

深部黏土渗透特性试验研究

蒋玉坤¹, 孙如华²

(1. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 中国矿业大学资源与地球科学学院, 江苏 徐州 221008)

摘要: 龙固矿区深部黏土层由于深埋藏、高应力和固结时间长, 所以其结构和物理力学性质与浅层黏土有所差异。为研究深部黏土的渗透特性, 利用改装后的 SJ-1A.G 三轴剪力仪对龙固矿区第三系黏土进行室内渗透试验。首先研究了渗透系数与轴向应力的关系曲线, 通过回归分析法拟合出渗透系数关于轴向应力的函数, 总结了深部黏土和浅层黏土在回归系数上的差别; 然后进一步研究了深部黏土渗透的各向异性和内在原因; 最后得出渗透系数与轴向应变的关系曲线, 深部黏土与浅层黏土的区别在于深部黏土没有小斜率延伸段。原因在于高应力下, 浅层黏土明显屈服, 发生塑性流变; 深部黏土屈服不明显, 而是发育微裂隙。该研究对深厚覆盖层矿井和深基坑防治水的设计有指导意义。

关键词: 深部黏土; 三轴渗透; 各向异性

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2012)02-0268-06

作者简介: 蒋玉坤(1986-), 男, 河北唐山人, 硕士研究生, 主要从事城市工程地质和工程环境效应等方面的研究。

E-mail: a13270336909@tongji.edu.cn。

Experimental study on permeability of deep clay

JIANG Yu-kun¹, SUN Ru-hua²

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. School of Resource and Earth Science, CUMT, Xuzhou 221008, China)

Abstract: The physical and mechanical properties of deep buried clays differ from those of shallow buried clays due to deep burial, high pressure and long solidification time. To study the permeability of the deep buried clays, clay samples are taken from Longgu Coal Mine in Shandong Province, and their permeability is tested by using the SJ-1A.G triaxial shear equipment. Firstly, the curve which shows the relationship between coefficient of permeability and axial stress is studied, and a regression equation I was found to describe it. There are some differences of regression coefficients between deep buried clays and shallow buried clays. Secondly, the anisotropy of permeability and the internal reason of the deep buried clays are analyzed. Finally, the curve which shows the relationship between coefficient of permeability and axial strain is studied. The curve of the deep buried clays' doesn't have a segment stretched with little slope and this is because the shallow buried clays will yield under high pressure, while the deep buried clays will develop micro-crack. The study is of guiding significance for the waterproof design in thick covered mines and deep excavations

Key words: deep clay; triaxial permeability; anisotropy

0 引言

随着经济的高速发展, 资源开采空间不断向深部发展。中国华东地区煤炭资源储量丰富, 区内有兖州、徐州、两淮和永城等大型矿区煤层上覆大面积的深厚表土层, 一般厚约 200~300 m, 新建的巨野和龙固煤田区, 上覆表土层厚度高达 700 余米。在这种地层中建井、掘进都遇到了井筒破裂渗水、巷道突水等难题, 要解决这种深部黏土层中产生的问题, 需要科研人员对其力学性质、渗透特性进行专门研究。另外在城市地下空间利用方面, 位于长江三角洲冲积带入口的上海市在其远景地下空间规划中明确提出, 未来数十

年内, 上海市预计要开发利用的地下空间将深达 100 余米。解决大深度基坑的支护或降水问题, 同样需要对深部黏土的渗透特性具有充分的认识, 从而改进现有计算方法和工程手段。

许多学者已为深部黏土的特性研究作出了很大努力^[1-5]: 李文平研究了徐淮地区深厚土层的物理力学性质、土层的矿物组成成份及水文条件, 并探讨了深层黏性土吸附含水率与塑限含水率之间的关系。崔广心

基金项目: 国家自然科学基金项目(40572160); 中国矿业大学理科专项基金项目(2010LKDZ08)

收稿日期: 2010-12-08

表 1 土样基本指标测试结果
Table 1 Results of basic index tests on clay samples

| 样品 编号 | 取 样 深度/m | 分类 名称 | 密度 /(g·cm ⁻³) | 含水率 /% | 孔隙 比 | 塑限 /% | 液限 /% | 塑性指 数 | 直剪强度指标 | | 单轴抗 压强度 /kPa | 膨胀力 /kPa | 膨胀率/% | |
|----------|-------------|----------|------------------------------|-----------|---------|----------|----------|----------|-------------|--------------|--------------------|-------------|------------------|-----------|
| | | | | | | | | | 黏聚力 /kPa | 内摩擦 角/(°) | | | 有侧限 自由膨 胀率 | 自由膨 胀率 |
| 61-1 | 289.6~309.0 | 含砂 黏土 | 1.95 | 27.22 | 0.44 | 31.64 | 52.37 | 20.73 | 73.49 | 15.79 | 27.81 | 65.84 | 14.39 | 75.50 |
| 61-2 | 309.0~326.4 | 黏土 | 1.95 | 27.22 | 0.44 | 31.64 | 52.37 | 20.73 | 98.45 | 23.51 | 48.57 | 87.99 | 18.74 | 98.00 |
| 62 | 326.4~328.6 | 粉质 黏土 | 1.99 | 16.04 | 0.37 | 21.92 | 35.86 | 13.94 | 172.85 | 29.33 | | 155.20 | 18.53 | 53.30 |
| 66 | 332.2~341.8 | 黏土 | 2.06 | 17.92 | 0.36 | 25.70 | 49.33 | 23.63 | 96.63 | 32.51 | 115.04 | 94.23 | 14.25 | 97.40 |
| 67 | 341.8~349.4 | 细砂 | 1.98 | 18.88 | 0.38 | | | | 69.83 | 27.93 | | | | |
| 69 | 350.4~360.0 | 细砂 | 1.93 | 11.94 | 0.35 | | | | 33.70 | 34.11 | | | | |
| 72 | 361.4~367.5 | 黏土 | 1.99 | 29.53 | 0.44 | 29.59 | 53.23 | 23.64 | 28.36 | 26.65 | 54.23 | 163.88 | 18.83 | 112.0 |
| 73 | 370.6~372.8 | 黏土 | 1.94 | 19.23 | 0.41 | 28.82 | 51.14 | 22.32 | 177.46 | 20.93 | 84.12 | 139.70 | 16.10 | 91.10 |
| 74 | 375.9~377.1 | 粉质 黏土 | 2.18 | 15.41 | 0.30 | 17.85 | 28.05 | 10.20 | 118.15 | 30.73 | | 0 | 0.09 | 21.40 |
| 75 | 379.6~382.9 | 细砂 | 1.85 | 19.93 | | | | | 106.29 | 26.51 | | | | |

等研究发现, 深部黏土体的力学参数与常规土力学试验提供的参数有不可忽略的差别, 马金荣指出如果将浅层黏土的研究成果、理论以及研究方法直接延用到深部土中, 将造成计算和设计的较大误差。

1 试验概况

本文试验研究以龙固矿区黏土作为研究对象, 矿区地层区划属华北地层区鲁西地层分区, 区内多被第四系覆盖, 基岩出露甚少, 煤系基底为寒武、奥陶系, 缺失奥陶系上统、志留系、泥盆系、石炭系下统和三叠系等地层。

1.1 矿区土层物理力学性质概况

中国矿业大学对龙固矿井副检孔的岩土样的工程地质参数进行了测试。本文试验所用土样为该区 300~370 m 深度范围内的钻孔取样, 故仅选择了该深度土样的测试结果列入表 1。

由表 1 可粗略看到, 随深度增加, 黏土重度有增大趋势, 但数据较离散, 规律不明显; 孔隙比逐渐减小; 塑液限几乎同幅度增大, 也导致了塑性指数无明显变化; 黏聚力规律不显著; 膨胀性则由于不同深度土层膨胀土含量差异而跟深度无相关性。

1.2 深部黏土及浅层黏土塑液限对比

对深部土样和浅层土样进行塑液限联合测定, 结果如图 1 和表 2 所示。根据建筑地基基础设计规范 (GBJ7—89) [6] 细粒土分类, 浅层黏土 $I_p=20$, 为黏土, 深部黏土 $I_p=13.5$, 为粉质黏土; 根据岩土工程勘察规范 (GB50021—2001) [7] 按液性指数确定黏性土状态方法, 浅层黏土 $I_L=0.459$, 状态为可塑, 深部黏土 $I_L=0.23$, 状态为硬塑。

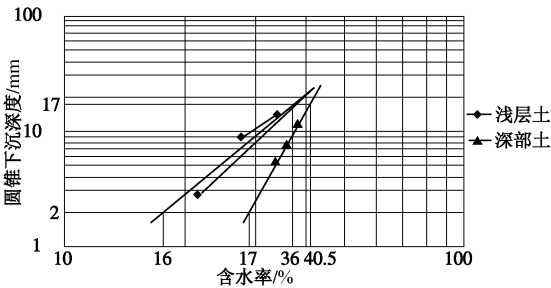


图 1 圆锥下沉深度与含水率关系图

Fig. 1 Relationship between cone's penetration depth and moisture content

表 2 塑液限联合测得结果

Table 2 Results of combined tests on plastic and liquid limits

| 参数 | 天然含 水率 w/% | 液限 w _L /% | 塑限 w _P /% | 塑性指数 I _P =w _L -w _P | 液性指数 $I_L = \frac{w - w_P}{I_P}$ |
|----------|------------------|-------------------------|-------------------------|--|-------------------------------------|
| | | | | | |
| 浅层 黏土 | 25.17 | 36.0 | 16.0 | 20.0 | 0.459 |
| 深部 黏土 | 30.15 | 40.5 | 27.0 | 13.5 | 0.230 |

1.3 深部和浅层黏土样 SEM 分析

比较两种黏土纵向竖直切面的扫描电镜图片, 可知虽然组成两种黏土的黏土矿物颗粒大多呈扁平板状或薄片状, 属絮状结构, 但亦有较为显著的差别。浅层黏土颗粒排列比较松散、凌乱, 倾斜的搭接较多, 面-面、边-面、边-边、边-角等状态均有存在, 粒间孔隙大。而深部黏土颗粒相对规整, 以面面相叠方式紧密接触为主, 鲜见较大粒间孔隙。如图 2 所示。

1.4 试验方法

利用 SJ-1A.G 三轴剪力仪进行试验, 但在原试验系统上稍加改动, 孔隙压力阀上外接高水头, 即可进

表 3 工作量一览表
Table 3 Workload list

| 土样类型 | 编号 | 试样数量/个 | 取土来源 | 围压/kPa | 水头 |
|------|----|--------|------------------------|--------|----------------|
| 纵向原状 | zy | 5 | 龙固 300~370 m 深度钻孔 | 500 | 室外 15 m 以上自由水头 |
| 横向原状 | hy | 5 | 龙固 300~370 m 深度钻孔 | 500 | 室外 15 m 以上自由水头 |
| 重塑土 | cs | 6 | 龙固 300~370 m 深度钻孔 (土屑) | 500 | 室外 15 m 以上自由水头 |
| 浅层黏土 | qc | 4 | 矿大(徐州)博物馆 0~50 m 深度钻孔 | 200 | 室外 15 m 以上自由水头 |

行规范的土的变水头三轴渗透试验。图 3 中 B 部分即高水头,为创造大约 0.15 MPa 的渗透压,设置水头位置比剪力仪高约 15 m。

为研究深部黏土不同于浅层土的渗透特性及其自身渗透的各向异性,试验前根据下表制备纵向原状、横向原状、重塑土、浅层黏土 4 类土样,分别在上述三轴渗透系统上进行变水头渗透试验。其中所谓横向原状样,即切土方向为水平。每个土样在设计围压下排水固结,然后在排水条件下施加轴向应力,孔压消散后,开通渗流阀门,测量渗透系数^[9]。具体工作量见表 3。

2 深部黏土渗透性与应力水平的关系

2.1 试验设定条件

- (1) 渗流模型的确定,不考虑渗流路径的迂回曲折,只分析它的主要流向,不考虑土体中颗粒的影响,认为孔隙和土粒所占的空间之总和均为渗流所充满。
- (2) 在试验水头差 (150~170 kPa) 下,黏土渗透满足达西定律。
- (3) 土样均处于饱和状态。

2.2 回归分析

图 4 中可以看到, $k-\sigma_z$ 并不是规则的线性相关,两组原状土样的 $k-\sigma_z$ 曲线虽然不规则,但是在达到突变应力之前,所呈现的规律与重塑土、浅层黏土比较一致。故本文对重塑土、浅层黏土的全部散点和纵横向原状土的前段(突变前)散点分别进行回归分析。选定了对 4 条曲线均有较高拟合度的函数进行拟合:

$$\ln k = a + b \cdot e^{-\sigma_z}$$
 (1)

式中, k 为渗透系数, σ_z 为轴向应力, a, b 为回归系数,拟合结果如表 4 所示。

表 4 拟合结果
Table 4 Fitting values

| 土样类别 | a | b | 相关系数 R |
|-------|-------------|-----------|----------|
| 重塑土 | -0.16569043 | 6.2477948 | 0.97729 |
| 浅层黏土 | -1.0228644 | 4.7581913 | 0.89905 |
| 纵向原状土 | 0.9940847 | 3.6532667 | 0.99732 |
| 横向原状土 | 0.86806944 | 3.5498785 | 0.87055 |

由上述拟合结果可以看到, 重塑土和浅层黏土的 $k-\sigma_z$ 关系存在相似性, 而深部黏土纵横向原状样与之差异较大。重塑土和浅层黏土的系数 $a < 0$, 原状土的 $a > 0$ 且接近 1; 重塑土和浅层黏土 b 值大于深部黏土。对此,推测黏土(破坏前)的 $k-\sigma_z$ 关系用式 (1) 一般能得到高度拟合, 并且回归系数 a 随深度增大由

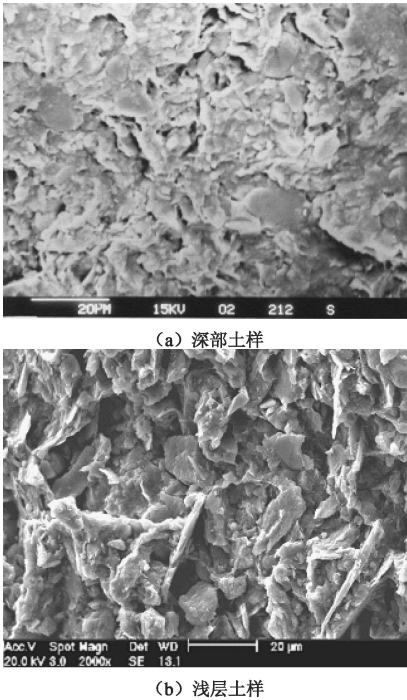


图 2 深部黏土和一般浅层黏土 SEM 图片

Fig. 2 SEM pictures of deep buried clays and shallow buried clays

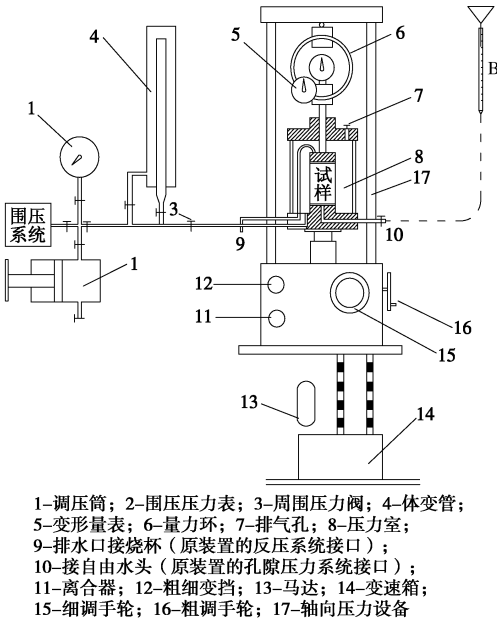


图 3 三轴剪力仪改装的三轴渗透仪

Fig. 3 Triaxial permeation apparatus adapted from triaxial shear apparatus

负转正, 绝对值不大; b 随深度增大逐渐减小。

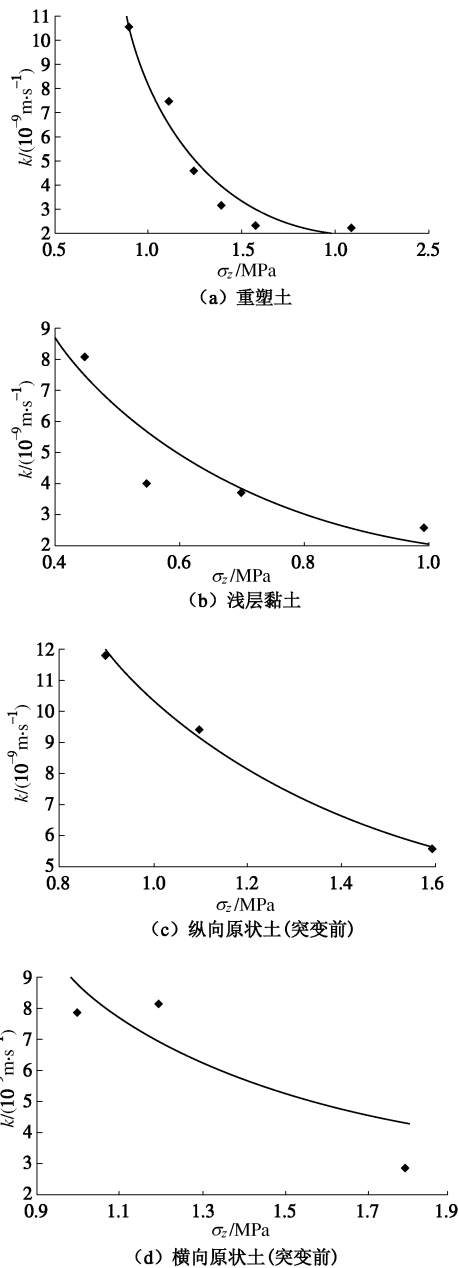


图4 4类土样 $k-\sigma_z$ 关系拟合曲线

Fig. 4 Fitting curves for relationship between k and σ_z for four kinds of soil samples

进一步可得到以下结论: ①渗透系数随轴向应力变化较大, 在应用 Terzaghi 和 Biot 固结理论时, 渗透系数 k 不变的假设会导致理论计算较大偏离实际情况; ②深部黏土在渗透性上有别于浅层黏土, 应力对其渗透系数的影响程度小于对浅层黏土的影响。

拟合函数中的回归系数 a , b 应由土的压缩模量、塑性指数、孔隙比等常规物理性质指标决定, 刘希亮等^[2]还提出特性粒径对它们的影响。但是所有这些相关关系还难以确定。

2.3 深部黏土层渗透的各向异性

下面对图5所示原状土的纵横向 $k-\sigma_z$ 曲线进行

单独研究, 重点分析深部黏土渗透的各向异性和各自发生突变的原因。

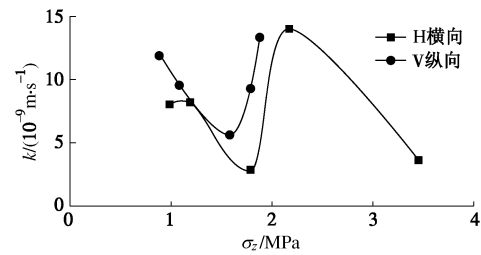


图5 原状土纵横向 $k-\sigma_z$ 曲线

Fig. 5 Undisturbed clays' vertical and horizontal $k-\sigma_z$ fit curves

由图5可见, 深部黏性土原状土样渗透性存在明显的各向异性。具体表现为: ①随轴向应力由小增大, 两者渗透系数均呈现类似于浅层黏土下降趋势, 前文中已进行过函数拟合, 随即在各自临界应力处发生转折, 渗透系数突变、增大; ②纵向渗透系数 k_v 在突变后, 再次下降, 几乎回到突变前水平, 而横向渗透系数 k_h 突变后未再次下降; ③横向渗透系数曲线中临界应力小于纵向渗透系数曲线; ④同等轴向应力下纵向渗透系数 k_v 小于横向渗透系数 k_h , 突变前(即各自均未达到临界应力段) k_h/k_v 大约为 1.1~1.3, 比文献[3]中浅层黏土对应值偏小。

临界应力之后的突变可能由于高应力下黏土结构遭破坏, 发育了导通裂隙。原状土样的横向抗压强度稍低于纵向, 是导致横向临界应力小于纵向的主要原因。纵向渗透系数 k_v 在突变后, 再次下降到突变前水平, 推测原因为, 裂隙出现后, 土样自身形变, 三轴压应力下自动调整而使裂隙临时闭合, 当三轴应力释放后(卸下土样), 发现依然有明显裂隙。而横向土样可能这种自动调整能力较差。从图6可以粗略看出横纵向土样的破坏特点。

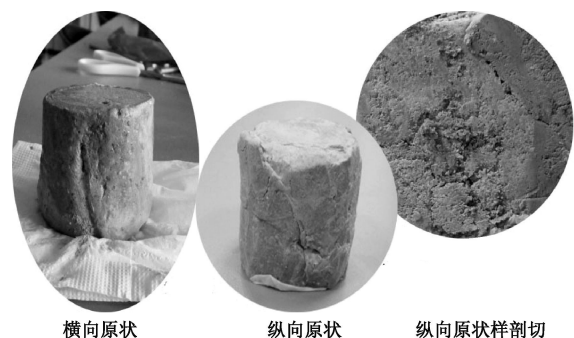


图6 原状土横纵向破坏特征对比

Fig. 6 Comparison between vertical and horizontal failure features of undisturbed clays

3 深部黏土层渗透性与应变的关系

煤矿开采过程, 受采动影响煤岩体发生形变, 使煤岩的渗透性质随变形程度发生变化, 从而影响流体

的分布和运移。因此研究图 7 所示的 $k-\xi$ 关系很有必要。

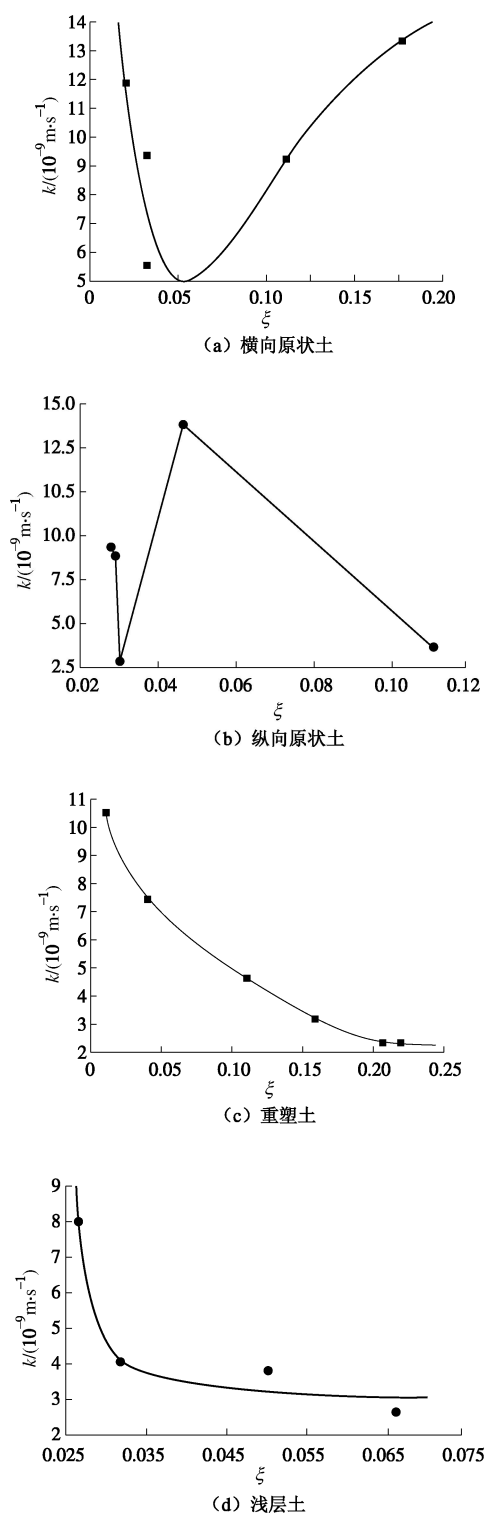


图 7 各类土样 $k-\xi$ 曲线

Fig. 7 $k-\xi$ curves for different clay samples

同 $k-\sigma_z$ 曲线类似, 重塑土、浅层黏土 $k-\xi$ 规律相近, 可分两段, 第一段大斜率 (绝对值) 下降, 第二段小斜率 (绝对值) 延伸。而原状土样的 $k-\xi$ 曲线只存在大斜率下降段, 未等出现小斜率延伸结构便发

生破坏, 从而使深部黏土层渗透系数陡然增大。结合试验过程可知, 小斜率延伸段产生的原因是土样达到屈服强度, 应力稍有增大, 应变急剧发展, 土样发生塑性流变, 局部鼓胀, 见图 8。深部黏土与浅层黏土的区别又体现在此, 深部黏土直到破坏都没有这种明显的屈服现象。由于这种原因, 在考虑深部黏土受采动影响发生变形后的渗透特点时, 不能简单按照浅层黏土的 $k-\xi$ 关系去推测, 否则会严重偏小, 而应该研究其是否有微裂隙发育或结构是否发生破坏。



图 8 试验后土样形态对比

Fig. 8 Comparison among forms of tested clay samples

4 结论与建议

渗透系数与轴向应力水平的关系中, 第一阶段, 深部黏土层原状土和重塑土、浅层黏土的渗透系数变化规律相似, 可按式 (1) 表示, 但深部黏土和浅层黏土在回归系数上差别较大, 回归系数 a 随深度增大由负变为正, 绝对值不大; b 随深度增大逐渐减小。第二阶段, 原状土渗透系数不再随轴向应力增大而减小, 发生了突变, 陡然增大。原因在于原状土在高应力下, 微裂隙逐渐发育, 渗透系数控制因素从孔隙比转为裂隙。原状土渗透性有明显的各向异性。

在渗透系数与轴向应变的关系曲线中, 重塑土和浅层黏土有小斜率延伸段, 深部黏土没有, 原因在于压缩过程中, 重塑土、浅层黏土发生屈服, 塑性流变, 局部鼓胀, 深部黏土直到破坏都没有明显屈服现象。因此, 研究深部黏土受采动影响发生变形后的渗透特点, 如果简单按照浅层黏土的 $k-\xi$ 关系去推测, 会严重偏小, 应研究其微裂隙发育或结构是否发生破坏。

此外由于研究的深部黏土埋藏深, 天然应力大, 目前的取样手段与运输水平不能消除对样品的扰动, 现有的试验设备难以满足较苛刻试验条件, 所以建议研究土层渗透系数的原位测试方法; 深部黏土原则上属非饱和土, 建议做一些基于非饱和土土力学理论的渗透研究; 对深部黏土的渗透特性的研究应建立在对深部黏土的全面认识的基础上, 因此深部黏土的强度、

本构模型等基础研究应进一步完善;目前渗透试验往往建立在达西定律的基础上,董邑宁^[3]提出原状土在高水头作用下,渗透规律偏离达西定律。但偏离达西定律后有无其他规律可循,值得作进一步研究。

参考文献:

- [1] 商翔宇. 不同应力水平深部黏土力学特性研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2009. (SHANG Xiang-yu. Study on the mechanical properties of deep clay under various stress level[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2009. (in Chinese))
- [2] 刘希亮, 罗 静, 朱维申. 深部含水层渗透系数均匀试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(16): 2989 - 2993. (LIU Xi-liang, LUO Jing, ZHU Wei-shen. Uniform experimental study on permeable coefficient of deep aquifer[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(16): 2989 - 2993. (in Chinese))
- [3] 董邑宁. 饱和黏土渗透特性的试验研究[J]. 青海大学学报(自然科学版), 1999, **17**(1): 6 - 10. (DONG Yi-ning. The Experimental research of the permeating characteristic of saturated cohesive soil[J]. Journal of Qinghai University, 1999, **17**(1): 6 - 10. (in Chinese))
- [4] 李又云, 刘保健, 谢永利, 等. 黏土的结构对渗透性质影响的试验研究[J]. 东北公路, 2003, **26**(1): 37 - 39. (LI You-yun, LIU Bao-jian, XIE Yong-li, et al. Experimental research on effect of clay structure on its permeability[J]. Northeastern Highway, 2003, **26**(1): 37 - 39. (in Chinese))
- [5] 孔令荣. 饱和软黏土的微结构特性及其微观弹塑性本构模型[D]. 上海: 同济大学, 2007. (KONG Ling-rong. Microstructural behavior of saturated soft clay and an elasto-plastic constitutive model considering microstructure[D]. Shanghai: Tongji University, 2007. (in Chinese))
- [6] GB50021—2001 岩土工程勘察规范[S]. 2002. (GB50021—2001 Code for investigation of geotechnical engineering[S]. 2002. (in Chinese))
- [7] 高大钊, 袁聚云. 土质学与土力学[M]. 北京: 人民交通出版社, 2008. (GAO Da-zhao, YUAN Ju-yun. Soil geology and soil mechanics[M]. Beijing: China Communication Press, 2008. (in Chinese))
- [8] 李文平, 孙如华, 王维理, 等. 深部土高压卸载变形结构性量化参数确定及本构模型[J]. 工程地质学报, 2007, **15**(3): 384 - 390. (LI Wen-ping, SUN Ru-hua, WANG Wei-li, et al. Constructive model and structural parameter for unloading deformation of clay soils at high pressure from triaxial testing[J]. Journal of Engineering Geology, 2007, **15**(3): 384 - 390. (in Chinese))
- [9] 李文平, 张志勇, 孙如华, 等. 深部黏土高压 K_0 蠕变试验及其微观结构各向异性特点[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(10): 1185 - 1190. (LI Wen-ping, ZHANG Zhi-yong, SUN Ru-hua, et al. High pressure K_0 creep experiment and the anisotropy of microstructure of deep buried clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(10): 1185 - 1190. (in Chinese))
- [10] 顾正维, 孙炳楠, 董邑宁. 黏土的原状土、重塑土和固化土渗透性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, **22**(3): 505 - 508. (GU Zheng-wei, SUN Bing-nan, DONG Yi-ning. Testing study of permeability of the original clay recomposed clay and improved clay with stabilizer ZDYT-1[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, **22**(3): 505 - 508. (in Chinese))
- [11] OBRIKE S E, OSADEBE C C, OMONIYI S S. Geotechnical analysis of two nigerian soils for use as clay liners[J]. Bull Eng Geol Environ, 2009, **68**: 417 - C41.
- [12] 李树刚, 钱鸣高, 石平五. 煤样全应力应变过程中的渗透系数-应变方程[J]. 煤田地质与勘探, 2001, **29**(1): 22 - 24. (LI Shu-gang, QIAN Ming-gao, SHI Ping-wu. Permeability-strain equation relation to complete stress-strain path of coal sample[J]. Coal geology & exploration, 2001, **29**(1): 22 - 24. (in Chinese))
- [13] 张阿根, 李洪然, 叶为民. 上海深部硬土渗透特性试验研究[J]. 工程地质学报, 2008, **16**(5): 630 - 633. (ZHANG A-gen, LI Hong-ran, YE Wei-min. Experimental study on permeability of hard clay at deep depth in Shanghai[J]. Journal of Engineering Geology, 2008, **16**(5): 630 - 633. (in Chinese))
- [14] 介玉新, 许延春, 刘 正, 等. 黄淮地区深部黏土工程性质试验研究[J]. 工业建筑, 2006, **36**(3): 63 - 66. (JIE Yu-xin, XU Yan-chun, LIU Zheng, et al. Engineering properties of deep clay in Huanghuai area[J]. Industrial Construction, 2006, **36**(3): 63 - 66. (in Chinese))