

河川堤防の浸透流解析に用いる解析パラメータのデータセットに関する検討

九州工業大学大学院 学生会員 山下航暉

九州工業大学大学院 正会員 川尻峻三, 廣岡明彦

1. はじめに

河川堤防は線上に長い地盤構造物であるため、築堤で使用される盛土材料の土質が縦断・横断方向に変化している。このため安定性評価の精度を高めるためには、盛土材料の浸透・強度特性の評価が重要となる。浸透・強度特性は室内試験や原位置試験から取得することが最良であるが、すべての土質に対して各種試験を実施することは費用や労力の観点から現実的ではない。そのため、「河川堤防の構造検討の手引き」¹⁾ (以下、手引きとする) では、築堤や基礎地盤における土質を礫質土・砂質土、細粒分の多い砂質土、粘性土の3種類に分類し、それぞれの土質に対する保水性などの浸透特性のデータセットが浸透流解析に使用するパラメータとして推奨されている。しかし、先述したように河川堤防の土質特性は変化しているため、より多様な土質に対応可能なデータセットがあれば、浸透流解析の精度向上が可能となる。

そこで本研究では、筆者らが過去に実施した実大試験堤防の湛水実験の浸透流解析による再現解析によって、Carsel and Parrish²⁾が提案する USDA (アメリカ農務省) の土質分類と浸透特性のパラメータに関するデータセットの適用性について検討した。

2. 試験堤防と浸透流解析の概要

図 1 は本研究で用いた試験堤防の断面図を示している。また、図 2 は試験堤防の構築に使用した盛土材料の粒度分布を示している。堤体は高さ 2m、法面勾配 1:2、幅 2m であり、シルト質土で構成されている。堤体部における平均的な締固め度 D_c は $D_c = 84\%$ であり、堤防天端には簡易なアスファルト舗装、法面には張芝を施工されている。基礎地盤は 1m であり、0.5m ずつ砂質土と礫質土で構築した。計測機器は水位計、土壤水分計、傾斜計が設置されている。湛水実験は 2 日間実施しており、1 日目 (2020/10/7) は、0.25m/hour の速さで河川水位を堤防高さの半分まで上昇させた。2 日目 (2020/10/7) は、1 日目の 4 倍の速さとなる 1.00m/hour で河川水位を堤防天端まで上昇させた³⁾。

表 1 は本研究の浸透流解析で使用した主なパラメータのまとめを示している。表 1 は室内土質試験および原位置結果から、表 2 は手引きと Creager 法⁴⁾から、表 3 は Carsel and Parrish の土質区分と浸透特性の関係から、それぞれのパラメータを決定した。表中の θ_s は飽和体積含水率、 θ_r は残留体積含水率、 α および n は van Genuchten モデル⁵⁾におけるフィッティングパラメータ、 k_{sat} は飽和透水係数である。表 1 のシルト質土 (堤体) と砂質土 (基礎地盤) については、試験堤防の築堤中に実施した現場密度および透水

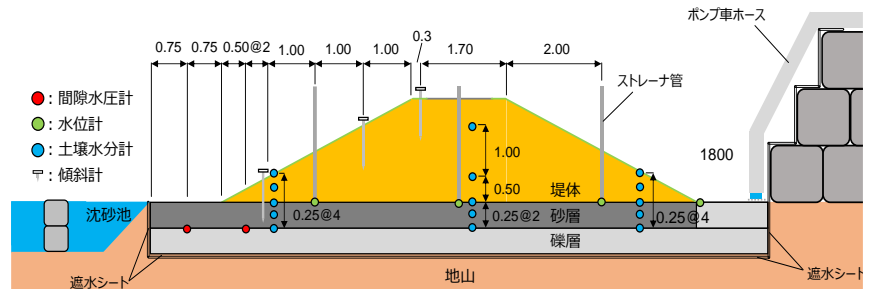


図 1 試験堤防の概要および観測機器の設置位置

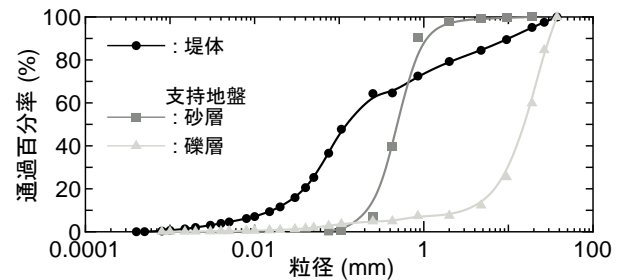


図 2 試験堤防に使用した盛土材料の粒度分布

表 1 主に室内および原位置試験から決定したパラメータ

土質	θ_s	θ_r	$\alpha(\text{kN/m}^2)$	n	$k_{sat}(\text{m/s})$
シルト	0.43	0.100	0.911	1.230	5.18×10^{-5}
砂	0.40	0.057	0.710	5.057	1.28×10^{-4}
礫	0.38	0.045	10.000	2.680	2.78×10^{-4}

表 2 手引きおよび Creager 法から決定したパラメータ

土質	θ_s	θ_r	$\alpha(\text{kN/m}^2)$	n	$k_{sat}(\text{m/s})$
シルト	0.20	0.116	1.947	1.230	1.80×10^{-6}
砂	0.20	0.044	1.960	5.057	1.10×10^{-4}
礫	0.20	0.044	1.960	2.680	3.00×10^{-1}

試験と、再構成供試体に対して行った保水性試験の結果からパラメータを決定した。礫質土については、実測値と解析値が整合するようパラメトリック解析を行い、最終的には逆解析的にパラメータを決定した。

表3 Carsel and Parrish のデータから決定したパラメータ

土質	θ_s	θ	$\alpha(\text{kN/m}^2)$	n	$k_{\text{sat}}(\text{m/s})$
シルト	0.41	0.067	1.33	1.89	1.23×10^{-5}
砂	0.43	0.045	0.71	2.68	8.25×10^{-5}
礫	0.43	0.045	0.71	2.68	8.25×10^{-5}

3. 結果および考察

図3は湛水実験中における河川水位 H_R 、堤体内水位 H_L と各パラメータを用いて浸透流解析から算出した水位計設置地点の圧力水頭 h_w の時間変化を示している。実測値と最も整合している結果は、室内および原位置試験からパラメータを決定した解析値である。堤外側（表法面）では実測値と解析値で0.3m程度の違いあるものの、堤内側（裏法面）では実測値と解析値の整合性は高く、裏法面における安定性評価が高い精度で実施できるといえる。次に手引きからパラメータを決定した解析値は、堤外・天端下・堤外での h_w の時間変化が類似している。つまり、堤体では H_L がほぼ水平に形成されて、河川水位に応じて増減している。これは Creager 法から算出した礫の k_{sat} が高いため基礎地盤への河川水の流入量が多くなり、堤体への河川水の流入量がほぼ定常状態となっているためと予想される。また、解析値である h_w は実測値の H_L よりも大きな値であることから、安定性評価としては安全側にはなるが過大な設計となる可能性があり、本実験で使用したような礫層に対して Creager 法から k_{sat} を求める場合には注意が必要である。Carsel and Parrish を用いた解析値は、1回目の湛水時にはすべての地点で h_w が H_L よりも小さくなっている。一方で2回目の湛水時の解析値は、手引きの結果よりも実測値に近い値となっている。これには保水性に関するパラメータが影響していると考えられる。つまり、1回目の湛水により飽和度が上昇し、2回目の湛水時にはこの飽和度上昇の影響が残っており、不飽和透水係数が大きくなったことで2回目の湛水時には河川水が堤体へ浸透して h_w が上昇したと推察される。しかし、解析値は実測値よりも低い値であり、堤体内水位を過小評価しているため安定性評価としては危険側である。

4. まとめ

本研究では、河川堤防の堤体内水位の推定に用いられる浸透流解析に使用する解析パラメータのデータセットについて、過去に実施した実大試験堤防実験の再現解析を行うことで検討した。その結果、手引きを参考に決めたデータセットを用いた解析値は堤体内水位を過大評価し、USDAの土質分類と関連付けられたデータセットを用いた場合には堤体内水位を過小評価する傾向にあった。

謝辞

本研究の一部は、本研究は科研費(20H02405, 20166523)の助成を受けたものである。

参考文献

- 財団法人国土技術研究センター：河川堤防の構造検討の手引き，2012。
- Carsel, R. F., & Parrish R. S.: Developing Joint Probability Distributions of Soil Water Retention Characteristics, *Water Resource Research*, Vol. 24, pp. 755-769, 1988.
- Kawajiri, S. et al.: Development and Verification Experiment of Ultrasmall-pore Water Pressure Gauge by Laboratory and Full-scale-model Levee Experiments, *Sensors and Materials*, Vol.34, No.11(4), pp. 4223-4235, 2022.
- Creager, W.P., Justin, J.D., and Hinds, J.: Engineering for Dams, Vol. III, Earth, Rock-fill, Steel and Timber dams, John Wiley & Sons, Inc., N.Y., pp. 645 ~ 649, 1945.
- van Genuchten, M. T.: A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils, *Soil Science Society American Journal*, Vol.44, pp.892-898, 1980.

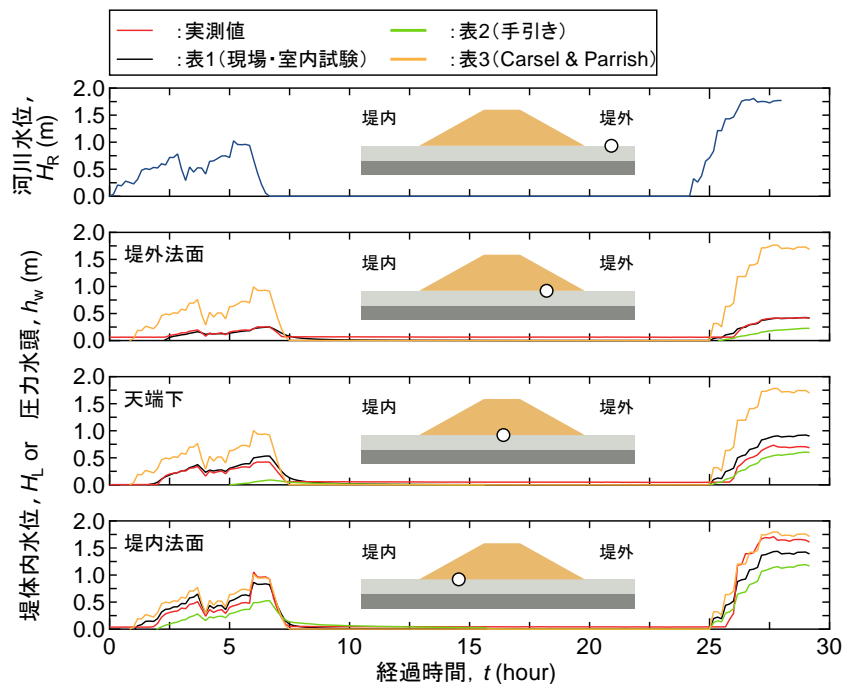


図3 湛水実験より得られた堤体内水位と解析から得られた圧力水頭の経時変化