

DOI: 10.11779/CJGE202110004

交通荷载下台阶式加筋土挡墙动力响应的试验研究

肖成志¹, 李海谦¹, 高 珊¹, 李文君²

(1. 河北工业大学土木与交通学院, 天津 300401; 2. 湖南省工程建设监理有限公司, 湖南 长沙 410100)

摘要: 台阶式加筋土挡墙在山区道路边坡支挡结构中应用广泛, 针对总高相同的二级台阶式加筋土挡墙开展1:3大型缩尺模型试验, 首先分析交通循环荷载作用下台阶宽度 D 对加筋土挡墙顶部基础沉降比的影响, 进而选取 $D=0.4H_2$ (H_2 为下级挡墙高度)的台阶式加筋土挡墙, 研究交通荷载幅值及频率变化时, 挡墙位移、土压力、筋材应变和潜在滑动面的动力响应规律。结果表明: 加载初期挡墙顶部沉降和面板水平位移增加明显, 但随循环次数增加呈收敛趋势; 面板最大水平位移出现在上级墙高约 $0.85H$ (H 为总墙高)处, 且分布模式几乎不受幅值及频率变化影响; 荷载幅值和频率对上级挡墙筋材应变的影响明显, 下级挡墙筋材在上级墙趾下方处应变较大; 二级挡墙水平土压力值沿墙高均呈顶部与底部小而中部较大的分布形式; 上级挡墙潜在破裂面随荷载幅值增大而下移, 由局部破坏逐渐向深层整体破坏演变; 填筑过程将使下墙近面板处垂直应力增至约为1.5倍自重。研究结果将为台阶式加筋土挡墙设计与施工提供有益指导。

关键词: 台阶式加筋土挡墙; 交通荷载; 台阶宽度; 模型试验; 土工格栅

中图分类号: TU413; U416.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2021)10-1789-09

作者简介: 肖成志(1976—), 男, 教授, 博士研究生导师, 主要从事土工合成材料及加筋土原理方面的研究工作。E-mail: chengzhixiao@hotmail.com。

Dynamic response of tiered geogrid-reinforced soil retaining walls under traffic loading

XIAO Cheng-zhi¹, LI Hai-qian¹, GAO Shan¹, LI Wen-jun²

(1. School of Civil and Transportation Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China; 2. Hunan Engineering Consulting Company, Changsha 410100, China)

Abstract: The multi-tiered geogrid-reinforced retaining wall (GRSRW) has been widely used in road retaining projects in mountainous areas. A 1:3 large-scaled model test is carried out to investigate the performance of a two-tiered GRSRW with the same total height. The influences of offset distance D on its foundation settlement ratio is analyzed firstly, and then under the specified offset $D=0.4H_2$ (H_2 , the height of the lower wall), the effects of variation of amplitude and frequency of the traffic loading on the panel horizontal displacement, earth pressure, reinforcement strains, strain distribution and potential failure surface are studied comprehensively. The test results show that the settlement ratio of loading plate at the top of retaining wall and the horizontal displacement ratio of panels increase significantly at the very beginning with the increase of the number of the traffic loading, and the displacement increment gradually tends to be convergent with the further increase of cycle times. The maximum displacement occurs at the upper wall height of about $0.85H$ (H is the total wall height), and the distribution mode of the horizontal displacement is not affected obviously by the traffic loading. To increase the amplitude and frequency of the traffic loading can remarkably affect the strains of geogrid layers of the upper wall, and the strains of geogrid, below the toe of upper wall, of the lower wall are relatively greater. The horizontal earth pressure of the upper and lower walls is small at the top and bottom of the retaining wall, but large in the middle. The potential failure surface of the upper wall moves downward with the increase of the loading amplitude, and the failure mode of the upper wall gradually changes from local failure to deep global one. The filling process will increase the vertical stress of the lower wall near the panel to about 1.5 times the self-weight. The conclusion can provide a helpful guidance for the design and construction of tiered GRSRWs.

Key words: tiered geogrid-reinforced soil retaining wall; traffic loading; offset distance; model test; geogrid

0 引言

加筋土柔性挡墙结构因减载效果明显、施工简单快速、成本低、占地面积小和外形美观等特点, 被广

基金项目: 国家自然科学基金项目(41877255, 52078182); 河北省自然科学基金项目(E2018202108)

收稿日期: 2020-11-10

泛用于道路边坡支挡结构中。目前,国内外针对单级加筋土挡墙的设计与实践相对成熟,而对分级台阶式加筋土挡墙设计与理论涉及较少^[1-2]。中国《铁路路基支挡结构设计规范》^[3]规定挡墙高度大于10 m时宜采用分级式设计且台阶宽度不宜小于1 m;美国联邦公路局(FHWA)规范^[4]通过考虑台阶宽度D来量化上、下级挡墙的相互影响,并指出当 $D \leq (H_1+H_2)/20(H_1, H_2$ 分别为上、下级挡墙高),可视为总高为 (H_1+H_2) 的单级加筋土挡墙;当 $(H_1+H_2)/20 < D \leq H_2 \tan(45^\circ - \phi/2)$ 时,可视为上、下级挡墙相互影响的复合型加筋土挡墙;当 $D > H_2 \tan(90^\circ - \phi)$ 时相邻的上、下级加筋土挡墙影响减弱,可视为相互独立的加筋土挡墙,如图1所示。而美国混凝土砌体协会(NCMA)规程^[5]直接将上级挡墙视为顶部超载来考虑,上述方法主要基于单级加筋土挡墙的实践经验,对台阶宽度界限的划分相对随意。

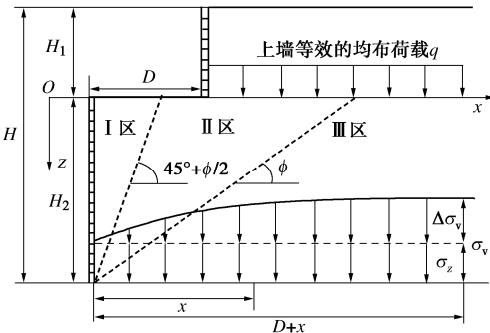


图1 二级台阶式挡土墙示意图

Fig. 1 Schematic diagram of reinforced retaining wall

近些年来,随着加筋土挡墙在公路及铁路路基结构中的大量应用,考虑交通荷载对加筋土挡墙性能影响的分析成为研究的热点问题。吴连海等^[6]采用现场激振试验,研究了单级加筋土挡墙墙面动力响应,结果表明模块式面板具有刚度大、变形小和整体性好的特点,且赵云斐等^[7]基于现场观测指出格栅拉力可显著抑制挡墙变形;Xiao等^[8]通过模型试验分析了单级加筋土挡墙顶部荷载作用下潜在破坏面特征;陈建峰等^[9]基于离心机试验和数值模拟方法,研究了挡墙变形、筋材拉力和内部破坏面演化规律,指出内部破坏面与地基贯通呈复合滑动模式,为加筋土挡墙设计提供了有益的指导。进而,杨果林等^[10]、曹新文等^[11]基于室内模型试验,指出交通荷载幅值与频率和作用次数对加筋土挡墙侧向变形和填土永久变形的影响显著。然而,现有研究对台阶式加筋土挡墙的动载分析相对较少,杨广庆等^[12]、王祥等^[13]研究了双级加筋土挡墙土压力和筋材应变的分布规律,指出交通荷载作用对台阶式加筋土挡墙影响明显,但既有相关研究较

少涉及顶部条形基础作用下,台阶宽度、荷载幅值及荷载频率对挡墙应力应变规律影响。

因此,这里采用正弦波加载模拟交通循环荷载,考虑台阶宽度、荷载大小和频率等因素对台阶式加筋土挡墙力学与变形性能的影响,并分析长期循环荷载下挡墙潜在破裂面特征。

1 二级台阶式加筋土挡墙模型试验

模型试验是土木工程领域开展力学与变形性能分析的重要手段,为准确预测原型加筋土挡墙动力特性和变形与力学规律,选择合理的模型试验相似比是必要的,这里综合考虑室内试验条件和常规加筋土挡墙高,选择采用1:3缩小模型试验来研究顶部条形基础受交通荷载作用下,台阶式加筋土挡墙的动力响应。

1.1 台阶式加筋土挡墙模型试验箱及试验材料

模型试验采用自制钢结构模型箱,其长、宽和高分别为3.5, 1.0, 2.0 m,如图2所示。箱体两侧壁内置钢化玻璃便于试验现象观察,并通过箱体玻璃两侧均匀涂抹润滑剂并粘贴聚四氟乙烯薄膜,有效减少侧壁摩擦。挡墙顶部条形基础采用自伺服液压控制的作动器施加荷载。

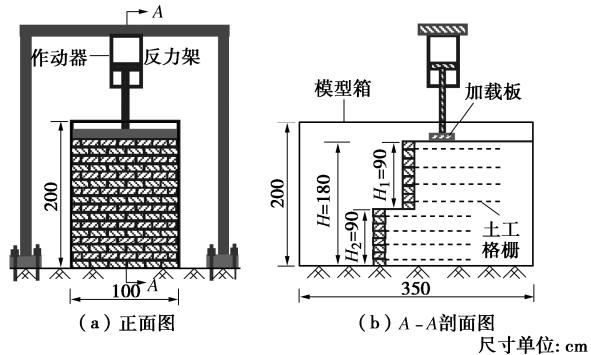


图2 台阶式加筋土挡墙模型箱及模型试验示意图

Fig. 2 Diagram of MGRSRW and model test box

试验填料采用干净河砂,其级配曲线如图3所示。砂土不均匀系数 C_u 和曲率系数 C_c 分别为2.77和1.01,最大和最小干重度分别为 18.7 kN/m^3 和 15.3 kN/m^3 ,试验分层填筑并控制压实度为93%。基于直剪试验获得砂土内摩擦角 $\phi=35.6^\circ$ 。

基于模型试验相似比,试验选取格栅的极限抗拉强度为6 kN/m,极限拉应变为9.7%,筋材2%和5%延伸率所对应的筋材抗拉强度分别为2 kN/m和3.5 kN/m,网孔尺寸为40 mm×40 mm,筋材厚度1 mm。

加筋土挡墙面板几何尺寸按实际尺寸的1/3缩小,面板砌块采用11.25 cm×15 cm×15 cm和11.25 cm×15 cm×8 cm(高×深×宽)两种类型。同时,铺设筋材后将砌块面板预留的小孔和筋材网孔用碳棒

表 1 加筋土挡墙模型试验方案
Table 1 Model test schemes of GRSRW

试验组别	荷载范围 P/kPa	频率 f/Hz	台阶宽度 D/cm	终止条件
1	0~50	1.0	18($0.2H_2$)	1×10^4 次循环
2	0~50	1.0	36($0.4H_2$)	1×10^4 次循环
3	0~50	1.0	54($0.6H_2$)	1×10^4 次循环
4	0~75	1.0	36($0.4H_2$)	1×10^4 次循环
5	0~50	1.5	36($0.4H_2$)	1×10^4 次循环

连接，防止试验过程中筋材层从相邻面板层间拔出，如图 4 所示。

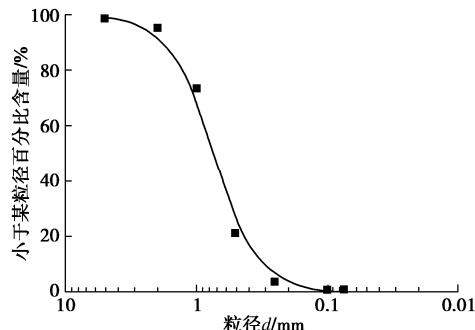


图3 试验填料级配曲线

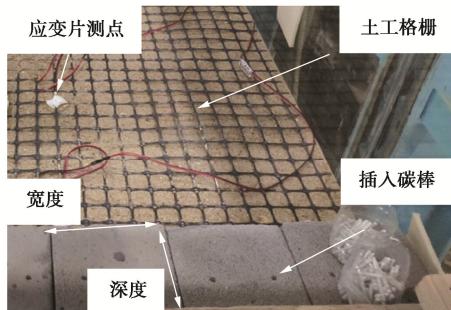


图 4 格栅与面板连接方式
Fig. 4 Connection mode between geogrid and facing panel

1.3 模型试验方案及仪器布置

通过改变台阶宽度和荷载幅值与频率来分析加筋土挡墙的动力响应, 图 2 (b) 中台阶宽度通过调整下级挡墙尺寸而保持上级挡墙不变的方法实现, 试验墙总高 $H=180$ cm, 上、下两级挡墙墙高 (H_1 , H_2) 均为 90 cm。

上级加筋土挡墙顶部采用厚和宽尺寸分别为 1.5 cm 和 30 cm 的条形钢板加载, 加载板中心距离上墙墙背 35 cm (约 $0.4H_2$)。为模拟平面应变条件, 钢板长度取 96 cm, 与模型箱宽度基本相同。模拟交通循环荷载频率 f 取 1.0, 1.5 Hz, 考虑到《高速铁路设计规范》^[14] 中关于路基面和均布荷载规定, 即设计静力荷载不大于 54.1 kPa, 模型试验取交通循环荷载幅值为 25 kPa, 其加载正弦曲线为

$$P = P_A (\sin 2\pi f t + 1) \quad , \quad (1)$$

式中, P_A 为荷载幅值 (kPa), f 为加载频率 (Hz), t 为加载持续时间 (s)。

由式(1)可知加载最大荷载对应50 kPa, 同时, 为对比研究荷载幅值大小对加筋土挡墙性能影响, 同时取幅值 P_A 为 37.5 kPa ($f=1.0$ Hz) 时的工况进行研究, 试验方案如表 1 所示, 针对不同工况施加交通循环荷载, 循环次数至 $N=1\times10^4$ 次时停止试验。

上、下级加筋土挡墙均等间距铺设 4 层筋材，除每级挡墙顶层和底层层间距为 11.25 cm 外，中间层间距为 22.5 cm，筋材长度 $L=0.7H=126$ cm，每层筋材距面板不同距离设置 4 个应变片用于筋材应变监测。试验采用位移计和土压力计监测条形基础沉降、面板位移和墙体土压力。具体位置如图 5 所示（以 $D=36$ cm 或 $0.4H_2$ ）为例，当台阶宽度变化时，土压力盒和筋材应变监测点与面板的相对位置保持不变。

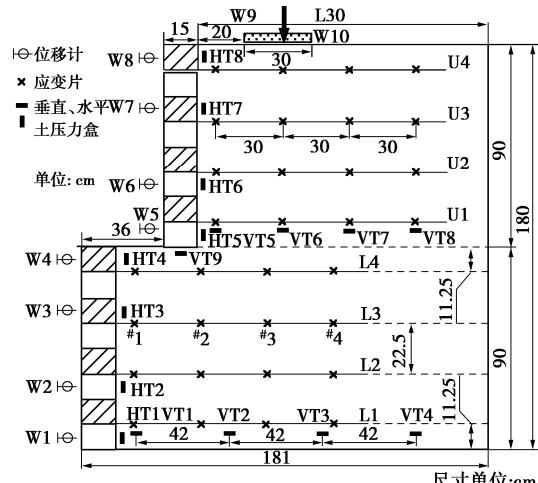


图 5 台阶式加筋土挡墙监测方案布置图(以 $D=36$ cm 为例)
 Fig. 5 Monitoring plan of instrumented GRSRW (e. g., $D=36$ cm)

2 试验结果与分析

2.1 加筋土挡墙墙顶条形基础沉降变化

图 6 为上级墙顶条形基础的沉降比 s/H_1 (沉降平均值 s 与上级墙高 H_1 的比值) 和荷载循环次数 N 与加载时间 T 的关系。由图 6 可知, 随循环作用次数增加, 沉降总体呈增长趋势, 且前期沉降发展迅速, 当循环次数 $N=1 \times 10^3$ 次时, 各组试验沉降比均接近最终

沉降一半；当循环荷载大小和频率相同时，初始阶段如 $N \leq 100$ 次时，3 组台阶宽度不同的试验沉降比 s/H_1 差距较小，后续随作用次数增加，台阶宽度的影响增加。

当循环荷载作用次数相同时，增加台阶宽度，沉降比 s/H_1 先增加后逐步减少， $D=0.6H_2$ 时沉降比明显小于 $D=0.2H_2$ 和 $0.4H_2$ 时，且随荷载作用次数增加，如 $N=1 \times 10^3$ 次和 1×10^4 次时，沉降比相差更明显，表明当 D 较小时，上、下级加筋土挡墙相互影响明显，且当 $H_2 \tan(45^\circ - \varphi/2) < D = 0.6H_2 = 54 \text{ cm} < H_2 \tan(90^\circ - \varphi)$ ，即依据 FHWA 规范认为上、下级挡墙趋于各自独立，上级挡墙顶部受载特性与相同高度的单级挡墙相同。因此，同等条件下沉降比明显减少，表明适当增加台阶宽度有利于增强上级墙顶承受荷载能力。

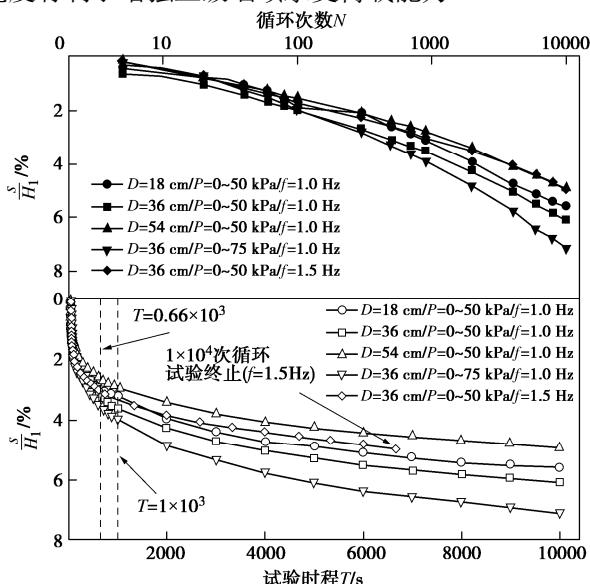


图 6 循环次数与试验时程和基础沉降比的关系曲线

Fig. 6 Relationship among settlement ratio of strip foundation, cycle times and time history

当台阶宽度相同即 $D=0.4H_2$ 时，相比于 $P=0 \sim 50 \text{ kPa}$ ($f=1.0 \text{ Hz}$)，增加循环荷载值至 $P=0 \sim 75 \text{ kPa}$ ($f=1.0 \text{ Hz}$)，在加载结束时沉降比 s/H_1 增大 27.3%，而当荷载频率增至 $f=1.5 \text{ Hz}$ ($P=0 \sim 50 \text{ kPa}$) 时，沉降比 s/H_1 减小 11.0%，显然，交通循环荷载作用幅值比荷载频率对沉降比的影响更加明显。此外，提高荷载频率使单位时间作用次数增加，加载损耗能量相应增多，且模型试验以循环作用次数相同 (10^4 次) 为终止条件，则 $f=1.5 \text{ Hz}$ 组模型试验的荷载作用时间比 $f=1.0 \text{ Hz}$ 组少约 0.9 h，因此，导致提高频率时沉降比相对减少。

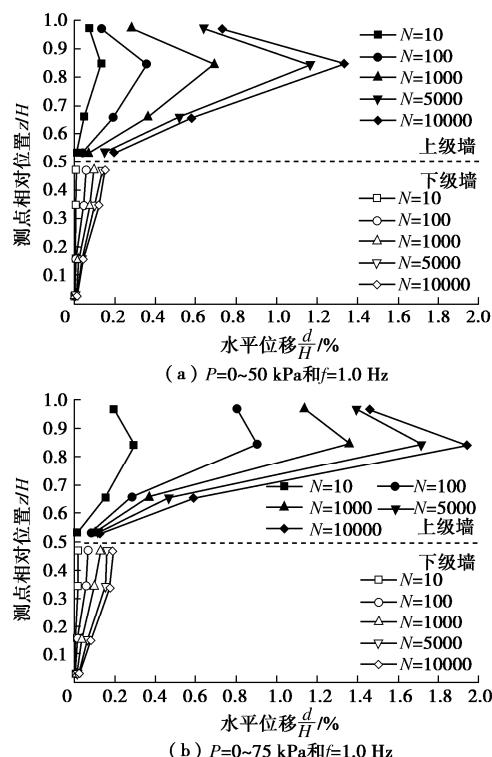
进一步地，为分析交通循环荷载幅值和频率对挡墙变形及力学影响，下文选取台阶宽度 $D=0.4H_2$ 时，通过变化荷载大小和频率，即选取表 1 中第 2, 4 和 5 组模型试验进行对比分析，详细探讨复合型台阶式加

筋土挡墙在交通循环荷载下的力学与变形性能。

2.2 加筋土挡墙面板水平位移

图 7 为台阶式加筋土挡墙面板水平位移沿墙高 H 的分布曲线。显然，面板水平位移呈“上大下小”的变化趋势，位移集中在 $(0.65 \sim 1)H$ 墙高范围内，最大处距墙底 $0.85H$ ，主要原因是墙顶荷载作用时，基础发生沉降的同时伴随土颗粒水平移动，挤压上墙面板致其变形明显，而且通过试验箱侧面钢化玻璃可清晰观察到图 5 中位移计 W7 对应面板的侧向位移最明显。总体上，增加作用次数 N ，位移累积值呈增长趋势，但增量呈收敛态势。当作用次数 $N=1 \times 10^3$ 次时，3 种工况所对应水平位移值占最大位移的 50% 以上，而 $N=5 \times 10^3$ 次至试验结束时水平位移积累增长值小于 $0.03\%H$ 。

此外，在相同台阶宽度和循环作用次数 ($N=1 \times 10^4$) 下， $P=0 \sim 50 \text{ kPa}$ ($f=1.0 \text{ Hz}$)、 $P=0 \sim 50 \text{ kPa}$ ($f=1.5 \text{ Hz}$) 和 $P=0 \sim 75 \text{ kPa}$ ($f=1.0 \text{ Hz}$) 3 种工况对应的墙体最大水平位移分别为 $1.4\%H$ 、 $1.5\%H$ 和 $2.0\%H$ 。显然，相同条件下，荷载幅值增加显著影响上级挡墙面板水平位移增加。因此，对承受交通循环荷载的台阶式加筋土挡墙设计来说，应注意荷载幅值较大时应力扩散引起的面板水平位移，可适当增加面板连接刚度。进而，由图 7 可知， $P=0 \sim 50 \text{ kPa}$ ($f=1.5 \text{ Hz}$) 时，上级挡墙墙底和下级挡墙顶部的位移，明显大于 $P=0 \sim 50 \text{ kPa}$ ($f=1.0 \text{ Hz}$) 和 $P=0 \sim 75 \text{ kPa}$ ($f=1.0 \text{ Hz}$) 时的相同高度面板位移，表明提高频率，应力扰动区域扩大，导致荷载向深处传递。



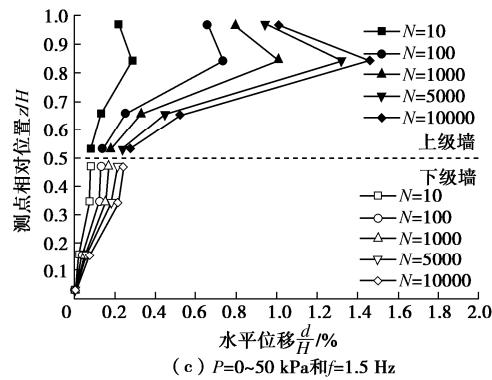


图 7 $D=0.4H_2$ 时荷载大小和频率对挡墙水平位移的影响

Fig. 7 Effects of magnitude and frequency of cyclic loading on horizontal deformation of GRSRW

2.3 加筋土挡墙墙后土压力变化规律

(1) 水平土压力

图8为不同荷载大小和频率时挡墙水平土压力随相对高度 Z/H 的变化曲线。由图8可知, 不同工况下墙背水平土压力具有相同分布规律, 即大致呈顶部与底部小而中部较大的分布形式, 上级最大值出现在约 $0.65H$ 处, 设置台阶明显改变了水平土压力分布, 台阶分级处上级挡墙底部和下级挡墙顶部的水平土压力较小, 下级挡墙最大水平土压力位置约在 $0.15H$ 处。

由图8可知, 对相同台阶宽度的二级加筋土挡墙, 顶部基础受交通循环荷载作用时, 上级挡墙顶部墙背水平土压力几乎为零, 该处水平土压力主要由填土侧向挤压引起, 而顶层面板依靠自重情况下与相邻面板的摩擦来抵抗侧向土压力, 面板变形大而土压力释放多且在零附近变化。下级挡墙墙顶处水平土压力值约5 kPa, 几乎不发生改变。同样地, 吴连海等^[6]指出随重复荷载进行及筋材拉锚作用逐步发挥, 土体逐渐达到最大密实度, 导致水平土压力基本保持不变。

另外, 随作用次数 N 增加, 上级墙背水平土压力呈现先增加后减小趋势, $N=5000$ 次时达到峰值。随墙后填土逐步压实, 水平土压力增幅逐渐降小; 而下级挡墙距离荷载中心较远, 填土密实过程较上级挡墙耗时长, 水平土压力持续增加, 但幅度减少即呈收敛趋势。当荷载频率不变而荷载幅值增至1.5倍时, 上级最大水平土压力值由14.8 kPa增至18.6 kPa, 增加到约1.26倍, 而下级挡墙增长至1.08倍; 对比图8 (a) 和8 (c) 可知, 当频率增至 $f=1.5$ Hz时, 上、下两级挡墙墙背水平土压力最大值分别增至1.14倍和1.02倍。显然, 频率或幅值增加对下级挡墙水平土压力的峰值影响较小。

(2) 垂直土压力

图9为交通循环荷载作用下加筋土挡墙基底垂直土压力沿深度方向分布图, 由图9可知, 总体上靠近

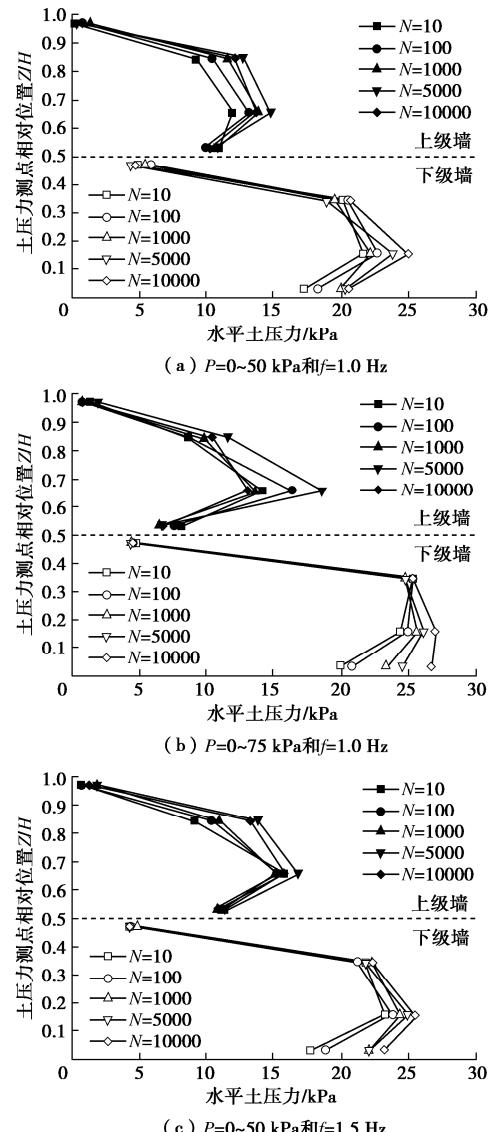


图 8 $D=0.4H_2$ 时台阶式加筋土挡墙墙背水平土压力

Fig. 8 Horizontal earth pressures along height of GRSRW

面板处为底部垂直土压力峰值, 距顶部基础边缘较远的筋材末端或非加筋区底部垂直土压力最小且几乎不受加载过程影响。此外, 不同频率和幅值作用下, 随循环次数增加, 下级墙底垂直土压力相应增加, 尤其靠面板附近增加明显, 而上级墙底垂直土压力呈现先增加后减少的趋势, 表明对于承受交通循环荷载的台阶式加筋土挡墙, 基底承受的垂直土压力需重点关注。

进一步地, 与荷载 $P=0\sim50$ kPa ($f=1.0$ Hz) 组相比, 增加荷载幅值 $P=0\sim75$ kPa ($f=1.0$ Hz) 或频率 $f=1.5$ Hz ($P=0\sim50$ kPa), 上、下级墙底垂直土压力增加明显。荷载幅值增加, 加筋复合体逐渐挤密压实, 面板向背离填土方向位移, 加筋土挡墙重心向面板偏移, 加载终止时近面板处垂直土压力值增至开始阶段的1.5倍。另外, 当荷载频率增至 $f=1.5$ Hz时, 频率增长使荷载传递效率增加, 应力传播范围扩大, 影响更多区域的土颗粒运动并重新排布, 进而削弱基底稳固

性, 潜在引起加筋土挡墙整体失稳破坏。

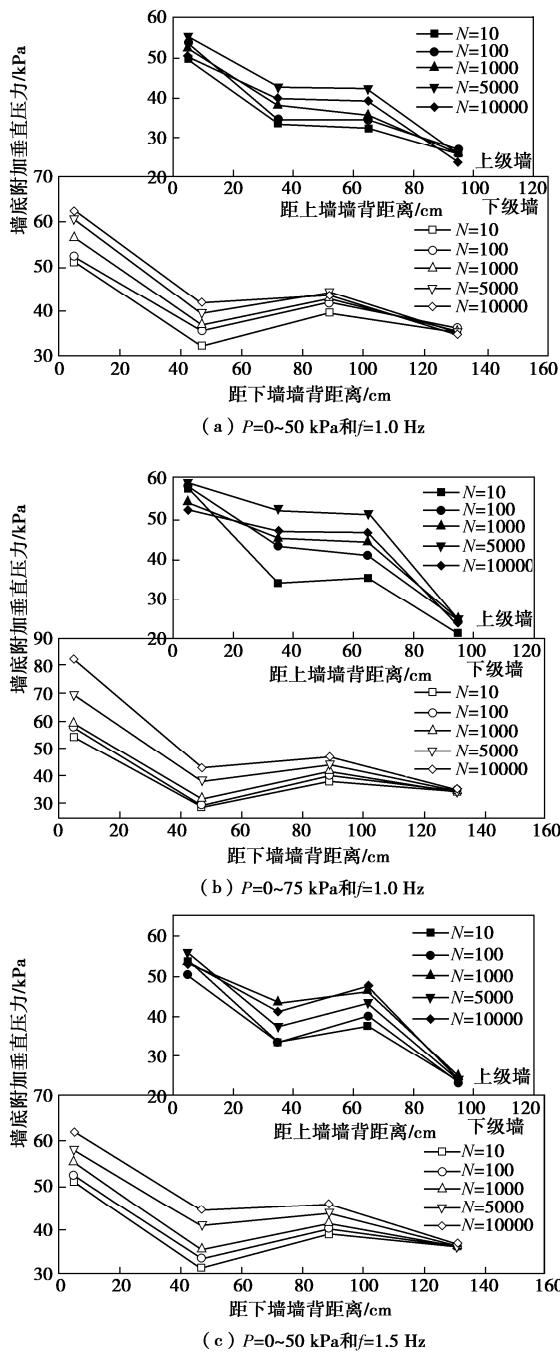


图 9 $D=0.4H_2$ 时台阶式加筋土挡墙垂直土压力

Fig. 9 Vertical earth pressures along the bottom of GRSRW

2.4 加筋土挡墙筋材应变规律

图10为循环荷载对筋材应变的影响, 当荷载 $f=1.5$ Hz ($P=0\sim 50$ kPa) 时, 作用次数 N 对筋材应变的影响如图10 (a) 所示。由图10可知, 总体上, 从筋材伸长方向, 筋材应变呈现先增大后减小趋势, 面板固定的前端贡献大于仅受土颗粒摩擦与嵌咬作用的末端。随着循环次数增加, 加载板正下方和上级墙趾下方的筋材应变变化剧烈, 而上级挡墙远离加载板或下级挡墙远离墙趾的测点应变相对较小。

此外, 当增加作用次数时, 部分筋材测点应变数值出现下降甚至负值现象, 主要是由于受长时间加载影响, 条形基础下方土体产生沉降, 部分筋材弯曲变形所致。试验结束开挖填土时, 可肉眼直观观察到筋材凹陷, 且随筋材布设层高增加凹陷程度越明显。

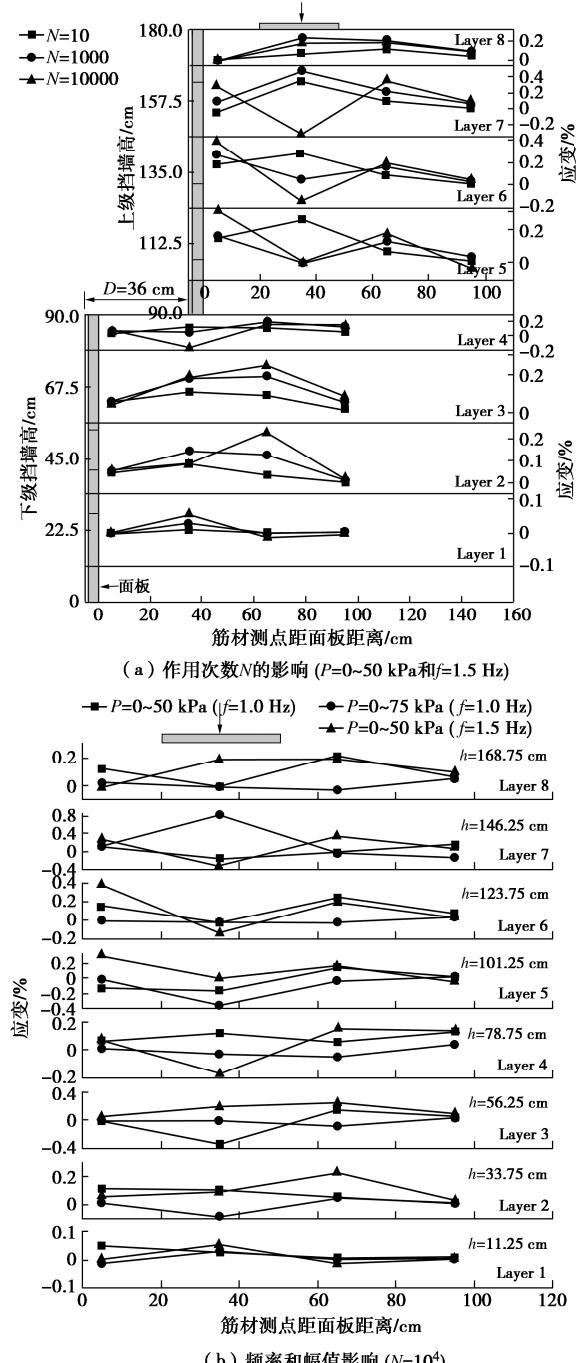


图 10 循环荷载对筋材应变的影响

Fig. 10 Effects of cyclic loading on strains of geogrids

进而, 选取 $N=1\times 10^4$ 时分析加载幅值和频率对筋材应变的影响, 结果如图10 (b) 所示。显然, 下级加筋土挡墙相同层高的筋材应变小于上级挡墙, 且增加荷载幅值或频率时, 靠近荷载处的应变变化明显, 尤其对上级挡墙筋材应变影响显著, 并观察到, 增加荷载幅值对下级挡墙筋材应变影响不明显, 可能由于加

筋土挡墙作为柔性支撑物, 抵抗荷载和整体变形协调能力强, 结合图7 (b) 可知上级挡墙面板外鼓强烈, 应力得以释放, 使下级挡墙筋材应变相对较小。当频率增至 $f=1.5\text{ Hz}$ ($P=0\sim 50\text{ kPa}$) 时, 最显著特征是下级挡墙筋材应变稍大于另外两种荷载情况, 表明荷载频率增加, 下级墙体填土颗粒受外荷载扰动影响而重新排布, 筋-土界面相互嵌咬使格栅受拉伸长。

2.5 加筋土挡墙潜在破裂面特征

为分析交通荷载作用下台阶式加筋土挡墙破坏面特征, 沿模型箱两侧透明钢化玻璃按层高铺设红色彩砂并夯实, 通过连接红砂层沉降峰值点绘出挡墙潜在破裂面, 如图 11 中红色实线所示。同时, 采用黄色虚线将格栅应变最大点连线, 显然, 受顶部条形基础影响, 上级挡墙可能潜在破裂面从基础近面板端出发到墙高 $0.81H$ 或上级墙高约 $0.62H_1$ 处滑出, 另一潜在破裂面从基础远离面板一侧出发到墙高 $0.68H$ 或上级墙高约 $0.37H_1$ 处滑出, 其中近面板端可能的潜在破裂面出口处砌块有挤出风险, 远面板端潜在破裂面为循环荷载影响而形成, 锚固段减少使筋材层有拔出风险。

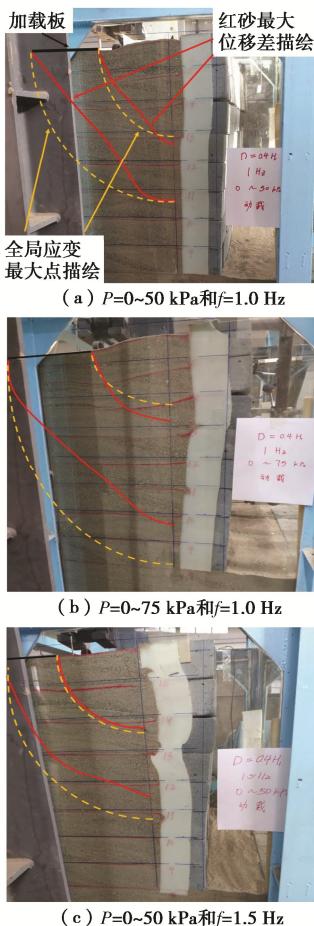


图 11 $D=0.4H_2$ 时顶部加载作用下加筋土挡墙潜在破坏模式

Fig. 11 Potential failure surfaces of GRSRW under different loading modes for $D=0.4H_2$

荷载值或频率增加均会导致近面板端破裂面上移, 增大面板挤出风险。此外, 当荷载值较大如 $P=0\sim 75\text{ kPa}$ ($f=1.0\text{ Hz}$), 相较另外两工况其远端破裂面呈下移趋势, 表明循环荷载下挡墙破裂面向深层发展, 由局部破坏逐渐向深层整体破坏演变, 如图 11 (b) 所示。

3 加筋土挡墙基底垂直土压力讨论

3.1 填筑过程对加筋土挡墙基底垂直土压力影响

选取荷载 $P=0\sim 75\text{ kPa}$ ($f=1.0\text{ Hz}$), 分析填筑过程对挡墙基底垂直土压力的影响, 如图 12 所示。由图 12 可知, 当回填高度小于 90 cm , 即下级挡墙回填时, 挡墙基底垂直土压力随回填高度增加而增加, 尤其是靠近面板的垂直土压力增加明显。然而, 当填筑高度大于 90 cm 时, 即上级加筋土挡墙开始回填时, 上级挡墙填筑过程亦增加基底垂直土压力, 但增长幅度明显减弱, 表明台阶式加筋土挡墙有利于减少基底垂直土压力, 进而降低对挡墙地基承载能力的要求。

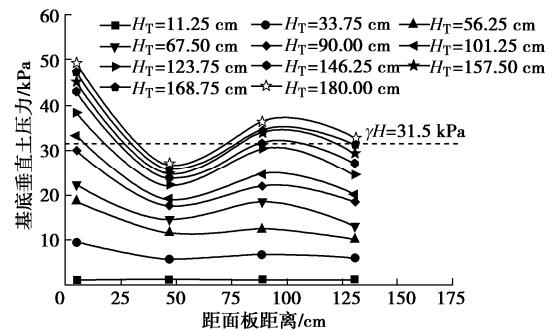


图 12 填筑过程对加筋土挡墙基底垂直土压力影响

Fig. 12 Effects of filling of GRSRW on vertical earth pressure

显然, 由图 12 可知, 随填筑高度增加, 基底垂直土压力总体呈现倒“S”型曲线分布, 最大值出现在挡墙面板附近, 这是由于填筑过程中土体在自重作用下具有整体向外倾覆趋势, 表现为靠近面板处垂直土压力最大, 且靠近面板处土体因压实困难而压实度不足, 易产生不均匀沉降, 致使面板附近基底垂直土压力出现不均匀分布, 引起墙面土拱效应而导致靠近面板的 VT2 测点垂直土压力明显小于 γH 值, 两侧则大于 γH 。

3.2 加筋土挡墙自重对墙基底垂直应力影响

基于 FHWA 经验公式, 杨广庆^[15]提出改进计算台阶式加筋土挡墙基底附加垂直应力的方法, 将台阶式加筋土挡墙分 3 种情况: ① $D \leq D_1 = H_2 \tan(45^\circ - \varphi/2)$ 、② $D_1 < D \leq D_2 = H_2 \tan(90^\circ - \varphi)$ 、③ $D > D_2$, 分别对应主动区、过渡区和稳定区, 并考虑上级挡墙作用, 计算下级挡墙基底垂直土压力, 如图 1 所示。此外, Wright 基于弹性半空间表面均匀加载下的应力求解方法^[16],

通过将上级挡墙视为附加均布荷载, 提出计算下级墙体任一位置附加垂直土压力, 计算公式为

$$\Delta\sigma_v = \frac{q}{\pi} \left\{ \left[\beta_a + \frac{(x-D)z}{R_a^2} \right] + K \left[\beta_i - \frac{(x+D)z}{R_i^2} \right] \right\}, \quad (2)$$

式中,

$$\beta_i = \arctan\left(\frac{z}{D+x}\right), \quad \beta_a = \arctan\left(\frac{z}{D-x}\right),$$

$$R_i = \sqrt{z^2 + (D+x)^2}, \quad R_a = \sqrt{z^2 + (D-x)^2}.$$

式中 $\Delta\sigma_v$ 为上级挡墙自重引起的下级墙体附加垂直应力 (kPa); x 为计算点与挡墙距离 (m); z 为计算点与下级墙墙顶竖直高度 (m); 当挡墙为“刚性墙”时, $K=1$, 为“柔性墙”时, $K=-1$ (如图 1 所示)。

图 13 为上述 2 种附加应力计算方法和本文实测所得挡墙基底垂直土压力的对比结果图, 由图 13 可知, 实测值在靠近面板附近处与上述两种方法的计算结果相差较大, 而在远离面板尤其是在挡墙后部处吻合较好, 由于上、下级挡墙自重作用, 挡墙面板向背离填土方向移动, 加筋层受拉紧绷使筋-土界面摩擦错动而产生较大作用力, 筋材层起到对土的水平限制及竖向承托作用, 使面板底部附近存在应力集中现象, 从而使得台阶式加筋土挡墙靠近挡墙处基底垂直土压力的实测值大于理论计算值。此外, Wright^[16] 基于弹性半无限空间表面均匀加载设定进行应力求解, 这种假设与挡墙临空一侧区别较大, 因而实测与计算值在面板附近差别明显, 但远离面板区域其假设与实际情况较吻合, 故二者吻合较好。事实上, 两种理论求解方法均未考虑下级挡墙对上级挡墙的影响, 以及填筑完成后挡墙水平位移和墙后填土应力场重分布的影响, 这也是部分区域实测与理论计算值区别较明显的原因之一。

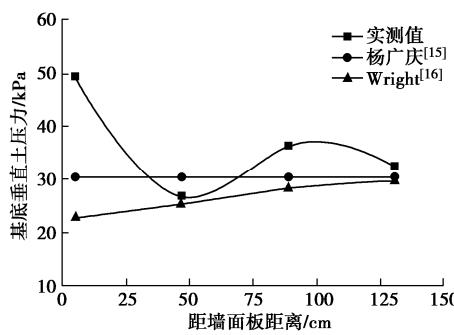


图 13 基底垂直土压力实测与理论结果对比图

Fig. 13 Comparison between measured and theoretical results of vertical earth pressure at bottom of wall

4 结 论

(1) 台阶宽度为 0.4 倍下级墙高时, 增加交通循环荷载作用次数, 加筋土挡墙顶部加载板基础沉降比

和面板水平位移在加载初期增加明显, 后期增幅减弱呈收敛趋势; 二级台阶式加筋土挡墙上级面板位移呈“鼓出”形式, 且墙高 (0.65~1.0) H 内位移较大, 最大位移出现在墙高约 0.85 H 处; 下级挡墙顶部水平位移较大, 且随台阶宽度增加而减少。

(2) 墙背水平土压力呈顶部与底部小而中部较大的分布形式, 上、下墙顶部及上墙底部水平土压力受荷载作用影响较小, 增加荷载频率或幅值对下级挡墙的水平土压力增量影响较小; 垂直土压力受荷载影响在上墙中部和下墙靠近面板处变化幅度大, 增加荷载作用次数, 上墙墙底垂直应力呈先增加后减少的趋势。

(3) 筋材应变沿长度即从末端至面板, 其值呈现先增大后减小趋势, 相同层高处, 下级挡墙筋材应变明显小于上级挡墙; 增加荷载幅值或频率时, 靠近面板的筋材应变变化明显, 即与面板固定的前端拉力贡献大于仅受土颗粒摩擦和嵌咬作用的末端。

(4) 顶部条形基础受交通荷载时, 台阶式加筋土挡墙存在两组潜在破裂面, 即从基础近面板端至墙高 0.81 H 处滑出或基础远面板一侧至墙高 0.68 H 处滑出。当荷载值幅值较大时, 循环荷载作用下滑移土体范围扩大, 上墙由局部破坏逐渐演变为深层整体破坏。

(5) 挡墙填筑期间下级挡墙基底靠近面板的垂直土压力约为 1.5 倍自重应力; 远离面板的筋材末端及非加筋区, 基底垂直土压力较小, 且实测值和采用改进的 FWHA 法及 Wright 法的理论计算值吻合较好。

参 考 文 献:

- [1] KOERNER R M. Design with Geosynthetics[M]. 5th ed. Englewood Cliffs: Prentice-Hall Inc, 2010.
- [2] YOO C S, SONG A R. Effect of foundation yielding on performance of two-tier geosynthetic-reinforced segmental retaining walls: a numerical investigation[J]. Geosynthetics International, 2006, 13(5): 181~194.
- [3] 铁路路基支挡结构设计规范: TB 10025—2006[S]. 2006. (Code for Design on Retaining Structures of Railway Subgrade: TB 10025—2006[S]. 2006. (in Chinese))
- [4] Design and Construction of Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes: Volume I FWHA—NHI—10—024[S]. 2009.
- [5] NCMA. Design Manual for Segmental Retaining Walls[S]. 1997.
- [6] 吴连海, 杨广庆, 张青波, 等. 高速铁路加筋土挡墙动响应规律现场试验[J]. 西南交通大学学报, 2017, 52(3): 546~553. (WU Lian-hai, YANG Guang-qing, ZHANG Qing-bo, et al, In-situ test on dynamic responses of reinforced

- soil retaining walls for high-speed railways[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2017, **52**(3): 546 – 553. (in Chinese))
- [7] 赵云斐, 杨广庆, 周诗广, 等. 高速铁路土工格栅加筋土挡墙服役期力学行为研究[J]. 铁道学报, 2020, **42**(6): 129 – 138. (ZHAO Yun-fei, YANG Guang-qing, ZHOU Shi-guang, et al. Research on mechanical behaviour of high-speed railway geogrid reinforced soil retaining wall[J]. Journal of the China Railway Society, 2020, **42**(6): 129 – 138. (in Chinese))
- [8] XIAO C Z, HAN J, ZHANG Z. Experimental study on performance of geosynthetic-reinforced soil model walls on rigid foundations subjected to static footing loading[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2016, **44**(1): 81 – 94.
- [9] 陈建峰, 张 旭, 柳军修. 软土地基刚/柔组合墙面加筋土挡墙离散连续耦合数值模拟[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2019, **47**(2): 159 – 166. (CHEN Jian-feng, ZHANG Xu, LIU Jun-xiu. Coupling discontinuous-continuous simulation of reinforced soil walls with flexible/rigid facings on soft foundation[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2019, **47**(2): 159 – 166. (in Chinese))
- [10] 杨果林, 林宇亮, 李 眇. 新型加筋土挡墙动变形特性试验研究[J]. 振动与冲击, 2010, **29**(1): 223 – 248. (YANG Guo-lin, LIN Yu-liang, LI Yun, Test study on dynamic deformation behavior of new reinforced earth retaining walls[J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, **29**(1): 223 – 248. (in Chinese))
- [11] 曹新文, 蔡 英. 重复加载下路基填土的临界动应力和永久变形初探[J]. 西南交通大学学报, 1996, **2**(1): 1 – 5. (CAO Xin-wen, CAI Ying. Study of the critical dynamic stress and permanent strain of the subgrade-soil under the repeated load[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 1996, **2**(1): 1 – 5. (in Chinese))
- [12] 杨广庆, 蔡 英. 多级台阶式加筋土挡墙试验研究[J]. 岩土工程学报, 2000, **22**(2): 254 – 257. (YANG Guan-qing, CAI Ying. Study on the multi-steps reinforced earth retaining wall[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, **22**(2): 254 – 257. (in Chinese))
- [13] 王 祥, 徐林荣. 双级土工格栅加筋土挡墙的测试分析[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))
- [14] 高速铁路设计规范: TB 10621—2014[S]. 2015. (Code for Design of High Speed Railway: TB 10621—2014[S]. 2015. (in Chinese))
- [15] 杨广庆. 台阶式加筋土挡墙设计方法的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, **23**(4): 695 – 698. (YANG Guang-qing. Study on design method of tiered reinforced earth retaining wall[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, **23**(4): 695 – 698. (in Chinese))
- [16] WRIGHT S G. Design Guidelines for Multi-Tiered MSE Walls[R]. Texas: Texas Department of Transportation, 2005.