

DOI: 10.16285/j.rsm.2020.1227

线性加载条件下考虑应力历史的饱和黏土一维非线性固结渗透试验研究

张 乐, 党发宁, 高 俊, 丁九龙

(西安理工大学 西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048)

摘 要: 为研究线性加载条件下不同应力历史的饱和黏土的渗透性, 利用改装后的 GDS 三轴仪进行了一维固结渗透联合试验, 对陕西洛川粉质黏土重塑样的渗透系数变化规律进行了研究。研究表明, 正常固结与超固结饱和黏土的渗透系数均随固结应力的增大而呈非线性减小, 且两者的孔隙比与渗透系数随固结应力的变化趋势一致。处于超固结状态土体的压缩性和渗透性要比处于正常固结状态小得多。在同一固结应力下, 渗透系数和孔隙比均随渗透压差的增大而减小。最后, 将实测值与文献[12]中修正后的达西渗透系数公式、修正后的柯森-卡门公式、斯托克斯孔隙流渗透系数公式以及固结度渗透公式计算得到的渗透系数进行了比较。结果表明, 用修正后的柯森-卡门渗透系数公式计算得到的渗透系数与实测值吻合较好, 因此, 推荐使用修正后的柯森-卡门渗透系数公式来预测洛川饱和黏土渗透系数。

关 键 词: 线性加载; 正常固结饱和黏土; 超固结饱和黏土; 渗透系数; 孔隙比; 非线性固结渗透

中图分类号: TU 411

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2021) 04-1078-10

Experimental study on the one-dimensional nonlinear consolidation and seepage of saturated clay considering stress history under ramp loading

ZHANG Le, DANG Fa-ning, GAO Jun, DING Jiu-long

(State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China)

Abstract: To study the permeability of saturated clays with different stress histories under ramp loading, the one-dimensional consolidation and seepage tests are carried out using modified GDS triaxial apparatus, and the change of the permeability coefficient of remolded silty clay in Luochuan, Shaanxi Province is studied. The results show that permeability coefficients of normally and over-consolidated saturated clays decrease nonlinearly with the increase of the consolidation stress, and the void ratios of these two soils are consistent with the trend of change of the permeability coefficients with the consolidation stress. The compressibility and permeability of soil in the over-consolidated state are much smaller than that in the normally consolidated state. The permeability coefficient and void ratio decrease with the increase of the osmotic pressure difference under a constant consolidation stress. Finally, the measured values are compared with the permeability coefficients calculated by the modified Darcy permeability coefficient formula, modified Kozeny-Carman formula, Stokes porosity permeability coefficient formula and degree of consolidation and seepage formula in Ref. [12]. The results reveal that the permeability coefficients calculated using the modified Kozeny-Carman formula are in good agreement with the measured values. Therefore, the modified Kozeny-Carman formula is recommended to predict the permeability coefficient of Luochuan saturated clay.

Keywords: ramp loading; normally consolidated saturated clay; over-consolidated saturated clay; permeability coefficient; void ratio; nonlinear consolidation and seepage

收稿日期: 2020-08-16

修回日期: 2020-09-29

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 51979225, No. 51679199); 水利部公益性行业科研专项 (No. 201501034-04); 陕西省科技统筹创新工程重点实验室项目 (No. 2014SZS15-Z01)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51979225, 51679199), the Special Funds for Public Industry Research Projects of the Ministry of Water Resources (201501034-04) and the Key Laboratory for Science and Technology Coordination & Innovation Projects of Shaanxi Province (2014SZS15-Z01).

第一作者简介: 张乐, 女, 1993 年生, 博士研究生, 主要从事黏性土土力学和挡土墙土压力以及土工试验等方面的工作。E-mail: lezhang_1993@163.com

通讯作者: 党发宁, 男, 1962 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土工程数值分析、计算力学等方面的教学与研究工作。

E-mail: dangfn@mail.xaut.edu.cn

1 引言

伴随着我国国民经济持续快速发展, 高速公路的许多路段不得不修建在软基(饱和黏土)之上, 因沉降引起的路面灾害越来越多, 所以准确高效地预测软基在受到上覆荷载后的沉降显得尤为重要及迫切。早在 1925 年, 太沙基即建立了饱和土单向固结理论, 并获得了一定初始条件与边界条件的数学解, 迄今仍被广泛应用。在太沙基固结理论中, 首先假设土的固结系数 C_v 为常量, 但事实上, 在计算固结系数 C_v 时的渗透系数 k 、孔隙比 e 以及压缩系数 a_v 都会随着应力的变化而变化。再者, 太沙基还假设外荷载一次瞬时施加到土体上, 然而实际工程中的外荷载经常为线性或循环荷载等^[1]。

多年来, 单向固结理论也获得了较大进展, 许多学者对太沙基基本假设进行了修正。Davis 等^[2]注意到压缩系数和渗透系数随有效应力的变化呈非线性变化, 由此获得了一维非线性固结方程的解析解。Xie 等^[3]在 Davis 的基础上, 提出了双层土的一维非线性固结的解析解。夏长青^[4]和胡安峰^[5]等假定土体在固结过程中压缩性和渗透性的变化成正比, 推导出饱和软土成层地基一维非线性固结解析解。Li 等^[6]假设压缩系数和渗透系数均变化, 建立了黏土在线性加载过程中的一维非线性固结方程。师旭超等^[7]通过太沙基一维固结理论与有效应力原理的方法, 研究了软土地基在线性卸荷作用下的固结变形规律。Lee 等^[8]针对层状土的一维固结问题, 在 Schiffman 等^[9]的基础上提出了一种更加明确的

解析解, 并提出土体渗透系数和体积压缩系数对固结的影响是不同的, 两者变化并不能体现在土体固结系数中。孙立强等^[10]考虑了固结系数为变量, 在此基础上对巴隆固结理论进行了改进。此外, 一些学者也考虑了应力历史对土体一维固结渗透的影响^[11-17], 并提出了考虑应力历史的一维非线性固结方程。为研究一维固结渗透过程中渗透系数和压缩系数的变化规律, 已有一些学者对软黏土进行了室内试验研究。邹圣锋等^[18]进行了不同水头压力下的土体渗透系数变化规律的试验, 得出软土渗透系数随孔隙比的减小而减小。齐添^[19]对萧山黏土进行了超固结土的一维固结渗透联合试验, 结果表明, 超固结土在固结过程中压缩性和渗透性随固结压力呈非线性变化。

虽然已有大量关于一维非线性固结渗透的理论研究, 但大多都是假设固结系数不变, 或假设渗透系数与水力梯度无关, 且很少有较为系统的室内试验来研究饱和黏土在不同初始固结状态下的一维固结渗透规律。鉴于此, 本文利用 GDS 三轴仪对陕西洛川黄土进行了一系列线性加载条件下考虑应力历史的一维固结渗透联合试验。对不同固结应力、多组水头作用下粉质黏土非线性渗透规律进行研究。在此基础上, 验证了文献[12]提出的考虑初始固结状态影响的渗透系数预测公式的适用性。

2 试验方案及方法

2.1 试验用土及试样制备

试验用土为陕西洛川 Q_3 黄土, 取土深度为 7~8 m, 原状黄土的物理性质指标如表 1 所示。

表 1 原状 Q_3 黄土的物理性质指标
Table 1 Physical properties of intact Q_3 loess

相对密度 G_s	含水率 $w/\%$	干密度 $\rho_d/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	液限 $w_L/\%$	塑限 $w_P/\%$	颗粒组成/%		
					>0.075 mm	0.075~0.005 mm	<0.005 mm
2.70	13.3	1.34	28.4	19.2	4	73	23

本文所用土样均为饱和重塑土样。其制备过程如下:

(1) 将风干土碾碎后过 2 mm 筛, 充分拌匀后测其风干含水率。然后将土配制到能够制样的含水率, 本文的制样含水率为 11.6%。将配制好的土装在塑料袋里密封放置 24 h。

(2) 测量配制好土样的含水率, 并计算制样所需土的质量。试样直径为 3.91 cm, 高度为 8 cm。本文采用压样法进行制样。制样时将试样均匀分为

5 层, 为了使试样层间更好接触, 在每次压实前都将接触面刮毛。连续压 5 次将试样压至目标干密度。根据 $e-\lg p$ 曲线可知洛川粉质黏土的先期固结压力为 115 kPa, 并认为此时土体处于正常固结状态。由此让重塑土样在 115 kPa 的压力下进行固结, 待固结稳定后, 认为试样处于正常固结状态。

2.2 试验仪器

试验仪器为英国进口的 GDS 三轴仪, 如图 1 所示。GDS 三轴仪不仅可以进行传统固结试验, 又

能在保持固结应力不变条件下进行渗透试验,直接测定每级荷载下固结完成时的渗透系数。从而解决了已有试验仪器在固结、渗透试验时的缺陷。为了对饱和和重塑土试样进行固结渗透试验,对 GDS 三轴仪进行了改造。重新设计加工了一套饱和土底座及双通道试样帽,实现了反压控制器与试样的底座以及试样帽连通,这样保证了试样在进行饱和及固结时,试样上下端排水都汇入到反压控制器中,进而可以精确地量测试样体变。

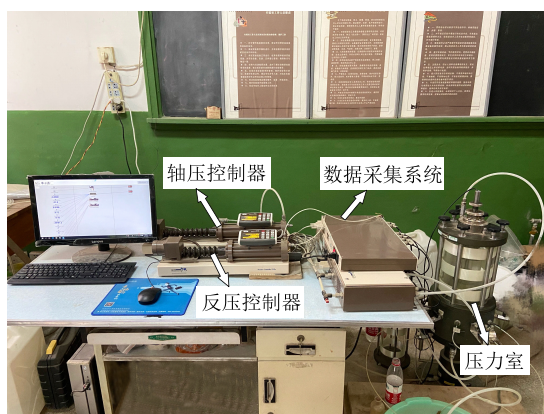


图 1 GDS 三轴仪

Fig.1 GDS triaxial apparatus

2.3 试验方案及方法

为了研究饱和黏土在考虑初始固结状态时的一维固结渗透规律,进行了一维固结渗透联合试验。为了提高试样的饱和度,在装样前,先对试样进行真空抽气饱和,然后利用 GDS 进行反压饱和。反压饱和时,对试样同时施加反压和围压,并使反压总是比围压小 2~5 kPa (本试验中,设置反压比围压小 5 kPa)。这样做的目的是为了防止试样膨胀。当孔隙水压力增量与围压增量之比大于 0.98 时,认为试样饱和。在试样饱和后,利用 GDS 高级加载模块对正常固结土进行固结应力为 140、165、190、215 kPa 下的固结试验,对超固结土进行固结应力为 25、50、75、100 kPa 下的固结试验。图 2 为多级线性加荷示意图,图中 $t_{j1} \sim t_{j4}$ 代表达到每一级荷载所需时间,本文选取 $t_{j1} = t_{j2} = t_{j3} = t_{j4} = 30 \text{ min}$, $t_1 \sim t_4$ 代表每级固结应力持续总时长,本文设定 $t_1 = t_2 = t_3 = t_4 = 24 \text{ h}$ 。每组固结试验结束后,保持固结应力不变,进行多级水头下的渗透试验,每级渗透时间为 1 h。每个初始固结状态下的试样做 3 组平行试验,总共进行了 9 组试验。以正常固结土为例,具体试验方案如表 2 所示。

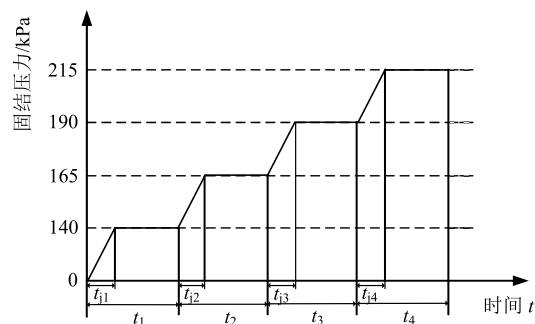


图 2 多级加荷示意图

Fig.2 Schematic diagram of multi-stage ramp loading

表 2 一维固结渗透联合试验方案

Table 2 One-dimensional consolidation and permeability joint test program

步骤	试验类型	围压 /kPa	反压 /kPa	底部压力 /kPa	备注
1	固结	140	0	—	固结应力 140 kPa
2	渗透	140	20	0	渗透压差 20 kPa
3	渗透	140	40	0	渗透压差 40 kPa
4	渗透	140	60	0	渗透压差 60 kPa
5	固结	165	0	—	固结应力 165 kPa
6	渗透	165	20	0	渗透压差 20 kPa
7	渗透	165	40	0	渗透压差 40 kPa
8	渗透	165	60	0	渗透压差 60 kPa
9	渗透	165	80	0	渗透压差 80 kPa
10	固结	190	0	—	固结应力 190 kPa
11	渗透	190	20	0	渗透压差 20 kPa
12	渗透	190	40	0	渗透压差 40 kPa
13	渗透	190	60	0	渗透压差 60 kPa
14	渗透	190	80	0	渗透压差 80 kPa
15	固结	215	0	—	固结应力 215 kPa
16	渗透	215	20	0	渗透压差 20 kPa
17	渗透	215	40	0	渗透压差 40 kPa
18	渗透	215	60	0	渗透压差 60 kPa
19	渗透	215	80	0	渗透压差 80 kPa
20	渗透	215	100	0	渗透压差 100 kPa

在固结阶段,以固结应力为 140 kPa 为例,打开与反压相通的反压上、下接口,关闭与外界相通的下接口。分别设置围压为 140 kPa,反压为 0 kPa,进行为时 24 h 的固结试验。待孔压消散完全,轴向变形基本不变,体变稳定即可认为固结完成。

在渗透阶段,以第 1 阶段(固结应力为 140 kPa)为例,关闭与反压相通的反压下接口,打开与外界相通的下接口及与反压相通的反压上接口,利用反压和底部压力形成的水头差来形成从上向下的渗透路径。在保持固结应力为 140 kPa 不变的条件下,设置渗透压差为 20、40、60 kPa 来进行渗透。渗透压差的选取参考文献[19]。固结、渗透试验的围压、反压及底部压力的施加方式见图 3。

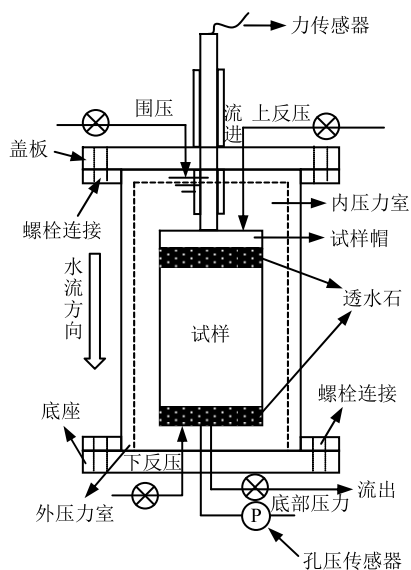


图3 固结、渗透试验的压力施加示意图

Fig.3 Schematic diagram of pressure application for consolidation and permeability tests

3 试验结果分析及验证

3.1 正常固结土一维固结渗透规律

3.1.1 渗透系数 k 和孔隙比 e 与固结应力 σ 的关系

由于欠固结土实质上属于正常固结土一类，故本文仅就正常固结和超固结黏土来探究应力历史对饱和黏土一维固结渗透规律的影响。

在保持固结应力 σ 不变情况下，测得正常固结黏土在每级渗透压差下的渗透系数，如表3所示。

表3 各级固结应力下正常固结黏土渗透系数测定值
Table 3 Measured values of permeability coefficient of normally consolidated clay under various consolidation pressures

固结应力 /kPa	渗透压差 /kPa	渗透系数 /($10^{-5} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	渗透系数平均值 /($10^{-5} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$)
140	20	0.96	0.86
	40	0.83	
	60	0.78	
165	20	0.85	0.74
	40	0.74	
	60	0.70	
	80	0.66	
195	20	0.64	0.56
	40	0.56	
	60	0.54	
	80	0.51	
	20	0.57	
215	40	0.50	0.49
	60	0.48	
	80	0.46	
	100	0.45	

根据表3绘制渗透系数 k 和孔隙比 e 随固结应力 σ 变化的关系曲线见图4、5。从图4可以看出，渗透系数 k 随着固结应力 σ 的增大呈现非线性减小趋势。在固结应力为 165 kPa 之前，渗透系数减小速率较快，之后渗透系数减小速率变缓并逐渐趋于平稳。根据图5可知，孔隙比 e 随着固结应力 σ 的增大而减小，在固结应力相对较小时，孔隙比减小速率较大，随着固结应力的增大，其减小速率逐渐变小并趋于平缓。通过线性拟合 $e-\lg \sigma$ 关系曲线可得试样的压缩指数 $C_c=0.88$ 。限于篇幅，此处不再详细展示 $e-\lg \sigma$ 拟合曲线。

对比图4和图5发现，渗透系数 k 和孔隙比 e 随固结应力 σ 变化规律基本一致，这是因为渗透系数大小主要受孔隙比的影响。

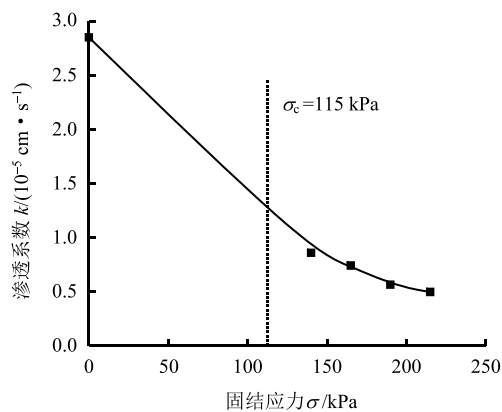


图4 正常固结黏土渗透系数随固结应力的变化曲线
Fig.4 Curve of permeability coefficient changing with consolidation stress for normally consolidated clay

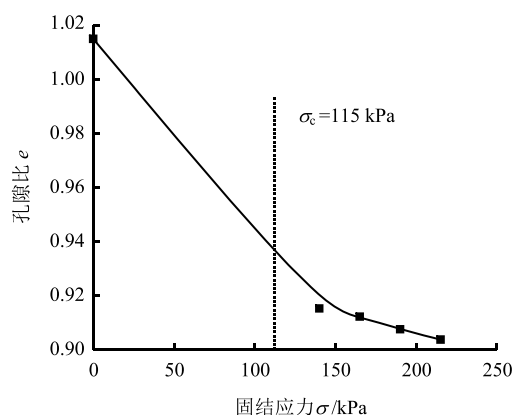


图5 正常固结黏土孔隙比随固结应力的变化曲线
Fig.5 Curve of void ratio changing with consolidation stress for normally consolidated clay

3.1.2 渗透系数 k 和孔隙比 e 与渗透压差的关系

为了研究渗透压差（水力梯度）对正常固结黏土渗透性的影响，根据表2绘制了渗透系数和孔隙比随渗透压差的变化曲线如图6、7所示。从图6、

7 可以看出,在一定固结应力的不同渗透压差下,渗透系数和孔隙比随渗透压差的增大均呈减小趋势。宋林辉等^[20]也研究了水力梯度对黏土渗透性的影响,得到了与本文相同的结论,即孔隙比和渗透系数均随水力梯度增大而减小。这是由于渗透压差的增大使得水力梯度逐渐增大,导致试样的孔隙比呈减小趋势,这也就是李广信^[21]所言,在渗透压差作用下,土体内部形成渗流,渗透力作用在土骨架中的颗粒上,致使土体压缩,从而导致土体渗透系数减小。此外,二者减小幅度均随固结应力的增大而降低。

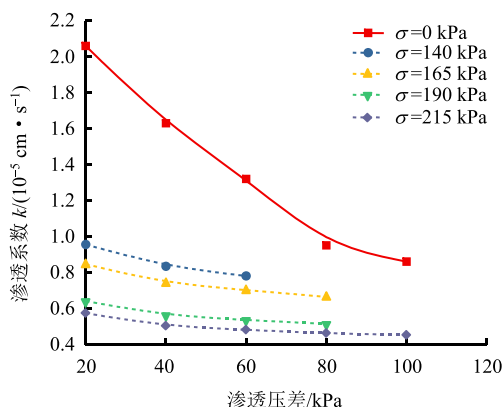


图6 正常固结黏土渗透系数 k 随渗透压差的变化曲线
Fig.6 Curves of permeability coefficient k changing with osmotic pressure difference for normally consolidated clay

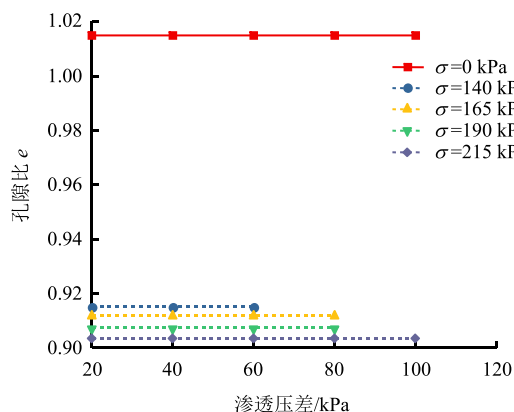


图7 正常固结黏土孔隙比 e 随渗透压差的变化曲线
Fig.7 Curves of void ratio e changing with osmotic pressure difference for normally consolidated clay

3.1.3 渗透系数 k 与孔隙比 e 的关系

由表3的试验结果,根据不同固结应力下的渗透系数 k 与孔隙比 e ,绘制出如图8的 $e-k$ 曲线。

从图8可以看出,孔隙比 e 对于渗透系数 k 有着很大的影响。渗透系数 k 随着孔隙比 e 的减小而减小。当固结应力从 140 kPa 增加至 215 kPa 时,试样孔隙比 e 从 1.015 下降至 0.903,相应地,渗透系

数 k 从 $0.856 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ 下降至 $0.493 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ 。究其原因,作者认为土样在固结阶段被压缩,土体变密实从而导致土体孔隙比 e 减小,相应的渗透系数也在不断减小。渗透系数 k 随孔隙比 e 的变化也呈非线性变化。

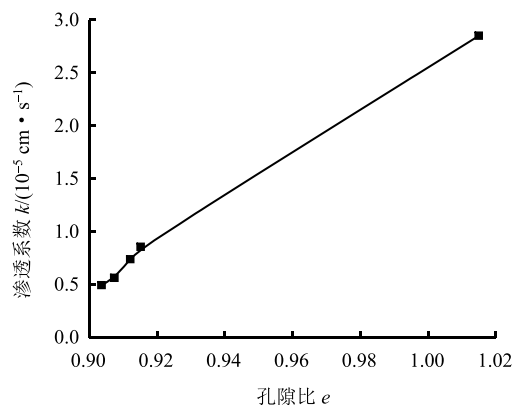


图8 正常固结黏土渗透系数 k 随孔隙比 e 的变化曲线
Fig.8 Curves of permeability coefficient k changing with void ratio e for normally consolidated clay

3.2 超固结土一维固结渗透规律

3.2.1 渗透系数 k 和孔隙比 e 与固结应力 σ 的关系

在保持固结应力 σ 不变情况下,测得超固结黏土在每级渗透压差下的渗透系数如表4所示。

表4 各级固结应力下超固结黏土渗透系数测定值
Table 4 Measured values of permeability coefficient of over-consolidated clay under various consolidation pressures

固结应力 /kPa	渗透压差 /kPa	渗透系数 /($10^{-5} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	渗透系数平均值 /($10^{-5} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$)
25	5	1.72	1.51
	10	1.29	
50	10	1.22	1.14
	20	1.06	
75	10	1.18	1.10
	20	1.03	
100	20	0.91	0.85
	40	0.80	

根据表4绘制渗透系数 k 和孔隙比 e 随固结应力 σ 的关系曲线见图9、10。

从图9可以看出,超固结饱和黏土的渗透系数 k 随固结应力 σ 增大而减小,并呈现出明显的非线性变化规律。在 $\sigma \leq 50 \text{ kPa}$ 时,渗透系数减小速率较快,之后逐渐变缓。在固结应力作用下对应的渗透系数 k 的变化范围为 $1.51 \times 10^{-5} \sim 0.85 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ 。比较图4和图9可知,正常固结与超固结饱和黏土

的渗透系数 k 随固结应力 σ 的变化规律一致。

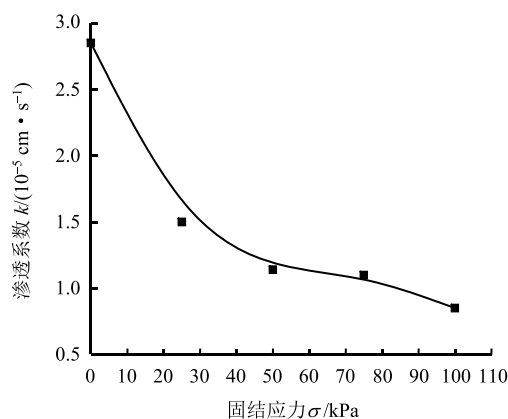


图9 超固结黏土渗透系数随固结应力的变化曲线
Fig.9 Curve of permeability coefficient changing with consolidation stress for over-consolidated clay

从图 10 可知,超固结饱和黏土的孔隙比 e 随着固结应力 σ 的增加而减小。这表明了土体在受到固结应力后,随着土体孔隙水的排出,致使土体内孔隙体积减小。

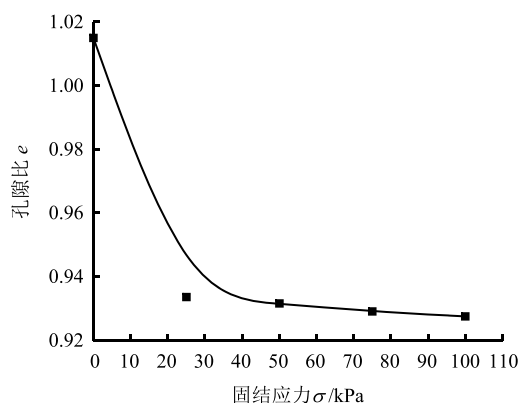


图10 超固结黏土孔隙比随固结应力的变化曲线
Fig.10 Curve of void ratio changing with consolidation stress for over-consolidated clay

3.2.2 渗透系数 k 和孔隙比 e 与渗透压差的关系

图 11、12 给出了超固结饱和黏土渗透系数 k 和孔隙比 e 随渗透压差的变化曲线。从图 11 可以看出,随着渗透压差的增大,在土体未受到固结应力时,渗透系数 k 减小速率较快,随着固结应力的增大,渗透系数随渗透压差增大而减小的幅度明显下降。

从图 12 可以看出,孔隙比 e 随渗透压差的增大而小幅度减小。在相同渗透压差下,固结应力越大,孔隙比越小。作者认为同样是由于渗透压力导致土体压缩,进而引起土体孔隙比减小。

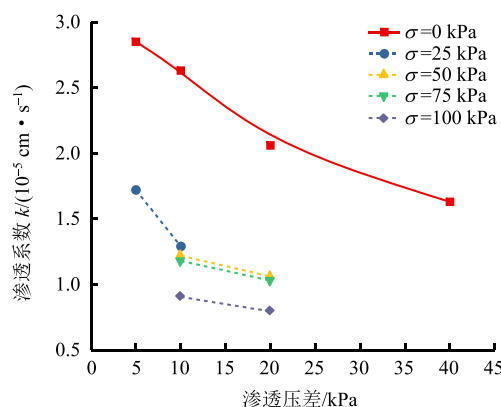


图11 超固结黏土渗透系数随渗透压差的变化曲线
Fig.11 Curves of permeability coefficient changing with osmotic pressure difference for over-consolidated clay

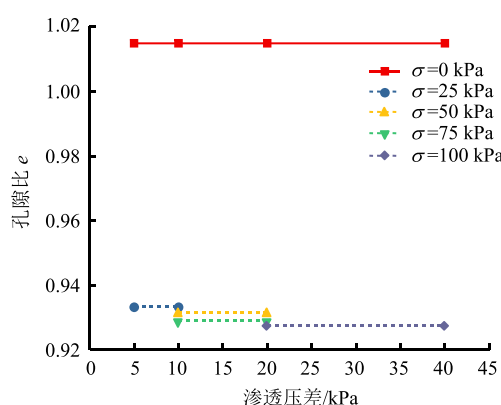


图12 超固结黏土孔隙比随渗透压差的变化曲线
Fig.12 Curves of void ratio changing with osmotic pressure difference for over-consolidated clay

从图 11 和 12 可以看出,渗透系数 k 和孔隙比 e 随渗透压差变化的规律一致。二者均随着渗透压差的增大而减小。再次证明了饱和黏土在一维固结渗透时的非线性。

3.2.3 渗透系数 k 与孔隙比 e 的关系

为了研究超固结饱和黏土在一维固结渗透时渗透系数 k 和孔隙比 e 之间的关系,根据表 4 绘制 e - k 曲线如图 13 所示。

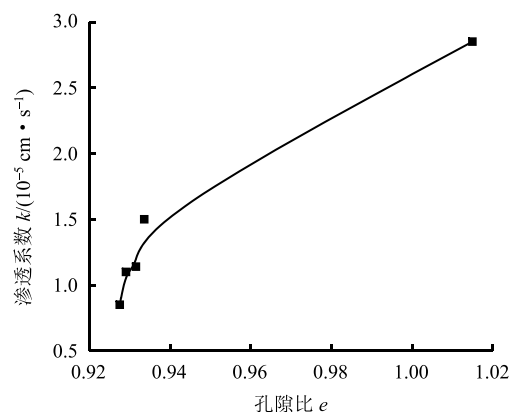


图13 超固结黏土渗透系数 k 随孔隙比 e 的变化曲线
Fig.13 Curve of permeability coefficient k changing with void ratio e for over-consolidated clay

从图 13 可以看出, 渗透系数 k 随孔隙比 e 的变化呈非线性变化趋势。渗透系数 k 随孔隙比 e 的减小而减小, 与正常饱和黏土的渗透系数 k 随孔隙比 e 的变化规律一致, 此处不再赘述。

3.3 应力历史对饱和黏土渗透规律的影响

3.3.1 正常固结和超固结黏土渗透系数 k 和孔隙比 e 与固结应力 σ 的关系

为了研究应力历史对饱和黏土一维固结渗透过程中渗透系数 k 和孔隙比 e 随固结应力 σ 的变化规律的影响, 本文选取相同固结应力增量对正常固结和超固结黏土进行一维固结-渗透联合试验。根据表 3、4 得到正常固结和超固结饱和黏土 k - σ 和 e - σ 的关系曲线如图 14、15 所示。

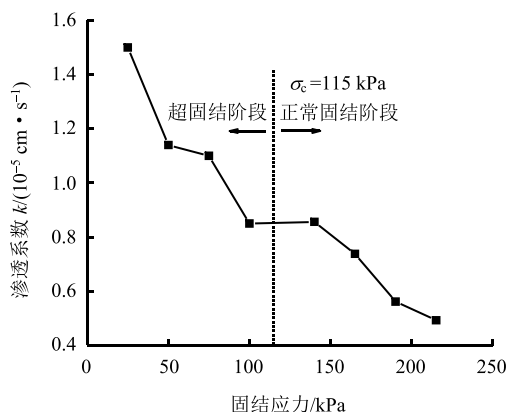


图 14 正常固结和超固结饱和黏土渗透系数随固结应力的变化曲线

Fig.14 Curve of permeability coefficient of normally and over-consolidated saturated clay changing with consolidation stress

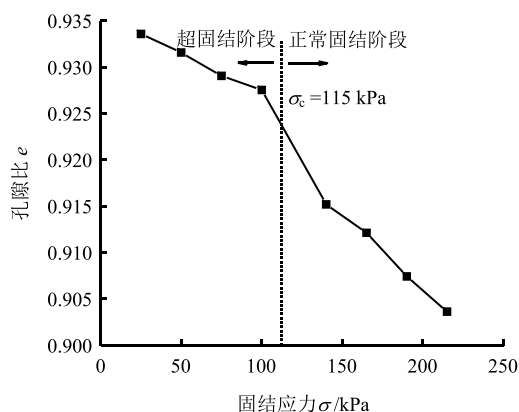


图 15 正常固结和超固结饱和黏土孔隙比随固结应力的变化曲线

Fig.15 Curve of void ratio of normally and over-consolidated saturated clay changing with consolidation stress

从图 14、15 可以看出, 在先期固结压力 $\sigma_c = 115$ kPa 之前为超固结阶段, 之后为正常固结阶段。

正常固结和超固结饱和黏土的渗透系数 k 和孔隙比 e 均随固结应力 σ 的增大而单调减小。正常固结和超固结黏土的渗透系数与孔隙比呈一一对应关系, 即渗透系数随着孔隙比的减小而减小。

3.3.2 渗透系数 k 与孔隙比 e 的关系

图 16 给出了正常固结和超固结饱和黏土在一维固结渗透过程中渗透系数 k 随孔隙比 e 变化的关系曲线。

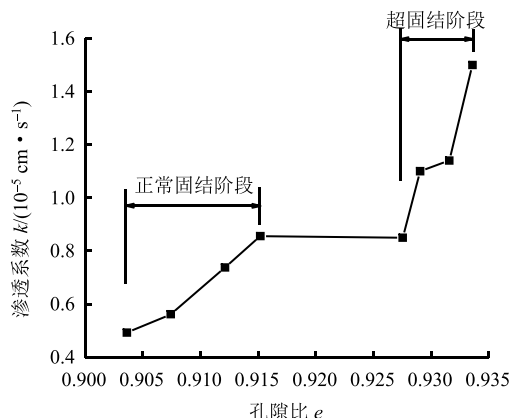


图 16 正常固结和超固结饱和黏土渗透系数随孔隙比的变化曲线

Fig.16 Curve of permeability coefficient of normally and over-consolidated saturated clay changing with void ratio

从图 16 可以看出, 正常固结和超固结饱和黏土在一维固结渗透中的渗透系数 k 随孔隙比 e 的减小均呈非线性减小趋势。图中出现的近乎直线段是因为本文对正常固结和超固结黏土分别进行了一维固结渗透试验。正常固结饱和黏土的孔隙比从 1.014 下降至 0.904, 下降幅度为 10.85%; 相应的, 渗透系数从 0.856×10^{-5} cm/s 降至 0.493×10^{-5} cm/s, 下降幅度为 42.41%。超固结饱和黏土的孔隙比从 0.934 下降至 0.928, 下降幅度为 0.648%; 相应的, 渗透系数从 1.049×10^{-5} cm/s 下降至 0.850×10^{-5} cm/s, 下降幅度为 43.33%。综合而言, 处于超固结阶段的土体的压缩性和渗透性要比处于正常固结状态小得多。从图中还可以看出, 应力历史仅对渗透系数大小有影响, 对渗透系数随孔隙比的变化关系没有影响。文献[22]同样认为应力历史对渗透系数随孔隙比的变化关系无影响。这也佐证了本文研究的正确性。

4 饱和黏土渗透系数的模型预测

通常在工程实践中, 准确快速地预测饱和黏土渗透系数显得尤为重要。第 3 节提出应力历史对渗透系数随孔隙比的关系没有影响, 故本节只对正常固结饱和黏土的渗透系数进行预测。本文选取文献

[12]提出的考虑初始固结状态影响的渗透系数预测公式和斯托克斯孔隙流渗透系数公式以及固结度渗透公式来预测陕西洛川饱和黏土的渗透系数。

(1) 用文献[12]提出的渗透系数预测公式表示时, 有

$$k = k_0 \frac{1+e_0}{e_0^2} \frac{\left(e_0 - C_c \lg \frac{\sigma_0 + \Delta\sigma}{\sigma_0} \right)^2}{1+e_0 - C_c \lg \frac{\sigma_0 + \Delta\sigma}{\sigma_0}} \quad (1)$$

$$k = k_0 \frac{1+e_0}{e_0^3} \frac{\left(e_0 - C_c \lg \frac{\sigma_0 + \Delta\sigma}{\sigma_0} \right)^3}{1+e_0 - C_c \lg \frac{\sigma_0 + \Delta\sigma}{\sigma_0}} \quad (2)$$

式中: k_0 和 e_0 分别为土体初始渗透系数和初始孔隙比。

式(1)、(2)是分别为以达西渗透系数公式和柯森-卡门渗透系数公式为基础的正常固结土的渗透系数预测公式。

(2) 用斯托克斯孔隙流渗透系数公式表示时, 有

$$k = \frac{\gamma_{wz} R^2 e}{8\eta(1+e)} \quad (3)$$

式中: R 为毛细管的半径 (cm); η 为自由水的动力黏滞系数 ($\text{g}\cdot\text{s}\cdot\text{cm}^{-2}$); γ_{wz} 为自由水的重度; e 为土的孔隙比。参考文献[12]方法, 土体在压缩过程中, 水的动力黏滞系数、自由水的重度等基本物理参数均为常数, 只有渗透系数和孔隙比在发生变化, 故可用初始渗透系数 k_0 和初始孔隙比 e_0 来表示这些不变的物理参数。则式(3)变为

$$\frac{\gamma_{wz} R^2}{8\eta} = k_0 \frac{1+e_0}{e_0} \quad (4)$$

将式(4)代入式(3)得土体的渗透系数为

$$k = k_0 \frac{1+e_0}{e_0} \frac{e}{1+e} \quad (5)$$

对于正常固结土来说, 假设作用于土层中点的自重应力为 σ_0 , 相应的初始孔隙比为 e_0 , 该点所受的附加应力为 $\Delta\sigma$, 则实际所受应力为 $(e_0 + \Delta\sigma)$, 相应的孔隙比 e 为

$$e = e_0 - C_c \lg \frac{\sigma_0 + \Delta\sigma}{\sigma_0} \quad (6)$$

将式(6)代入式(5)中, 得正常固结土一维固结渗透时的渗透系数公式:

$$k = k_0 \frac{1+e_0}{e_0} \frac{e_0 - C_c \lg \frac{\sigma_0 + \Delta\sigma}{\sigma_0}}{1+e_0 - C_c \lg \frac{\sigma_0 + \Delta\sigma}{\sigma_0}} \quad (7)$$

(3) 用固结度渗透公式表示时, 有

$$k = C_v \gamma_{wz} \frac{a_v}{1+e} \quad (8)$$

与斯托克斯孔隙流渗透系数公式处理方式相同, 即可得到正常固结土一维固结渗透时的渗透系数公式 (见下式), 此处不再赘述。

$$k = k_0 \frac{1+e_0}{1+e_0 - C_c \lg \frac{\sigma_0 + \Delta\sigma}{\sigma_0}} \quad (9)$$

根据一维固结渗透的实测数据和式(1)、(2)、(7)、(9) 计算可得正常固结饱和黏土渗透系数预测值和实测值的对比图如图 17 所示。

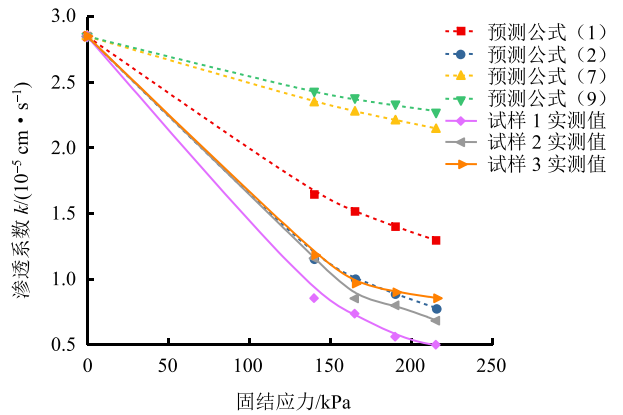


图 17 正常固结饱和黏土渗透系数随固结应力的变化曲线
Fig.17 Curves of permeability coefficient of normally consolidated saturated clay changing with consolidation stress

观察图 17 发现, 3 个试样渗透系数的预测值与实测值随固结应力的变化规律一致。渗透系数实测值位于 $10^{-5} \sim 10^{-6}$ 数量级之间, 而使用修正后的达西渗透公式、斯托克斯孔隙流渗透系数公式以及固结度渗透公式计算得到的渗透系数均位于 10^{-5} 数量级, 与实测值相差较大。文献[12]提出的修正后的柯森-卡门渗透系数公式计算得到的预测值与实测值较为接近, 因此, 用修正后的柯森-卡门渗透系数公式来预测本文饱和黏土渗透系数较为合适。

5 结 论

利用改进的 GDS 三轴仪对不同应力历史下的饱和黏土试样进行了一维固结-渗透联合试验。得出如下结论:

(1) 采用一维固结-渗透联合试验, 测定了正常固结和超固结饱和黏土在一维固结渗透过程中的渗透系数。两种应力历史下的饱和黏土的渗透系数和孔隙比均随固结应力的增大而减小。

(2) 处于超固结状态土体的压缩性和渗透性要比处于正常固结状态时小得多。渗透系数随孔隙比变化的关系与应力历史无关。表明了同一种土渗透系数的大小只与孔隙比有关系。

(3) 利用修正后的达西渗透系数渗透公式、修正后的柯森-卡门渗透系数公式、斯托克斯孔隙流渗透系数公式以及固结度渗透公式对陕西洛川饱和黏土的渗透系数进行了预测。结果表明, 修正后的柯森-卡门渗透系数公式计算得到的渗透系数与实测值吻合较好。因此推荐采用修正后的柯森-卡门公式预测陕西洛川饱和黏土在一维固结渗透过程中的渗透系数。

参考文献

- [1] MA B H, HU Z Y, LI Z, et al. Finite difference method for the one-dimensional non-linear consolidation of soft ground under uniform load[J]. **Frontiers in Earth Science**, 2020, 8: 111-1-111-9.
- [2] DAVIS E H, RAYMOND G P. A non-linear theory of consolidation[J]. **Geotechnique**, 1965, 15(2): 161-173.
- [3] XIE K H, XIE X Y, JIANG W. A study on one-dimensional nonlinear consolidation of double-layered soil[J]. **Computers and Geotechnics**, 2002, 29(2): 151-168.
- [4] 夏长青, 胡安峰, 崔军, 等. 饱和软土成层地基一维非线性固结解析解[J]. **岩土力学**, 2018, 39(8): 2859-2864.
XIA Chang-qing, HU An-feng, CUI Jun, et al. Analytical solutions for one-dimensional nonlinear consolidation of saturated soft layered soils[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2018, 39(8): 2859-2864.
- [5] 胡安峰, 周禹杉, 陈缘, 等. 结构性土一维非线性大应变固结半解析解[J]. **岩土力学**, 2020, 41(8): 2583-2591.
HU An-feng, ZHOU Yu-shan, CHEN Yuan, et al. Semi-analytical solutions for one-dimensional nonlinear large strain consolidation of structured soft clay[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2020, 41(8): 2583-2591.
- [6] LI C X, HUANG J S, WU L Z, et al. Approximate analytical solutions for one-dimensional consolidation of a clay layer with variable compressibility and permeability under a ramp loading[J]. **International Journal of Geomechanics**, 2018, 18(11): 06018032.
- [7] 师旭超, 孙运德. 线性卸荷作用下软土超孔隙水压力变化规律分析[J]. **岩土力学**, 2020, 41(4): 1333-1338.
- SHI Xu-chao, SUN Yun-de. Analysis of the evolution of excess pore water pressure in soft soil under linear unloading[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2020, 41(4): 1333-1338.
- [8] LEE P K K, XIE K H, CHEUNG Y K. A study on one-dimensional consolidation of layered systems[J]. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, 1992, 16(11): 815-831.
- [9] SCHIFFMAN R L, STEIN J R. One-dimensional consolidation of layered systems[J]. **Mechanics and Foundation Division Journal, ASCE**, 1970, 96(4): 1499-1504.
- [10] 孙立强, 闫澍旺, 邱长林. 考虑新近吹填土固结系数为变量的固结理论研究[J]. **岩土工程学报**, 2013, 35(增刊 1): 312-316.
SUN Li-qiang, YAN Shu-wang, QIU Chang-lin. Consolidation theory considering coefficient of consolidation of hydraulic fill as variable[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2013, 35(Suppl. 1): 312-316.
- [11] 李西斌, 谢康和, 陈福全. 考虑软土流变特性和应力历史的一维固结与渗透试验[J]. **水利学报**, 2013, 44(1): 18-25.
LI Xi-bin, XIE Kang-he, CHEN Fu-quan. One dimensional consolidation and permeability tests considering stress history and rheological characteristic of soft soils[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2013, 44(1): 18-25.
- [12] 高俊, 党发宁, 丁九龙, 等. 考虑初始固结状态影响的软基固结计算方法研究[J]. **岩石力学与工程学报**, 2019, 38(增刊 1): 3189-3196.
GAO Jun, DANG Fa-ning, DING Jiu-long, et al. Research on soft soil consolidation calculation method considering the impacts of initial consolidation state[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2019, 38(Suppl. 1): 3189-3196.
- [13] 齐添, 谢康和, 唐胡乐. 超固结土的一维非线性固结计算参数及其试验测定[J]. **工程地球物理学报**, 2008, 5(6): 735-741.
QI Tian, XIE Kang-he, TANG Hu-le. Computational parameters on one-dimensional nonlinear consolidation of over-consolidation soil and its experimental determination[J]. **Chinese Journal of Engineering Geophysics**, 2008, 5(6): 735-741.
- [14] 温介邦. 考虑应力历史影响的成层地基一维固结理论研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
WEN Jie-bang. Study on one-dimensional consolidation theory of layered soils considering the effect of stress

- history[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007.
- [15] 吕卫清, 董志良, 陈平山, 等. 正常固结软土渗透系数与固结应力关系研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(3): 769-773.
LÜ Wei-qing, DONG Zhi-liang, CHEN Ping-shan, et al. Research on relationship between permeability coefficient and consolidation stress of normal consolidation clay[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(3): 769-773.
- [16] 林鹏, 许镇鸿, 徐鹏, 等. 软土压缩过程中固结系数的研究[J]. 岩土力学, 2003, 24(1): 106-112.
LIN Peng, XU Zhen-hong, XU Peng, et al. Research on coefficient of consolidation of soft clay under compression[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2003, 24(1): 106-112.
- [17] 庄迎春, 刘世明, 谢康和. 萧山软粘土一维固结系数非线性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(24): 4565-4569.
ZHUANG Ying-chun, LIU Shi-ming, XIE Kang-he. Study on nonlinearity of one-dimension consolidation coefficient of Xiaoshan clay[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(24): 4565-4569.
- [18] 邹圣锋, 李金柱, 王忠瑾, 等. 基于GDS渗透仪的渗透试验及经验模型[J]. 浙江大学学报(工学版), 2017, 51(5): 856-862.
ZOU Sheng-feng, LI Jin-zhu, WANG Zhong-jin, et al. Seepage test and empirical models for soils based on GDS apparatus[J]. **Journal of Zhejiang University (Engineering Science)**, 2017, 51(5): 856-862.
- [19] 齐添. 软土一维非线性固结理论与试验对比研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
QI Tian. Theoretical and experimental studies on one-dimensional nonlinear consolidation of soft soil[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008.
- [20] 宋林辉, 黄强, 闫迪, 等. 水力梯度对黏土渗透性影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(9): 1635-1641.
SONG Lin-hui, HUANG Qiang, YAN Di, et al. Experimental study on effect of hydraulic gradient on permeability of clay[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2018, 40(9): 1635-1641.
- [21] 李广信. 论土骨架与渗透力[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(8): 1522-1528.
LI Guang-xin. On soil skeleton and seepage force[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2016, 38(8): 1522-1528.
- [22] 刘维正, 石名磊, 缪林昌. 天然沉积饱和黏土渗透系数试验研究与预测模型[J]. 岩土力学, 2013, 34(9): 2501-2514.
LIU Wei-zheng, SHI Ming-lei, MIU Lin-chang. Experimental study of permeability coefficient of natural saturated clay and its prediction model[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2013, 34(9): 2501-2514.

上接第 1064 页

- [14] ZHAO Zeng-hui, GAO Xiao-jie, TAN Yun-liang, et al. Theoretical and numerical study on reinforcing effect of rock-bolt through composite soft rock-mass[J]. **Journal of Central South University**, 2018, 25, 2512-2522.
- [15] 中国电力企业联合会. GB/T50266—2013 工程岩体试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2013.
China Electricity Council. GB/T50266—2013. Standard for test methods of engineering rock mass[S]. Beijing: China Planning Press, 2013.
- [16] 王子越. 树脂锚杆锚固质量和杆体变形特征研究[D]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2014.
WANG Zi-yue. Study on anchoring quality and Rebar deformation characteristics of resin bolts[D]. Beijing: China Coal Research Institute, 2014.
- [17] 李昌儒. 高强度螺纹钢锚杆抗剪力学性能试验研究[D]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2019.
LI Chang-ru. Experimental Study on shear mechanical properties of high strength threaded steel bolt[D]. Beijing: China Coal Research Institute, 2019.
- [18] MURALHA J, GRASSELLI G, TATONE B, et al. ISRM suggested method for laboratory determination of the shear strength of rock joints: revised version[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2014, 47: 291-302.
- [19] JALALIFAR H, AZIZ N, HADI M. The effect of surface profile, rock strength and pretension load on bending behaviour of fully grouted bolts[J]. **Geotechnical and Geological Engineering**, 2006, 24(5): 1203-1227.
- [20] PELLET F, EGGER P. Analytical model for the mechanical behaviour of bolted rock joints subjected to shearing[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 1996, 29(2): 73-97.
- [21] MA Shu-qi, ZHAO Zhi-ye, PENG Jun, et al. Analytical modeling of shear behaviors of rockbolts perpendicular to joints[J]. **Construction and Building Materials**, 2018, 175: 286-295.
- [22] MORADI A R, SOLTANI M, TASNIMI A A. A simplified constitutive model for dowel action across RC cracks[J]. **Journal of Advanced Concrete Technology**, 2012, 10(8): 264-277.