

西安地铁穿越地裂缝的抽水试验研究

李新生^{1,2,3}, 王朋朋¹, 李亚圣¹, 李忠生¹, 高铎文¹, 万通¹, 高虎艳⁴

(1 长安大学地质工程与测绘学院, 陕西西安 710054; 2 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; 3 长安大学国土资源部岩土工程开放研究实验室,

陕西西安 710054; 4 西安市地下铁道有限责任公司, 陕西西安 710018)

摘要: 查清地裂缝水文地质情况可以为西安地铁设计和施工提供科学依据。根据西安地铁勘察工作需要, 2008年7月~9月选择地裂缝穿过的西安市劳动路小学校内场地首次尝试进行跨地裂缝水文地质专项现场试验。试验内容包括试坑渗水试验、钻孔注水和抽水试验, 并以1号抽水井的稳定流抽水试验为典型, 研究地裂缝对地下水渗流的影响。采用带1个观测孔的稳定流潜水完整井公式、带2个观测孔的稳定流潜水完整井公式以及潜水完整井水位恢复速度计算公式等3个渗透系数计算方法, 得到了地表浅层土体沿地裂缝走向和垂直于地裂缝走向的渗透系数, 分析了渗透系数的差异性; 最后利用MADIS有限元软件模拟场地内建筑物对地基土施加应力, 探讨了建筑物对场地土体的影响。结果表明: 利用上述3个公式计算, 都得到沿地裂缝方向土体的渗透系数比垂直地裂缝方向的土体稍大; 在同一落程中, 利用潜水完整井水位恢复速度公式计算得到的渗透系数最大, 利用带2个观测孔的稳定流潜水完整井公式计算得到的渗透系数次之, 利用带1个观测孔的稳定流潜水完整井公式计算得到的渗透系数最小, 这主要是由井损造成的; 建筑物对场地土体的影响主要集中在素填土层、黄土层和古土壤层, 粉质黏土层以下影响则逐渐减弱, 影响深度在18m左右; 由于建筑物长期对地裂缝上盘土体施加荷载, 附加应力作用使地基土固结压密, 导致地裂缝上盘土体的渗透系数较下盘小。

关键词: 西安地铁; 地裂缝; 抽水试验; 渗透系数; 水文地质; 稳定流

中图分类号: P641.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-6561(2010)04-0378-08

Study on Pumping Test for Xi'an Metro Crossing Ground Fracture

LI Xin-sheng^{1,2,3}, WANG Peng-peng¹, LI Ya-sheng¹,

LI Zhong-sheng¹, GAO Duo-wen¹, WAN Tong¹, GAO Hu-yun⁴

(1. School of Geological Engineering and Surveying, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China;

2. Key Laboratory of Western Mineral Resources and Geology Engineering of Ministry of Education, Xi'an 710054,

Shaanxi, China; 3. Open Research Laboratory of Geotechnical Engineering of Ministry of Land Resources,

Xi'an 710054, Shaanxi, China; 4. Xi'an Metro Company Limited, Xi'an 710018, Shaanxi, China)

Abstract Measuring hydrogeological condition of ground fissure could provide a basis for the design and construction of Xi'an Metro. Hydrogeological test around the ground fracture was done in Laodonglu primary school of Xi'an City, which located above the ground fracture, from July to September, 2008. It included water penetration, drilling hole injected with water and pumping tests, and the stationary flow pumping test in No. 1 pumping well was taken as a special example. Effect of ground fracture on seepage action of ground water was studied. The three formulas (stationary flow fully penetrating well with one or two observation wells, water level reset rate fully penetrating well) were used to calculate the permeability coefficients of shallow soils, which were parallel or vertical to the ground fracture. The differences of permeability coefficients were discussed. Finally, effect of stress application of building on foundation soil was simulated by finite element software MADIS. The results showed that the permeability coefficients of soil body parallel to the ground fracture was a little bigger than that vertical to the ground fracture based on the above mentioned three formulas; the permeability coefficient calculated by the three formulas decreased in the order of water level reset rate fully penetrating

收稿日期: 2010-01-05

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(121201064140)

作者简介: 李新生(1963-), 男, 山东肥城人, 副教授, 理学博士, 从事岩土工程及环境工程地质教学及研究。E-mail: xinshengli1688@163.com

well, stationary flow dive fully penetrating well with two observation wells and stationary flow dive fully penetrating well with one observation well under the same height of drop, and well loss caused the difference; the influence of building on soil body mainly focused on plain fill, loess and paleosol strata, gradually decreased under silty clay strata, and the influence depth was approximately 18 m; because of the load application of building to the upper side of ground fracture for a long time, effect of subsidiary stress caused foundation soil consolidation, and the permeability coefficients in the upper side of ground fracture was smaller than that in the lower side.

Key words: Xi'an Metro; ground fracture; pumping test; permeability coefficient; hydrological geology; stationary flow

0 引言

西安地裂缝是一种地区性的地质灾害现象^[1-5], 目前查明的西安地裂缝有 14 条, 总体走向均为北东和北东东向。目前正在施工的地铁二号线为南北向, 其走向穿过了大多数地裂缝, 和地裂缝大角度相交, 受影响的长度和范围较小。而正在施工的地铁一号线西段为北西向, 中段为东西向, 东段为北东向, 通过的地裂缝较二号线少, 但和地裂缝交角小, 受地裂缝影响的长度和范围较大, 并且存在多次穿越一条地裂缝的情况。

西安地区应对建筑场地地裂缝的措施是查清位置、合理避让。因此, 地裂缝工程地质和水文地质性质一直未曾引起关注, 很少对其进行研究。地铁工程无法采取避让措施, 必须在查清地裂缝水文地质情况后, 才能进行科学合理的设计和施工。二号线北大街 f₃ 地裂缝处, 曾因地裂缝的水文地质性质不明而给工程施工造成了极大困扰, 影响了工期。因此, 查清地裂缝水文地质参数, 为地铁设计和施工提供科学依据迫在眉睫。

西安地铁穿越地裂缝的施工方法均为浅埋暗挖, 为了保证施工安全须先进行降水。为给降水设计提供合理参数, 2008 年 7 月~9 月选择在劳动路小学院内场地首次尝试进行跨地裂缝水文地质专项现场试验。试验内容包括试坑渗水试验、钻孔注水和抽水试验, 抽水试验分为单井和群井抽水试验。笔者以 1 号抽水井的抽水试验结果为典型, 研究地

裂缝对地下水渗流的影响, 进而评价其对地铁工程施工的影响。

1 试验场地概况

试验场地所在的劳动路小学位于西安市劳动南路东侧, 北距大庆路约 300 m (图 1), 小学院内 f₃ 地裂缝出露地表, 损毁多栋教学楼 (图 2)。地裂缝走向北东向 29°, 倾向南东向, 倾角约 80°。场地地形平坦, 地面高程为 398.60~400.89 m, 西高东低, 南高北低, 位于劳动公园黄土梁南侧, 地貌单元属洮河二级阶地。根据钻探结果, 场地在试验深度范围内主要地层有 4 层, 各层特征见表 1。



图 1 试验场地位置

Fig. 1 Location of Test Site

根据钻探结果, 场地内潜水位为 9.20~9.73 m, 相应水位标高为 391.42~391.61 m。丰水期和枯水期间地下水位相应上升和下降, 水位年变化幅度约 2.00 m。该场地地下水为孔隙潜水, 补给源为大气降水、地下径流与管网渗透等。排泄方式

表 1 试验场地主要地层

Tab. 1 Main Strata in Test Site

地层编号	地质年代	岩性描述	层厚/m	层底深度/m	层底标高/m
①	Q ^{pl}	杂填土: 黄褐色—灰褐色, 局部为杂色。土质不均匀, 含混凝土块、砖块等	2.60~6.10	2.60~6.10	394.71~398.20
②	Q ^{sl}	新黄土: 褐黄色, 土质均匀, 含微量氧化铁、钙质条纹及零星蜗牛壳碎片。可塑, 压缩性中等	4.60~6.30	8.50~11.10	389.92~392.29
③	Q ^{sl}	古土壤: 棕红色, 土质较均匀, 具花瓣状结构, 含大量氧化铁及钙质结核	0.80~4.60	9.40~15.30	385.51~391.27
④	Q ^{sl}	粉质黏土: 黄褐色, 可塑, 饱和。含铁锰质、条纹钙质结核, 硬塑, 压缩性中等。夹薄层中粗砂层透镜体④-1、④-2	最大揭露厚度为 18.00 m		



a 损毁教学楼



b 地面破坏

图 2 试验场地地裂缝造成建筑物及地面破坏

Fig. 2 Cracks of Building and Surface Caused by Ground Fracture

为径流排泄、人工开采、潜水越流排泄等。

2 试验场地布置

本次试验共布设钻孔(井)9 个,其中抽水井 3 个,观测孔 6 个。沿地裂缝走向为 1 个抽水井、4 个观测孔,垂直地裂缝方向为 3 个抽水井、2 个观测孔(图 3)。

图 3 中 1 号抽水井布设在地裂缝上,2 号抽水井布设在地裂缝下盘,3 号抽水井布设在上盘,距 1 号抽水井均为 6 m。3 个抽水井连线方向垂直于地裂缝走向。6 个观测孔在垂直地裂缝走向和沿地裂缝走向 2 个方向布设,并布设在抽水井四周。在垂

直地裂缝走向上,地裂缝上盘 6 号观测孔距 1 号抽水井 24 m,下盘 5 号观测孔距 1 号抽水井 12 m;沿地裂缝走向,1 号观测孔和 2 号观测孔距 1 号抽水井均为 6 m,3 号观测孔距 1 号抽水井 12 m,4 号观测孔距 1 号抽水井 24 m。

根据“孔深越过拟建线路底板深度不小于 5 m、尽量是完整井、最大落程满足基底下 1.0~1.5 m 降深要求”的原则,抽水井和观测孔深度均定为 30 m。抽水井井径为 600 mm,成井后下入外径 480 mm 的混凝土滤水管。井壁与管壁的环状间隙投入优质砾石,投砾石时实际砾面测量和计量同时进行,投砾石至井口以下 3 m,其上至井口段的环状间隙填充黏土以封堵止水。观测孔孔径为 150 mm,下入穿孔的外径为 100 mm 的 PVC 管。

3 跨地裂缝的抽水试验方案

抽水试验设计为 3 个落程,大落程为抽水试验的最大降深(约 18 m),中落程和小落程分别为最大降深的 2/3 和 1/3^[6]。

试验前首先测定所有井孔静止水位,稳定时间不小于 8 h。从小落程到大落程逐次进行抽水试验,做下一落程试验前须等静水位恢复到试验前静止水位。试验时对抽水井、观测孔水位同步进行观测,试验开始和结束均按照在第 1~4、6、8、10、15、20、25、30 min 观测水位和流量的要求进行,每隔 1 h 测定 1 次水温及静止水位,3 次所测水位相同或 4 h 内水位相差不超过 2 cm,即为静止水位^[6]。抽水试验稳定时间的长短,直接关系到抽水试验质量和资料的可用性。根据现场实际情况,大、中、小落程抽水试验稳定时间分别定为 24、16、8 h。

对抽水试验的稳定标准有以下要求^[7]:

- (1)抽水过程中水位和出水量历时曲线不能有逐渐增大和减小的趋势。
- (2)在稳定时间段内,主孔水位波动值不超过水位降低值的 1%;当降深小于 10 m 时,水位波动值不应超过 3~5 cm,观测孔水位波动值不超过 2~3 cm。
- (3)出水量波动值不超过正常流量的 5%,当出水量很小时,可适当放宽。
- (4)当主孔和观测孔水位与区域地下水位变化趋势及幅度基本一致时,可以视为稳定。
- (5)多孔抽水时,以最远观测孔的水位达到稳定为标准。

最后进行恢复水位观测,观测时间间距为 1、3、5、10、15、30 min,直至完全恢复。观测精度的要求

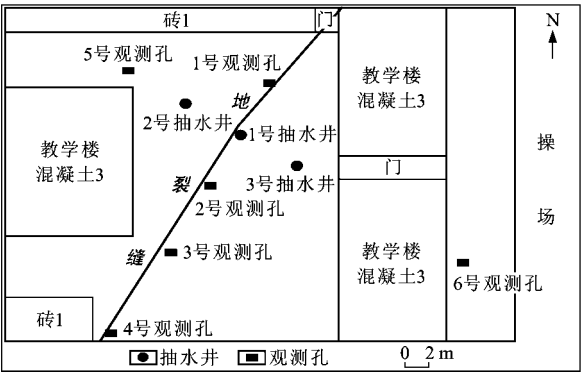


图 3 试验场地观测孔和抽水井平面分布

Fig. 3 Position of Observation and Pumping Wells in Test Site

与静止水位的观测相同^[1]。抽水采用扬程 28 m、水量 25 t/h 的潜水泵,流量计采用三角堰,水位观测采用万用表型水位计。

4 抽水试验资料整理

抽水试验有稳定流和非稳定流两种方法,即抽水时,动水位和相应的出水量要求达到稳定并延续一段时间才可结束的抽水试验,即稳定流抽水试验。本次试验所选地点及抽水孔远离补给或隔水边界,符合稳定流抽水试验的使用条件。本次抽水试验的渗透系数计算主要应用以下公式:

(1)带 1 个观测孔的稳定流潜水完整井公式^[8]

$$K=\frac{0.366Q}{m(S_w-S_1)}\lg\frac{r_1}{r_w}$$
$$m(S_w-S_1)=\frac{1}{2}(S_w-S_1)(2H-S_w-S_1)$$

(2)带 2 个观测孔的稳定流潜水完整井公式^[8]

$$K=\frac{0.366Q}{m(S_1-S_2)}\lg\frac{r_2}{r_1}$$
$$m(S_1-S_2)=\frac{1}{2}(S_1-S_2)(2H-S_1-S_2)$$

(3)潜水完整井水位恢复速度计算式^[9]

$$K=\frac{3.5r_w^2}{4t(H+2r_w)}\ln\frac{S_a}{S_b}$$

式中: K 为含水层的渗透系数(m/h); m 为承压含水层厚度(m); Q 为抽水井的出水量(m^3/h); H 为抽水前潜土层厚度(m); r_w 、 r_1 、 r_2 分别为抽水井半径,1、2 号观测孔至抽水井中心的距离(m); S_w 、 S_1 、 S_2 分别为抽水井、1、2 号观测孔内的水位下降值(m); t 为计算水位恢复时间间隔(h); S_a 、 S_b 分别为水位恢复前后井中剩余水位降深(m)。

根据试验安排,场地内共布置 3 个抽水井,6 个观测孔,这里着重介绍地裂缝上 1 号抽水井 3 个落程的抽水试验。依据试验结果绘制抽水井出水量与时间以及降深与时间的关系曲线(图 4~15),然后选用计算公式计算渗透系数,抽水试验资料及计算结果见表 2~4^[10-11]。另外,由于 6 号观测孔的水位

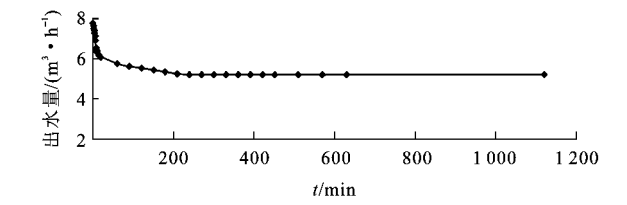


图 4 1 号抽水井小落程出水量与时间关系

Fig. 4 Relationship Between Water Yield and Time for No. 1 Pumping Well Under the Small Height of Drop

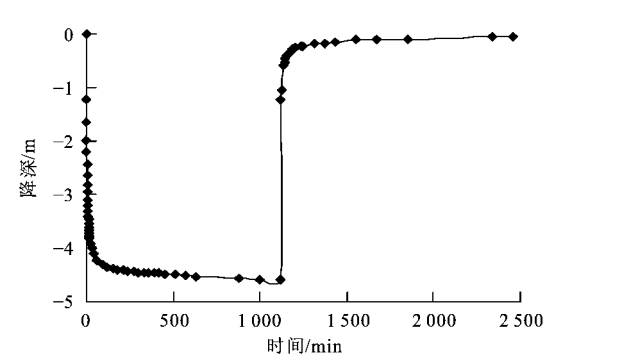


图 5 1 号抽水井小落程水位降深与时间关系

Fig. 5 Relationship Between Drop-down and Time for No. 1 Pumping Well Under the Small Height of Drop

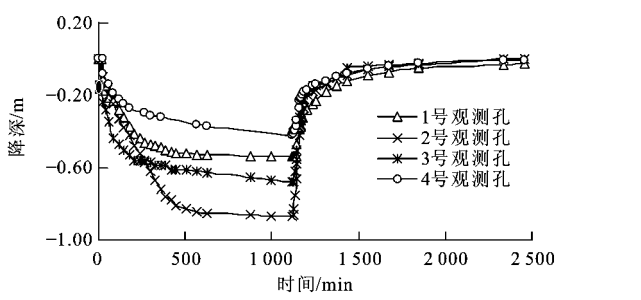


图 6 沿地裂缝小落程水位降深与时间关系

Fig. 6 Relationship Between Drop-down and Time for Pumping Wells Parallel to the Ground Fracture Under the Small Height of Drop

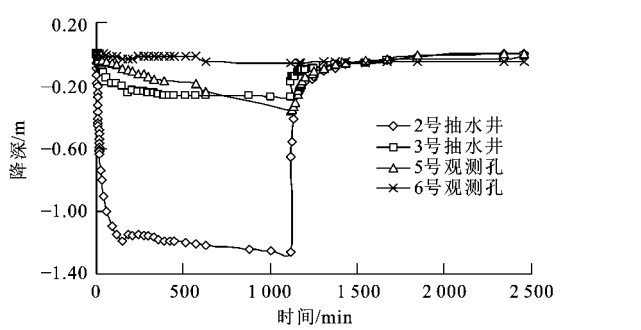


图 7 垂直地裂缝小落程水位降深与时间关系

Fig. 7 Relationship Between Drop-down and Time for Pumping Wells Vertical to the Ground Fracture Under the Small Height of Drop

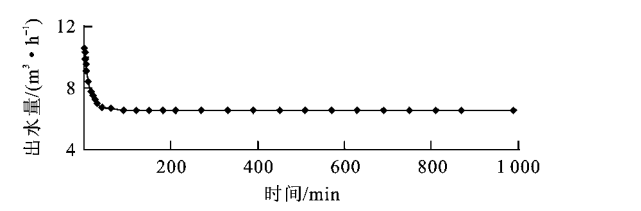


图 8 1 号抽水井中落程出水量与时间关系

Fig. 8 Relationship Between Water Yield and Time for No. 1 Pumping Well Under the Medium Height of Drop

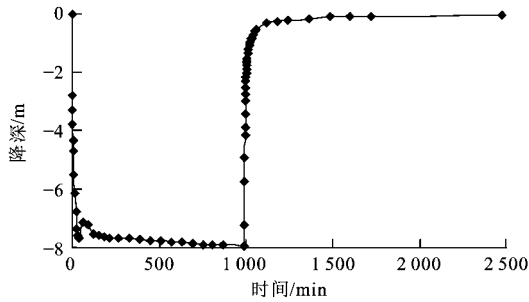


图 9 1号抽水井中落程水位降深与时间关系
Fig. 9 Relationship Between Drop-down and Time for No. 1 Pumping Well Under the Medium Height of Drop

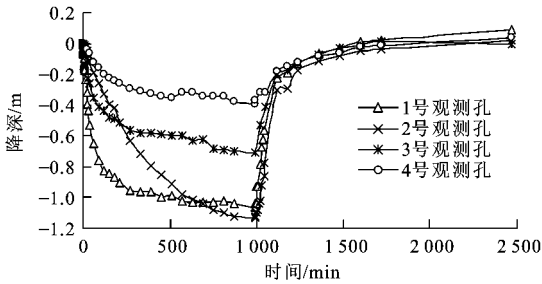


图 10 沿地裂缝中落程水位降深与时间关系
Fig. 10 Relationship Between Drop-down and Time for Pumping Wells Parallel to the Ground Fracture Under the Medium Height of Drop

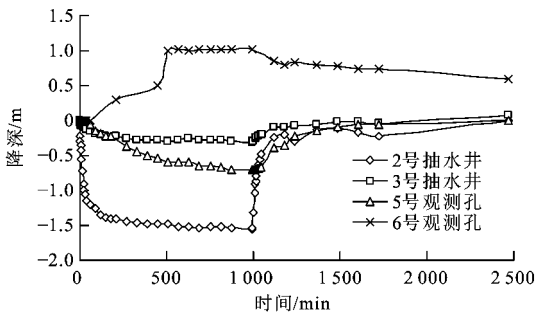


图 11 垂直地裂缝中落程水位降深与时间关系
Fig. 11 Relationship Between Drop-down and Time for Pumping Wells Vertical to the Ground Fracture Under the Medium Height of Drop

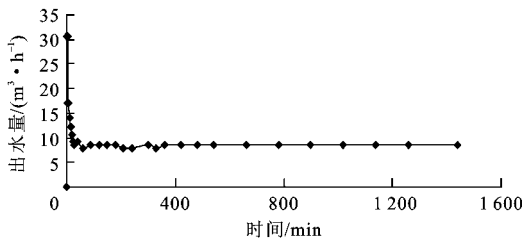


图 12 1号抽水井大落程出水量与时间关系
Fig. 12 Relationship Between Water Yield and Time for No. 1 Pumping Well Under the Large Height of Drop

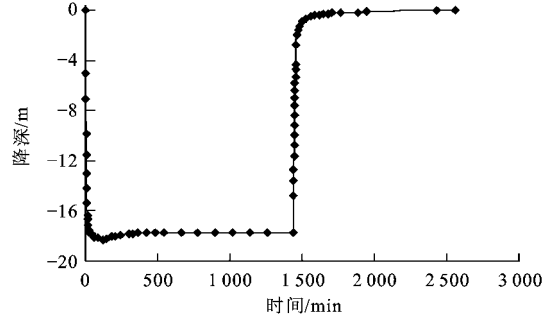


图 13 1号抽水井大落程水位降深与时间关系
Fig. 13 Relationship Between Drop-down and Time for No. 1 Pumping Well Under the Large Height of Drop

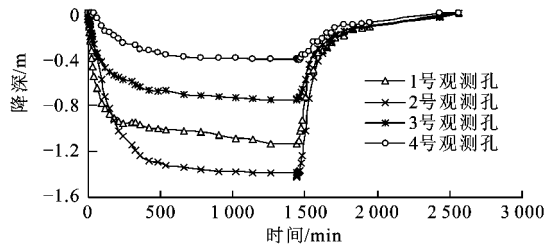


图 14 沿地裂缝大落程水位降深与时间关系
Fig. 14 Relationship Between Drop-down and Time for Pumping Wells Parallel to the Ground Fracture Under the Large Height of Drop

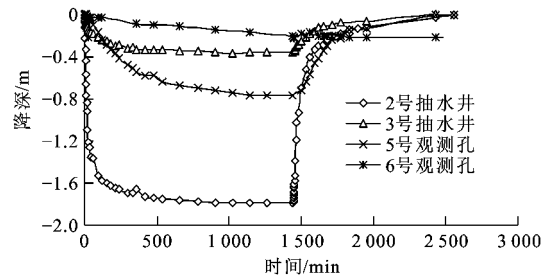


图 15 垂直地裂缝大落程水位降深与时间关系
Fig. 15 Relationship Between Drop-down and Time for Pumping Wells Vertical to the Ground Fracture Under the Large Height of Drop

变化受院内排水系统的影响较大, 故未用其数据进行渗透系数的计算。

5 试验结果分析

5.1 渗透系数试验结果

(1)由表 2~4 中试验结果可知, 1 号抽水井抽水, 利用带 1 个观测孔的稳定流潜水完整井公式计算; 2 号抽水井作为观测孔时, 小、中、大落程下渗透系数分别为 1.07、0.84、0.67 m/d; 3 号抽水井作为观测孔时, 小、中、大落程下渗透系数分别为 0.79、0.64、0.52 m/d; 5 号观测孔作为观测孔时, 小、中、

表 2 1 号抽水井小落程抽水试验结果

Tab. 2 Test Result of No. 1 Pumping Well Under the Small Height of Drop									
参数	1 号抽水井	沿地裂缝变形带观测孔				垂直地裂缝上盘观测孔及抽水井		垂直地裂缝下盘观测孔及抽水井	
		1 号观测孔	2 号观测孔	3 号观测孔	4 号观测孔	6 号观测孔	3 号抽水井	5 号观测孔	2 号抽水井
距 1 号抽水井距离/ m	0. 00	6. 00	6. 00	12. 00	24. 00	24. 00	6. 00	12. 00	6. 00
静水位/ m	9. 62	9. 55	9. 61	9. 49	9. 61	9. 20	9. 48	9. 61	9. 74
动水位/ m	14. 21	10. 09	10. 48	10. 17	10. 03	9. 26	9. 76	9. 97	11. 00
水位降深/ m	4. 59	0. 54	0. 87	0. 68	0. 42	0. 06	0. 28	0. 36	1. 26
出水量/(m ³ · d ⁻¹)	125. 34								
$K_1/(m \cdot d^{-1})$		0. 78	0. 82	1. 11	1. 16		0. 79	1. 00	1. 07
$K_2/(m \cdot d^{-1})$				1. 91				0. 81	
$K_3/(m \cdot d^{-1})$	3. 16								

注: K_1 为利用带 1 个观测孔的稳定流潜水完整井公式计算的渗透系数; K_2 为利用带 2 个观测孔的稳定流潜水完整井公式计算的渗透系数; K_3 为利用潜水完整井水位恢复过程计算公式得到的渗透系数

表 3 1 号抽水井中落程抽水试验结果

Tab. 3 Test Result of No. 1 Pumping Well Under the Medium Height of Drop									
参数	1 号抽水井	沿地裂缝变形带观测孔				垂直地裂缝上盘观测孔及抽水井		垂直地裂缝下盘观测孔及抽水井	
		1 号观测孔	2 号观测孔	3 号观测孔	4 号观测孔	6 号观测孔	3 号抽水井	5 号观测孔	2 号抽水井
距 1 号抽水井距离/ m	0. 00	6. 00	6. 00	14. 00	24. 00	24. 00	6. 00	12. 00	6. 00
静水位/ m	9. 66	9. 61	9. 62	9. 56	9. 66	9. 25	9. 50	9. 57	9. 74
动水位/ m	17. 62	10. 67	10. 82	10. 27	10. 05	8. 23	9. 81	10. 28	11. 29
水位降深/ m	7. 96	1. 06	1. 20	0. 71	0. 39	— 1. 02	0. 31	0. 71	1. 55
出水量/(m ³ · d ⁻¹)	156. 81								
$K_1/(m \cdot d^{-1})$		0. 69	0. 67	0. 82	0. 89		0. 64	0. 80	0. 84
$K_2/(m \cdot d^{-1})$				1. 94				1. 11	
$K_3/(m \cdot d^{-1})$	4. 59								

表 4 1 号抽水井大落程抽水试验结果

Tab. 4 Test Result of No. 1 Pumping Well Under the Large Height of Drop									
参数	1 号抽水井	沿地裂缝变形带观测孔				垂直地裂缝上盘观测孔及抽水井		垂直地裂缝下盘观测孔及抽水井	
		1 号观测孔	2 号观测孔	3 号观测孔	4 号观测孔	6 号观测孔	3 号抽水井	5 号观测孔	2 号抽水井
距 1 号抽水井距离/ m	0. 00	6. 00	6. 00	14. 00	24. 00	24. 00	6. 00	12. 00	6. 00
静水位/ m	9. 75	9. 70	9. 72	9. 65	9. 80	8. 79	9. 65	9. 71	9. 87
动水位/ m	27. 46	10. 83	11. 11	10. 40	10. 20	9. 01	10. 00	10. 47	11. 66
水位降深/ m	17. 71	1. 13	1. 39	0. 75	0. 40	0. 22	0. 35	0. 76	1. 79
出水量/(m ³ · d ⁻¹)	202. 25								
$K_1/(m \cdot d^{-1})$		0. 52	0. 54	0. 65	0. 71		0. 52	0. 61	0. 67
$K_2/(m \cdot d^{-1})$				2. 30			1. 17		
$K_3/(m \cdot d^{-1})$					3. 71				

大落程下渗透系数分别为 1. 00、0. 80、0. 61 m/d; 3 号观测孔作为观测孔时, 小、中、大落程下渗透系数分别为 1. 11、0. 82、0. 65 m/d; 4 号观测孔作为观测孔时, 小、中、大落程下渗透系数分别为 1. 16、0. 89、0. 71 m/d。以上结果对比表明地裂缝土体的渗透系数较下盘土体稍大, 同时下盘较上盘稍大(一般情况下裂缝上盘岩土较下盘破碎, 其渗透系数应大于下盘), 沿地裂缝方向土体较垂直地裂缝方向土体的

渗透系数稍大。
将沿地裂缝方向的 3、4 号观测井作为观测孔时, 1 号抽水井抽水, 利用 2 个观测孔的稳定流潜水完整井公式计算小、中、大落程下渗透系数分别为 1. 91、1. 94、2. 30 m/d; 将垂直地裂缝方向上 2 号抽水井和 5 号观测孔作为观测孔时, 小、中、大落程下渗透系数分别为 0. 81、1. 11、1. 17 m/d。结果显示, 沿地裂缝方向土体较垂直地裂缝方向的土体渗透系

数大。

利用潜水完整井水位恢复速度计算公式算得一系列与水位恢复时间有关的渗透系数值。通过作渗透系数与水位恢复时间函数关系的曲线确定小、中、大落差下渗透系数分别为 3.16、4.59、3.71 m/d, 明显大于上述两种公式算得的渗透系数。

(2)按上述 3 种计算方法, 对 2、3 号抽水井单井抽水试验资料进行了类似整理及分析, 结果显示出与上述相同的规律。

(3)3 种计算公式结果对比分析表明, 在同一落程中用潜水完整井水位恢复速度计算公式得到的渗透系数最大, 用带 2 个观测孔的稳定流潜水完整井公式计算得到的渗透系数次之, 用带 1 个观测孔的稳定流潜水完整井公式计算得到的渗透系数最小。

5.2 渗透系数差异性分析

井损是抽水试验中一个重要的影响因素, 井损也是上述试验计算结果差异的主要原因。当水井抽水时, 井损使井中水位远低于井壁水位; 水位恢复时, 又使井中恢复水位远大于井壁恢复水位。因此, 用潜水完整井水位恢复速度计算公式得到的渗透系数偏大, 用其余 2 个公式计算得到的渗透系数偏小。此外, 井损对用带 2 个观测孔的稳定流潜水完整井公式计算结果比用带 1 个观测孔的计算结果影响小。

5.3 建筑物对试验结果的影响

试验场地的建筑物为 20 世纪 50 年代所建的教学楼。其中, 位于地裂缝上盘的 3 层教学楼破坏较为严重, 3 号抽水井和 6 号观测孔分别位于该教学楼的两侧。该建筑物的基础埋深为 2 m, 基底压力标准组合值为 100 kPa。利用文献[12]及 MADIS 有限元软件^①模拟场地内建筑物对地基土施加应力的影响, 判断场地建筑物对场地土体的影响。

计算模型为弹塑性, 同一层内的土视为均质各项同性。选用莫尔-库仑本构模型进行有限元模拟分析。为了简化模型, 将土层中厚度较小的砂层忽略, 并依据 3 号抽水井、6 号观测孔及 1 号抽水井所揭露的地层厚度确定计算中采用的土层厚度。计算中所采用的模型材料参数见表 5, 共分出 3 643 个节点和 1 166 个单元(图 16)。

计算结果(图 17~21)表明, 教学楼对场地土体的影响主要集中在素填土层、黄土层和古土壤层, 粉质黏土层以下影响逐渐减弱, 影响深度约 18 m。由于教学楼附加应力作用使地基土固结压密, 导致地裂缝上盘土体的渗透系数较下盘小。

表 5 不同地层的模型参数

Tab. 5 Parameters of Model for Different Strata					
地层 土质	弹性模量/ MPa	泊松比	内聚力/ kPa	内摩擦角/ (°)	重度/ (kN·m ⁻³)
素填土	3.63	0.38	12	15	17.1
黄土	7.00	0.30	30	14	18.0
古土壤	5.77	0.30	35	15	19.8
粉质黏土	6.28	0.30	45	18	19.8

注: 内聚力与摩擦角由试验结果和当地经验综合确定

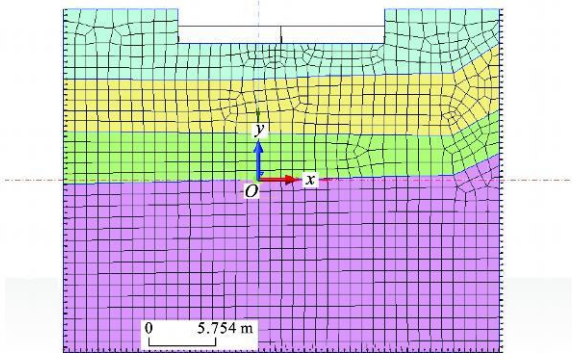


图 16 地层几何模型

Fig. 16 Geometric Model of Strata

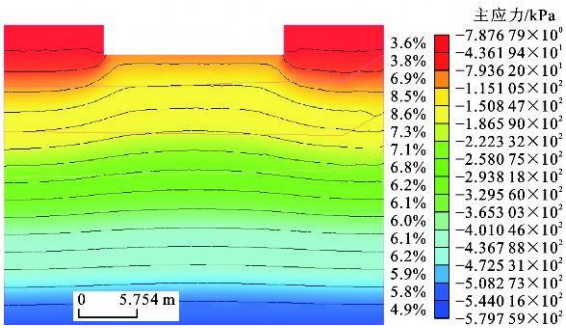


图 17 主轴方向的最小主应力

Fig. 17 Minimum Principal Stress in Principal Axis Direction

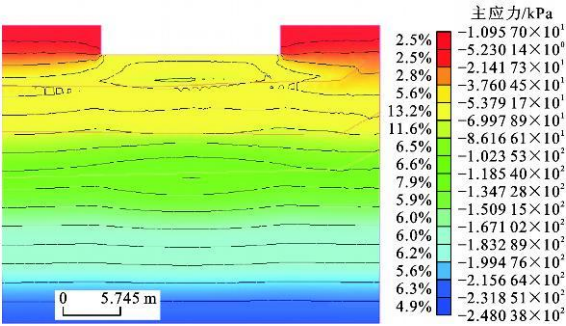


图 18 主轴方向的最大主应力

Fig. 18 Maximum Principal Stress in Principal Axis Direction

①北京迈达斯技术有限公司, MIDAS/Gen 用户手册及相关培训资料, 北京: 北京迈达斯技术有限公司, 2009.

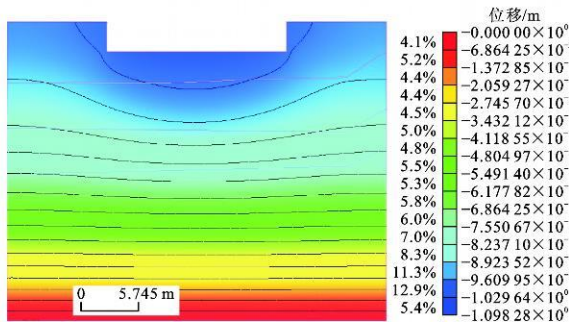


图 19 竖向位移

Fig. 19 Vertical Displacement

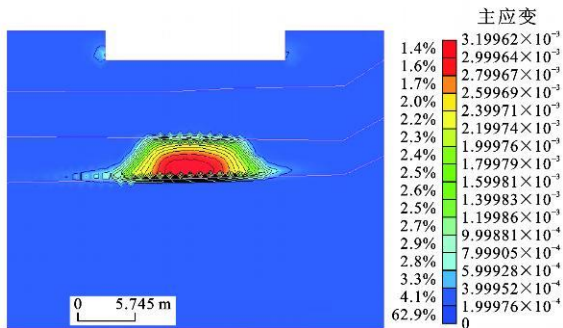


图 20 主轴方向最大塑性主应变

Fig. 20 Maximum Plastic Principal Strain in Principal Axis Direction

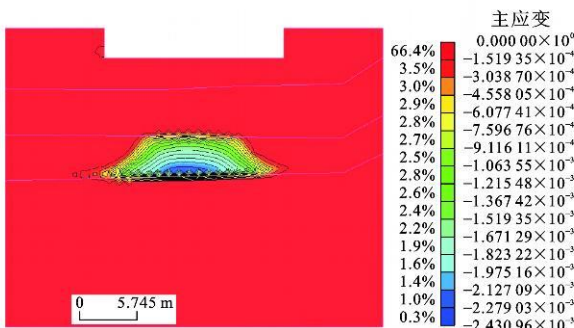


图 21 主轴方向最小塑性主应变

Fig. 21 Minimum Plastic Principal Strain in Principal Axis Direction

6 结语

(1) 基于 1 号抽水井单井抽水试验资料, 利用带 1 个观测孔的稳定流潜水完整井公式计算, 认为地裂缝土体的渗透系数较下盘土体稍大, 同时下盘土体较上盘稍大, 沿地裂缝方向土体的渗透系数比垂直地裂缝方向的土体稍大; 利用带 2 个观测孔的稳

定流潜水完整井公式计算, 认为沿地裂缝方向土体的渗透系数比垂直地裂缝方向的土体稍大; 利用潜水完整井水位恢复速度计算公式得到的渗透系数明显大于上述两种公式的结果。

(2) 在同一落程中利用潜水完整井水位恢复速度计算公式得到的渗透系数最大, 利用带 2 个观测孔的稳定流潜水完整井公式计算得到得渗透系数次之, 利用带 1 个观测孔的稳定流潜水完整井公式计算得到的渗透系数最小, 并损是渗透系数差异的主要原因。

(3) 基于 MADIS 有限元软件模拟认为, 建筑物对场地土体的影响主要集中在素填土层、黄土层和古土壤层, 粉质黏土层以下影响则逐渐减弱, 影响深度在 18 m 左右; 由于建筑物长期对地裂缝上盘土体施加荷载, 附加应力作用使地基土固结压密, 导致上盘土体的渗透系数较下盘小。

参考文献:

- [1] 李新生, 王 静, 王万平, 等. 西安地铁二号线沿线地裂缝成因分析[J]. 水文地质工程地质, 2008, 35(5): 33-36.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 门玉明, 石玉玲. 西安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.
- [5] 胡志平, 赵振荣, 朱启东, 等. 西安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] DLJ 203—81, 水利水电工程钻孔抽水试验规程[S].
- [7] 河北省地质局水文地质四大队. 水文地质手册[M]. 北京: 地质出版社, 1978.
- [8] 陕西省综合勘察院《供水水文地质勘察》编写组. 供水水文地质勘察[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1980.
- [9] GB 50307—1999, 地下铁道、轻轨交通岩土工程勘察规范[S].
- [10] 长安大学工程设计研究院. 西安地铁一号线一期工程(后围寨—纺织城)详细勘察阶段跨地裂缝水文地质试验方案[R]. 西安: 长安大学, 2008.
- [11] 长安大学工程设计研究院. 西安地铁一号线一期工程(后围寨—纺织城)详细勘察阶段劳动路 f₃ 地裂缝变形带岩土工程勘察报告[R]. 西安: 长安大学, 2009.
- [12] 向坚持, 刘相滨, 谭义红, 等. MIDAS 技术研究及其应用[J]. 计算机工程与应用, 2002, 38(15): 168-170.