

黄土的物理力学指标与黄土易损性分析研究

段汝文 王 峻 李 兰

(国家地震局兰州地震研究所, 兰州 730000)

摘要 作者多年来在黄土地区进行了考察和勘探并采集了各类黄土样品, 在室内进行了黄土的物理力学性质的试验研究, 取得了大量的关于黄土特性的资料. 根据这些研究结果, 探讨了黄土的物理力学指标与黄土易损性的关系及其区域分布规律, 从而研究它与黄土地区的地质灾害和震害的关系.

关键词: 地质灾害 震害分布 黄土 黄土易损性 物理力学指标

1 前言

黄土本身的易损性大小对于黄土地区的地质灾害, 尤其是地震灾害分布的影响是很大的. 举例来说, 1654 年发生在天水的 8 级地震和 1718 年发生在通渭的 7.5 级地震都引发了大量的滑坡. 两次地震震级相差不大, 但是据统计大于 500 m 的滑坡后者有 337 个而前者仅有 59 个^[1]. 产生这种差别的原因主要是两地土质条件的影响. 这两个地区的地形、地貌基本相似, 大多为黄土梁峁区, 间有河流阶地. 从工程地质图上可以看到, 通渭地区为自重湿陷性黄土区, 而天水地区则为非自重黄土湿陷区. 我们对两个区的黄土进行了考察和勘探取样, 经过试验发现两地黄土的物理力学指标相差较大, 如表 1 所示.

表 1 的资料表明, 黄土的物理力学指标与黄土分布区的地质灾害(包括震害)的形成有着十分密切的关系. 可以说不同的物理力学指标代表着黄土易损性的大小和程度. 因此, 研究黄土的物理力学指标与黄土易损性的关系对于研究黄土地区的灾害问题是很重要的. 本文研究了如黄土的密度、含水量、孔隙比、结构特性、塑性指数和强度等几个主要的物理力学指标与黄土易损性的关系及其区域分布特性.

2 黄土的天然容重(即密度)与易损性的关系

2.1 黄土的天然容重(即密度)的概念

黄土的天然密度反映了土的前期固结度, 前期固结好的, 年代久远的黄土的密度就大. 一般来说, 密度大的黄土, 强度就大, 也就是说它在各种外力和内力的作用下其易损性就小, 相反则易损性大. 黄土的天然密度与黄土的工程性质有很大关系, 它影响黄土的湿陷性、压缩性及强度等等, 所以它是一个重要的物理性质指标.

2.2 黄土天然密度的影响因素及区域分布

黄土的天然密度受诸多因素的影响. 首先是黄土形成的年代, 它直接影响前期固结度, 年

代久远的,固结度就好,密度也大.其次是黄土的埋深,即黄土的覆盖层厚度,一般来说在同一地点埋深愈大的土,密度愈大.其密度还受土的结构、物质组成、沉积环境及含水量等因素的影响.为了排除一些影响因素,通常可以用黄土的干密度来衡量土的性质.

表 1 通渭、天水地区黄土的物理力学参数

取土地区	密度 γ (kN/m^3)	含水量 $\omega(\%)$	孔隙比 e	内聚力 $C(\text{kPa})$	内摩擦角 φ
通渭	12.94 ~ 14.21	8 ~ 16	1.134 ~ 1.297	14.7 ~ 34.3	$15^\circ \sim 24^\circ$
天水	14.14 ~ 17.64	10 ~ 26	0.722 ~ 1.038	29.2 ~ 100.0	$18^\circ \sim 32^\circ$

经过我们多年的野外考察和勘探取样及室内外试验研究,积累了一些地区的资料,现将不同地区黄土的一些主要物理力学指标列于表 2.表 2 的数据大部分是用 5 m 左右深度的土样试验得出的,同时也统计了少量 10 ~ 15 m 深的土样资料.数据较多的,除了给出其变化范围外还给出了平均值.资料少的仅给出了一个变化范围.

表 2 中黄土密度的数据表明,它具有明显的区域分布特性,陇东和西安及关中地区黄土的密度明显大于陇西地区,例如西安、宝鸡、渭南和天水等地区黄土的天然密度平均在 $16.0 \text{ kN}/\text{m}^3$ 以上,其干容重平均在 $14.0 \text{ kN}/\text{m}^3$ 左右.而陇西地区黄土的天然密度则普遍偏小,平均为 $14.5 \text{ kN}/\text{m}^3$,而干密度平均仅为 $12.5 \text{ N}/\text{m}^3$.这表明了黄土的区域分布特点.

2.3 黄土的密度指标与易损性的关系

前面已提到黄土的密度是土的物理性质中的一个重要指标.它的大小与土的强度、湿陷、震陷等特性都有密切的关系.当排除含水量等影响因素后,该指标愈大黄土的强度就愈大,在各种地质营力作用下其易损性就小.因此我们在作黄土地区的灾害预测时可把该参数作为判别其易损性的一个定量指标.

3 黄土的含水量与易损性的关系

黄土的含水量用土中的水重与固体重之比值来表示.黄土的含水量的大小直接影响到土的性质.当然各地黄土含水量的大小与当地的水文气象条件密切相关.就总体而言,当其他物理性质比较接近时,含水量大的土压缩性大,强度相对降低,震动时震陷也会增大.若达到饱和状态,陇西地区的黄土还会产生液化,所以含水量大的土易损性相对较大.

4 黄土的孔隙比与易损性的关系

土的孔隙比是反映土的疏密程度的指标,是土中孔隙与固体体积之比.从表 2 统计的结果看,由东到西黄土的孔隙比是增大的.尽管东边黄土的含水量普遍大于西边,可是其孔隙比仍比西边小,这说明东西两地黄土的疏密程度的差异.陇西地区的黄土孔隙比都大于 1,说明是比较疏松的.而陇东和关中等地其孔隙比基本上小于 1.这些现象也表明黄土的结构及胶结程度的差别.我们曾作过这些地区的黄土的显微结构的电镜扫描分析研究.研究结果表明,陇西黄土颗粒之间基本上呈粒状接触架空大孔结构,很少胶结.而陇东及关中地区大部分为粒状-集粒架空接触絮状胶结或凝块-粒状镶嵌胶结结构.这些都表明,黄土的结构差异也影响黄土的易损性的大小.孔隙比的大小和结构上的差别对黄土本身的强度、湿陷性以及动力特性都有很大影响.孔隙比大的大孔架空结构的黄土在外力和内力作用下容易破坏,其易损性大,相反,

孔隙比小的结构胶结程度好的黄土在相同力的作用下破坏程度较轻, 易损性较小.

表 2 黄土的物理力学特性参数

取土地区	密 度		干密度		含水量		孔隙比		塑性指数		抗剪强度		标准湿陷		自重湿陷		湿陷起始压力	
	γ		γ_d		ω		e		I_p		C Φ		系数 $\bar{\alpha}$		系数 $\bar{\alpha}_s$		P_{sh}	
	(kN/m ³)		(kN/m ³)		(%)						(kPa) (度)		(%)		(%)		(kPa)	
	范围	平均	范围	平均	范围	平均	范围	平均	范围	平均	范围	平均	范围	平均	范围	平均	范围	平均
静宁	13.54	14.03	11.58	12.16	14.3	15.12	1.180	1.194	8.7	9.0	8.0	15.5	6.46	10.46	5.0	6.3	20.0	38.9
	~14.91		~13.24		~16.5		~1.320		~9.4		~43.0		~22.3		~12.68		~63.0	
西吉	13.64	14.03	11.97	12.26	14.3	14.99	1.038	1.179	9.7	10.2	38.0	17.2	5.45	8.92	2.2	3.0	55.0	60.0
	~15.11		~13.05		~15.5		~1.228		~10.1		~45.0		~18.3		~12.38		~65.0	
华家岭	14.72	14.81	11.87	12.16	18.4	21.45	1.177	1.200	10.5	11.3	34.0	16.9					65.0	
	~14.91		~12.36		~24.5		~1.223		~12.0		~37.0		5.78		1.1			
定西	12.56	13.39	11.38	11.97	10.0	11.85	1.117	1.231	10.6	10.7	45.0	22.5	10.03	11.57	1.3	5.9	35.0	60.0
	~14.22		~12.56		~13.7		~1.345		~10.8				~13.11		~10.4		~85.0	
榆中	12.95	13.49	11.67	12.51	4.8	7.70	0.985	1.106	8.5	9.9	8.0	28.0	4.69	7.64	0.9	7.1	4.0	53.0
	~14.03		~13.34		~10.6		~1.227		~11.4		~21.0		~36.0		~10.58		~102	
兰州	13.54	14.22	11.97	13.05	6.0	8.72	0.920	1.055	7.8	10.6	13.0	15.1 ~27.5	2.64	7.00	1.0	5.4	10.0	52.0
	~15.70		~13.73		~13.0		~1.230		~13.4		~50.0		~12.00		~9.1		~100.0	
西宁	14.52		12.95		12.3		0.915		8.4		8.0	16.0	1.14		0.7		16.0	
	~16.48		~13.93		~18.0		~1.061		~9.2		~34.0		~21.0		~10.76		~173.0	
渭南	13.93		12.07		15.0		0.835		8.6				0.66		0.3		62.0	
	~17.56		~14.32		~22.1		~1.178		~9.6				~5.00		~4.0		~316.00	
西安	14.72	16.28	12.26	13.54	14.0	22.33	0.730	0.993	9.0	12.0	20.0	17.0						
	~18.74		~15.60		~25.7		~1.200		~17.3		~78.5		~32.4					
宝鸡	15.11	15.70	12.75	14.13	14.0	19.35	0.700	0.899	9.0	11.3	63.0	12.0	0.71	2.19	0.4	1.1	52.0	151.3
	~19.62		~16.19		~24.0		~1.165		~14.4		~192.0		~22.1		~3.23		~310.0	
天水	44.41	16.00	12.01	13.54	10.0	19.20	0.722	0.958	8.0	9.9	39.2	20	0.61		0.56		65	
	~18.15		~15.30		~26.0		~1.088		~11.4		~100.0		~32.0		~6.27		~210.0	
西峰	14.03		12.16		15.1		1.194		8.7		25.0	20.0					33.7	
											~28.0		~21.0					
宁县	15.21		12.65		20.1		1.101		8.6		35.8	15.0					64.3	
											~42.0		~16.3		6.22			
通渭	12.94	13.58	11.18	12.05	8.0	13.60	1.134	1.216	8.7	9.1	14.7	15.0	11.72	12.20	7.5	8.2	22.0	27.5
	~14.21		~12.94		~16.0		~1.297		~9.4		~34.3		~24.0		~12.68		~33.0	
会宁	13.54		12.16		11.6		1.194		10.0				10.10		9.6		25.0	

5 黄土的塑性指数与易损性的关系

塑性指数的物理意义是粘性土处于可塑状态时含水量变化的最大范围. 如果一种粘性土的流限与塑限之间范围大则塑性指数大, 说明这种土能吸附的结合水多, 即土的颗粒细, 或矿物成分吸水能力强. 因此, 塑性指数可反映黄土的工程性质. 塑性指数大的土粘粒含量高, 相应的强度也大, 其抗震性能也好. 由东到西黄土的粘粒含量逐渐减小, 而粉粒含量则不断增多, 所以塑性指数也由大变小. 塑性指数也可作为判别饱水黄土和粉质土是否液化的标志之一, 通常塑性指数低于 10 的土发生液化的可能性就大, 所以它仍是黄土易损性判别的指标之一, 同时区域分布也很明显. 关中、陇东和陇西是有差别的.

6 黄土的强度与易损性的关系

黄土的强度无疑是黄土的一个重要的力学指标. 它直接关系到地基承载力的大小和地基的稳定性, 同时也直接影响土坡的稳定性, 包括天然土坡、人工挖方、路堤和土坝等的稳定性. 所以它更是判断黄土易损性的一个重要指标.

黄土属于粘性土, 它的抗剪强度包括两部分. 一是来源于土粒之间的摩擦力, 一般用内摩擦角 φ 表示. 除内摩擦力外, 土还具内聚力. 内聚力主要来源于土颗粒之间电分子吸引力和土中天然胶结物质对土粒的胶结作用, 通常用内聚力或凝聚力 C 来表示. 我们在多年的工作中对黄土地区由东向西作了上百组黄土的静三轴和动三轴抗剪试验, 试验条件基本相同, 在表 2 中列出了所有静三轴抗剪强度的试验结果. 表 2 的结果也显示出明显的区域性差异. 虽然关中和陇东地区土的含水量高但其强度仍高于陇西地区, 尤其是宝鸡地区土的强度是比较高的. 具体到某地还可具体分析, 用强度和其它指标综合分析来判断易损性的大小. 但黄土强度本身的确是一个重要指标. 前面曾述及两次历史地震产生的破坏, 天水 8 级地震产生的滑坡破坏比通渭 7.5 级地震产生的滑坡破坏轻得多. 前者的土的强度和物性指标也大得多, 而后者则较小. 另外, 我们还作了少量黄土的动强度试验研究, 研究结果表明, 振动使土的内摩擦力降低, 因此土的强度也会降低, 从而加剧了黄土地区的震害.

7 黄土的湿陷性与易损性的关系

黄土的湿陷性是不同于其它土类的一个特殊的工程性质. 这种湿陷特性指标对于评价黄土的易损性也是非常重要的指标之一. 经过对黄土的湿陷试验和动力试验的对比研究, 我们得出了它们之间的一定关系, 因此它对灾害特别是震害的评估是十分重要的. 表 2 列出了研究地区 200 kPa 压力下的标准湿陷系数 $\bar{\alpha}_s$ 和土的自重饱和压力下的湿陷系数 $\bar{\alpha}_{ss}$ 及湿陷起始压力 P_{sh} . 这 3 项指标对评价黄土的湿陷和自重湿陷及湿陷敏感性都是必不可少的. 根据湿陷性黄土地区建筑规范规定: 当 $\bar{\alpha}_s < 0.015$ 时, 为非湿陷性黄土; $0.015 \leq \bar{\alpha}_s \leq 0.03$ 时, 为轻微湿陷性黄土; $0.03 \leq \bar{\alpha}_s \leq 0.07$ 时, 为中等湿陷性黄土; $\bar{\alpha}_s > 0.07$ 时, 为强烈湿陷性黄土; $\bar{\alpha}_{ss} < 0.015$ 时, 为非自重湿陷性黄土; $\bar{\alpha}_{ss} \geq 0.015$ 时, 为自重湿陷性黄土.

根据上述规定, 对照表 2 的统计结果不难看出, 陇西和陇东及关中地区黄土的湿陷系数存在着明显的差异. 陇西黄土均为自重湿陷性和强烈湿陷性黄土, 湿陷系数大部分都大于 0.07, 湿陷起始压力大都在 50 kPa 左右, 有的还更小. 而陇东和关中大部为非自重湿陷性黄土, 湿陷系数普遍偏小而湿陷起始压力明显增大.

黄土动力特性的试验研究结果表明, 凡是自重湿陷性和强烈湿陷性黄土都存在震陷特性, 有的震陷系数可达 10% 以上. 而且典型黄土的湿陷起始压力和震陷起始压力几乎是相等的. 湿陷起始压力具有区域性特征, 它的数值随粘粒含量增加而增大, 随孔隙比增大而变小, 随湿陷系数增大而变小, 随深度的增加而增大.

震陷起始压力同样也具备上述特征.

上述对比研究结果表明, 黄土湿陷强烈与否也是判断易损性的重要指标. 自重湿陷性和强烈湿陷性黄土易损性大, 反之就小. 而且目前已编制出版黄土地区自重湿陷性和非自重湿陷性黄土以及几级湿陷性土分布图. 我们可以利用现有的图件及我们自己所取得的资料进行分析研究, 从而获得更加准确的易损性评判结果, 为各种地质灾害的研究提供科学依据.

8 结语

通过上述对黄土的几个主要物理力学指标的分析研究, 本文探讨了每一个物理力学参数与易损性的关系及其区域分布特点. 这些主要指标之间都有相互的关系可寻, 例如土的密度与含水量、孔隙比和湿陷性等都有着密切的关系, 前面 3 个指标还可以互相换算. 因此, 在资料少的地方可以通过其中一些指标来推算另一些指标, 得到更为丰富的资料, 从而进行多指标的综

合分析研究, 以便更合理更准确地预测和评估地质灾害. 因为在土力学中这些主要物理力学指标的实验测定已经历了近一个世纪的研究和发展, 其实验测量方法已形成了系统的规范, 所以这些参数的定量结果是可靠的, 用作易损性分析的定量指标也是可信的.

参考文献

- 1 刘百箴, 等. 1718 年通渭地震和 1654 年天水地震地区航空照片判读. 地震科学研究, 1984 (1): 1~7.
- 2 陈希哲. 土力学地基基础(第二版). 北京: 清华大学出版社, 1989.
- 3 段汝文, 等. 陇西黄土的强度特性. 西北地震学报, 1993, 15(1): 67~71.
- 4 中华人民共和国国家标准局. 湿陷性黄土地区建筑规范 GBJ. 北京: 中国计划出版社, 1992. 25~90.
- 5 关文章. 湿陷性黄土工程性能新篇. 西安: 西安交通大学出版社, 1992.

ON RELATIONSHIP BETWEEN PHYSICAL MECHANICAL INDICES AND VULNERABILITY OF LOESS

DUAN Ruwen WANG Jun LI Lan

(*Earthquake Research Institute of Lanzhou, SSB, Lanzhou 730000*)

Abstract

For several years the authors investigated and explored in loess area, collected loess samples of each type, tested the physical mechanical nature of loess in field and laboratory, and obtained a large amount of data about loess features. Based on these research results, the relationship between physical mechanical indices of loess and its vulnerability as well as regional distribution regularity of these indices were discussed, and then their relation to geological and seismic disasters in loess area was studied.

Key words: Geologic hazard, Earthquake disaster distribution, Loess, Loess vulnerability, Physical mechanical index

上接(80 页)

Abstract

In this paper, the soil chronological method and its dating principle as well as present research situation at home and abroad and developmental prospect for application are introduced and discussed in detail. The fundamental train of thought of this method has been applied by the authors to dating study of the foreland regions of the Yumushan mountain and Altun mountain, and four quantitative relational expressions between CaO, CaCO₃ content and CaCO₃ accumulation index value in soils and their developmental age have been preliminarily formed and the mean accumulation rate of the calcic coats on gravels in soils has been obtained by statistical calculation as well. Through test and comparative analysis, it is considered that the soils chronological method is applicable to the Northwestern region of China and has the vast prospects for application.

Key words: Soil characteristic, Chronological method, Dating active tectonics