

DOI:10.19751/j.cnki.61-1149/p.2019.02.007

西安地区含水系统释水压密效应及微结构变化

董英^{1,2}, 张茂省^{2,*}, 刘洁², 张新社², 冯立²

(1. 西北大学, 陕西 西安 710069; 2. 中国地质调查局西安地质调查中心/西北地质科技创新中心, 自然资源部黄土地质灾害重点实验室, 陕西 西安 710054)

摘要:西安地区诱发地面沉降地裂缝灾害最主要的因素是过量开采地下水。承压水地下水头下降引起的含水层骨架有效应力增加, 粘性土释水压密一方面造成了地面沉降地裂缝灾害; 另一方面引起含水层孔隙率、储水系数、渗透系数等水文地质参数的变化。笔者选取西安地裂缝最活跃的 F4 号地裂缝两侧钻孔岩心进行了压密 CT 扫描, 获取了 300 m 以浅地层粘性土在不同压力(水头下降幅度)条件下的空隙大小的微结构变化, 并建立了渗透系数与微结构变化耦合关系。结果显示: 在地下水开采引起的土层应力增加过程中, 大孔隙度、长孔隙度会随着压力增加而明显降低, 地裂缝上盘和下盘含水层大孔隙分别降低了 39.05% 和 9.22%, 不利于水分在孔隙间运移, 中小孔隙度基本保持不变或略有上升; 渗透系数随压力的增加呈现出减小趋势, 最大下降幅度为 71.08%, 且随深度增加含水层渗透系数减小幅度逐渐降低。研究结果对于科学评价和预测西安地区地面沉降地裂缝地质灾害具有指导意义。

关键词:粘性土; 释水压密; CT 扫描; 地面沉降

中图分类号: P641

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2019)02-0063-09

Water Release Compaction Effect and Microstructure Change of Aquifer System in Xi'an

DONG Ying^{1,2}, ZHANG Maosheng^{2,*}, LIU Jie², ZHANG Xinshe², FENG Li²

(1. Northwest University, Xi'an 710069, Shaanxi, China; 2. Key Laboratory for Geo-hazards in Loess Area, MNR, Xi'an Center of China Geological Survey/ Northwest China Center for Geoscience Innovation, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract: In Xi'an city, the over-exploitation of groundwater is the most important factor for inducing land subsidence and ground fissures. The confined groundwater head increases the effective stress of the aquifer layer. The release compaction of cohesive soil water causes the land subsidence and ground fissures; it also results in the change of hydrogeological parameters, such as aquifer porosity, water storage coefficient and permeability coefficient. The borehole cores on both sides of the F4 ground fissure, served as the most active ground fissure in Xi'an city, are selected for the compacted CT scanning in this paper. Under the different pressures (head draw-

收稿日期: 2019-04-04; **修回日期:** 2019-05-02

基金项目: 国家重点研发项目(2018YFC1504700), 国家自然科学基金重点项目(41641011, 41530640), 中国地质调查局项目(DDT20190463, DD20160261, DD20189270)联合资助

作者简介: 董英(1981-), 男, 四川资阳人, 高级工程师, 主要从事水工环地质调查与研究。E-mail: dongy329@163.com

*** 通讯作者:** 张茂省(1962-), 男, 陕西咸阳人, 研究员, 博导, 主要从事水工环地质调查与研究。E-mail: xazms@126.com

down amplitude), the microstructure changes of the pores within 300m shallow clay have been obtained. And then, the coupling relationship between the permeability coefficient and microstructure change has been established. The results show that the large porosity and long porosity can decrease with the increasing pressure during the increase of soil stress caused by the groundwater exploitation. This is not conducive to the migration of water between pores. The macropores of the upper and lower aquifers of the ground fissure will decrease by 39.05% and 9.22%, respectively. The small and medium porosity is almost unchanged or only slightly increased. The permeability coefficient shows a decreasing trend with the increase of pressure. The aquifer permeability coefficient decreases with depth, the decline magnitude is gradually decreasing, and its maximum decrease is 71.08%. Thus, the research results have a guiding significance for scientific evaluation and prediction of land subsidence and ground fissure in Xi'an city.

Keywords: cohesive soil; water release compaction; CT; land subsidence

西安地区地面沉降地裂缝十分发育,诱发因素主要有地质构造、黄土湿陷、开采地下水、城市建设的荷载等。其中,过量开采地下水是最主要的诱发因素。传统认为西安地区地裂缝地面沉降由长安临潼断裂及Y字型雁列状次生断裂控制,地下水开采引起差异沉降形成地裂缝(彭建兵等,2007),有学者研究了西安地区地裂缝两侧粘性土含量差异,认为粘性土层厚度差异引起不均匀沉降造成地裂缝,并利用研究成果评价了西咸新区地面沉降(张茂省等,2013)。

可见不管是构造控制,还是地下水开采,西安地面沉降的主要原因是含水层的释水压密,因此获取含水层释水过程中空隙微结构变化尤为重要。以CT扫描技术为代表的新技术的面世使得孔隙研究变得直接化、量化,具有以下优势:一是精确度提高,识别精度可达微米级别的孔隙(CARLSON. et al., 2003);二是三维可视化,可以将扫描图片进行三维重构,提取孔隙特征参数(MOONEY, 2002);三是无损化,可以保存土壤中内部结构(Al-Raoush et al., 2005)。CT扫描技术在土壤分类、孔隙分析等方面得到了广泛应用。利用CT扫描技术分析大孔隙的分布状况及其在垂向范围内的变化,并在太湖地区水稻土进行应用(吴华山等,2007);也可以对土壤团聚体孔隙结构特征进行分析(赵冬等,2016);还可以利用CT扫描技术获取污水灌溉前后土壤孔隙形态特征(郭晓明等,2015),利用图形处理软件对CT扫描的图形进行孔隙和基质分割(王宇等,2015);运用CT扫描技术对煤储层中的孔隙分布进行三维重构(姚艳斌等,2010)。

综上所述,西安地区地面沉降地裂缝发育与地下水开采引起的含水层形变息息相关,但开采地下水引起的含水层微观结构及含水层水文地质参数变化情况并不清晰。依托关中盆地城市群综合地质调查、西安多要素城市地质调查等项目,笔者试图从含水层释水压密效应和CT扫描的微结构角度出发,回答含水层压缩变形主要发生的深度,地裂缝两侧土层释水压密差异,粘性土的释水压密引起的空隙变化和空隙变化引起含水层渗透系数变化情况。

1 试验设计

1.1 试验装置与步骤

首先还原样品在地层深度的地应力状况下,逐级增加压力,模拟含水层水头下降造成的有效应力增加,压缩试验结束后,立即进行CT扫描。为剔除金属材质对CT扫描的影响,专门设计了压缩装置和配套仪器(图1),所有试验在中国地质大学(北京)岩土工程实验室和微焦点CT实验室进行。具体要求:①利用无气水,先期连续滴水2小时之后,放于真空饱和缸中浸泡24h,确保土样完全饱和,并对试样的饱和度进行了验证,结果表明,饱和度均达到了98%以上,符合试验样品的要求。②有侧限条件,不考虑水平变形,垂直加压,对角均匀手动加压(60°),压力测量配套压力盖重量传感器及数据变送仪,根据设计压力等级,连续加压。③顶盖顶部安装千分表,实时记录该等级压力下的位移量,数据记录采用10s、20s、30s、60s、120s、300s、600s、1800s、3600s的间隔记录变形数据。④在精确控

制施加压力后,连续 2 个小时的变形量小于 1 mm,即认为稳定。⑤每一级加压稳定之后,即可进行三维 CT 扫描试验。⑥整个模拟过程中土样不拆卸,尽

量减小由于拆卸土样带来的扰动,连同配套仪器一起放入 XT320 的铅房里面进行 CT 扫描,实现土样的不回弹扫描,符合土样的天然状态下的应力状态。



1. 底座;2. 透明外壁;3. 样品;4. 护环;5. 透水石;6. 压力盖;7. 顶盖;8. 加压盖;9. 加压杆
说明:除加压杆使用 304 不锈钢制作外,其余部件均为亚克力材料制作,原因在于考虑到土体密度和材料密度的差异以及 X 射线的穿透能力。

图 1 压力测量及变送器配套仪器图

Fig. 1 Pressure measurement and transmitter equipment

1.2 测试样品

本次选取了西安鱼化寨地区 F4 号地裂缝两侧钻孔岩心进行释水压缩和 CT 扫描试验。考虑到抽取承压水引起的地面沉降主要压密地层为粉土层、粉质粘土层和粘土层,根据水文地质条件,分别在潜水、第一层承压水、第二承压水、第三承压水 4 个含水层中,选取了 21 个代表性地层取样并进行三维 CT 扫描来观察随着抽取地下水所引起的土体孔隙变化过程,其中地裂缝上盘钻孔(YHG-1)12 个样品,地裂缝下盘钻孔(YHG-2)9 个样品,深度 5~275 m。详见表 1、2。

1.3 试验数据

根据试验步骤,本次实验设计时根据土体埋深情况逐级增加压力直至最大设计压力。由于该地区地下水开采主要层位为承压水,因此潜水含水层仅进行了初始压力试验,承压含水层 2~4 级增压过程,每级增加约 200 kpa(20 m 水头降幅),加上初始情况共进行 5 次 CT 扫描,试验加压扫描数据汇总表见表 3、表 4。

表 1 YHG-1 钻孔 CT 实验地层列表

Tab. 1 YHG-1 borehole CT experimental strata list				
样品编号	分层深度 (m)	分层厚度 (m)	岩土名称	说明
1-1	23.05	4.35	粉质黏土	潜水位可压缩代表性土层
1-2	50.41	6.27	粉质黏土	
1-3	59.47	6.00	粉质黏土	
1-4	65.98	3.21	粉质黏土	
1-5	73.42	5.92	黏土	
1-6	93.69	8.60	粉质黏土	
1-7	98.2	2.60	黏土	
1-8	119.17	3.82	粉质黏土	第一层承压水可压缩代表性土层
1-9	150.5	3.30	粉土	第二层承压水可压缩代表性土层
1-10	179.49	7.36	粉土	
1-11	229.68	2.73	粉土	
1-12	274.58	3.62	粉土	第三层承压水可压缩代表性土层

表 2 YGH-2 钻孔 CT 实验地层列表				
Tab. 2 YHG-2 borehole CT experimental strata list				
样品编号	分层深度 (m)	分层厚度 (m)	岩土名	说明
2-1	17.32	3.9	黏土	潜水位
2-2	37.45	4.17	粉土	
2-3	68.25	3.24	粉土	
2-4	88.12	4.28	粉质黏土	
2-5	111.12	1.33	粉土	第一层承压水涵盖
2-6	141.02	7.46	粉质黏土	可压缩代表性土层
2-7	170.78	1.35	黏土	第二层承压水涵盖
2-8	211.45	3.7	粉土	可压缩代表性土层
2-9	269.72	3.5	粉质黏土	第三层承压水涵盖 可压缩代表性土层

表 3 YGH-1 钻孔试样加压数据汇总表						
Tab. 3 YGH-1 Summary of Pressure Data for Drilling Samples						
样品编号	取样深度(m)	加 压				CT 次数
		初始压力(kPa)	第一次施加(kPa)	第二次施加(kPa)	终止压力(kPa)	
1-1	23.05	423.01	-	-	423.01	2
1-2	50.41	663.54	-	-	663.54	2
1-3	59.47	1 017.31	-	-	1 091.24	2
1-4	65.98	1 083.71	-	-	1 210.79	3
1-5	73.42	1 159.67	-	-	1 347.25	3
1-6	93.69	1 366.19	-	-	1 719.14	3
1-7	98.2	1 412.22	-	-	1 802.04	3
1-8	119.17	1 626.07	1 792.26	1 955.19	2 186.76	5
1-9	150.5	1 945.01	2 352.34	-	2 759.67	4
1-10	179.49	2 240.33	2 647.66	3 054.99	3 293.69	5
1-11	229.68	2 752.61	3 482.69	-	4 195.52	4
1-12	274.58	2 799.22	3 564.15	4 276.99	5 038.59	5

表 4 YGH-2 钻孔试样加压数据汇总表						
Tab. 4 YGH-2 Summary of Pressure Data for Drilling Samples						
样品编号	取样深度(m)	加 压				CT 次数
		初始压力(kPa)	第一次施加(kPa)	第二次施加(kPa)	终止压力(kPa)	
2-1	17.32	317.72	-	-	317.72	2
2-2	37.45	688.39	-	-	688.39	2
2-3	68.25	1 185.34	-	-	1 252.55	3
2-4	88.12	1 389.00	-	-	1 617.11	3
2-5	111.12	1 623.22	1 832.99	-	2 038.70	4
2-6	141.02	1 928.00	2 145.32	2 362.63	2 588.41	5
2-7	170.78	2 232.18	2 545.82	2 851.32	3 134.42	5
2-8	211.45	2 645.62	3 034.62	3 441.96	3 881.87	5
2-9	269.72	3 240.74	3 767.82	4 378.82	4 950.68	5

2 压密释水孔隙微结构变化特征

2.1 孔隙微结构表征

根据 CT 扫描图像进行统计分析,选取总孔隙数量、大孔隙数量、中孔隙数量、小孔隙数量、总孔隙度、大孔隙度、中孔隙度、小孔隙度、最大孔隙面积、平均孔径、成圆度、规则孔隙数、不规则孔隙数、长孔隙数、规则孔隙度、不规则孔隙度、长孔隙度、各向异性度等 18 项进行孔隙参数定义(表 5)。

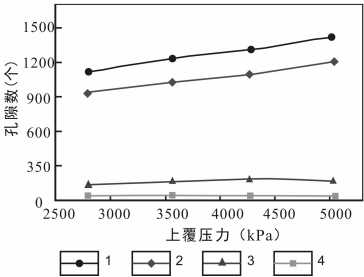
2.2 孔隙度变化

压缩过程对于土样孔隙数变化具有极显著的影响(表 6),其主要的变化趋势为随着应力增加,土样孔隙数也随之得到增加,其增加数量排名为小孔隙

表 5 孔隙参数定义表
Tab. 5 Definition of Pore Parameters

参数名称	参数定义
大孔隙	当量直径大于 1 mm 的孔隙(KIM et al. , 2010; RACHMAN et al. , 2005)
中孔隙	当量直径 0.2~1 mm 的孔隙
小孔隙	当量直径小于 0.2 mm 的孔隙
规则孔隙	形状因子 1~2 的孔隙
不规则孔隙	形状因子 2~5 的孔隙
长孔隙	形状因子>5 的孔隙
成圆率	$\frac{4\pi \times S}{A^2}$ (S 为孔隙面积, A 为孔隙周长)
平均孔径	孔隙直径的平均值(mm)
各项异性度	孔隙在三维空间分布

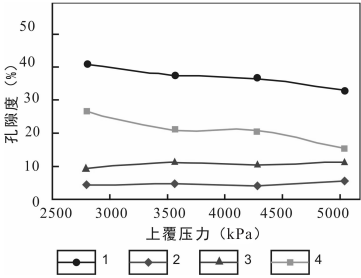
>中孔隙,而大孔隙数目则出现减少趋势。以 1-12 号土样为例,初始状态下总孔隙数为 1 112,随着 3 次压缩过程的进行,总孔隙数变为 1 232、1 309、1 419 个,分别是原始状态的 1.11、1.18、1.28 倍;大孔隙数由最初的 40 个分别变为 43、36、32 个,减小幅度为-7.5%、10%、20%;中孔隙数则由 142 个增加到 170 个,增幅为 19.7%;小孔隙数增长最为显著,由 930 个变为 1 212 个,增幅达到 30.32%(图 2)。



1. 总孔隙数;2. 大孔隙数;3. 中孔隙数;4. 小孔隙数
图 2 1-12 号土样孔隙数随压力增大变化图
Fig. 2 1-12 Number of soil samples pore varies with pressure increase

对于土样孔隙度来说,应力增加对其有着极显著的影响(表 6),主要的变化趋势为随着压力的增加,土样总孔隙度及大孔隙度随之降低,而中孔隙度及小孔隙度则出现小幅降低甚至增加趋势。仍以 1-12 号土样为例,初始状态下总孔隙度为 41.14%,随着 3 次压缩过程的进行,总孔隙度变为 38.02%、36.98%、33.40%,分别是原始状态的 0.92、0.90、0.82 倍;大孔隙度由最初的 26.64%分别变为 21.61%、21.31%、15.71%,减小幅度为

18.89%、20.00%、41.03%;中孔隙度则由 9.89%增加到 11.78%,增幅为 19.11%;小孔隙度也呈现增长态势,由 4.61%变为 5.91%,增幅为 28.19%(图 3),可以看出总孔隙度的降低主要是由于大孔隙度的降低所致,而压缩过程所带来的主要结果为大孔隙面积的明显减小。



1. 总孔隙数;2. 大孔隙数;3. 中孔隙数;4. 小孔隙数
图 3 1-12 号土样孔隙度随压力增大变化图
Fig. 3 1-12 porosity of soil sample with pressure increase

2.3 孔隙面积变化

从各土样在不同压力作用下 CT 扫描后阈值分割所形成的二值图中(图 4)也可看出土样孔隙度的变化情况。随着压力的增加,图中黑色部分所示的孔隙部分面积逐渐减小,尤其是大孔隙部分减小量更为明显。而不同的是对于 2-7 和 2-9 号土样而言,孔隙数量随着压力增大而减小,其中主要为大孔隙部分;而 1-12 号土样则体现孔隙数量随压力增加而增大但孔隙面积随之减小的现象。

通过研究孔隙平均面积变化率随深度变化关系(图 5)可以看出,随着深度的增加,孔隙平均面积及大孔隙平均面积的减小幅度均呈现增加态势,以 YGH-1 钻孔为例,在深度为 73.4 m 的土样中其孔隙面积平均减小 13.51%,而在深度为 274.58 m 的土样中该值变为 55.34%,达到前者的 4.10 倍,表明在深度越深的地方,压缩程度越大,使得孔隙面积受到更大程度的减小,相较于 YGH-1 钻孔,YGH-2 钻孔也具有类似性质,但变化幅度较小。

3 压密释水渗透系数变化特征

3.1 基于孔隙度渗透率计算方法

可以通过对 CT 扫描的孔隙进行分形计算获取土体渗透率。研究表明(YU et al. , 2002; YU et al. ,

表 6 不同压力下各试样孔隙度平均值统计表
Tab. 6 Statistical table of average porosity of samples under different pressures

土样编号	上覆压力 (kPa)	总孔隙		大孔隙		中孔隙		小孔隙	
		孔隙度	数量	孔隙率	数量	孔隙率	数量	孔隙率	数量
1-8	1 626.07	40.56% ^a	1 123 ^c	28.79% ^a	31 ^a	7.35% ^a	101 ^b	4.41% ^{bc}	991 ^c
	1 792.26	38.78% ^a	1 067 ^d	26.18% ^a	31 ^a	8.12% ^a	108 ^b	4.48% ^c	928 ^d
	1 955.19	38.36% ^a	1 513 ^a	24.58% ^a	33 ^a	8.21% ^a	123 ^a	5.57% ^a	1 357 ^a
	2 186.76	37.67% ^a	1 365 ^b	23.64% ^a	30 ^a	8.51% ^a	124 ^b	5.51% ^b	1 211 ^b
1-9	1 945.01	45.11% ^b	1153 ^b	34.33% ^b	34 ^b	6.32% ^b	85 ^c	4.46% ^b	1 040 ^a
	2 352.34	43.53% ^c	1 233 ^a	30.73% ^c	33 ^a	7.91% ^a	114 ^a	4.89% ^a	1 086 ^a
	2 759.67	41.86% ^a	1 246 ^c	28.68% ^a	284 ^a	8.22% ^b	116 ^b	4.96% ^c	1 096 ^b
1-10	2 240.33	43.69% ^a	1 380 ^c	31.33% ^a	40 ^c	7.15% ^b	104 ^c	5.21% ^d	1 240 ^c
	2 647.66	42.06% ^b	1 536 ^c	26.80% ^b	39 ^c	8.98% ^a	138 ^b	6.28% ^c	1 359 ^c
	3 054.99	40.08% ^b	1 683 ^b	23.96% ^b	36 ^b	9.27% ^{ab}	149 ^b	6.86% ^b	1 494 ^b
	3 293.69	39.04% ^a	3 488 ^a	17.62% ^b	54 ^a	11.29% ^a	256 ^a	10.13% ^a	3 178 ^a
1-11	2 752.61	41.85% ^a	1 270 ^b	28.95% ^a	35 ^a	7.98% ^c	115 ^c	4.92% ^b	1 124 ^b
	3 482.69	38.95% ^a	1 407 ^a	23.73% ^b	34 ^a	9.38% ^a	142 ^a	5.84% ^a	1 230 ^a
	4 195.52	37.52% ^a	1 540 ^a	21.58% ^{ab}	31 ^a	9.70% ^b	151 ^b	6.23% ^a	1 355 ^a
1-12	2 799.22	41.14% ^c	1 112 ^a	26.64% ^c	40 ^{bc}	9.89% ^a	142 ^a	4.61% ^a	930 ^a
	3 564.15	38.02% ^b	1 232 ^b	21.26% ^b	43 ^{ab}	11.61% ^a	162 ^{ab}	5.15% ^b	1 027 ^b
	4 276.99	36.98% ^{ab}	1 309 ^c	21.31% ^b	36 ^a	10.96% ^a	188 ^b	4.72% ^b	1 101 ^c
	5 038.59	33.40% ^a	1 419 ^c	15.71% ^a	32 ^c	11.78% ^b	170 ^c	5.91% ^b	1 212 ^c
2-5	1 623.22	49.75% ^a	587 ^a	42.62% ^a	25 ^a	4.83% ^a	83 ^b	2.31% ^a	479 ^a
	1 832.99	48.52% ^a	607 ^{ab}	41.19% ^a	26 ^a	4.93% ^a	85 ^a	2.41% ^a	497 ^a
	2 038.7	46.89% ^a	627 ^b	38.77% ^a	29 ^a	5.58% ^a	94 ^a	2.54% ^a	504 ^b
2-6	1 928	39.34% ^a	1 012 ^b	24.88% ^a	35 ^{ab}	10.03% ^a	174 ^b	4.43% ^b	803 ^b
	2 145.32	38.11% ^c	1 105 ^a	23.26% ^b	35 ^b	10.18% ^{ab}	185 ^a	4.68% ^a	885 ^a
	2 362.63	36.89% ^d	1 134 ^a	21.63% ^c	36 ^a	10.41% ^{ab}	188 ^a	4.85% ^a	910 ^a
	2 588.41	36.13% ^b	1 142 ^b	20.36% ^a	34 ^{ab}	10.83% ^b	193 ^b	4.93% ^b	915 ^b
2-7	2 232.18	37.93% ^{ab}	1 067 ^a	27.97% ^{ab}	23 ^a	5.99% ^b	105 ^b	3.98% ^a	939 ^a
	2 545.82	37.22% ^b	1 089 ^a	26.25% ^b	25 ^a	6.74% ^{ab}	117 ^{ab}	4.23% ^a	947 ^a
	2 851.32	36.38% ^a	1 287 ^a	24.37% ^a	27 ^a	7.16% ^{ab}	134 ^{ab}	4.85% ^a	1 126 ^a
	3 134.42	36.20% ^b	940 ^b	24.48% ^b	22 ^a	7.14% ^a	128 ^a	4.58% ^a	790 ^b
2-8	2 645.62	42.71% ^a	1 037 ^c	31.61% ^a	21 ^{ab}	6.77% ^b	130 ^{bc}	4.34% ^c	886 ^c
	3 034.62	42.47% ^a	965 ^a	31.40% ^a	19 ^{ab}	6.87% ^a	127 ^a	4.19% ^a	818 ^a
	3 441.96	41.22% ^a	1 122 ^b	30.05% ^a	21 ^b	6.58% ^{ab}	130 ^{ab}	4.59% ^b	971 ^b
	3 881.87	39.46% ^a	1 178 ^c	27.43% ^a	22 ^a	7.18% ^b	141 ^c	4.85% ^c	1 015 ^c
2-9	3 240.74	24.17% ^{ab}	1 620 ^b	10.95% ^b	20 ^a	7.17% ^a	146 ^b	6.04% ^a	1 454 ^b
	3 767.82	24.47% ^a	1 781 ^a	12.25% ^a	16 ^a	6.07% ^a	138 ^a	6.14% ^a	1 627 ^a
	4 378.82	18.91% ^{ab}	1 988 ^b	5.77% ^a	14 ^a	6.25% ^a	145 ^b	6.89% ^a	1 830 ^b
	4 950.68	18.10% ^b	1 481 ^b	7.04% ^c	12 ^a	5.56% ^a	117 ^b	5.50% ^a	1 352 ^b

注:同一列水位不同字母表示在 p<0.05 水平下存在显著差异。

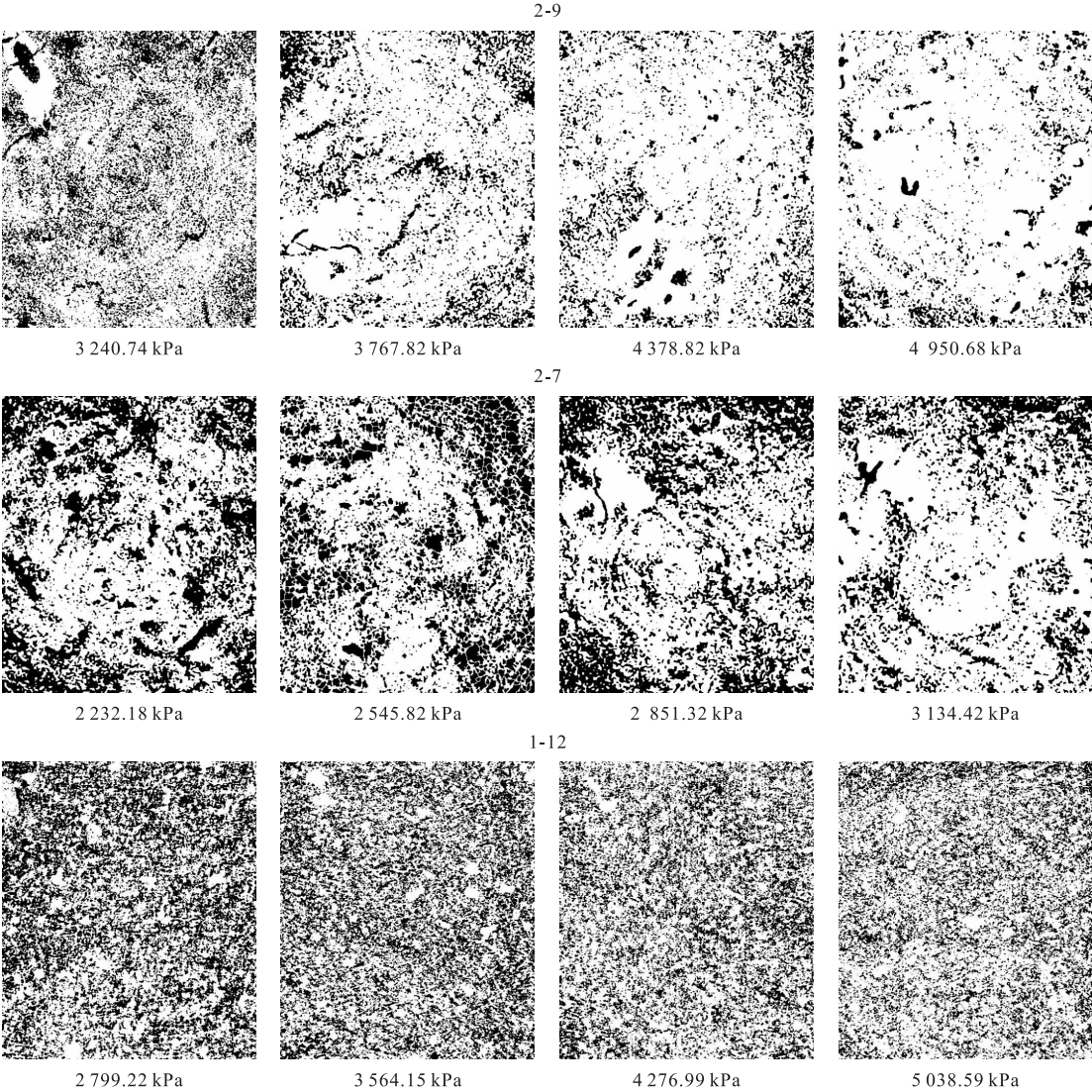


图 4 不同压力作用下孔隙分布图(注:黑色为孔隙,白色为固体颗粒)

Fig. 4 Pore distribution under different pressures(Black is porous and white is solid)

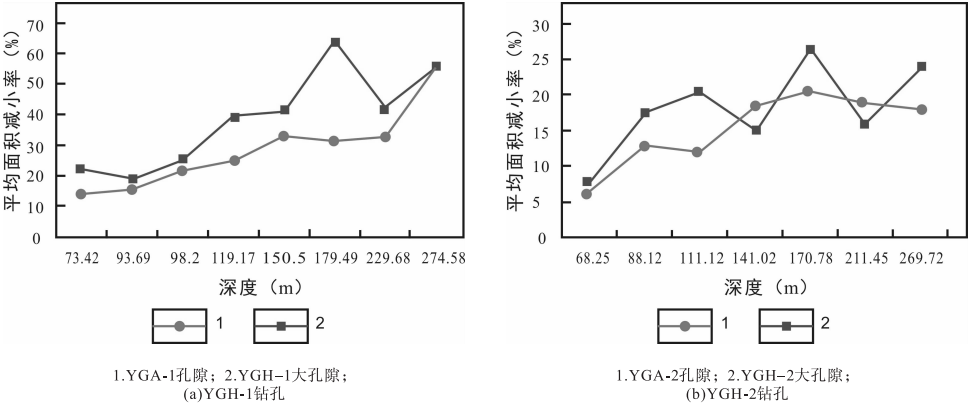


图 5 孔隙平均面积减小率曲线图

Fig. 5 Pore average area reduction curve

2002)当流体经过直径为 λ 的毛管时其流量 $q(\lambda)$ 满足修正的 Hagen-Poiseulle 方程:

$$q(\lambda)=\frac{\pi}{128}\frac{\Delta P}{L_e(\lambda)}\frac{\lambda^4}{\mu}$$

(1)

其中 μ 为流体的粘滞系数; ΔP 为压力差。
根据上式可以计算出通过面积为 A 的单元总流量 Q 为:

$$Q=-\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}}q(\lambda)dN(\lambda)$$
$$=\frac{\pi}{128}\frac{\Delta P}{\mu}\frac{L_0^{1-D_T}}{L_0}\frac{D_f}{3+D_T-D_f}\lambda_{\max}^{3+D_T}\left[1-\left(\frac{\lambda_{\min}}{\lambda_{\max}}\right)^{3+D_T-D_f}\right]$$

(2)

由于孔隙通道呈弯曲状, $1<D_T<2$,又因为 $1<D_f<2$,故 $3+D_T-D_f>2$,又因为 $\lambda_{\min}/\lambda_{\max}\ll 1$,则公式(2)变为:

$$Q=\frac{\pi}{128}\frac{\Delta P}{\mu}\frac{L_0^{1-D_T}}{L_0}\frac{D_f}{3+D_T-D_f}\lambda_{\max}^{3+D_T}$$

(3)

通过达西定律,可得到多孔介质渗透率 k 为:
$$k=\frac{\mu L_0 Q}{\Delta P A}=\frac{\pi}{128}\frac{L_0^{1-D_T}}{A}\frac{D_f}{3+D_T-D_f}\lambda_{\max}^{3+D_T}$$

由上式可以看出,多孔介质渗透率与孔隙面积分形维数 D_f 、最大孔隙面积 $\lambda_{\max}$ 、孔隙迂曲度分形维数 D_T 以及结构参数 A 、 L_0 有关。

3.2 渗透率变化特征

当压力增加时土体渗透系数均不同程度的出现

了下降。选取 1-12、2-7、2-9 三个典型样品不同那个压力情况下的孔隙分布进行渗透系数计算,结果显示:1-12 号土样从未压缩时的 2.49E-4 cm/s 变为 7.22E-5 cm/s,减小了 71.08%;2-7 号土样从未压缩时的 1.44E-04 cm/s 减小为 7.33E-5 cm/s;而 2-9 号土样由于本身埋藏较深且初始孔隙度较小,压缩过程对于其渗透系数的影响最小。从图 6、表 7 中可以看出,渗透系数的下降幅度在一级级压缩时最为明显,之后呈缓慢下降趋势,呈指数函数变化。

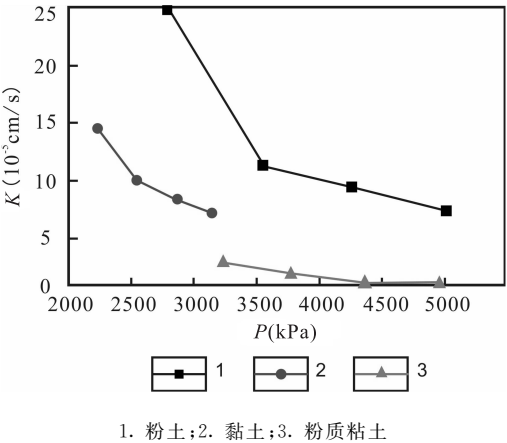


图 6 各土样渗透系数随压力的变化情况图

Fig. 6 The variation of permeability coefficients of soil samples with pressure

表 7 各土样不同条件下的渗透率分布表

Tab. 7 The permeability distribution of the soil samples under different conditions

土样编号	应力 (kPa)	D_f	D_T	$\lambda_{max}(mm)$	$k(mm^2)$	$K(cm/s)$
1-12	2 799	1.796	1.343 4	0.154 7	2.57E-08	2.49E-04
	3 564	1.775	1.345 6	0.130 0	1.17E-08	1.13E-04
	4 277	1.765	1.346 4	0.125 0	9.71E-09	9.43E-05
	5 039	1.750	1.348 1	0.118 2	7.44E-09	7.22E-05
2-7	2 232	1.816	1.345 2	0.136 1	1.49E-08	1.44E-04
	2 546	1.778	1.346 1	0.128 8	1.12E-08	1.09E-04
	2 851	1.754	1.347 2	0.128 2	1.07E-08	1.04E-04
	3 134	1.688	1.348 3	0.120 2	7.54E-09	7.33E-05
2-9	3 241	1.753	1.350 2	0.096 0	2.99E-09	2.90E-05
	3 768	1.589	1.353 4	0.092 0	2.08E-09	2.02E-05
	4 379	1.556	1.354 8	0.081 2	1.16E-09	1.13E-05
	4 951	1.502	1.355 6	0.082 0	1.14E-09	1.11E-05

4 结论

通过对西安 F4 地裂缝两侧土样进行原状试样饱和和渗透-压缩实验,并利用 CT 扫描技术和数字影像处理技术,重点模拟分析了抽取地下水所导致的压力增加过程对于土样孔隙数量、孔隙度等孔隙结构参数的影响,并通过不同压力状态下土中孔隙分布的特征计算了多孔介质渗透率计算公式。

(1)利用 CT 扫描技术可以将土中孔隙大小、数量等信息无损化获得,极大限度的保存了土样内部结构,提高了计算精确度,使得孔隙研究简便易行。

(2)随着地下水开采而产生的土层应力增加过程对于孔隙数目而言除去大孔隙数外均存在显著正相关关系,其中长孔隙数相对增幅小于其他类型孔隙。而各孔隙度相关参数中,大孔隙度、长孔隙度会随着压力增加而明显降低,YGH-1 钻孔和 YGH-2 钻孔的大孔隙平均面积降幅为 39.05% 和 9.22%,不利于水分在孔隙间运移;对于中孔隙度、小孔隙度、不规则孔隙度、规则孔隙度而言,基本保持不变甚至略有上升。由此可见对于因孔隙水压力降低、有效应力增加而导致的土体压缩过程是与大孔隙面积的显著降低息息相关的。

(3)渗透系数随压力的增加呈现出减小趋势,最大下降幅度为 71.08%,同时随深度增加而减小。通过将所求渗透系数与孔隙结构参数进行多元回归分析发现回归方程显示渗透系数受最大孔隙面积变化影响最大,决定系数达 0.875,其次是总孔隙度。

参考文献(References):

彭建兵,范文,李喜安,等. 汾渭盆地地裂缝成因研究中的若干关键问题[J]. 工程地质学报,2007,15(4):433-440.

PENG Jianbing, FAN Wen, LI Xi'an, et al. SOME KEY QUESTIONS IN THE FORMATION OF GROUND FISSURES IN THE FEN-WEI BASIN [J]. Journal of Engineering Geology,2007,15(4):433-440.

张茂省,董英,张新社,等. 地面沉降预测及其风险防控对策——以大西安西咸新区为例[J]. 中国地质灾害与防治学报,2013,24(4):115-118.

ZHANG Maosheng, DONG Ying, ZHANG Xinshe, et al. Prediction of land subsidence and Its mitigation methods——a case study in the new urban district of Xi'an-

Xianyang [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2013,24(4):115-118.

吴华山,陈效民,陈桢. 利用 CT 扫描技术对太湖地区主要水稻土中大孔隙的研究[J]. 水土保持学报,2007,21(2):175-178.

WU Huashan, CHEN Xiaomin, CHEN Can. Study on Macropore in Main Paddy Soils in Tai-Lake Region With CT[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2007,21(2):175-178.

赵冬,许明祥,刘国彬,等. 用显微 CT 研究不同植被恢复模式的土壤团聚体微结构特征[J]. 农业工程学报,2016,32(9):123-129.

ZHAO Dong, XU Mingxiang, LIU Guobin, et al. Characterization of soil aggregate microstructure under different revegetation types using micro-computed tomography [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2016,32(9):123-129.

郭晓明,马腾,陈柳竹,等. 污水灌溉下土壤孔隙特征的 CT 定量分析[J]. 地球科学-中国地质大学学报,2015,(11):1896-1903.

GUO Xiaoming, MA Teng, CHEN Liuzhu, et al. Quantitative Analysis of Soil Pores under Sewage Irrigation Using Computerized Tomography [J]. Earth Science (Journal of China University of Geosciences) 2015,(11):1896-1903.

王宇,李晓,阙介民,等. 基于 CT 图像灰度水平的孔隙率计算及应用[J]. 水利学报,2015,46(3):357-365.

WANG Yu, LI Xiao, QUE Jiemin, et al. A porosity calculation method based on CT images and its application [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(3): 357-365.

YU, Cheng. A fractal permeability model for bi-dispersed porous media[J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 2002, 45(14): 2983-2993.

CARLSON, ROWE, R. A. Ketcham, et al. Applications of high-resolution X-ray computed tomography in petrology, meteoritics and palaeontology[J]. Geological Society London Special Publications, 2003, 215(1): 7-22.

Al-Raoush, Willson. Extraction of physically realistic pore network properties from three-dimensional synchrotron X-ray microtomography images of unconsolidated porous media systems[J]. Journal of Hydrology, 2005, 300(1-4): 44-64.

MOONEY. Three-dimensional visualization and quantification of soil macroporosity and water flow patterns using computed tomography[J]. Soil Use And Management, 2002, 18(2): 142-151.