

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数値解析

京都大学大学院 学生会員 ○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 月に列島を襲った台風 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は大規模な出水が発生した。20 日からの断続的な降雨の影響もあり、京都府八幡市上津屋地区、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、漏水が発生したり。本研究では、久御山地区（右岸 6.0 k + 150 m）の堤内地で実際に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^{2,3)}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²⁾および弾粘塑性構成式³⁾を用いた。構成式中の応力変数には、土粒子骨格内に間隙空気が存在する不飽和土にも適用可能な、次の式 (1) に示す骨格応力を使用した。

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

ここで、 σ_{ij} は全応力テンソル、 p^w 、 p^g はそれぞれ間隙水圧、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、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た。水分特性曲線には、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。時間離散化に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浸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、久御山地区の主な噴砂発生位置と解析断面を図 1 に、解析断面の地質図を図 2 に、地質断面を基に作成した解析メッシュを図 3 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。解析は二次元平面ひずみ条件とし、基礎地盤の固定境界は、底面が x 、 y 方向固定、側方が x 方向固定とした。基礎地盤は堤体を含め 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)、堤体粘土 (Bc 層)、堤体砂 (Bs 層) である。堤外地表面と堤体表面は、水圧が正の時に排水境界、負の時に非排水境界となるように設定した。

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、解析用の入力水位データを作成した。その水位時刻列変化グラフを図 4 に示す。観測所で記録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。解析の計算時間増分は 10.0 sec とし、河川水の浸透は基礎地盤上部および堤体表面の当該要素に水圧境界を与えることで表現した。解析に用いたパラメータを表 1 に示す。

本研究では、粘土層における過去のパイピング現象の影響を検討するため、2 ケースの解析を行った。ケース 1 では、図 2 に示したように、堤内側表層の粘土層厚を一定だと仮定した。噴砂被害を受けて現地で行われたトレンチ掘削の結果、粘土層下部に噴砂が貫入している様子が確認された。そこでケース 2 では、過去の度重なるパイピング現象による影響で、Asg 材料が浸食され、粘土層厚が局所的に薄くなっている状況を再現するために、実際の噴砂発生箇所での解析メッシュに関して、図 5 に示すように Asg 層の領域を変化させた。

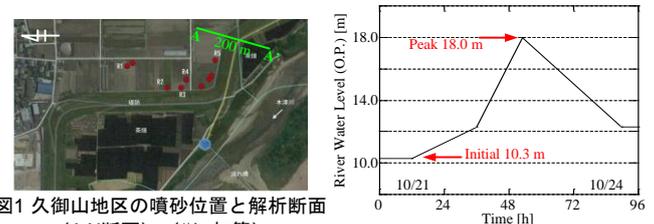


図1 久御山地区の噴砂位置と解析断面 (AA'断面) (1)に加筆

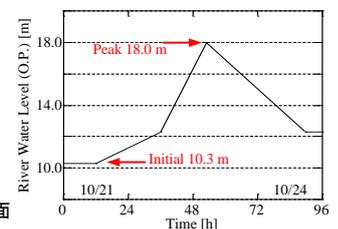


図4 河川水位の時刻列変化

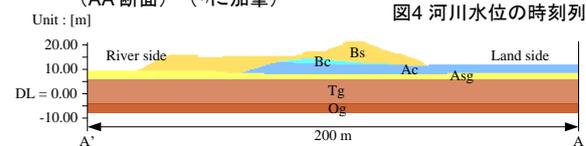


図2 久御山地区の地質断面

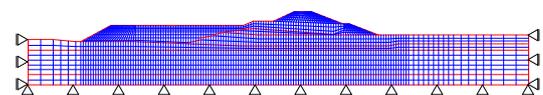


図3 解析メッシュ

キーワード 堤防, パイピング, 数値解析

連絡先 〒615-8540 京都府京都市西京区京都大学桂 C クラスタ C1 棟 581

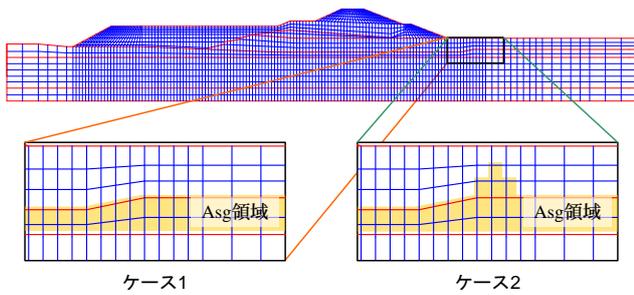


図5 ケース間のAsg領域の違い

表1 材料パラメータ

Parameter	Bs (EVP)	Bc (EVP)	Ac (EVP)	Asg (EP)	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/σ'_{m0}	761	400	400	761	400	400
Stress ratio at critical state M^*_m	1.41	1.24	1.24	-	1.24	1.24
Stress ratio at phase transformation M^*_m	-	-	-	0.909	-	-
Stress ratio at failure M^*_f	1.41	1.24	1.24	1.229	1.24	1.24
Hardening parameters B^*_o, B^*_i, 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, 5.0	0.3, 3.6	0.3, 3.6
Dilatancy parameters D^*_o, 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^*_{p0}	-	-	-	0.001	-	-
Reference value of elastic strain γ^*_{e0}	-	-	-	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^*_1, B^*_2	5.0, 10.0	5.9, 1.8	5.9, 1.8	-	5.9, 1.8	5.9, 1.8
Strain-dependent parameters α^*_1, 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_r	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_{TB}	-	-	-	0.2	-	-
Suction parameter S_{db}	-	-	-	0.1	-	-

4. 解析結果

被災当時、噴砂現象が発生し始めたのは、河川水位がピークを迎える 53h (10月23日午前9時) 頃であった。そして、本解析上でも同等の計算内時間において顕著な変化が見られた。両ケースにおける、53h 時点での平均骨格応力分布を図6に、蓄積塑性偏差ひずみ分布を図7に示す。図6より、両ケースのAsg層において、周辺要素より応力の小さな領域が生じていることが確認できる。これは増水した河川水が透水性の高いAsg層に浸透し、間隙水圧が上昇したためだと考えられる。川裏法尻付近の要素に着目すると、特にケース2においてゼロ近くに至る顕著な応力低下が見られる。図7より、ケース1では堤内側の粘土層下部に小さなひずみが広範囲に分布している一方で、ケース2ではAsg材料が粘土層に貫入している部分において顕著なひずみが卓越している様子が見られる。

パイピングに対する安全性照査に用いられる、鉛直

動水勾配を川裏法尻付近の粘土層に着目し計算した結果、ケース1では0.61、ケース2では0.75となった。次に、本モデルのように被覆土がある場合のパイピングに対する安全率 (G/W)の計算を次式に基づいて行った¹⁾。

$$\frac{G}{W} = \frac{i_c + 1}{i + 1} \quad (2)$$

ここで、 i_c は限界動水勾配、 i は動水勾配を表す。安全率 (G/W)は、ケース1では1.085、一方ケース2では0.984と、わずかに1を下回る結果となった。

5. 結論

砂礫の粘土層への貫入を考慮したケース2では、顕著なひずみの卓越や、安全率が1を下回ったという点から、実現象に近い結果を解析的に表現できたといえる。しかし、本解析では浸透に伴って流動化した土粒子が流れ出すことによる透水係数の変化、内部侵食の影響を考慮できていないため、今後は内部侵食を扱う支配方程式を組み込んだうえで再解析を行い、その影響を検討する。

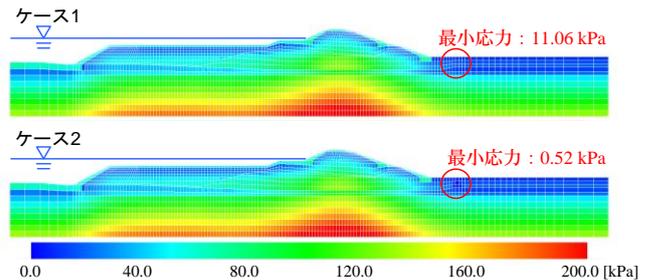


図6 平均骨格応力分布

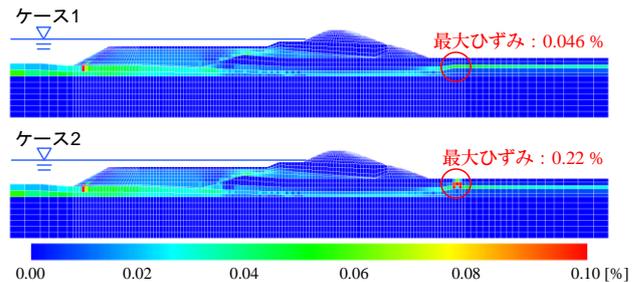


図7 蓄積塑性偏差ひずみ分布

参考文献

- 1) 木津川漏水対策工の検討報告書, 平成31年3月, 淀川河川事務所管内堤防破壊時の堤防調査委員会
- 2) Oka, F., Yashima, A., Tateishi, Y. and Yamashita, S.: A cyclic elasto-plastic constitutive model for sand considering a plastic strain dependency of the shear modulus, *Geotechnique*, Vol.49, No.5, pp.661-680, 1999.
- 3) 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.