

基于离心试验的环形加筋挡墙破坏形式试验研究^{*}

梁波^{1,2}, 汪滔¹, 赵宁雨^{1,2}, 厉彦君¹, 凌学鹏¹

(1. 重庆交通大学 土木工程学院, 重庆 400074; 2. 重庆交通大学 山区桥梁与隧道工程国家重点实验室培育基地, 重庆 400074)

摘 要: 环形加筋挡墙破坏形式的研究目前还处于相对空白阶段。笔者通过2组离心模拟实验, 对环形加筋挡墙的破坏形式和变形特征进行了研究, 初步判定了环形加筋挡墙的破裂面形状与“0.3H”破裂面相似, 呈折线形。通过对挡墙破裂面附近监测点的位移对比分析研究表明: 环形加筋形式对挡墙破裂面的开展有良好的限制作用, 能使墙体的侧向位移变化更加均匀; 环形加筋形式对约束挡墙侧向变形的能力较竖向变形能力强。

关键词: 环形加筋挡墙; 加筋土; 破坏形式; 离心模型试验;

中图分类号: TU476.4

文献标识码: A

文章编号: 1673-0836(2018)06-1536-06

Experimental Study on Failure Mode of Ring-shaped Reinforced Retaining Wall Based on Centrifugal Test

Liang Bo^{1,2}, Wang Tao¹, Zhao Ningyu^{1,2}, Li Yanjun¹, Ling Xuepeng¹

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, P.R. China; 2. State Key Laboratory Breeding Base of Mountain Bridge and Tunnel Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, P.R. China)

Abstract: There are few studies on the forms of failure of ring-shaped reinforced retaining walls. Two groups of centrifugal simulation experiments were carried out to study the failure modes and deformation characteristics of annular reinforced retaining walls. It is preliminarily determined that the shape of the rupture surface of the ring-shaped reinforced retaining wall is similar to that of the "0.3H" rupture surface, and it is a broken line shape. Comparative analysis of the monitoring points near the rupture surface of the retaining wall has shown that the annular reinforcement form has a good limit to the development of the rupture surface of the retaining wall, and it can make the lateral displacement of the wall change more evenly. The ability of the annular reinforcement form in limiting lateral deformation of the retaining wall is greater than that of vertical deformation.

Keywords: ring reinforced retaining wall; reinforced soil; failure form; centrifugal model test

0 引言

目前, 加筋土挡墙的发展很快, 但国内外学者的研究大多集中在条式拉筋带的加筋土挡墙的破

坏形式, 关于环形加筋形式的挡土墙边坡破坏形式的研究还处于相对空白阶段。^[1-2]

“0.3H”破裂面得到了多数研究成果的认同, 也在一些规范里得到了推荐。杨广庆等^[3]研究认

^{*} 收稿日期: 2018-06-04(修改稿)

作者简介: 梁波(1964-), 男, 四川隆昌人, 博士, 教授, 博导, 主要从事隧道与地下工程理论和技术方面的研究。

E-mail: liang_laoshi@126.com.

通讯作者: 汪滔(1991-), 男, 重庆涪陵人, 硕士生, 主要从事高速公路隧道交通安全方面的理论和技术研究。

E-mail: 1085644995@qq.com

基金项目: 重庆市建委科技项目(2016-0001)

为,土工格栅加筋土挡墙破裂面下部符合 Rankine 破裂面,但上部不符合传统“ $0.3H$ ”破裂面。李国祥^[4]对加筋土挡墙在主动极限状态下的破裂面进行了模型研究。结果表明,挡墙在自重作用下破裂面为一对数螺旋线,可以简化为“ $0.3H$ ”破裂面。高江平等^[5]的研究对加筋土挡墙的破裂面形式有了新的发现,提出上覆荷载的加筋土挡墙有两组潜在的滑动破裂面-折线复合式滑裂面。

相对于现有的布筋形式,庄维健^[6]首次提出了环形加筋的布筋形式,用以替代加筋带。他认为环形筋材阻断了侧向土压力从环内向环外传递,使得部分侧向压力由环形筋材承担。这种加筋土挡墙形式为加筋形式提供了新的思路和方向。张孟喜等^[7-8]结合传统加筋方式率先提出了 H-V(水平-竖向)立体加筋概念,在水平筋材满布的基础上,通过室内三轴试验系统研究了不同竖筋高度对土体的强度特性影响,但并没有将环形加筋应用于挡墙的研究。李丽华等^[9]将废旧轮胎用于加筋边坡模型试验,试验结果表明,轮胎加筋改变了路堤边坡的应力场,对减小路堤沉降、提高路堤的稳定性有显著的效果。王协群等^[10]以膨胀土为对象,进行了全高度竖向加筋与水平加筋的对比试验。结果均表明,竖向加筋对黏聚力的提高优于传统的水平加筋形式。Nie 等^[11]以玻纤格栅为加筋材料,开展了不同加筋环直径、不同竖筋高度和不同加筋层数的竖向加筋三轴试验,基于加筋三轴试样强度指出存在一个最佳尺寸的布筋形式。

为探究环形加筋形式挡土墙的工程性能,通过离心模型试验,对环形加筋挡土墙的破坏形式进行分析研究,明确环形筋材结构的作用机理,以期为工程实际提供参考和依据。

1 离心模型试验研究

本试验在重庆交通大学土工离心试验室的 TLJ-60 型离心机上进行,试验参照《土工离心试验技术规程》(DL/T 5102—2013)的相关规定,模型箱尺寸为 700 mm(长)×400 mm(宽)×600 mm(高),使用预制的环形镀锌铁丝网,进行了 2 组模型试验,以期通过离心模拟加载,研究环形加筋挡土墙的破坏特征及规律。

1.1 试验填料

离心模型试验中所用的是重庆地区典型填料,该类土一般为红褐色,将原型土风干、清除杂质后进行颗粒筛分试验,其填料的级配曲线如图 1 所示。

按《公路土工试验规程》(JTG E40—2007)测定该土体的物理性质指标如表 1 所示。

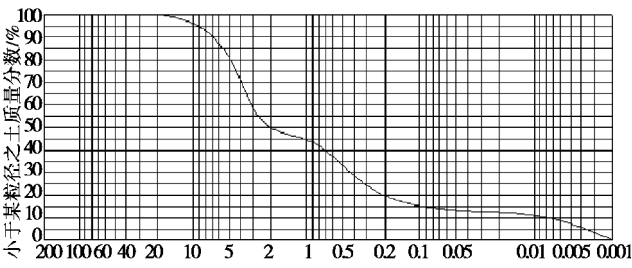


图 1 颗粒级配曲线

Fig.1 Gradation curve of particles

表 1 填料的物理性质

Table 1 Physical properties of fillers

相对密度 G_s	最大干密度 $\rho_{dmax}/(g \cdot cm^{-3})$	最佳含水率 $\omega/\%$	粘聚力 c/kPa	摩擦角 $\varphi/(^\circ)$
2.72	2.04	10.6	30	28.5

1.2 加筋材料

由于环形加筋支挡结构不同于传统加筋形式,结合本试验研究内容寻找完全符合相似关系的筋材十分困难,而环形加筋的形式的相似关系主要考虑摩擦系数和抗拉强度的对应相似,Gourc 等^[12]提出筋-土之间的粘结力和位移 δ 存在明显的缩放效应。由界面摩擦定律可知, $(\tau_b)_m = (\tau_b)_p$ 和 $\delta_m = \delta_p$,这与离心模型试验的相似规律 $\delta_m = \delta_p/n$ 存在矛盾。Gourc 等通过原型试验和离心模型试验解释了这种缩放效应,从试验结果(图 2)可以看出,在原型和离心模型试验中,筋-土之间在达到相同的粘结力的条件下,离心模型中的界面位移要小得多,数值是原型界面位移的 $1/n$ 倍,也就是说,模型用土工格栅的刚度应该比原型土工格栅的刚度大。Zornberg 等^[13]通过筋-土界面的剪切应力和剪切位移的关系,得到离心模型中筋-土界面的刚度是原型中筋-土界面刚度的 n 倍。从制作模型的便利性上来讲,选用成型的网格材料更为方便,其网格尺寸应大于填料的粒径,以便使筋材周围的土层能牢固地粘结在一起,发挥格栅与土之间的嵌固、咬合作用。

综上所述,结合试验情况,要求环形筋材具有足够的刚度以保证支挡结构的稳定性,选用镀锌铁丝网作为试验筋材,它作为成型的网格材料具有厚度薄、刚度大的特点;丝径为 0.7 mm,网孔尺寸为

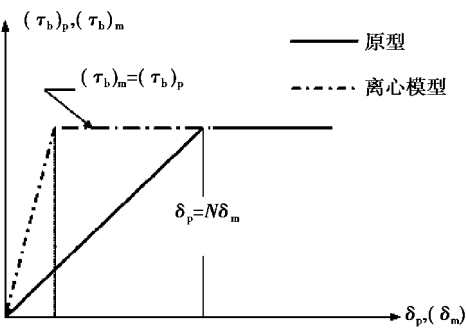


图 2 筋-土之间粘结力与位移变化曲线

Fig.2 Cohesion and displacement curves between ribs and soil
1.5 cm×1.5 cm,纵向每延米拉伸强度为 393 kN/m,与工程常用的土工格栅强度类似。

1.3 模型工况设计

试验模型选取墙高为 45 cm,如表 2 所示。工况 M1 为素土模型,工况 M2、M3 采用镀锌铁丝网预制成环形筋材。试验初期为探寻环形加筋挡墙的破坏形式,参考国内外学者对现有加筋形式的研究成果,加筋土挡墙的潜在破裂面确定为“0.3H”破裂面,拟定工况 M2、M3 的环形加筋布筋形式如图 3~5 所示,将圆环按中线对称布置,使环形筋材的中心连线尽量与“0.3H”破裂面重合,旨在利用环形筋材对土体的侧向约束作用来限制挡墙的侧向位移。

表 2 离心模型试验工况表

Table 2 Centrifugal model test condition

工况	模型墙高 /cm	加速度 n/g	原型墙高 /m	圆环直径 /cm
M1	45	22	10	无
M2	45	22	10	17/30
M3	45	50	22.5	17/30

1.4 模型的填筑

根据土体的物理性质试验结果,击实试验测定最佳含水率 10.6% 下配置模型填料。地基土和回填土均使用该土。为减小模型箱的侧壁约束,在模型箱内侧涂抹凡士林。以填料质量除以填筑体积的方法确定填筑密度,地基土控制压实度为 95%,回填土控制压实度为 85%,回填土填筑干密度为 1.73 g/cm³。环形筋材高为 5 cm,筋材层间距为 3 cm,筋材与墙面留 1 cm 的间距,使筋材完全包裹

于土体内部,具体模型参数如图 4 所示。蔡正银等^[12]在离心模型试验测量墙体位移时,在模型侧表面按 3 cm×3 cm 的网格线埋置镀银的塑料钉。本试验参考前人经验,模型制作完后在模型侧表面标记 4 cm×4 cm 网格线,并用大头针标记好网格如图 3、图 4 所示。

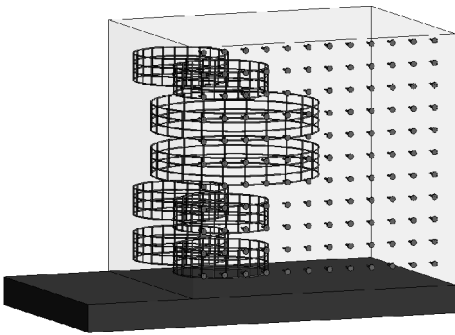


图 3 模型三维视图

Fig.3 3D view of M2 and M3 model(unit:cm)

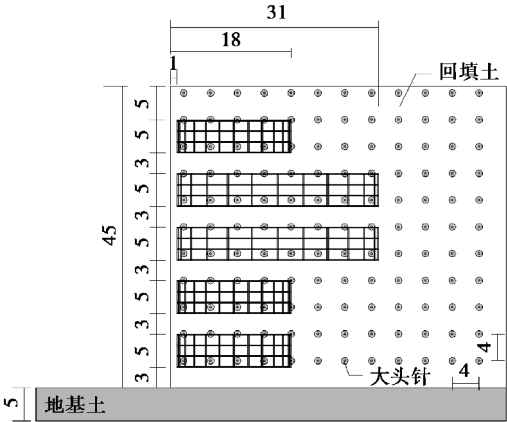


图 4 M2、M3 模型正视图(单位:cm)

Fig.4 The front view of the M2 and M3 models(unit:cm)

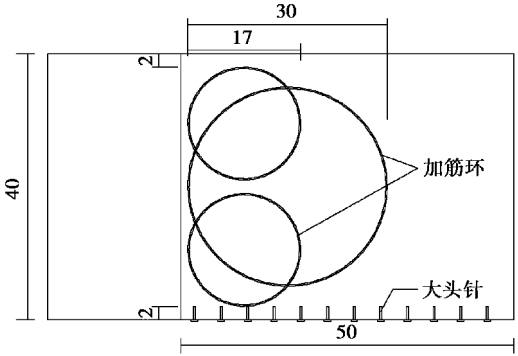


图 5 模型 M2、M3 俯视图(单位:cm)

Fig.5 Top view of the M2 and M3 models(unit:cm)

试验中,离心机以 10g/(3 min) 一级的加载速度均匀加载,达到设计加速度后稳定运行 10 min,

再停机对模型破坏状况进行观察,测量边坡上裂缝的深度和位置,对整个挡墙的破坏情况进行采样。试验结束后,分层对模型进行拆除,观察土层中的环形筋材以及环内土体的变形和破坏情况,逐层观察记录。

2 试验结果与分析

2.1 模型破坏形态

2.1.1 素土模型破坏形态

图6为素土模型破坏情况,从监控录像上看到,模型在加载到 $22g$ 的时候发现边坡已经发生破坏。滑动面近似呈圆弧形,其通过坡面位置距离填土表面 37 cm ,填土表面开裂位置距离坡顶 17 cm ,在靠近坡面位置 $26\text{ cm}\times 28\text{ cm}$ 的方形区域内,土体沉降比较明显,呈马鞍形分布,坡脚附近的变形也较为明显,呈外凸状,在填土上部出现了3条肉眼可见到的裂缝,开裂位置分别距离坡顶 21.5 cm 、 26 cm 和 45 cm ,开裂深度分别为 12.8 cm 、 13 cm 和 14 cm ,并且前两条裂缝与破裂面通过1条微小裂缝形成贯通。

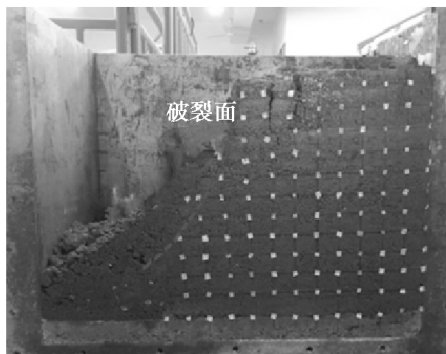


图6 素土模型破坏情况

Fig.6 The destruction of soil model

2.1.2 环形加筋模型破坏形态

图7为工况M2模型加载到 $22g$ 时破坏情况,从图中可以看出,填土在坡面 2 cm 范围内出现剥落,剥落面沿着环形筋材面呈现中间凸、两面凹的形状,这是因为环形筋材安装位置靠近坡面 2 cm 位置,由于模型没有墙面板支撑,这部分土体未能受到墙面板的挡土作用,出现剥落现象。同时,在距坡面 10 cm 位置出现深度为 13 cm 的裂缝。试验后分层拆模,发现此裂缝并未穿过加筋层,靠近坡面端镀锌铁丝网有向下滑移的趋势,越靠近坡顶,现象越明显,说明环形筋材嵌入填土,起到了阻

碍滑裂面贯通和限制土体侧向变形的作用。

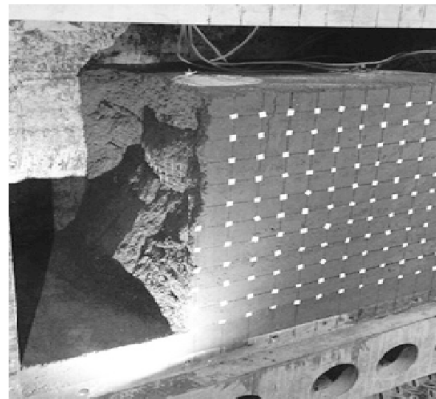


图7 M2模型破坏情况

Fig.7 The destruction of M2 model.

图8为工况M3模型加载到 $50g$ 的破坏情况,工况M3是在工况M2的基础上将加速度从 $22g$ 提高到 $50g$ 破坏后的模型。从图中显示的加筋土变形破坏情况可以看出,填土沿着环形筋材剥落面的比例继续扩大,呈现出的凸状结构更为明显,而环形筋材边坡的破裂面仍未穿过加筋层。环内土体在上部土体自身荷载的作用下出现侧向膨胀,而环形筋材恰恰抑制了环内土体侧向膨胀,增强了加筋层的强度,使得加筋层未被拉出出现整体破坏,而未被环形筋材发挥作用的土体发生了塌落,说明了环形筋材增强环内土体的强度和稳定性。同时,加筋土在距坡面 36 cm 处出现了裂缝,裂缝最深处为 11 cm 。

通过对工况M2、M3的试验研究,从破坏形式可以得出,环形筋材对环内土体的强度和稳定性的提高尤为明显,也能在一定程度上限制破裂面的发展。同时在工况M2、M3中,模型裂缝始终未穿过加筋层,说明环内土体区别于环外土体,环形筋材改变了土体的应力场,使圆环内填料形成一个“饼”状,阻断了环内侧压力向环外的传递,限制了土体的变形。

2.2 模型破裂面开展位置及变形规律

2.2.1 挡墙破裂面开展位置

通过对试验前后网格点位置变化的数据整理,对挡墙破坏形态以及裂缝位置进行绘制,如图9所示。素土破裂面接近圆弧形破裂面,与“ $0.3H$ ”折线交错,工况M2、M3位移变化最明显的区域集中于挡墙肩部,M2垂直裂缝(裂缝1)的开展位置位于“ $0.3H$ ”折线以内,而增加离心加速度($50g$)后的工况M3,填土沿着裂缝1塌落,并形成贯通裂缝

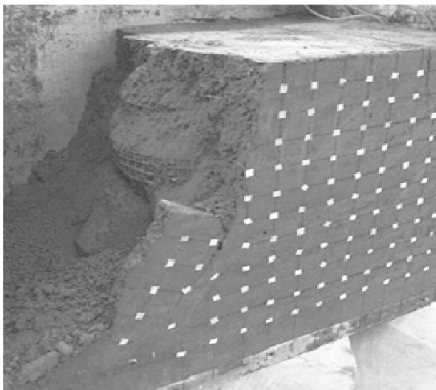


图 8 M3 模型破坏情况

Fig.8 The destruction of M3 model

2。裂缝 2 位置属于未加筋区域,恰好在大环形筋材末端附近。分析认为,环内土体形成的“饼”状区相互叠加,改变了原土体的应力场,形成了一个新的加筋实体,在离心加速度不断增大时,加筋体和未加筋体附近产生相对运动,加筋体向远离未加筋体的方向发生侧向位移,出现整体性破坏,因此出现了裂缝 2 的情况。试验结果表明,环形加筋挡土墙的破裂面区别于素土破裂面,与“0.3H”破裂面类似,呈折线形。

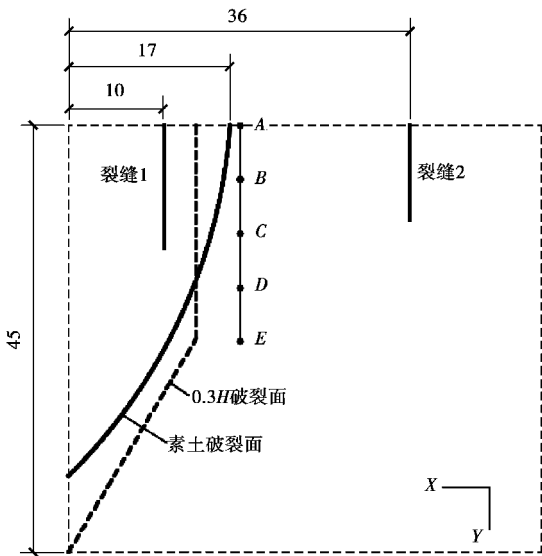


图 9 模型破裂面开展位置

Fig.9 Model fracture surface development position

2.2.2 挡墙变形规律分析

结合所得到的试验结果,考虑素土墙体裂缝开展位置,选择靠近素土破裂面上 5 个监测点(图 9 中 A、B、C、D、E),分别对工况 M1、M2(模拟原型墙高 10 m)中监测点的位移情况作对比分析,如图

10、图 11。

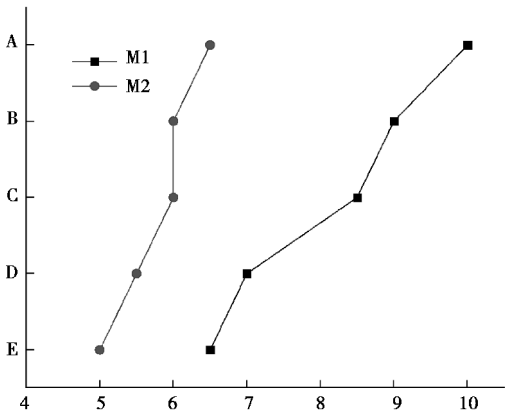


图 10 M1、M2 模型监测点的侧向位移 (mm)

Fig.10 Lateral displacement of monitoring points of M1 and M2 models (mm)

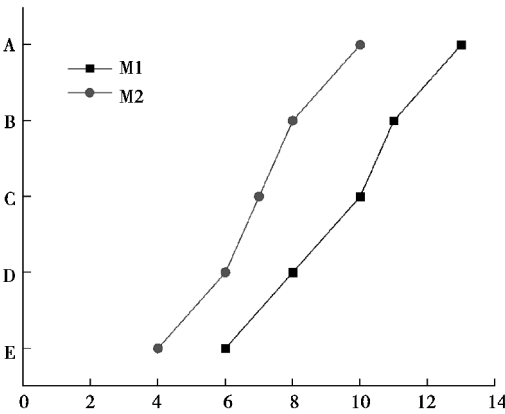


图 11 M1、M2 模型监测点的竖向位移 (mm)

Fig.11 Vertical displacement of monitoring points of M1 and M2 models (mm)

从工况 M1、M2 各监测点的位移变化情况可以得出,环形加筋挡土墙在相同监测点的位移(侧向、竖向)都较素土挡土墙的位移小,环形筋材对挡墙的强度和整体稳定性都有着一定的提升,这也与前述挡墙的破坏形态得到了互相印证。对比素土与环形加筋挡土墙的位移变化情况,侧向位移表现出不同的变化趋势,环形加筋挡土墙的侧向位移变化较素土均匀,且侧向位移较小。这说明环形筋材的加入不仅能有效地限制挡土墙的侧向位移,还能使侧向位移的变化更加均匀。竖向位移方面,位移曲线呈现相同的变化趋势,环形加筋挡土墙在相同监测点的竖向位移总是小于素土模型,说明环形筋材的加入能起到减小竖向位移的效果,但相较侧向位移的约束效果,并不明显。

5 结论

采用离心模型试验,对环形加筋挡土墙的破裂面开展和变形规律进行了研究,可得如下结论:

(1) 环形加筋挡土墙的破裂面形式区别于素土挡墙,破坏区域主要集中在挡墙肩部,与“0.3H”破裂面相似,呈折线形。

(2) 环形加筋对挡土墙破裂面的开展起到了良好的限制作用,环内土体区别于环外土体,环形筋材承担了一部分侧向土压力,减小了土体变形,在提高了墙体的强度和稳定性的同时,也使得墙体的侧向位移变化更加均匀。

(3) 环形加筋形式对挡墙变形有着良好的约束作用。试验表明,环形加筋形式对土体的侧向约束能力要强于竖向。

参考文献 (References)

- [1] 况联飞,周国庆,乔来军,等.大型槽仓基坑填方加筋土筋带变形实测分析[J].地下空间与工程学报,2018,14(S1):322-328,429.(KuangLianfei, Zhou Guoqing, QiaoLaijun, et al. Field Monitoring and Analysis of the Deformation in Reinforced Belt of Large Coal Bunker Foundation Pit Engineering[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2018, 14(S1):322-328, 429.(in Chinese))
- [2] 熊甜甜,廖红建,杨博,等.加筋土筋土界面抗剪强度影响因素试验研究[J].地下空间与工程学报,2018,14(3):629-634.(XiongTiantian, Liao Hongjian, Yang Bo, et al. Experimental Study on Influence Factors of Shear Strengthbetween Geogrid and Soil Interface[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2018, 14(3):629-634.(in Chinese))
- [3] 杨广庆,蔡英.多级台阶式加筋土挡土墙试验研究[J].岩土工程学报,2000,22(2):254-257.(Yang Guangqing, Cai Ying. Study on the multi-steps reinforced earth retaining wall[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000,22(2):254-257.(in Chinese))
- [4] 李国祥.加筋土挡墙破裂面的试验研究与分析[J].铁道工程学报,2001(3):125-128.(Li Guoxiang. Experimental research and analysis on breaking surface of reinforced earth retaining wall[J]. Journal of Railway Engineering Society. 2001(3):125-128.(in Chinese))
- [5] 高江平,俞茂宏,胡长顺,等.加筋土挡墙滑动破裂面的大型模型试验[J].长安大学学报(自然科学版),2005,25(6):6-9.(Gao Jiangping, Yu Maohong, Hu Changshun, et al. Large model experiment on sliding rupture of reinforced earth retaining wall[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition). 2005, 25(6):6-9.(in Chinese))
- [6] 庄维健.加筋土挡墙新技术[J].公路,2002(10):11-14.(Zhuang Weijian. New technology of reinforced earth retaining wall[J]. Highway, 2002(10):11-14.(in Chinese))
- [7] 张孟喜,陈高峰,朱引,等.H-V加筋饱和砂土性状的三轴试验研究[J].岩土力学,2010,31(5):1345-1351.(Zhang Mengxi, Chen Gaofeng, Zhu Yin, et al. Triaxial tests on saturated sands reinforced with horizontal-vertical Inclusions [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010,31(5):1345-1351.(in Chinese))
- [8] 张孟喜,张贤波,段晶晶.H-V加筋黏性土的强度与变形特性[J].岩土力学,2009,30(6):1563-1568.(Zhang Mengxi, Zhang Xianbo, Duan Jingjing. Strength and deformation properties of H-V reinforced clay[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009,30(6):1563-1568.(in Chinese))
- [9] 李丽华,肖衡林,郑俊杰,等.废旧轮胎加筋路堤边坡模型试验研究[J].工程力学,2015,32(11):79-85.(Li Lihua, Xiao Henglin, Zheng Junjie, et al. The model test of waste tire reinforced slope[J]. Engineering Mechanics, 2015,32(11):79-85.(in Chinese))
- [10] 王协群,郭敏,胡波.土工格栅加筋膨胀土的三轴试验研究[J].岩土力学,2011,32(6):1649-1653.(Wang Xiequn, Guo Min, Hu Bo. Triaxial testing study of expansive soil reinforced with geogrid[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(6):1649-1653.(in Chinese))
- [11] Gourc J P, Villard P, Matichard Y. Pull-out behaviour of reinforcements-centrifuge tests and theoretical validations[A]//Proceeding of International Symposium on Earth Reinforcement Practice [C]. Japan, 1992: 73-78.
- [12] Zornberg J G, Mitchell J K, Sitar N. Testing of reinforced slopes in a geotechnical centrifuge [J]. Geotechnical testing Journal, 1997,20(4):470-480.
- [13] 蔡正银,章为民,赖忠中.京九铁路加筋土挡墙离心模型试验[J].水利水运科学,1997(2):160-166.(Cai Zhengyin, Zang Weiming, Lai Zhongzhong. Centrifugal model test of reinforced earth retaining wall of Beijing-Kowloon Railway[J]. Research on Waterborne Transportation, 1997(2):160-166.(in Chinese))