

衡水地面沉降区黏性土体渗透特征研究*

丁国平^① 胡成^① 陈华丽^② 陈刚^① 李亮^③

(^①中国地质大学环境学院 武汉 430074)

(^②韩国庆北国立大学地质系 大邱 702-701, 韩国)

(^③中国地质大学研究生院 武汉 430074)

摘要 弱透层或(和)弱透水性夹层中低渗透性黏土体的存在是地面沉降赖以形成的物质基础,其渗透特征是影响地面沉降评价、模拟与预测的最基本参数之一。本文以华北平原衡水沉降中心区的钻孔黏性土样为对象,利用高压三轴渗透试验仪进行了土样的渗透试验。结果表明:黏性土体的渗透系数随土体埋深和渗透压力增加而呈现总体逐渐减小的趋势,在时间上总体表现为开始时迅速减小而后逐渐趋于稳定的特点,但是由于地下水位季节性波动或者地下水大量被抽取,部分地层黏土其渗透系数与总体趋势有所差异。最后文章结合电镜扫描试验及分形技术分析了土体微观结构对其渗透特征的控制作用。

关键词 黏性土 渗透试验 渗透特征 地面沉降

中图分类号:P642.26 文献标识码:A

PERMEABILITY CHARACTERISTICS OF CLAY IN LAND SUBSIDENCE CENTER AT HENGSHUI, HEBEI, CHINA

DING Guoping^① HU Cheng^① CHEN Huali^② CHEN Gang^① LI Liang^③

(^①School of Environment Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430074)

(^②Department of Geology, Kyungpook National University, Daegu 702-701, South Korea)

(^③Graduate School, China University of Geosciences, Wuhan 430074)

Abstract The clay with low permeability in aquitard or/ and interbedded layer is the substance base of subsidence in the Huabei Plain, China. The seepage flow characteristics in clay can greatly impact the evaluation, simulation and prediction of the land subsidence. In this paper, soil samples are taken from the subsidence center at Hengshui and tested in laboratory. First, seepage tests are carried out by the high confining pressure triaxial seepage equipment. The test results indicate that the permeability of clay changes with the soil depth and the applied seepage pressure. The greater the soil depth and the seepage pressure are, the smaller the permeability is. Temporally, the permeability of the clay decreases rapidly at the beginning of the test. Then it stabilizes gradually. But due to the seasonally groundwater level fluctuations or excessive groundwater pumpage, the permeability values of some clay soil samples show different patterns. Finally, electron microscope scanning and fractal technology are used to analyze the control effect of microstructure of clay on the seepage flow characteristics.

Key words Clay, Seepage test, Permeability characteristics, Land subsidence

* 收稿日期: 2011-04-25; 收到修改稿日期: 2011-09-30.

基金项目: 中国地质调查局项目(1212010540906)资助.

第一作者简介: 丁国平, 主要从事水文地质、环境地质领域的教学与研究工作. Email: gpdling@gmail.com

1 引言

地面沉降是常在沿海、河流三角洲、河谷平原等发生的一种缓变性地面变形的地质灾害。很多国家和地区因经济发展需要大量开采地下水,导致城市和地区的地面沉降,破坏了地质环境,引发一系列环境问题,如泰国曼谷、日本东京、中国上海等等^[1-3]。中国在 17 个省都有发生地面沉降,特别是长三角和华北平原^[2,3]。20 世纪 80 年代初,由于对华北平原地下水的开采超量,青县、衡水、大城和沧州等城镇地下水位迅速下降,形成降落漏斗,致使水力梯度发生改变,进而流场受到影响。国内对地面沉降研究较为深入的只有长三角(包括上海、苏锡常)和天津,前人在这些方面做了不少工作,取得了较为丰硕的研究成果^[2-6]。但是针对华北平原地面沉降的研究不多,目前还没有人对华北平原完整第四系土体渗流固结特性进行系统的研究与总结。

衡水地区是华北平原地下水位的 1 个漏斗中心,由于地面沉降所带来的经济、地质灾害、环境等方面的影响日益严重,已经束缚了该地区的发展。由于各种条件的限制,目前针对该地区地面沉降机理研究还存在着很多的不足,对于地面沉降的规律研究资料缺乏,而采取对该地区地层样品进行试验研究并对其规律进行总结成为该地区地面沉降研究急需解决的问题。

过量开采地下流体,导致低渗透性介质如黏性土体中的孔隙水渗流排出而使有效应力增加造成土体压缩,是华北平原地面沉降的主要原因。因此黏性土体的渗透特征是影响黏性土体释水压缩变形的 1 个基本参数。通过实验对黏性土体渗流的特征参数进行研究,可以为地面沉降的发展模式分析提供依据。本文以华北平原衡水沉降中心区的钻孔黏性土样为对象,利用高压三轴渗透试验仪进行了土样的渗透试验。通过渗透系数的各项分析来研究各种因素对黏性土渗流和固结特性的影响,分析衡水地区因过量开采地下水造成地面沉降的内在机理。

2 试验内容与方法

2.1 试验内容

黏性土体的渗透系数是其渗流特征的直观反映,本文以华北平原衡水沉降区基岩标钻孔中的第

四系黏性土为研究对象,在忽略流体性质的情况下,从孔隙结构和渗流规律出发,通过试验来观测不同变量条件下的渗透系数变化,研究黏性土体的渗流特征,对华北平原黏性土渗流固结规律做出微观解释。

2.2 仪器设备^[7]

黏性土渗流中有关参数的正确获取是研究地面沉降渗流固结理论中的重要环节。由于所取土样为基岩标土体,样品埋藏深度大,最深可达到 420 多米,土样所处自然条件下地质空间的压力环境很难使用常规渗透仪进行模拟。同时考虑到试验所用土样从原地层取出后,由于应力环境的改变,会产生 1 个应力的释放过程,因此常规渗透仪所测出的渗透系数 k 一般要大于土体原有的自然状态下的渗透系数,使得问题分析的结果往往存在很大偏差。本研究采用三轴渗透仪(图 1)对基岩标土样进行渗流试验,可有效克服常规渗透试验的不足,减小误差,为地面沉降的渗流固结分析提供有力依据。



图 1 本研究试验所用的三轴渗透仪

Fig. 1 Image of triaxial permeameter

2.3 试验过程

制备试样:按照原状土的要求采取试样,制备直径大约 50mm 的土柱,并用游标卡尺准确读取试样的直径和高度。

装样:将制备的试样用橡皮膜进行封装,并用橡皮圈固定在仪器上。

设备加压:先加围压再加渗透压力,使围压始终大于渗透压力。

饱和试样:渗透加压排水,直至排水管内无气泡排出,认为试样饱和。

加压试验:控制渗透压力,分别在 1.0MPa、1.5MPa、2.0MPa 3 个压力段下对黏性土体做高压渗

流,并进行连续观察直至渗透系数相对稳定。

试验结束。

2.4 试验数据处理

黏性土在低速情况下是非线性的非达西渗流,但是当水压达到一定的情况下仍然遵循达西定律的^[8-10]。本试验中渗透压力较大,一般在1MPa以上,故渗流可以根据达西定律进行计算。利用下式计算玻璃管中的水量增加值 ΔQ :

$$\Delta Q = K \frac{H}{L} A \Delta t \quad (1)$$

因所加外压较大,玻璃管中水位增加值所引起的水头变化可以忽略不计, H 可理解为所加气压折算成的水头值。黏土的渗透系数计算公式可表示为:

$$K_T = \frac{\Delta Q L}{A H \Delta t} \quad (2)$$

$$K_{20} = K_T \frac{\eta_T}{\eta_{20}} \quad (3)$$

其中, H 为水头; L 为渗流途径; A 为试样横截面积; Δt 为时间差; η_T 为水在温度 T 时的黏滞系数; η_{20} 为水在20℃时的黏滞系数;求得的 K_{20} 即为试样的渗透系数。

3 试验结果分析

3.1 渗透系数随时间变化特征

为了进行对比分析,我们从浅到深随机选取了试样11、13、14、54、64进行作图分析。表1为文中所用土样的基本物性指标和土样深度,图2为不同深度的土样渗透系数随时间的变化曲线。

表1 土样基本物性指标及土样深度

Table 1 Physical properties and depth of soil samples

土样编号	取样深度/m	土的分类	含水量/(%)	湿密度/ $g \cdot cm^{-3}$	比重	初始空隙比
8	60.2~60.5	黏土	17.7	2.11	2.67	0.49
11	85.0~85.3	黏土	14.6	2.15	2.70	0.44
13	98.0~98.3	黏土	17.9	2.11	2.69	0.50
14	99.7~100.0	黏土	20.1	2.07	2.66	0.54
41	255.2~255.5	黏土	10.81	2.21	2.66	0.33
50	293.7~294.0	黏土	15.66	2.16	2.66	0.42
54	319.2~319.5	黏土	16.6	2.20	2.66	0.41
64	371.0~371.3	黏土	17.8	2.10	2.68	0.46

由图2可以看出,在试验开始的前4~6d的时

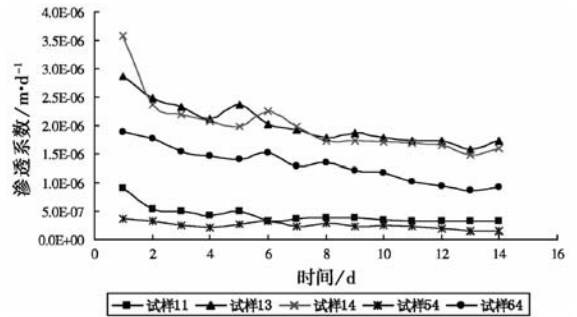


图2 渗透系数随时间变化趋势图

Fig. 2 Change of soil permeability with time

间里,黏土的渗透系数快速降低,然后逐渐趋于稳定。这是因为黏土自所处的地质环境中取出以后,存在1个应力释放的过程。在此过程中,黏土的微结构因应力减小而发生变化,黏土的孔隙半径及孔喉扩张,导致在黏土渗流试验的初期,土体的渗流主要由捷径式渗流控制。随着土体渗流试验的进行,黏土试样在高压渗流仪的压力室受较大围压、渗流压力以及黏土矿物吸水膨胀的影响,黏土的渗流由初期的捷径式渗流控制转为活塞式渗流控制。同时发现在由捷径式渗流转变为活塞式渗流的过程中,渗透系数有1个异常值(突然变大),这表明,在渗流形式发生变化的同时,黏性土结构具有突变的特点,而这个变化正是黏性土颗粒排列变化的转折点。我们可以利用电镜扫描试验来观察黏性土结构的改变。

通过运用环境扫描电子显微镜(Quanta200型,FEI有限公司),并且应用适当的放大倍数,得到黏土样品的环境电镜扫描照片(SEM),来帮助真实地描述黏土的微观孔隙结构形态的分布特征(图3、图4)。

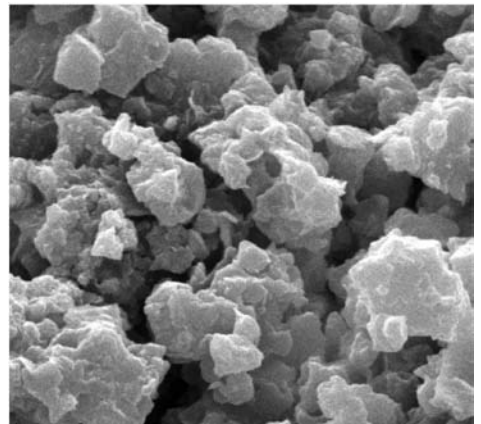


图3 试样41絮凝结构

Fig. 3 Flocculation structure of soil sample 41

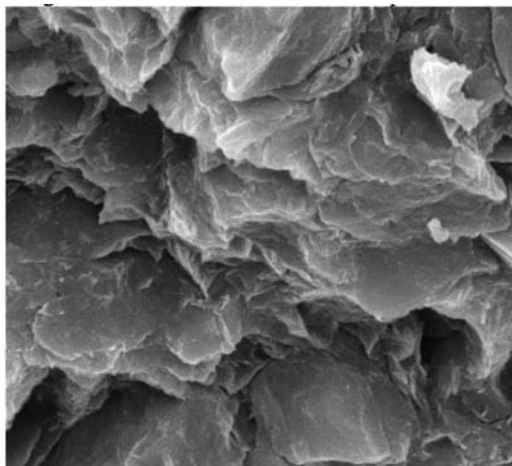


图4 试样50分散结构

Fig. 4 Dispersed structure of soil sample 50

从图3和图4可以看出,絮凝结构的孔隙和比表面积相对于分散结构都要大。而分散结构的特点是土体孔隙较小,排列较为密实,密度大,压缩性较小。土在垂直于定向排列的方向和平行于定向排列的方向上性质不同,具有各向异性。

渗流过程中随着压缩的进行,黏性土微观结构逐渐由不稳定型向稳定型转变,即由凝聚结构向同相结构转变(松散的絮凝结构向结构紧密的分散结构和聚集结构转变),相应地其密实程度逐渐由松散转变为密实,其可压缩性逐渐变小。在这个转变过程中,由于孔隙水压力的变大,黏性土的絮凝结构受到破坏,比表面积增大,根据有效应力原理在很短的时间里,由土体结构破坏减小的应力被孔隙水所承担而形成了沿施压方向上突然增大的水力梯度,所以,渗透系数异常变大,而等到黏性土结构稳定后,黏性土被适当的固结压实,部分孔隙封闭,渗透系数逐渐变小,并趋于稳定。

然而絮凝结构和分散结构是没有一个固定的界限的,絮凝结构局部被放大后也可以看做是分散结构,所以,在渗透压力变大时,黏性土结构仍然会出现上述类似的破坏过程,唯一的区别就是,这次破坏稳定过程后,黏性土的结构会更加致密。这一过程也恰好反映了随着压力的增大,土体压缩性会变大的现象。但是由于不同试样的结构差异性,这种突变的程度也有所差异(图2)。

3.2 渗透系数随压力变化特征

在高压渗流试验中,为研究黏土渗透系数与渗流压力的关系,本研究进行了3级渗流压力试验,所

加渗流压力分别为1MPa、1.5MPa和2MPa,对应的围压分别为1.5MPa、2MPa和2.5MPa。图5为渗透系数随压力的变化趋势图:

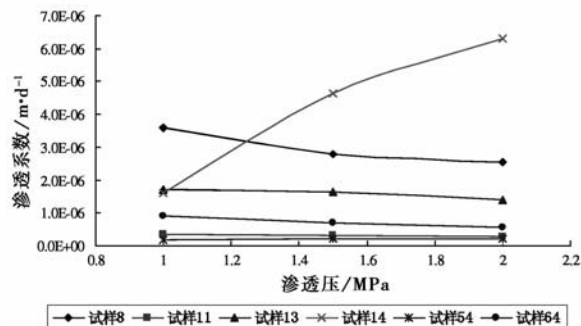


图5 渗透系数随所加压力变化趋势图

Fig. 5 Change of soil permeability with applied pressure

由图5可知,在高压外力的作用下,黏土的渗透系数有3种变化趋势。一是随外加渗透压力增大渗透系数增大,二是随外加渗透压力增大渗透系数减小,三是随外加渗透压力增大渗透系数基本保持不变。

本研究认为对于在渗透压力增加的情况下,衡水地面沉降典型区黏土的渗透系数出现3种不同趋势的原因是:不同地层的黏土,以及同地层不同埋深的黏土,其微观结构及黏土的理化性能具有一定的空间异质性,例如试验土体的粒度、孔隙半径、带电性等方面的差异,可能造成黏土在渗流过程中结合水与自由水的转化,导致黏土的微结构发生变化。并且,由于高压渗流试验中所添加的渗流压力很大,加之比渗流压力更大的围压的共同作用,使黏土发生不同程度固结。有些黏土试样在加压过程中固结程度大,出现渗透系数随渗流压力增大保持不变或者减小的趋势;有些黏土试样基本没有发生固结现象即黏性土的结构没有发生大的变化,随着渗流压力的增大,渗透系数也随着增大。

3.3 渗透系数与土体埋深的关系

在渗透系数随地层埋深的变化趋势图(图6)中可以看出,衡水地面沉降区漏斗中心分层标黏土的渗透系数值的数量级为 $10^{-6} \sim 10^{-7} \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$,且随着地层埋深的加深,其渗透系数总体呈减小的趋势。在85m和155m附近的渗透系数较小,且与总体趋势不符,这是因为它们所处地质环境的差异造成的。85m附近,为潜水位浸润带,由于地下水位的季节性波动,地层组段的黏土通过不断失水和饱水重复过

程,所以黏土骨架所承受应力同样出现增加和减小的循环变化,黏土孔隙被压密变形,造成其渗透性能下降;而 155m 位于第三含水层组地层内,由于华北平原第三含水层组的地下水被大量抽汲^[11],本含水层组中孔隙水压力减小,造成土体有效应力和渗流力增加,黏土颗粒骨架承受的应力增加,土层孔隙被压密,从而其渗透性能下降。可以知道,地质环境的差异也是通过黏性土结构性能的改变来影响黏性土的渗流特性。

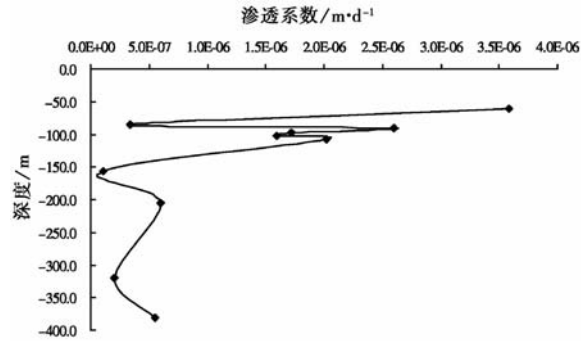


图6 渗透系数随土样深度变化趋势图
Fig. 6 Change of soil permeability with depth

为了从微观上验证上述的分析,应用 Voss, Lailowitz 和 Allesandrini 的研究成果^[12]来研究黏土的分维值(微观的孔隙分布)越大,反映黏土的孔隙分布更加分散,孔隙发育程度越高,黏土的团粒化程度越高,密度值越小。

采用遥感处理软件 ERDAS IMAGINE 8.7 对环境电镜扫描图片进行矢量化处理(图7),求取黏土微观孔隙的等效周长和等效面积。根据图8,可以发现等效周长和等效面积的对数值之间有很好的线性相关关系。即说明,环境电镜扫描图像中的微观孔隙等效面积与等效周长有很好的对数相关性,也就是说黏土微观孔隙具有自相似性,进一步说明黏土的孔隙微观结构形态具有分形特征。

在以上分析计算的基础上,做华北平原第四系黏土微观孔隙分维值、密度与深度的关系曲线(图9)。分析图9可以看出本试验样品黏土微观孔隙分布的分维值介于1和2之间,而且随着深度增加数值呈减小的趋势,不过局部范围呈减小-增大-减少的变化。这与渗透系数的变化一致,而黏性土的密度则呈现相反的变化规律。

土体结构单元体的性质在很大程度上取决于土粒集合体的性质^[13]。试样的密度值结合分维值分



图7 采用最优像素个数过滤小图斑
Fig. 7 Use optimum pixels to eliminate speckle

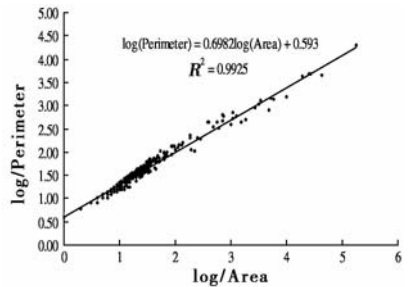


图8 试样7 等效周长-等效面积对数值图
Fig. 8 Log(Perimeter)-log(Area) graph of soil sample 8

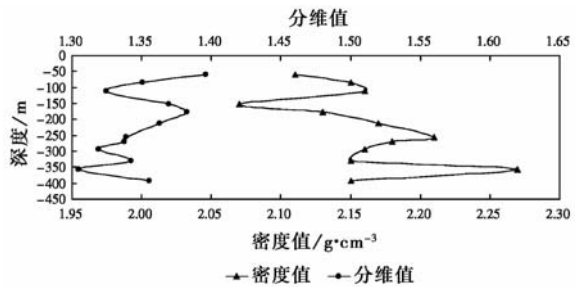


图9 黏土的微观孔隙分维值、密度和深度的关系图
Fig. 9 Relationship between microcosmic pore's fractal dimension, density and depth of clay

析,可以发现随着试样密度的增加,试样的微观孔隙分布分维值呈减小趋势。

根据土体的应力理论,对于平原区域,因为自重应力是黏土承受的主要有效应力,当黏土存在于浅层的地质环境的时候,上面覆盖的土体的自重应力比较小,所以黏土的土体结构所承受的有效应力也较小,相应的黏性土结构比较疏松,分形分维数比较大,更接近于絮凝状结构,反映出的土体基本物理密度指标也大。

但是当黏土存在于深层的地质环境时,黏性土体所承受的有效应力则较大,所以土体结构的形变也会较大,黏土的分形分维数(微观孔隙的自相似

度)也比较小。局部的突变是受黏性土沉积环境的影响,固结状态不同,分维值也相应地发生改变,但渗流规律仍受黏性土微观结构的控制。

4 结 论

华北平原黏性土渗流过程中,黏性土结构变化是引起渗透系数变化的根本原因。黏性土的结构具有相对性,是和孔隙水压力密切相关的。不同地层不同埋深的黏土其微观结构和理化性质具有一定的空间异质性,使得其渗透系数随渗透压力增大产生不同的变化,尤其对于地下水位季节性波动的地层黏土和地下水大量被抽取的地层。针对黏性土结构具有分形的特点,文中通过对不同深度分维值的计算,进一步说明渗流过程中颗粒结构的变化。

结合电镜扫描的渗流试验,可以有助于研究黏性土的渗流,对渗流机理的阐释会更加明确。进一步的研究将对试验仪器做出改进,结合电镜扫描,即在黏性土的渗流过程中,随时观察微观结构的变化,可以更清晰地研究黏土渗流特征。

参 考 文 献

- [1] N Phienwei, PH Giao and P Nutalaya. Land subsidence in Bangkok, Thailand. *Engineering Geology*, 2006, **82**: 187 ~ 201.
- [2] Yuqun Xue, Yun Zhang, Shujun Ye, Jichun Wu and Qinfen Li. Land subsidence in China. *Environmental Geology*, 2005, **48**: 713 ~ 720.
- [3] RL Hu, ZQ Yue, LC Wang and SJ Wang. Review on current status and challenging issues of land subsidence in China. *Engineering Geology*, 2004, **76**: 65 ~ 77.
- [4] 石建省, 张凤斌, 程彦培. 地质灾害图形图像分析系统在天津沉降分析中的应用[J]. *工程地质学报*, 1997, **5**(2): 174 ~ 181.
Shi Jiansheng, Zhang Fengbin, Cheng Yanpei. Development of Ghmias system and its application to analysis of spatial subsidence in Tianjin city. *Journal of Engineering Geology*, 1997, **5**(2): 174 ~ 181.
- [5] 史玉金, 严学新, 周念清. 长江河口滨海地区冲填土对地面沉降效应——以上海市临港新城为例[J]. *工程地质学报*, 2007, **15**(3): 391 ~ 394.
Shi Yujin, Yan Xuexin, Zhou Nianqing. Land subsidence induced by recent alluvia deposits in Yangtze river delta area—A case study of Shanghai lingang new city. *Journal of Engineering Geology*, 2007, **15**(3): 391 ~ 394.
- [6] 董东林, 武强, 钱增江, 等. 临汾地面沉降数值模拟及其与地裂缝灾害关系研究[J]. *工程地质学报*, 2001, **9**(2): 218 ~ 222.
Dong Donglin, Wu Qiang, Qian Zengjiang, et al. Numerical simulation of surface subsidence and its relation to ground fissure hazards. *Journal of Engineering Geology*, 2001, **9**(2): 218 ~ 222.
- [7] 杨正明. 低渗透油藏渗流机理及其应用[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2001.
Yang Zhengming. *Porous Flow Mechanics for Low Permeability Reservoirs and Its Application*. Beijing: Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, 2001.
- [8] 李兆敏, 蔡国琰. 非牛顿流体力学[M]. 东营: 石油大学出版社, 1998.
Li Zhaomin, Cai Guoyan. *Non-Newtonian Fluid Mechanics*. Dongyin: China University of Petroleum Press, 1998.
- [9] 宿青山, 侯杰, 段淑娟. 对饱和黏性土渗透规律的新认识及其应用[J]. *长春科技大学学报*, 1994, **24**(1): 50 ~ 56.
Su Qingshan, Hou Jie, Duan Shujuan. A new recognition on the law of water seepage in saturated cohesive soil and its application. *Journal of Changchun University of Science and Technology*, 1994, **24**(1): 50 ~ 56.
- [10] Bear J. *Dynamics of Fluids in Porous Media*. Courier Dover Publications, 1988, 764.
- [11] 付学功. 衡水市深层地下水降落漏斗发展趋势分析[J]. *海河水利*, 1999, **3**: 26 ~ 28.
Fu Xuegong. The deep drawdown cone of groundwater developing trend analysis in Hengshui city. *Haihe Water Resources*, 1999, **3**: 26 ~ 28.
- [12] 刘松玉, 方磊, 陈浩东. 论我国特殊土粒度分布的分形结构[J]. *岩土工程学报*, 1993, **15**(1): 23 ~ 30.
Liu Songyu, Fang Lei, Chen Haodong. Fracture structure of granularity distribution of regional soil in China. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1993, **15**(1): 23 ~ 30.
- [13] 胡瑞林, 李向全, 官国琳, 等. 黏性土微观结构定量模型及其工程地质特征研究[M]. 北京: 地质出版社, 1995.
Hu Ruilin, Li Xiangquan, Guan Guolin, et al. *The Quantitative Model of Clay Soil Micro-Structural Characteristic and Its Engineering Geology Character Study*. Beijing: Geological Publishing House, 1995.