

軟弱粘性土地盤上の河川堤防築堤に伴う閉封飽和域の形成とその地震応答解析

名古屋大学 正会員 ○中井健太郎, 吉川高広

名古屋大学 フェロー会員 野田利弘

名古屋大学 学生会員 加藤健太

名古屋市 非会員 河田誠一, 田邊一樹, 新井雅之

1. はじめに

東北地方太平洋沖地震では東北から関東地方まで広範囲にわたって河川堤防に甚大な被害が生じた。この地震では基礎地盤の液状化だけでなく、粘性土地盤上の河川堤防での液状化被害が多数発生した。これは粘性土地盤が築堤に伴う圧密沈下により堤体下部に閉封飽和域が形成され、その領域の地震時液状化が原因とされるが、このメカニズムの解明には不飽和土の飽和化が鍵となるため、飽和・不飽和の両状態を考慮する必要性が高まっている。本報では、砂・粘土・中間土までを同一の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¹⁾を搭載した静的／動的対応の空気～水～土骨格連成有限変形解析コード²⁾を用いて浸透条件下での地震応答解析を行い、名古屋市内の軟弱粘土地盤上に築造された河川堤防の耐震性を照査する。

2. 解析条件

飽和度 100%の水平成層な基礎地盤に対して、実際の施工履歴をできるだけ再現する形で、①川表側への鋼管矢板打設（材料置換）、②堤防の築堤（有限要素メッシュの追加）、③河道部分の掘削（有限要素メッシュの削除）を行った。最終的な有限要素メッシュを図 1 に示す。水理境界条件は下端と右端を非排気・非排水、上端と左端は水を排出できるように地下水位に対応した全水頭境界とした。基礎地盤の初期状態は過圧密比・構造の程度・応力比・異方性の程度を各層で均一とし、間隙比を土被り圧に応じて分布させ、堤体部は造成時の転圧を考慮して過圧密比を分布させた。掘削時は土骨格の荷重のみを取り除き、河川水位は地下水位と同じ T.P.0.30m とした。

各土層の弾塑性性状は原位置から採取した不攪乱試料の力学試験結果を SYS カムクレイモデルで再現することで決定した。不飽和である B 層の水分特性曲線には van Genuchten 式³⁾を使用し、透水係数と透気係数の式には Mualem⁴⁾モデルに van Genuchten 式を適用して用いる。飽和透水係数および van Genuchten 式のパラメータは Carsel and Parrish⁵⁾の silt を参考にした。図 2, 3 に水分特性曲線と透水・透気係数の変化を示す。

築堤後、50 年間の圧密計算を実施して地震動を入力した。下端に $V_s=300\text{m/s}$ 相当の粘性境界、左右端に側方境界要素単純せん断変形境界を設定し、2003 年に中央防災会議で策定された名古屋港付近の東海・東南海・南海 3 連動地震の NS 成分を入力した。 V_s に応じて翠川の式⁶⁾を用いて増幅し、下端すべての節点に等しく入力した。

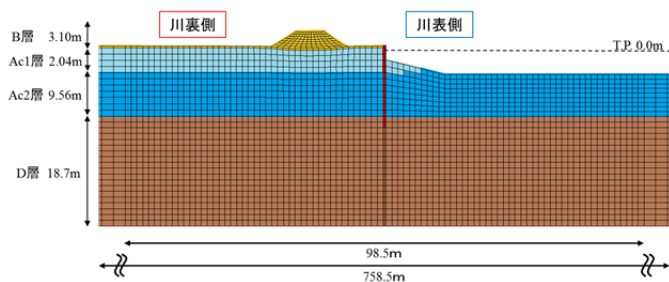


図 1 有限要素メッシュ

表 1 透水・透気関係パラメータ

	B 層
乾燥透気係数 k_d^g (cm/sec)	3.82×10^{-3}
初期飽和度 (%)	81.8
最大飽和度 (%)	99
最小飽和度 (%)	7.32
van Genuchten 式 α (kPa ⁻¹)	0.163
van Genuchten 式 n	1.37
水の体積弾性係数 K_w (kPa)	2.19×10^6
空気の気体定数 \bar{R} (m ² /sec ² /K)	287.04
絶対温度 Θ (K)	293.15

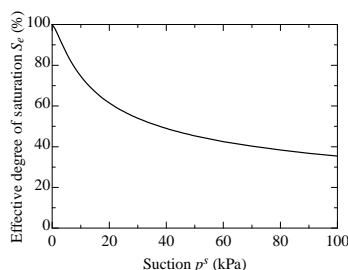


図 2 水分特性曲線

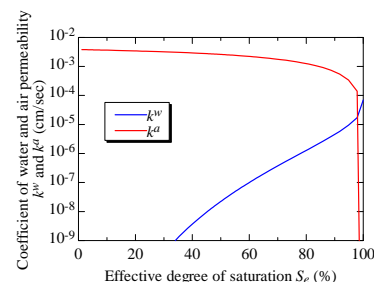


図 3 透水・透気係数変化

地震応答解析, 河川堤防, 不飽和

3. 圧密沈下に伴う閉封飽和域の形成

対象地点で行われている実際の測量では築堤開始から約 30cm の沈下が生じたが、本解析でも同等の沈下量が得られた。図 4 に堤体の飽和度分布を示す。圧密沈下によって、堤体下部の 40cm 程度が地下水位より下に位置し、閉封飽和域が形成された。

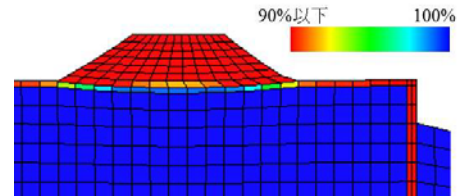


図 4 堤体部の飽和度分布

4. 地震時～地震後の応答

地震直前、最大加速度時、地震直後および地震発生から 30 年後のせん断ひずみ分布を図 5 に示す。せん断ひずみ分布を見ると地震中に堤体が大きく沈下し、堤体の下部と Ac1 層の上部で大きなひずみが生じた。深部の Ac2 層にも 10% を超える大きなひずみが生じているが、大きく滑るような変形は見られない。図 6 と図 7

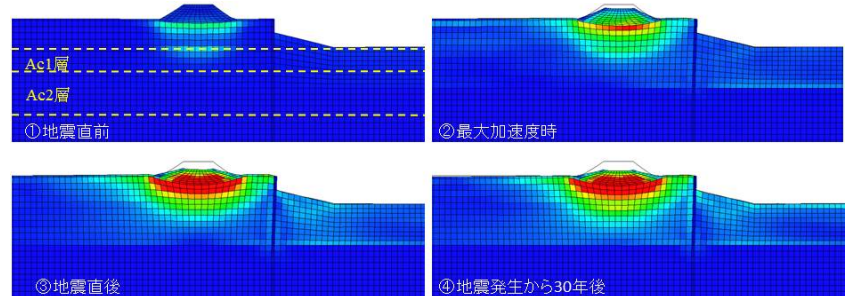


図 5 せん断ひずみ分布の経時変化

に堤体中央と堤体下部の地震中の要素挙動を示す。堤体中央では間隙水圧の上昇と平均骨格応力の減少が生じるが、地震前の時点で飽和度が 70% 程度と不飽和状態にあるためゼロまでは減少しない。一方、堤体下部は圧密沈下によってほぼ飽和状態にあるため（閉封飽和域）、地震中は間隙水圧の上昇とともに平均骨格応力がほぼゼロまで低下して液状化している。堤体が崩壊に至らなかったのは、川表側に設置された鋼管矢板が洪積層まで根入れされ、地盤の変形抑制効果が大きかったためである。図 8 と図 9 に堤体法尻の水平変位と堤体天端の層別沈下量を示す。堤体は川表・川裏両方向に 1m の水平変位と地震中に 130cm、地震後はさらに 30cm の沈下を生じるが、天端高が満潮時の水位を下回ることではないことを確認した。

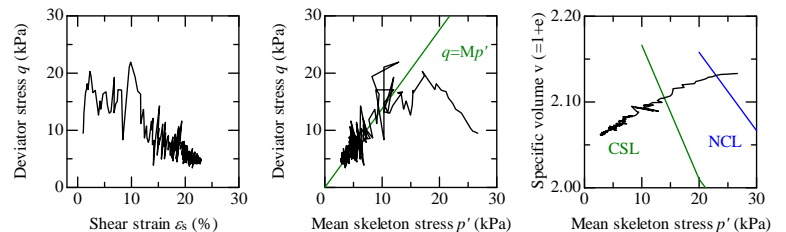


図 6 堤体中央の要素の挙動

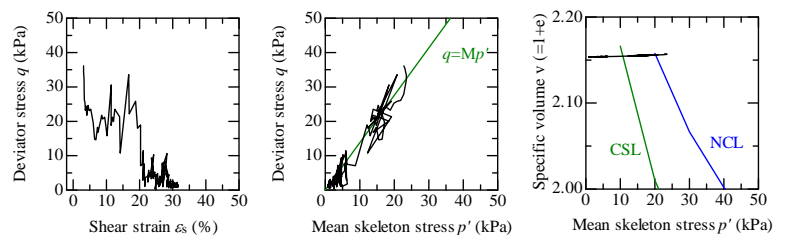


図 7 堤体下部の要素の挙動

5. おわりに

名古屋市内の河川堤防を対象に地震応答解析を実施し、①堤体下部に閉封飽和域

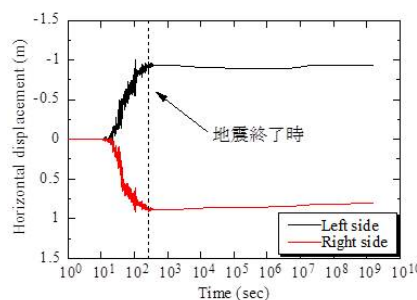


図 8 堤体法尻の水平変位

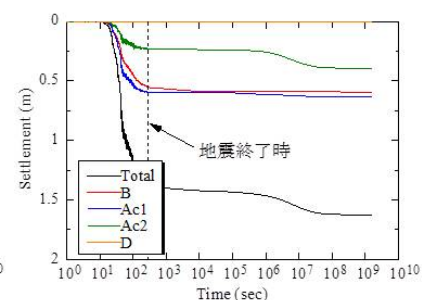


図 9 堤体天端の層別沈下

が形成されて地震時に液状化すること、一方で、②鋼管矢板の根入れが深いため堤体の変形は抑えられること、などを示した。広大なゼロメートル地帯を有する濃尾平野では、河川堤防の健全性確保は最重要課題の一つである。河川堤防の詳細な耐震性評価解析のためには、飽和状態～不飽和状態までを連続的に取り扱うことが重要である。なお、本研究は JSPS 科研費（基盤研究 A：25249064）の助成を受けた。

参考文献 1) Asaoka, A. et. al. (2002): An elasto-plastic description..., S&F, 42(5), 45-57. 2) Noda, T., and Yashikawa, T. (2015): Soil-water-air coupled finite..., S&F, 55(1), 45-57. 3) van Genuchten, M. T.(1980): A closed-form equation for ..., Soil Science Society of America Journal, 44, 892-898. 4) Mualem, Y. (1976): A new model for predicting the hydraulic..., Water Resources Research, 12, 513-522. 5) Carsel, R.F. and Parrish, R.S. (1988): Developing joint probability distribution..., Water Resources Research, 24(5), 755-769. 6) 翠川(1987): 関東平野を対象とした..., 構造工学論文集, 33B, 43-48.