

降雨入渗条件下镇巴县牛背梁滑坡风险评价

李 军, 范 文, 宋宇飞, 祁顶朝

(长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054)

摘要: 为了研究降雨强度对浅表层坡体失稳的影响程度, 在野外详细地质勘察的基础之上, 利用 Geostudio 软件对坡体在不同降雨工况下进行渗流场和稳定性模拟, 研究相应工况下的稳定性系数和失稳概率, 再通过定量化方法对极易失稳工况下的坡体进行风险评估, 研究结果表明: 只有完全饱和状态条件下的坡体才极易失稳, 失稳概率高达 48.93%, 滑坡影响区内承灾体总价值为 361.9 万元, 财产年损失 83.24 万元, 单人年死亡概率 8.7×10^{-2} , 即处于风险极高区。

关键词: 滑坡; 降雨; Green-Ampt 模型; Geostudio 软件; 风险评价

中图分类号: P694; P642.2

文献标识码: A

Risk Assessment of Niubeiliang Landslide in Zhenba County under Rainfall Infiltration Conditions

LI Jun, FAN Wen, SONG Yufei, QI Dingchao

(College of Geological Engineering and Surveying, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054)

Abstract: In order to study the influence degree of rainfall intensity on the instability of superficial slope, based on the detailed geological survey in the field, the Geostudio software is used to simulate the seepage field and stability of the slope under different rainfall conditions, and study the stability coefficient and instability probability under the corresponding working conditions. then, the risk assessment of the slope under extremely unstable conditions through the quantitative method is carried out. The results show that the slope is only vulnerable to instability under fully saturated conditions. The probability of instability is as high as 48.93%. The total value of the disaster-bearing body in the landslide-affected area is 3.619 million yuan, the annual loss of property is 0.8324 million yuan, and the probability of single-person annual death is 8.7×10^{-2} , which is in the extremely high risk area.

Key words: landslide; rainfall; Green-Ampt model; Geostudio software; risk assessment

滑坡灾害稳定性、定量化风险分析及评价一直是国内外学者研究的热点及难点课题, 目前研究多以区域定性或半定量稳定性和风险分析为主^[1-7], 而对不同雨强与坡体入渗深度的定量关系研究以及通过不同入渗深度来直接模拟坡体渗流和稳定性的研究很少。本文以秦巴山区牛背梁滑坡为例, 对其在不同降雨重现期下的入渗深度进行大数据统计来确定相应工况, 进行定量化的边坡稳定性分析和风险评估, 对该地区生产和未来投资有一定的借鉴意义。

1 牛背梁滑坡概况

牛背梁滑坡位于汉中市镇巴县东北部的兴隆镇水田坝村, 坐标 $32^{\circ} 35' 23''$ N、 $108^{\circ} 03' 14''$ E。该滑坡后缘高程为 773 m, 前缘高程为 724 m, 高程相差 49 m, 滑坡体长约 100 m, 宽约 90 m, 整体坡度约 30° , 坡度最大达 55° 以上, 滑体平均厚度约 4.0 m, 滑体体积约为 3.6 万 m^3 , 滑向 120° , 滑坡体平面形态为簸箕形, 见图 1, 由于坡体耕地较多,

收稿日期: 2018-10-26

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(41602281); 中央高校基金项目(310826161019); 中国地质环境监测院项目(12120115045601); 中国地质科学院探矿工艺研究所项目(12120115045601)

作者简介: 李军(1990-), 男, 山西大同人, 硕士研究生, 主要研究方向为工程地质和地质灾害。

滑坡体剖面形态为复合型,见图2。坡脚处为兴隆镇居民聚集点及镇主干公路,囊括房屋113间及16户72人,附近人口分布非常密集,同时多户居民开挖坡脚修建房屋,切坡高度为1.5~2.5 m,而且坡脚处房屋后无任何遮挡结构;坡体上有多处人工陡坎及土石小路,切坡高度约为1~2 m,平缓区均为耕地,即在斜坡后缘和中部及前缘均有分布,其余为乔灌木,植被覆盖率约为35%,以灌木为主,坡顶上建有高约20 m的信号塔,对坡体表面堆积体稳定性有很大的影响。

滑体以第四系残坡积物粘土、粉质粘土,夹母岩风化碎块石为主,呈松散-中密状,孔隙较发育,透水性较好,碎石主要为强风化粉砂岩,呈棱角状,碎石含量约为30%~35%,粒径较大,坡体表面碎石粒径主要为1~4 cm,坡体内部碎石粒径主要为2~12 cm;滑带物质主要为受前期滑动剪切作用影响形成的软弱带,成分主要为黄褐~褐黄色,稍湿,可塑的粉质黏土夹碎块石,层厚约10~15 cm;下伏基岩主要为 ϵ_{1s} 灰黄色粉砂岩、灰黑色灰岩,夹砂岩,部分灰岩可见石英条纹和矿物斑点,呈微晶粒结构,中厚层-厚层构造,节理裂隙稍发育,滑坡左翼后缘及侧翼出露粉砂岩,倾向约250°~270°,倾角20°~60°;右翼前缘及侧翼有粉砂岩出露,倾向240°~260°,倾角40°~70°。

据调查,该处为老滑坡,在2010年7月18日,坡体后缘出现高约2~3 m的陡坎,坡体中部出现多条长约数十米,高约0.5~1 m的陡坎,地面上出现宽约10~20 cm,长约20~30 m的裂缝,形成较明显的圈椅状地形,自2010年以来,每逢雨季,均会有局部小范围表土层岩土体变形坍塌和裂缝出现,前缘会有局部垮塌,表明该坡体仍处于蠕滑变形阶段,具有季节活动性,因此该滑坡主要诱因为长时间持续性降雨,为典型的降雨型滑坡,在极端降雨条件下,变形失稳概率极大,危险性较大。

2 滑坡破坏概率计算

2.1 极值降雨概率及入渗深度计算

2.1.1 方法总论

研究区内多阴雨天,尤其是7-9月份,本文中的重现期选取10年、50年和100年,而多日选取1日、3日、5日、7日。其中某一重现期下的降雨强度是通过特定的曲线来拟合已有样本点数据(多年

日值降雨数据)求得,某一降雨强度下的雨水入渗深度是通过Green-Ampt模型求得。

2.1.2 极值降雨频率分布线型

在对已有样本点进行拟合时,采用皮尔逊三型曲线来进行样本点的拟合^[8],其概率密度函数为:

$$f(x) = \frac{\beta^\alpha}{\tau(\alpha)} (x - a_0)^{\alpha-1} e^{-\beta(x-a_0)} \quad (a_0 < x < \infty, \alpha > 0, \beta > 0) \quad (1)$$

式中, a_0 、 α 、 β 分别表示皮尔逊三型分布的位置参数、形状和刻度, $\tau(\alpha)$ 为 α 的伽玛函数, x 为水文变数取值。

显然当 a_0 、 α 、 β 确定后,该密度函数也随之确定。

则 X 的超过累积概率为:

$$P(X \geq x) = \frac{\beta^\alpha}{\tau(\alpha)} \int_x^{+\infty} (x - a_0)^{\alpha-1} e^{-\beta(x-a_0)} dx \quad (2)$$

令 $t = \frac{x - E(X)}{\sigma}$,则(2)式变为下式:

$$P(X \geq x) = \frac{\beta^\alpha}{\tau(\alpha)} \int_{\frac{x-E(X)}{\sigma}}^{+\infty} \left(t\sigma + \frac{\alpha}{\beta}\right)^{\alpha-1} e^{-\beta\left(t\sigma + \frac{\alpha}{\beta}\right)} \sigma dt = \frac{\alpha}{2} \frac{\beta^\alpha}{\tau(\alpha)} \int_{\frac{x-E(X)}{\sigma}}^{+\infty} (t + \sqrt{\alpha})^{\alpha-1} e^{-\sqrt{\alpha}(t+\sqrt{\alpha})} dt \quad (3)$$

上式只含有一个参数 α ,按照水文工作习惯,以 φ 代表 $\frac{x-E(X)}{\sigma}$,水文上称之为离均系数,由

(3)式可知 P 是 α 和 φ 的函数,由于 $C_s = \frac{2}{\sqrt{\alpha}}$,所

以 P 也是 φ 和 C_s 的函数,即 $P = f(\varphi, C_s)$,P-san型离均系数表

$$\text{由于 } t = \frac{x - E(X)}{\sigma}, dx = \sigma dt, \text{ 可以得出:} \\ x_p = \bar{x}(\varphi C_v + 1) \quad (4)$$

采用年最大值法对收集的1959-2015年共57年的降雨数据进行选样,降雨历时选取1日、3日、5日以及7日,利用不同历时的降雨样本点,采用最小二乘适线法对皮尔逊三型曲线进行拟合,可以得到不同降雨历时下皮尔逊三型曲线的参数,见表1,将表1中的参数代入到式(4)中便可得到不同重现期下的理论降雨值^[8-9]。

2.1.3 极值降雨条件下的入渗深度计算

在得到不同重现期降雨强度的基础上,采用Green-Ampt模型中非积水入渗部分^[10]

$$y = tq \cos \alpha / (Q_s - Q_i) \quad (5)$$

计算在特定降雨强度作用下雨水的入渗深度,其中 y 为入渗深度, t 为降雨时间, q 为降雨强度,

α 为斜坡坡度, Q_s 为饱和含水率, Q_i 为初始含水率。

由于滑坡整体覆盖层较薄 (约 4.0 ~ 4.5 m), 且坡度主要集中在 $10^{\circ} \sim 50^{\circ}$ 之间, 本文仅统计该坡度范围内不同降雨重现期 (10 年 3 日、50 年 7 日、100 年 1 日、100 年 5 日、100 年 7 日) 坡体的最大平均入渗深度, 见表 2。

表 1 不同降雨历时下 P-III 型曲线参数

Tab.1 P-III curve parameters under different rainfall durations

工况	E(X)	Cv	Cs
1 日	115.96	0.384 6	1.13
3 日	60.23	0.42 4	1.23
5 日	41.77	0.425 2	0.87
7 日	33.66	0.415 7	0.63

表 2 不同降雨重现期入渗深度统计表

Tab.2 Infiltration depth statistics table for different rainfall return periods

工况分类	深度	入渗总深度 /m	入渗平均深度 /m
10 年 3 日		98.48	2.40
50 年 7 日		162.39	3.96
100 年 1 日		88.48	2.16
100 年 5 日		163.30	3.98
100 年 7 日		176.21	4.30

2.2 滑坡稳定性分析

2.2.1 滑坡模拟工况与模拟参数

从表 2 中可以看出当 50 年一遇 7 日及 100 年一遇 5 日, 7 日工况时, 上覆土层入渗深度平均约为 4.0 ~ 4.3 m, 即上覆土层完全饱和, 而 10 年一遇 3 日及 100 年一遇 1 日暴雨工况下入渗深度为 2.16 ~ 2.4 m, 即上覆土层仅有一半土层深度完全饱和, 因此本文坡体危险性仅考虑天然状态、上覆土层完全饱和状态及上覆土层仅有一半土层深度完全饱和状态三种情况为滑坡瞬态渗流场, 即研究以下三种不同工况下的滑坡稳态问题, 即

- ① 工况 1: 自重 (天然状态);
- ② 工况 2: 自重 + 10 年一遇 3 日或 100 年一遇 1 日暴雨工况 (半层饱和状态);
- ③ 工况 3: 自重 + 50 年一遇 7 日、100 年一遇 5 日或 7 日暴雨工况 (完全饱和状态);
- (1) 通过前期地质钻探和实地剖面测量构建稳定性分析计算模型, 见图 3。
- (2) 通过对钻探所取土样进行室内土工试验, 各

参数见表 3。

2.2.2 滑坡渗流场模拟

采用 Geostudio 软件对各工况进行渗流场模拟,

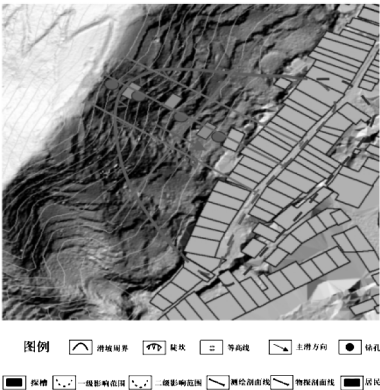


图 1 牛背梁滑坡工程地质平面图

Fig.1 Engineering geological plan of Niubeiliang landslide

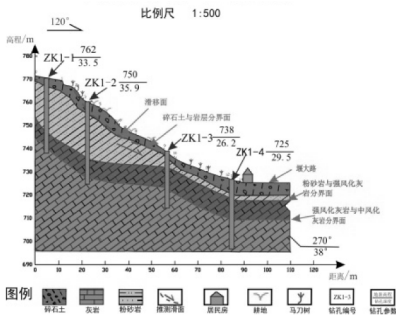


图 2 牛背梁滑坡工程地质剖面图

Fig.2 Engineering geological section of Niubeiliang landslide

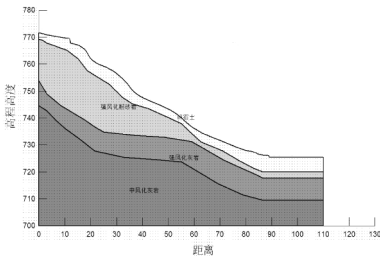


图 3 牛背梁滑坡剖面计算模型

Fig.3 Calculation model of Niubeiliang landslide section

由于工况二即半层饱和状态的渗流场即为工况 3 条件下上半层土层的渗流, 所以此处仅给出天然状态和完全饱和状态条件下滑体渗流场, 见图 4 和图 5。

2.2.3 滑坡稳定性分析

在滑坡渗流场分析的基础上, 耦合 slope 模块, 为提高模拟结果精度, 对不同工况下滑坡分别利用 Ordinary 法, Janbu 法, Bishop 法及 Morgenstern-Price 法, 对剖面进行稳定性计算和利用 Monte Carlo 法进行 10 000 次随机计算最终得到破坏概率, 见表 4。

表 3 碎石土物理力学性质参数
Tab.3 Physical and mechanical properties of gravel soil

参数名称	重度 KN/m ³		体积含水量 /m ³ /m ³	弹性模量 /Gpa	泊松比	渗透系数 /m/d		粘聚力 C/KPa		内摩擦角 φ /°	
状态	天然	饱和	饱和	天然	天然	天然	饱和	天然	饱和	天然	饱和
数值	17.4	20.5	0.25	0.07	0.21	5.8×10 ⁻⁴	0.584	18	15	17.1	15.1

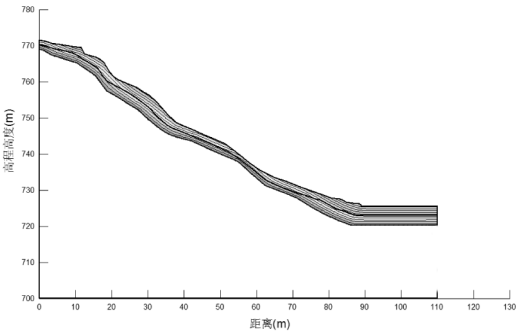


图 4 天然状态下滑坡渗流场
Fig.4 Natural state sloping slope seepage field

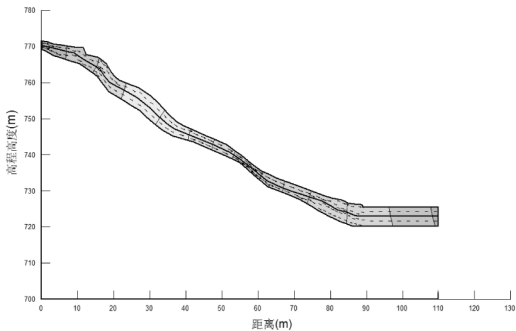


图 5 完全饱和状态下滑坡渗流场
Fig.5 Fully saturated state sloping slope seepage field

从表 4 可以看出,该坡体在正常条件(天然状态)下是相对稳定的,甚至在 10 年一遇 3 日及 100 年一遇 1 日暴雨等工况(半层饱和状态)下,也是基本稳定的,但如若出现极其罕见的连续强降雨,例如在 50 年一遇 7 日,100 年一遇 5 日,7 日暴雨工况(完全饱和状态)下,随着降雨强度和重现期增大,雨水入渗深度将会增大,使坡体土层完全饱和,坡体自重极剧变大,粘聚力和内摩擦角极剧减小,土体强度极剧降低,坡体安全系数降低,失稳概率突变式增大,增大到约 16 倍之多,加之坡脚处人工切坡严重,未采取任何加固措施,严重威胁坡脚下众多居民安全,因此在工况三下危害性及大,建议进行边坡加固并修筑排水渠,提早预警。

表 4 不同工况下安全系数和失稳概率统计表
Tab.4 Statistical Table of Safety Factor and Instability Probability of Different Working Conditions

工况类型	平均安全系数	平均失稳概率
1	1.132	2.79%
2	1.12	3.06%
3	0.979	48.93%

3 滑坡易损性评价

3.1 滑坡影响范围分析

滑坡的影响范围可以通过滑坡最远滑移距离来

确定,而滑坡最远滑移距离通过下述公式来确定:

log10(H/L)=-0.085·log10V-0.047 (6)

由实地调查可知坡体的垂直高度为H=49 m,体积约为3.6×10⁴m³,由(6)式可以计算得坡体滑移最远距离为L=133 m,由于坡脚房屋为砖混结构,强度较高,然后再通过地形地貌得出滑坡大致的影响范围,见图 6。



图 6 牛背梁滑坡及其影响范围
Fig.6 Niubeiliang landslide and its impact range

3.2 承灾体易损性评价

Uzielli 等^[11]提出考虑承灾体本身脆弱性和滑坡强度的易损性评价公式,即

V=I×S (7)

式中:I指滑坡灾害作用强度;S代表承灾体脆弱性。

3.2.1 滑坡对建筑作用强度分析

滑坡对建筑物的作用强度采用式 $(I = 1 - (1 - I_{pre})(1 - I_{f-dep}))$ 进行计算, 其中 I_{pre} 为滑坡冲击力强度指标, I_{f-dep} 为运动滑体深度强度指标。

3.2.2 建筑物脆弱性

由式 $(S = 1 - (1 - S_{str})(1 - S_{mai})(1 - S_{ser}))$ 计算建筑物的脆弱性。

结合该滑坡承载体特点, 运用工程类比法及相关经验参数, 具体参数可见表 5。

则由式 (7) 可以计算得到建筑的易损性为 0.48。

由于滑坡影响范围内的房屋建筑多为砖混结构, 房屋质量较好, 但屋后无支挡措施, 且室内人员多

表 5 建筑物易损性评价参数

Tab.5 Building vulnerability assessment parameters

房屋结构类型	I_{pre}	I_{f-dep}	S_{str}	S_{mai}	S_{ser}
砖混结构	0.70	0.50	0.50	0.05	0.10

为年龄在 1 ~ 15 岁, 40 ~ 70 岁的幼龄和中老年人群, 约占总人口的 60% 以上, 行动迟缓, 逃生困难, 因此人员的易损性取 0.3。(见表 5)。

3.3 风险分析评估

3.3.1 滑坡体到达承灾体的概率

由现场估算可知, 建筑物距离滑体前缘的平均距离大约为 26 m, 则滑坡体的到达概率为 $P_{(T:L)} = 126/133 = 0.8$ 。

3.3.2 承灾体的时空概率

房屋为固定承灾体, 其时空概率为 1; 房屋中的人员时空概率通过对兴隆镇人员居住情况调查可知人员每年居住约为 295 天, 每天在家为 18 个小时, 则时空概率为 $= (295/365) * (18/24) = 0.606$ 。

3.3.3 承灾体价值评估

3.3.4 风险评估

将滑坡对承灾体中财产和人员风险分别进行评价, 按式 $(R_{(prop)} = P_{(L)} \times P_{(T:L)} \times P_{(S:T)} \times V_{(prop:S)} \times E)$

表 6 承灾体估值表

Tab.6 Valuation of the disaster-bearing body

承灾体类型	承灾体数量	单价 / 元	承灾体价值 / 万元	承灾体总价值 E / 万元
农田	3750/m ²	207	77.6	
砖混房屋	113/ 间	25 000	282.5	361.9
镇道	180/ 米	100	1.8	

对牛背梁滑坡进行财产风险评估, 评估结果见表 6, 按式 $(P_{(LOL)} = P_{(L)} \times P_{(T:L)} \times P_{(S:T)} \times V_{(D:T)})$ 对牛背梁滑坡进行人员风险评估, 评估结果见表 8。

4 结论

1) 斜坡整体在天然状态和半层饱和状态下, 是基本稳定的, 但如若遭遇某些极端情况, 例如在 50 年一遇 7 日, 100 年一遇 5 日, 7 日暴雨工况 (完全饱和状态) 下, 斜坡极有可能整体发生破坏, 危及坡脚下的集镇居民, 应及时做好防灾减灾措施。

2) 滑坡影响区内单人年死亡概率 8.7×10^{-2} , 滑坡影响区内承灾体总价值为 361.9 万元, 财产年损失 83.24 万元。

3) 单人年死亡概率 $8.7 \times 10^{-2} > 1 \times 10^{-3}$, 在工况三 (完全饱和状态) 条件下, ②区即牛背梁滑坡坡体区域和③区即滑坡前缘坡脚处影响区域处于风险极高区, 其中建筑易损性高于人员的易损性, 而①区和④区即滑坡后扩区由于人类活动较少, 处于中低风险区。

表 7 牛背梁滑坡财产风险评估

Tab.7 Property risk assessment of Niubeiliang landslide

滑坡发生概率 $P_{(L)}$	滑坡到达承灾体概率 $P_{(T:L)}$	承载体时空概率 $P_{(S:T)}$	承载体易损性 $V_{(prop:S)}$	承载体价值 E (万元)	财产年损失 $R_{(prop)}$ (万元)
0.599	0.8	1	0.48	361.9	83.24

表 8 牛背梁滑坡人员伤亡风险评估

Tab.8 Risk assessment of casualties of Niubeiliang landslide

滑坡发生概率 $P_{(L)}$	滑坡到达承灾体概率 $P_{(T:L)}$	承载体时空概率 $P_{(S:T)}$	人员易损性 $V_{(D:T)}$	单人年死亡概率 $P_{(LOL)}$
0.599	0.8	0.606	0.3	8.7×10^{-2}

参考文献:

- [1] John R Dymond, Mrray R Jessen. Computer simulation of shallow landsliding in New Zealand hill country[J]. ITC Journal/the International Institute for Aerial Survey and Earth Sciences, 1999, 1(2): 122-131.
- [2] 石菊松, 石玲, 吴树仁, 等. 滑坡风险评估实践中的难点与对策[J]. 地质通报, 2009, 28(8): 1020-1030.
- [3] 吴树仁, 石菊松, 张春山, 等. 地质灾害风险评估技术指南初论[J]. 地质通报, 2009, 28(8): 995-1005.
- [4] 杜娟. 单体滑坡灾害风险评价研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2012.
- [5] 向玲, 王世梅, 王力. 动水压力型滑坡对库水位升降作用的响应——以三峡库区树坪滑坡为例[J]. 工程地质学报, 2014, 22(5): 876-882.
- [6] 向学坤, 文海家, 谢朋, 等. 强降雨条件下诱发单体滑坡的多场特征耦合研究[A]. 中国地质学会工程地

质专业委员会. 2015年全国工程地质学术年会论文集[C]. 中国地质学会工程地质专业委员会: 《工程地质学报》编辑部, 2015: 9.

- [7] 李佳春. 降雨入渗对麻湾村滑坡稳定性影响研究[D]. 中国地质大学(北京), 2018.
- [8] 顾春新. 城市短历时暴雨强度公式及参数确定方法研究[D]. 河海大学, 2007.
- [9] 刘光文. 皮尔逊Ⅲ型分布参数估计[J]. 水文, 1990(4): 1-15.
- [10] 张洁, 吕特, 薛建锋, 等. 适用于斜坡降雨入渗分析的修正 Green-Ampt 模型[J]. 岩土力学, 2016, 37(9): 2451-2457.
- [11] UZIELLI M, NADIM F, LACASSE S, et al. A Conceptual Framework for Quantitative Estimation of Physical Vulnerability to Landslides [J]. Engineering Geology, 2008, 102(3/4): 251 - 256.

(责任编辑 李新)

(上接第40页)

3 结论

1) 在低围压时, 两种缩尺方法缩制的粗粒料试样均有不同程度的软化现象, 且 TC 料的软化更为明显。围压相同时, TC 料的峰值偏应力 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 与内摩擦角均高于同一粒径下 HH 料的相应值。

2) TC 料的 ε_{af} 与 ε_{v0} 均小于 HH 料的相应值, 说明用剔除法缩制的粗粒料的压缩性较小。相同围压相同粒径下, TC 料的 M_0 均高于 HH 料的相应值, 较高的 M_0 说明土颗粒有较高的翻越势能, 宏观上即表现为 TC 料有更强的剪胀性。总体而言, 与 HH 料相比, TC 料有较强的剪胀性。

3) 两种方法缩尺所得的割线弹性模量 $E_{0.5}$ 均随围压的增大而增大。同一缩尺方法下, 大型三轴试验在应力水平 50% 处的割线弹性模量 $E_{0.5}$ 及割线体积模量 $K_{0.5}$ 均高于中型三轴试验。同一颗粒最大粒径下, TC 料的 $E_{0.5}$ 高于 HH 料的 $E_{0.5}$, 前者约为后者的 1.03 ~ 1.39 倍。

4) 两种缩尺方法缩制的试样强度指标值有较大差别; 随着颗粒最大粒径的增大, HH 料的 c 、 φ_0 、 $\Delta\varphi$ 值均有所增大, 而 TC 料的相应值却有所减小; 与 TC 料相比, HH 料的弹性模量参数 K 的变化幅度更大。

参考文献:

- [1] 日本土质工学会著. 粗粒料的现场压实[M]. 郭熙灵, 文丹译. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.
- [2] 郭庆国. 粗粒土的工程特性及应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003.
- [3] 郇能惠. 高混凝土面板堆石坝新技术[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.
- [4] 中华人民共和国行业标准. SL237-1999 土工试验规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.
- [5] MARSAL R J. Large scale testing of rockfill materials[J]. Journal of the Soil Mechanics & Foundations Division, 1967, 93(2): 27-43.
- [6] MARSCHI N D, CHAN C K, SEED H B. Evaluation of properties of rockfill materials[J]. Journal of Soil Mechanics & Foundations Div, 1972, 98(1): 95-114.
- [7] 福島伸二, 北島明. 超大型三軸壓縮試驗裝置の歩みとその果たした役割[J]. 土と基礎, 1998, 46(11): 29-32.
- [8] 朱俊高, 翁厚洋, 吴晓铭, 等. 粗粒料级配缩尺后压实密度试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(8): 2394-2398.
- [9] 傅华, 韩华强, 凌华. 堆石料级配缩尺方法对其室内试验结果的影响[J]. 岩土力学, 2012, 33(9): 2645-2649.
- [10] AHAD, BAGHERZADEH Khalkhali, ASGHAR, et al. Numerical and experimental direct shear tests for coarse-grained soils[J]. Particuology, 2009, 7(1): 83-91.
- [11] 王永明, 朱晟, 任金明, 等. 筑坝粗粒料力学特性的缩尺效应研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(6): 1799-1806.

(责任编辑 李新)