

甘肃永登湿陷性新近堆积黄土的微观结构分析

邓 津, 王兰民, 张振中, 袁中夏

(中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘 要:甘肃永登县树屏村某工程场地土为第四纪新近堆积黄土, 其工程性质较为特殊, 具有较大的湿陷性, 但在天然湿度下震陷性却很小。本文利用扫描显微镜对其微结构图象进行分析, 同时结合土工试验结果, 揭示了导致其特殊工程性质的微观机理。最后提出了在工程施工中应注意的问题。

关键词:关键词:新近堆积黄土; 微结构; 震陷; 湿陷

中图分类号: P315.9; P642.1; TU441⁺7

文献标识码: A

文章编号: 1000-0844(2005)03-0267-05

Analysis on Microstructure of the Recently Cumulated Collapsible Loess in Yongdeng County, Gansu Province

DENG Jin, WANG Lan-min, ZHANG Zhen-zhong, YUAN Zhong-xia

(Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou 730000, China)

Abstract: It is found that the recently accumulated loess in one site at Shuping village, Yongdeng country, Gansu province, has special engineering behaviors. It has larger water collapsibility but only smaller seismic subsidence in natural humidity. Based on the analysis of microstructure images by means of scanning electron microscopy and experimental results of its physical parameters, the micro-mechanism of causing the special engineering behaviors is revealed. Some suggestions for construction on this kind site soil are presented.

Key word: Recently accumulated loess; Microstructure; Seismic subsidence; Water collapsibility

0 引言

目前利用扫描电子显微镜分析黄土微结构的研究^[1-4]很多, 但较少涉及工程性质更加复杂的新近堆积黄土微结构特性的研究。鉴于此, 本文以永登县树屏村附近某工程场地的新近堆积黄土为研究对象, 利用扫描电子显微镜对其微结构进行研究分析, 并结合室内土工试验的测试数据, 研究了该场地内新近堆积黄土土产生湿陷及震陷的微观机理。

1 场地及试验概况

甘肃永登县树屏村黄土取自黄河支流沟谷处开辟的工程场地, 表层为全新世次生黄土状土。该场地土颜色棕红, 土质稍湿, 疏松, 有肉眼可见的大孔, 含闪亮的细小盐类晶体。挖至 10 m 左右为第三纪红色泥岩, 其中可见片状结晶体。土层中混杂有小

颗粒的红色粘土和白色钙化膜, 从上到下土层红黄相间, 具水平层理。初步勘定该场地表层土体应为坡积—洪积物, 成分为第四纪黄土与第三纪红色黏土混杂堆积, 形成了新近堆积黄土。

在工程场地内挖掘了 8 m 深的探井, 分别在该探井的 3 m, 6 m 处取 12 个原状土样。对这些土样进行常规的室内土工试验分析, 并利用中国地震局黄土地震工程实验室最新购置的 kyky-2800 型扫描电子显微镜对所取土样微结构的特征进行研究。电镜试验需经过: 取样, 土样干燥, 喷金, 测试, 软件数据处理等程序。

2 场地土湿陷性的物性分析结果

2.1 土工数据分析

土工试验数据见表 1。3 m 深处土样的湿陷系

收稿日期: 2004-12-20

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(50379049); 中国地震局兰州地震研究所论著编号: LC20050050

作者简介: 邓津(1970—), 女(汉族), 四川隆昌人, 硕士, 工程师, 主要从事黄土灾害研究。

表 1 永登树屏土样土工试验数据

样品	深度 /m	W_l	W_p	I_p	$W/\%$	γ	$\gamma_d/[kN \cdot m^3]$	$S_r/\%$	$n/\%$	e	湿陷系数 δ_s	自重湿陷 系数 δ_{zs}
YD1	3	26.4	17.1	9.3	11.23	14.7	13.13	30.4	50.29	1.017	0.148	0.042
YD2	6	27.1	17.27	9.87	15.57	16.17	14.01	49.9	47.4	0.909	0.058	

数为 0.148, 换算成 8 m 厚度土层的湿陷量为 366 mm, 根据文献[5]的相关标准定为Ⅲ级自重湿陷性黄土, 湿陷性较强烈; 天然含水量在 11%~15% 左右, 在塑限附近; 饱和度较低, 在 30%~50% 左右; 密度为 1.3~1.4 g/cm³ 左右, 较一般风成黄土 (1.1~1.2 g/cm³) 大。

2.2 粒度分析

对 YD1 样品进行激光粒度仪的粒度分析, 结果见表 2。根据以往对颗粒的划分^[1], 应定为黄土状粉质粘土。

表 2 YD1 样品粒度测试结果
(王峻, 李兰提供)

序号	颗粒大小/ μm	累积
1	0.6—1.00	0.75
2	1.00—2.00	13.16
3	2.00—5.00	32.55
4	5.00—10.00	46.62
5	10.00—20.00	64.79
6	20.00—30.00	74.87
7	30.00—50.00	89.81
8	50.00—100.00	99.21
9	100.00—120.00	100.00

统计后粉粒占 57.26%, 砂粒 10.19%, 粘粒含量为 32.55%。因为粘粒含量很高, 在 30% 以上。

3 场地土湿陷性的化学分析

对土样做相关化学分析实验后, 结果表明该场地土中硫酸钠含量较高 (见表 3)。硫酸钠有特殊的化学性质^[6], 当沉淀重结晶时, 结合 10 个水分子形成芒硝 ($Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$), 体积增大; 在 32.4℃ 时芒硝放出水分, 又成为无水芒硝, 体积减小。随着环境温度的变化, 土体时缩时胀, 致使土体结构疏松, 又由于水多次淋溶作用, 从而形成较大的缩胀孔隙。

由表 3 可知, YD2 硫酸根离子 (SO_4^{2-}) 与氯离子 (Cl^-) 的当量比值高达 15.66, 应属于硫酸盐渍土。YD2 虽然易溶盐含量较大, 但与 YD1 相比含有大量的钙、镁二价离子, 由于二价硫酸盐较一价硫酸盐胶结力强, 溶解力差, 使得 YD2 的湿陷系数较 YD1 小。

由于场地土的胀缩性、力学性质、湿陷性、压缩性均受盐类含量及其化学性质的影响, 因此也影响

着土的微结构特征的变化。电镜照片表明, 易溶盐类胶结在颗粒内部及支架孔隙周围。如图 1 所示, 黄土颗粒表现为盐类胶结成块状, 盐溶以后形成了溶蚀状的颗粒集粒, 集粒周围产生了溶洞式架空孔隙; 而图 2 显示了 YD2 粘粒颗粒镶嵌胶结成的牢固集粒, 同时盐类胶结在颗粒的内部或周围, 增强了结构强度, 这种集粒在含水量低时, 受力后不易破坏。



图 1 YD1 黄土的盐类胶结状态

Fig. 1 Salt cementation in YD1 loess sample.

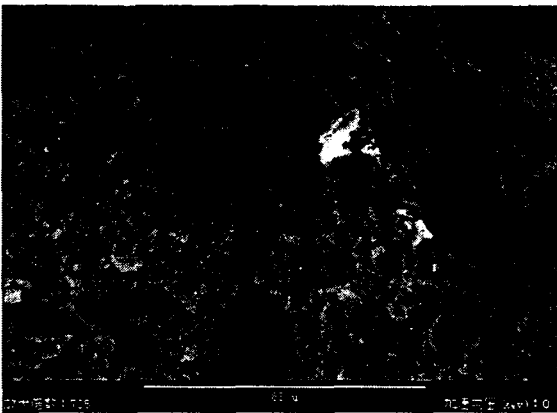


图 2 YD2 黄土的镶嵌结构

Fig. 2 The incrustation fabric in YD2 loess sample.

由上述的物理化学分析以及室内湿陷性试验结果表明, 该研究场地内的新近堆积黄土状土为Ⅲ级自重湿陷性黄土, 具有较强的湿陷性; 粒度分析结果显示有很高的粘粒含量。因为土中富含易溶盐, 当有水侵入使得土体湿度增大时, 该场地土表现出很强的湿陷性。

表 3 永登树屏场地土易溶盐含量化学分析实验结果

样品	含水率/%	pH 值	阴离子含量/[mg·kg ⁻¹]			阳离子含量/[mg·kg ⁻¹]				易溶盐总量 /[mg·kg ⁻¹]
			HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺ +Na ⁺	NH ₄ ⁺	
YD1	13.44	8.01	189	883	181	190	43	314	2	1 702
YD2	13.88	7.62	184	5 526	250	1593	367	355	2	8 456

4 场地土的震陷性分析

根据《建筑抗震设计规范》(GB50011—2001)^[7],自重湿陷性黄土或黄土状土具有震陷性,若孔隙比大于 0.8,当含水量在塑限与 25%之间时,应根据需要评估其震陷量。一般强湿陷性黄土往往具有强的震陷性^[8],树屏土样孔隙比在 1.0 左右,含水量在塑限附近,因此需要进行震陷性分析。我们对永登树屏盐渍黄土的力学性质进行了震陷性和浸水后的力学性质试验。

4.1 震陷性试验

用常规的动三轴仪对永登土样固结后做了震陷性试验,其结果列于表 4。当场地土遭受Ⅶ度地震情况时,YD1 的震陷系数为 0.000 61,计算的总震陷量为 0.32 cm;Ⅶ度地震时震陷系数为 0.001 7,总震陷量为 0.92 cm;Ⅸ度地震时震陷系数为 0.006 1,总震陷量为 2.92 cm。即震陷系数远小于 0.015。根据震陷程度评价标准^[7],震陷量≤7 cm 时,该场地在Ⅸ度的地震作用下,应视为只有轻微震陷。震陷曲线列于图 3。可以看出震陷曲线在 100 kPa 时震陷系数很微小。6 m(YD2)土样的震陷曲线较平缓,震陷性较 3 m(YD1)的弱。

表 4 永登树屏场地土震陷系数表(王峻,李兰提供)

土样	深度/m	各地震烈度下最大震陷系数/%		
		Ⅶ	Ⅷ	Ⅸ
YD1	3	0.061	0.17	0.61
YD2	6	0.02	0.06	0.12

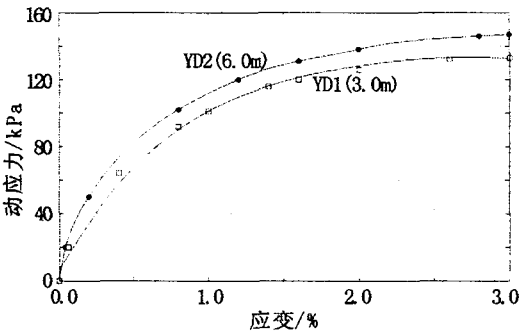


图 3 YD1,YD2 试样震陷曲线(王峻,李兰提供)
Fig. 3 Seismic subsidence curves of YD1, YD2 samples.

YD1 孔隙比为 1.017。大量数据^[9]显示,黄土的孔隙比在 1.0 以上存在架空孔隙,往往也是强震

陷性黄土^[8]。但这里的黄土湿陷性很强,但震陷性却较小。已有研究成果也已表明,震陷是黄土大孔性架空孔隙结构在地震作用下产生崩溃破坏的宏观表现,并与黄土的动力特性密切相关^[9]。甘肃某些地区的风成黄土的震陷系数在 4%~10%^[4],都因为有架空孔隙存在。后面的孔隙分析说明永登场地土的架空孔隙依然存在。

该场地土地质成因不同,环境特殊,盐类的胶结起了很大作用。在天然状态下,该场地土因为湿度低,可溶盐的影响使架空孔隙周围有较强的胶结力(图 1,2)。该场地土的震陷性与湿陷性变化不同,主要原因有两个方面:(1)微结构类型为Ⅶ型(见后),低湿度下易溶盐胶结作用强;(2)易溶盐遇水溶解后,架空结构中胶结的结晶易溶盐溶解,土体将会产生崩溃性破坏。

4.2 盐渍场地土湿化后的微结构强度特性

为了研究该场地土浸水后强度降低,微结构破坏的情况,通过侧限压缩试验研究黄土结构强度受含水量变化的影响。在压缩试验后又进行了原状土的天然湿度和不同湿度条件下的微结构强度试验。我们称这种试验为不同含水量下场地土侧限压缩试验。该场地土具有较强的湿陷特征,其微观结构的力学特性是决定其抗震性能的内因。对该场地土进行侧限压缩试验的目的是研究土体的微结构强度。

试验结果见图 4,原状土的天然含水量 W 为 13.3%,压缩曲线在压力为 200 kPa 左右才出现明显的微结构崩塌性破坏,该压力可称为微结构强度。一般可震陷黄土的微结构强度在 50 kPa 左右。表明该场地土体的微结构是比较稳定的,具有较好的抗震陷性能。

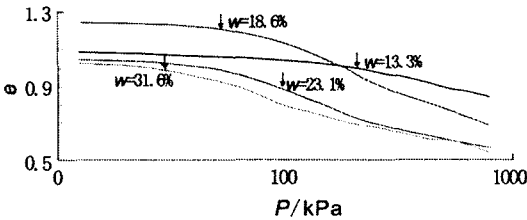


图 4 土样侧限压缩试验(刘旭,张振中提供)
Fig. 4 Loess compression test of the samples.

但是,微观结构的力学特性与含水量的关系密切,试验表明随土体含水量的增高,微结构强度将会

大幅度降低。由图 4 可以看出:含水量为 18.6% 时,微结构强度为 40 kPa;含水量为 23.1% 时,微结构强度为 30 kPa;含水量为 31.6% 时,微结构强度为 20 kPa。这里的曲线是已经整理过的,在实时曲线上破坏点是突降陡坎状的。由此可以明显看出,随含水量的增大,微结构强度降低的剧烈程度。

另外,土层的微结构强度与湿度(或饱和度)密切相关,四种湿度相对应的饱和度见图 5。图中可见随着含水量的增大,土样的饱和度也发生变化。3 m 土层在湿陷含水量以下盐类没有完全溶解以前具有较高的微结构强度,当试样湿度达到湿陷含水量(或饱和)时,盐类溶解,结构破坏,产生严重的湿化沉降。此类湿陷即是盐溶型湿陷。

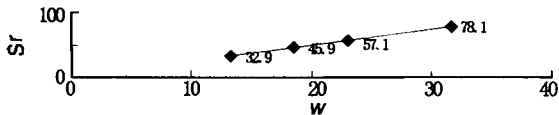


图 5 YD1 土样含水量和饱和度图

Fig. 5 Water containing and saturation of YD1 loess sample.

出镶嵌胶结的结构特征,但这些集粒和团块依然排列成架空孔隙,其孔径长轴在 20~150 μm ,短轴在 20~60 μm 左右的架空孔隙依然存在。笔者认为按高国瑞的分类方法^[2],该场地土的微结构类型应属于粒状、凝块、架空—镶嵌,胶结结构的Ⅶ型显微结构。这种显微结构架空孔隙依然存在,应仍有震陷性^[8]。

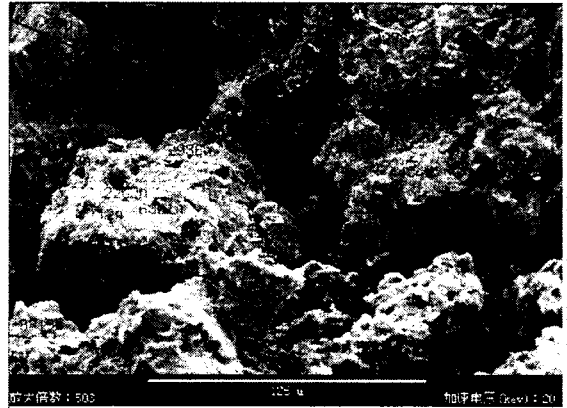


图 6 YD1 原状土微观图像

Fig. 6 Image of YD1 original loess sample.

5 场地土的结构性

土的结构性^[3]是指土中颗粒或土颗粒集合体以及它们之间的孔隙的大小,排列组合及联结等综合特征。下面从土的结构特征和孔隙特征两方面来讨论。

5.1 颗粒性状及显微结构类型

根据高国瑞^[2]对扫描电镜显微图像的研究结果,将我国黄土的骨架颗粒划分成粒状和凝块状两类,并同时存在,但一般西北地区黄土以粒状为主,粒状颗粒包括带棱角的和磨圆的碎屑矿物,外包粘粒的粗颗粒和全由粘胶微细碎屑碳酸盐胶结成的集粒。如图 6 所示,骨架颗粒主要是由粒径在 1~5 μm 之间的粘粒及 5.4 μm 以上的粉粒胶结成的集粒。在探井 3 m (YD1) 处挖取的土样中,孔隙直径一般在 30~143 μm 左右,多为大中孔隙;在凝块状的团块形集粒中,颗粒粒径范围多数是小颗粒的粉粒(5.4~9.16 μm)和粘粒(2.303~4.637 μm),另外还可看到集粒中有带棱角的粒径为 17 μm , 12 μm 的粒状颗粒和颗粒间的架空结构的点接触关系。

在所挖探井 6 m 处提取的土样 (YD2) (如图 7 所示),其骨架颗粒呈现凝块状集粒。这些集粒多由粒径在 5.4~9.6 μm 之间的粉粒和粒径在 4.6 μm 以下的粘粒胶结而成。这两种颗粒胶结成团块状,与少量粒状大颗粒连接在一起,有的团粒之间表现

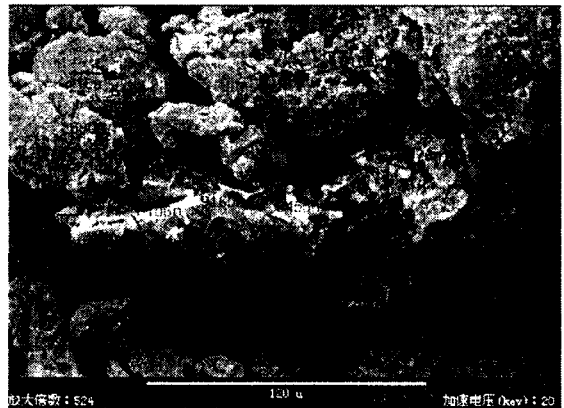


图 7 YD2 原状土微观图像

Fig. 7 Image of YD2 original loess sample.

5.2 孔隙分析

黄土中与骨架颗粒排列方式有关的孔隙^[1]有三种:大孔隙直径在 1 mm~1 cm,包括虫孔、根孔和裂隙,一般是水稳性结构,对震陷和湿陷影响不大。架空孔隙(500~10 μm)是由一定数量的骨架颗粒松散堆积形成的孔隙,其孔径远比构成孔隙的颗粒粒径为大。由于骨架颗粒多以棱边或棱角相互接触,接触面积小,很不牢固,当水浸入削弱颗粒间的连接强度时,或在压力作用下整个结构体系就迅速崩溃,造成湿陷,或震陷现象。黄土的湿陷,震陷等现象与该类架空孔隙直接相关^[8]。粒间孔隙(10

μm 以下)一般比周围颗粒的直径小,因此比较稳定,一般不会发生震陷、湿陷。

利用 kyky-2800 型扫描电子显微镜及其图像处理软件对研究场地土样做孔隙分析,结果如图 8,图 9 所示。其中四个孔隙的长轴直径都大于 $16\mu\text{m}$,均属于架空孔隙,而架空孔隙对黄土性质的影响应该很大。图 8 为对 YD1 原状样图像截取架空孔隙面积的图像,将其进行二值处理,得到灰度图像图 9。对图 9 进行数据分析后得孔隙分析结果表 5,四个架空孔隙面积总和为: $13\,528.84\mu\text{m}^2$ 。占图像总面积的 26.29%。经统计,震陷性黄土的架空孔隙面积一般在 20%~35% 左右。这里的孔隙可能是易溶盐在多次溶解,干燥,结晶后形成的架空孔隙。

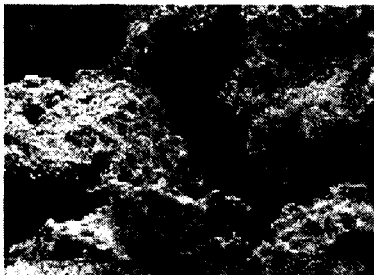


图 8 截取架空孔隙后的图像

Fig. 8 Picture after intercepted the trellis pore.

表 5 Yd1 架空孔隙分析结果(测量单位: μm)

孔隙	几何中心	面积	周长	圆形成度	长轴	短轴
0	(43.3, 30.5)	3 540.360	285.558	1.833	95.82	74.34
1	(153.4, 81.2)	6 696.479	515.364	3.156	150.26	150.26
2	(238.8, 118.0)	1 604.179	213.975	2.271	64.62	43.61
4	(23.4, 152.9)	1 687.818	218.774	2.257	69.35	58.32



图 9 灰度变换后的图像

Fig. 9 Picture after ash transform.

由于架空孔隙含量较高,以及硫酸盐胶结的影响,使得在低含水量下的场地土的震陷性较低,但在湿化后,架空孔隙周围骨架的可溶盐溶解后,架空孔隙崩溃性破坏,会产生很强的湿化震陷。

6 结果与讨论

(1) 本文利用电子显微镜对永登树屏村第四纪复杂黄土进行了微结构分析后认为,该场地土其微结构为粒状、凝块、架空—镶嵌胶结结构的Ⅶ型的显微结构。粒度分析表明,该土属于黄土状土粉质粘土。其大中孔隙有别于其它黄土的支架架空孔隙,周围多是粘粒及特殊盐份胶结成的凝块或集粒,在低含水量下,土体承载力较大,该场地土震陷量较小。

(2) 本场地土是一种富含硫酸盐及碳酸钙的盐渍土,在漫长成土过程中,在大气降水淋溶、风化以及湿度、温度变化、黄河阶地上的水土流失、沉积作用下,土中盐类不断的溶解、结晶,土体收缩、凝聚,形成了现在的棕红色、红黄相间、粘土含量较高的第四纪新近堆积黄土状粉质粘土。

(3) 因为土中富含易溶盐,当有水侵入使得土体湿度增大时,该场地土表现出了很强的湿陷性。同时,土中的盐分也造成了结构上的特殊性,盐份的溶解—结晶的松胀作用形成了特殊的架空式的孔隙,再加上粘粒含量大于 30%,粘粒和易溶盐的胶结,使该土的震陷量很小。但浸水后,其微结构强度剧烈降低,其抗震性能也降低。

(4) 由于场地土的特殊性质在工程上应予以重视。在工程施工中应注意这种盐渍土地基的稳定性,应按规范进行湿陷性地基处理,消除湿陷性,始终应注意采取防水措施,确保地基的安全。

【参考文献】

- [1] 钱鸿谱,王继唐,等.湿陷性黄土地基[M].北京:中国建筑工业出版社,1985.20—42.
- [2] 高国瑞.黄土显微结构分类与湿陷性[J].中国科学,1980,1203—1208.
- [3] 齐吉琳,谢定义,石玉成.土结构性的研究方法和现状[J].西北地震学报,2001,23(1):99—102.
- [4] 石玉成,李兰,刘红玫.黄土的震陷性及其微结构特征的关系研究[J].西北地震学报,2002,24(2):129—134.
- [5] 中华人民共和国建设部,国家质量监督检验检疫总局.湿陷性黄土地区建筑规范(GB50025—2004)[S].18—19.
- [6] 工程地质手册[M].北京:中国建筑工业出版社,1987.421.
- [7] 建筑抗震设计规范(GB50011—2001)[S].北:中国建筑工业出版社,2001.
- [8] 张振中.黄土地震灾害预测[M].北京:地震出版社,1999.2—20,100—102.
- [9] 王兰民.黄土动力学[M].地震出版社,2003.40—53,62—66.