

基于 Forchheimer 渗流的土石混合体单向固结模型研究*

钟祖良^{1,2}, 别聪颖^{1,2}, 胡伦³, 涂义亮⁴

(1. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045; 2. 重庆大学 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400045; 3. 贵州交通职业技术学院 建筑工程系, 贵阳 550008; 4. 重庆交通大学 土木工程学院, 重庆 400074)

摘要: 土石混合体回填土的渗流属于非达西渗流, 不符合 Terzaghi 固结理论的前提。因此, 土石混合体回填土的固结沉降问题难以依靠 Terzaghi 固结理论解决。经验证 Forchheimer 渗流模型符合土石混合体的渗流特性, 基于 Forchheimer 渗流模型并加以理论推导, 建立了欠固结饱和土石混合体回填土线性单向固结模型。利用 MATLAB 软件编制有限差分计算程序, 将有限差分解与达西解析解以及固结压缩试验结果进行对比, 验证有限差分解的有效性。结果表明: 基于 Forchheimer 渗流模型推导得到的线性单向固结模型能够较好地预测分析土石混合体的固结沉降, 对西南地区欠固结土石混合体回填土固结沉降问题具有理论指导意义。

关键词: 土石混合体; 渗流模型; 线性单向固结模型; 有限差分; 解析解

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1673-0836(2019)02-0473-08

Research on One-dimensional Consolidation Model of Soil-rock Mixtures Backfill under Forchheimer Seepage Model

Zhong Zuliang^{1,2}, Bie Congying^{1,2}, Hu Lun³, Tu Yiliang⁴

(1. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P.R. China; 2. Key Lab of Chinese Education Ministry for Construction and New Technology of Mountain Cities, Chongqing, 400045, P.R. China; 3. Department of Architectural Engineering, Guizhou Transportation Vocational Technical College, Guiyang 550008, P.R. China; 4. School of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, P.R. China)

Abstract: The seepage in the soil-rock mixture belongs to non-Darcy flow and it does not conform to the premise of Terzaghi's consolidation theory. Therefore, the consolidation settlement of soil-rock mixture backfill can hardly be solved by Terzaghi's consolidation theory. Based on Forchheimer seepage model which was confirmed to accord with the seepage characteristics in soil-rock mixture, the linear one-dimensional consolidation model of the under consolidated saturated soil-rock mixture is established by theoretical derivation, with its finite difference solution calculated. The program of finite difference calculation is compiled by MATLAB software to verify the effectiveness of finite difference solution, and the finite difference solution is compared with Darcy's analytical solution and the results of consolidation compression test. The results show that the linear one-dimensional consolidation model derived from the Forchheimer seepage model can predict and analyze the consolidation settlement of the soil-rock mixture well, and is of theoretical significance to the consolidation settlement of the under consolidated soil-rock mixture backfill in the southwest region.

Keywords: soil-rock mixtures; seepage model; linear one-dimensional consolidation; finite difference; analytical solution

* 收稿日期: 2018-10-23(修改稿)

作者简介: 钟祖良(1980-), 男, 福建武平人, 博士, 副教授, 博士生导师, 主要从事隧道与地下工程的理论与数值模拟等方面的研究工作。E-mail: haiou983@126.com

基金项目: 国家自然科学基金(51808083); 重庆市基础研究与前沿探索项目(cstc2018jcyjAX0491)

0 引言

西南地区山地城镇在前期建设时经常开山填谷,导致地下形成了大面积土石混合体回填区。土石混合体是一类介于土体和岩体之间的特殊地质体,回填方式多以抛填为主,极不均匀且相对松散^[1],对地表建筑物、市政路基、以及地下轨道交通衬砌结构的沉降控制影响较大。因此,山地城市土石混合体回填土的固结沉降问题一直是工程界关注的热点。

以达西渗流为基础, Terzaghi 1925 年提出的线性单向固结理论,一直被应用于计算土体的固结沉降。由于土体的渗流在很多情况下不满足达西定律,不少学者基于非达西渗流探索新的固结模型。Schmidt 等^[2]在指数渗流模型的基础上,假设可忽略渗流对土体不透水底面的影响,从而得出了土体在非达西渗流条件下土体固结的短期解析解和较长固结时间的近似解。Pascal 等^[3]考虑有起始水力梯度渗流模型,借助有限差分方法求解了一维固结近似解析解。刘慈群等^[4]在前者研究基础上,将公式进行简化,从而求出其近似解。刘忠玉等^[5]同样在考虑有起始水力梯度渗流的基础上,利用有限体积法对单层、双层的黏土固结情况进行分析,重点研究了非达西渗流下土体固结的影响因素,并提出了新的单向固结模型。谢海澜等^[6]对弱透水黏土层进行固结试验研究,分析其非达西渗流下的固结行为,通过半解析法计算获得固结解。可见,不同的渗流模型可推导出不同的固结模型,而渗流模型与研究对象息息相关。以上计算模型主要是以黏土、沙土或者其他均质土体为研究对象,而研究涉及到土石混合体的相关研究较少。

基于非达西 Forchheimer 渗流模型,笔者推导了土石混合体线性单向固结偏微分方程,采用有限差分法推导其固结解析解,获得其固结模型,将计算结果与达西解析解、固结压缩试验结果进行对比验证。本研究将对回填土固结沉降问题具有重要理论指导意义。

1 土石混合体固结压缩试验

1.1 试验材料

本次试验土样取自重庆市轨道交通 10 号线工程 10105 标上湾路—环山公园区间隧道 K23+592~K23+802 段下穿土石回填区域,其块石主要由泥岩和砂质泥岩组成,细粒土为粉质黏土,隧道掌子

面如图 1 所示。采用现场灌水法测定回填土密度 $\rho_d = 1.895 \text{ g/cm}^3$ 。

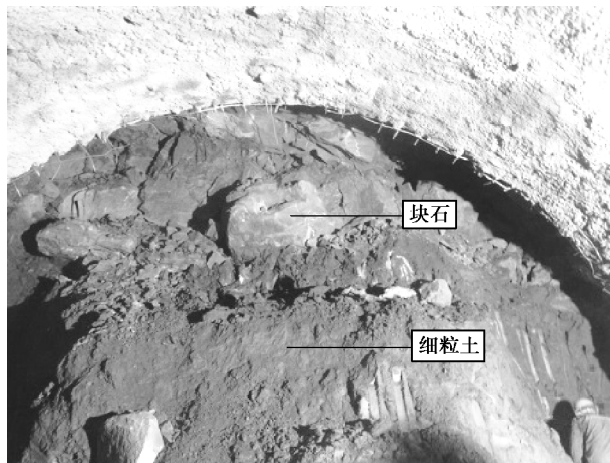


图 1 现场取样

Fig. 1 Field sampling

本试验以原状土石混合体回填土的干密度 ρ_d 为标准,采用原土石混合体回填土进行重塑,得到土石混合体回填土试样,各试样干密度都与原状土相同。

采用等量替代法对原试样进行缩尺后再进行筛分试验。确定试样各粒组含量,得到平均级配曲线如图 2 所示,含石量约 60%,不均匀系数 $C_u = 51.95$,曲率系数 $C_c = 4.10$,不同时满足 $C_u > 5$ 、 $1 < C_c < 3$ 的条件,属于级配不良的土。

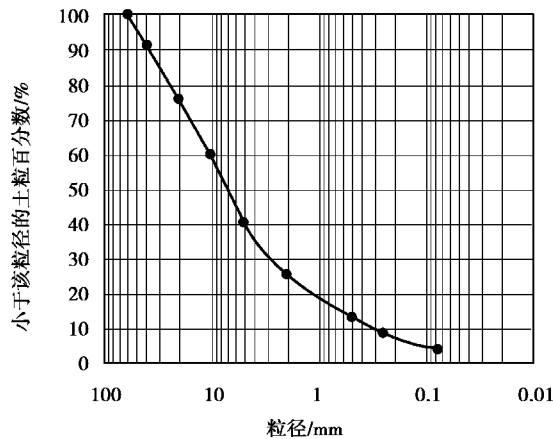


图 2 试样平均级配曲线

Fig. 2 Average particle size distribution curve of the sample

根据回填土级配关系计算出试样所需各粒组的质量,参考文献 [7-9],采用 5 mm 的土石阈值,通过控制试样中粒径 $> 5 \text{ mm}$ 的石粒组质量来控制试样的含石量,制备用于试验的含石量分别为 0%、20%、40%、60%、80%、100% 的重塑土,试验总共需配制 6 组 18 个试样,试样物理参数见表 1。

表 1 土石混合体回填土试样物理参数
Table 1 Physical parameters of soil-rock mixtures backfill specimen

含石率 $\omega_{\text{石}}/\%$	饱和含 水率 $\omega/\%$	饱和密 度 $\rho/$ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	干密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	比重 G_s	初始孔 隙比 e
0	15.4	2.188	1.895	2.680	0.414
20	14.9	2.177	1.895	2.640	0.393
40	14.3	2.167	1.895	2.601	0.372
60	13.8	2.156	1.895	2.564	0.353
80	13.2	2.145	1.895	2.526	0.333
100	12.6	2.134	1.895	2.490	0.314

1.2 试验仪器及加载方法

试验采用 ZY50-2G 型大型粗颗粒土压缩试验机,如图 3 所示,试样尺寸为 $\phi 500 \text{ mm} \times 280 \text{ mm}$,应力水平为 3.5 MPa,轴向总荷重为 700 kN。采用计算机自动测量、采集、处理试验数据。

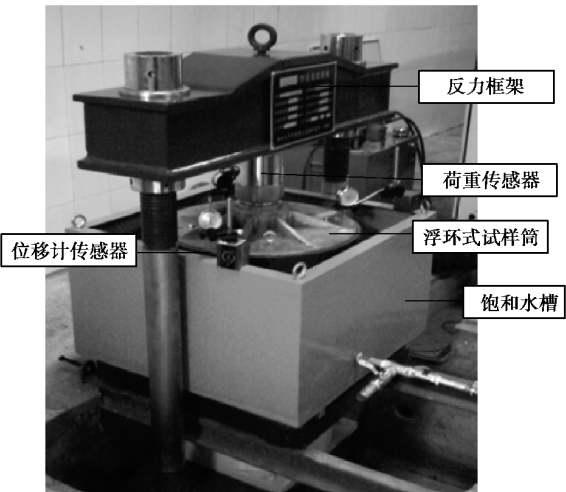


图 3 ZY50-2G 型大型粗颗粒土压缩试验机
Fig. 3 ZY50-2G large grained soil compression testing machine

本试验土石混合体含粗颗粒多,最大粒径接近 60 mm,参考粗粒土试验规程^[10],最大粒径符合试样尺寸要求。试验法向应力设定为 50 kPa、100 kPa、200 kPa、400 kPa、800 kPa、1600 kPa 6 个级别。

试验步骤如图 4 所示:①将原状土锤散风干、筛分备用,先配置不同含石量的试样。②试验时依照等密度原则将试样分层装入试样盒并压实,按常水头饱和方法湿润 24 h,保持试样处于饱和状态。③24 h 后进行试样预接触,打开数据采集系统软

件,对土样施加各级压力,记录沉降数据直至试验完毕。然后在计算机控制卸除垂直压力,收回油缸取下位移计、传力板等,卸出试样,清理现场。

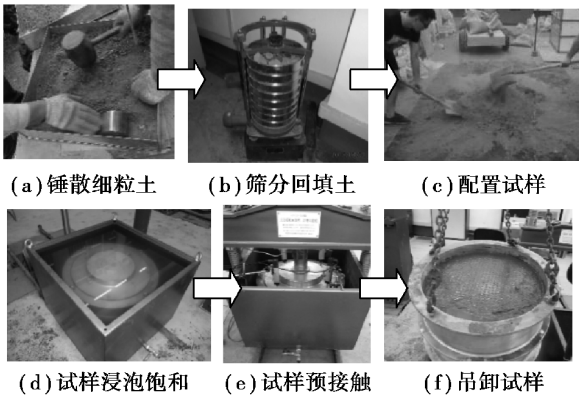


图 4 压缩固结试验步骤

Fig. 4 Procedure of compression consolidation test

1.3 试验结果及分析

将实验数据进行整理计算,得到不同含石量土石混合体的压缩系数 a_v 、压缩指数 c_v 、压缩模量 E_s ,如表 2 所示。

表 2 土石混合体压缩性参数试验结果

Table 2 Test results of compressibility parameters of soil-rock mixtures backfill

含石率/%	0	20	40	60	80	100
$a_v/(\text{MPa}^{-1})$	0.19	0.17	0.20	0.16	0.15	0.23
c_v	0.06	0.06	0.07	0.06	0.05	0.08
E_s/MPa	7.12	7.81	6.52	8.17	8.43	5.51

压缩系数 a_v 的变化范围为 0.15~0.23 MPa^{-1} ; 压缩指数 c_v 变化范围是 0.05~0.08;属于中性压缩土,变形模量 E_s 变化范围为 5.51~8.43 MPa;土石混合体属于中压缩性土。

2 土石混合体线性单向固结模型建立

2.1 土石混合体回填土的渗流模型分析

土石混合体的渗流特性与含石量紧密相关。当含石量从零增大,土石混合体中渗流流态由层流发展为紊流,而达西定律适用于层流或者近似层流的流态,因此,含石量越大,渗流越偏离达西定律。

目前非达西渗流模型的研究已有不少成果,却很少应用于分析土石混合体的渗流问题。1901 年,Forchheimer 等^[11]考虑土石混合体非达西渗流中流速较大,提出了非达西 Forchheimer 模型;1975 年

Volker^[12]通过数值模拟和试验研究验证了该渗流模型的可靠性。后续有学者^[13-14]基于大量土石混合体的渗流试验数据,对 Forchheimer 模型做了验证工作,证明了 Forchheimer 模型对土石混合体的适用性。该模型如式(1)所示:

$$i = av + bv^2 \quad (1)$$

式中: i 为水力坡降; v 为流速; a 和 b 所代表的值为:

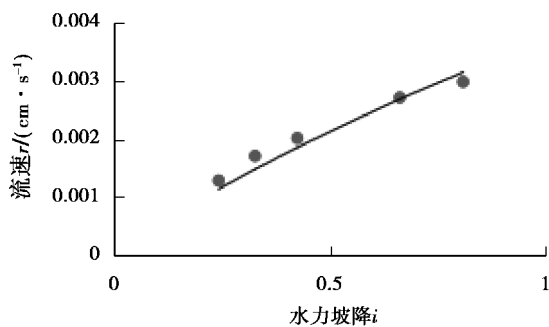
$$a = \frac{u}{\rho g k} = \frac{1}{K} \quad (2)$$

$$b = \frac{\beta}{g} \quad (3)$$

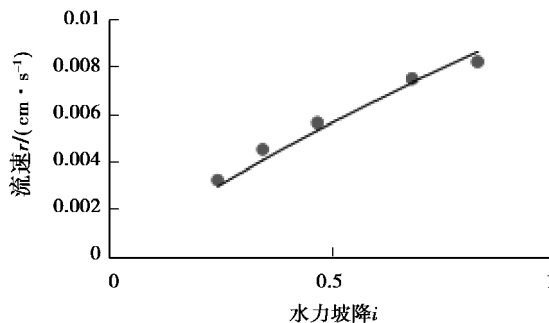
式中: μ 为流体的粘滞系数; κ 为土体的渗透率; K 为土体渗透系数; β 为非达西渗流的影响系数; ρ 为流体密度; g 为重力加速度。当 $b=0$ 时,式(1)变为达西渗流关系式,对应于含石量为 0 的情况。

Forchheimer 模型的一次项考虑孔隙流体所受到的黏土介质中黏滞力作用,二次项考虑了石块间孔隙流体所受到的惯性力的作用;且 Forchheimer 公式可从流体力学 N-S 方程推求出,具有扎实理论基础。因此,本文选用 Forchheimer 渗流模型。

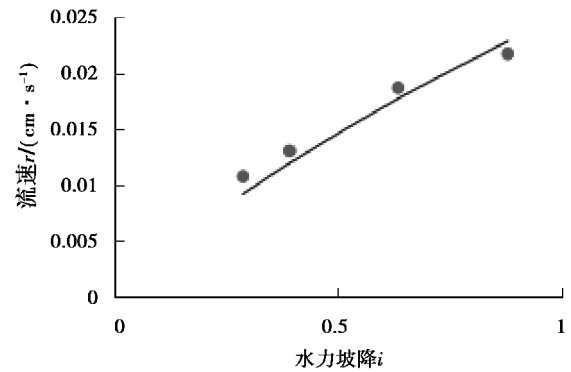
参考文献[15]中土石混合体的大量渗流实验数据,对含石量为 0%、20%、40%、60%、80%、100% 的土石混合体渗流结果进行拟合,部分拟合效果如图 5 所示。



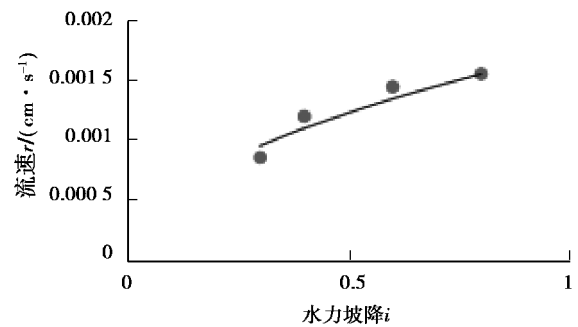
(a) 含石率20%Forchheimer模型拟合曲线



(b) 含石率40%Forchheimer模型拟合曲线



(c) 含石率60%Forchheimer模型拟合曲线



(d) 含石率80%Forchheimer模型拟合曲线

图 5 不同含石量下 Forchheimer 渗流模型拟合曲线

Fig. 5 The Forchheimer model fitting figure under different stone containings

Forchheimer 渗流模型能较好地拟合土石混合体回填土的渗流情况,拟合获得的渗流参数如表 3 所示。

表 3 Forchheimer 渗流模型拟合参数

Table 3 Fitting parameters of Forchheimer percolation model

含石率 $\omega_{\text{石}}/\%$	渗透系数 K / ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	影响系数 β/m^{-1}
0	0.0027	28.300
20	0.0053	2.145×10^9
40	0.0133	2.417×10^8
60	0.0370	5.083×10^7
80	0.6970	3.329×10^6
100	4.0900	2.342×10^5

2.2 基本假设条件

在可变荷载加载条件下,厚度为 H 的饱和土石混合体回填土层上面是透水层,底部为不透水层,受到初始荷载为 q_0 、终值荷载为 q_u 的可变荷载作用,其渗流符合 Forchheimer 渗流,其余基本假设均与太沙基理论相符。

2.3 微分方程的建立

根据流入和流出单元体的流量差等于单元土体体积变化这一连续条件,可以得到:

$$\frac{\partial v}{\partial z} = \frac{a_v}{1+e} \left(\frac{\partial u}{\partial t} - \frac{dq}{dt} \right) \quad (4)$$

式中: q 为土体所受荷载值; z 为竖向坐标; a_v 为土的压缩系数; e 为初始孔隙比; u 为超孔隙水压力; t 为时间。

在地基中任取一单元土体,土中的渗流用 Forchheimer 渗流定律可以表示为:

$$v = \frac{\sqrt{\frac{1}{K^2} + 4i \frac{\beta}{g} - \frac{1}{K}}}{\frac{2\beta}{g}} \quad (5)$$

联立式(4)和式(5)得线性固结偏微分控制方程:

$$\frac{1+e}{a_v \gamma_w} \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{K^2} + \frac{4\beta}{\gamma_w g} \frac{\partial u}{\partial z}}} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{\partial u}{\partial t} - \frac{dq}{dt} \quad (6)$$

式中: γ_w 为水的容重。初始边界条件为:

$$\begin{cases} u(0, t) = 0, u(z, 0) = q \\ \left. \frac{\partial u}{\partial z} \right|_{(z=H)} = 0 \end{cases} \quad (7)$$

2.4 微分方程的有限差分解

将控制方程无量纲化,令:

$$\begin{cases} U = \frac{u}{q_u}, Z = \frac{z}{H}, T = \frac{Kt}{\gamma_w m_v H^2} \\ Q = \frac{q(t)}{q(u)}, Q_0 = \frac{q_0}{q_u}, I = \frac{4\beta q_u K^2}{\gamma_w g H} \end{cases} \quad (8)$$

将式(7)代入式(5),使得方程无量纲化得:

$$\left(1 + C \frac{\partial U}{\partial Z} \right)^{-\frac{1}{2}} \frac{\partial^2 U}{\partial Z^2} = \frac{\partial U}{\partial T} - \frac{dQ}{dT} \quad (9)$$

将上式进行 Crank-Nicholson 差分得到:

$$\begin{aligned} & \lambda \alpha_j^k U_{j-1}^k + \lambda \alpha_j^k U_{j+1}^k - 2(1 + \lambda \alpha_j^k) U_j^k = \\ & 2(\lambda \alpha_j^{k-1} - 1) U_j^{k-1} - \lambda \alpha_j^{k-1} U_{j-1}^{k-1} - \\ & \lambda \alpha_j^{k-1} U_{j+1}^{k-1} - 2(Q^k - Q^{k-1}) \end{aligned} \quad (10)$$

$$\text{式中: } \alpha_j^k = \left(1 + C \frac{U_{j+1}^k - U_{j-1}^k}{2\Delta Z} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (11)$$

初始边界条件离散差分为:

$$\begin{cases} U_j^0 = Q^0 & j = 1, 2, 3, \dots, n \\ U_0^k = 0, U_{n+1}^k = U_{n-1}^k & k = 1, 2, 3, \dots, m \end{cases} \quad (12)$$

联立式(10)和式(11)解得该方程的孔隙水压力解。

则土石混合体回填土的沉降量计算式为:

$$S_t = \begin{cases} m_v q_u H \left(Q - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left(\frac{U_j + U_{j-1}}{2} \right) \right) & T < T_c \\ m_v q_u H \left(1 - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left(\frac{U_j + U_{j-1}}{2} \right) \right) & T \geq T_c \end{cases} \quad (13)$$

式中: T_c 为加载时间因子。

由超静孔压解可进而得到平均固结度,计算得到以有效应力定义的固结度 U_p 和以沉降定义的固结度 U_s ,两者相等,即:

$$U_p = U_s = \begin{cases} Q - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left(\frac{U_j + U_{j-1}}{2} \right) & T < T_c \\ 1 - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left(\frac{U_j + U_{j-1}}{2} \right) & T \geq T_c \end{cases} \quad (14)$$

3 线性单向固结模型有限差分解验证

3.1 有限差分解与达西固结解析解的对比验证

为了对土石混合体回填土的孔隙水压力和固结度进行计算,利用 MATLAB 编制了相应的有限差分计算程序。令参数 $\beta=0, T_c=0$ 时,受到瞬时恒定荷载 $Q=1$ 的作用,与太沙基单向固结理论受荷情况相同。因此,在 $\beta=0, T_c=0$ 条件下,分别考虑时间因子 $T=0.05$ 和 $T=0.5$ 时土石混合体回填土 Forchheimer 渗流线性单向固结有限差分解和太沙基单向固结理论的超孔隙水压力 $U=u/q_u$ 进行比较,以验证 Forchheimer 渗流下线性单向固结差分程序的可靠性。在计算时,差分程序中时间步距 $\Delta T=0.0001$,空间网格分别取 $n=50, n=100$ 和 $n=200$ 将孔隙水压差分计算结果与解析解对比,结果显示,当 $T=0.5, n$ 取以上值时,误差均为 0,当 $T=0.05$ 时,结果如表 4 所示。

可见,当 $\beta=0$ 且 $T_c=0$ 时, T 较小时,仅当划分空间网格 $n=50$ 时有极小的误差,最大相对误差为 0.020 0%,而在其他条件下误差为 0。

当 $\beta=0$ 且 $T_c=0$ 时(即瞬时恒定荷载 $Q=1$ 作用下),土石混合体回填土 Forchheimer 渗流线性单向固结平均固结度有限差分解与太沙基单向固结理论的平均固结度解析解在不同的时间因子 T 条件下进行对比,时间步距 $\Delta T=0.0001$,划分空间网格分别为 $n=50, n=100$ 和 $n=200$,对比结果如表 5 所示。

表 4 不同空间网格下超孔隙水压力 $U=u/q_u$ 差分计算结果与解析解对比 ($T=0.05$)
Table 4 Finite difference calculation results compared with the analytical solution of excess pore water pressure $U=u/q_u$ at different spatial grid ($T=0.05$)

z/H	解析解	$n=50$		$n=100$		$n=200$	
		差分解	误差/%	差分解	误差/%	差分解	误差/%
0.1	0.248 2	0.248 2	0.000 0	0.248 2	0.000 0	0.248 2	0.000 0
0.2	0.472 9	0.473 0	-0.020 0	0.472 9	0.000 0	0.472 9	0.000 0
0.3	0.657 2	0.657 2	0.000 0	0.657 2	0.000 0	0.657 2	0.000 0
0.4	0.794 1	0.794 1	0.000 0	0.794 1	0.000 0	0.794 1	0.000 0
0.5	0.886 2	0.886 1	0.010 0	0.886 1	0.000 0	0.886 1	0.000 0
0.6	0.942 2	0.942 1	0.010 0	0.942 2	0.000 0	0.942 2	0.000 0
0.7	0.973 1	0.973 0	0.010 0	0.973 1	0.000 0	0.973 1	0.000 0
0.8	0.988 4	0.988 4	0.000 0	0.988 4	0.000 0	0.988 4	0.000 0
0.9	0.995 1	0.995 0	0.010 0	0.995 1	0.000 0	0.995 1	0.000 0

表 5 不同时间因子下平均固结度 U_s 差分计算结果与解析解对比
Table 5 The finite difference calculation results compared with the analytical solution of average degree of consolidation U_s under difference time factor

时间因子 T	解析解/%	$n=50$		$n=100$		$n=200$	
		差分解/%	误差/%	差分解/%	误差/%	差分解/%	误差/%
0.045 2	23.996 8	24.002 9	-0.025 6	23.993 0	0.015 8	23.990 5	0.026 2
0.085 3	32.955 7	32.965 3	-0.029 1	32.958 0	-0.007 2	32.956 2	-0.001 7
0.161 0	45.264 0	45.270 8	-0.015 2	45.265 7	-0.003 8	45.264 4	-0.001 0
0.221 2	52.970 6	52.976 1	-0.010 3	52.972 0	-0.002 6	52.970 9	-0.000 6
0.303 9	61.694 8	61.698 7	-0.006 3	61.695 8	-0.001 6	61.695 1	-0.000 4
0.417 5	71.065 3	71.067 6	-0.003 2	71.065 9	-0.000 8	71.065 5	-0.000 2
0.573 6	80.315 1	80.316 0	-0.001 2	80.315 3	-0.000 3	80.315 2	-0.000 1
0.788 0	88.401 9	88.402 0	-0.000 1	88.401 9	0.000 0	88.401 9	0.000 0
1.082 6	94.393 4	94.393 1	0.000 3	94.393 3	0.000 1	94.393 4	0.000 0

由表 5 可见,相对误差较小。在 $n=50$ 时,其最大误差为 0.029 1%; $n=100$ 时,最大误差为 0.015 8%; $n=200$ 时,最大误差为 0.026 2%。因此,划分空间网格 $n=100$ 时所得的效果比较好。

当 $\beta=0$ 且 $T_c \neq 0$ 时,即在达西定律条件下考虑可变荷载 $Q=q(t)$ 的作用,将不同土石混合体回填土 Forchheimer 渗流线性单向固结有限差分解和基于达西渗流的单向固结的固结度解析解进行对

比。令初始荷载 $Q_0 = 0$, 时间步距 $\Delta T = 0.000\ 1$ 、 $T_c = 0.1$ 、 $n = 100$, 计算结果如表 6 所示。

表 6 可变荷载下 U_s 差分计算结果与解析解对比
Table 6 The finite difference calculation results compared with the analytical solution of U_s under variable load

时间因子 T	Darcy 解析解/%	差分解/%	误差/%
0.045 2	7.229 7	7.231 9	-0.030 2
0.085 3	18.741 6	18.744 9	-0.017 5
0.161 0	37.260 8	37.263 0	-0.005 8
0.221 2	46.490 2	46.491 9	-0.003 6
0.303 9	56.528 2	56.529 4	-0.002 1
0.417 5	67.180 8	67.181 6	-0.001 1
0.573 6	77.673 8	77.674 1	-0.000 4
0.788 0	86.845 7	86.845 8	-0.000 1
1.082 6	93.641 1	93.641 1	0.000 0

可以看出,可变荷载条件下的偏差很小,其最大误差也只为 0.030 2%。

3.2 有限差分解与试验数据的对比验证

将固结压缩试验结果与 Forchheimer 渗流线性单向固结有限差分解程序计算结果进行对比验证。模型中参数取值由固结压缩试验得到,见表 7。

表 7 模型中参数的取值
Table 7 The parameters in the model

含石率 $\omega_{\text{石}}/\%$	20	40	60	80
压缩系数 a	0.17	0.20	0.16	0.15
初始孔隙比 e_0	0.393	0.372	0.353	0.333

验证结果如图 6—9 所示,可以看出:
拟合效果良好,证明有限差分计算理论的可靠性。由于压缩性和渗透性是随着固结过程而逐渐减小的,故线性模型比试验数据固结要快。

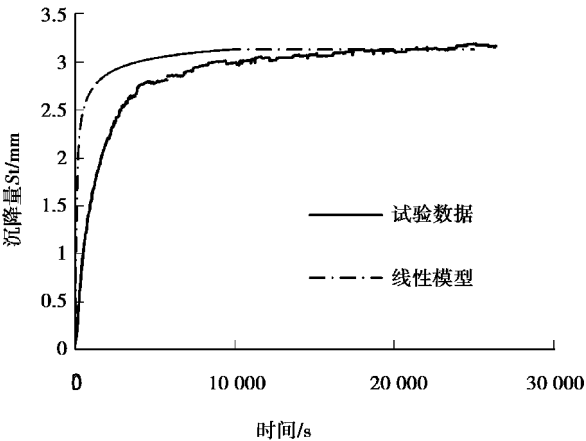


图 6 含石率为 20% 时线性模型与试验数据对比
Fig. 6 The comparison of linear models and test results when rock containing 20%

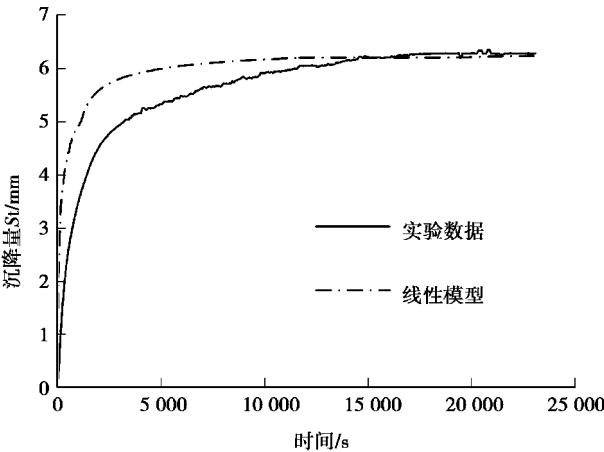


图 7 含石率为 40% 时线性模型与试验数据对比
Fig. 7 The comparison of linear models and test data when rock containing 40%

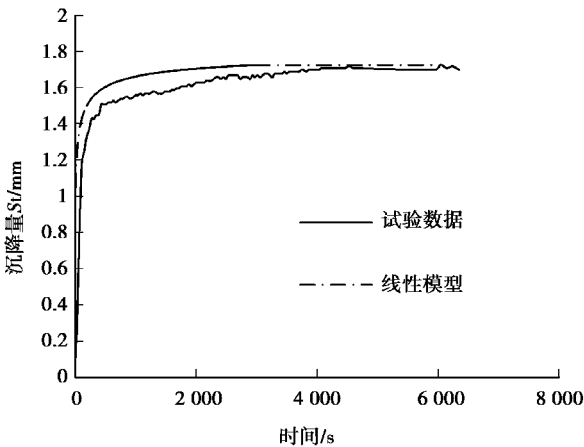


图 8 含石率为 60% 时线性模型与试验数据对比
Fig. 8 The comparison of linear models and test data when rock containing 60%

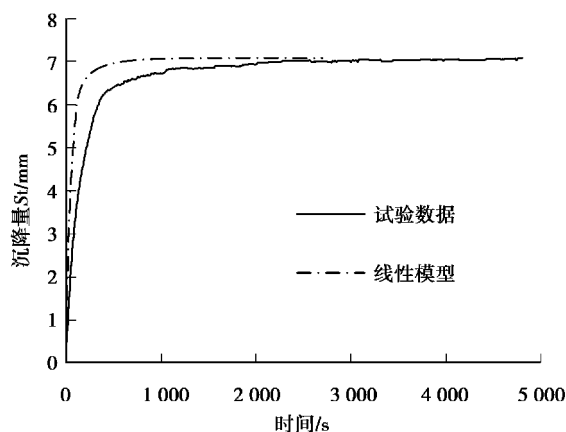


图 9 含石率为 80% 时线性模型与试验数据对比

Fig. 9 The comparison of linear models and test data when rock containing 80%

5 结论

(1) 土石混合体属级配不良土, 工程性质差; 根据土石混合体压缩性判定其属于中性压缩土。

(2) 以 Forchheimer 模型为基础, 在不考虑其压缩性、渗透性随时间变化的条件下, 通过超孔隙水压力公式推导得出线性单向固结偏微分方程。采用 Crank-Nicholson 差分法计算其有限差分解, 得出了欠固结土石混合体回填土线性单向固结模型。

(3) 用 MATLAB 软件对土石混合体线性固结模型进行编程计算并验证, 证实了土石混合体线性固结模型能较好地预测土石混合体的固结规律。

参考文献 (References)

- [1] 钟祖良, 涂义亮, 何晓勇, 等. 土石混合体物理指标及强度特性研究进展[J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12(4): 952-961. (Zhong Zuliang, Tu Yiliang, He Xiaoyong, et al. Research progress on physical index and strength characteristics of bimsoils [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2016, 12(4): 952-961. (in Chinese))
- [2] Schmidt J D, Westmann R A. Consolidation of porous media with non-Darcy flow [J]. Journal of the Engineering Mechanics Division, 1973, 99 (6): 1201-1216.
- [3] Pascal F, Pascal H, Murray D W. Consolidation with threshold gradients [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1981, 5(3): 247-261.
- [4] 刘慈群. 有起始比降固结问题的近似解[J]. 岩土工程学报, 1982, 4(3): 107-109. (Liu Ciqun. Approximate solutions for one-dimensional consolidation with a threshold gradient [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1982, 4(3): 107-109. (in Chinese))
- [5] 刘忠玉, 孙丽云, 乐金朝, 等. 基于非 Darcy 渗流的饱和黏土一维固结理论[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(5): 973-979. (Liu Zhongyu, Sun Liyun, Yue Jinchao, et al. One-dimensional consolidation theory of saturated clay based on non-Darcy flow [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(5): 973-979. (in Chinese))
- [6] 谢海澜, 武强, 赵增敏, 等. 考虑非达西流的弱透水层固结计算[J]. 岩土力学, 2007, 28(5): 1061-1065. (Xie Hailan, Wu Qiang, Zhao Zengmin, et al. Consolidation computation of aquitard considering non-Darcy flow [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(5): 1061-1065. (in Chinese))
- [7] 刘新荣, 涂义亮, 王鹏, 等. 基于大型直剪试验的土石混合体颗粒破碎特征研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(8): 1425-1434. (Liu Xinrong, Tu Yiliang, Wang Peng, et al. Particle breakage of soil-rock aggregate based on large-scale direct shear tests [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(8): 1425-1434. (in Chinese))
- [8] 董云, 柴贺军. 土石混合料的工程综合分类法研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(1): 179-184. (Dong Yun, Chai Hejun. Study on engineering synthetic classification of rock-soil aggregate mixture [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(1): 179-184. (in Chinese))
- [9] 刘新荣, 涂义亮, 王林枫, 等. 土石混合体的剪切面分形特征及强度产生机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(9): 2260-2274. (Liu Xinrong, Tu Yiliang, Wang Linfeng, et al. Shear failure surface characteristics and strength generation mechanism of soil-rock aggregate [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(9): 2260-2274. (in Chinese))
- [10] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 水电水利工程粗粒土试验规程 (DL/T5356—2006) [S]. 北京: 中国电力出版社, 2007. (National Development and Reform Commission of the People's Republic of China. Code for coarse-grained soil tests for hydropower and water conservancy engineering (DL/T5356—2006) [S]. Beijing: China Electric Power Press, 2007. (in Chinese))

(下转第 488 页)