

陇东黄土湿陷过程的 CT 结构变化研究^{*}

Research on CT structure changing for damping process of loess in Longdong

蒲毅彬

(中国科学院兰州冰川冻土研究所冻土工程国家重点实验室, 兰州, 730000)

陈万业

廖全荣

(兰州军区后勤部营房部, 兰州, 730000) (中国科学院兰州冰川冻土研究所冻土工程国家重点实验室, 兰州, 730000)

文 摘 已经用多种方法进行了黄土的湿陷性研究, 由于研究方法的限制, 只能在试验前后推导试验现象, 人们比喻为‘黑匣子’。计算机断层扫描仪(CT)是一种无损、定量检测方法, 通过对黄土在单轴、三轴、渗水及其综合作用条件下进行的 CT 扫描和初步图像分析, 看到在达到破坏应力前, 黄土裂隙自缺损处开始扩大, 其发展速率随试验条件而变; 水分沿着毛细孔道渗入并扩展, 计算出渗水速率及渗水量。通过对 CT 扫描辅助装置的改造和与计算机图像处理系统的联网, 实现了 CT 图像的彩色显示, 纠正了扫描过程的数据偏差, 为数据图像的深入处理提供了基础。

关键词 黄土, 湿陷性, CT, 结构

中图法分类号 TU 444, TP 317.4

作者简介 蒲毅彬, 男, 1951 年生, 高级工程师, 毕业于上海理工大学, 从事仪器、计算机图像处理研究工作。

Pu Yibin

(State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, LIGG, CAS, Lanzhou, 730000)

Chen Wanye

Liao Quanrong

(Lanzhou Barracks Department of Logistics, CPLA, Lanzhou, 730000) (State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, LIGG, CAS, Lanzhou, 730000)

Abstract The CT technology has been used on frozen soil, ice, some stones and cement mortar. It can open the “black box” of experiment process. Because of nondestruction and quantization, the images have been changed to PC Images. From these images, the change of density and water content can be caught in experiment process of undisturbed state loess. The structure and specific property of loess would be exposed in many tests.

Key words loess, collapsibility, CT, structure

1 前 言

工程实践中, 人们对黄土的湿陷性有所了解。CT 技术对揭示试验过程中样品的结构变化已经取得了突破进展。蒲毅彬(1995)推导出 CT 冻土实验的数值方程, 马巍(1996)进行了单轴、三轴试验条件的冻土试样结构变化规律, 杨更社(1998)进行了岩体损伤及检测的 CT 实验。采用 CT 技术对原状黄土的基本结构进行分析, 并在此基础上模拟降水导致的黄土湿陷过程结构变化, 找出其变化规律, 提供工程处理意见, 是一种直观、科学的研究方法。在更新及改造了原有 CT 机之后, 进行了 CT 机与计算机的软、硬件联接, 编制了一些应用分析程序, 进行了初步 CT 图像分析, 说明本系统和研究方法具有特殊应用价值。

2 实验原理

自然状态下的黄土在长期沉降及风、水侵袭下出现剥蚀和渗水通道。在承受工程力作用及自然条件改变时, 必然引起其结构和其他物理性质的改变。CT

是计算机断层扫描技术的缩写, 利用 CT 扫描可以干扰试样试验过程看到试样内部各层位图像, 且可以对图像数据进行数学分析, 获得所需要的信息。湿陷性黄土湿陷量的计算理论比较成熟, 其中湿陷系数与黄土的内部结构有直接关系, CT 扫描数据可以直接分析土中孔径的大小、孔隙的多少, 以及浸水后各层面的渗水图景、渗水通道, 反映黄土中可溶盐溶解水中以后的内部结构状况。模拟黄土在自然及工程应用条件下的试样被置放于 CT 机内, 在一定时间进行扫描, 通过对 CT 数的统计分析首先建立某种试验过程中其干容重、含水量、渗水率等物理指标, 然后经过一系列扫描图像的类比分析, 得出在该应用条件下黄土的湿陷等级, 从而在实验意义上给出了工程应用的客观依据。同时, 深入广泛的 CT 实验研究和新的图像处理数学方法的采用可以对黄土多方面理论作出特殊的贡献, 是一项带有创新性的研究方法。

参照国家《湿陷性黄土地区建筑规范》(JTJ25—

^{*} 到稿日期: 1998-12-22

78) 将我国黄土的湿陷性划分为自重湿陷和非自重湿陷两大类, 其在水作用下突然下沉的本质是一样的。试验所采用的黄土来自甘肃陇东平凉地区, 属高原湿陷性黄土。钻采的黄土深度约在 5 m, 属于新第四纪的新黄土, 颗粒中值约等于 0.023 mm, 小于 0.01 mm 的粉粒接近 80%, 透水性强, 存在水溶盐类, 天然含水量一般为 12%~14%, 干容重一般为 12.1~12.8 kN/m³, 相对湿陷系数约为 0.079, 湿陷性很大, 一般有自重湿陷性, 结构松软, 为第二类湿陷性黄土。利用 CT 扫描研究黄土的湿陷性即从以上黄土特性出发, 在图像和数据变化上揭示其特性, 同时在改变试验条件(即采取处理措施后) 情况下比较湿陷性的变化。

3 技术路线

在甘肃平凉地区工程施工地用钻探方法取出 20 个地下 5~10 m 深处的原状黄土样, 对土样要妥为保管, 密封运至试验机房。根据研究目标将土样分成 5 组, 对待 CT 扫描的试样用圆柱型刮削器进行手工制样, 置于专用于 CT 机试验的非金属压力容器内, 进行准确定位及透视扫描, 从 CT 透视平片上测量试样的长度、直径, 确定扫描基线。接着在几个确定的截面上按试验进程进行分阶段断层扫描。同时, 对切削下的土样测定整体容重及含水量。CT 机选定扫描参数(电压、电流、层厚、层位、速度、扫描方式、算法及存储形式), 以便下一步数据分析和转储至微机进行深入图像处理。研究目标为

(1) 原状土扫描, 测量土样的容重、含水量, 计算在约定试验情况下 CT 数与土样物理参数之间的关联, 计算黄土的 X 射线吸收系数。

(2) 黄土单轴有侧限条件下 CT 扫描, 观察其变形量及内部结构变化过程, 计算孔隙率及 CT 数值变化。

(3) 黄土三轴条件下 CT 扫描, 观察其变形量及内部结构变化过程, 与单轴有侧限试验结果比较, 分析不同受荷情况下黄土的力学特性。

(4) 黄土浸水过程条件下 CT 扫描, 观察浸水通道的作用, 分析不同孔隙状况水的浸入速率, 分析浸水图像, 计算浸水量。

(5) 黄土受荷并浸水复合作用下 CT 扫描, 分析内部结构的变化, 总结与前项试验的比较差异, 给出适合实用条件下的黄土特性图像解释。

4 试验分析

按照拟定的试验目标, 分别进行 5 组 CT 试验。

(1) 黄土 CT 特性测定

为将 CT 数据与黄土参数联系起来, 必须测知该

试验用黄土的 X 射线吸收系数。从文献[1]可知, 扫描条件对 CT 图像数据有一定的影响。考虑影响 CT 数主要因素: 试样尺寸、射线硬化及外围装置作用时, 平均 CT 数 H 表达为

$$H = (\mu - 1) / [1 + A(R - r) - B(8Rr - 5r^2) / 6] \times 1000 \quad (1)$$

式中 μ 为 X 射线吸收系数; $A = 0.0379$, $B = 0.0024$, A , B 是方程系数; $R = 12.5$ cm, 是标准样品半径; r 是实际样品半径。

X 射线吸收系数是物质成分及其密度的物理表现, 研究黄土湿陷过程必须区分样品中土与水两相物质, 找出它们对 CT 数据的影响。

$$\mu = \mu_s + \mu_w = \gamma_d(w + \mu_{s0}) \quad (2)$$

式中 μ_s 为土的 X 射线吸收系数; μ_w 为水的 X 射线吸收系数; μ_{s0} 为单位密度土的 X 射线吸收系数; γ_d 为土样的干容重; w 为含水量。

已知水的 X 射线吸收系数 $\mu_{w0} = 1$, 土样由于其成分的不同, 其 X 射线吸收系数 μ_{s0} 也有差异。对第一组样品进行扫描是为了求解 μ_{s0} , 确定此系数后, 就可以根据 CT 数 H 反推得 μ 值进而求解土样参数 γ_d 和 w 。在一定试验条件下确定 γ_d 或 w 不变时, 从 H 的变化即可计算出样品结构的变化。

对表 1 所计算出的当地黄土 X 射线吸收系数求平均, $\mu_{s0} = 1.1365$ 。此值还可以通过更大量严格的测试予以修正, 但已从此过程看出, 简单的 CT 扫描可以获取试样内部的密度分布, 可以将 CT 数与试样物理参数联系起来, 直接观测到试验过程中试样结构变化。以下试验可以区分试验条件认定 CT 数的变化是黄土密度变化或者水分迁移变化。

表 1 第一组试样平均 CT 数与试样参数对照及据此计算的 μ_{s0}

Table 1 The comparison between CT number and parameter of first group sample

序号	样号	等效半径 / cm	干容重 / (kN·m ⁻³)	含水量 / %	CT 数	土吸收系数 μ_{s0}
1	H4	5.40	13.20	17.61	845.08	1.162
2	H4	9.00	13.20	17.61	630.50	1.093
3	W1	10.00	0	100.00	2.20	(纯水样)
4	P2	14.00	18.04	12.60	1002.20	1.163
5	X6	13.40	17.06	12.56	823.76	1.073
6	H1	14.00	13.90	25.00	843.94	1.253
7	X1	13.50	15.72	16.62	747.60	1.075

(2) 单轴有侧限压力试验

由于原状黄土在无围压作用时仅有很小的承载能力, 试验中 0.1 MPa 轴压即使 CT 数上升约 100, 同时试样向四周扩展, 即密度增高 5% 左右, 试样结构大体保持。继续增大轴压, 样品立即瓦解。因此进行有侧

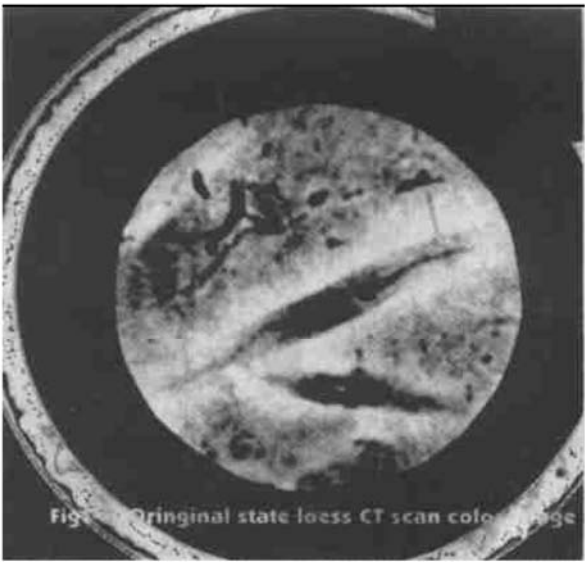
限的单轴压力试验, 目的在于观察黄土受荷过程内部结构变化情况, 测定黄土的孔隙率。土样置于有机玻璃筒中, 初始小压力条件等效单轴试验, 在轴向施荷时试样可以发生径向变形。待试验扩展充满样筒时, 径向受限无法继续扩展, 继续施荷使试样密度增高, 其内部结构发生破坏性改变。

以某一 X1 试样为例, 该试样含水量 16.62%, 水吸收系数 $\mu_w = 1$, 黄土吸收系数 $\mu_s = 1.1365$ 。轴压分别为 0, 0.1, 0.2, 0.3 MPa, 每隔 40 多分钟对试样 6 个对应层位进行扫描, 从图片可看出试样 X1 在试验各阶段各层位的内部图像, 原样存在着多个孔隙和岩样结晶, 有些孔隙是纵向贯通的。受荷过程中, 多数孔隙逐渐闭合, 土样密度增高。通过 0.2 MPa 下图像与原图相减, 可看出变化最大的地方都是在孔隙周围。图像数据上的表现是, 各部位数据增加, 根据式 (1), (2) 可以计算出试样密度、干容重的数值; 各试验阶段截面数据离差减小, 这意味着孔隙密合。其均值见表 2。

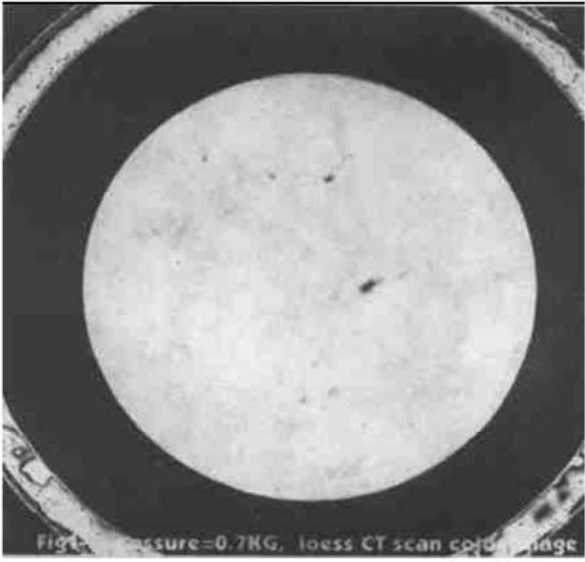
表 2 单轴有侧限等效三轴 CT 扫描数值平均变化(X1 样)

Table 2 Change of CT number for confined uniaxial test of loess(sample X1)						
试验阶段	扫描时间	荷载 / MPa	平均 CT 数	计算干容重 $\gamma_d / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	平均方差	描述
0	10:15	0	697.6	14.531	194.65	单轴过程
1	10:56	0.1	852.6	15.997	162.88	有侧限
2	11:47	0.2	884.7	16.310	145.85	有侧限
3	12:00	0.3	1080.4	18.220	77.74	压实
变化趋势		轴压增大	数值增高	密度增 25%	方差减小	有侧限

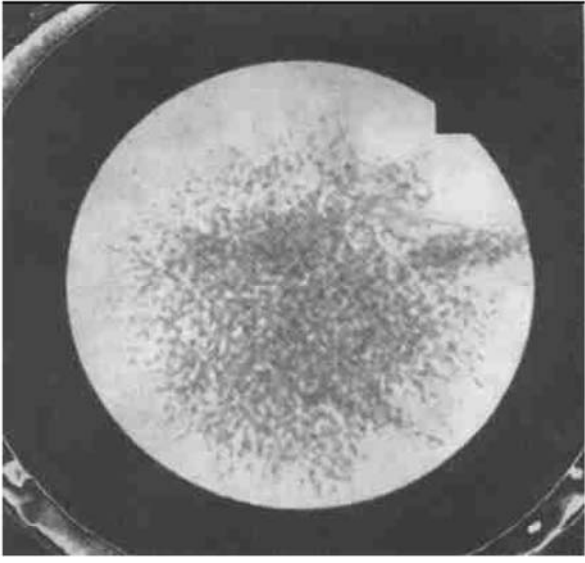
图 1(a), (b), (c), (d) 展示出自 0~3 试验阶段一个断层的 CT 图景。与其数值表现对应, 可以看出随着荷载增加内部孔隙减少, 密度增高。在达到 0.3 MPa 荷载时, 原状黄土所有的骨架结构消失了, 由于有侧限的作用, 试样并未崩溃。



(b) 0.1 MPa 轴压



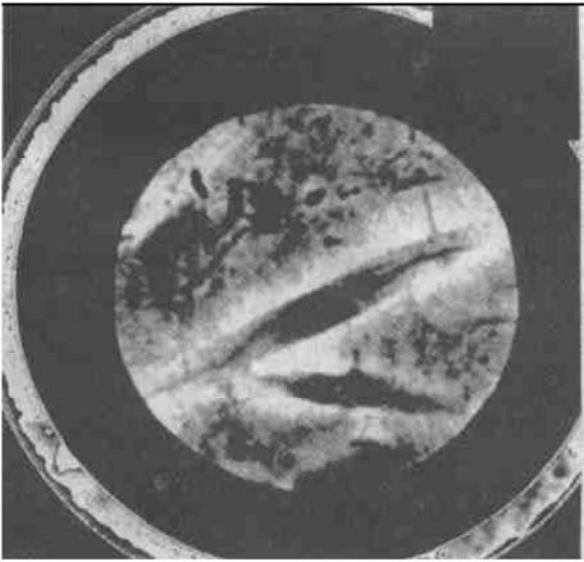
(c) 0.2 MPa 轴压



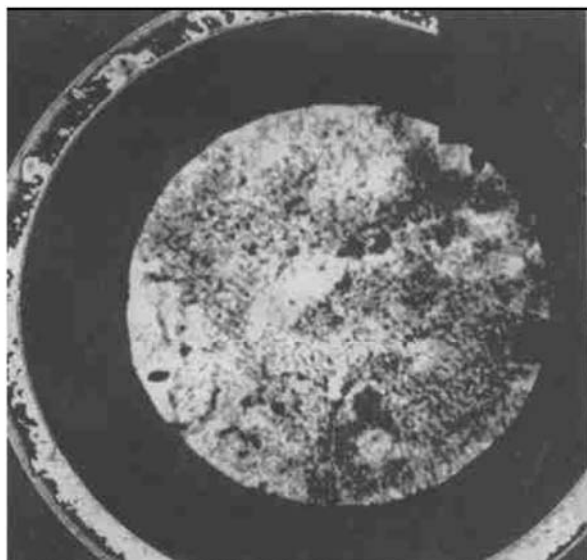
(d) 0.3 MPa 轴压

图 1 有侧限黄土 CT 扫描图像(X1 样)

Fig. 1 Black-white image of CT scanning on confined test



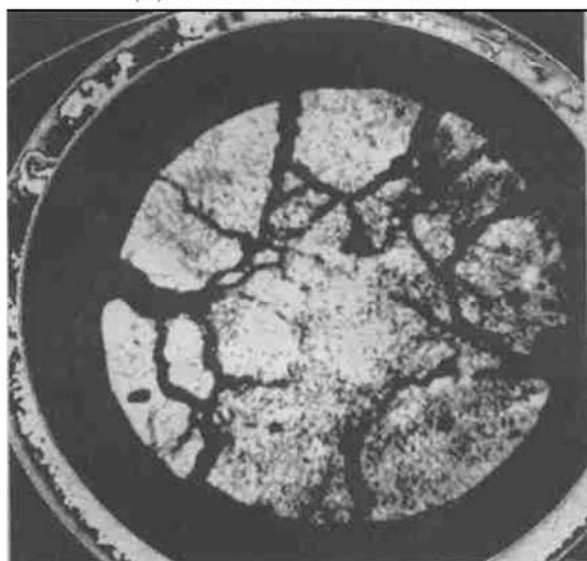
(a) 0 MPa 轴压



(a) 0.15MPa 轴压黑白增强图



(b) 0.195MPa 轴压黑白增强图



(c) 0.227MPa 轴压黑白增强图

图2 三轴黄土 CT 试验分色增强图(H1 样)

Fig. 2 B/W enhanced image for triaxial test of loess(H1)

(3) 三轴压力试验

通常状态下黄土承载能力很差。为表现三轴受荷过程,我们限制应力差,试样精心用旋转刮削器手工制作,以保证圆柱端面平行。用乳胶套隔断围压油侵入试样,用百分表测量轴向位移,记录测量时间。以某 H1 试样三轴试验为例,图像分析如下。

预置轴应力及围应力为 0.15 MPa,初次 CT 扫描 5 个层位,然后轴压加至 0.195 MPa,每 2 min 记录百分表读数,90 min 后位应变速率降至 0.02 mm/min 时再进行同层位 CT 扫描。增加轴向应力至 0.227 MPa,25 min 后应变速率降至 0.08 mm/min 时第三次 CT 扫描。之后,发现应变速率迅速增大,样品崩溃。

从图 2 可以更加清楚地看出,整个试验过程中黄土内部结构的变化(因印刷原因彩图从略),裂隙自原样中缺陷处迅速扩大,分层次的裂痕绕过致密的准结晶土体爬行,具有显著的分形特征。同时,个别封闭的空洞并不参与裂隙演化。表 3 为此试验三个时段多层 CT 扫描的平均描述,可以看出在轴压大于围压情况下,表 3 数据与表 2 有明显差异,CT 值减少而方差增大。

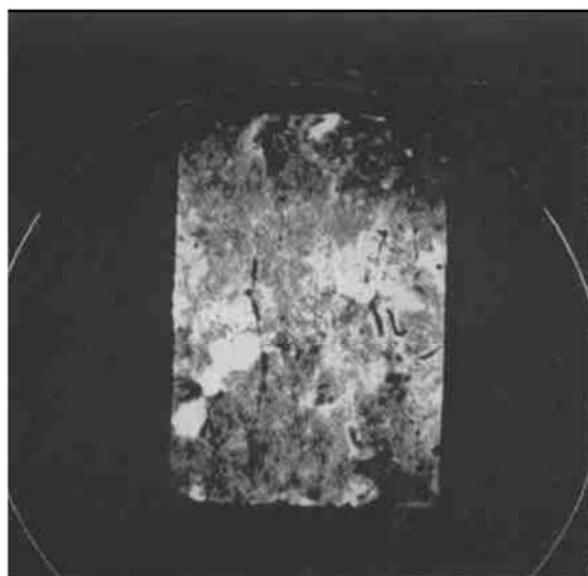
表3 三轴黄土 H1 试样的 CT 扫描平均数据表

Table 3 CT number of triaxial test for H1 loess sample

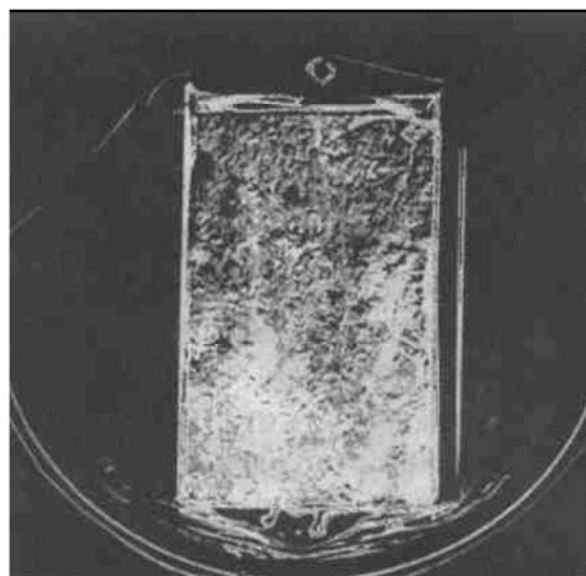
试验阶段	扫描时间	轴应力 / MPa	围应力 / MPa	平均 CT 数	平均方差	描述
0	16:53	0.150	0.150	843.93	128.23	预应力后
1	18:26	0.195	0.150	827.98	169.70	应变 5.9mm
2	18:50	0.227	0.150	780.72	211.32	应变 4.2mm
变化趋势		轴压增大	围压不变	数值减小	方差增大	

(4) 渗水试验

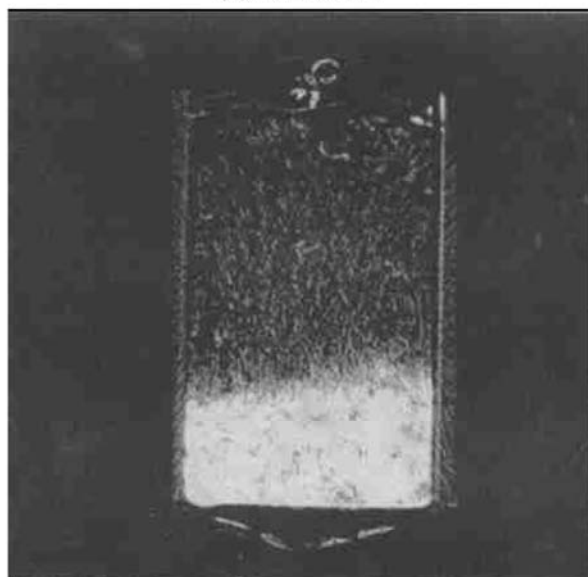
黄土在表面径流或雨水侵蚀下,受到冲刷或渗水。冲刷的过程不易模拟,渗水过程的模拟对黄土湿陷性机理研究十分有用。所设计的试验以成倍的时间差扫描多个层位,持续地使试样表面积水下渗,对每层自上至下分三个区间测量 CT 统计量,通过图像运算和补水量核对计算出补水速率和补水量。图 3 为补水前、中、后逐次图像数值相减图,从图 3 上可以明显看出水是如何渗入黄土的全过程,先是自毛细孔渗水,黄土中封闭的“虫孔”几乎不能进水,高密度的类结晶土体只有很少的水渗入,直至浸水达到底部,使其逐渐超饱和,在水压的作用下“虫孔”开始进水。随着浸水区域的发展,土-水混合体密度自上至下增高且渐趋均匀,当下端含水超饱和后,下端 CT 数高于中上端。此项试验多次重复,规律是一致的。表 4 以 H5 试样为例说明这一过程。



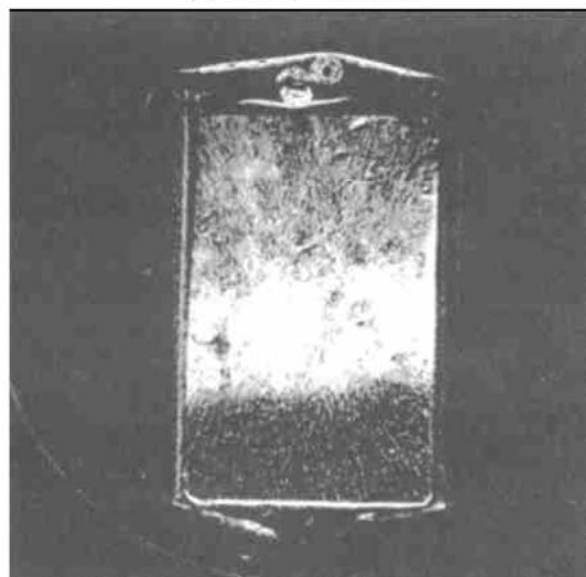
(a) 初始黑白图



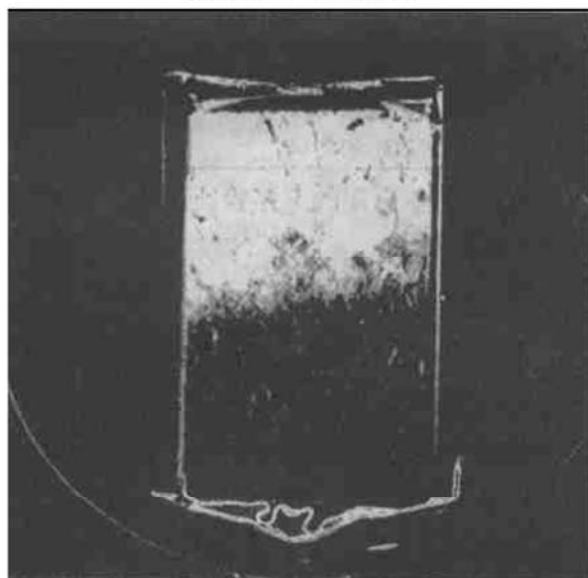
(d) 阶段 3~ 2 黑白图



(b) 阶段 1~ 0 黑白图



(e) 阶段 4~ 3 黑白图



(c) 阶段 2~ 1 黑白图

图 3 黄土渗水 CT 试验过程差值黑白图(H5 样)

Fig. 3 B/W image of water seep age into loess for CT test H5 sample

表 4 清楚地说明, 由于黄土骨架未变, 从 CT 扫描数据可以计算出每一时段黄土中水的渗透情况, 经过 60 min, 水已浸透 15 cm 土样, 垂直渗透率达到 0.0417 mm/s, 表明该黄土水溶性盐类使小土粒凝聚成团聚体, 形成管状孔隙, 提高了黄土的渗透性。之后全部试样完全饱和, 甚至下端有超饱和和水积累。H5 的 CT 图片清楚地展示了各层面渗水图景, 差值图像中可看到渗水通道, 从代表层位上下端数值直方图也可比较水渗入样品时的特点。

(5) 综合试验

在多种分项试验后, 我们进行了数个综合性的模拟试验。在对黄土施荷情况下加上一定的水头压力进行补水, 有些试验因为装置的缺陷漏水, 有些因为荷载的不稳定而不成功。从做成的试验看, 在黄土受荷状

表 4 黄土 H5 试样渗水试验 CT 扫描数据分析表

Table 4 Analysis of CT number on water permeability test for loess H5 sample

时间	部位	平均 CT 数	方差	与上次差值	核算补水量/ml	补水速率/(ml·min ⁻¹)
第 0 次 17:45	上	589.95	120.95		体积= 414.1cm ³	
	中	596.93	149.63		体积= 414.1cm ³	
	下	618.50	144.64		体积= 414.1cm ³	
第 1 次 17:58	上	747.58	122.31	157.63	63.74	4.903
	中	629.80	151.92	32.87	13.29	1.022
	下	617.02	134.91	- 1.47	- 0.59	- 0.045
第 2 次 18:11	上	795.55	114.95	47.97	19.40	0.841
	中	738.85	139.44	109.05	44.10	1.838
	下	623.13	130.35	6.11	2.47	0.107
第 3 次 18:35	上	785.75	118.60	- 9.8	- 3.96	0.165
	中	743.10	139.62	4.26	1.72	0.072
	下	723.55	130.38	100.42	40.61	1.692
第 4 次 21:35	上	862.03	104.28	76.28	30.84	0.171
	中	846.23	100.95	103.13	41.71	0.232
	下	882.35	81.39	158.80	64.21	0.357
合计	上			272.08	110.02	
	中			249.30	100.82	
	下			263.85	106.70	

态下水的渗透相当困难, 渗水速率十分慢, 数小时后只渗透几厘米。压密作用造成黄土中总孔隙率减少, CT 图像数据达到 1000 以上, 缓慢的渗水造成参加土骨架构成的可溶性土粒和水溶盐结晶的溶解, 土骨架胶结减弱, 团粒被“湿崩”成小土块填到土的孔隙中去, 土结构因此破坏。比较各种条件 CT 扫描图像, 可以分辨出各种作用的独立影响。这些现象从各个不同试验的图像中均有表现, 为进一步分析, 今后将设计恰当处理方法, 提取带有标志意义的黄土特征参数, 为工程应用服务。

5 结 论

用 CT 技术对黄土受荷、渗水过程的结构分析是一种十分有效的创新的方法。对原状黄土进行了多项有意义的动态扫描试验, 从 CT 图像和数据分析可以直观地看出土样变化过程。分析可知, 由于黄土存在松散的毛细孔隙, 由于毛细孔对水的亲和作用, 形成了水的渗透通路。水的渗入最终瓦解了土骨架, 填充了所有的较大孔洞, 导致黄土湿陷。荷载的作用使黄土在受荷方向压缩, 裂隙迅速扩大使试样破坏。在有侧限情况下, 使土样致密, 土颗粒重新分布, 失去了原状黄土特征, 水分几乎无法渗入。在工程实践中, 根据当地降水量和降水密度考虑防护措施, 可以根据工程实用的土质及工程环境条件取样进行有针对性的 CT 扫描, 观察土质结构的稳定性, 从而确定安全系数。

用 CT 扫描融土的试验才刚刚开始, 许多装置和方法尚不完善, 需要更多的工作验证试验方法和结论。欢迎各位专家指正。

参 考 文 献

- 1 蒲毅彬等. 冻土 CT 实验的数学方程. 冰川冻土, 1995, 17 (增刊): 135~ 139
- 2 吴紫汪等. 冻土蠕变过程体积变化的 CT 分析. 冰川冻土, 1995, 17(增刊): 41~ 46
- 3 吴紫汪等. 冻土蠕变过程中结构的 CT 分析. CT 理论与应用研究, 1995, 4(3): 34~ 40
- 4 吴紫汪等. 冻土单轴蠕变过程中结构变化的 CT 动态监测. 冰川冻土, 1996, 18(4): 306~ 311
- 5 马 巍等. 冻土三轴蠕变过程中结构变化的 CT 动态监测. 冰川冻土, 1997, 19(1): 52~ 57
- 6 蒲毅彬等. CT 用于冻结土、岩及冰的无损动态试验研究. 自然科学进展, 1998, 8(2): 251~ 253
- 7 杨更社等. 岩体损伤及检测. 西安: 陕西科学出版社, 1998
- 8 吴紫汪. 冻土蠕变变形特征的细观分析. 岩土工程学报, 1997, 19(3): 1~ 6
- 9 Ma wei, et al. Monitoring the change of structure in frozen soil during the creep process by CT. The International Conference on Permafrost, Canada, 1998
- 10 穆斯塔伐耶夫 A A[苏]. 湿陷性黄土土地基与基础的计算. 北京: 水力电力出版社, 1984
- 11 张宗祜. 中国黄土类土湿陷性及渗透性基本特征. 中国地质, 1962, (12): 12~ 40
- 12 翟礼生. 中国湿陷性黄土区域建筑工程地质概要. 北京: 科学出版社, 1983