

双级土工格栅加筋土挡墙的测试分析

Test and analysis of two-step retaining wall reinforced by geogrid

王 祥¹, 徐林荣²

(1. 铁道第四勘察设计院 地路处, 湖北 武汉 430063; 2. 中南大学铁道学院 土建院, 湖南 长沙, 410075)

摘 要: 通过对梅坎铁路双级土工格栅加筋土挡墙的墙面板水平土压力、垂直土压力及土工格栅变形的原位观测, 分析了墙面板水平土压力的变化及分布规律、垂直土压力变化及土工格栅的变形随填高及时间的变化规律, 并对挡土墙的破裂面进行了探讨。

关键词: 双级加筋土挡墙; 土工格栅; 测试分析

中图分类号: TU 413

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2003)02-0220-05

作者简介: 王 祥(1970-), 男, 江西玉山人, 中南大学岩土工程硕士, 工程师, 主要从事岩土工程科研、设计和施工工作。

WANG Xiang¹, XU Linrong²

(1. Department of Geology and subgrade, the Forth Survey and Design of China Railway, Wuhan 430063, China; 2. Central South University, Changsha 410075, China)

Abstract: In this paper, the prototype measurement for the lateral soil pressures on the facing, the vertical soil pressures and the deformations of the geogrid on the two-step retaining wall reinforced by the geogrid on Meikan railway, were described. The variation and distribution of the lateral and vertical soil pressures and the deformations of the geogrid with soil filling and time were analyzed, the cracked face of the wall was discussed.

Key words: two-step reinforced soil wall; geogrid; test and analysis

0 引 言^①

法国工程师 H. Vidal 1957 年就开始对加筋土进行了从理论到施工的研究, 并于 1963 年公布了加筋土的首批研究成果^[1]。随后法国成功建成了世界上第一座加筋土挡墙^[2,3]。此后加筋土挡墙以其结构轻型、施工方便等优点, 在国内外得到了广泛应用。

梅(州)坎(市)铁路 DK24+190~+285 段路堤左侧边坡高达 30 m, 为避免坡脚大量侵占河道, 原设计为高达 11 m 的 M10 浆砌片石浸水路堤挡墙, 工程巨大, 施工困难。为进一步降低路堤边坡高度, 节约投资, 优化设计采用高 14.60 m 的双级加筋土挡墙^[4]。铁路工程中加筋土挡墙高度一般不超过 10 m, 高达 14.60 m 的双级土工格栅加筋土挡墙在国内尚未见报道, 且加筋土挡墙各组成部分相互作用的机理较复杂。为积累资料, 探讨土工格栅加筋土挡墙的受力状态, 揭示双级加筋土高挡墙的工作机理及设计计算方法, 指导今后加筋土挡墙的设计施工, 有必要对挡土墙进行原位测试分析, 以积累该类挡土墙的设计与施工经验, 促进铁路加筋土挡墙技术的发展。

1 工程概况

线路以高路堤通过丘陵缓坡及丘间谷地, 路基左侧为永定河, 右侧靠山。地基表层为砂黏土, 硬塑, 厚 2~3 m, 下部为变质砂岩, 极严重—颇重风化。

加筋土挡墙分两级施工, 上级墙高 6.4 m, 墙顶填

土 0.6 m; 下级墙高 1.0~7.6 m, 上级墙条形基础座落在下级墙的填土上, 两级墙墙面之间设 2.5 m 宽平台。挡土墙采用 C15 混凝土条形基础, 下墙基础沿纵向设计为台阶式, 墙面板采用 C20 钢筋混凝土矩形预制板, 面板长 1.1 m, 宽 0.6 m, 厚 0.12 m。每块面板预埋两层拉筋连接环, 拉筋采用国产 SDL-50 型单向拉伸土工格栅, 幅宽 1.1 m, 其极限拉力为 50 kN/m, 破断延伸率小于 10%。拉筋分层满铺于填土面上, 层间距为 0.3 m, 下级墙每一拉筋层铺设两层土工格栅, 拉筋长度为 10 m, 上级墙每一拉筋层铺设一层土工格栅, 拉筋长度为 7 m。

1999 年 5 月挡墙开始施工, 同年 12 月竣工。测试工作于 1999 年 5 月开始, 2001 年 2 月结束(施工开始至运营后一段时间), 历时近 3 a。

2 仪器的布置及观测

根据挡墙的结构和受力特点, 选取了最大墙高断面 DK24+247.05 为主观测断面, 对加筋土挡墙墙背水平土压力、内部土中垂直压力以及拉筋受力状态进行了测试。主观测断面的原位观测元件见图 1。

3 填料的物理力学性质

填料为加筋土结构的主体材料, 选择填料的基本原则是要保证填料与加筋之间有足够的摩擦力, 并在

① 收稿日期: 2002-05-08

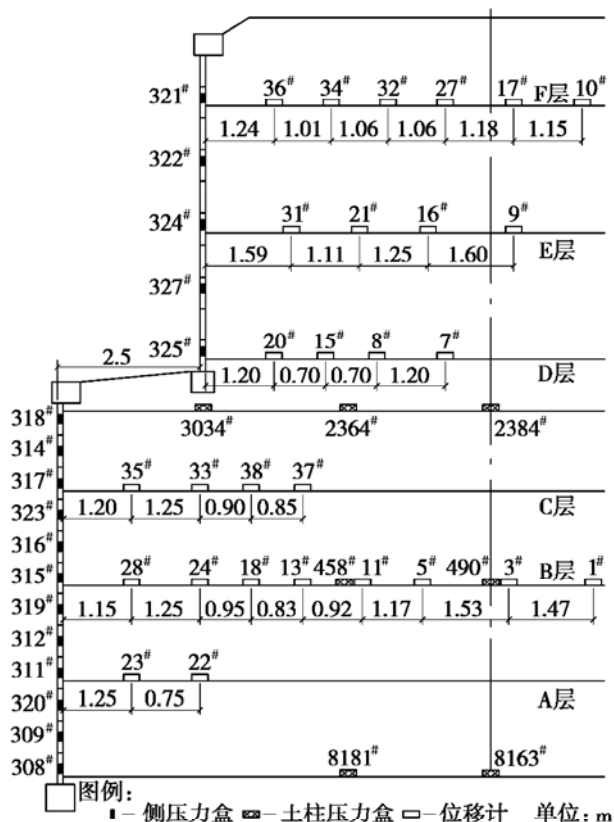


图1 DK24+ 247.05 断面元件布置示意图

Fig. 1 Arrangement of instrument of the DK24+ 247.05

结构中不产生孔隙水压力。对于用土工格栅作为加筋材料时,填料不应对其具有腐蚀性。墙后回填料原设计为渗水较好的卵砾土,后发现大块卵石易造成土工格栅特别是横肋的损伤,对工程安全造成危害,后改为砂砾土,情况较好。 $\gamma = 19 \text{ kN/m}^3$, $\varphi = 35^\circ$;土-筋似摩擦系数,浸水时 $f' = 0.3$,不浸水时 $f' = 0.4$ 。

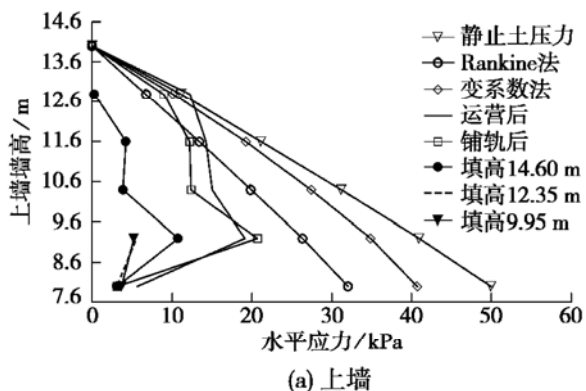
经计算,Rankine 主动土压力系数 λ_a 为 0.271;静止土压力系数 λ_0 用 Jaky 公式估算为 0.426^[5]。

4 实测结果分析

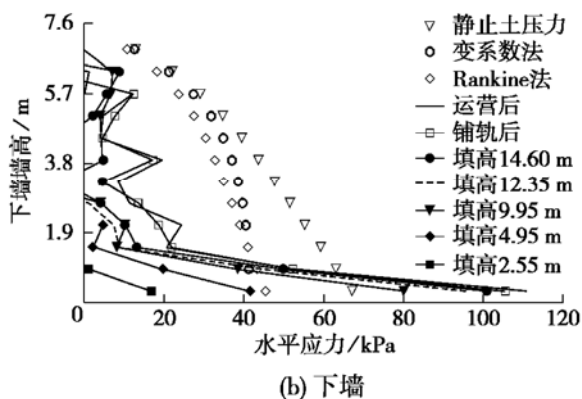
4.1 墙背水平土压力分析

图2为实测水平土压力与理论值对比曲线。对于挡土墙水平土压力的计算,规范采用变系数法进行^[6]。其中,上墙的水平土压力按单级挡土墙常规方法计算;计算下墙水平土压力时,上墙的填料荷载对下墙造成的作用按 Boussinesq 假定,用条形荷载作用下土中应力公式计算,由此得到的水平土压力加下墙墙后填料产生的水平土压力之和即为下墙的总水平土压力。图中还用 Rankine 理论及静止土压力理论进行了墙背水平土压力的计算。

由图2可知,随着填料荷载的增加,挡土墙的水平土压力也增大。上墙大部分实测水平土压力与 Rankine 法计算出的结果较接近,在接近下墙的 1 m 多范围内,水平土压力逐渐减小,这种现象与一般单级挡墙水



(a) 上墙



(b) 下墙

图2 实测水平土压力与理论值对比曲线

Fig. 2 Comparison of the theoretic earth pressure with test data

平土压力的分布规律相反。此现象在桩板墙实测和能量法计算水平土压力中也出现过^[7]。下墙底部的实测水平土压力大于各理论的计算值,这与该处面板的变形受基础顶的限制有关;而在挡土墙的中部,各理论值均大于实测值较多,这与把上墙荷载对下墙的影响按 Boussinesq 理论求解有关。由于 Boussinesq 理论是建立在均质、连续和各向同性的半无限弹性体的基础上的,且认为挡土墙是刚性体^[8],这与实际是不符的,但把上、下墙当作整体来考虑,得出的结果也大于实测值较多^[4]。因此,对双级加筋土挡墙上墙对下墙产生的水平土压力的计算仍需作进一步的研究。

下墙有的面板实测水平土压力很小,甚至接近 0,这与面板之间活动相对自由有关,面板受力后产生向外位移,使水平土压力随时释放^[4],这充分体现了加筋土挡墙面板属于柔性结构的特点。

图3为上墙实测水平土压力随时间的变化曲线。从图中可知,随着填料荷载的增加,面板的水平土压力也增大,反映了水平土压力的变化规律。进入铺轨以后,面板水平土压力稍有增加,但总体变化不大,即列车荷载对面板的水平土压力的影响较小。

4.2 土中垂直土压力分析

图4为部分测点实测垂直土压力与理论计算垂直土压力对比曲线(图中理论值 1 为 2364#、2384#、3034# 测点的理论计算值,458# 和 490# 的理论计算值很接近,在图中重合在一起)。理论计算采用的方法按

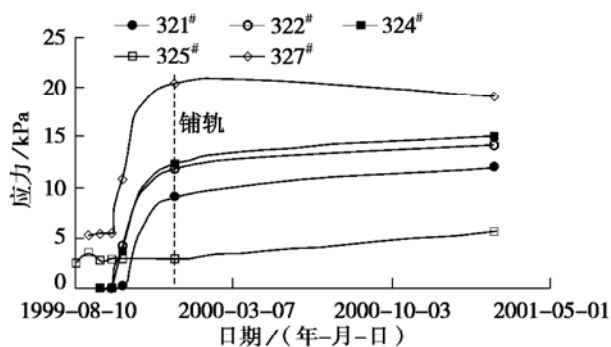


图3 上墙实测水平土压力随时间变化曲线

文献[6]进行。从图4可以看出,距下墙面板7.5 m的490[#]、2384[#]垂直土压力盒得到的垂直土压力实测值与理论计算值相差较大,而距下墙面板5 m的458[#]、2364[#]、3034[#]的垂直土压力实测值与理论计算值比较接近,每个土压力盒所测得的垂直土压力均随填料荷载的增大而增大,基本反映了垂直土压力随时间荷载的变化过程。同一水平面同一层土工格栅的不同位置的垂直土压力并不一致,这必然使同一层土工格栅不同位置处的摩擦力不同,导致同一层土工格栅的受力变形不同,这也从后面实测的拉筋受力变形结果中得到验证。

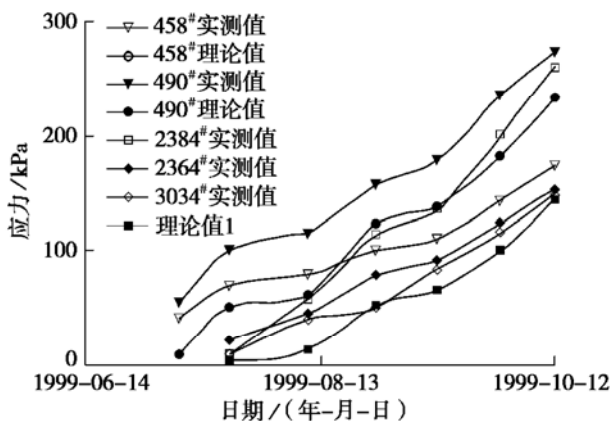


图4 部分测点实测垂直土压力与理论计算值对比

Fig. 4 Comparison of the theoretic vertical soil pressure with test data

总体来说,实测垂直土压力比理论计算的垂直土压力大,其原因可能与砂砾土填料中大粒径的颗粒挤压造成应力集中有关。但距墙面板同一距离不同高度的490[#]、2384[#]土压力盒得到的垂直土压力实测值均与计算值相差较大,除了应力集中外,还与这种连续满铺的土工格栅加筋土挡墙的垂直应力随距离墙面的距离增加而增加有关,理论分析也得出相同的结论^[9]。实测的同一高度不同位置的垂直土压力有一定的差异,因此,对垂直土压力进行计算时,采用应力扩散法是不合适的^[10]。

4.3 拉筋变形分析

由上述垂直土压力的实测结果可知,由于同一水

平面上垂直土压力分布的不均匀性,同一层土工格栅上不同位置处的摩擦力是不同的,反映在土工格栅的受力变形上,同一层土工格栅的变形是不同的。

图5为距面板不同距离B层土工格栅变形随时间的变化曲线,从中可看出,距墙面板2.40 m和5.10 m处测点土工格栅的变形在整个观测期均大于其他处测点土工格栅的变形。填筑完成进入运营期后,除距墙面板2.40 m及5.10 m两处土工格栅的变形增加外,其他测点土工格栅的变形均有所下降。总体上看,列车运营后对土工格栅变形产生的影响较小,即列车荷载对加筋土挡墙中的土工格栅的受力影响较小,只是引起加筋土挡墙内部土体的应力重新分配,土工格栅各部分受力变形得到了新的调整。

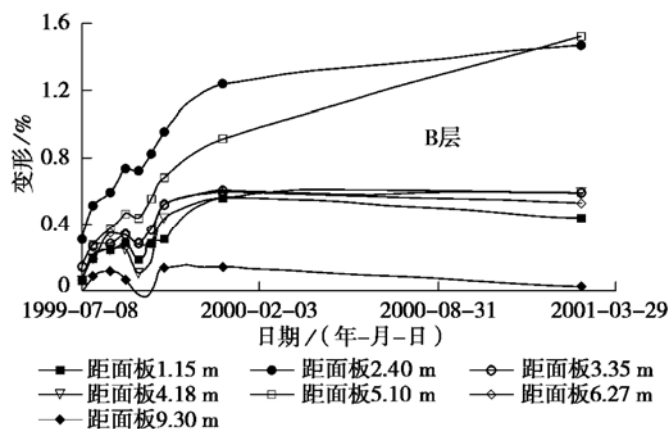


图5 距面板不同距离土工格栅变形随时间变化曲线

Fig. 5 Time curves of the deformation of geogrid

图6为挡土墙土工格栅变形随墙高荷载变化曲线。由图6可知,在填筑施工中,土工格栅的受力变形随着其上填筑荷载的增大而增加,除少数测点外,各层土工格栅的各个测点受力变形的分布规律大致保持不变。但各层土工格栅受力变形的分布规律并不相同,有的差异还较大。

除下墙的A层仅2个测点反映不出双峰值外,其他各层土工格栅的受力变形大致出现两个峰值,但峰值出现的位置并不完全一致。上墙D层土工格栅变形的峰值出现在距墙面板1.20及3.80 m处,E层受力变形的峰值出现在距墙面板1.59及5.55 m处,F层变形的峰值出现在距墙面板1.24及5.55 m处,其最大值为1.81%,出现在F层离墙面板最近的测点处。

下墙B层土工格栅的受力变形具有典型的双峰值特征,其峰值分别出现在距墙面板2.40和5.10 m处,A层土工格栅受力变形的峰值出现在距墙面板1.25 m处,C层土工格栅的受力变形的峰值分别出现在距面板1.20及3.35 m处。下墙土工格栅受力变形的峰值最大为1.47%,这种加筋材料受力变形的双峰值现象在钢筋混凝土楔形拉筋加筋土挡墙中也曾观测到^[11]。

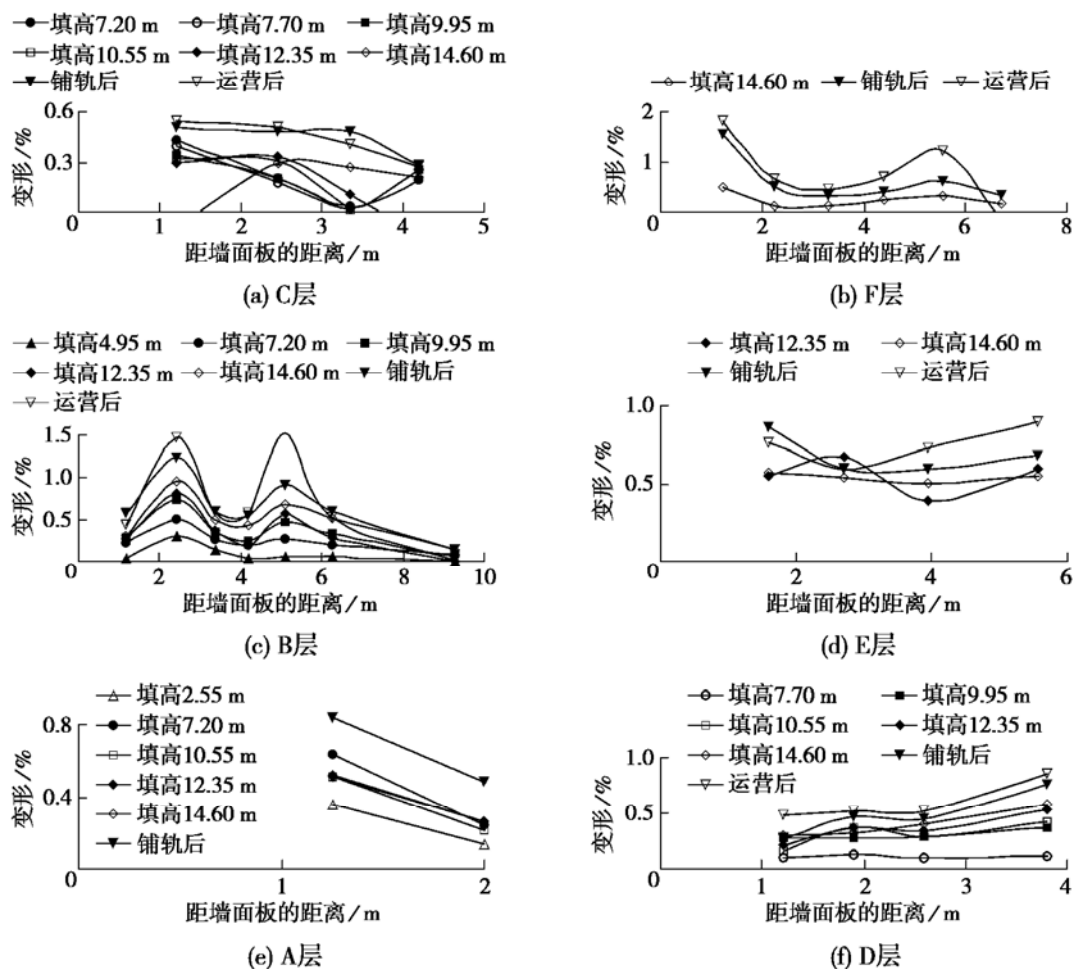


图6 挡土墙土工格栅变形随填高荷载变化曲线

Fig. 6 Variation of the deformation of the geogrid with load

从上述分析可知,土工格栅的受力变形最大值为1.81%,小于按照规范得出的2%的设计延伸率^[12],且大部分测点土工格栅的变形在1%以内,具有一定的安全度,因此,挡墙是安全稳定的。

4.4 双级土工格栅加筋土挡墙破裂面的确定

国内外学者对加筋土挡墙的破裂面进行了大量研究。Schlosser 和 Segrestin 等研究认为加筋土挡墙破裂面为一对数螺旋线^[13~15]。为了工程应用的方便,国内外研究者认为破裂面可简化为上部平行于墙面(距面板 $0.3H$, H 为墙高)、下部通过墙脚(与水平面夹角为 $45^\circ + \varphi/2$)的两段折线。《铁路路基支挡结构设计规范》即采用上述简化的两段折线的破裂面,两段的分界点为墙高的中点^[6]。

对于双级土工格栅加筋土挡墙,其破裂面的研究成果尚不多见。图7为实测土工格栅受力变形的峰值沿墙高的分布及 Rankine 理论计算曲线。从图中可知,破裂面沿墙高近似为一直线,其相关系数为0.989,直线与水平面的夹角为 65.0° ,而通常认为下段折线与水平面夹角为 $45^\circ + \varphi/2$,对应文中为 62.5° ,拟合曲线得到的值与此值是很接近的。

从图7中拟合曲线来看,下墙的破裂面拟合程度

很好,上墙的拟合程度稍差一些;但如果用 $0.3H$ 法进行拟合,效果更差。因此,从本次试验实测得到的破裂面可近似为一与水平面成 $45^\circ + \varphi/2$ 角且通过墙脚的直线。这个破裂面更接近 Rankine 理论的破裂面。Mitchell 和 Villet(1987) 也认为,对用具有较大延伸率的土工合成材料作加筋材料的加筋土挡墙,其破裂面更接近 Rankine 理论的破裂面^[16]。

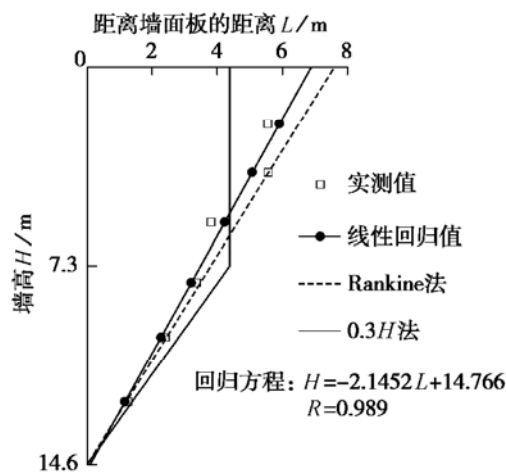


图7 土工格栅变形峰值沿墙高分布曲线

Fig. 7 Distribution of the peak value of the deformation of the geogrid along the wall

文献[1]提到加筋土挡墙计算理论分两大类,对于适用锚定结构理论机理的加筋土结构,其破裂面更接近 Rankine 理论的破裂面。

研究表明,若不是以拉筋的强度(断裂)而是以拉筋的位移(拔出)来控制加筋体的破裂,则破裂面很接近 Rankine 理论破裂面^[9]。文献[9]指出,从工程实践出发,对于高度在 8 m 以内的墙采用 0.3H 的折线破裂面作为抗拔稳定计算是可行的;对于高墙(15 m 以上),原则上还是以采用 Rankine 破裂面为妥。

图 7 中拟合曲线与坐标横轴的交点于 6.88 m 处,若考虑上墙的面板距下墙面板有 2.5 m 的平台,用 6.88 m 减去平台宽 2.5 m 得 4.38 m,该值除以整个墙高为 0.30,即拟合曲线得到的破裂面与上墙顶面的交点距上墙面板为 0.30H (H 为整个墙高)。

综合上述的分析可认为,对于高达 14.60 m 的双级土工格栅加筋土挡墙,其破裂面为一与墙脚处水平面夹角呈 $45^\circ + \varphi/2$ 的直线,其下部通过墙脚,此直线与上墙交于扣除上、下墙之间的平台宽度的整个墙高 0.3 倍的地方。

5 结 论

(1) 挡土墙经受了列车运营荷载和两个雨季的考验,现场原型试验均表明加筋土挡墙的受力完全满足结构的使用要求,结构物外形平整、变形很小,内部受力趋于稳定,充分说明该工程设计合理,结构可靠,施工质量良好。

(2) 上墙大部分的实测水平土压力接近 Rankine 理论计算值,接近下墙处土压力逐渐减少,而不是一般单级挡墙水平土压力的增大规律。下墙大部分的实测水平土压力小于各理论计算值,无论是把上墙填料产生的荷载按 Boussinesq 理论还是把上、下墙当成整体来计算上墙对下墙产生的水平土压力,均与实测值差异较多,该问题需作进一步的研究。

(3) 实测的垂直土压力结果表明,同一高度不同位置的土压力有一定的差异,垂直土压力随距离墙面的距离增加而增加。因此,对垂直土压力进行计算时,采用应力扩散法是不合适的。

(4) 由于同一层土工格栅不同位置的垂直土压力分布具有不均匀性,导致土工格栅所受的摩擦力不同而变形各异。土工格栅的受力变形具有双峰值特征,

第一个峰值靠近挡土墙面板,第二个峰值出现的位置与土工格栅所处的高度有关。列车荷载对加筋土挡墙中土工格栅的受力影响较小,只是引起加筋土挡墙内部土体应力的重新分配。土工格栅的变形较小,最大为 1.81%,小于设计值,且大部分测点土工格栅的变形在 1% 以内,因此其受力是安全的。

(5) 对于高达 14.60 m 的双级土工格栅加筋土挡墙,其破裂面为一与墙脚处水平面夹角为 $45^\circ + \varphi/2$ 的直线,其下部通过墙脚,此直线与上墙交于扣除上、下墙之间的平台宽度的整个墙高 0.3 倍的地方。

参加该项试验研究的还有铁四院周宏元、熊林敦、丁光文、李佳音、刘俯生、袁建国、陈明德等,在此对他们的辛勤工作一并表示衷心的感谢!

参考文献:

- [1] 刘成宇. 土力学[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1990. 239-240.
- [2] Schlosser F, Long N T. Recent result in French research on reinforced earth[J]. ASCE, 1974, 100(CO3): 223-237.
- [3] 法国加筋土设计规范[S]. 蒋现林译. 武汉: 铁道部第四勘测设计院, 1985.
- [4] 周宏元, 熊林敦, 等. 梅坎铁路双级土工格栅加筋土挡墙试验研究报告[R]. 武汉: 铁道第四勘察设计院, 2001.
- [5] 梁钟琪. 土力学及路基[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1986.
- [6] TB 10025-2001, 铁路路基支挡结构设计规范[S].
- [7] 何昌荣, 陈 群, 富海鹰. 两种支挡结构的实测和计算土压力[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(1): 55-60.
- [8] 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.
- [9] 欧阳仲春. 现代土工加筋技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 1991. 184-207.
- [10] JTJ 015-91, 公路加筋土工程设计规范[S].
- [11] 陈 群, 何昌荣. 一种新型楔形拉筋加筋土挡墙的原型观测[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(3): 289-293.
- [12] TB 10118-99, 铁路路基土工合成材料应用技术规范[S].
- [13] JTJ 015-91, 公路加筋土工程设计规范(条文说明)[S].
- [14] Lee I K, White W, Ingeles O G. 岩土工程[M]. 俞调梅, 等译. 北京: 中国建筑工业出版社, 1986. 299-303.
- [15] 铁道部第四勘测设计院科研所. 加筋土挡墙[M]. 北京: 人民交通出版社, 1985.
- [16] 叶书麟. 地基处理工程实例应用手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998. 552-574.