

西安市承压含水层高压渗透模拟试验研究

孙刚臣^{1,2,3}, 彭建兵^{1,4}, 戴海涛⁵, 孙晓涵^{1,4}, 何小锋⁶, 卢全中^{1,4}

(1 长安大学 地质工程与测绘学院 陕西 西安 710054; 2 桂林理工大学 广西壮族自治区建筑工程检测与试验重点实验室 广西 桂林 541004;

3 桂林理工大学 土木与建筑工程学院 广西 桂林 541004; 4 长安大学 西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室 陕西 西安 710054;

5 中国广东核电集团 中广核工程有限公司 广东 深圳 518124; 6 宁夏回族自治区国土资源调查监测院 宁夏 银川 750004)

摘要: 为了揭示在地下水头升降过程中西安市承压含水层的物理及力学性质, 采用自行设计的高压渗透固结试验设备模拟西安市承压含水层中细砂高压渗透, 研究了在不同竖向压力和孔隙水压力条件下砂柱应变与时间的关系、应力与应变的关系以及砂样的渗透性, 同时对比探讨了试验前后砂样微观结构。结果表明: 孔隙水压力降低或竖向压力增大时, 砂柱发生压缩变形且表现出分段线性的特点; 在一定应力范围内, 增大孔隙水压力, 砂柱变形几乎没有发生回弹或者恢复。根据试验前后颗粒分析曲线、双目镜照相及电镜扫描照片的对比, 可以推断砂样在压缩过程中除产生颗粒滑移和位置调整外, 部分颗粒被压碎或压裂, 由此导致了砂样在地下水头升降过程中颗粒级配发生改变, 渗透系数急剧降低以及砂样在不同应力下表现出的分段线性、粘滞性和部分不可恢复等非完全弹性性质。

关键词: 承压含水层; 中细砂; 地下水头; 高压渗透; 非弹性变形; 颗粒级配

中图分类号: P641 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-6561(2010)04-0386-06

Simulated Study on High-pressure Penetration in Confined Aquifer of Xi'an

SUN Gang-chen^{1,2,3}, PENG Jian-bing^{1,4}, DAI Hai-tao⁵,

SUN Xiao-han^{1,4}, HE Xiao-feng⁶, LU Quan-zhong^{1,4}

(1. School of Geology Engineering and Surveying, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2. Guangxi Key Laboratory for Construction Engineering Testing and Experiment, Guilin University of Technology, Guilin 541004, Guangxi, China; 3. School of Civil Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, Guangxi, China; 4. Key Laboratory of Western Mineral Resources and Geological Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 5. Engineering Company Limited of China Guangdong Nuclear Power Group, Shenzhen 518124, Guangdong, China; 6. Ningxia Institute of Land and Resources Investigation and Monitoring, Yinchuan 750004, Ningxia, China)

Abstract In order to reveal the physical and mechanical properties of soil in confined aquifer of Xi'an when groundwater head changes, high-pressure infiltration and consolidation test system was designed to simulate the high-pressure penetration of medium-fine sand in confined aquifer of Xi'an. Relationships between strain and time, and strain and stress of sand column under different vertical pressure and pore water pressure were discussed; penetrability of sand sample was analyzed; and microstructures of sand samples before and after the test were compared. The results showed that sand column characterized compression deflection and piecewise linearity, when pore water pressure decreased or vertical pressure increased; deflection of sand column could not resile when pore water pressure increased in a certain limit of stress. According to the comparison of the test curves before and after the particle analysis, and the photographs of binocular microscope and electron scanning microscope before and after the tests, it was estimated that the sand sample characterized particle slides, position adjustment and particle crushed or fractured partly in the compression process. It caused particle composition changing and permeability coefficient sharply decreasing in the process of groundwater head change and the sand sample characterized imperfectly elastic, such as piecewise linearity, treachiness and partly irrecoverable.

收稿日期: 2010-06-13

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(40534021); 中国地质调查局项目(1212010641403); 广西壮族自治区建筑工程检测与试验重点实验室基金项目(桂科能 07109005-C; 桂科能 07109005-4)

作者简介: 孙刚臣(1977-), 男, 江苏丰县人, 工学博士研究生, 从事地面沉降致灾机理研究。E-mail: sun2963@163.com

Key words: confined aquifer; medium-fine sand; groundwater head; high-pressure penetration; inelastic deformation; particle composition

0 引言

过量开采浅层承压水是西安市发生地面沉降的主要原因。根据西安市地面沉降分层标监测和历年的研究成果,西安市地面沉降主要发生在地表以下 100~300 m 的承压含水层组,该层为粉质黏土与中细砂或粉细砂互层^[1-10]。一般认为,西安市地面沉降中,黏土层的压缩变形占大部分,砂层的压缩量小,且为近弹性压缩,对砂层变形计算一般依据弹性理论^[11]。但是,张云等^[12-14]在对上海和常州承压含水层变形现场监测和试验研究时发现,砂层在一定应力环境下,会发生塑性变形和蠕变,并且其压缩量在地面沉降计算中不容忽略。为研究西安市承压含水层在水头升降条件下的物理、力学性质及其变化,通过中细砂的高压渗透固结试验,对西安市承压含水层进行模拟试验研究。

1 试验概况

1.1 试验用土

按照试验要求,应取各深度处的土样,根据其埋藏深度和地下水头高度,施加竖向力和孔隙水压力,待变形稳定后测其孔隙比和渗透系数。但鉴于砂土原状样取样困难及与大型物理模拟试验用土保持一致,本次试验取西安市某基坑工地中细砂代替不同深度处的土样,试验用中细砂相对密度为 2 675。

1.2 试验设备

试验用仪器是在常规固结仪的基础上,借鉴同类仪器加以改进和加工。改进后的仪器包括加荷、水压控制、量测和数据采集系统。试验仪器装置见图 1。

1.3 试验方案

首先通过加荷系统提供竖向压力,模拟上覆地层的自重应力,同时通过高压氮气来控制试验土层中孔隙水压力,按照试验方案,在各级竖向压力下变形稳定后,逐级降低和增大孔隙水压力,以模拟水头下降和上升。试验中量测砂柱变形及单位时间出水量和水温等。地下水水头监测表明,该承压水水头波动范围为地表以下 50~130 m。根据土层深度和地下水水头波动情况(图 2),竖向压力分别为 2.0、3.0、4.0、5.0、6.0 MPa;水压 0.06~2.0 MPa,渗透试验水头差为 0.1 MPa(表 1),如果连续 5 h 砂柱变形不超过 0.02 mm,视为砂柱在该级压力下变形稳定。



1—压力室; 2—千斤顶; 3—氮气罐; 4—水罐; 5—横梁; 6—孔隙水压力计; 7—千斤顶压力表; 8—百分表; 9—温度计

图 1 试验装置

Fig. 1 Test Equipment

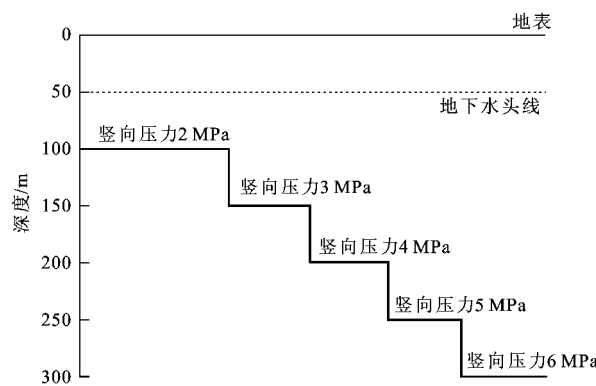


图 2 试验方案设计依据

Fig. 2 Design Considerations of Test Scheme

2 试验结果分析

2.1 砂柱应变与时间的关系

图 3 表明,在不同竖向压力、不同孔隙水压力作用下,砂柱应变与时间关系曲线表现出以下特征:

(1)砂柱应变与时间有关,表明在长时间的压应力作用下,砂层也会发生流变。

(2)应变-时间曲线具有分段性,土柱压缩变形先快后慢,并逐渐趋于稳定。

(3)小幅度降低孔隙水压力时,砂柱应变增量近

表 1 试验压力控制方案
Tab. 1 Pressure Control Scheme of the Test

试验 顺序	竖向压力/ MPa	孔隙水压力/ M Pa											备注
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
1	2	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	变形 稳定后 改变 压力
2	3	1.0	0.8	0.6	0.4	0.1	0.0	0.1	0.4	0.6	0.8	1.0	
3	4	1.5	1.2	0.9	0.6	0.3	0.0	0.3	0.6	0.9	1.2	1.5	
4	5	2.0	1.6	1.2	0.8	0.4	0.0	0.4	0.8	1.2	1.6	2.0	
5	6	1.6	1.5	1.0	0.5	0.1	0.0	0.1	0.5	1.0	1.5	1.6	

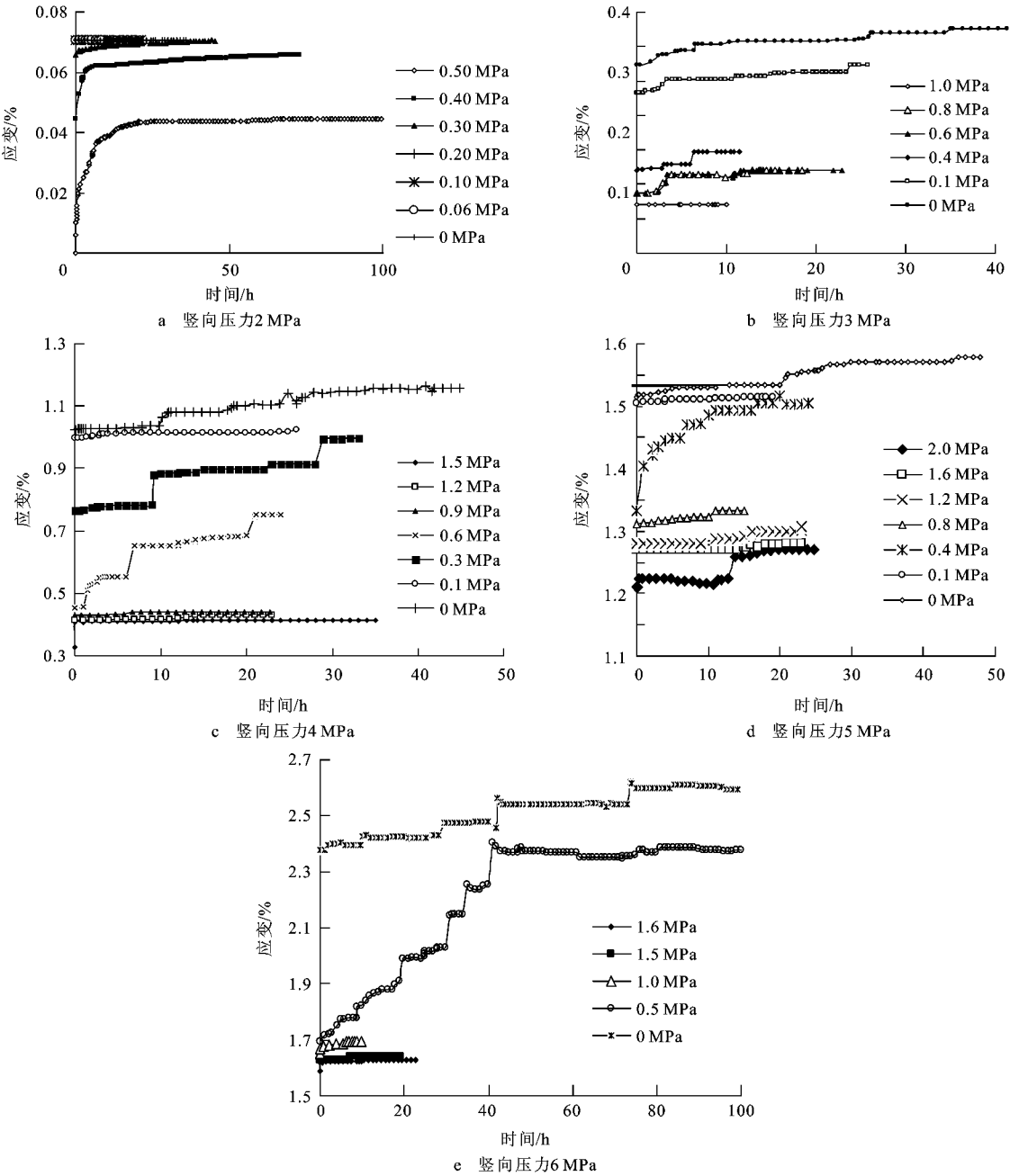


图 3 不同竖向压力和孔隙水压力下砂柱应变与时间的关系

Fig. 3 Relationship Between Strain and Time of Sand Column Under Different Vertical Pressure and Pore Water Pressure
?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

似为零(图 3c 中竖向压力为 4 MPa、孔隙水压力为 0.9~1.5 MPa 下应变-时间曲线)。

(4)受竖向压力波动影响, 部分应变-时间曲线出现异常点。

2.2 竖向有效压力下砂柱应力与应变的关系

由循环荷载作用下砂柱压缩曲线(图 4)可以看出, 砂柱在竖向压力和孔隙水压力反复升降作用下的应力-应变具有以下特征:

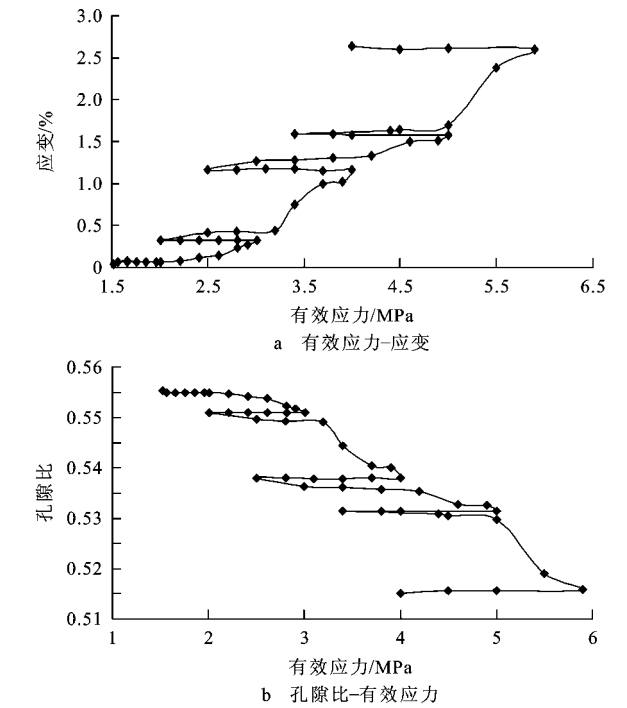


图 4 循环荷载作用下砂柱压缩曲线

Fig. 4 Compression Curve of Sand Column Under Cyclic Loading

(1)有效应力-应变曲线具有分段性。本次试验中的砂柱应变曲线可以分为 3 段: 0.0~2.01 MPa、2.01~2.9 MPa、2.9~6.0 MPa。随着有效应力增加, 压缩模量降低, 各段曲线基本呈线性。

(2)在较低水平有效应力作用下, 砂柱应变量的增加和降低都很小。

(3)砂柱在竖向压力作用下变形稳定后, 增大孔隙水压力, 应变基本不变。这表明升高地下水头仅能控制砂层的压缩变形不再增加, 而不能使其变形恢复。另外, 间断性抽水可以减少砂层的压缩变形量。

(4)荷载恢复后, 砂柱变形仍遵循原来的变形轨迹。

2.3 不同竖向压力下砂样渗透性

对试验数据进行整理, 绘制出渗透系数曲线(图 5)。图 5 表明, 西安市下覆中细砂的渗透系数随孔隙比的降低而降低, 当孔隙比在 0.527~0.534

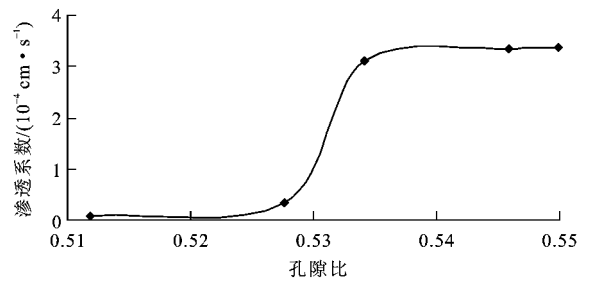


图 5 砂样在不同孔隙比下渗透系数

Fig. 5 Permeability Coefficient of Sand Sample Under Different Void Ratios

处, 渗透系数发生突变。此时竖向有效应力为 4~5 MPa。

2.4 试验前后砂样微观结构对比

对试验前后的砂样分别进行颗粒分析(筛分试验、激光粒度分析实验)、双目镜观察及电镜扫描分析。

2.4.1 砂样的颗粒粒度分析

图 6 表明, 试验后曲线整体向左侧偏移(图 6a), 曲线峰值明显降低(图 6b), 说明试验后小粒径砂粒所占密度比试验前明显增加, 砂样颗粒级配发生变化。

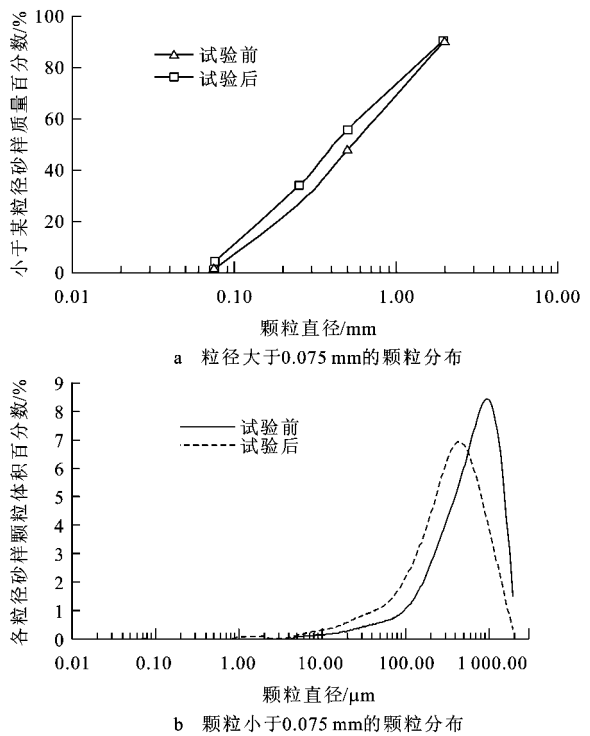


图 6 试验前后砂样颗粒粒度分布

Fig. 6 Distribution of Particle Size Before and After the Test

2.4.2 砂样的颗粒结构分析

为了进一步揭示砂样的颗粒级配变化, 通过双目镜光学显微镜观察了不同粒径的颗粒结构变化, 同时

通过高精度电镜扫描对砂样的微观结构进行分析。

(1)普通光学双目显微镜观察的试验前后不同颗粒结构特征。图 7 在长安大学地质古生物实验室拍的,由于该双目光学显微镜及配套照相装置像素低,放大倍数有限,故粒径小于 0.075 mm 颗粒没能拍到,但从试验前后砂粒照片(图 7)可以较清晰地看到,试验后砂样比试验前有所破碎,试验后部分砂颗粒发生了破裂。

(2)试验前后砂颗粒结构的电镜扫描观察。对试验前后的砂样分别取样进行电镜扫描(图 8),通过照

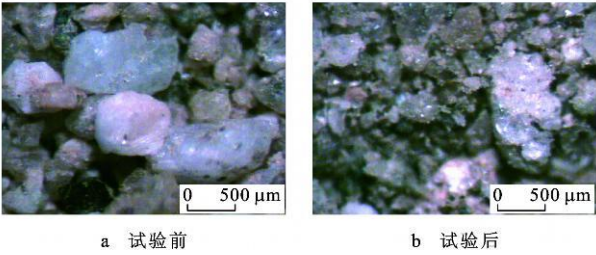


图 7 砂样试验前后双目镜照片
Fig. 7 Photographs of Sand Samples by Binocular Microscope Before and After the Test

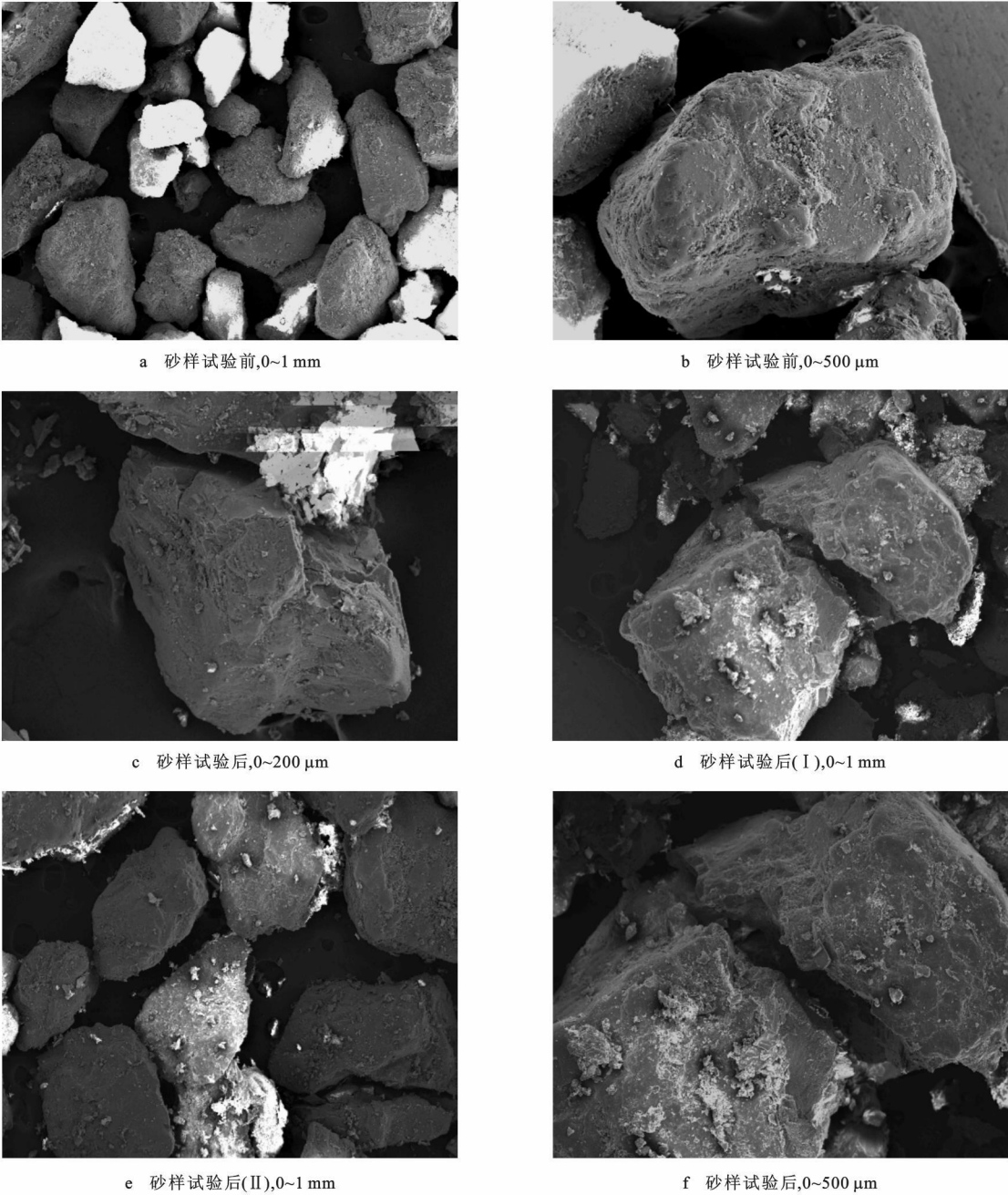


图 8 砂样试验前后电镜扫描照片

Fig. 8 Photographs of Sand Samples by Electronic Microscopic Before and After the Test

片可以很清楚地看到试验后部分砂粒发生压裂破坏,破坏方式主要有整体结构破坏和局部边缘破坏等两种类型,可以推测其颗粒不规则、棱角度高是砂颗粒在较低应力(5~6 MPa)水平发生破坏的原因。

3 结语

(1)孔隙水压力降低或竖向压力增大时,砂柱发生压缩变形,且表现出分段线性的特点:低水平循环应力作用下,砂柱应变量的增加和降低都很小,随着有效应力水平增大,砂柱发生较大的应变,压缩模量降低,在竖向有效压力增加到4~5 MPa时,砂柱的渗透系数突然降低。

(2)本次试验应力范围内,增大孔隙水压力,砂柱变形几乎没有发生回弹或者恢复,可以推测,恢复和升高地下水水头仅能控制砂层的压缩变形不再增加,而不能使已经发生的压缩变形得到恢复。此外,计算西安市100~300 m深度内的砂层在水头升降时的变形,采用完全弹性理论是值得商榷的。

(3)砂颗粒在压缩过程中除产生颗粒滑移和位置调整外,部分颗粒被压碎或压裂,使颗粒级配趋于“优化”,从而减小了有效渗透面积,导致渗透系数急剧减小。

(4)本次试验用砂取自西安市某基坑工地,与100~300 m承压含水层在沉积时间和环境上有一定的差异,因此,试验还需进一步改进,采取深层砂样进行试验,以期能够根据试验结果对西安市承压含水层的力学性质做定量分析与研究。

参考文献

- [1] 赵其华,王兰生,徐进.西安市地面沉降机制[J].地质灾害与环境保护,1998,9(3):11-17.
- [2] 彭建兵,陈立伟,黄强兵,等.地裂缝破裂扩展的大型物理模拟试验研究[J].地球物理学报,2008,51(6):1826-1834.
- [3] 徐光黎,佟永贺,张天明.地下水抽汲对西安市地面沉降和地裂缝活动的影响程度分析[J].中国地质灾害与防治学报,1992,3(4):3-7.
- [4] 金海峰,张益谦.西安市地下热水开采现状与合理开发利用探讨[J].地球科学与环境学报,2004,26(3):40-43.
- [5] 胡志平,赵振荣,朱启东,等.西安市某地裂缝两侧黄土物理力学性质试验[J].地球科学与环境学报,2009,31(1):85-88.
- [6] 孙刚臣,彭建兵,张德媛.西安市地面沉降成因机理中的若干问题探讨[J].灾害学,2008,23(增刊):40-44.
- [7] 门玉明,石玉玲.西安市地裂缝研究中的若干重要科学问题[J].地球科学与环境学报,2008,30(2):172-176.
- [8] 索传郾,王德潜,刘祖植.西安市地裂缝地面沉降与防治对策[J].第四纪研究,2005,25(1):23-28.
- [9] 邓亚虹,彭建兵,卢全中,等.地铁工程地质灾害危险性综合评估定量方法——以西安地铁一号线为例[J].地球科学与环境学报,2009,31(3):291-294.
- [10] 石玉玲,门玉明,刘洋,等.西安市地裂缝对城市立交的破坏机理及防治措施[J].地球科学与环境学报,2009,31(1):89-93.
- [11] 徐光黎,唐辉明,贾思吉,等.西安市地裂缝活动数学模型研究[R].西安:陕西省环境监测中心站,1994.
- [12] 张云,薛禹群,施小清,等.饱和砂性土非线性蠕变模型试验研究[J].岩土力学,2005,26(12):1869-1873.
- [13] 张云,薛禹群,李勤奋.上海现阶段主要沉降层及其变形特征分析[J].水文地质工程地质,2003,30(5):6-11.
- [14] 叶淑君,薛禹群,张云,等.上海区域地面沉降模型中土层变形特征研究[J].岩土工程学报,2005,27(2):140-147.

“第三届全国矿田构造与地质找矿理论方法研讨会”在西安召开

“第三届全国矿田构造与地质找矿理论方法研讨会”于2010年10月15~19日在西安长安大学召开。会议由中国地质学会地质力学专业委员会和构造地质学与地球动力学专业委员会主办,长安大学和中国地质科学院地质力学研究所承办。翟裕生、赵文津、张国伟、汤中立、李佩成院士等参加了大会,陈毓川、赵鹏大和孙传尧院士和张洪涛总工程师等发来贺信。来自全国各地的350多名地质矿产科技人员参加了会议。

会议秘书长吕古贤介绍,李四光确立了中国地质力学矿田构造的研究方向并建立了矿田构造研究室,杨开庆1982年组织了海南“全国矿田构造与小型构造学术研讨会”,翟裕生1986年主持了山东招远“全国矿田构造专业会议”,为延续继承前两次会议的学术思想,本次研讨会旨在进一步促进矿田构造、深部外围找矿、改造成矿、构造动力成岩成矿及其地球化学与物理化学过程的研究,提高矿田构造与地质找矿理论方法的创新能力,更好地为资源可持续供应和经济建设服务。院士报告有翟裕生“加强矿田构造研究,促进找矿突破”,汤中立“与镁铁超镁铁岩有关的小岩体成大矿控矿构造问题”,赵文津“矿田深部结构与找矿”等。

本次会议围绕区域成矿体系与矿田成矿系列找矿理论方法,金属矿田构造与找矿理论方法,煤油气田构造与预测理论方法,矿田构造应力场、构造地球化学、构造物理化学及成岩成矿实验,矿山地质和深部找矿与矿田整装勘查的理论方法等五个专题进行了研讨。会议提出了矿田地质学的新概念,讨论了成矿系统的时空结构及其构造控制,介绍了中国矿山地质的新成就,报道了国外大型矿床勘查策略和实例及国内危机矿山专项的重要进展,分析了矿田构造定量化测量方法、大陆碰撞构造、地质力学矿田构造的研究与发展、综合预测找矿技术方法和实践、花岗岩过程的元素行为与矿田类型以及构造岩相填图和岩穹控矿模式等新成果,报道展示了秦岭凤太矿田、东天山金铜矿田、云南、青海等地构造地球化学找矿突破和阿尔金地区铁矿找矿进展。