

DOI: 10.11779/CJGE201808020

水平地震作用下双级加筋土挡墙格栅应变及破裂面分析

蔡晓光, 李思汉, 黄 鑫

(防灾科技学院防灾工程系, 河北 三河 065201)

摘 要: 基于大型振动台模型试验, 研究水平地震荷载作用下双级土工格栅加筋土挡墙的格栅应变和潜在破裂面规律。用福建砂作为回填砂、混凝土砌块作为挡墙和土工格栅作为筋材构成了试验模型。模型高度 1.8 m。输入地震波为卧龙波和 EL-Centro 波, 共 9 个试验工况。试验结果表明, 随着峰值加速度增大, 应变值增大, 且应变最大值点向土体内部扩展。潜在破裂面随峰值加速度增加逐渐向土体内部扩展。综合已有破裂面计算方法, 提出了考虑平台宽度的双级折线型破裂面模型, 模型可为双级加筋土挡墙设计计算提供参考。

关键词: 双级加筋土挡墙; 格栅应变; 破裂面; 振动台试验

中图分类号: TU435

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2018)08-1528-07

作者简介: 蔡晓光(1979-), 男, 教授, 主要从事挡土结构抗震及尾矿库动力分析等方面的研究工作。E-mail: caixiaoguang123@163.com。

Geogrid strain and failure surface of two-stage reinforced soil retaining wall under horizontal seismic loading

CAI Xiao-guang, LI Si-han, HUANG Xin

(Disaster Prevention Engineering Department, Institute of Disaster Prevention, Sanhe 065201, China)

Abstract: Based on the large-scale shaking table model tests, the geogrid strain and failure surface of two-stage reinforced soil-retaining wall under horizontal seismic loading are studied. The experimental model is made of backfill, retaining wall and geosynthetics, where the backfill is standard soil, the retaining wall is concrete blocks and the geosynthetics is geogrid. The model height is 1.8 m. The input seismic waves are Wulong waves and EL-Centro waves. The test results show that with the increase of the peak acceleration, the strain value increases, and the maximum strain point extends to the soil interior. With the increase of the peak acceleration, the potential rupture surface gradually extends to the soil interior. Based on the existing methods for calculating the fracture surface, a double-broken line model considering the width of the offset is proposed. The proposed model can be used as a reference for the design of the two-stage reinforced soil retaining wall.

Key words: two-stage reinforced soil retaining wall; geogrid strain; failure surface; shaking table test

0 引 言

筋材是加筋土挡墙的重要组成部分。因筋材破坏而导致挡土墙破坏的情况时有发生, 如 2014 年 4 月智利 8.2 级地震中, 由于筋带锈蚀造成了某加筋土挡墙的倒塌。针对这类情况, 众多学者对筋材进行了研究。王丽艳等^[1]通过大型振动台试验得到了中间层格栅应变较大, 格栅与墙体连接处应变较大, 揭示了柔性挡土墙上的受力分布规律。

潜在破裂面是确定筋材设计长度的依据。当前对加筋土挡墙的潜在破裂面形状和位置的假设主要有对数螺旋线滑面、直线型滑面、 $0.3H$ 简化破裂面和双折线型滑面四类。

对数螺旋线滑面即破裂面为曲滑线。雷胜友^[2]通

过离心机试验研究, 认为加筋土挡墙潜在破裂面为开始于墙脚或设置错台处, 到达顶部后距墙面板约为 $0.169H$ (简称雷胜友方法) 的对数螺旋线。

直线型滑面即朗肯破裂面和自定义拟合线破裂面。朗肯破裂面为通过墙趾与水平面成 $(45^\circ + \varphi/2)$ 的平面, 土工合成材料应用技术规范^[3] (简称土工规范) 和美国联邦公路局规范^[4] (简称美国规范) 对于柔性筋材加筋土挡墙均按照朗肯破裂面进行计算。王祥等^[5]对梅坎铁路双级加筋土挡墙研究得出, 双级加筋土挡墙的潜在破裂面为一与墙脚处水平面夹角为

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (51778144); 地震科技星火计划项目 (XH14073Y); 中央高校基本科研业务费研究生科技创新基金项目 (ZY20170305)

收稿日期: 2017-05-05

($45^\circ + \varphi/2$) 的直线 $H=-2.1452L+14.766$ (简称王祥拟合曲线), 其下部通过墙脚, 此直线与上墙交于扣除上下墙之间平台宽度的整个墙高 0.3 倍的位置。

0.3H 简化破裂面是为了工程应用方便简化而来。公路路基设计规范^[6] (简称公路规范) 将破裂面简化为下部通过墙脚 (与水平面成 $45^\circ + \varphi/2$), 上部平行于墙面的两段折线; 铁路路基支挡结构设计规范^[7] (简称铁路规范) 和美国规范 (对于非柔性筋材) 破裂面为下部通过墙脚与坐标点 (0.3H, 0.5H) 相连, 上部平行于墙面的 2 段折线。

双折线型滑面是专家学者通过试验结果的自定义描述方式。高江平等^[8]通过加筋土挡墙加载试验, 认为存在两组潜在破裂面, 均为折线型复合式破裂面。黄向京等^[9]、王维等^[10]通过对加筋格宾挡墙筋材进行原型观测和数值模拟, 认为破裂面为下部通过墙脚, 折点位置为 (0.2H, H/3), 与上部点 (0.3H, H) 相连的“新折线型潜在破裂面”。英国 BS8006^[11]中规定, 破裂面为下部通过墙脚, 折点位置为 (0.2H, 0.4H), 与上部点 (0.3H, H) 相连。周世良等^[12]通过有限元模拟提出了不同台阶宽度下加筋土挡墙的简化潜在破裂面, 当上阶挡墙前趾位于下阶挡墙主动区内, 简化计算潜在破裂面下部为距下阶墙趾 D (平台宽度) (与水平面成 $45^\circ + \varphi/2$), 上部为距挡墙 $D+0.3h$ (h 为上阶挡墙墙高) 且与墙面平行的 2 段折线 (简称周世良潜在简化破裂面)。

目前关于加筋土挡墙方面的研究基本为静力作用下加筋土挡墙的筋材应变和潜在破裂面情况, 动力作用下的研究相对较少, 各类相关规范均未涉及。因此本文通过振动台试验对双级加筋土挡墙的筋材应变和潜在破裂面进行研究, 提出了动力作用下双级加筋土挡墙的简化潜在破裂面形式。

1 试验系统及设备

试验模型如图 1 所示。试验在防灾科技学院土木工程试验中心内的国产电液伺服地震模拟振动台上完成。振动台主要技术参数: 台面尺寸为 3.0 m×3.0 m; 双水平向地震模拟; 最大位移: X 向±100 mm, Y 向±100 mm; 最大加速度: X 向 1g (满载), Y 向 1g (满载); 最大承载质量为 20 t。

采集系统为国产 128 通道动态采集系统, 应变采集频率为 100 Hz。试验在自行设计的 3.0 m (横向) ×1.5 m (纵向) ×2.0 m (竖向) 的刚性模型箱内完成。

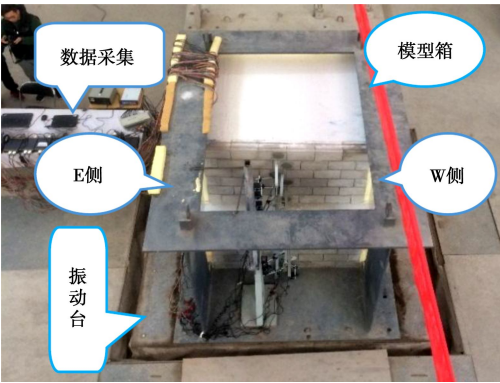


图 1 模型测试设备
Fig. 1 Model test equipment

2 试验模型

2.1 相似比设计

以四川 G213 都江堰—映秀段线路段上一处双级加筋土挡墙为研究对象进行缩尺试验, 如图 2^[13]所示。试验采用标准砂作回填砂。按照结构相似关系 Buckingham π 定理, 推导出模型主要相似参数, 见表 1。



图 2 挡墙实际破坏情况 (西南交通大学研究组, 2009)
Fig. 2 Actual failure of retaining wall (Study Group of Southwest Jiaotong University, 2009)

表 1 模型主要相似参数

Table 1 Primary similitude coefficients of model		
物理量	相似关系	相似常数 (原型/模型)
长度 L	C_l	10
密度 ρ	C_ρ	1
加速度 a	C_a	1
速度 v	$C_v=C_l^{0.5}$	3.16
内摩擦角 φ	$C_\varphi=1$	1
时间 t	$C_t=C_l^{0.5}$	3.16
频率 ω	$C_\omega=C_l^{-0.5}$	0.316

2.2 模型材料

加筋土挡墙试验模型为 2.0 m (长) ×1.5 m (宽) ×1.8 m (高)。挡墙直立, 上下级墙高均为 0.9 m, 采用 A、B 两类自制模型砖见图 3, 尺寸分别为 25 cm

(长) × 15 cm (宽) × 15 cm (高) 和 12.5 cm (长) × 15 cm (宽) × 15 cm (高)。土工格栅材料采用青岛旭域土工材料股份有限公司生产的 EG50 型单向土工格栅, 在 MTS 拉伸试验机上得到 2% 伸长率时拉力为 17.4 kN/m, 5% 伸长率时拉力为 32.7 kN/m。筋材水平等长布置, 上下间距为 15 cm, 铺设长度为 90 cm。回填砂采用标准砂, 通过砂的物理力学试验, 物理力学性质指标如表 2 所示。

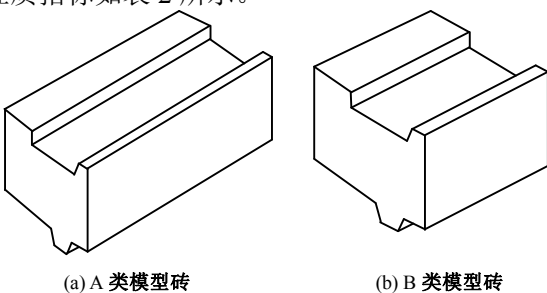


图 3 两类模型砖大样图
Fig. 3 Two types of model brick

表 2 填料的物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical parameters of filling						
特征粒径/mm			不均匀系数	曲率系数	最大干密度($D_r=0.7$)	内摩擦角
d_{60}	d_{30}	d_{10}	C_u	C_c	$\rho_d/(g \cdot cm^{-3})$	$\varphi/(^{\circ})$
0.37	0.29	0.18	2.055	1.262	1.82	41

2.3 传感器布置

试验模型中的传感器布置如图 4 所示。传感器布置: 应变片共布置 104 片, 观测土工格栅的动应变情况。其中 E 侧布置 4 层, 分别为 F1、F5、F6、F7, 每层布设 4 个位置, 每个位置均布设在上侧。W 侧共布设 11 层, 每层布设 4 个位置, 每个位置上下各有一片应变片, 互为补偿片。图 5 则为试验中布置仪器实物图。

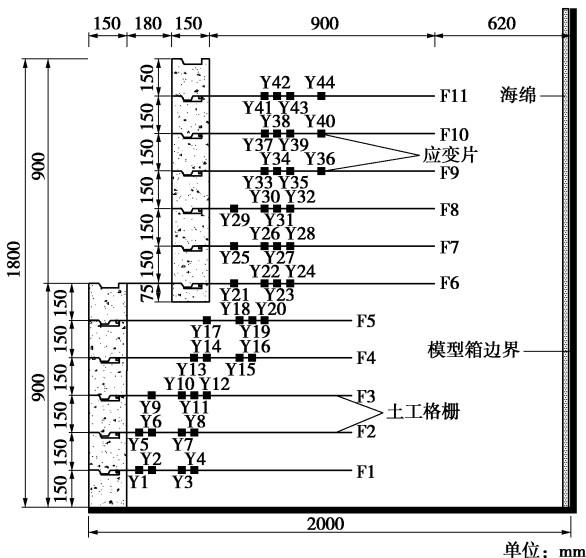


图 4 振动台试验模型
Fig. 4 Shaking table test model

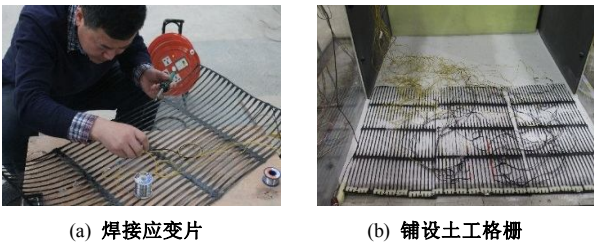


图 5 试验仪器布置
Fig. 5 Installation of test instruments

2.4 测试工况

根据试验目的, 试验时输入单向水平地震波为卧龙波 (代号 WL), EL-Centro 波 (代号 EL)。WL 波峰值加速度为 1.0g, 数据点时间间隔 0.005 s; EL 波峰值加速度 1.0g, 数据点时间间隔 0.02 s, 持续时间均为 58.5 s。可根据需要调整峰值加速度和时间压缩, 地震波时程曲线如图 6 所示。

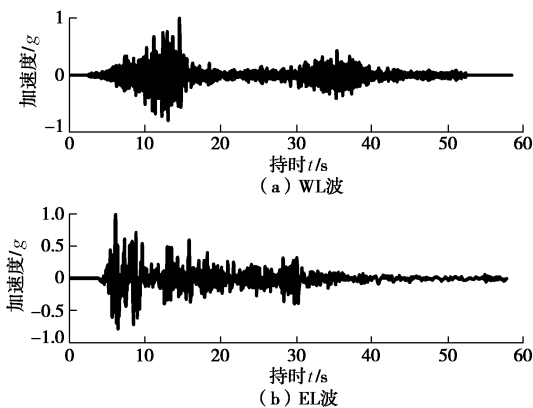


图 6 输入地震动时程和傅氏谱
Fig. 6 Input earthquake waves and spectra

每次输入地震波工况前均输入白噪声进行模型扫描, 输入工况见表 3。

表 3 模型试验加载工况

Table 3 Loading cases for model tests			
序号	输入波形	PGA/g	工况代号
1	WL	0.2	WL0.2g
2	EL	0.2	EL0.2g
3	WL	0.4	WL0.4g
4	EL	0.4	EL0.4g
5	WL	0.8	WL0.8g
6	EL	0.8	EL0.8g
7	WL	1.2	WL1.2g
8	EL	1.2	EL1.2g
9	WL	1.6	WL1.6g

每个工况加载结束后, 进行数据的查看和模型外部破坏情况的记录、拍照等相关工作。随后将所有采集通道归零, 将模型看作新模型进行下一工况, 直至模型发生破坏。

3 测试结果分析

模型在工况 9 (WL1.6g) 时发生破坏, 其破坏形

式为上级挡墙顶部面板砌块坠落, 见图 7。



图 7 双级加筋土挡墙震害情况

Fig. 7 Seismic damages of two-stage reinforced retaining wall

图 8 为 WL0.4g 下 F6 层 Y21-WU 的应变时程(时间压缩比为 3.16)曲线。图 9 为应变片布置图。

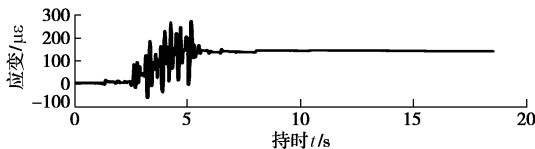


图 8 格栅应变时程曲线 (WL0.4g)

Fig. 8 Time-history curves of geogrid strain

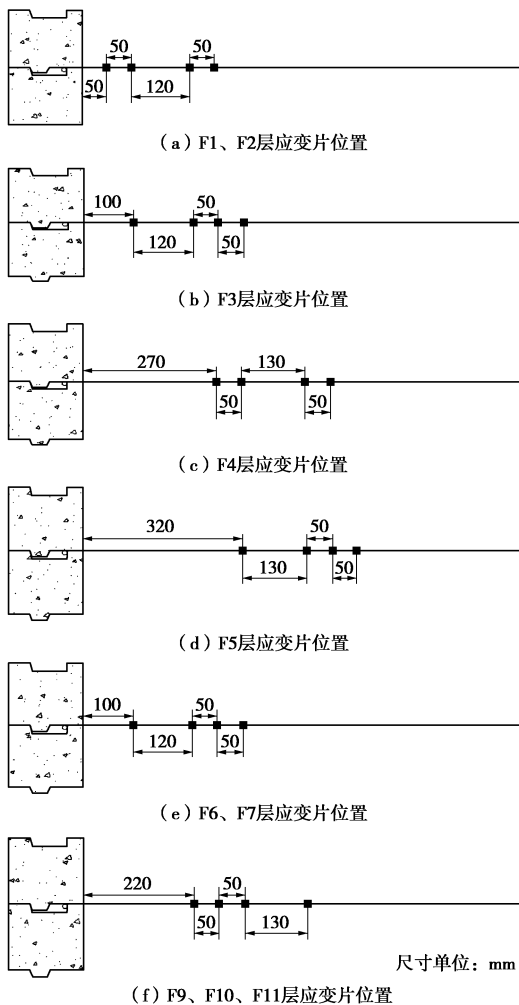


图 9 应变片布置

Fig. 9 Arrangement of strain gauges

3.1 格栅应变反应

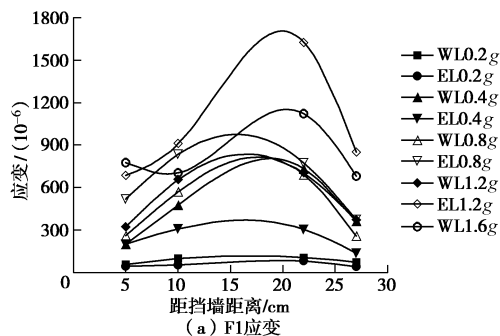
选取部分应变时程将其分为水平同层应变对比和竖向同位置对比两部分进行分析。

(1) 同层应变对比

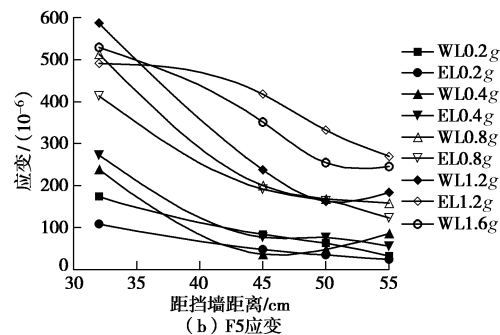
图 10 是 F1 (Y1~Y4) 层、F5 (Y17~Y20) 层、F6(Y21~Y24)层、F7 层(Y25~Y28)层和 F11(Y41~Y44) 层在不同峰值加速度下的应变时程。

总体上看, 各层各应变点的应变值均随峰值加速度的增大而增大。峰值加速度较小时, 各应变点应变值相差无几, 趋势线近似一条直线。峰值加速度增大过程中, 各应变点应变增长不同, 趋势线逐渐变化为曲线, 下级挡墙 F1 层、F5 层与上级挡墙 F7 层、F11 层应变趋势线一致, 均存在 1 个极大(小)值, 而台阶处 F6 层应变趋势线则明显存在 1 个极大值, 1 个极小值。这可能是因为 F5 层和 F7 层土工格栅对 F6 层土工格栅约束区域不同所致。

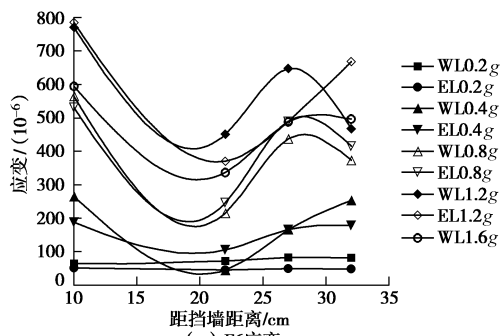
在峰值加速度增大过程中, F1 层应变最大值逐渐向 Y3 靠拢, F7 层应变最大值逐渐向 Y28 靠拢, F11 层应变最大值逐渐向 Y44 靠拢。可推测, 随着峰值加速度增大, 最大值应变点向土体内部扩展。



(a) F1 应变



(b) F5 应变



(c) F6 应变

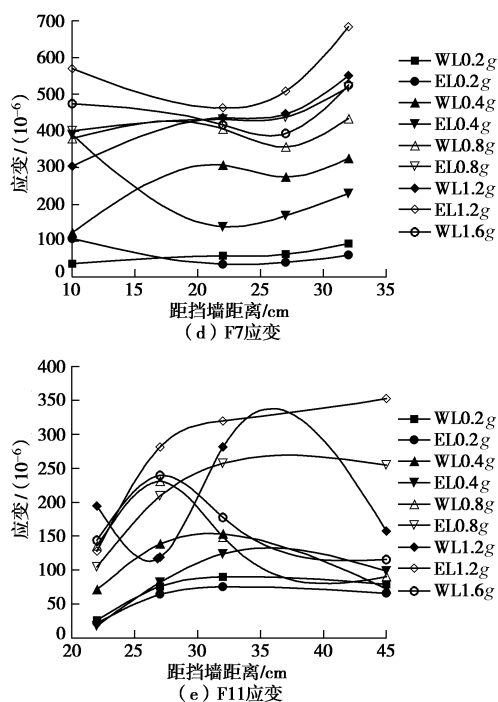


图 10 各层应变时程曲线

Fig. 10 Time-history curves of strain of different layers

(2) 不同层同位置对比

图 11 为下级挡墙 F1~F4 层距挡墙 27 cm 处(Y4、Y8、Y11、Y13)土工格栅的应变值沿墙高分布情况。由图可知,应变值随峰值加速度增大而增大,最大值位于 F2 层。若将下级挡墙视为加筋土挡墙,上级挡墙及回填土视为均布荷载,则研究结果与王丽艳等^[1]一致。

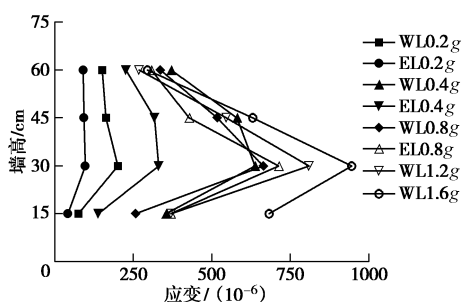
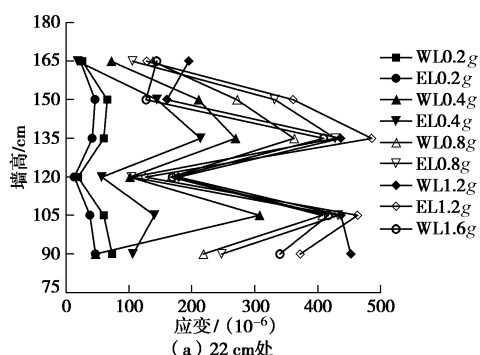


图 11 下级挡墙应变沿墙高分布

Fig. 11 Strains of lower wall along height of wall

图 12 为上级挡墙 F6~F11 层距挡墙 22, 27, 32 cm 处土工格栅应变幅值沿墙身分布情况。



(a) 22 cm 处

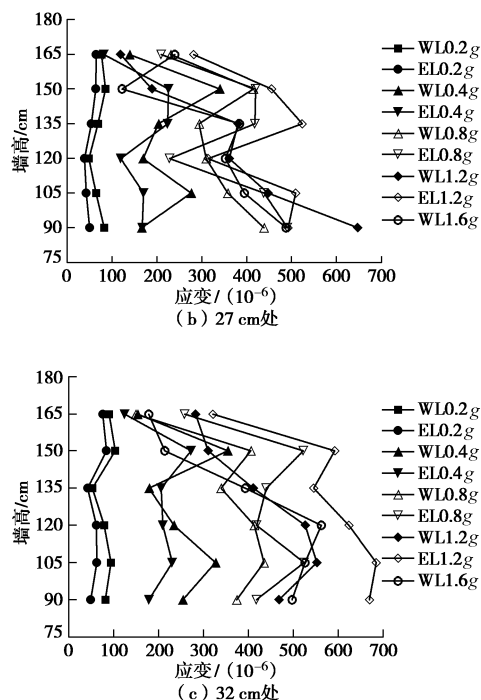


图 12 上级挡墙应变沿墙高分布

Fig. 12 Strains of upper wall along height of wall

由图 12 可知,随着峰值加速度增加,应变值增大。对比图 12 (a)、(b)、(c) 可知,距离挡墙位置不同,应变情况也不同,应变规律不一致: 22 cm 处应变幅值在 F7 (105 cm) 和 F9 (135 cm) 处存在极大值, 27 cm 处应变幅值在 F6 (90 cm)、F7 (105 cm)、F9 (135 cm) 和 F10 (150 cm) 处均有极大值, 32 cm 处应变幅值在 F7 (105 cm) 和 F10 (150 cm) 处均有极大值; 22 cm 处和 27 cm 处在 F8 (120 cm) 存在极小值, 而 32 cm 处在 F9 (135 cm) 处存在极小值。

3.2 破裂面

将加筋土挡墙中各层拉筋的最大值点进行连线,得出回填土的潜在破裂面。潜在破裂面形状与位置的确定直接影响筋带长度的确定和加筋土结构的内部稳定性分析。

(1) 潜在破裂面

依据周世良等^[12](台阶式格栅加筋挡墙潜在破裂面计算模式研究)提出的计算理论: 当 $0 < D \leq D_1$ (D 为平台宽度, $D_1 = h \cdot \tan\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right)$), 即上级挡墙的前沿位于下级挡墙的主动区内, 下级挡墙的塑性区显著受上级挡墙荷载的影响。此时挡墙潜在破裂面为一连续曲面。由 $D=18$ cm, $h=90$ cm, $\varphi=38^\circ$, 得 $D_1=43.9$ cm。 $D < D_1$, 故图 13, 14 中将上下级挡墙中各层土工格栅最大点连成了一条曲线。根据国内外学者研究情况, 用对数螺旋线对双级加筋土挡墙潜在破裂面进行拟合, 拟合数据见表 4。

表 4 潜在破裂面指数拟合线

Table 4 Fitting curves of indices of potential failure surface					
输入地震动	WL0.2g	WL0.4g	WL0.8g	WL1.2g	WL1.6g
拟合线方程	$y = 17.755e^{0.030x}$ $R^2 = 0.705$	$y = 18.267e^{0.031x}$ $R^2 = 0.686$	$y = 22.661e^{0.028x}$ $R^2 = 0.697$	$y = 22.631e^{0.028x}$ $R^2 = 0.705$	$y = 23.7e^{0.026x}$ $R^2 = 0.687$
输入地震动	EL0.2g	EL0.4g	EL0.8g	EL1.2g	
拟合线方程	$y = 23.820e^{0.028x}$ $R^2 = 0.723$	$y = 24.012e^{0.029x}$ $R^2 = 0.838$	$y = 22.749e^{0.028x}$ $R^2 = 0.830$	$y = 23.3e^{0.026x}$ $R^2 = 0.732$	

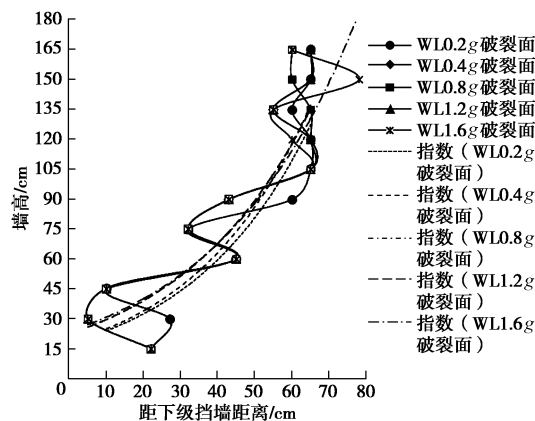


图 13 WL 波潜在破裂面
Fig. 13 Potential failure surfaces of WL waves

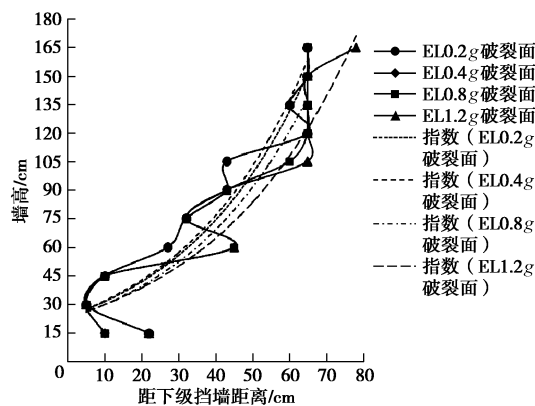


图 14 EL 波潜在破裂面
Fig. 14 Potential failure surfaces of EL waves

由图 13、14 和表 4 可知，无论地震波种类、峰值加速度如何，加筋土挡墙潜在破裂面均非规则曲线。WL 波作用下，各层土工格栅应变最大值点较分散，指数拟合 R^2 介于 0.68~0.71，指数函数增长速率随峰值加速度增加而减小。而 EL 波作用下，指数拟合 R^2 介于 0.72~0.84，拟合效果优于 WL 波，拟合曲线近似于包络线，当峰值加速度为 0.2g、0.4g 时，11 个最大值点中 9 个点位于拟合线以内，当峰值加速度为 0.8g、1.2g 时，11 个最大值点中分别有 8 个和 7 个点位于拟合曲线内。由图 14 可直接观察到，随着峰值加速度增大，加筋土挡墙潜在破裂面位置逐渐向挡墙土体内部扩展。

(2) 潜在破裂面计算方法对比

将各类计算潜在破裂面方法综合于图 15。由图可知，美国规范中朗肯破裂面、王祥拟合曲线和周世良简化潜在破裂面均可作为 $0 < D \leq D_1$ 下双级加筋土挡墙的简化潜在破裂面。但考虑到工程造价经济，本文建议对 $0 < D \leq D_1$ 下双级加筋土挡墙采用双级折线型潜在破裂面。

双级折线型潜在破裂面假定下部通过墙脚，以墙脚作为原点对加筋土挡墙建立坐标轴，潜在破裂面位置为自变量 x ，墙高为因变量 y 。潜在破裂面公式如下：

$$\left. \begin{aligned} y &= \frac{h_l}{D + d + 0.3h_l} x, x \in (0, h_l), \\ y &= \frac{h_u}{D} x + B, x \in (h_l, h_l + h_u), \\ B &= \frac{Dh_l(h_u - h_l) + dh_u h_l + 0.3h_l h_u^2}{0.3Dh_u + Dd + D^2} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中 D 为平台宽度； d 为挡墙厚度； h_l 为下级挡墙高度； h_u 为上级挡墙高度。

将双级折线型潜在破裂面添加到图中，即图中线型 9，可较好地反映 $0 < D \leq D_1$ 下双级加筋土挡墙的潜在破裂面位置。

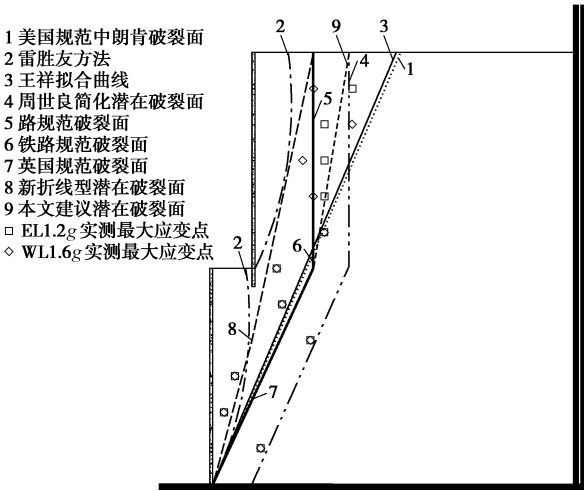


图 15 不同计算方法下潜在破裂面
Fig. 15 Different methods under failure surface

4 结 论

本文通过开展振动台试验研究了双级加筋土挡墙

在水平地震作用下筋材应变和潜在破裂面变化情况,得到以下3点结论。

(1) 随着震级增大,应变值增大,且最大值应变点向土体内部扩展。不同层同位置处应变值规律不一。

(2) 无论地震波形式如何,震级增加,潜在破裂面向土体内部扩展。

(3) 综合各类潜在破裂面计算方法,提出了考虑平台宽度的双级折线型潜在破裂面,可作为双级加筋土挡墙加筋长度设计计算的参考、依据。

致谢: 本文的试验部分得到了防灾科技学院郭迅教授、王波硕士、宣越硕士,河北工业大学李雨润教授、肖成志教授,石家庄铁道大学杨广庆教授的大力支持,在此表示感谢!

参考文献:

- [1] 王丽艳, 孙 田, 陈 苏. 近远场地震中土工格栅加筋土挡墙抗震特性的振动台试验研究[J]. 土木工程学报, 2015, **48**(2): 103 - 110. (WANG Li-yan, SUN Tian, CHEN Su. Large scale shaking table test on seismic behaviors of geogrid reinforced retaining walls under near-fault and far-fault ground motions[J]. China Civil Engineering Journal, 2015, **48**(2): 103 - 110. (in Chinese))
- [2] 雷胜友. 双面加筋土高挡墙的离心模型试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, **24**(3): 417 - 423. (LEI Sheng-you. Centrifugal modelling of high double-face reinforced earth retaining wall[J]. Chinese Journal of Rock mechanics and Engineering, 2006, **24**(3): 417 - 423. (in Chinese))
- [3] GB/T 50290—2014 土工合成材料应用技术规范[S]. 2014. (GB/T 50290—2014 Technical code for application of geosynthetics[S]. 2014. (in Chinese))
- [4] FHWA-NHI-10-024. Design and construction of mechanically stabilized earth walls and reinforced soil slopes-volume I[S]. America: US Department of Transportation Federal Highway Administration, 2009.
- [5] 王 祥, 徐林荣. 双级土工格栅加筋土挡墙测试分析[J]. 岩土工程学报, 2003, **25**(2): 220 - 224. (WANG Xiang, XU Lin-rong. Test and analysis of two-step retaining wall reinforced by geogrid[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, **25**(2): 220 - 224. (in Chinese))
- [6] JTG D30—2015 公路路基设计规范[S]. 2015. (JTG D30—2015 Specifications for design of highway subgrades[S]. 2015. (in Chinese))
- [7] TB 10025—2015 铁路路基支挡结构设计规范[S]. 2015. (TB 10025—2015 Code for design on retaining structures of railway subgrades[S]. 2015. (in Chinese))
- [8] 高江平, 俞茂弘, 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 Jiang-ping, YU Mao-hong, HU Chang-shun, 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))
- [9] 黄向京, 许桂林, 彭 立. 加筋格宾组合式挡墙破裂面及承载力特性[J]. 中国公路学报, 2011, **24**(6): 31 - 38. (HUANG Xiang-jing, XU Gui-lin, PENG Li. Failure surface and bearing capacity character of combined reinforced gabion retaining wall[J]. China Journal of Highway and Transport, 2011, **24**(6): 31 - 38. (in Chinese))
- [10] 王 维, 黄向京, 许桂林, 等. 加筋格宾挡墙破裂面及承载力特性研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2010, **7**(6): 43 - 49. (WANG Wei, HUANG Xiang-jing, XU Gui-lin, et al. Study on the failure surface and the bearing capacity character of reinforced gabion retaining wall[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2010, **7**(6): 43 - 49. (in Chinese))
- [11] BS 8006-1 2010. Code of practice for strengthened/reinforced soils and other fills[S]. 2010.
- [12] 周世良, 汪承志, 何光春, 等. 台阶式格栅加筋挡墙潜在破裂面计算模式研究[J]. 公路交通科技, 2007, **24**(11): 15 - 20. (ZHOU Shi-liang, WANG Cheng-zhi, HE Guang-chun, et al. Study on rational model of potential fractured surface for stepped geogrid reinforced soil retaining wall[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2007, **24**(11): 15 - 20. (in Chinese))
- [13] 西南交通大学研究组. 国道 G213 加筋土结构震害统计报告[R]. 成都: 西南交通大学, 2009. (Study Group of Southwest Jiaotong University. Seismic damage statistical report about reinforcement earth structure on national highway G213[R]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2009. (in Chinese))
- [14] 曹礼聪, 张建经, 付 晓, 等. 条带式刚性面板加筋土挡墙筋带应变响应特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, **36**(7): 1768 - 1779. (CAO Li-cong, ZHANG Jian-jing, FU Xiao, et al. Strain response of the stripe reinforced soil with rigid retaining wall[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, **36**(7): 1768 - 1779. (in Chinese))