

万家寨引黄工程大梁段砂黄土的工程特性研究

Engineering properties of sand-loess from the Daliang region along the Wanjiashai water diversion project

张永双¹, 曲永新²

(1. 中国地质科学院 地质力学研究所, 北京 100081; 2. 中国科学院 地质与地球物理研究所, 北京 100029)

摘要:以万家寨引黄工程大梁水库周边地区砂黄土为例,通过试验分析,阐述了库区砂黄土的物质组成、物化性质和力学特性,并通过不同状态下砂黄土的微观结构特征对比,探讨了砂黄土作为库坝土料的适宜性,同时对砂黄土斜坡和隧洞工程易出现的问题进行了分析。

关键词:砂黄土;工程特性;水库大坝;工程问题;调水工程

中图分类号: TU 471

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2004)02-0229-05

作者简介:张永双(1968-),男,山东龙口人,博士,副研究员,主要从事工程地质和地质灾害研究工作。

ZHANG Yong-shuang¹, QU Yong-xin²

(1. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China; 2. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: Based on the test results of sand-loess around the Daliang Reservoir of the Wanjiashai water diversion project, the Characteristics including composition, physico-chemical properties and mechanical properties are summarized. By comparison of the sand-loess microstructures under different states, the applicability of sand-loess as filling material to a reservoir dam, as well as the engineering problems associated with the sand-loess slopes and tunnels, is discussed.

Key words: sand-loess; engineering property; reservoir dam; engineering problem; water diversion project

0 引言

万家寨引黄工程是我国一项大型跨流域调水工程,位于山西省西北部黄土高原区,以黄河万家寨水利枢纽为取水首部,由总干线、南干线(包括南干线联接段)和北干线3部分组成(见图1)。该引水工程通过我国黄土高原西北部砂黄土区。20世纪80年代以来,尽管不少单位开展了大量的工程地质勘察和线路比选工作,避开不少黄土地段或工程不直接与黄土接触,但仍有少量工程段受到黄土不良工程特性的制约^[1]。

大梁水库是引黄北干线上的一座调蓄水库,位于山西省朔州市平鲁区井坪镇西北约3 km的下称沟谷地内。水库坝址附近广为第四纪黄土覆盖,受砂砾料储量等因素限制,黄土成为首选的筑坝材料和天然防渗土料,因此主坝坝型设计为黄土砂石混合坝,主坝防渗体为黄土厚心墙,下游坝壳也需用黄土填筑^[2]。笔者通过对大梁水库附近砂黄土的物质组成、物化性质和力学特性等特征分析,阐述砂黄土作为水库大坝土料的适宜性,并对类似地区工程建设易出现的工程问题进行分析探讨。

1 砂黄土的物质组成和物化性质

大梁水库料场为黄土坡地,距主坝1.25~3.6 km,

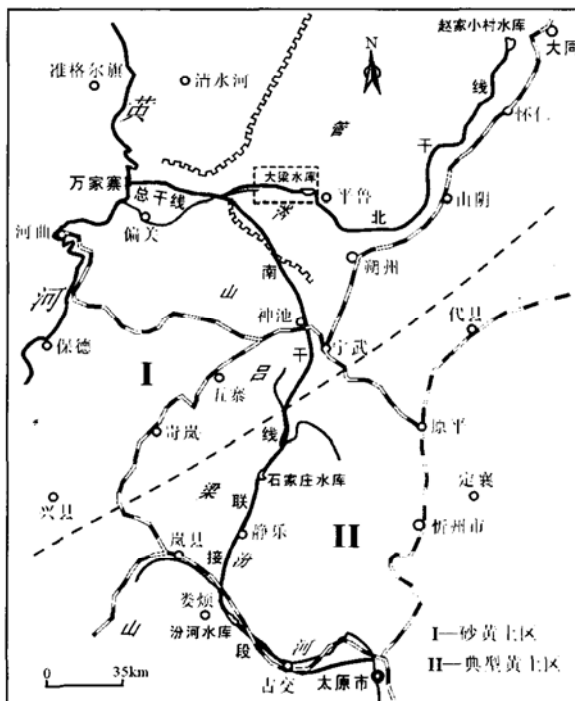


图1 万家寨引黄工程线路示意图

Fig. 1 Distribution of the Wanjiashai water diversion project

基金项目:国家自然科学基金资助项目(40102025)

收稿日期:2003-03-17

黄土呈层状分布,上层为第四系上更新统马兰黄土(Q_3),下层为中更新统离石黄土(Q_2)、下伏第三系上新统三趾马红土(N_2)及基岩。 Q_3 黄土平均厚度 8.6 m,呈浅黄色,底部含有少量钙质结核。 Q_3 黄土含水率一般在 8%~14%之间,干容重一般为 12.05~15.39 kN/m³。 Q_2 黄土平均厚度 11.6 m,呈浅棕色或棕黄色,结构稍密实,含水率相对较高,大部分在 14%~17%之间。

1.1 黄土的颗粒成分

根据全分散法颗粒分析结果,黄土颗粒成分的最大特点是粒径大于 0.05 mm 的极细砂和细砂颗粒含量很高,0.05~0.1 mm 极细砂粒组含量都超过 30%,并且所有样品的砂粒含量均超过粗粉粒组含量(见表 1),这是西北黄土高原典型自重湿陷性黄土所没有的,黄土高原中部和东部地区更无此现象。从小于 0.005 mm 黏粒含量看, Q_2 黄土的黏粒含量总体较高(大于 20%),也较稳定,仅个别样品黏粒含量较低。 Q_3 黄土黏粒含量比 Q_2 黄土略低,一般为 15.3%~19.7%。

扫描电子显微镜下观察表明,砂黄土中的黏土颗粒不是独立存在的,而主要以碎屑颗粒表面黏附物的形式构成颗粒间胶结物,仅少数与碳酸盐微晶和细分散碎屑颗粒组成聚集体,并构成黄土骨架的一部分。黏土颗粒的这种存在形式更增加了黄土的粉土性。

1.2 砂黄土的黏土矿物组成和物化性质

20 世纪 80 年代以前,由于仪器精度的局限性和对混层黏土矿物缺乏认识,许多研究者都认为黄土中的主要黏土矿物为伊利石。实际上,伊利石的存在形式有两种:一是伊利石/蒙脱石的混层矿物(IL/S),二是独立存在的伊利石。根据 X 射线衍射定量测定结果(见表 2 和图 2),研究区砂黄土小于 0.002 mm 粒级主要黏土矿物成分为伊利石/蒙脱石混层矿物,其混层比大部分为 50%,即混层矿物中伊利石与蒙脱石的比值接近 1:1;混层矿物含量占整个小于 0.002 mm 黏粒含量的 60%~70%;次要黏土矿物为伊利石,一般占 18%~21%;同时伴生少量的高岭石(5%~8%)和绿泥石(5%~11%),这与 20 世纪 80 年代以来,我国西北黄土高原最新黏土矿物测试结果相一致。根据试验和计算结果(见表 2),IL/S 混层矿物最高仅占天然干土重的 11.51%,通常为 7.02%~9.31%;伊利石含量 2.39%~3.72%;高岭石含量 0.67%~1.24%,绿泥石含量 0.93%~1.31%。采用 SnCl₂ 容量法测定的砂黄土有效蒙脱石含量均小于 10%,最大仅 9.74%,与比表面积测试结果一致(见表 1)。上述测试结果表明,尽管 IL/S 混层矿物为膨胀性黏土矿物,但由于绝对含量低,整个砂黄土的物理化学活性和亲水性都较低,导致黄土湿陷敏感性较强,饱和黄土在震动和渗透压力作用下具有液化的趋势,这对工程是极为不利的。

表 1 黄土物质成分和物化性质测试结果

Table 1 Compositions and physico-chemical properties of loess from the Daliang Reservoir

时代	编号	颗粒成分含量/%							蒙脱石含量 /%	伊利石含量 /%	比表面积 (m ² ·g ⁻¹)
		>0.1	0.1~0.05	0.05~0.01	0.01~0.005	0.005~0.002	<0.005	<0.002			
Q_3	2899	1.43	50.47	29.2	3.6	3.6	15.3	11.7	4.27	3.63	39.66
	2900	1.29	40.21	34.4	4.4	3.6	19.7	16.1	5.01	5.27	46.90
	2901	1.40	41.70	34.4	5.6	2.4	16.9	14.5	6.08	4.67	50.92
	2911	2.05	51.05	27.6	3.6	4.4	15.7	11.3	3.95	4.58	36.55
	2912	1.20	48.30	30.4	4.0	2.8	16.1	13.3	4.51	5.08	45.90
	2913	4.41	65.49	2.04	1.6	1.6	8.1	6.5	3.74	2.64	31.55
	2902	0.68	33.22	33.2	6.8	5.6	26.1	20.5	8.24	6.73	73.71
Q_2	2903	2.10	34.20	32.8	6.0	5.6	24.9	19.3	8.47	6.48	69.36
	2904	0.82	41.48	33.2	3.6	3.2	20.9	17.7	6.53	5.66	56.08
	2905	0.59	35.71	36.4	6.0	3.6	21.3	14.5	8.71	5.03	61.43
	2906	0.86	39.04	34.4	4.4	6.8	21.3	14.5	8.71	5.03	61.43
	2907	0.63	34.47	32.4	5.6	6.4	29.6	20.5	6.21	6.64	68.35
	2914	3.61	47.09	24.4	3.2	3.2	21.7	18.5	8.07	6.65	64.80
	2915	1.24	37.06	32.8	5.6	5.2	23.3	18.1	7.85	6.68	67.70
	2916	4.31	50.79	26.4	4.4	2.8	14.1	11.3	4.11	4.51	32.39
	2917	0.64	39.26	27.6	7.2	1.6	25.3	23.7	9.74	7.66	72.30
	2918	1.85	49.65	26.4	5.2	2.4	16.9	14.5	4.67	5.36	48.86
	2919	0.86	37.04	38.0	4.8	5.2	19.3	14.1	4.90	5.40	46.11

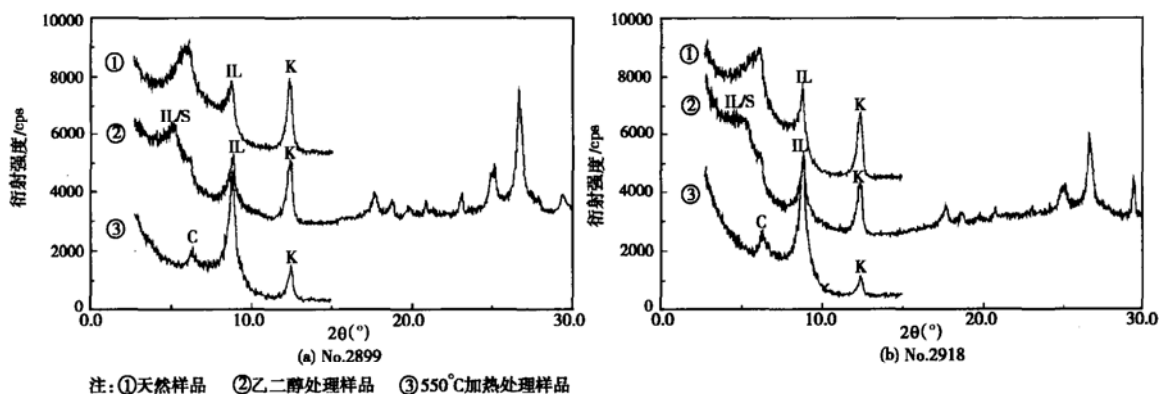
表中蒙脱石和伊利石含量为单矿物化学法测定结果。

表2 黏土矿物X射线衍射定量测定结果

Table 2 Quantitative analysis results of clay minerals for loess from the Daliang Reservoir

时代	编号	< 2 μm 黏土矿物相对含量/%				IL/S 混层比	< 2 μm 黏粒 含量/%	黏土矿物绝对含量/%			
		IL/S	IL	K	C			IL/S	IL	K	C
Q ₃	2899	60	21	8	11	50	11.7	7.02	2.46	0.94	1.29
	2912	70	18	5	7	50	13.3	9.31	2.39	0.67	0.93
Q ₂	2904	65	21	7	7	50	17.7	11.51	3.72	1.24	1.24
	2918	64	21	6	9	40	14.5	9.28	3.05	0.87	1.31

IL/S 为伊利石/蒙脱石混层矿物; IL 为伊利石; K 为高岭石; C 为绿泥石。

图2 砂黄土小于2 μm 粒组 X 射线衍射曲线Fig.2 Oriented X-ray diffractograms of < 2 μm clay fraction in sand-loess

2 黄土的压实性和渗透性

多级荷载(荷重分别为0.05, 0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.2 MPa)下的压缩变形试验结果表明,砂黄土的压缩变形随着分级加荷具有明显的阶段性^[3]。当荷重为0.05 MPa时压缩系数较高,随后变化不是很大;荷重为0.2 MPa时压缩系数又开始增大,当荷重达到0.4 MPa时,压缩系数即达到极值,在此之后变形开始减弱。根据击实试验结果, Q₃ 黄土和 Q₂ 黄土的压实特性略有差异;同时代的黄土因取样位置不同,击实特性也表现出一定的分散性。Q₃ 黄土的最大击实干密度为1.78 g/cm³,最优平均含水率为14.5%; Q₂ 黄土的最大击实干密度为1.79 g/cm³,最优平均含水率为15.2%。

砂黄土的渗透性是库坝设计中需要重点考虑的问题。根据渗透试验结果,当砂黄土干密度控制在1.65 g/cm³时, Q₃ 黄土和 Q₂ 黄土的渗透系数虽略有差异,但一般为(4~6) × 10⁻⁶ cm/s,说明经过压实处理的砂黄土基本上可以达到筑坝防渗设计要求。

3 不同压实状态下的黄土微结构对比

为了选择和确定大梁水库大坝施工黄土碾压处理的最佳技术条件,分别对 Q₃ 黄土和 Q₂ 黄土的天然土、

压缩土(0.2 MPa)、压缩浸水土和击实土4种状态的8组样品进行微结构观察和对比,扫描电镜放大倍数均采用500倍。对比结果表明:

(1)与压缩土、压缩后浸水土和击实土相比,天然状态的 Q₃ 黄土和 Q₂ 黄土均具有显著的欠压密结构特征,即具有发育的骨架间架空孔隙,孔隙直径可达50~100 μm (见图3(a)、(e))。天然状态的 Q₃ 黄土比 Q₂ 黄土结构更疏松、架空孔隙更发育,这也预示着天然状态的 Q₃ 黄土具有较高的湿陷性和压缩性。

(2) Q₃ 黄土和 Q₂ 黄土在0.2 MPa荷载下压缩稳定后,原始结构均遭受强烈破坏,碎屑颗粒(包括黏土团聚体)呈镶嵌结构紧密接触(见图3(b)、(f))。相比而言, Q₃ 黄土比 Q₂ 黄土压缩效应更加显著。

(3)经压缩浸水处理的 Q₃ 黄土比纯压缩处理样品压缩效果更好一些,主要表现在微结构单元排列更加致密、剩余的架空孔隙数量变少、孔径变小,具有比较好的加固效果(见图3(c))。但 Q₂ 黄土压缩浸水效果不太理想,架空孔隙仍较发育(见图3(g))。

(4)与天然黄土相比,击实处理后的黄土碎屑颗粒和黏土团聚体虽然产生重新镶嵌排列,但结构体间界面显现,缺乏结构联结,并表现出动力剪切破坏机理(见图3(d)、(h)),预示击实处理后的砂黄土仍将具有一定的渗透性($k = 10^{-6}$ cm/s量级)。

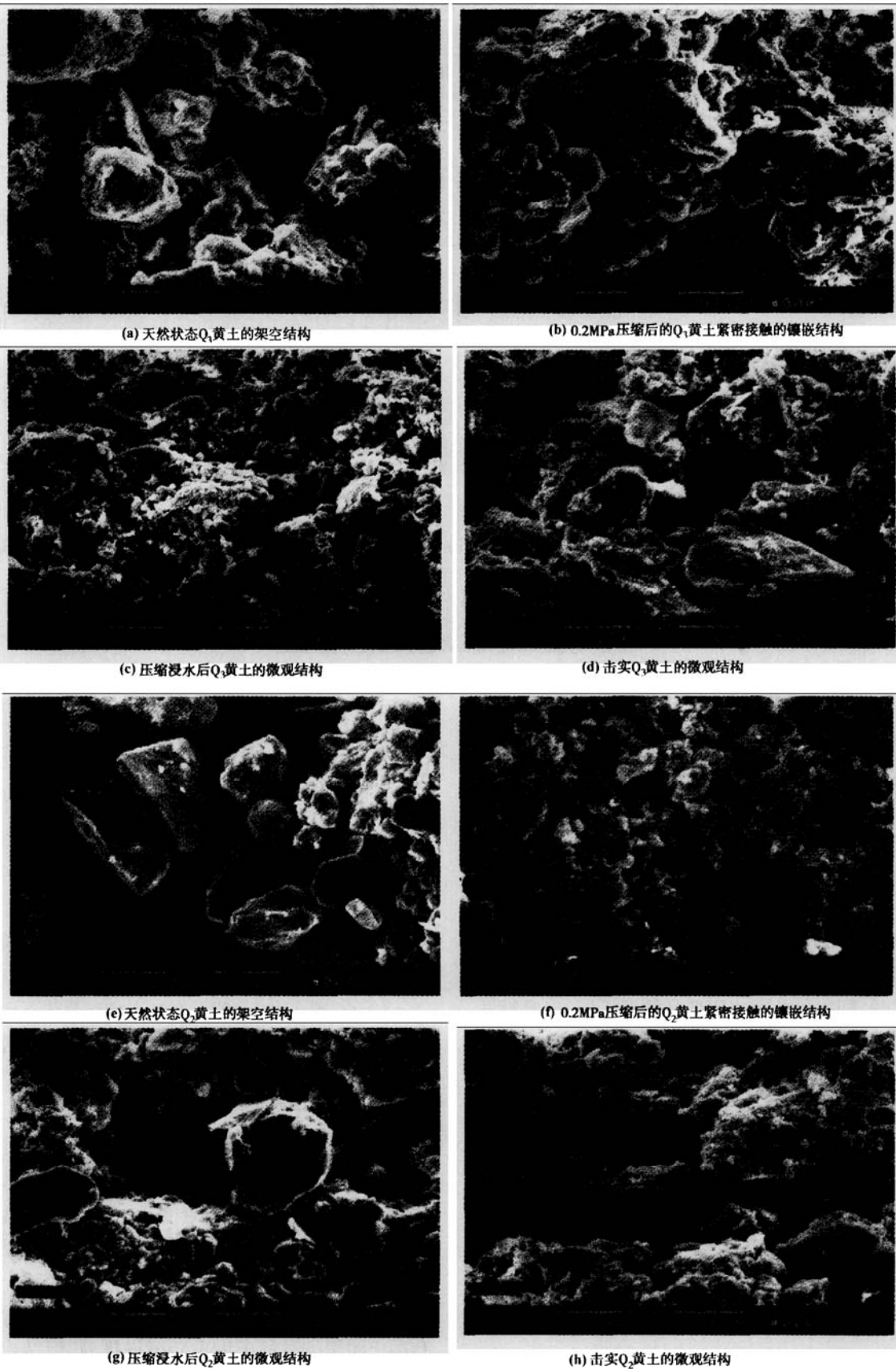


图3 不同状态下砂黄土的微观结构特征

Fig.3 The sand-loess microstructures under different states

4 砂黄土工程问题分析

4.1 关于砂黄土作为筑坝材料适宜性问题

湿陷性和较高渗透性是黄土天然地基最主要的不利工程性质,产生这种不良工程特性的原因在于天然黄土的高孔隙性(孔隙比高、干密度小),其本质在于天然黄土中存在着与骨架碎屑颗粒尺寸同级别的架空孔隙或支撑孔隙。按工程特性进行的坝基沉降量计算表明,未经处理的此类土体坝基,在坝体荷载作用下将产生较大的压缩和湿陷变形,并将由此导致坝体的不均匀沉陷,从而危及建筑物的安全运营。根据压缩土、压缩浸水土和击实土微观结构分析对比,压缩浸水效果最为明显。结合颗粒分析结果, Q_2 黄土作为筑坝的土料尤其是土石坝心墙防渗材料比较适宜, Q_3 黄土可作为下游坝壳填筑土料。

应当指出,上述多种试验结果显示,经过严格压实的砂黄土仍可能具有较高的渗透性,渗透率一般为 $(4 \sim 6) \times 10^6 \text{ cm/s}$,因此在砂黄土区利用黄土作为土石坝心墙防渗土料时,必须严格按筑坝要求进行碾压;并且施工期间在心墙上下游部位须采用多种途径浸水,利用筑坝荷重预压。此外,还可以采用初期控制水库蓄水位等途径进行浸水预压处理,使地基土逐渐完成固结,这不仅可以减缓水库开始蓄水时地基湿陷变形集中的矛盾,而且可以提高土层干密度值和强度指标。

4.2 砂黄土边坡稳定性问题

砂黄土的物质组成和结构在很大程度上决定着其力学特性,由于组成砂黄土的极细砂和粗粉粒含量很高,在微观上表现为极微弱连结的粗骨架状架空结构,因而砂黄土常具有较高的摩擦强度,内摩擦角可以达到 $26^\circ \sim 31^\circ$ 。极低的黏粒含量决定此类黄土极低的黏聚力,根据试验结果,砂黄土的 c 值一般仅为 $5 \sim 13 \text{ kPa}$,这在黏性土中是非常罕见的。这些力学特性决定了黄土高原北部黄土厚度较大的边坡常常会出现黄土滑塌灾害,坡体在滑移过程中主要表现为结构解体,而不是保持整体滑动,滑塌破坏后的滑床坡度仍然可以达到 $45^\circ \sim 50^\circ$ ^[4,5]。在引水工程设计和施工中应该引起注意。

4.3 隧洞施工阶段的稳定问题

在引水隧洞TBM施工中,砂黄土段塌方也是突出的工程问题,并且常常与渗漏相伴出现。由于砂黄土的黏聚力低,隧洞开挖后,很容易在隧洞上方形成较大范围的松弛带,使洞顶产生较大的向下位移。位于偏关县的引黄总干线7号隧洞葛家山—水泉河段(开挖直径 6.01 m ,衬砌后内径 5.46 m)开挖在砂黄土中,采用卸载试验参数求得的隧洞开挖洞周位移结果表明,洞顶向下位移可达 66 mm ^[6],如果不进行及时支护和处理,很容易引起塌方事故。

5 结 语

通过对万家寨引黄工程大梁水库周边地区砂黄土的物质组成、物化性质和力学特性等的试验测试分析表明,黄土高原北部的砂黄土在物质组成和结构方面与黄土高原中部和东南部的黏质黄土具有明显的差异,黄土的工程性质也具有鲜明的地域特点。随着我国西部大开发战略的实施,砂黄土区大量公路和水利工程建设遇到了不少与砂黄土不良工程特性密切相关的工程问题,因此分析和研究砂黄土的工程地质特性及其与各类工程问题之间的关系,对该地区的工程实践具有重要的指导作用和现实意义。

参考文献:

- [1] 宋 岳. 万家寨引黄入晋工程地质勘察[J]. 水利水电工程设计, 2001, 20(4): 8-11.
- [2] 樊安顺, 张沁成. 大梁水库土石坝防渗土料设计与压实[J]. 山西水利科技, 2000, (4): 10-14.
- [3] 李清梅. 万家寨引黄工程大梁水库坝址黄土的工程特性及处理[J]. 山西水利科技, 1995, (3): 85-87.
- [4] 张永双, 曲永新, 陈情来, 等. 浅析黄土滑坡与黄土滑塌[J]. 工程地质学报, 2002, 10(s): 258-262.
- [5] 曲永新, 张永双, 陈情来. 陕北晋西黄土滑塌灾害的初步研究—以西气东输工程为例[J]. 工程地质学报, 2001, 9(3): 233-240.
- [6] 王 钊, 黄 杰, 咸付生, 等. 土的卸载试验和在万家寨引水隧洞变形分析中的应用[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(4): 525-527.