DOI: 10.12090/j. issn. 1006 - 6616. 2018. 24. 06. 090

文章编号: 1006-6616 (2018) 06-0863-08

降雨下边坡开挖支护离心模型试验

万 琪¹,岳夏冰¹,闫 强^{1,2},晏长根¹ (1.长安大学公路学院,陕西西安 710064;

2. 广西交通投资集团有限公司, 广西 南宁 530021)

摘 要:为研究降雨下高速公路高边坡在开挖及运营过程中的变形规律及稳定性,以柳南公路 改扩建工程某处典型高边坡为原型,利用大型土工离心机及自主研发降雨装置,开展12组不同 开挖—支护时序边坡模型试验,通过对边坡从变形至破坏全过程监测,分析不同支护时序条件 对边坡稳定性的影响。结果表明:实时支护能有效抑制边坡在水平和竖向的变形,在边坡开挖 至第1级和第6级后,坡顶水平变形分别降低33.9%和30.4%,竖向变形降低54%和11.6%; 实时支护对维持降雨下边坡稳定状态非常有利,边坡开挖至第2、4、6级后遭遇降雨,其稳定系 数降低了10.1%、5.4%、6.5%;相同降雨量下,无实时支护边坡的稳定系数要比实时支护至 少降低50%,说明了实时支护对降雨下边坡稳定性的意义巨大。

关键词: 高速公路; 边坡开挖; 改扩建工程; 实时支护; 模型试验 中图分类号: TU472; TU458 +.4 ______ 文献标识码: A

CENTRIFUGE MODEL TEST OF SLOPE EXCAVATION AND SUPPORT UNDER RAINFALL

WAN Qi¹, YUE Xiabing¹, YAN Qiang^{1,2}, YAN Changgen¹

(1. School of Highway, Chang' an University, Xi' an 710064, Shaanxi, China;
2. Guangxi Communications Investment Group Co., Ltd., Nanning 530021, Guangxi, China)

Abstract: In order to study the slope stability and deformation characteristics under rainfall during excavation and operation process, the typical high slope of Liu-Nan highway extension project is chosen as the prototype. Using the geotechnical centrifuge of Chang'an University and independently developed rainfall device, 12 groups of centrifuge model tests of different excavation-support sequence were carried out. Through monitoring the whole process of slope from deformation to failure, the effect of different support sequence on the stability of slope was analyzed. The following results are obtained: the horizontal deformation and the vertical deformation of the slope are well restricted by the timely-support method, the horizontal deformations of the 1th and 6th grade excavation are reduced by 33. 9% and 30. 4%, and vertical deformations are reduced by about 54% and 11. 6%; It is extremely favorable to use the timely-support excavation method for the stability of the slope under rainfall condition. The rainfall stability coefficient have a very small drop at 2th, 4th and 6th grade excavation after rainfall and reduce by 10. 1%, 5. 4% and 6. 5% respectively. Under the same rainfall, the stability coefficient of slope without timely-support is at least 50% lower than that of timely-support excavation method, which shows that it is of great significance to slope stability under rainfall.

Key words: highway; slope excavation; reconstruction project; timely-support; model test

基金项目:国家自然科学基金项目(41272285,51209006);中央高校基本科研业务费专项资金资助(300102218412) 作者简介:万琪(1990-),女,在读博士,主要从事特殊土路基及地基处理方面的研究。E-mail:wanqi77@163.com 收稿日期:2017-07-12;修回日期:2018-09-22 范二平编辑

0 引言

近年来,道路交通量的日益剧增使得很多路 段都趋于饱和,由于新建公路投资大,耗时长, 占用土地资源多等,因此道路改扩建工程迫在眉 睫^[1-3]。路基扩建势必要对原已稳定的边坡造成进 一步扰动,边坡开挖后通常不能实时支护,根据 开挖支护方式不同,其间隔时间可达数月,甚至 一年以上。这期间在降雨等自然营力等影响下, 可能会导致边坡出现不同规模的变形,尤其是地 形起伏较大的路段,边坡的稳定性较差,严重影 响公路路基拼宽施工和工程设施运营安全。

研究认为,降雨入渗是导致绝大部分边坡出 现冲蚀、滑塌和滑坡等灾害的主要原因^[4~6],尤其 是地震作用下的高边坡及其边坡开挖的稳定 性[7~9]。由于雨水在边坡土体中渗流形成的流固耦 合过程较复杂,一般采用数值模拟建立降雨入渗 模型进行边坡稳定性分析^[10~12],特别是水库岸边 坡稳定性[13~15]。同时,通过物理模型试验和现场 试验监测^[16-18]分析降雨型滑坡的产生机制,或基 于非饱和渗流理论提出边坡降雨入渗深度计算公 式,实现边坡稳定性的实时分析^[19~20]。以上研究 大都针对自然或在建边坡展开,而对于改扩建道 路边坡的研究比较少,特别是施工开挖形成的临 时多级边坡的研究则更少。为了对降雨时不同开 挖--支护时序下边坡稳定性,进行准确的分析和 预测,并寻求并优化合理的开挖施工方法及边坡 加固措施,开展室内模型试验研究非常必要。

近年来,模型试验在边坡稳定性分析中得到 了日益广泛的应用^[21-23]。通过离心模型试验模拟 锚杆等加固边坡时的受力特征,揭示锚固结构在 边坡运营过程中的作用机理^[24-26]。边坡在不同开 挖一支护时序下的变形特性具有不同的规律,尤 其是降雨作用下。近年的研究多侧重于开挖一支 护时序与边坡稳定性的关系^[27-28],但对其与边坡 土体内部应力和变形关系,以及实际工程的支护 方案等没有深入探讨。

因此,选取柳州至南宁高速公路改扩建工程 某典型高边坡为实例,通过开展降雨条件下不同 开挖一支护时序下的边坡离心模型试验,分析边 坡在开挖过程中的变形与稳定特性,探讨不同程 度的实时支护对边坡加固效果的影响,为相关边 坡工程支护设计及工程实践提供一定参考。

1 模型方案设计

试验采用长安大学 TLJ-3-60gt 型土工离心机进行,该机主要技术性能指标见表1。试验选用模型 箱尺寸为500 mm×360 mm×400 mm(长×宽×高)。

表1 离心机技术指标

Table	1	Tecl	nnical	indexes	of	geotechn	ical	centrifuge
						0		0

离心模型箱参数	规格
离心机容量/ (g・t)	60
离心加速度/g	1 ~ 200
有效半径/m	2.0
启动历时/min	≤20 (从静止到 200 g)
模型箱外部尺寸/ (m×m×m)	0. 7 × 0. 36 × 0. 5/0. 5 × 0. 4 × 0. 5

1.1 地质构造

根据柳南段高速公路某处边坡为原型开展了 离心模型试验。该路段的地形起伏较大,边坡左 右两侧的高度分别是 73 m 和 15 m,坡高为 57 m, 边坡分 6 级,每级为 10 m。边坡分为三层:上层 为冲洪积成因粘土,工程地质条件很差;中层为 砾质粘性土;底层边坡为砂质粘性土。基岩主要 为泥盆系的砂岩、泥质砂岩及下第三系泥质砂岩 等。第 1、2 和 3 级边坡坡率 n 为 0.5、0.75 和 0.75,第 4、5、6 级边坡坡率 n 均为 1。各岩土体 物理力学参数如表 2 所示。

表 2 边坡岩土体工程参数

Table 2	The mechanical parameters of the rock masses					
土层	重度/ (kN/m ³)	粘聚力 c/kPa	内摩擦角 <i>φ</i> /(°)	坡高	平均 倾角	边坡 分级
砾质粘性土	19.1	28.9	21.3	17	39.6	3
砂质粘性土	20.2	30.8	24.2	34	34.9	2
泥质砂岩	24.6	40.2	27.1	6	33.8	1

1.2 模型相似与元器件布置

根据现场地质情况和试验条件,确定模型试验几何相似比为 N = 1:140。取 $C_{\sigma} = 1^{[3]}$,实现等应力模拟,按 π 定理,其他物理量相似比见表 3。 对实际边坡进行简化处理,取路基中心线至边坡坡顶外 11 m 处为模型原型,且在模型填筑时基本 保持实际地形剖面一致。

砂质粘性土砂含量较低,直接采用原型土料, 砾质粘性土需要进行比尺效应判别是否需要考虑 模型箱边界的影响。

表 3 离心模型试验相似比

 Table 3
 Similitude ratios used in centrifuge model tests

类型	物理量	相似比
	线位移 L/m	1:100
几何尺寸	面积 S/m ²	$1:10^{4}$
	体积 V/m3	$1:10^{6}$
	弾性模量 E/(kN・m ⁻²)	1:1
	变形模量 E ₀ / (kN・m ⁻²)	1:1
	容重 γ / (kN・m ⁻³)	100:1
材料特性	应变 7	1:1
	泊松比 v	1:1
	内摩擦角 φ/ (°)	1:1
	黏聚力 c/ (kN・m ⁻²)	1:1
动力特性	固结时间 T/h	1:104

$$B_{\min}/d_{\max} > 13$$

 $B_{\min}/d_{50} > 60$ (1)

公式中, *B*_{min}为模型箱的最小边长, mm; *d*_{max} 为土颗粒的最大粒径, mm; *d*₅₀为土料颗粒的平均 粒径, mm。通过颗粒分析试验得到砾质粘性土颗 粒的 *d*_{max}和 *d*₅₀不满足式(1), 需将不合格的土料 颗粒粒径按等量替代的原则进行处理。经过调整 的土料各级粒径含量的计算公式:

$$P_i = \frac{P_{oi}P_5}{P_s - P_{d_{\max}}} \tag{2}$$

其中, P_i 为处理后土料的某粒径含量,%; P_{oi} 为原级配某粒径含量,%; P_5 为大于 5 mm 粒径土的含量,%; P_s 为不合格粒径的含量,%; 通过比例关系等量替代法处理后的颗粒级配曲线如图 1 所示。







根据相似准则中的量纲分析法,边坡模型试验中的各参数可以通过式(3)表达:

$$f\{\varphi_i, C_i, (a, b, c), (\sigma_i, \tau_i, E, \mu, \varphi, c, \gamma \cdots)\} = 0$$
(3)
其中, (φ_i, C_i) 为结构面的剪切强度, (a,

b, c)为岩土体和主要构造面的几何条件, (σ , τ , E, μ , φ , c, γ)为岩土体的力学特性。砂岩 的模型材料采用重晶石粉、水泥和石膏制成, 见 表4。实际工程中锚杆直径22 cm,弹性模量2.1× 10⁵ MPa,通过计算选择弹性模量为 0.8×10⁵ MPa 的硒丝模拟,直径为 1 cm。

表 4 砂岩模拟材料力学参数

fable 4	Mechanical	parameters	of	sandstone	simulation	material
---------	------------	------------	----	-----------	------------	----------

重晶石:水泥:石膏	重度/(kN/m ³)	弹性模量	单轴抗压强度
1:1.21:1.28	23.1 ~26.3	2.7	16.3

1.3 模型试验方案

为了模拟公路改扩建工程高边坡在开挖及运营过程中的稳定性,设计了12组不同开挖—支护时序下的模型试验,其中ES-1—ES-6这6组为实时支护,即每开挖一级边坡后立刻进行支护,E-1—E-6这6组则采用的是边坡开挖完成后再进行支护,即非实时支护,边坡原型的模拟如图2所示。将ES-1—ES-3和E-1—E-3组模型进行两次试验,分别测得一般条件和降雨作用下的边坡稳定系数。试验方案详见表5。





为监测坡体在开挖过程中的变形情况,采用 optoNCDT-1401 型激光位移传感器进行监测(精度 4 μm,%F·S≤40 μm,线性量程40~100 mm)。 分别在坡顶、第二、三级边坡和坡脚用大头针标 记(列间距均为35 mm),结合高速摄影装置对边 坡沉降进行观测。通过自行研制的模拟降雨系统, 在离心场中实现了较为均匀的降雨作用,该系统 包括输水装置与降雨装置,其中输水装置由储水 箱、输水管、电磁阀等组成。将降雨器分成4个小

2018

表 5 模型支护与降雨情况

Table 5 Supporting conditions of models and rainfall situation

编号	开挖- 支护时序	降雨时间	降雨条件	
ES-1		第 2 级 边 坡 开 挖 结束		
ES-2		第 4 级 边 坡 开 挖 结束	暴雨 (30 mm/h 持续 7 h)	
ES-3	实时支护	第 6 级 边 坡 开 挖 结束		
ES-4	(近开挖 边支护)		暴雨(24 h 总降雨量 50 ~ 100 mm)	
ES-5		全部边坡开挖结束	大暴雨(24 h 总降雨量 100~200 mm)	
ES-6			特大暴雨 (24 h 总降雨量 > 200 mm)	
E-1		第 2 级 边 坡 开 挖 结束		
E-2		第 4 级 边 坡 开 挖 结束	暴雨 (30 mm/h 持续 7 h)	
E-3	6 级边坡 全部开挖	第 6 级 边 坡 开 挖 结束		
E-4	完 后 才 支护		暴雨 (24 h 总降雨量 50 ~ 100 mm)	
E-5		全部边坡开挖结束	大暴雨 (24 h 总降雨量 100~200 mm)	
E-6			特大暴雨 (24 h 总降雨量 > 200 mm)	

隔间以实现均匀降雨,并在其底板铺设一层土工 织布,见图3、图4。





图4 模型箱及降雨装置实体图

Fig. 4 Stereogram of the physical model and the rainfall device

1.4 模型制作与试验过程

边坡模型制作主要分三个步骤:第一,根据 设计尺寸在模型箱的侧面上描绘坡体形状,并固 定模型箱的侧板;第二,根据实际边坡土体的密 度和层高称取相应质量的土体,每层土的厚度小 于4 cm,通过抹平、击实(至标记)以及凿毛进 行分层填筑;第三,依据对每级边坡设定的坡率 进行削坡,并在坡面上铺一层土工布对其进行保 护。模型制作完成后上机运行至固结沉降稳定 (模拟实际时间8年)后停机,开始边坡的开挖及 支护。然后继续上机运行,最后持续提高重力加 速度至边坡破坏,重复试验结束。

2 试验结果

2.1 边坡开挖过程中的变形

两种开挖一支护时序下边坡顶部处水平与竖向变形的发展趋势基本一致,如图 5、图 6 所示, 但从每级边坡的变形量可知,采用实时支护能有 效降低边坡在水平及竖向的变形,其中在第 1 级和 第 6 级边坡开挖结束后,水平变形分别减少了 33.9%和 30.4%,竖向变形分别减少了 54%和 11.6%。且该实时支护对竖向变形的抑制效果在开 挖前期更加明显。

两种施工方式下边坡坡脚的变形发展规律相 似,如图7、图8所示,相比无实时支护的工况, 采取实时支护的坡脚在水平方向上的变形有所减 少,其中第1级和第6级边坡在开挖结束后,水平 变形分别减少28.6%和20.5%,但该降幅要明显



图5 坡顶开挖过程中的水平变形







Fig. 6 Vertical deformation of the slope top during excavation

低于坡顶,因此实时支护对变形的抑制作用主要 体现在坡顶。而两种工况的坡脚的竖向变形均随 第3级边坡开挖结束出现降低趋势,尤其是实时支 护下的坡脚在第4级开挖结束后基本为零,但无支 护的坡脚变形明显。







2.2 边坡开挖过程中的稳定性

均质土坡的稳定系数的计算公式为:

$$F_{s} = \frac{fih \pi fi}{\hbar a fit} = \frac{\sum (c_{i}l_{i} + W_{i}\cos\alpha_{i}\tan\varphi_{i})}{\sum W_{i}\sin\alpha_{i}}$$
(4)

离心模型(CM)与原型(PM)之间的相似 关系为:



图8 坡脚开挖过程中的竖向位移

Fig. 8 Vertical displacement of the slope foot during excavation

$$\begin{split} c_{i}^{PM} &= c_{i}^{CM}, l_{i}^{PM} = N l_{i}^{CM}, \alpha_{i}^{PM} = \alpha_{i}^{CM}, \\ \varphi_{i}^{PM} &= \varphi_{i}^{CM}, N \gamma_{i}^{PM} = \gamma_{i}^{CM}, W_{i}^{PM} = N W_{i}^{CM} \quad (5) \\ 则稳定系数为: \end{split}$$

$$F_{\rm s}^{\rm CM} = F_{\rm s}^{\rm PM} \tag{6}$$

公式中, l_i 、 W_i 、 γ_i 为土条i的弧长、重力和容重。 α_i 为土条i在水平线与弧线中点切线的夹角, c_i 和 φ_i 为土条i在滑动面的黏聚力和内摩擦角。由于模型试验 F_s 与原型相等,可通过坡顶处位移传感器监测沉降过程并确定 F_s 。沉降用无量纲量 s/h (s为坡顶沉降,h为坡高)来表示。其中 F_s 为边坡临界加速度 α_f 与模型设计加速度 N_g 的比值。

两种工况下的各级边坡在开挖结束后,坡顶 沉降变形速率的发展随离心加速度的增加而明显 加快(见图9)。用拟合曲线方程分析边坡变形的 发展情况,并确定了稳定系数为1的临界状态。

两种施工方法的稳定系数曲线见图 10、图 11, 开挖前边坡稳定系数为 1.38,实时支护下的边坡 在第 1~2级开挖结束后下降为 1.18,但在 3~4 和 5~6级开挖过程中一直增长至 1.42,且在降雨 后分别减少了 10.1%、5.4%、6.5%。但没有采 用实时支护的边坡,其稳定系数随开挖过程逐渐 降低,并在第 6级开挖结束后降至 0.87,边坡已 失稳,且降雨后边坡的稳定系数大幅下降,降幅 分别为 17.3%、18.6%和 19.8%。由此可见,采 用实时支护对维持边坡尤其是降雨作用下边坡的 稳定状态是极为有利的。

2.3 降雨对边坡开挖过程中稳定性的影响

试验组 ES-4、ES-5 和 ES-6 采用的是实时支护 的施工方式,试验组 E-4、E-5 和 E-6 采用全部开 挖完成后统一支护的施工方式,即非实时支护。 然后对两组工况下的边坡进行极端天气下的稳定 系数测试,如图 12、图 13 所示。



图9 坡顶处无量纲沉降随离心加速度水平 变化曲线



两种工况边坡的稳定系数的稳定系数下降幅 度随降雨量的增大而明显变大(见图 12、图 13), 且稳定系数的最小值出现的时间随降雨量的增加 而推迟,说明降雨量越大,对边坡的影响范围则 越大,对其稳定性的影响也越大。当 24 h 内降雨 分别为 50 mm、100 mm 和 200 mm 时,采用实时



图 10 实时支护稳定系数发展曲线

Fig. 10 Development curves of stability coefficient

with timely-support



图 11 开挖不实时支护稳定系数发展曲线 Fig. 11 Development curves of stability coefficient without timely-support



图 12 实时支护工况降雨后稳定系数发展曲线

Fig. 12 Stability coefficient development curves after rainfall with timely-support after rainfall



图 13 非实时支护工况降雨后稳定系数发展曲线 Fig. 13 Stability coefficient development curves after untimely excavation support condition after rainfall

支护边坡的稳定系数在 36 h 内的最大降幅为 3.6%、6.5%、12.3%,而非实时支护工况的最大 降幅为7.1%、16.7%、93.1%,没有采用实时支 护的边坡,其稳定系数在降雨作用下至少降低了 50%。由此可见,实时支护对于维持降雨下边坡开 挖过程中的稳定性发挥非常大的作用。

3 结论

通过采用长安大学大型土工离心机模拟降雨 条件下的多级高边坡不同开挖一支护时序下的变 形特性及稳定性。主要得出以下结论:

(1)采用实时支护能有效减少坡顶处水平和 竖向的变形,第1级和第6级边坡开挖后,坡顶水 平方向的变形分别降低了33.9%和30.4%,竖向 的变形降低了54%和11.6%,实时支护对坡顶变 形的抑制效果比坡脚更加明显,且在开挖前期更 能发挥作用。

(2)当边坡采用实时支护的方式进行开挖,边 坡的稳定性系数在初始阶段略有降低,之后则一直 处于增长势态,且边坡在逐级开挖中遭遇降雨后, 其稳定系数的降幅很小,分别是10.1%、5.4%、 6.5%。而没有采用实时支护的边坡,稳定系数随开 挖逐渐降低,且降雨后大幅下降,降幅分别为 17.3%、18.6%和19.8%。说明实时支护对维持开 边坡尤其是降雨下的稳定状态是极为有利的。

(3)边坡稳定系数随着降雨量的增大而降低, 其最小值并不是在降雨过程中,而是降雨停止后 的一段时间里,且稳定系数最小值出现的时间随 着降雨量的变大而延迟。相同降雨量下,没有采 用实时支护边坡,其稳定系数要比实时支护边坡 至少降低 50%,说明了实时支护对保证降雨作用 下边坡的稳定性发挥非常大作用。

参考文献/References

[1] 韩宝睿. 高速公路改扩建工程方案研究的关键技术分析
 [D]. 南京:东南大学,2005.

HAN Baorui. Studies on key-technology in freeway reconstruction scheme [D]. Nanjing: Southeast University, 2005. (in Chinese with English abstract)

[2] 唐朝生,刘义怀,施斌,等.新老路基拼接中差异沉降的数 值模拟 [J].中国公路学报,2007,20 (2):13~17.
TANG Chaosheng, LIU Yihuai, SHI Bing, et al. Numerical simulation on differential settlement of jointing of new and old roadbed [J]. China Journal of Highway and Transport, 2007, 20 (2):13~17. (in Chinese with English abstract)

- [3] Deschamps R J, Hynes C S, Bourdeau P. Final report: embankment widening design guidelines and construction procedures [R]. West Lafayette: Purdue University, 1990.
- [4] 刘永涛.降雨入渗对黄土边坡稳定性影响研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2010.
 LIU Yongtao. Effect of rainfall infiltration on stability of loess slope [D] Yangling: Northwest Agriculture and Forestry University, 2010. (in Chinese with English abstract)
- [5] 孙萍,薛涛,虞玉诚.下蜀土边坡降雨型滑坡的成因分析
 [J].水利水电技术,2016,47 (12):117~120.
 SUN Ping, XUE Tao, YU Yucheng. Analysis on causation of rainfall-induced landslide of Xiashu loess slope [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2016,47 (12):117~120. (in Chinese with English abstract)
- Liu J X, Yang C H, Gan J J, et al. Stability analysis of road embankment slope subjected to rainfall considering runoffunsaturated seepage and unsaturated fluid-solid coupling [J]. International Journal of Civil Engineering, 2017, 15 (6): 865 ~876.
- [7] 邹祖银,朱占元,张锋,等. 连续降雨条件下某震后高边坡 稳定性分析 [J]. 地震工程学报, 2016, 38 (4): 541 ~548.
 ZOU Zuyin, ZHU Zhanyuan, ZHANG Feng, et al. Stability analysis of post-earthquake high slope under continuous rainfall [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2016, 38 (4): 541 ~548. (in Chinese with English abstract)
- [8] 蒲小武,王兰民,吴志强,等.兰州丘陵沟壑区挖方黄土高 边坡面临的工程地质问题及稳定性分析 [J].地震工程学 报,2016,38 (5):787~794.
 PU Xiaowu, WANG Lanmin, WU Zhiqiang, et al. Engineering geological problems of loess high excavation slope in loess hilly and gully region of Lanzhou and its stability analysis [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2016, 38 (5):787~ 794. (in Chinese with English abstract)
- [9] 秦凤艳,杨富莲,刘洪波,等.常见边坡支护形式的地震稳 定性对比分析 [J].地震工程学报,2017,39 (3):460 ~466.

QIN Fengyan, YANG Fulian, LIU Hongbo, et al. Comparative analysis of seismic stability on a common slope support form [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2017, 39 (3): 460 ~466. (in Chinese with English abstract)

- [10] 徐晗,朱以文,蔡元奇,等.降雨入渗条件下非饱和土边坡 稳定分析 [J].岩土力学,2005,26 (12):1957~1962.
 XU Han, ZHU Yiwen, CAI Yuanqi, et al. Stability analysis of unsaturated soil slopes under rainfall infiltration [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26 (12): 1957~1962. (in Chinese with English abstract)
- [11] Cai F, Ugai K. Numerical analysis of rainfall effects on slope stability [J]. International Journal of Geomechanics, 2004, 4 (2): 69~78.
- [12] Mahmood K, Jin M K, Ashraf M, et al. The effect of soil type on matric suction and stability of unsaturated slope under uniform rainfall [J]. Ksce Journal of Civil Engineering, 2016, 20 (4): 1294 ~ 1299.

 [13] 谭新莉,崔炜.卡拉贝利水利枢纽工程联合进水口软岩高 边坡稳定设计 [J].水利水电技术,2017,48 (4):47~ 51,57.

TAN Xinli, CUI Wei. Design of the stability of high soft rock slope at joint-intake of Kalabeili water control project [J].
Water Resources and Hydropower Engineering, 2017, 48 (4):
47 ~ 51, 57. (in Chinese with English abstract)

- [14] 崔洁.不同库水位升降速度对大坝边坡稳定性的影响研究
 [J].水利水电技术, 2017, 48 (2): 155~159.
 CUI Jie. Study on impactfrom various reservoir water level fluctuation rates on dam slope stability [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2017, 48 (2): 155~159. (in Chinese with English abstract)
- [15] 方景成,邓华锋,肖瑶,等. 库水和降雨联合作用下岸坡稳 定影响因素敏感性分析 [J].水利水电技术,2017,48 (3):146~152,157.

FANG Jingcheng, DENG Huafeng, XIAO Yao, et al. Sensitivity analysis on bank -slope stability impacting factors under joint -effect of reservoir water and rainfall [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2017, 48 (3): 146 ~152, 157. (in Chinese with English abstract)

[16] 冯有亭,李卓,周涛.坡脚冲刷作用下近坝库岸边坡滑坡 模型试验研究 [J].水利水电技术,2016,47 (12):121~ 125.

FENG Youting, LI Zhuo, ZHOU Tao. Model experimental study on near-dam reservoir bank slop landslide under slope toe erosion [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2016, 47 (12): 121 ~ 125. (in Chinese with English abstract)

 [17] 胡庆国,袁宁,刘登生,等.多层结构土质边坡降雨入渗过 程及稳定性影响分析 [J].中国公路学报,2018,31 (2): 67~74.

HU Qingguo, YUAN Ning, LIU Dengsheng, et al. Analysis of rainfall infiltration process and stability of soil slope with multilayer structure [J]. Chinese Journal of Highway and Transport, 2018, 31 (2): 67 ~74. (in Chinese with English abstract)

- [18] Wang J, Chen L, Yu Z B. Modeling rainfall infiltration on hillslopes using flux-concentration relation and time compression approximation [J]. Journal of Hydrology, 2018, 557: 243 ~ 253.
- [19] 付建新,谭玉叶,宋卫东.考虑二维降雨入渗的非饱和土 边坡稳定性分析 [J].东北大学学报(自然科学版), 2014,35 (11):1646~1649.

FU Jianxin, TAN Yuye, SONG Weidong. Analysis on stability of unsaturated soil slope considering two dimensional rainfall infiltration [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2014, 35 (11): 1646 ~ 1649. (in Chinese with English abstract)

 [20] 石振明,沈丹祎,彭铭,等.考虑多层非饱和土降雨入渗的 边坡稳定性分析 [J].水利学报,2016,47 (8):977 ~985.

> SHI Zhenming, SHEN Danyi, PENG Ming, et al. Slope stability analysis considering rainfall infiltration of multi-layered unsaturated soils [J]. Journal of Hydraulic Engineering,

2016, 47 (8): 977 ~ 985. (in Chinese with English abstract)

 [21] 贺凯,高杨,王文沛,等. 陡倾煤层开采条件下上覆山体变 形破坏物理模型试验研究 [J]. 地质力学学报,2018,24
 (3):399~406.

> HE Kai, GAO Yang, WANG Wenpei, et al. Physical model experimental study on deformation and failure of overlying rock slope under the condition of steep coal seam mining [J]. Journal of Geomechanics, 2018, 24 (3): 399 ~ 406. (in Chinese with English abstract)

- [22] 张敏,吴宏伟.边坡离心模型试验中的降雨模拟研究 [J]. 岩土力学,2007,28 (S1):53~57.
 ZHANG Min, WU Hongwei. Rainfall simulation techniques in centrifuge modelling of slopes [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007,28 (S1):53~57. (in Chinese with English abstract)
- [23] Allersma H G B, Ravenswaay L, Vos E. Investigation of road widening on soft soils using a small centrifuge [R]. Transportation Research Record 1462, 1994: 47 ~ 53.
- [24] 宋军,梁炯,石胜伟,等. 预应力格构锚固结构受力特征模型试验研究 [J]. 地质力学学报, 2018, 24 (3): 432~438.
 SONG Jun, LIANG Jiong, SHI Shengwei, et al. Modelling test on the mechanical properties of pre-stressed lattice framed

anchor structure [J]. Journal of Geomechanics, 2018, 24 (3): 432 ~ 438. (in Chinese with English abstract)

[25] 李林昊,赵宇飞,汪小刚.预应力锚索边坡加固作用的离心机试验研究 [J].水利水电技术,2018,49 (1):143~148.

LI Linhao, ZHAO Yufei, WANG Xiaogang. Centrifuge experiment based study on slope reinforcing effect of anchor cable [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2018, 49 (1): 143 ~148. (in Chinese with English abstract)

- [26] 赵晓彦,张京伍,梁瑶,等.花岗岩类土质边坡主被动组合 锚固设计方法 [J].岩石力学与工程学报,2013,32 (3): 633~639.
 ZHAO Xiaoyan, ZHANG Jingwu, LIANG Yao, et al. Design method for combined active/passive anchoring for granitoid soil slope [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32 (3): 633~639. (in Chinese with English abstract)
- [27] 姚裕春,姚令侃,袁碧玉,等.施工时序对边坡稳定性影响的离心模型试验及数值分析 [J].岩石力学与工程学报,2006,25 (5):1075~1080.
 YAO Yuchun, YAO Lingkan, Yuan Biyu, et al. Centrifuge model test and numerical analysis of effects of excavation and support sequence on slope stability [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25 (5): 1075~1079. (in Chinese with English abstract)
- [28] 许湘华,王强,方理刚.高速公路路堑边坡施工过程动态
 稳定性分析 [J].中南大学学报(自然科学版),2006,37
 (5):1008~1012.

XU Xianghua, WANG Qiang, FANG Ligang. Analysis on the stability of Expressway Slope during construction [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2007, 37 (5): 1008 ~ 1012. (in Chinese with English abstract)