

文章编号: 1004—5589 (2009) 01—0120—07

辽宁阜朝高速公路路基黄土的工程地质性质

周波¹, 王常明¹, 匡少华², 张静涛¹

1. 吉林大学 建设工程学院, 长春 130026; 2. 辽宁省交通勘测设计院, 沈阳 110005

摘要: 对辽宁阜朝—朝阳段高速公路路基黄土进行的物理力学试验及物质组成和结构的分析测试结果表明: 辽西黄土在粒度组成和化学成分上与其他地区有较大差异, 如 SiO_2 、 Al_2O_3 含量明显高于其他地区。微结构以支架大孔微胶结构、支架大孔-镶嵌微孔半胶结构、絮凝状胶结构和凝块状胶结构 4 种类型为主, 并具有较好的物理力学性质: 干密度为 $1.15 \sim 1.76 \text{ g/cm}^3$, 天然含水率平均值为 18.31%, c 值为 $7.5 \sim 86.3 \text{ kPa}$, φ 值为 $14.0 \sim 29.9^\circ$, 湿陷性黄土段以中等湿陷性为主。

关键词: 黄土; 湿陷性; 微观结构; 工程地质性质; 辽宁阜朝高速公路

中图分类号: TU444 文献标识码: A

Engineering geological properties of roadbed loess in Fuxin-Chaoyang highway of Liaoning

ZHOU Bo¹, WANG Chang-ming¹, KUANG Shao-hua², ZHANG Jing-tao¹

1. College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun 130026, China;

2. Liaoning Jiaotong Investigation and Design Institute, Shenyang 110005, China

Abstract: The results of physical mechanical tests, material components and structures of roadbed loess in Fuxin-Chaoyang highway of Liaoning show that Liaoxi loess is different from other areas' in particle composition and chemical component, such as the contents of SiO_2 and Al_2O_3 are higher than other areas. The microstructures include bracket particles and macroporous micro-cemented structure, bracket particles and macroporous-inlay particles and microporous half-cemented structure, flocculated-cemented structure and cotted-cemented structure. The loess has preferable physical and mechanical properties: dry density is $1.15 \sim 1.76 \text{ g/cm}^3$, average content of natural water is 18.31%, c is $7.5 \sim 86.3 \text{ kPa}$, φ is $14.0 \sim 29.9$ degree, etc., and the collapsible loess mainly belongs to medium-collapseability.

Key words: loess; collapsibility; microstructure; engineering geological characteristics; Fuxin-Chaoyang expressway in Liaoning

0 引言

中国对黄土系统的研究始于解放后, 相对国外有些滞后。目前对黄土的研究主要集中于黄土连续区域, 并在各个方面都取得了一大批具有理论意义

和实用价值的成果^[1-5], 但对于诸如辽宁西部等边缘地区的黄土研究则相对较少^[6]。深入研究黄土的工程地质性质, 对高速公路黄土路基的设计与施工具有重要的意义。笔者结合朝阳—阜新段高速公路工程, 通过各种试验手段, 对辽西地区黄土的工

收稿日期: 2008-08-18; 改回日期: 2008-10-20

基金项目: 辽宁省科技厅重点项目

程地质性质进行了较系统的研究, 研究成果将为进一步研究辽西黄土的工程特性及地基处理提供参考。

1 中国黄土及研究区黄土分布概况

中国黄土分布范围之广, 面积和厚度之大, 以及地层层序之完整, 均是举世闻名的。在甘肃的中部和东部, 宁夏南部, 陕西的西北部和中部, 山西和河南的西部及其他一些地区, 黄土连续分布面积约 44 万 km^2 , 厚度从数十米到 400 m 不等^[7]。此外, 新疆、山东、辽宁、宁夏、青海、河北以及内蒙古的部分地区也有不连续分布^[6]。东北地区黄土状土堆积物主要分布在辽西和昭乌达盟地区, 辽东地区仅有少量堆积, 从早更新世到晚更新世本区都有黄土堆积, 厚度一般为几米到 10 余米, 最厚

不超过 30 m。成因类型以坡积-洪积为主, 有少量残积和风积作用。辽西黄土则主要分布在朝阳和阜新地区, 位于朝阳市西的宁城以及西北的赤峰均为黄土分布区^[7]。

本文试验土样取自铁岭至朝阳高速公路阜新-朝阳段 (K319+890 m ~ K506+890 m) 沿线各标段, 深度为 1~20 m 不等,¹⁴C 测试结果和相关文献说明本区段黄土为晚更新世冲洪积次生黄土^[7]。该区黄土由于生成时期相对较晚, 受沉积条件等原因限制, 沿路段局部地表以卵石、碎石和含碎石亚黏土等为主 (如 K454+150 ~ K455+810 段中), 因此, 其分布在平面上具有不连续性。在剖面上, 黄土厚度则随地貌的变化而有所不同。为深入研究该区黄土的工程特性, 笔者通过大量试验, 得到了黄土的物理力学性质指标、物质组成及结构特征。

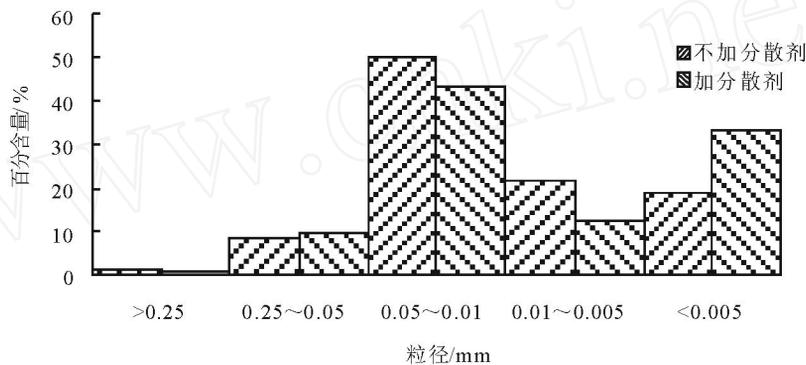


图 1 辽西黄土粒度成分分布直方图

Fig. 1 Histograms of particle composition of loess in Liaoxi

2 基本物质组成

2.1 粒度成分

对试样按添加分散剂和未添加分散剂两种情况进行颗粒成分分析 (图 1)。加分散剂的颗粒分析试验中, 粉粒含量集中在 58%~73%, 黏粒含量集中在 24%~39%, 未加分散剂的颗粒分析试验中, 粉粒含量集中在 81%~88%, 黏粒含量集中在 10%~16%。对比典型黄土^[8,9], 粉粒和黏粒的含量均较高。

2.2 化学成分

黄土的化学成分分析有助于了解黄土的物质成分特征及工程地质性质。黄土中的主要化学成分有 SiO_2 、 Al_2O_3 、 CaO 、 Fe_2O_3 、 MgO 、 K_2O 、 Na_2O 、 FeO 、 MnO 、 TiO_2 和 P_2O_5 等, 其中以 SiO_2 含量最

高, Al_2O_3 及 Fe_2O_3 含量次之。据测试的 19 个化学全分析试验结果 (表 1) 表明, SiO_2 含量为 61.9%~72.10%, 平均为 66.50%; Al_2O_3 的含量为 12.41%~15.66%, 平均为 13.83%; CaO 和 Fe_2O_3 的平均含量分别为 3.02% 和 4.08%, 这与黄土的主要矿物石英、长石的含量情况一致。其次为 MgO 、 K_2O 和 Na_2O , 而 FeO 、 MnO 、 TiO_2 和 P_2O_5 含量甚微。

表 2 为中国黄土广泛分布地区的黄土 (主要为 Q_3 的黄土) 化学成分统计表^[10] (数据有删节), 通过表 1 与表 2 的对比分析可以发现, 辽西地区黄土的化学成分与中国其他地区黄土的化学成分的平均值存在一定差异, 如辽宁西部地区黄土的 SiO_2 、 Al_2O_3 含量要明显高于表 2 中三个地区的黄土, 其他成分除 MnO 、 MgO 外, 也均高于表 2 中

表 1 辽西黄土化学全分析结果

Table 1 Results of chemical entire analysis of loess in Liaoxi / (B) /10⁻²

分析量	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O
最小值	61.90	12.41	2.70	0.17	0.44	0.10	0.07	0.95	1.03	2.44	1.31
最大值	72.10	15.66	4.84	0.70	0.70	0.24	0.16	6.12	1.86	2.93	2.82
平均值	67.44	13.27	3.70	0.40	0.55	0.16	0.08	2.84	1.39	2.68	2.35

表 2 其他地区黄土化学全分析结果

Table 2 Results of chemical entire analysis of loess in other areas / (B) /10⁻²

地区	桩号	地质年代	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O
甘肃	兰州九洲台	Q ₃	59.57	11.70	2.32	1.50	0.61	0.15	0.08	8.06	2.92	2.30	2.24
	兰州五泉山	Q ₃	59.13	11.45	2.40	1.58	0.59	0.12	0.09	8.23	3.22	2.34	1.85
	靖远若笠哈巴沟	Q ₃	58.00	11.37	3.04	1.29	0.64	0.12	0.07	9.25	2.56	2.25	1.80
	庆阳西峰火巷沟	Q ₃	58.34	12.31	2.94	1.40	0.58	0.16	0.08	8.12	2.77	2.09	2.20
山西	吉县宏渠沟	Q ₃	58.58	11.97	2.90	1.23	0.59	0.14	2.44	8.71	0.07	1.75	2.25
陕西	武功尚家坡	Q ₃	56.79	14.73	5.11	0.40	0.72	0.15	2.27	2.03	0.08	1.63	2.53
	榆林双山	Q ₃	63.61	11.93	3.07	0.90	0.58	0.13	0.08	6.11	2.06	2.31	2.36
	靖边席麻湾破山	Q ₃	60.35	11.24	2.69	1.32	0.55	0.13	0.08	8.22	2.51	2.01	1.98
	洛川坡头	Q ₃	60.35	11.24	2.69	1.32	0.55	0.13	0.08	8.22	2.51	2.01	1.98
	平均值	Q ₃	60.03	12.07	3.09	1.18	0.61	0.14	0.56	7.13	2.19	2.09	2.15

的三个地区，尤其是 SiO₂含量在辽西地区最高可达 72.1%。由此可见，辽西地区的黄土在化学成分上与西北地区的黄土还存在较大的差异。

2.3 可溶盐

黄土中可溶盐类含量的多少，对黄土的工程地质性质有很大的影响。因此，了解可溶盐类的种类和含量，对评价黄土的工程地质性质有着重要意义。黄土中的可溶盐可分为：易溶盐，以 Na₂CO₃、NaCl、Na₂SO₄和 KCl等为代表；中溶盐，以 CaSO₄·2H₂O、CaSO₄为主；难溶盐，最主要的成分为 CaCO₃，其中 MgCO₃的含量不到 CaCO₃含量的 1%，故分析时将二者合起来计算含量^[10]。本次试验中，取试样样本数为 19，用以进行易、中、难溶盐含量的测试（表 3）。结果显示，易溶盐总含量为 0.026% ~ 0.130%，平均值 0.047%；中溶盐中 CaSO₄·2H₂O 含量为 0 ~ 0.074%，平均值 0.029%；难溶盐中 CaCO₃ 含量为 0.056% ~ 8.194%，平均值 2.46%。西北地区黄土易溶盐总含量平均值为 0.32%，CaSO₄·2H₂O 的总平均含量为 0.30%，CaCO₃ 的总平均含量为 10.34%，有

些地方高达 25.50%。经分析，辽西黄土可溶盐的含量与西北地区黄土有较大差距，其中 CaCO₃含量较低，而其他两种可溶盐的含量相差达一个数量级，由此可见，这两个地区的黄土在成因上有较大的不同。

表 3 辽西黄土中可溶盐测试结果统计表

Table 3 Statistics results of soluble salt of loess in Liaoxi

	/%			
可溶盐	易溶盐	中溶盐	(CaSO ₄ ·2H ₂ O)	难溶盐 CaCO ₃
最小值	0.026		0.000	0.056
最大值	0.130		0.074	8.194
平均值	0.047		0.029	2.460

3 物理力学性质

3.1 物理性质

试样呈淡灰黄色或淡灰褐色，无层理，孔隙

多，肉眼可见，垂直节理发育。对各标段黄土进行相应的物理力学试验，获得土样的基本物理力学性质指标如表 4 所示，其中辽西黄土含水率平均值为 18.31%，天然密度集中在 1.31 ~ 2.03 g/cm³，干密度为 1.15 ~ 1.76 g/cm³，液限为 22.00% ~ 42.60%，塑限为 16.83% ~ 24.23%，塑性指数最

大值为 38.80，孔隙比为 0.53 ~ 1.36。

3.2 力学性质

本区段黄土虽然属晚更新世^[7]，但由于其天然含水率变化大，故抗剪强度指标 c_c 的变化也较大（表 4）。表 5 为其他地区黄土的内聚力和内摩擦角值^[10,11]。

表 4 辽西黄土基本物理力学性质试验成果统计表

Table 4 Statistics results of mechanical property of loess in Liaoxi

	含水率 w/%	天然密度 /g · cm ⁻³	干密度 d/g · cm ⁻³	孔隙比 e	饱和度 Sr	液限 wL%	塑限 wP/%	塑性指数 IP/%	液性指数 IP/%	内聚力 c/Kpa	内摩擦角 / °
样品个数	1993	1976	1976	1976	1976	1799	1799	1993	1474	1148	1148
最大值	33.13	2.03	1.76	1.36	86.71	42.60	24.23	38.80	0.60	86.3	29.9
最小值	2.62	1.31	1.15	0.53	8.04	22.00	16.83	5.17	-	7.5	14.0
平均值	18.31	1.70	1.50	1.02	50.84	31.05	20.08	6.90	-	24.1	21.8

注：液性指数的试验中，对 1474 个样品进行试验，其中小于零的试样个数为 1358 个。

表 5 其他地区黄土的 c_c 、 ϕ 值

Table 5 c_c of loess in other areas

地点	c_c /kPa	ϕ / °
兰州	25	20
西安	27	21.5
洛阳	27	18
西宁	25	23.5
靖边、榆林	40	24.7
太原杨家峪	96.5	26

通过表 4 和表 5 的对比分析可以发现，辽西黄土与其他地区黄土的 c_c 值、 ϕ 值相差不多，说明虽然该区黄土的形成时代较晚，但其强度指标值较高，这与其化学成分、颗粒成分和结构等有关。

4 黄土的湿陷特性

湿陷性黄土是指在一定压力下受水浸湿，土结构被迅速破坏，并产生显著附加下沉的黄土。影响黄土湿陷性的因素总体上可归为两大类：内因和外因。外因主要是压力、水和温度的作用；内因则是一个非常复杂的物理化学过程。湿陷的发生，是由土内部固有的特殊因素和外界造成的适当条件共同作用的结果。研究区内具有湿陷性黄土的地段中，以中等湿陷性黄土居多，部分地段为轻微湿陷性，

少数地段为强烈湿陷性。由湿陷系数与土样位置关系图（图 2）可以看出，湿陷系数随公路里程的变化，呈波浪形变化，与黄土分布的地貌类型密切相关。

在黄土的物质组成中，与湿陷特性有着密切关系的是土中起胶结作用的物质。一般认为，除了黏土矿物外，在黄土中起胶结作用的主要有不同的盐类，其中又细分为易溶盐、中溶盐和难溶盐，另外就是游离氧化物硅、铁、铝等。湿陷系数与可溶盐总量的关系和游离硅、铁、铝总量的关系分别如图 3、4 所示。从图中可以看出，湿陷系数的大小与全盐总量呈正相关的线性关系，随着含盐总量的增加，湿陷系数逐渐增大，即湿陷性逐渐增强。而湿陷系数则与游离氧化物硅、铁、铝总量呈线性负相关。

5 黄土的微观结构特征

构成黄土结构体系的是骨架颗粒，扫描电镜下观察到的黄土骨架颗粒可划分为单粒状、集粒状和凝块状。粒状颗粒一般是一些带棱角和磨圆的碎屑矿物，而外包黏粒的粗颗粒是由黏胶微碎屑胶结而成的集粒，凝块则是由柔性集粒进一步软化合并而成的。辽西原状黄土骨架颗粒为单粒状、集粒状和凝块状三种形式共存，粒状颗粒中单个的粉粒以由黏粒微细碎屑胶结而成的集粒居多。

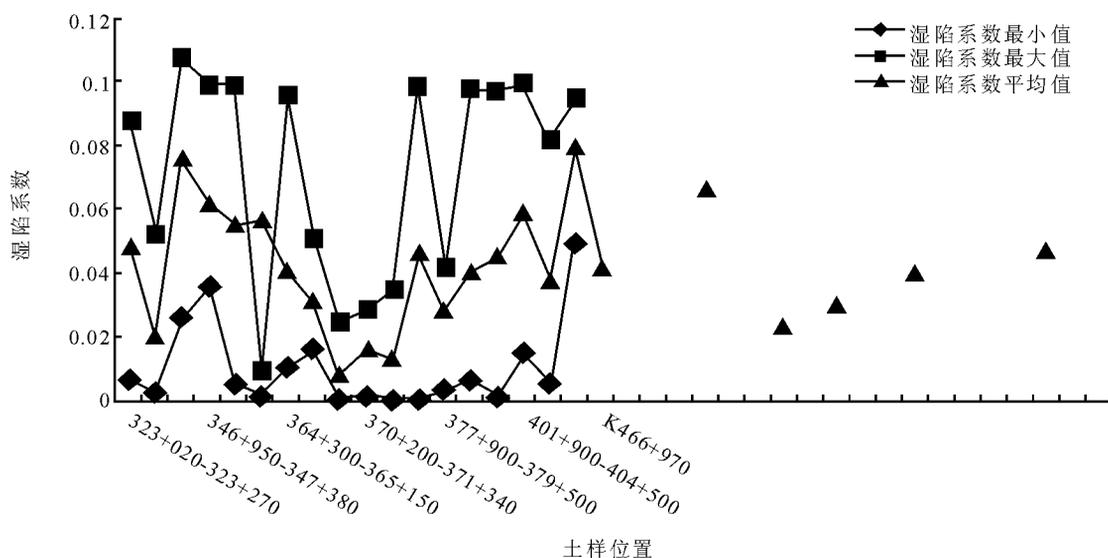


图 2 湿陷系数与土样位置关系图

Fig. 2 Connection between collapsible coefficient and soil location

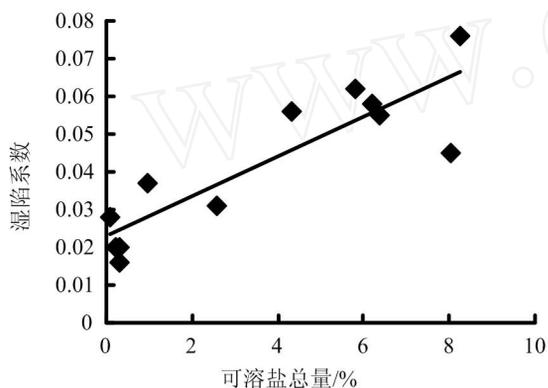


图 3 湿陷系数与可溶盐总量的关系

Fig. 3 Connection between collapsible coefficient and total soluble salt

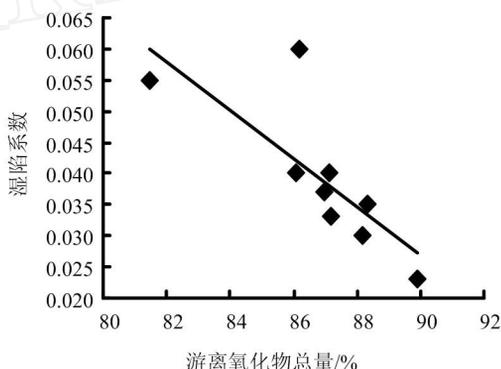


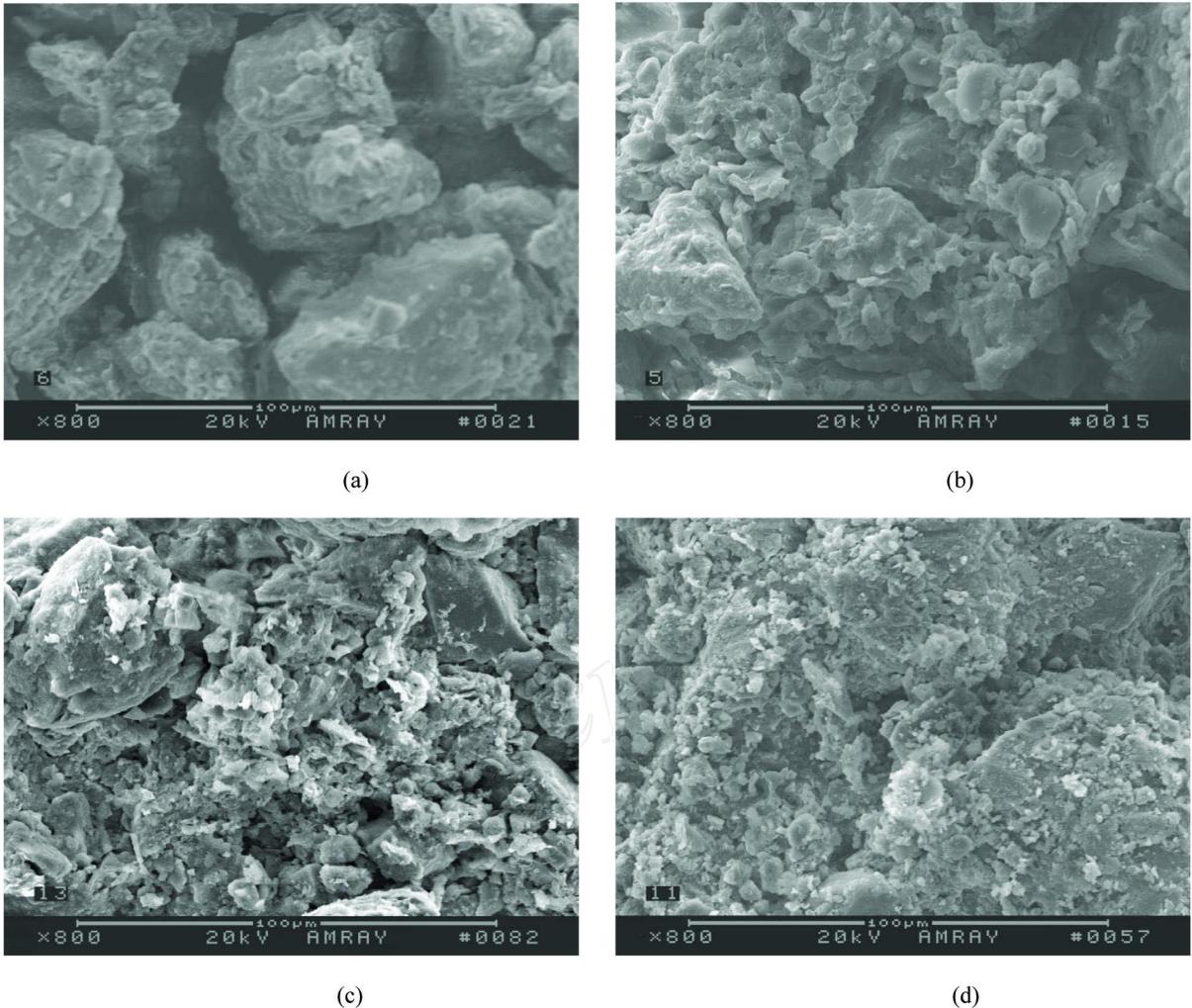
图 4 湿陷系数与游离氧化物总量的关系

Fig. 4 Connection between collapsible coefficient and total dissociative oxide

黄土中孔隙发育。研究区内浅层黄土的大孔隙和中孔隙数量要大于深层黄土，且浅层黄土中含有较多的虫孔和根孔等，虫孔最大直径达 10 mm。深层黄土的小孔隙和微孔隙数量要多于浅层黄土，说明浅层黄土较疏松，存在较多的支架孔隙和其他大孔隙，深部黄土结构较致密，存在更多的微、小孔隙。

沿线黄土在深度 20 m 内的微观结构类型有：支架大孔微胶结结构、镶嵌微孔微胶结结构、支架大孔半胶结结构、镶嵌微孔半胶结结构、絮凝状胶

结结构和凝块状胶结结构，且以支架大孔微胶结结构、支架大孔-镶嵌微孔半胶结结构、絮凝状胶结结构和凝块状胶结结构 4 种类型为主（图 5）。浅部黄土的结构较松散，存在支架大孔微胶结结构，深度黄土的结构较为密实，主要为絮凝状胶结结构和凝块状胶结结构。随着深度的增加，土体从松散逐渐趋于密实，土中孔隙逐渐减少，土颗粒从粒状逐渐聚集成凝块状，土粒间排列从微胶结结构逐渐变为胶结结构，稳定性逐渐提高，湿陷性逐渐降低。



(a) 支架大孔微胶结结构 (K312+890, 深度 2 m); (b) 镶嵌微孔半胶结结构 (K312+890, 深度 2 m)
 (c) 絮凝状胶结结构 (K345+940, 深度 10 m); (d) 凝块状胶结结构 (K345+960, 深度 20 m)

图 5 辽西黄土中微结构的主要类型

Fig. 5 Main types of loess microstructure in Liaoxi

6 结论

(1) 该区黄土粉粒和黏粒含量较高, 其中 SiO_2 、 Al_2O_3 及 Fe_2O_3 含量最高, CaO 含量偏低, 可溶盐含量较低, 总体上与其他地区黄土相差较多。

(2) 该区黄土主要呈淡灰黄色和淡灰褐色, 干密度 $1.15 \sim 1.76 \text{ g/cm}^3$, 孔隙比 $0.53 \sim 1.36$, 液限 $22.00\% \sim 42.60\%$, 塑限 $16.83\% \sim 24.23\%$, 塑性指数 $5.17 \sim 38.80$, 天然含水率最小值为 2.62% , 平均值为 18.31% 。抗剪强度指标 c 值为 $7.5 \text{ kPa} \sim 86.3 \text{ kPa}$, ϕ 值为 $14.0 \sim 29.9^\circ$ 。

(3) 该区黄土湿陷特性明显, 以中等湿陷黄土为主, 部分为轻微湿陷性, 少量为强烈湿陷性。

(4) 黄土结构类型以支架大孔微胶结结构、支架大孔-镶嵌微孔半胶结结构、絮凝状胶结结构和凝块状胶结结构 4 种类型为主。

综上所述, 辽西地区的黄土工程地质性质较好, 但因其具有湿陷性, 在工程实践中宜根据具体工程条件采取相应的防护和处理措施。

参考文献:

[1] 王兰民, 马巍, 陈正汉, 等. 特殊土木工程中的关键

- 科学问题研究与展望 [C] //中国岩石力学与工程学会. 第二届全国岩土与工程学术大会论文集 (下册). 北京: 科学出版社, 2006: 216-230
- WANG Lan-min, MA Wei, CHEN Zheng-han, et al On research and its prospect of key problems in special soil engineering [C] // Chinese Society for Rock Mechanics and Engineering Proceeding of the 2nd National Scientific Conference on Rock-soil and Engineering (2nd). Beijing: Science Press, 2006: 216-230
- [2] 朱元青, 陈正汉. 研究黄土湿陷性的新方法 [J]. 岩土工程学报, 2008, 30 (4): 524-528
- ZHU Yuan-qing, CHEN Zheng-han A new method of studying collapsibility of loess [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30 (4): 524-528
- [3] 王生新, 韩文峰, 谡文武, 等. 冲击压实路基黄土的微观特征研究 [J]. 岩土力学, 2006, 27 (6): 939-944
- WANG Sheng-xin, HAN Wen-feng, CHEN Wen-wu, et al Microstudy on roadbed loess improvement by impact compaction technology [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27 (6): 939-944
- [4] 杨超, 崔玉军, 黄茂松, 等. 循环荷载下非饱和结构性黄土的损伤模型 [J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27 (4): 805-810
- YANG Chao, CUI Yu-jun, HUANG Mao-song, et al Damage model for unsaturated structural loess under cyclic loading [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27 (4): 805-810
- [5] 邢玉东, 王常明, 张立新, 等. 阜新一朝阳高速公路段湿陷性黄土路基处理方法及效果 [J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2008, 38 (1): 98-104
- XING Yu-dong, WANG Chang-ming, ZHANG Li-xin, et al Subgrade treatment effects for collapsible loess subgrade of Fuxin-Chaoyang in west of Liaoning Province [J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2008, 38 (1): 98-104
- [6] 陕西省计划委员会. GB 50025-2004湿陷性黄土地区建筑规范 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004
- Shanxi Province Planned Committee GB 50025-2004 code for building construction in collapsible loess regions [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2004
- [7] 张宗祜, 张之一, 王芸生. 中国黄土 [M]. 北京: 地质出版社, 1989: 1-192
- ZHANG Zong-hu, ZHANG Zhi-yi, WANG Yun-sheng China loess [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1989: 1-192
- [8] 李保雄, 李永进. 兰州马兰黄土的工程地质特性 [J]. 甘肃科学学报, 2003, 15 (3): 31-34
- LI Bao-xiong, LI Yong-jin The engineering geological properties of Malan loess in Lanzhou [J]. Journal of Gansu Sciences, 2003, 15 (3): 31-34
- [9] 路晶芳, 向树元, 江尚松, 等. 西藏日喀则末次冰期风成黄土粒度分析及其意义 [J]. 干旱区资源与环境, 2008, 22 (5): 80-85
- LU Jing-fang, XIANG Shu-yuan, JIANG Shang-song, et al Analysis of soil granularity at Dazhuka Country, Rikeze [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2008, 22 (5): 80-85
- [10] 王永焱, 林在贵. 中国黄土和结构特征及物理力学性质 [M]. 北京: 科学出版社, 1990: 62-64
- WANG Yong-yan, LIN Zai-guan Structure and physical and mechanical properties of Chinese loess [M]. Beijing: Science Press, 1990: 62-64
- [11] 郑晏武. 中国黄土的湿陷性 [M]. 北京: 地质出版社, 1982: 60
- ZHENG Yan-wu Collapsible of Chinese loess [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1982: 60