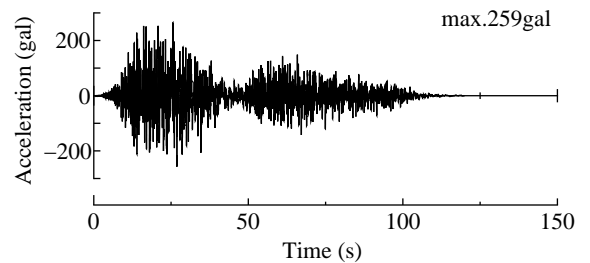


図-5 想定東南海・東海連動型地震

3 埋立地盤の造成過程の概略

江戸時代中の 1800 年ごろに行われた干拓工事の再現から計算を開始する。埋立地盤は 1896 年からの履歴を考慮して、護岸を設置してから弾塑性有限要素メッシュを追加⁵⁾し、所定の時間まで圧密放置計算を行うことで埋立地盤の造成を再現した。なお、護岸は 1 相系弾性体でモデル化し、実際の護岸を考慮して等価な剛性、密度になるように設定した。以下に造成過程の概要⁶⁾を示す。

(1) 築港以前（～1896 年）

領域 A での干拓工事を築堤→埋立の計算によって再現し、その後圧密放置計算を行った。

(2) 築港～開港（1896 年～1907 年）

埋立地 B, D の造成と海底面の浚渫工事（N.P.-7m まで掘削）を行った。

(3) 戦前の拡張（1907 年～1944 年）

埋立地 B, D のかさ上げ、海底面の浚渫工事（N.P.-9m まで掘削）、埋立地 E の造成を行った。

(4) 1944 年東南海地震

解析対象とした地域は、1944 年の東南海地震を経験しているが、戦時中でもあったのでこの地震に関する資料は極めて少ない。そこで、図-5 の 45 秒までの加速度時刻歴を与えることで 1944 年の東南海地震を模擬した。この加速度時刻歴を入力したときの地表面形状の経時変化を図-6 に示す。地震直後は護岸が海側へ倒れ込むためにその背後の地面が大きく沈下していることが分かる。また、埋立地盤全域において平均 30cm 程度の沈下が生じた。実際には護岸周辺で 30～60cm 程度の沈下が計測されている⁶⁾ことから、本論文の計算結果は概ね妥当な

数値を示していると言える。

(5) 戦後の復旧および拡張（1945年～2009年）

1963年～1966年に埋立地Bと埋立地Dの間の運河であった領域Cを埋め立てた。その後1975年までに埋立地Fの造成と海底面の浚渫工事（N.P.-10mまで掘削）を行い、現在の状態までの造成過程を再現した。

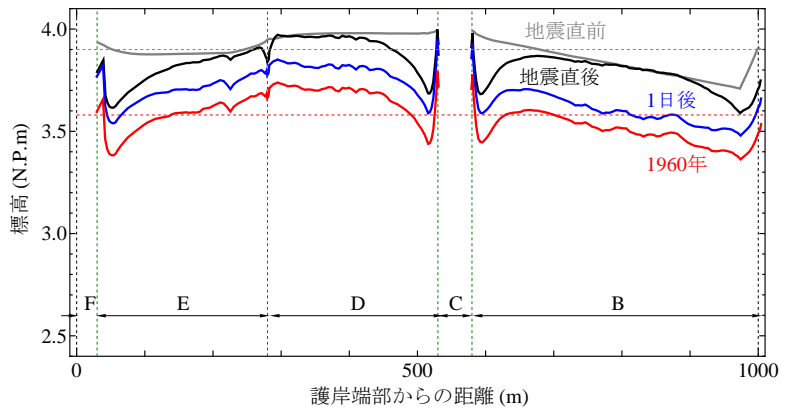


図-6 1944年東南海地震による地表面の沈下

4 解析結果

200年におよぶ造成過程を考慮して決定し

た現在の状態について図-5に示す加速度時刻歴を工学的基盤面に入力し、想定東南海・東海連動型地震に対する埋立地盤の地震応答を調べた。図-7と図-8は、埋立地E～Fにおける平均有効応力分布と比体積変化分布の経時変化を示す。地震中、砂層では平均有効応力が減少し、広い範囲で液状化を示し、地震後に沖積砂層、洪積砂層、洪積粘土層が圧縮していることが分かる。

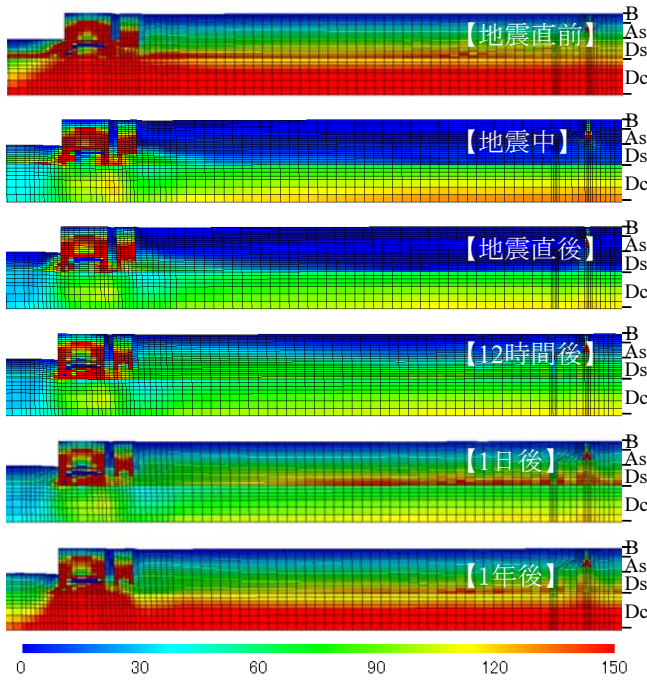


図-7 平均有効応力分布の経時変化（単位：kPa）

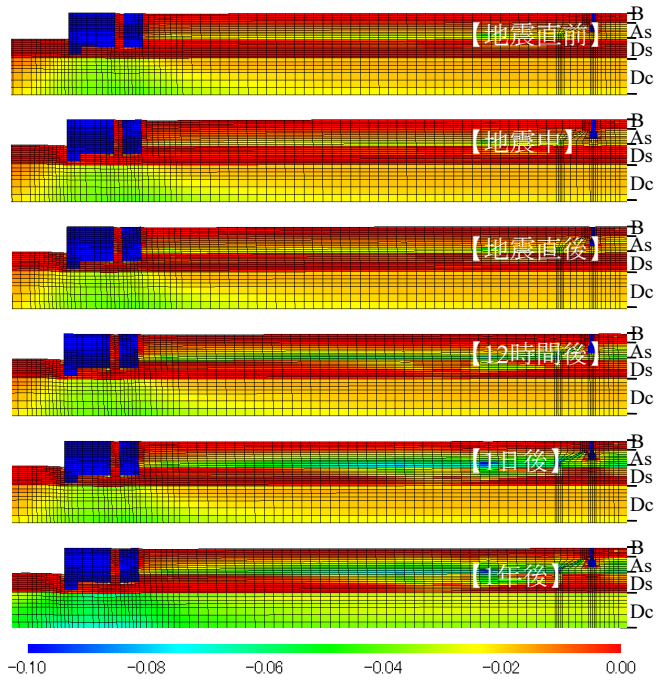


図-8 比体積変化分布の経時変化（圧縮：負）

図-9に想定東南海・東海連動型地震による地表面形状の変化を示す。埋立造成履歴や護岸などの重量の違いによって地表面形状が異なっている。また、埋立地盤全域において平均50cm程度の沈下が生じた。

図-10に埋立地E中央部での沈下量～時間関係を示す。地震中に洪積粘土層(Dc)が数cm沈下し、地震後に液状化した砂層が数時間にわたって沈下している。さらに地震後1日程度から約2年程度、粘土層が沈下している。図-11は1944年の東南海地震を模擬し

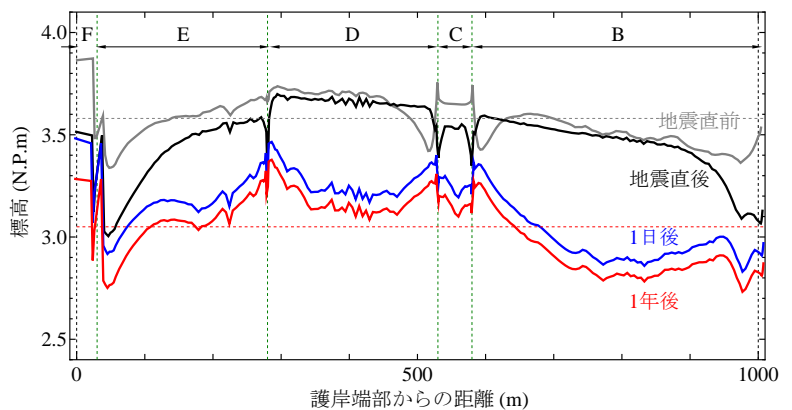


図-9 想定東南海・東海連動型地震による地表面の沈下

た地震動による沈下量～時間関係を示す。図-10 と図-11 の比較から、継続時間が長く地震外力が大きい連動型地震動では、 N 値が比較的大きな Ds(U) 層も液状化後の沈下を示している。図-12 に、埋立地 E の地盤内各深度における加速度応答を示す。基盤に入力した加速度は、液状化した砂層では減衰している。

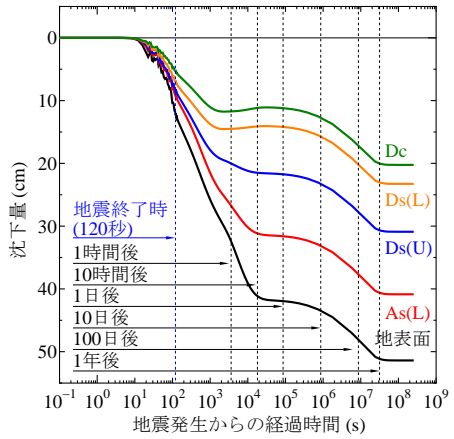


図-10 想定東南海・東海地震での沈下量

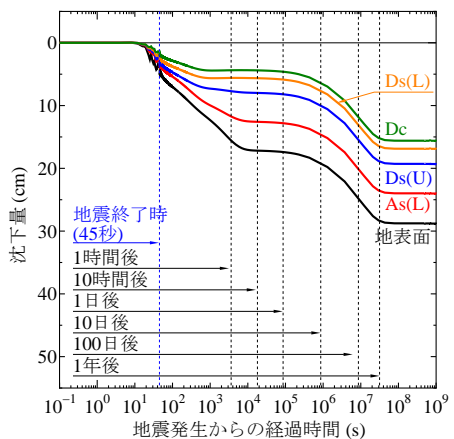


図-11 1944年東南海地震での沈下量

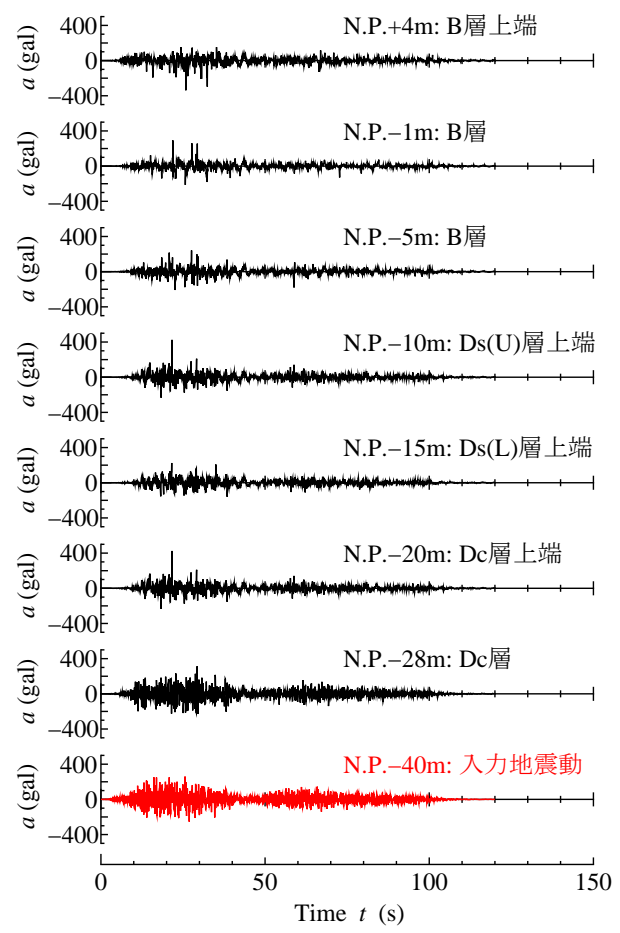


図-12 地盤内の各深度における加速度応答

図-13 は埋立地 F 護岸の変位を示す。図より水平方向海側に 3m 程度移動し、天端は 60cm 程度沈下する。兵庫県南部地震では、形式が異なるケーソン式の護岸が 5m 程度変位したことが報告されていることから、この程度の変位が生じる可能性はある。

5 おわりに

本論文では江戸時代から現在までの埋立地盤造成の履歴と、過去に発生した地震の履歴を考慮した埋立地盤の造成過程と、想定東南海・東海連動型地震が発生した際の地震中・地震後の地盤変形を同一の解析プログラム GEOASIA を用いて調べた。その結果、想定される連動型地震では N 値が比較的大きい洪積砂層でも液状化し、その後沈下する可能性があること、粘土層は遅れて沈下すること、護岸が水平方向に約 3m 変位する可能性があること、などが分かった。

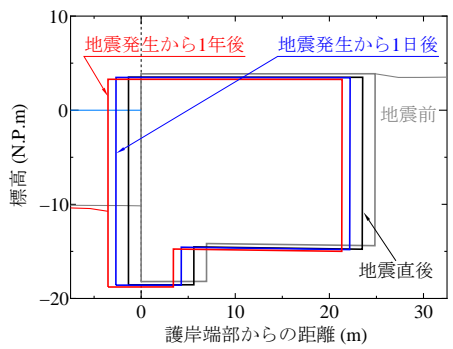


図-13 護岸の変位

参考文献 1) Asaoka et al. (2002): An elasto-plastic description ..., S & F, 42(5), pp.47-57. 2) Noda et al. (2008): Soil-water coupled finite deformation analysis ..., S & F, 48(6), pp.771-790. 3) 中井ら (2009): 護岸を有する埋立人工地盤の ..., 第 44 回地盤工学研究発表会講演概要集. 4) 吉見・福武 (2005): 地盤液状化の ..., 技報堂出版. 5) 竹内ら (2006): 飽和粘土地盤の ..., 応用力学論文集, 9, pp.539-550. 6) 名古屋港管理組合 (1990): 名古屋港史 — 建設編 —.