

肯尼亚 Karimenu II 大坝填筑土料试验研究

黄 星

[上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092]

摘 要: 肯尼亚 Karimenu II 大坝土料场位于库区上游,料场土主要为高液限粉土,具有高孔隙比、高含水量、塑性指数大,黏粒含量高等特点;土料最优含水率为平均值为 48.5%,与天然含水率相近,最大干密度平均值为 1.13 g/cm^3 ,黏粒含量平均值 46.7%。按设计要求 0.96 压实度配样后,土样具极微渗透性、中等压缩性。经碾压试验,库区土料可满足施工质量控制要求。土料的建议含水率控制在最优含水率 $\omega_0-5\%\sim\omega_0$ 范围,采用天然含水率压实度可以满足设计要求。

关键词: 高液限粉土;最优含水率;击实试验;碾压试验;肯尼亚

中图分类号: TV541+.1

文献标志码:

文章编号: 1009-7716(2022)02-0210-04

1 概 述

Karimenu II 供水项目大坝位于 Karimenu 河流上游,距肯尼亚首都内罗毕北部约 75 km,水库总库容 2 821 万 m^3 ,坝顶长 400 m,最大坝高 58 m,当采用均质土坝方案时,需用土料 218 万 m^3 ,当采渣石心墙坝方案时,需用土料 22 万 m^3 。

土料就地取材,土料场位于大坝上游 50~1 000 m 处,采用库区内广泛分布的高液限粉(黏)土作为心墙防渗土料,该土层为火山喷发岩风化产物,具有塑性指数大,黏粒含量高特点,按《碾压式土石坝设计规范》(SL 274—2020)中术语解释,可定义为红黏土。

红黏土是指石灰岩或其它熔岩经红土化后形成的富含铁铝氧化物的褐红色粉土或黏土,液限一般大于或等于 50%^[1-2]。具有高孔隙比,高液限、高塑限、高黏粒含量,低密度,压实度差等特点,同时红黏土还具有抗剪强度较高、中压缩性、较好的抗渗性等特点。国内云南、贵州、广西分布广泛,可用于筑坝材料^[3]。在肯尼亚当地,用红黏土作为心墙填料修建了锡卡大坝,经现场碾压试验,心墙填料的含水率为最优含水率为 +7%~+10%^[4]。

根据合同要求,该项目勘察设计采用中国标准,试验由在中方当地设置的试验室完成,主要进行室内试验项目有:含水率、塑性指数、黏粒含量、干密度、击实试验、有机质含量、水溶盐含量,原状土的剪

切试验、室内渗透试验、重塑土的剪切试验、室内渗透试验等。

试验结果,土料的剪切强度较高,渗透性等指标满足防渗土料的技术要求,黏粒含量和塑性指数等指标不符合防渗土料的技术要求,于是进行了现场碾压试验,进一步评价该红黏土作为填筑料的可行性,获得了大量数据,为下步设计施工提供了充分依据。

2 原状土室内试验

原状土样的试验内容包括含水率(ω)、塑性指数(I_p)、黏粒含量、干密度(ρ_d)、击实试验、有机质含量、水溶盐含量等。

2.1 料场原状土的物理性质

土料场 Q3dpl 土料以高液限粉土为主,天然含水率(ω)39.5~65.4%,平均值 48.2%,塑性指数(I_p)31.8~49.7,平均值 39.3,黏粒含量 27.3~67.3%,平均值 46.7%,干密度(ρ_d)为 0.85~1.12 g/cm^3 ,平均值为 1.00 g/cm^3 。自由膨胀率为 15~39%,平均为 18.9%,不具膨胀性。水溶盐含量为 0.018~0.102%,平均值 0.04%;有机质含量为 0.146~0.467%,平均值 0.260%,见表 1、表 2。

2.2 击实试验

采用轻型击实试验,锤重 2.5 kg,落距 30 cm,布置 3 层,每层击数 30 击,得其最优含水率为(ω_{op})44.4~55.1%,平均值为 48.5%,最大干密度(ρ_{dmax})为 1.04~1.20 g/cm^3 ,平均值为 1.13 g/cm^3 。(如图 1 所示)。

2.3 颗粒分析

颗粒分析试验采用筛析法、密度计法,料场土样

收稿日期: 2021-09-03

作者简介: 黄星(1968—),男,本科,高级工程师,从事勘察工作。

表 1 原状土天然状态下物理指标统计表

项目	含水率 $W/\%$	土粒比重 G_s $/(g \cdot cm^{-3})$	湿密度 P_0 $/(g \cdot cm^{-3})$	干密 P_d $/(g \cdot cm^{-3})$	饱和度 $S_r/\%$	孔隙比 e	塑性指数 I_p	液性指数 I_L
最大值	65.4	2.77	1.62	1.12	91.7	2.25	49.7	0.49
最小值	39.5	2.77	1.28	0.85	57.4	1.47	31.8	-0.31
平均值	48.2	2.77	1.48	1.00	75.35	1.78	39.3	-0.09

表 2 原状土天然状态下物理指标统计表

项目	黏粒含量 $/\%$	水溶盐含量 $/\%$	有机质含量 $/\%$
最大值	67.3	0.102	0.467
最小值	27.3	0.018	0.146
平均值	46.7	0.040	0.260

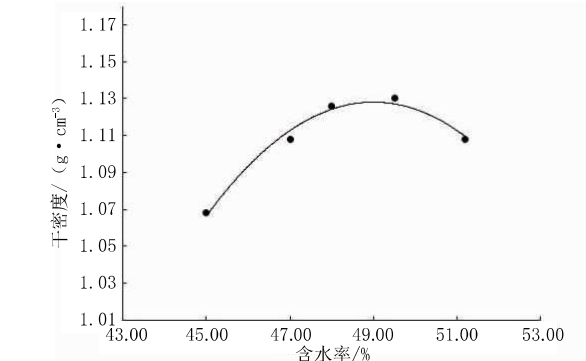


图 1 击实干密度随含水率变化的曲线

以高液限粉土为主,黏粒含量 27.3 ~ 67.3%,平均值 46.7%(见表 3)。

表 3 颗分数据表

项目	颗粒级配				
	粗砂 0.25~0.5 $/\%$	中砂 0.075~0.25 $/\%$	细砂 0.05~0.075 $/\%$	粉粒 0.005~0.05 $/\%$	黏粒 < 0.005/ $\%$
最大值	2.2	1.1	7	69	67.3
最小值	1.0	0.6	0.5	27.2	27.3
平均值	1.6	0.9	2.2	50.8	46.7

表 4 土样配样后(非饱和状态)物理性质试验成果统计表

项目	物理性质						渗透系数
	含水率 $W/\%$	土粒比重 $G_s/(g \cdot cm^{-3})$	湿密度 $\rho/(g \cdot cm^{-3})$	干密度 $\rho_d/(g \cdot cm^{-3})$	饱和度 $S_r/\%$	孔隙比 e	垂直 $K_v/(10^{-6} cm \cdot s^{-1})$
最大值	50.0	2.77	1.63	1.15	82.4	1.77	6.06
最小值	41.0	2.77	1.47	1.00	73.7	1.40	0.15
平均值	44.4	2.77	1.56	1.08	78.84	1.56	2.51

表 5 土样配样后(饱和状态)物理性质试验成果统计表

项目	物理性质					
	含水率 $W/\%$	土粒比重 $G_s/(g \cdot cm^{-3})$	湿密度 $\rho/(g \cdot cm^{-3})$	干密度 $\rho_d/(g \cdot cm^{-3})$	饱和度 $S_r/\%$	孔隙比 e
最大值	63.0	2.77	1.71	1.15	98.7	1.77
最小值	48.7	2.77	1.63	1.00	95.1	1.41
平均值	54.6	2.77	1.67	1.08	96.6	1.57

3 配样后土料室内试验

根据击实试验成果,按照设计方案 0.96 的压实度要求配样,对所配土样进行了试验,试验内容包括含水率(ω)、饱和度(S_r)、孔隙比(e)、压缩试验、渗透系数(K),以及饱和状态下的压缩试验、三轴 UU、CU 试验。

3.1 配样后土料的物理性质

对所配土样进行了渗透试验,其垂直渗透系数(K_v)为 $1.50 \times 10^{-7} \sim 6.01 \times 10^{-6} cm/s$,平均值为 $2.51 \times 10^{-6} cm/s$,具极微渗透性,见表 4、表 5。

3.2 配样后土料的剪切试验

按照填筑标准 0.96 压实度进行配样,对所配的土样进行三轴剪切试验,饱和不固结不排水(UU)条件下其凝聚力(c)为 19.0 ~ 83.3 kPa,平均值为 37.0 kPa,内摩擦角(ϕ)为 $4.5^\circ \sim 11.0^\circ$,平均值为 6.4° ;固结不排水(CU)条件下其凝聚力(c)为 16.4 ~ 58.6 kPa,平均值为 39.3 kPa,内摩擦角 ϕ 为 $11.0^\circ \sim 19.5^\circ$,平均值为 13.7° ,有效凝聚力(c')为 16.6 ~ 56.0 kPa,平均值为 33.4 kPa,有效内摩擦角(ϕ')为 $25.0^\circ \sim 34.0^\circ$,平均值为 27.9° 。试验成果见图 2,从该图可知:由平均值计算得出的 c 值为 38.6kPa, ϕ 值为 13.9° , c' 值为 30.4 kPa, ϕ' 值为 27.7° ,样品的剪切强度较高(见表 6)。

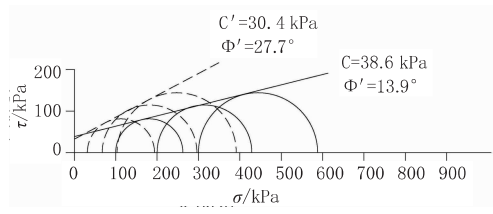


图 2 配样土平均破坏应力圆

表 6 配样后(饱和状态)力学性质试验成果统计表

项目	三轴(UU)		三轴(CU)		三轴(CU)	
	凝聚力 C _{uu} /kPa	摩擦角 Φ _{uu} /(°)	凝聚力 C _u /kPa	摩擦角 Φ _{cu} /(°)	凝聚力 C'/kPa	摩擦角 Φ'/(°)
最大值	83.3	11.0	58.6	19.5	56.0	34.0
最小值	19.0	4.5	16.4	11.0	16.6	25.0
平均值	37.0	6.4	39.3	13.7	33.4	27.9

3.3 配样后土料的压缩试验

按照填筑标准 0.96 压实度进行配样，对所配的土样进行压缩试验，试验最大压力为 1 200 kPa。配样后的压缩系数($a_{0.1-0.2}$)为 0.14~0.40 MPa⁻¹，平均值为 0.26 MPa⁻¹，具中等压缩性；饱和状态下压缩系数($a_{0.1-0.2}$)为 0.33~0.66 MPa⁻¹，平均值为 0.47 MPa⁻¹，具中等压缩性，见图 3、图 4。从试验结果分析，土料饱和后的压缩系数明显变大，变形是筑坝需考虑的重要因素。

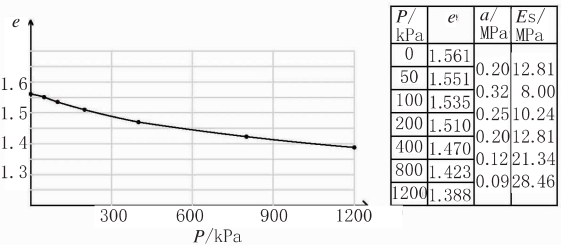


图 3 配样土压缩曲线

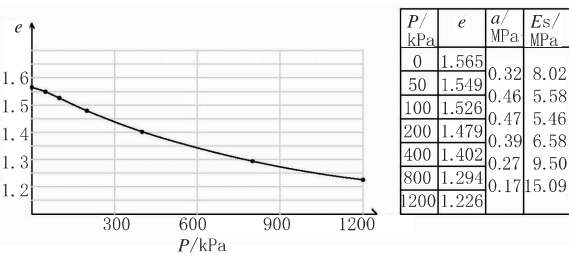


图 4 配样土(饱和)压缩曲线

3.4 水力性质及破坏准则

高液限粉土属黏性土，其渗透类型主要是流土。据土工试验统计资料，高液限粉土孔隙比平均值为 1.57，按孔隙比计算的孔隙率为 61.10%，土的比重平均值取 2.77，经计算，坝基流土型土的临界水力比降为 0.69。根据最大干密度 0.96 进行配样试验，临界比降为 1.72，破坏比降为 1.98，建议允许比降为 0.86。

4 土料质量评价

根据《水利水电工程天然建筑材料勘察规程》(SL 251—2015)第 5.3 节质量技术要求进行评价如表 7。

表 7 土料与均质土坝及防渗体用土料质量要求对比表

项目	质量指标		Q3 料场土	
	均质坝土料	防渗体土料	范围值	平均值
黏粒含量	10 ~ 30%	15 ~ 40%	27.3 ~ 67.3%	46.7%
塑性指数	7 ~ 17	10 ~ 20	31.8 ~ 49.7	39.3
渗透系数 / (cm·s ⁻¹)	击实后 < 1 × 10 ⁻⁴	击实后 < 1 × 10 ⁻⁵	击实后 1.5 × 10 ⁻⁷ ~ 6.01 × 10 ⁻⁶	2.51 × 10 ⁻⁶
有机质含量	< 5%	< 2%	0.146 ~ 0.467	0.260
水溶盐含量	< 3%		0.018 ~ 0.102	0.040
天然含水率	最优含水率为 48.5%		39.5 ~ 65.4%	48.2%

从上表可知，土料场土料最优含水率与天然含水率相近，击实后渗透系数满足填筑料与防渗料规范要求；土料中水溶盐含量与有机质含量满足大坝填筑料与防渗料规范要求。土料场土料黏粒含量偏高，塑性指数偏大。

5 现场碾压试验

为进一步评价高液限粉土层筑填坝的可行性，进行了现场碾压试验，按压实度不低于设计要求 96%，填筑时的含水率与最优含水率偏差 -5% ~ +10% 进行试验，其中土料经现场试验检测，料场天然含水率 46.7%，最佳含水率 51.3%，最大干密度 1.09 g/cm³，填料的松铺厚度分别为 30 cm、35 cm、40 cm，共三种，碾压遍数分别为 4 遍、6 遍。

选用以下 5 种不同含水率的合格土料分别进行试验：天然含水率(W) (相当于最优含水率 ω_0-5)、最优含水率(ω_0)、最优含水率 -2% (ω_0-2)、最优含水率 +5% (ω_0+5)、最优含水率 +10% (ω_0+10)，碾压试验结果如图 5、图 6。

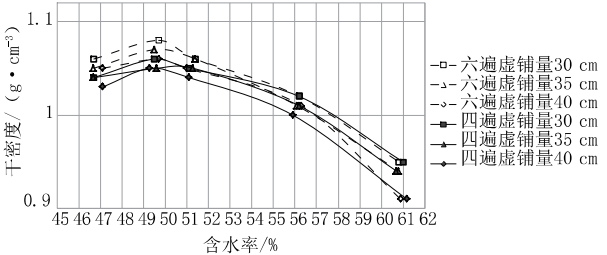


图 5 不同碾压遍数不同碾压厚度，干密度与含水率的关系曲线

从图 5 可知，当含水率越接近最优含水率 ω_0 时，土的干密度会越来越大，在 $\omega_0-2\%$ 时土的干密度最大。当含水率超过 $\omega_0-2\%$ 时随着含水率的增加土的干密度会越来越小，土的压实度会越来越低，即土料

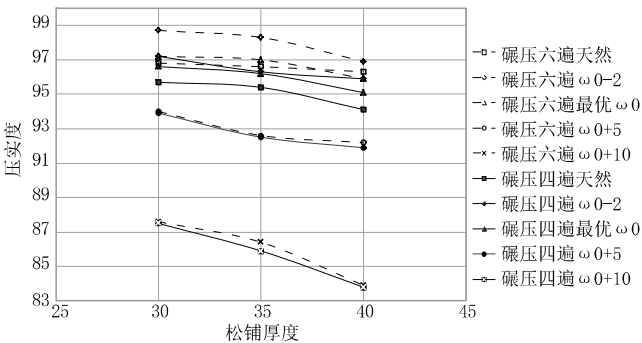


图 6 不同松铺厚度、不同含水率与压实度关系曲线

不宜增水。土料的建议含水率控制在 $\omega_0-5\%$ 至 ω_0 范围,最优碾压含水率是 $\omega_0-2\%$ 。采用天然含水率(相当于 $\omega_0-5\%$)压实度可以满足设计要求,即土料可以直接上坝填筑。

根据现场碾压试验结果,在碾压遍数一定的情况下,松铺厚度越大其压实效果越差,土的松铺厚度宜控制在 30~35 cm;提高碾压遍数,可以提高压实度。

6 结 语

(1)水库库区土料场土主要为高液限粉土,可定义为红黏土,具高孔隙比、高含水量、塑性指数大,黏粒含量高等特点。

(2)采用轻型击实试验,土料最优含水率为平均值为 48.5%,与天然含水率相近,最大干密度平均值为 1.13 g/cm³;黏粒含量平均值 46.7%。自由膨胀率为 15~39%,不具备膨胀性。水溶盐含量平均值 0.04%;有机质含量平均值 0.26%。

(3)按设计要求 0.96 压实度配样后,土样具极微渗透性,中等压缩性,剪切强度较高。

(4)水库库区土料最优含水率黏粒含量及塑性指数超标,其余指标合格。

(5)经碾压试验,库区土料可满足施工质量控制要求。

(6)土的松铺厚度宜控制在 30~35 cm;土料的建议含水率控制在 $\omega_0-5\%$ 至 ω_0 范围,最优碾压含水率是 $\omega_0-2\%$,采用天然含水率压实度可以满足设计要求。

参考文献:

[1] SL 274—2020,碾压式土石坝设计规范[S].
[2] GB 50021—2001,岩土工程勘察规范[S].
[3] 袁绚. 云南红粘土的工程特性及其应用 [J]. 南昌水专学报,2002, (1):59-62.
[4] D·A·布鲁格曼, J·D·戈斯登. 增加内罗毕供水的锡卡坝[J]国际水力发电, 1991(3):38-39.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

投稿网站: <http://www.csdqyfh.com> 电话: 021-55008850 联系邮箱: cdq@smedi.com