

空気～水～土骨格連成有限変形解析に基づく 南海トラフ地震に対する大規模河川堤防の挙動に及ぼす河川水位の影響評価

有効応力解析法 動的解析 河川堤防

名古屋大学 国際会員 ○野田利弘
 名古屋大学 学生会員 吉川高広 加藤健太
 名城大学 国際会員 小高猛司
GEOASIA 研究会 国際会員 高稲敏浩
 建設技術研究所 国際会員 李圭太

1. はじめに

東北地方太平洋沖地震では河川堤防も甚大な被害を受けた。一方で、近年では台風・集中豪雨による河川堤防の被災が相次いで発生しており、浸透・地震に関する複合外力に対応できる地盤解析ツールによる河川堤防の照査が必要となる。本報では、SYS Cam-clay model¹⁾を搭載した動的/静的対応空気～水～土骨格連成有限変形解析コード²⁾を用いて、実在する大規模河川堤防を対象に浸透条件下で地震応答解析を実施した。ただし、簡単のため、地下水位は基礎地盤の地表面と一致しているものとし、基礎地盤は飽和状態、堤体は飽和・不飽和の両状態を扱う。

2. 解析条件

本報は庄内川右岸 6.0km 地点の堤防を対象とする。図 1 のように地層構成は粘性土層と砂質土層が互層を成しており、別報³⁾では同地点における浸透破壊に対する検討を実施している。使用する SYS Cam-clay model¹⁾の土質パラメータは現地採取した試料の力学試験結果から決定している。基礎地盤の透水係数は過去に近傍で実施された現場透水試験の結果⁴⁾を用いた。不飽和状態を扱う堤体の水分特性曲線は Carsel and Parrish⁵⁾の van

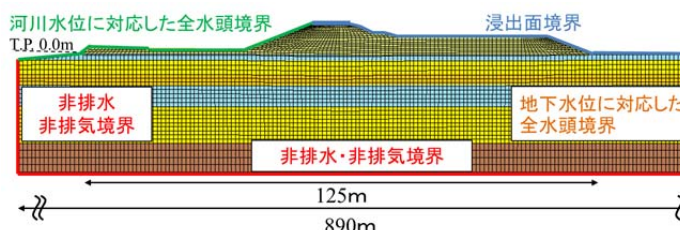


図 1 庄内川右岸 6.0km 地点の地質横断面図

Genuchten 式⁶⁾の silt の値を用い、透水係数と透気係数の式には Mualem モデル⁷⁾を用いた。また、堤防は原地盤の状態から有限要素メッシュを追加・削除する手法⁸⁾を用いて解析断面を作製後、T.P.0.0m を位置水頭の基準として河川水位を上昇させ、定常状態となるまでその水位を維持した。河川水位の上昇速度は 2000 年に発生した東海豪雨時に庄内川樫島観測所にて記録された河川水位の時刻歴⁹⁾を参考に算出し、Case1 : T.P.-0.18m (低水位)、Case2 : T.P.2.53m (中水位)、Case3 : T.P.5.22m (高水位)の河川水位を設定した(図 2)。河川水位上昇時には、川表側の河川水位よりも下に位置する土要素には河川水位に対応した全水頭境界を設定し、その他の川表側の土要素および川裏側の土要素には浸出面境界を設定した。図 3 には定常状態となった Case3 の飽和度分布を示す。河川水位の上昇によって堤体内に浸潤面が概ね放物線形状で形成されている様子が見て取れる。

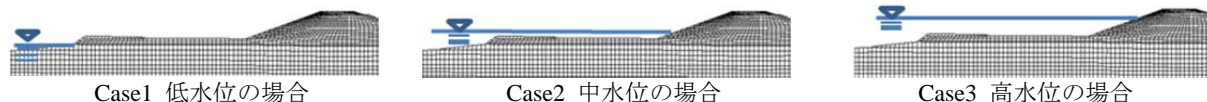


図 2 各解析ケースにおける河川水位

地震応答解析に際して、下端はせん断波速度 300m/sec の粘性境界、左右両端の要素に側方境界要素単純せん断変形境界¹⁰⁾を設定した。入力地震動は南海トラフ 5 連動地震(陸側ケース)の NS 成分である(図 4)。地震動入力後は下端の加速度の入力を止める以外は全く同じ解析条件で 50 年間の圧密計算を行った。

3. 解析結果

図 5 は各解析ケースにおける地震直後のせん断ひずみ分布を示す。地震中に大きく沈下する挙動が確認できるが、せん断ひずみ分布に着目すると各解析ケースでひずみの生じ方が異なっている。Case1 では川表側(図の左側)へ変形しているのに対し、Case3 では川裏側(図の右側)へ変形している。Case2 では若干川表側への変形が大きい。Case1 と Case3 の中間のような変形となっている。川表側には河川水位に対応する静水圧を表面力として作用させていて、河川水位が高いほど堤体は川裏側へ押されるような状態にある。このため、Case2、Case3 と水位が高くなるにつれて川表側へ変形しにくくなり、川裏側への変形が大きくなる。またいずれの解析ケースにおいても平均骨格応力は全体的に減少し、特に基礎地盤上部の砂質土層では大きく減少して、堤体中央付近の土被り圧の大きい箇所を除いて液状化が生じた。

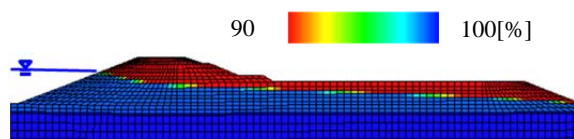


図 3 堤体内の浸潤位置(飽和度分布: Case3)

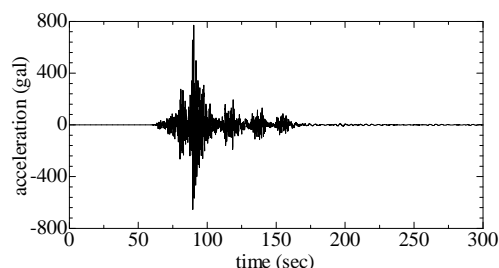


図 4 入力地震動

図6と図7は地震中～地震後の法尻の水平変位と天端沈下量を示す。図6を見ると、河川水位が高くなるほど右側の法尻の水平変位が大きく、左側の水平変位が小さくなっているのがわかる。このため、せん断ひずみ分布からも見て取れたように、河川水位が高いほど川裏側へ変形し、堤体近傍の住宅や構造物の被害が拡大する可能性があることが明らかになった。また地震後には水平変位が小さくなるが、これは地震中に生じた過剰間隙水圧の消散とともに基礎地盤・堤体が沈下し、法尻が引き込まれたためである。図7の天端沈下量を見ると、いずれの解析ケースにおいても3m程度の大きな沈下が生じた。本報の解析結果における地震直後の最大沈下量はCase1の2.98mであり、これは堤防高の約40%にあたる。河川構造物地震対策技術検討委員会(1996)の調査によると、明治以降に発生した地震による河川堤防の沈下量は堤防高の75%以内であることから、概ね妥当な解析結果が得られたものと考えている。河川水位が高くなると川裏側への変形が大きくなるが、この堤体の川裏側には大きな段が設けられているため、堤体が段に支えられる形になり沈下量が小さく抑えられたものと考えられる。しかし、Case3では地震入力終了時の堤防高は計画高水位を下回るため越水し、堤内地が浸水する恐れがある。

4. おわりに

庄内川右岸6.0km地点の堤防を対象とした地震応答解析により、地震中に基礎地盤内の砂質土層が液状化し、堤体の沈下や側方流動が生じることがわかった。このとき河川水位が高いほど堤体が川裏側に強く押されているため、川裏側へ大きく変形し、堤防近傍の住宅や構造物の被害が拡大する可能性がある。堤防天端の沈下量はいずれの河川水位の場合でも3m程度と大きく、洪水時など高河川水位状態であった場合には、堤防高が河川水位を下回って越水し、堤内地が浸水する恐れがあることを示した。今後は、複合外力下における三相系解析ならではの解析結果をより多く示していく予定である。

謝辞：JSPS 科研費 25249064 と国土交通省 H26 年度河川砂防技術研究開発の助成を受けた。ここに、謝意を表します。

参考文献

- 1) Asaoka, A., Noda, T., Yamada, E., Kaneda, K. and Nakano, M. (2002): An elasto-plastic description of two distinct volume change mechanisms of soils, *Soils and Foundations*, 42(5), 47-57.
- 2) Noda, T. and Yoshikawa, T. (2015): Soil-water-air coupled finite deformation analysis based on a rate-type equation of motion incorporating the SYS Cam-clay model, *Soils and Foundations*, 55(1), 45-62.
- 3) 加藤健太・吉川高広・野田利弘・小高猛司・高稲敏浩・李圭太 (2015) : 空気～水～土骨格連成有限変形解析に基づく河川堤防基礎地盤の透水性がパイピング破壊に及ぼす影響評価, 第50回地盤工学研究発表会概要集 (本誌掲載予定) .
- 4) 東邦地水株式会社 (1998) : 平成9年度庄内川下流部堤防詳細点検報告書 (資料編)
- 5) Carsel, R.F. and Parrish, R.S. (1988): Developing joint probability distribution of soil water retention characteristics, *Water Resources Research*, 24(5), 755-769.
- 6) van Genuchten, M. T. (1980): A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, *Soil Science Society of America Journal*, 44, 892-898.
- 7) Mualem, Y. (1976): A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media, *Water Resources Research*, 12, 513-522.
- 8) Takaine, T., Tashiro, M., Shiina, T., Noda, T. and Asaoka, A. (2010): Predictive simulation of deformation and failure of peat-calcareous soil layered ground due to multistage test embankment loading, *Soils and Foundations*, 50(2), 245-260.
- 9) 国土交通省中部地方整備局庄内川河川事務所ホームページ
- 10) 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.

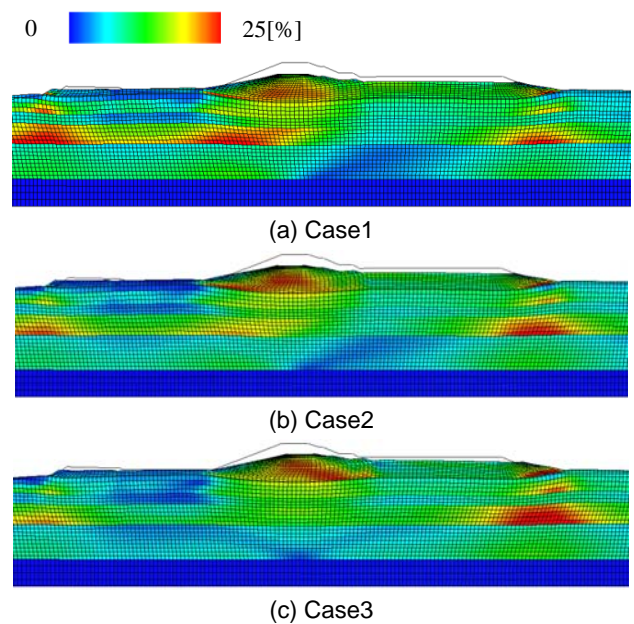


図5 地震直後のせん断ひずみ分布

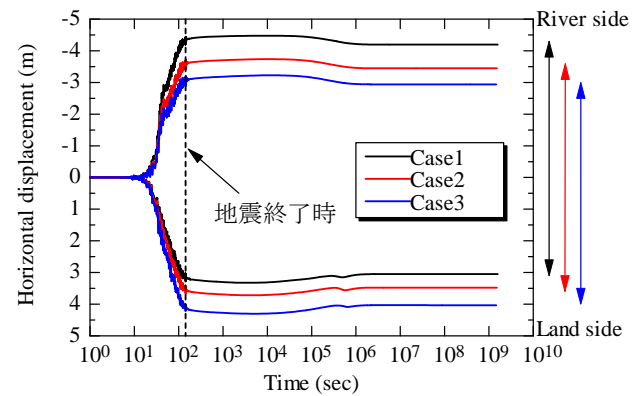


図6 法尻の水平変位

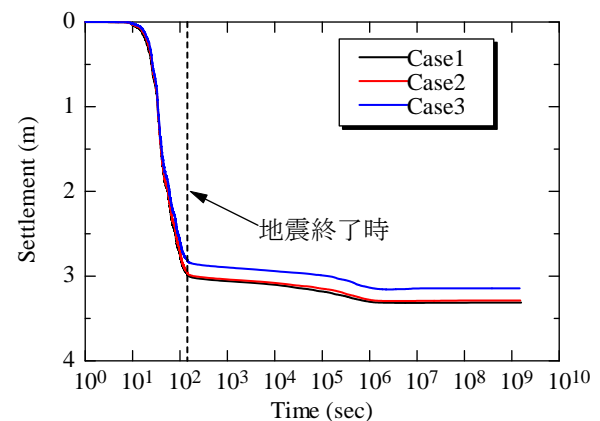


図7 天端沈下量