

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2017.05.012

复杂应力状态下土料三轴渗透试验

凌 华^{1,2}, 张 胜³, 敖大华³, 王 芳^{1,2}, 韩华强^{1,2}

- (1. 南京水利科学研究院水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029;
2. 水利部土石坝破坏机理与防控技术重点实验室, 江苏 南京 210029;
3. 中国电建集团贵阳勘测设计研究院有限公司, 贵州 贵阳 550081)

摘要: 为研究高土石坝坝体内土体单元在复杂应力状态下的渗透性能, 在中型三轴仪上对同一土料场 3 种不同级配土料进行三轴渗透试验。试验围压分为 5 级(100 kPa、400 kPa、800 kPa、1 200 kPa 和 2 000 kPa), 每级围压下分 4 种应力水平(0、0.2、0.4 和 0.8), 当试样在初始应力状态下变形基本稳定后, 采用常水头法测试试样的渗透系数。试验结果表明: 级配是影响渗透系数的重要因素, 相同应力条件下土料粉粒和黏粒含量越高, 渗透系数越小; 随围压和应力水平的提高, 土料的渗透系数逐渐降低; 粉粒和黏粒含量越低、大颗粒含量越高, 围压对土料渗透系数的影响越显著; 对于不同级配相同密实度试样, 应力水平对渗透系数的影响程度基本一致。在分析渗透系数随围压和应力水平变化规律的基础上, 建立了能描述复杂应力状态条件下土体渗透系数的经验公式。
关键词: 复杂应力状态; 三轴渗透试验; 中型三轴仪; 渗透系数; 围压; 应力水平; 颗粒级配; 常水头法
中图分类号: TU411.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2017)05-0451-06

Triaxial test study on the permeability of soil under complex stress state

LING Hua^{1,2}, ZHANG Sheng³, AO Dahua³, WANG Fang^{1,2}, HAN Huaqiang^{1,2}

- (1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;
2. Key Laboratory of Earth-Rock Dam Failure Mechanism and Safety Control Techniques, Ministry of Water Resources, Nanjing 210029, China;
3. Power-China Guiyang Engineering Corporation Limited, Guiyang 550081, China)

Abstract: To study soil permeability of soil element within the high earth-rock dam under complex stress state, medium-sized triaxial tests are carried out on the medium-sized triaxial apparatus for three kinds of soils with different gradations from the same material site, which incorporates five levels of confining pressure (100 kPa, 400 kPa, 800 kPa, 1 200 kPa and 2 000 kPa), with each being consisted of four stress levels (0, 0.2, 0.4 and 0.8). The permeability coefficient of soil sample is determined by using constant-head test method when the sample deformation is basically stable in the initial stress state. The test results show that, the coefficient of permeability is largely influenced by soil grading. Under the same stress state condition, the coefficient of permeability appears to decrease with the increase of silt and clay contents. Moreover, this coefficient of permeability is gradually reduced by the increased confining pressure and stress level, the effects of confining pressures on the coefficient are remarkably intensified by a lower contents of silt and clay and higher content of soil with large particle. For soil samples with different gradations and the same compactness, the effects of stress levels on the coefficient of permeability are basically the same. Based on the analysis results of the coefficient of permeability varying with the confining pressures and the stress levels, an empirical formula is finally established to describe the the permeability coefficient of soil under complex stress state.
Key words: complex stress state; triaxial permeability test; medium-sized triaxial apparatus; coefficient of permeability; confining pressure; stress level; particle gradation; constant head

心墙防渗体是心墙堆石坝建设的关键部位,目前坝体渗流分析常采用现场或室内试验确定渗透系数,而这些试验一般不考虑土体的受力条件,忽视了坝体内的应力状态。实际坝体内土体单元总是承受一定的应力,这不但会导致坝体发生变形,也会影响土体的渗透性能。土体受力后孔隙比会发生变化,考虑到孔隙比能反映土体的基本性质、密实程度和压缩特性,目前多采用孔隙比描述渗透系数的变化,如 Kozeny^[1] 和 Carman^[2-3] 针对多孔介质提出了渗透系数与孔隙率的半经验半理论 KC 方程;Taylor^[4] 研究了引入压缩指数的渗透系数与孔隙比关系式;Mesri 等^[5] 针对软黏土提出了考虑土体活性的渗透系数与孔隙比的关系式;邓永锋等^[6] 对比分析了几种孔隙比与渗透系数的关系式;党发宁等^[7] 建立了基于有效孔隙比的黏性土渗透系数经验公式;苏立君等^[8] 研究了同一粒径级砂土渗透系数随孔隙率的变化和同一孔隙率下不同粒径级砂土渗透系数均值粒径的变化规律;黄达等^[9] 对粗粒土孔隙比及级配参数与渗透系数的相关性进行了研究。

实际上不同的应力状态和边界条件会使土体产生相同的体积变形,从而达到相同的孔隙比。如高应力条件下的有侧限压缩试验和低应力条件下的三轴剪切试验后的试样可能具有相同的孔隙比,但由于此时试样内部应力分布不同,土体颗粒重新排列与大粒径颗粒的破碎情况也势必存在差异,此时相同孔隙比土体的渗透系数显然是不相等的,也就是说受力后相同孔隙比条件下土体的渗透系数不唯一。

从应力角度研究渗透系数方面,刘维正等^[10] 采用固结渗透联合试验,研究了不同前期固结压力重塑样的渗透系数变化规律;蒋中明等^[11] 研究了侧限条件下不同垂直应力状态下含黏粗粒土的渗透变形特性;李广冬等^[12] 通过三轴渗透试验,得出在同等条件下随着围压和干密度的增大,渗透系数减小,但其对渗透系数的影响会越来越小的结论;张改玲等^[13] 研究了高围压条件下砂土的渗透特性;吴珺华等^[14] 研究了不同围压、土石比和水头差对掺砾心墙料渗透系数的影响;雷红军等^[15] 研究了黏土渗透特性与大剪切变形的关系,讨论了渗透系数随轴向应变的变化规律;郭鸿等^[16] 采用三轴仪器开展了饱和黄土渗透试验,研究了不同地区黄土渗透系数的差异性;罗玉龙等^[17] 的室内试验研究表明,围压越大,管涌临界渗透坡降越大。总体而言,关于渗透系数随应力变化这方面的研究还不太成熟,成果也较少,更为重要的是未能综合考虑侧向压力、剪应力或应力水平等复杂应力状态对渗透系数的影响。

目前我国心墙堆石坝已经发展至 300 m 级,如美、双江口、两河口心墙堆石坝分别达到了 315 m、314 m 和 295 m,坝体内的应力不但高而且非常复杂,因此应重视复杂应力状态下心墙防渗土料与接触土料的渗透性能。鉴于相同孔隙比条件下土体渗透系数的非唯一性、为获取孔隙比所要进行的坝体内部密度测试工作的繁琐与困难、高土石坝坝体单元体内的实际复杂应力状态等多种因素,本文在中型三轴仪上开展了土体在复杂应力状态下的渗透性能试验,研究了不同级配土料渗透系数随围压和应力水平的变化规律,建立了复杂应力条件下土体渗透系数的经验公式,可方便地运用于土石坝渗流-应力耦合分析中,以期能真实反映坝体渗流特性。

1 三轴渗透试验

1.1 土料基本性质

三轴渗透试验试样为同一土料场的 3 种不同级配土料,土料级配见表 1。首先进行了中型尺寸的轻型击实试验,击实筒内径为 152 mm,单位体积击实功为 592.2 kJ/m³。根据击实试验结果,选取 0.98 密实度确定试验干密度,以排除密实度的影响,土料的试验干密度及其他基本物理力学特性见表 2。

表 1 试验土料级配
Table 1 Soil gradations in the test

试样编号	小于某粒径颗粒质量分数/%								
	20 mm	10 mm	5 mm	2 mm	1 mm	0.5 mm	0.25 mm	0.075 mm	0.005 mm
1	100.0	97.9	95.0	94.4	93.4	91.5	85.6	68.6	27.0
2	100.0	96.3	92.5	91.8	89.8	86.2	78.5	60.8	22.0
3	100.0	95.7	87.8	86.6	83.9	79.6	72.9	51.4	15.0

为确定三轴渗透试验时的初始预定应力状态,开展了直径 101 mm 的中型三轴固结排水剪切试验,剪切速率为每分钟 0.01% 轴向应变,根据试验结果整理得到的强度指标见表 2。典型三轴固结排水剪切试验曲线见图 1 和图 2,图中 ε_1 、 ε_v 分别为轴向应变与体积应变。由图 1、图 2 可知,随围压的增大,应力应变曲线逐

渐表现为硬化特性,体积应变的剪缩性增强,这与文献[18]的试验结果规律类似。

表 2 土料的主要物理力学指标

试样 编号	相对 密度	界限含水率			击实试验		试验干密度/ (g·cm ⁻³)	强度指标	
		液限/%	塑限/%	塑性指数	最大干密度/ (g·cm ⁻³)	最优含水率/%		c/kPa	φ/(°)
1	2.69	33.4	12.7	20.7	1.96	11.2	1.92	51.0	23.1
2	2.69	31.0	15.6	15.4	1.97	10.8	1.93	66.3	24.3
3	2.69	27.0	14.0	13.0	2.01	9.6	1.97	75.0	25.8

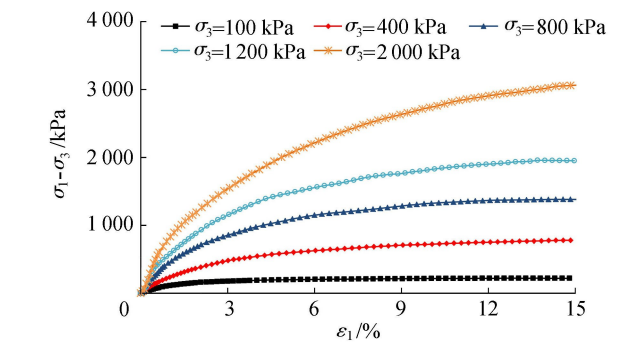


图 1 试样 2 的 (σ₁-σ₂) ~ ε₁ 曲线

Fig. 1 (σ₁-σ₃)-ε₁ curves of sample 2

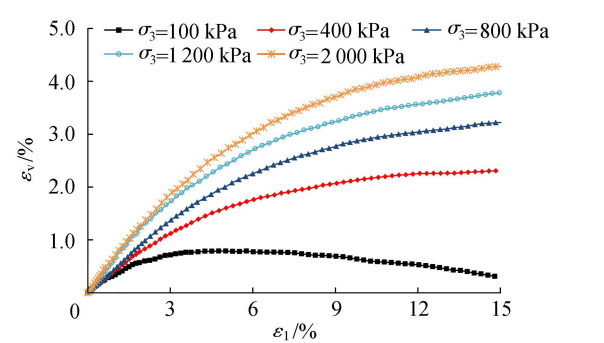


图 2 试样 2 的 ε_v ~ ε₁ 曲线

Fig. 2 ε_v-ε₁ curves of sample 2

1.2 复杂应力状态下土料渗透系数试验

复杂应力状态下的渗透试验在中型三轴仪上进行,试样直径为 101 mm。采用人工击实法分层制样,采用抽气饱和法进行饱和。试验时,首先在试样上施加围压,固结完成后在排水条件下采用位移控制方式按照静力三轴剪切速率对试样进行剪切,当轴向应力达到预定应力时,将位移控制方式切换为应力控制方式,保持轴向应力和围压不变至变形基本稳定。稳定标准:试样每小时排水量小于 0.1 mL。变形稳定后,在下排水管施加 15 kPa 常水头压力,记录上排水管排出水量、时间和温度。三轴渗透试验围压 5 级,分别为 100 kPa、400 kPa、800 kPa、1 200 kPa 和 2 000 kPa,应力水平 S₁ 分为 4 级,分别为 0、0.2、0.4 和 0.8。

试样 2,在围压为 800 kPa、应力水平为 0.2 时的三轴剪切及变形稳定应力 ~ 应变曲线见图 3,体积应变随时间的变化见图 4。本次试验,随试样级配、应力状态的不同,一般需 1 ~ 2 d 后变形才可基本稳定,方能进行渗透系数测试。

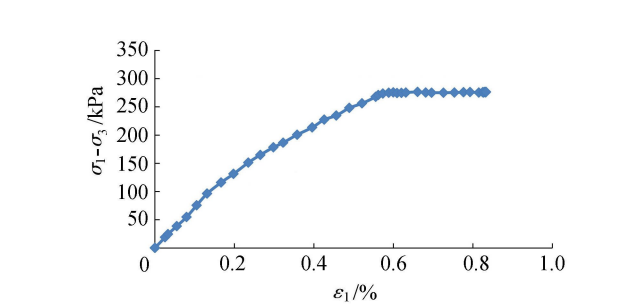


图 3 三轴渗透试验轴向应力加载曲线

Fig. 3 Axial stress loading curve of triaxial seepage test

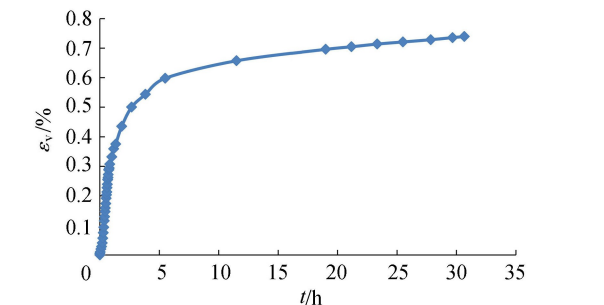


图 4 体积应变随时间的变化

Fig. 4 Volume strain changing with time

分别采用式(1)(2)计算剪切及变形稳定后试样的面积和高度:

$$h = h_0 \left(1 - \frac{\Delta V}{V_0} \right)^{\frac{1}{3}} - \Delta h_i$$

(1)

$$A_i = \frac{V_0 - \Delta V - \Delta V_i}{h}$$

(2)

式中:h——变形稳定后的试样高度,m;h₀——试样初始高度,m;A_i——变形稳定后的试样面积,cm²;ΔV——

固结排水量, cm^3 ; V_0 ——试样初始体积, cm^3 ; Δh_i ——试样剪切及变形稳定过程中产生的高度变化, m ; ΔV_i ——试样剪切及变形稳定过程中产生的排水量, cm^3 。

按照式(3)计算试样在特定围压和应力水平条件下三轴试样在标准温度时的渗透系数:

$$k_{20} = \frac{Qh}{A_i H t} \frac{\eta_T}{\eta_{20}}$$

(3)

式中: k_{20} ——标准温度 20°C 时试样的渗透系数, cm/s ; Q ——时间 t 秒内的渗透水量, cm^3 ; H ——测压管水位差, cm ; t ——时间, s ; η_T/η_{20} —— $T^\circ\text{C}$ 与标准温度时水的动黏滞系数比。

根据三轴渗透试验结果,3 个试样在不同围压和应力水平条件下的渗透系数见表 3。表 3 中, ξ 均小于 1, 表明随围压和应力水平的提高, 土料的渗透系数逐渐降低。本文应力状态范围内, 试样 3 虽然密度较大、孔隙比较小, 但由于含砾量较高, 粉粒和黏粒含量较低, 因此渗透系数最大; 试样 1 虽然孔隙比较大, 但由于细粒含量较高, 渗透系数最小; 试样 2 居中。这表明级配是影响土料渗透系数的重要因素。

表 3 三轴渗透试验结果

Table 3 Results of triaxial seepage test

围压/kPa	应力水平	渗透系数/($10^{-8}\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)			ξ		
		试样 1	试样 2	试样 3	试样 1	试样 2	试样 3
100	0	7.18	11.10	15.84	1	1	1
	0.2	3.55	6.08	10.08	0.49	0.55	0.64
	0.4	1.89	3.47	5.84	0.26	0.31	0.37
	0.8	0.85	2.29	3.69	0.12	0.21	0.23
400	0	4.95	6.65	9.99	1	1	1
	0.2	2.38	2.04	3.92	0.48	0.31	0.39
	0.4	0.94	1.16	2.14	0.19	0.17	0.21
	0.8	0.63	0.80	1.21	0.13	0.12	0.12
800	0	3.41	4.50	8.54	1	1	1
	0.2	1.14	2.01	3.80	0.33	0.45	0.44
	0.4	0.66	1.36	2.47	0.19	0.30	0.29
	0.8	0.50	0.91	1.35	0.15	0.20	0.16
1200	0	1.63	3.07	6.28	1	1	1
	0.2	0.69	1.09	2.79	0.42	0.36	0.44
	0.4	0.46	0.70	1.58	0.28	0.23	0.25
	0.8	0.31	0.52	0.88	0.19	0.17	0.14
2000	0	1.33	2.00	4.69	1	1	1
	0.2	0.55	0.72	2.26	0.41	0.36	0.48
	0.4	0.31	0.37	1.07	0.23	0.19	0.23
	0.8	0.22	0.28	0.61	0.17	0.14	0.13

注: $\xi=k_{\text{sl}}/k_{\text{s}}$, k_{s} 为常围压条件下应力水平为 0 时试样的渗透系数, k_{sl} 为该围压下应力水平不为 0 时的渗透系数。

2 渗透系数随应力状态的变化

2.1 渗透系数随围压的变化

由表 3 点绘应力水平为 0 时的常围压固结状态下渗透系数与围压的关系曲线, 见图 5。

根据图 5, 可近似采用下式描述渗透系数与围压的关系:

$$k_s = b - a \ln \frac{\sigma_3}{P_a}$$

(4)

式中: a 、 b ——拟合系数, cm/s ; P_a ——大气压, 取 100 kPa 。

试样 1~3 的 b 值分别为 $7.39\times10^{-8}\text{ cm/s}$ 、 $1.10\times10^{-7}\text{ cm/s}$ 、 $1.57\times10^{-7}\text{ cm/s}$, 由表 3 可知, 围压 100 kPa 条件下, 3 组试样的试验值与拟合 b 值相差不大, 拟合相关系数都超过了 0.96, 表明采用式(4)描述渗透系数随常围压的变化是可靠的, 而且精度较高, 能反映不同围压条件下的土料渗透系数的变化规律。

试样 1~3 的 a 值分别为 $2.06\times10^{-8}\text{ cm/s}$ 、 $3.10\times10^{-8}\text{ cm/s}$ 、

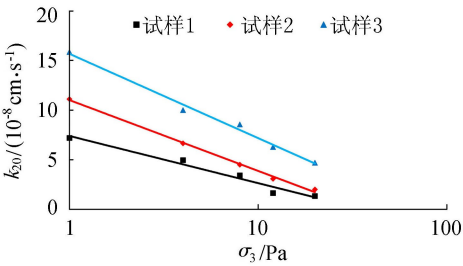


图 5 不同围压下试样的渗透系数

Fig. 5 Coefficients of soil permeability under different confining pressures

3.69×10⁻⁸ cm/s,均为正值,表明随常规固结应力的增加,渗透系数逐渐降低。这主要是因为:试样在围压作用下,土颗粒发生重新排列,土体发生排水,孔隙比降低,内部渗水通道面积减少,导致了随围压的增大渗透系数逐渐降低。

另外,试样 1 的 a 值最低、试样 3 的 a 值最高,对于本文土料,随黏粒含量增加渗透系数随围压的变化幅度也越小。当围压较高时,依据式(4)会出现试样 3 渗透系数要小于试样 1 的现象。文献[13]也得出了粗砂在高围压下的渗透系数要低于细砂的结论,认为这可能是由于颗粒破碎引起的。对于本文试验出现这种结果,从表象而言,试样 3 所掺的砾颗粒破碎更严重,其次是受力后试样 3 具有更大的密度,过水面积更小。从影响机理而言,主要应归为级配或土料自身特性:即由于试样 1 粉粒和黏粒含量较高,级配对渗透系数的影响占主要因素,应力变化对渗透系数的影响不占主导因素;对于试样 3,由于粉粒与黏粒含量较低,应力变化对渗透系数的影响权重增加,应力变化对试样 3 渗透系数影响比试样 1 更显著,因此试样 1 的 a 值要低于试样 3。

2.2 渗透系数随应力水平的变化

图 6 为试样 1~3 在各围压下的 $\xi \sim \sqrt{S_1}$ 关系曲线。

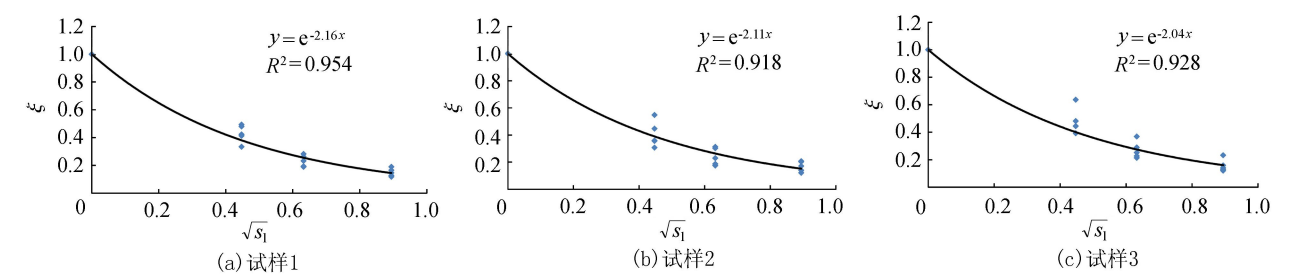


图 6 各试样 $\xi \sim \sqrt{S_1}$ 关系曲线

Fig. 6 $\xi \sim \sqrt{S_1}$ curve of samples

由图 6 可知,即使拟合时限定应力水平为 0 时 ξ 为 1,相关系数也均超过了 0.91,表明可用指数函数 $\xi = k_{sl}/k_s = e^{d\sqrt{S_1}}$ (d 为试验参数,试验结合拟合得到)描述应力水平对渗透系数的影响。

3 个试样 d 值均为负值,反映了随应力水平的提高渗透系数逐渐降低。试样 1~3 的 d 值分别为-2.16、-2.11、-2.04, d 值较接近,表明对于本文不同级配、相同密实度的试验土料,应力水平对渗透系数的影响程度近视一致,可采用平均值。

2.3 渗透系数随应力状态的变化

将 $\xi \sim \sqrt{S_1}$ 关系式 $\xi = k_{sl}/k_s = e^{d\sqrt{S_1}}$ 代入式(4),得

$$k_{sl} = \left(b - a \ln \frac{\sigma_3}{P_a} \right) e^{d\sqrt{S_1}} \tag{5}$$

由式(5),通过 a 、 b 、 d 可确定试样在特定围压和应力水平条件下的渗透系数。

试样 2 在围压为 800 kPa 和 2000 kPa 条件下,采用式(5)计算得到的渗透系数与试验结果对比见图 7,可见本文提出的经验公式能较好地描述复杂应力状态下的土体的渗透系数变化规律。

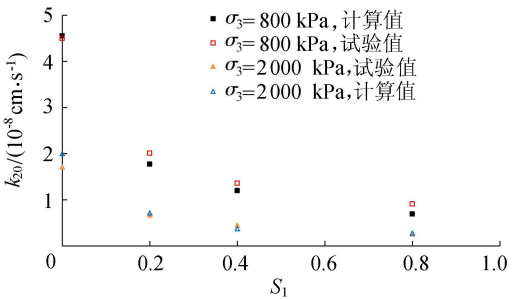


图 7 渗透系数计算值与试验结果对比

Fig. 7 Comparison of calculated and measured permeability coefficients

3 结 论

- a. 文中应力范围内,相同应力条件下粉粒和黏粒含量越高,土料渗透系数越小,表明了级配是影响土料渗透系数的重要因素。
- b. 随围压和应力水平的提高,土料的渗透系数逐渐降低。
- c. 粉粒和黏粒含量越低、大颗粒含量越高,围压对土料渗透系数的影响越显著;对于不同级配相同密实度试样,应力水平对渗透系数的影响程度基本一致。

d. 在分析渗透系数随围压和应力水平的变化规律基础上,给出了能描述复杂应力状态条件下土体渗透系数的经验公式(式(5))。

参考文献:

- [1] KOZENY J. Über kapillare leitung des wassers im Boden[J]. Akad Wiss Wien,1927,136:271-306.
- [2] CARMAN P C. Determination of the specific surface of powders. Part II[J]. Journal of the Society of Chemical Industry, 1938, 57:225-234.
- [3] CARMAN P C. Flow of gases through porous media[M]. London: Butterworths Scientific Publications, 1956:182.
- [4] TAYLOR D W. Fundamentals of soil mechanics[M]. New York:John Wiley and Sons Inc, 1948:700.
- [5] MESRI G, KWAN L D O, FENG W T. Settlement of embankment on soft clays[J]. Proc of Settlement 94, ASCE Geotechnical Special Publication,1994,40: 8-56.
- [6] 邓永锋,刘松玉,章定文,等. 几种孔隙比与渗透系数关系的对比[J]. 西北地震学报,2011,33(增刊1):64-66. (DENG Yongfeng, LIU Songyu, ZHANG Dingwen, et al. Comparison among some relationships between permeability and void ratio[J]. Northwestern Seismological Journal,2011,33(Sup1):64-66. (in Chinese))
- [7] 党发宁,刘海伟,王学武,等. 基于有效孔隙比的黏性土渗透系数经验公式研究[J]. 岩石力学与工程学报,2015,34(9):1909-1917. (DANG Faning, LIU Haiwei, WANG Xuewu, et al. Empirical formulas of permeability of clay based on effective pore ratio[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2015,34(9):1909-1917. (in Chinese))
- [8] 苏立君,张宜健,王铁行. 不同粒径级砂土渗透特性试验研究[J]. 岩土力学,2014,35(5):1289-1294. (SU Lijun, ZHANG Yijian, WANG Tiexing. Investigation on permeability of sands with different particle sizes[J]. Rock and Soil Mechanics,2014,35(5):1289-1294. (in Chinese))
- [9] 黄达,曾彬,王庆乐. 粗粒土孔隙比及级配参数与渗透系数概率的相关性研究[J]. 水利学报,2015,46(8):900-907. (HUANG Da, ZENG Bin, WANG Qingle. Study on probabilistic relation between permeability coefficient and void ratio and grain composition of coarse grained soils using copula theory[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2015,46(8):900-907. (in Chinese))
- [10] 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):2501-2507. (LIU Weizheng, SHI Minglei, MIAO Linchang. Experimental study of permeability coefficient of natural saturated clay and its prediction model[J]. Rock and Soil Mechanics,2013,34(9):2501-2507. (in Chinese))
- [11] 蒋中明,王为,冯树荣,等. 应力状态下含黏粗粒土渗透变形特性试验研究[J]. 岩土工程学报,2014,36(1):98-103. (JIANG Zhongming, WANG Wei, FENG Shurong, et al. Experimental study on influence of stress state on seepage failure characteristics of coarse grained soil with cohesive particles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2014,36(1):98-103. (in Chinese))
- [12] 李广冬,骆亚生,郭鸿,等. 杨凌地区黄土三轴渗透试验研究[J]. 人民黄河,2011,33(7):141-143. (LI Guangdong, LUO Yasheng, GUO Hong, et al. Study on the triaxial permeability test of Yangling Loess[J]. Yellow River, 2011,33(7):141-143. (in Chinese))
- [13] 张改玲,王雅敬. 高围压下砂土的渗透特性试验研究[J]. 岩土力学,2014,35(10):2748-2754. (ZHANG Gailing, WANG Yajing. Experimental investigation of hydraulic conductivity of sand under high confining pressure[J]. Rock and Soil Mechanics,2014,35(10):2748-2754. (in Chinese))
- [14] 吴珺华,杨松,卢廷浩. 掺砾心墙料的中三轴渗透试验[J]. 水利水电科技进展,2015,35(4):90-94. (WU Junhua, YANG Song, LU Tinghao. Permeability tests on middle triaxis of core wall mixed gravel[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015,35(4):90-94. (in Chinese))
- [15] 雷红军,卞锋,于玉贞,等. 黏土大剪切变形中的渗透特性试验研究[J]. 岩土力学,2010,31(4):1130-1133. (LEI Hongjun, BIAN Feng, YU Yuzhen, et al. Experimental study of permeability of clayey soil during process of large shear deformation[J]. Rock and Soil Mechanics,2010,31(4):1130-1133. (in Chinese))
- [16] 郭鸿,骆亚生,李广冬. 考虑地区差异性的饱和黄土三轴渗透试验研究[J]. 中国农村水利水电,2009(10):112-114. (GUO Hong, LUO Yasheng, LI Guangdong. Experimental research on triaxial seepage test of saturated loess based on regional differences[J]. China Rural Water and Hydropower,2009(10):112-114. (in Chinese))
- [17] 罗玉龙,速宝玉,盛金昌,等. 对管涌机理的新认识[J]. 岩土工程学报,2011,33(11):1895-1902. (LUO Yulong, SU Baoyu, SHENG Jinchang, et al. New understandings on piping mechanism[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011,33(11):1895-1902. (in Chinese))
- [18] 朱俊高,龚选,周建方,等. 不同剪切速率下掺砾料大三轴试验[J]. 河海大学学报(自然科学版),2014,42(1):29-34. (ZHU Jungao, GONG Xuan, ZHOU Jianfang, et al. Large-scale triaxial tests on behavior of gravelly soil at different shearing rates[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2014,42(1):29-34. (in Chinese))