

第Ⅲ部門

浸透-変形連成解析法による木津川堤防のパイピング現象の再現解析

京都大学大学院 学生員 ○田中 健造

京都大学大学院 正会員 木元 小百合

1. はじめに

平成 29 年 10 月の台風 21 号の影響で、22 日夜から 23 日明け方にかけて近畿地方で大規模な出水があった。20 日から続いた断続的な降雨の影響もあり、京都府八幡市上津屋地区および久世郡久御山地区の木津川堤内耕作地の至る箇所で、基礎地盤のパイピング現象に伴う噴砂、漏水が発生した。本研究では、久御山地区（右岸 6.0 k+150 m）の堤内地で発生したパイピング現象に関して、有限変形理論に基づく浸透-変形連成解析プログラム COMVI2D-DY を用いて再現解析を行った。

2. 解析の概要

本研究では、土層の構成式として弾塑性構成式¹⁾および弾粘塑性構成式²⁾を用いた。構成式の応力変数には、土粒子骨格内に間隙空気存在する不飽和状態の土にも適用可能な、式 (1) に示す骨格応力を適用した。

$$\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} - \{S_r p^w + (1 - S_r) p^g\} \delta_{ij} \quad (1)$$

ここで、 σ_{ij} は全応力テンソル、 p^w 、 p^g は間隙水圧、間隙空気圧であり、 S_r は飽和度である。

支配方程式には、Biot の二相混合体理論を拡張して不飽和土を固相、液相、気相の仮想連続体の重ね合わせで表現し、水分特性曲線に van Genuchten モデルを用いた。空間離散化には有限要素法を用い、土骨格変位は 8 節点アイソパラメトリック要素、水圧と空気圧は 4 節点アイソパラメトリック要素で計算した。時間離散化は土骨格の変位および速度に Newmark の β 法、間隙圧にオイラーの後退差分法を用いた。なお、本研究では土粒子の内部侵食挙動の影響は考慮しない。

3. 解析条件

本研究の解析対象である久御山地区（右岸 6.0 k+150 m）の地質断面を図 1 に、それを基に作成した有限要素メッシュを図 2 に示す。堤内側約 50 m の地層は水平構造をなしていると仮定した。二次元平面ひずみ条件とし、基礎地盤の固定境界は、底面は x 、 y 方向ともに固定、側方は x 方向のみ固定とした。基礎地盤は、堤

体を含めて 6 層から構成されており、それぞれ、大阪層群礫層（Og 層）、段丘堆積層（Tg 層）、沖積砂礫層（Asg 層）、沖積粘土層（Ac 層）、堤体粘土（Bc 層）、堤体砂質土（Bs 層）である。堤外地表面と堤体表面は、水圧が正の時は排水境界、水圧が負の時は非排水境界となるように設定した。

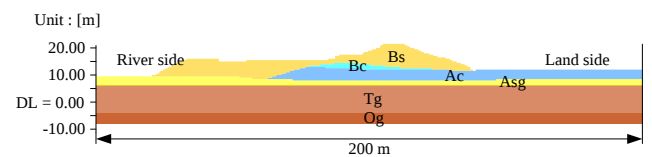


図 1 久御山地区の地質断面

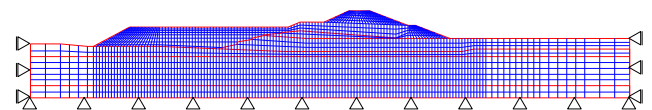


図 2 解析メッシュ

本研究では、台風 21 号発生当時の河川水位変化状況を再現するため、八幡水位観測所の水位データを基に、堤防モデルに与える水位変化データを作成した。河川水位の時刻列変化グラフを図 3 に示す。観測されたピーク水位を解析地点の痕跡水位に合わせてスライドさせ、初期水位を設定した。解析では、河川水の浸透を基礎地盤上部および堤体表面の該当要素に水圧境界を与えることで表現し、計算時間増分は 10.0 sec とした。解析に用いたパラメータを表 1 に示す。

本研究では、2 ケースでの解析を行った。ケース 1 では、パイピング現象における透水層になったと考えられる Asg 層の透水係数を 1.0×10^{-4} (m/s) で一定とし、ケース 2 では、これまでの度重なるパイピング現象による水みちの形成や内部浸食現象の影響、また、堤内側の Asg 層が実際は徐々に薄くなっている可能性を考慮して、実際の噴砂発生箇所を境に、堤内側の透水係数を砂質土層としては一般値の範疇である 1.0×10^{-6}

(m/s)に設定し、砂が流動化していると考えられる堤外側の透水係数については 1.5×10^{-4} (m/s)と設定し直した上で浸透-変形解析を行った。各ケースのAsg層に設定した透水係数を図4に示す。

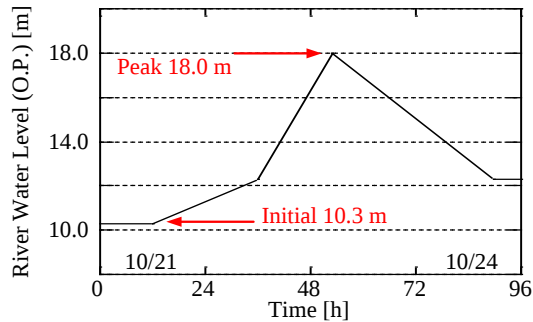


図3 河川水位の時刻列変化

表1 材料パラメータ

Parameter	Bs (EVP)	Bc (EVP)	Ac (EVP)	Asg (EVP)	Tg (EVP)	Og (EVP)
Density ρ_s (t/m ³)	2.80	2.80	2.80	2.65	2.80	2.80
Water specific weight γ_w (kN/m ³)	9.8	9.8	9.8	9.8	9.8	9.8
Water permeability k_w (m/s)	3.0×10^{-4}	1.0×10^{-7}	1.0×10^{-8}	1.0×10^{-4}	1.1×10^{-5}	9.6×10^{-6}
Gas permeability k_g (m/s)	1.0×10^{-3}	5.87×10^{-8}	5.87×10^{-8}	1.0×10^{-3}	5.87×10^{-8}	5.87×10^{-8}
Initial void ratio e_0	0.607	1.410	1.410	0.800	1.250	1.250
Compression index λ	0.044	0.341	0.341	0.025	0.341	0.341
Swelling index κ	0.009	0.019	0.019	0.0003	0.019	0.019
Initial elastic shear modulus ratio G_0/G_{ref}	761	400	400	761	400	400
Stress ratio at critical state M^*_{cs}	1.41	1.24	1.24	-	1.24	1.24
Stress ratio at phase transformation M^*_{tr}	-	-	-	0.909	-	-
Stress ratio at failure M^*_f	1.41	1.24	1.24	1.229	1.24	1.24
Hardening parameters B^*_n, B^*_{n1}, C_f	100, 40, 10	100, 40, 10	100, 40, 10	5000, 300, 1000	100, 40, 10	100, 40, 10
Structural parameters n, β	0.5, 1.0	1.0, 0.0	1.0, 0.0	0.5, 50	0.3, 3.6	0.3, 3.6
Dilatancy parameters D^*_0, n	-	-	-	1.0, 4.0	-	-
Over consolidation ratio OCR	1.2	1.0	1.0	1.2	1.0	1.0
Control parameter of anisotropy C_d	-	-	-	2000	-	-
Reference value of plastic strain γ^{pl}	-	-	-	0.001	-	-
Reference value of elastic strain γ^{el}	-	-	-	0.003	-	-
Viscoplastic parameter m^*	50.00	24.68	24.68	-	24.68	24.68
Viscoplastic parameter C_1 (1/s)	5.0×10^{-10}	3.8×10^{-11}	3.8×10^{-11}	-	1.0×10^{-20}	1.0×10^{-20}
Viscoplastic parameter C_2 (1/s)	3.0×10^{-10}	3.8×10^{-11}	3.8×10^{-11}	-	1.0×10^{-20}	1.0×10^{-20}
Scalar hardening parameters A^*_n, B^*_n	5.0, 10.0	5.9, 1.8	5.9, 1.8	-	5.9, 1.8	5.9, 1.8
Strain-dependent parameters a^*, r	10, 0.4	10, 0.4	10, 0.4	-	10, 0.4	10, 0.4
Van Genuchten parameter α (1/kPa)	3.00	0.033	0.033	0.4	0.033	0.033
Van Genuchten parameter n^*	1.50	1.083	1.083	3.0	1.083	1.083
Minimum saturation S_{rmin}	0.400	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Maximum saturation S_{rmax}	0.776	0.990	0.990	0.990	0.990	0.990
Shape parameter of water permeability a	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
Shape parameter of gas permeability b	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3
Suction parameter S_l	1.2	0.5	0.5	1.2	0.5	0.5
Suction parameter S_d	0.9	0.25	0.25	0.9	0.25	0.25
Suction parameter S_{th}	-	-	-	0.2	-	-
Suction parameter S_{th}	-	-	-	0.1	-	-

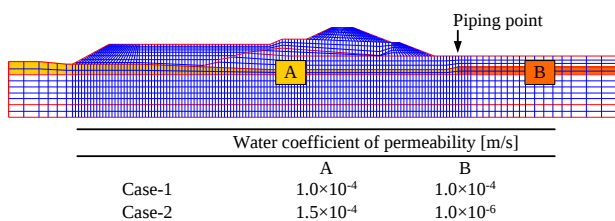


図4 各ケースのAsg層の透水係数

4. 解析結果

水位がピークとなる53 hにおける、両ケースの平均骨格応力分布を図5に、蓄積塑性偏差ひずみ分布を図6に示す。図5より、両ケースのAsg層において、周辺要素より応力の小さい、薄い層状の領域が発生していることがわかる。これは、河川水が透水性の高いAsg層に流入、浸透し、間隙水圧が増加したためだと考え

られる。特にケース2では、透水係数が変化する要素付近で応力がゼロ付近まで低下し、これはパイピング現象の発生を表す。このとき、顕著なひずみは台風21号でパイピングが実際に発生した地点で卓越しており、実現象に近い結果を解析的に表現できたといえる。

5. 結論

透水層の透水係数を均一としたケース1に対して、過去のパイピング現象の影響を考慮し、透水係数を変化させたケース2ではより実現象に近い再現結果が得られた。しかし、実地盤の粘土層や透水層の構造は本解析モデルのように単純ではなく、粘土層厚の薄くなっている箇所、過去の噴砂により砂礫が混じり透水性をもった粘土などが三次元的に分布している。そのような条件を解析上で如何に再現するかが今後の課題である。

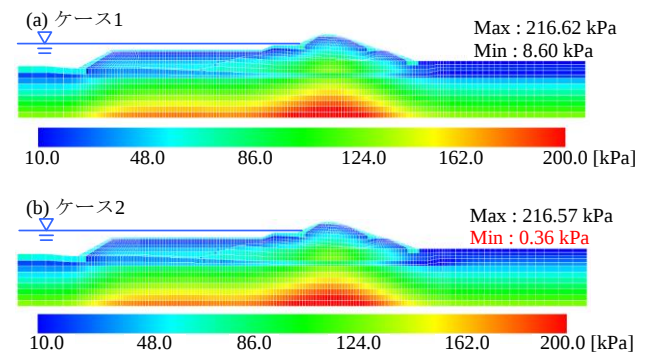


図5 平均骨格応力分布

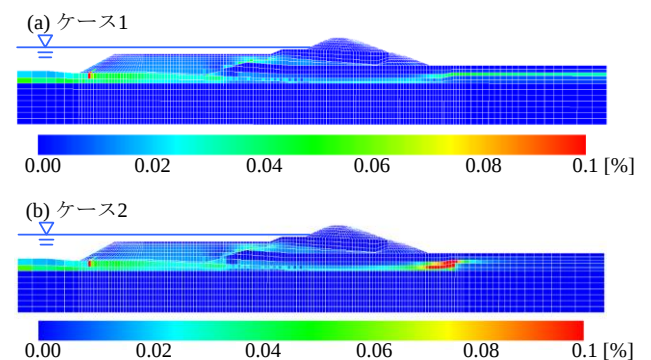


図6 蓄積塑性偏差ひずみ分布

参考文献

- Oka, F., Yashima, A., Tateishi, A., Tagichi, Y. and Yamashita, S.: A cyclic elasto-plastic constitutive model for sand considering a plastic strain dependency of the shear modulus, *Géotechnique*, Vol.49, No.5, pp.661-680, 1999.
- Kimoto, S., Shahbodagh, K.B., Mirjalili, M. and Oka, F.: Cyclic elasto-viscoplastic constitutive model for clay considering the nonlinear kinematic hardening rules and the structural degradation, *International Journal of Geomechanics*, Vol.15, No.5, pp. A4014005-1-A4014005-14, 2015.