文章编号：1001-4632（2025）06-0067-10
引用格式：周先才，徐健楠，杨广庆，等．多雨丘陵地区铁路2级加筋格宾挡墙施工期力学行为现场试验[J]．中国铁道科学，2025，46(6)：67-76.
Citation：ZHOU Xiancai，XU Jiannan，YANG Guangqing，et al. Field Test of Mechanical Behavior of Two-Tier Reinforced Gabion Retaining Wall for Railway Construction in Rainy Hilly Areas [J]. China Railway Science，2025，46 (6)：67-76.

多雨丘陵地区铁路2级加筋格宾挡墙施工期力学行为现场试验

周先才[1]，徐健楠[1]，杨广庆[2]，周诗广[3]，孟潇康[2]，王 贺[2]

（1. 中铁工程设计咨询集团有限公司，北京 100055；
2. 石家庄铁道大学 土木工程学院，河北 石家庄 050043；
3. 中国铁道学会，北京 100844）

摘 要：为研究多雨丘陵地区铁路2级加筋格宾挡墙施工期的力学行为，开展现场试验，对结构变形、挡墙内土压力、筋材应变进行分析。结果表明：抗滑桩顶部、上下级墙面和非加筋区土体水平位移随时间逐渐增大，而后趋于稳定，上下级墙面和非加筋区土体水平位移沿墙高从下到上呈近似线性增大趋势，非加筋区土体水平位移比加筋区土体大；挡墙基底、下级墙顶和上级墙顶沉降随时间逐渐增大，而后趋于稳定，静置期间加筋土区域的压缩变形比非加筋土区域小，沿水平方向距墙面越远沉降越大；上下级墙底实测竖向土压力比理论计算土体自重小，而水平土压力的实测值与理论计算值相比，作用于上级墙面板的为上大下小，作用于下级墙面板的则大幅减小，作用于加筋土体背面（各层加筋材料末端连线形成的截面）的水平土压力在上级墙范围内接近静止土压力计算值，在下级墙范围内比静止土压力大幅减小；土工格栅最大应变为0.7%，实测潜在破裂面接近于采用美国联邦公路局对加筋土挡墙设计方法的预测，在雨季时结构变形和挡墙内土压力出现小幅增长，土工格栅应变则稍有减小。

关键词：铁路；2级加筋格宾挡墙；抗滑桩；力学行为；现场试验
中图分类号：U213.152.3；TU411.3 **文献标识码**：A **doi**：10.3969/j.issn.1001-4632.2025.06.07

随着生态环保理念的深化与工程安全需求的提升，加筋土挡墙因其具有节约占地、生态环保以及良好稳定性的优势，越来越多地应用于交通基础设施填方工程建设中。传统加筋土挡墙的结构型式主要为预制混凝土模块式面板加筋土挡墙、包裹式墙面加筋土挡墙。近年来，新型整体刚性面板加筋土挡墙也在成昆铁路成功应用[1]。加筋格宾挡墙作为一种结合了加筋土技术和格宾挡墙优点的土工结构，因其具有透水性优良、施工便捷、生态友好等优势，成为复杂地形条件下填方工程建设的理想选择，逐渐在河道整治、公路边坡、铁路路基等工程中得到广泛应用。

在加筋格宾挡墙结构性能研究方面，Lin等[2]对格宾网箱双绞合钢丝网拉伸性能进行了研究，发现钢丝网应力-应变曲线呈S形，具有明显的锯齿状特征，曲线可分为网格变形、钢丝拉伸、整体屈服和钢丝断裂4个阶段。Chirdeep等[3]对分别以土、石为填充材料的加筋格宾挡墙在侧向荷载作用下的受力性能进行研究，结果表明与土笼墙相比，石笼墙的抗变形能力提高了30%～40%。Ye等[4]通过对加筋格宾煤矸石挡墙的研究表明，在后退的墙面石笼卸载效应下，墙面附近的垂直土压力较低，墙后的侧向土压力小于静止土压力。葛允雷等[5]通过加筋格宾挡墙的现场试验和数值模拟研究发现，挡墙潜在破裂面位置为离挡墙0.34H到0.6H区段内（H为第1级边坡高度），加筋处理后

收稿日期：2025-05-07；修订日期：2025-08-29
基金项目：国家重点研发计划项目（2022YFE0104600）；国家自然科学基金资助项目（52079078）
第一作者：周先才（1974—），男，浙江江山人，正高级工程师。E-mail：tsyzxc@163.com
通讯作者：王 贺（1987—），男，河北石家庄人，副教授，博士研究生导师。E-mail：wanghe@stdu.edu.cn

边坡的安全系数为1.28，挡墙侧向变形呈中间大两侧小的外鼓曲线分布。浆砌块石面板加筋土挡墙与加筋格宾挡墙有着相似的结构型式，靳静等[6]通过对承德机场高40.1 m分为8级的浆砌块石面板加筋土高挡墙的现场试验研究发现，沿筋材长度方向墙后垂直土压力最大值靠近筋材中后部，筋材应变很小且呈双峰值分布。

在加筋格宾挡墙抗震性能方面，国内外学者通过振动台模型试验进行了研究。孟亚等[7]对比分析了土工袋和格宾笼护坡的加筋土边坡抗震性能，发现格宾笼护坡的加筋土边坡具有更小的峰值位移和筋材轴力，而坡顶沉降相对较大，二者均具有良好的抗震性能。Yue等[8]发现加筋格宾挡墙的固有频率与输入地震波的幅值之间存在逆相关关系，即随着地震波幅值的增加，固有频率下降；峰值加速度放大因子均小于1.9，表明其具有较好的能量耗散能力。李思汉等[9]对土工格栅和格宾网双重加筋的加筋格宾挡墙的研究发现，土工格栅提供的拉力远大于格宾网，占总筋材拉力的76%～92%，筋土界面摩擦因数最大值仅为0.11，远小于规范建议值0.3～0.4。对于加筋格宾挡墙抗震设计，蔡晓光等[10]对复合式格宾土工格栅加筋土挡墙的自振频率计算方法进行对比分析，发现伍永胜的方法[11]与实测值最为契合，而Ghanbari的方法[12]在参数变化时表现出更强的适应性。

在实际工程应用方面，加筋格宾挡墙在复杂地质条件下表现出色，特别是在高填方路基和陡边坡环境中，能够有效提高路基的稳定性和安全性[13]。加筋格宾挡墙具有抗变形能力强、生态效果好、实现墙面快速排水等特点，不仅能适应地基土的不均匀变形，还能迅速降低路基土的孔隙水压力，保持土体强度，降低结构崩溃的风险，实现了绿色公路的建设目标[14－15]。白龙威等[16]、龙祖惠等[17]通过数值模拟对加筋格宾挡土墙施工期力学特性进行了研究，发现墙面位移为鼓胀形分布，土工格栅应变沿长度方向呈先增后减的分布趋势。

在加筋格宾挡墙经济与环保特性方面，欧冬等[18]通过滨海路基工程，对加筋格宾挡墙与片石混凝土挡土墙进行了对比，发现加筋格宾挡墙造价减少约20%，施工效率提升了1到2倍，适用于地质条件较不理想的生态敏感地区，适用范围广。Morsy等[19]对加筋格宾挡墙的生态效益和环境影响进行了研究，通过生命周期评估方法，比较了加筋格宾挡墙与其他4种传统挡墙（混凝土重力式挡土墙、钢筋混凝土悬臂式挡土墙、砖石挡土墙和石灰石格宾挡土墙）的环境影响，结果表明加筋格宾挡墙在可持续发展目标方面表现出色，特别是在减少水泥使用和降低二氧化碳排放方面。

综上所述，近年来国内外学者通过试验、数值模拟和理论分析等手段，对加筋格宾挡墙进行了研究，涵盖了结构性能、抗震性能、工程应用、生态和环境效益等多个方面。加筋格宾挡墙不仅具备良好的结构稳定性和抗震性能，还在环境保护和生态效益方面表现出色。对于加筋格宾挡墙而言，其墙面陡、位于地势起伏较大地区的挡墙高度高，依靠筋土间相互摩擦作用、筋材与墙面的连接维持稳定，但施工期挡墙填土、筋材均暴露于外界环境中，受机械荷载、外界环境的影响较大。然而，目前对于在复杂地质和环境条件影响下高陡加筋格宾挡墙实体工程施工期力学行为的研究较少。基于此，本研究以位于宜昌市夷陵区龙泉镇的新建沪渝蓉高速铁路宜昌北动车所两级加筋格宾挡墙实体工程为依托，对复杂地质和环境条件影响下的两级加筋格宾挡墙施工期力学行为进行现场试验研究，为加筋格宾挡墙的设计、施工、质量控制提供重要参考，促进加筋格宾挡墙在铁路工程中的推广和应用。

1 工程概况

1.1 水文地质情况

新建沪渝蓉高速铁路宜昌北动车所两级加筋格宾挡墙位于宜昌市夷陵区龙泉镇，处于宜昌市区东北部，属剥蚀丘陵区，地势起伏最大相对高差约80 m，基本地震动峰值加速度为0.05g。加筋格宾挡墙施工现场如图1所示，加筋格宾挡墙全长88 m，最大高度为15.32 m，最大级数为2级，处于斜坡地段，横坡坡率为1∶3～1∶2。试验断面所处位置原地层从上到下分别为：①全风化砂岩夹泥岩，厚1.0～1.5 m，承载力200 kPa；②强风化砂岩夹泥岩，厚1.5～2.0 m，承载力350 kPa；③弱风化砂岩夹泥岩，厚度大于15 m，承载力450 kPa。

加筋格宾挡墙填筑期间降雨量如图2所示。工程所在地区雨季为每年5月至9月，降水量较大且集中。

1.2 试验断面设计

1）结构

试验断面加筋格宾挡墙总高度H=15.9 m，设



（a）挡墙墙面　　（b）格栅铺设

图1　加筋格宾挡墙现场照片

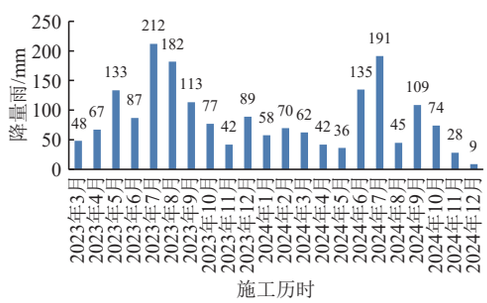
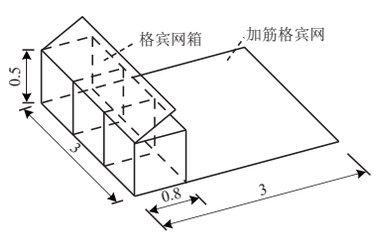


图2　加筋格宾挡墙施工期降雨量

2级墙，下级墙高 H_1=7.12 m，上级墙高 H_2=8.78 m，平台宽 D=3 m，路肩外8.3 m处设桩板墙，桩截面2.25 m×2.5 m，桩长16 m，悬臂段长8 m，桩身采用C35钢筋混凝土现场浇筑，地面以上设桩间挡土板，挡土板采用C40钢筋混凝土预制槽形板。加筋材料采用2种规格的高韧性聚酯纱线集束格栅，上级墙采用B型，铺设长度8.0 m；下级墙采用C型，铺设长度11.0 m，格栅竖向间距为0.5 m。每层土工格栅压设于格宾网箱下。挖除表层全风化和强风化土层后，以弱风化砂岩夹泥岩作为地基，承载力满足要求。

2）墙面

墙面由格宾网箱填充石料后组装而成，格宾网箱由格宾网组成，格宾网为六边形双绞合钢丝网，加筋格宾单元如图3所示。格宾网网面拉伸强度为45.6 kN·m^{-1}，网面翻边强度为36.6 kN·m^{-1}，C型钉最小拉开拉力值不小于2 kN。格宾网箱由块石填充，石料粒径为100～300 mm，空隙率不超30%。



（a）格宾网箱尺寸



（b）格宾与格栅相对位置

图3　加筋格宾单元示意图（单位：m）

3）填料

填料采用碎石类土，经试验确定其物理力学指标见表1。

表1　填料物理力学指标

最大干密度/(g·cm^{-3})	最优含水率/%	内摩擦角 φ/(°)	黏聚力 c/kPa	不均匀系数	曲率系数
2.1	8.0	30.4	10.3	60	0.1

4）加筋材料

2种规格高韧性聚酯纱线集束格栅物理力学特性见表2。

表2　高韧性聚酯纱线集束格栅物理力学特性

型号	横肋间距/m	抗拉强度/(kN·m^{-1})	特定应变时拉伸强度/(kN·m^{-1})		峰值应变/%
			2%	5%	
B型	1	164.9	33.4	84.5	8.3
C型	1	234.0	44.4	112.8	8.6

2　试验方案

加筋格宾挡墙施工过程包括了填筑期和填筑完成后的静置期2个阶段，期间经历了2个雨季。施工进度如图4所示。单层填料压实厚度25 cm，压实度≥93%。

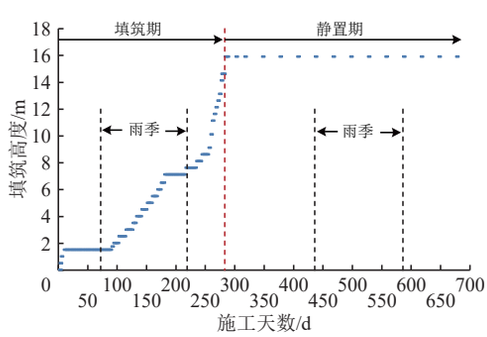


图4　加筋格宾挡墙填筑进度

试验采用的监测传感器包括土压力计、柔性位移计、沉降计和测斜仪。监测数据包括土压力、加

筋材料变形、墙顶沉降、墙面和非加筋区土体水平位移。监测传感器布置如图5所示。

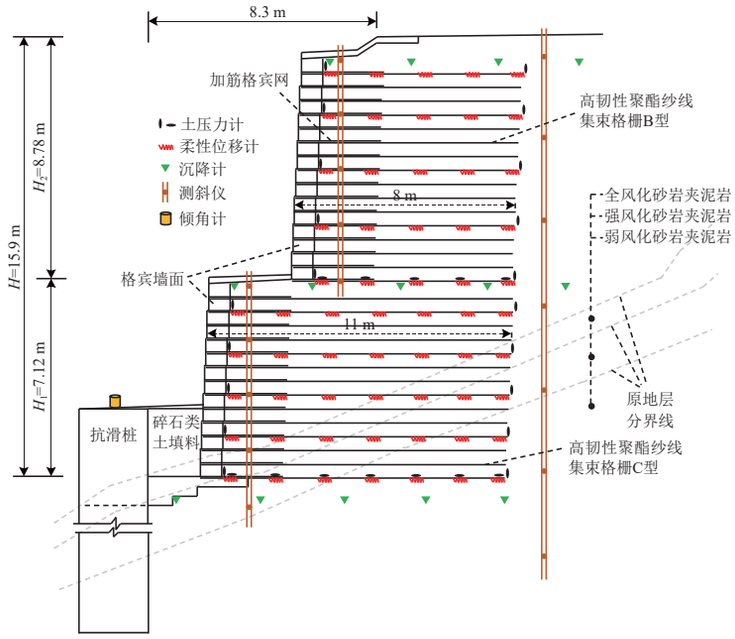


图5 监测传感器布置

3 试验结果

3.1 变形

图6—图9分别为施工期挡墙抗滑桩、下级墙面、上级墙面、非加筋区土体水平位移随时间变化曲线，图中h为墙高。由图可得如下结果。

（1）由于测斜仪是在填筑完成后安装，因此填筑期只有下级墙面水平位移监测数据。分析可知，填筑期下级墙面各监测点处水平位移均呈线性增长，最大水平位移为2.3 mm（0.032%H_1）。

（2）静置期，抗滑桩顶部、上下级墙面、非加筋区土体水平位移均随时间而逐渐增大并趋于稳定；下级墙高5 m以上墙面水平位移增长速率较为一致，说明上级墙自重荷载引起的下级墙内应力从墙脚沿约（90°−φ）的角度扩散，主要影响下级墙高5 m以下的墙面；上级墙不受外荷载的影响，顶部水平位移增长速率最快。

（3）静置期雨季时，由于降雨量大引起填料含水率增加，使挡墙各部位水平位移均发生波动，出现小幅增速上扬态势。

（4）沿墙高方向，上下级墙面、非加筋区土体水平位移均呈现从低到高逐渐增大的趋势，近似线性分布；非加筋区土体水平位移比加筋区土体大，主要是由于加筋区加筋作用使土体水平模量增大的缘故。

图10为以填筑完成后第13个月数据为代表的挡墙下级墙面、上级墙面、非加筋区土体水平位移沿墙高的分布情况。由图10可得如下结果。

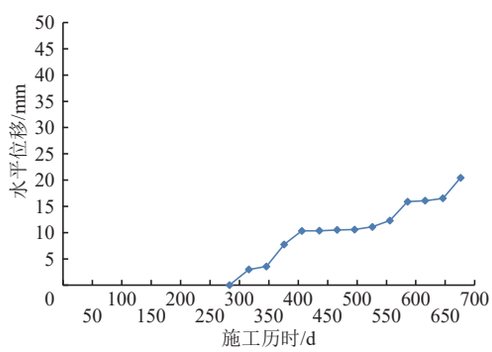


图6 施工期抗滑桩顶水平位移随时间变化曲线

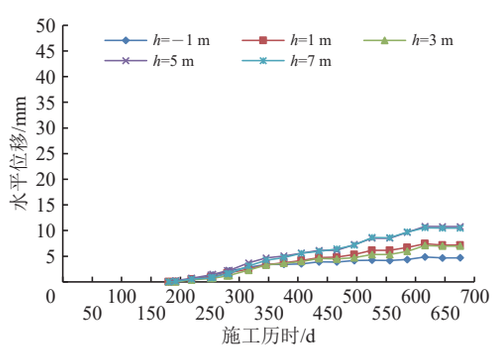


图7 施工期下级墙面水平位移随时间变化曲线

（1）由于埋设监测传感器的时间不同，因此只有下级墙面水平位移包含上级墙填筑期和整体静置期2个阶段的数据。下级墙面水平位移沿墙高的分布为底部小顶部大；在上级墙填筑期，上级墙荷载

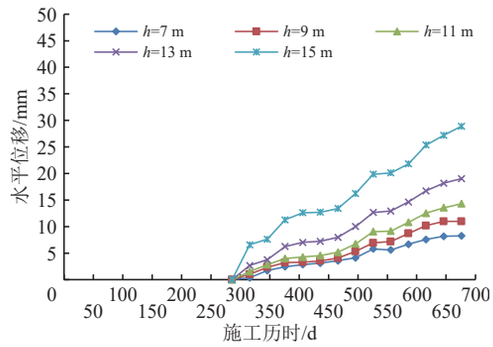


图 8　施工期上级墙面水平位移随时间变化曲线

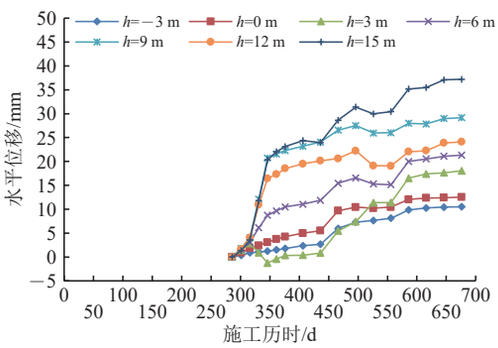


图 9　施工期非加筋区土体水平位移随时间变化曲线

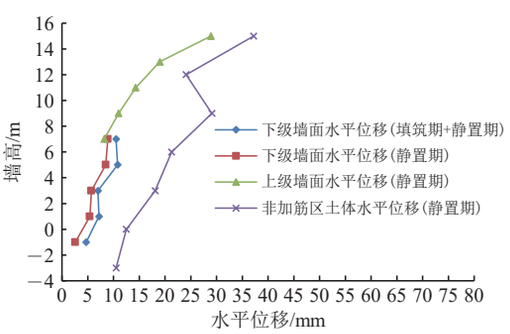


图 10　施工期挡墙各部位水平位移沿墙高分布

对下级墙面水平位移的影响很小（最大位移仅为 2.3 mm）且沿墙高相差不大，水平位移的增长主要在静置期，说明施工荷载对下级墙面水平位移的影响很小，影响主要来自上级墙自重荷载。

（2）从施工开始至填筑完成后第 13 个月，挡墙各部位发生的最大水平位移分别为抗滑桩顶部 20.44 mm（桩长的 0.13%）、下级墙面 10.8 mm（0.15%H_1）、上级墙面 28.9 mm（0.33%H_2）、非加筋区土体 37.2 mm（0.23%H）。

图 11—图 13 分别为施工期挡墙基底、下级墙顶、上级墙顶沉降随时间变化曲线，图 14 为以填筑完成后第 13 个月数据为代表的挡墙基底、下级墙顶、上级墙顶沉降沿水平方向上的分布情况。由图 11—图 14 可得如下结果。

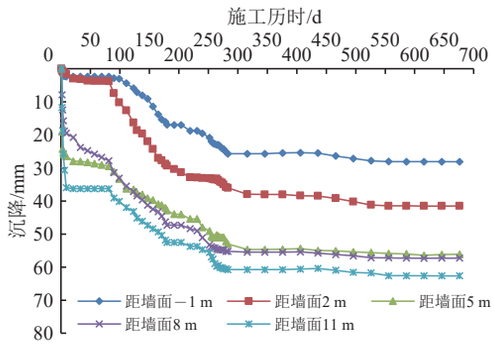


图 11　施工期基底沉降随时间变化曲线

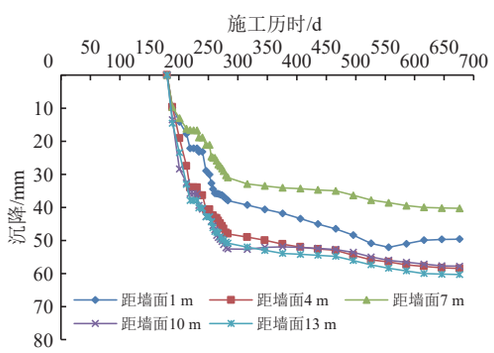


图 12　施工期下级墙顶沉降随时间变化曲线

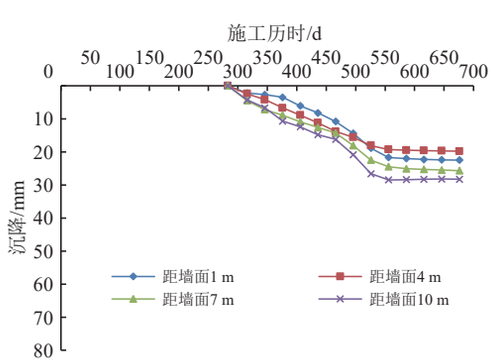


图 13　施工期上级墙顶沉降随时间变化曲线

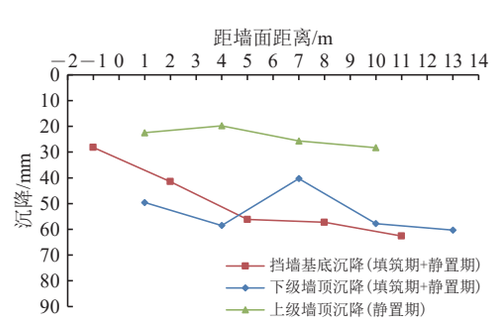


图 14　施工期挡墙各部位沉降沿水平方向分布

（1）填筑期：基底和下级墙顶沉降均随着填筑高度的增加而逐渐增大，增长速率逐渐减小；基底平均沉降为 46.2 mm，下级墙顶平均沉降为 44.1 mm。

（2）填筑期雨季：由降雨引起的填料含水率增加，使基底和下级墙顶沉降呈线性增长，比非雨

季时期增长速率大，尤其下级墙顶；雨季发生的平均沉降占填筑期平均沉降的43.5%（基底）、66.4%（下级墙顶）。

（3）静置期：基底沉降基本稳定，下级墙顶沉降稍有增长后逐渐稳定，上级墙顶沉降发生明显增长后逐渐稳定；静置期平均沉降由小到大依次为基底、下级墙顶、上级墙顶，其平均值分别为3.0，9.2和24.1 mm。

（4）静置期雨季：由于降雨量大引起填料含水率增加，使挡墙各部位沉降均发生了波动，雨季发生的平均沉降占静置期平均沉降的比例较高，分别为70%（基底）、53.3%（下级墙顶）、50.2%（上级墙顶）。

（5）静置期：挡墙本体发生了压缩变形，加筋土区域和非加筋土区域压缩变形量不同；对于加筋土区域的平均压缩变形，下级墙为5.9 mm，上级墙为13.5 mm；对于非加筋土区域平均压缩变形，下级墙为7.6 mm，上级墙为18.8 mm，可见加筋作用对于挡墙本体压缩变形的减小具有明显效果，减小了约26%的变形。

（6）在水平方向上，由于受到水平变形的影响，挡墙各部位沉降基本呈距墙面越远沉降越大的分布趋势。

3.2 土压力

图15和图16分别为上下级墙底竖向土压力随时间变化曲线，图17为以填筑完成后第13个月数据为代表的上下级墙底竖向土压力沿水平方向的分布曲线。由图15—图17可得如下结果。

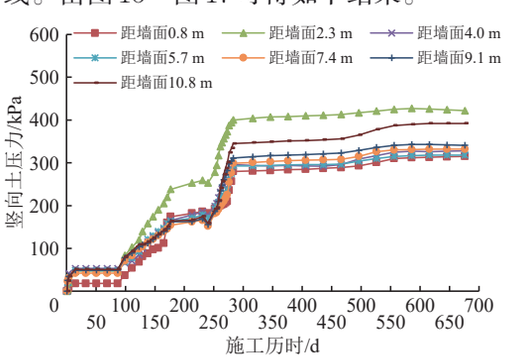


图15 下级墙底竖向土压力随时间变化曲线

（1）随着挡墙填筑高度的增加，每级墙底竖向土压力呈线性增长趋势，填筑完成后趋向于稳定。

（2）上下级墙底实测竖向土压力平均值分别为356.0（下级墙底）、185.0 kPa（上级墙底）；理论计算土体自重分别为360.6（下级墙底）、199.1 kPa（上级墙底）。虽然降雨使土体自重增加，但受加筋承托作用影响，实测值仍比理论计算值小。

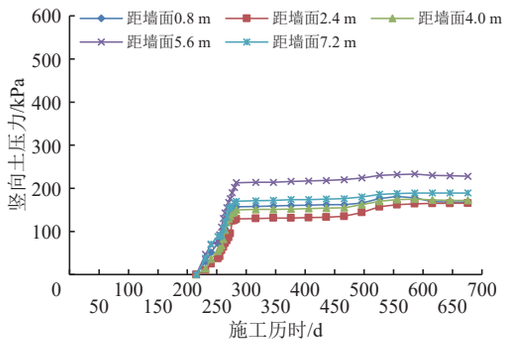


图16 上级墙底竖向土压力随时间变化曲线

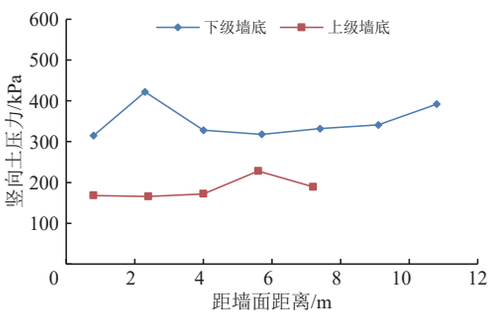


图17 上下级墙底竖向土压力在水平方向分布

（3）在静置期雨季，由于降雨量大引起填料含水率增加，使上下级墙底竖向土压力均发生小幅增长，平均增幅分别为25（下级墙底）、19 kPa（上级墙底），占静置期土压力总增量的79.9%和99.8%。

（4）在水平方向上，上下级墙底竖向土压力均呈非线性分布，受斜坡地段挡墙地基差异沉降及整体转动趋势的影响，使下级墙底在靠近墙面处竖向土压力偏大。上下级墙筋材尾部竖向土压力偏大主要是由于非加筋土体的影响。

图18—图21分别为上下级墙面板和加筋土体背面受到的水平土压力随时间变化曲线，图22为填筑完成后第13个月时上下级墙面板和加筋土体背面受到的水平土压力沿墙高的分布曲线。由图18—图22可得如下结果。

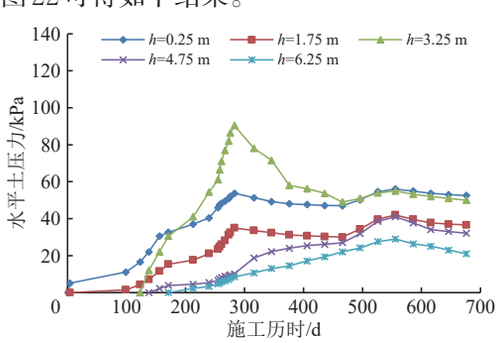


图18 下级墙面板背面水平土压力随时间变化曲线

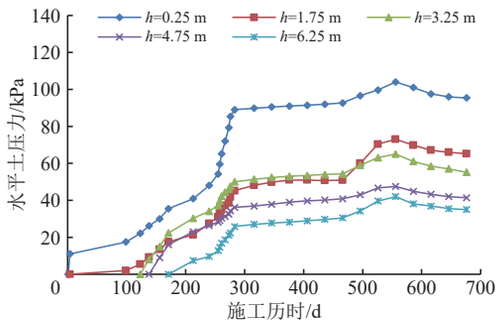


图 19　下级墙加筋土体背面水平土压力随时间变化曲线

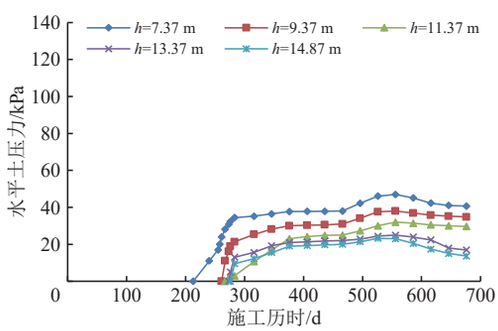


图 20　上级墙面板背面水平土压力随时间变化曲线

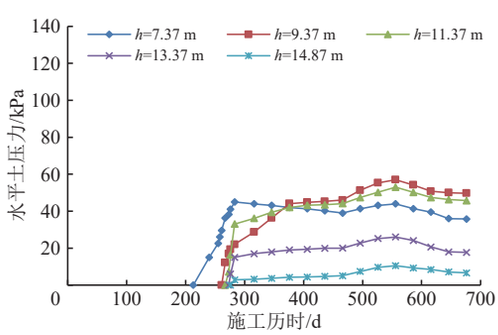


图 21　上级墙加筋土体背面水平土压力随时间变化曲线

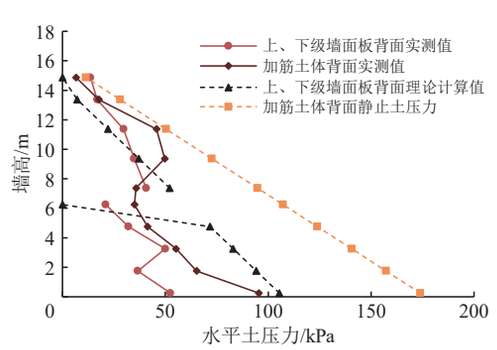


图 22　面板和加筋土体背面水平土压力沿墙高分布

（1）随着挡墙填筑高度的增加，面板和加筋土体背面水平土压力呈线性增长趋势，填筑完成后趋向于稳定；由于上级墙自重荷载引起的下级墙内应力从墙脚沿约（90°－φ）的角度扩散，因此下级墙 h=4.75 m以上的面板背面受到的水平土压力变化较小，而 h=4.75 m以下水平土压力变化较大。

（2）在静置期雨季，由于降雨量大引起填料含水率增加，使各部位水平土压力均发生小幅增长。

（3）在挡墙高度方向上，上下级墙面板和加筋土体背面水平土压力从高到低逐渐增大；加筋土体背面水平土压力比上下级墙面板背面水平土压力偏大。将实测值与采用FHWA加筋土挡墙设计规范推荐的方法得到的水平土压力计算值对比，上级墙面板处呈现上大下小的趋势，下级墙面板处比计算值大幅减小，主要与格宾面板具有一定自重有关。对于加筋土体背面水平土压力，上级墙更接近静止土压力计算值，下级墙比朗肯主动土压力和静止土压力都小。

3.3　土工格栅应变

图23和图24分别为沿水平方向上下级墙加筋体中部位置处各层土工格栅应变随时间变化曲线。由图可得如下结果。

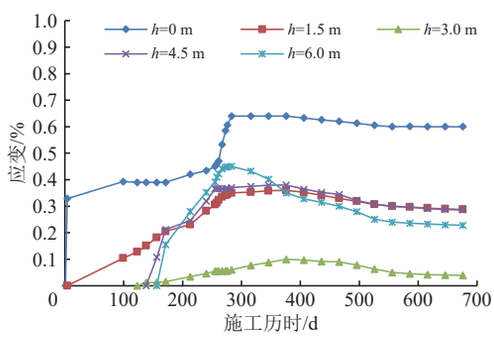


图 23　下级墙距墙面 5.7 m 处各层土工格栅应变随时间变化曲线

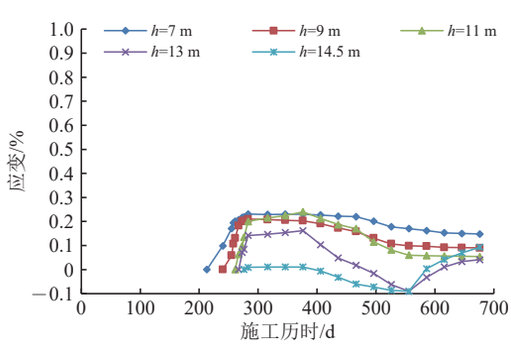


图 24　上级墙距墙面 4.0 m 处各层土工格栅应变随时间变化曲线

（1）在土工格栅铺设完成后的早期填筑阶段，由于压实的影响，其应变增长较快，很快便趋于稳定。至填筑完成后第13个月时，土工格栅应变基本稳定，最大为0.7%，出现于挡墙底部墙脚处。

（2）在静置期雨季，土工格栅应变稍有减小，之后又趋于稳定。其主要原因在于：①雨水入渗使得填料含水率增大，筋土之间及土颗粒之间摩擦作

用减弱，被拉伸的土工格栅发生较小回弹，挡墙上部受雨水入渗影响较为明显，因此该部位土工格栅应变减小稍多；②有抗滑桩支撑且自重较大的加筋格宾墙面系统自身稳定性好、变形小，而填土区域（尤其非加筋土区域）因受斜坡地段地形和多雨环境的影响发生的变形（包括沉降和水平变形）相对于墙面偏大，从而引起填土区域的挤压变形。

图25为填筑完成后第13个月时各层土工格栅应变在水平方向上的分布情况。基于各层土工格栅累积应变沿水平方向的分布曲线，对挡墙潜在破裂面位置进行预测，同时根据FHWA加筋土挡墙设计方法（以下简称FHWA法），由于$(H_1+H_2)/20<D\leqslant H_2\tan(45^\circ-\varphi/2)$，对破裂面进行预测，如图26所示。

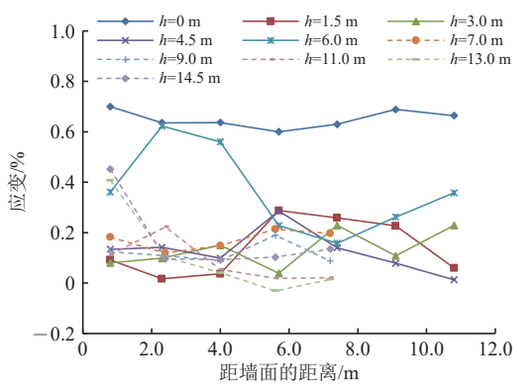


图25 各层土工格栅应变在水平方向分布

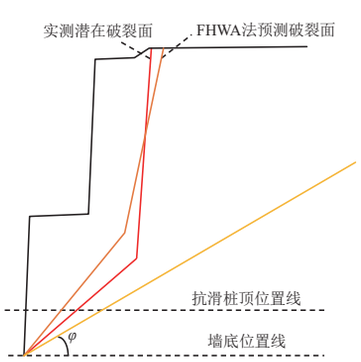


图26 挡墙破裂面预测

根据实测土工格栅应变推测潜在破裂面时注意：①不考虑位于与水平线成夹角φ的直线以下的位于稳定区的监测点数值；②不考虑靠近墙面的受面板和加筋土差异沉降影响的监测点数值。由图26可知：实测潜在破裂面与FHWA法预测破裂面较为接近，与FHWA法预测破裂面相比，由于受到抗滑桩作用的影响，实测潜在破裂面位于下级墙的部分距离墙面更远，位于上级墙的部分二者比较接近，说明抗滑桩的设置使挡墙整体更加稳定。

4 结 论

（1）水平变形方面，填筑期下级墙面水平位移线性增长，静置期，抗滑桩顶部、上下级墙面、非加筋区土体水平位移均随时间而逐渐增大并趋于稳定，雨季挡墙各部位水平位移出现小幅增长；沿墙高方向，上下级墙面、非加筋区土体水平位移均呈现从低到高逐渐增大的趋势，近似线性分布，非加筋区土体水平位移比加筋区土体大，施工过程对墙面水平位移的影响较小；从施工开始至填筑完成后第13个月，挡墙各部位发生的最大水平位移为抗滑桩顶部20.44 mm（桩长的0.13%）、下级墙面10.8 mm（0.15%H_1）、上级墙面28.89 mm（0.33%H_2）、非加筋区土体37.2 mm（0.23%H）。

（2）沉降方面，从施工开始至填筑完成后第13个月，挡墙基底、下级墙顶、上级墙顶沉降均随时间而逐渐增大而后趋于稳定，雨季时沉降发生波动；填筑期基底和下级墙顶平均沉降分别为46.2和44.1 mm，静置期基底、下级墙顶、上级墙顶平均沉降分别为3.0，9.2和24.1 mm；静置期挡墙发生了压缩变形，加筋土区域的压缩变形比非加筋土区域减小约26%；在水平方向上，挡墙各部位沉降基本呈距墙面越远沉降越大的分布趋势。

（3）竖向土压力方面，随着挡墙填筑高度的增加，每级墙底竖向土压力呈线性增长趋势，填筑完成后趋向于稳定，雨季时上下级墙底竖向土压力均发生小幅增长；上下级墙底实测竖向土压力比理论计算土体自重小；在水平方向上，上下级墙底竖向土压力均呈非线性分布，下级墙底在靠近墙面处竖向土压力偏大，上下级墙筋材尾部竖向土压力偏大。

（4）水平土压力方面，随着挡墙填筑高度的增加，面板和加筋土体背面水平土压力呈线性增长趋势，填筑完成后趋向于稳定，雨季时各部位水平土压力均发生小幅增长；在挡墙高度方向上，与理论计算值相比，实测值在上级墙面板处呈现上大下小的趋势，下级墙面板处大幅减小；对于加筋土体背面水平土压力，上级墙范围内更接近静止土压力计算值，下级墙范围内比朗肯主动土压力和静止土压力都小。

（5）土工格栅应变方面，填筑期土工格栅应变增长较快且很快趋于稳定，静置期雨季时土工格栅应变稍有减小。至填筑完成后第13个月时，土工格栅应变最大为0.7%。

（6）潜在破裂面方面，实测潜在破裂面与FH-

WA法预测破裂面较为接近，与FHWA法预测破裂面相比，实测潜在破裂面位于下级墙的部分距离墙面更远，位于上级墙的部分二者比较接近。

参　考　文　献

[1] 牛笑笛,杨广庆,周诗广,等.铁路新型整体刚性面板加筋土挡墙现场试验研究[J].中国铁道科学,2020,41(5):1-10.
(NIU Xiaodi, YANG Guangqing, ZHOU Shiguang, et al. Field Test Study on a New Type of Reinforced Earth Retaining Wall with Integral Rigid Face Slab for Railway [J]. China Railway Science, 2020, 41 (5): 1-10. in Chinese)

[2] LIN Y L, FANG P F, WANG X, et al. Experimental and Numerical Study on Tensile Behavior of Double-Twisted Hexagonal Gabion Wire Mesh [J]. Buildings, 2023, 13 (7): 1657.

[3] CHIRDEEP N R, BALAJI N C, JAIN R, et al. Studies on the Behavior of Gabion Wall Subjected to Lateral Monotonic Loading [J]. Lecture Notes in Civil Engineering, 2022, 162: 415-429.

[4] YE Z, QIAN H, LIU D, et al. Stability and Strengthening Measure of Coal Gangue Embankment Reinforced by Gabion [J]. Science Technology & Engineering, 2022, 22 (36): 16196-16202.

[5] 葛允雷,张帅,杨果林,等.退台式格宾加筋挡土墙现场测试及数值模拟分析[J].公路工程,2018,43(2):72-78.
(GE Yunlei, ZHANG Shuai, YANG Guolin, et al. Analysis between Numerical and Field Tests of Set-Back Gabion Box Reinforced Retaining Wall [J]. Highway Engineering, 2018, 43 (2): 72-78. in Chinese)

[6] 靳静,杨广庆,王志杰,等.多级加筋土高挡墙的工程特性及影响因素[J].中国铁道科学,2019,40(1):8-16.
(JIN Jing, YANG Guangqing, WANG Zhijie, et al. Engineering Characteristics and Influence Factors of Multi-Tiered Reinforced Soil High Retaining Wall [J]. China Railway Science, 2019, 40 (1): 8-16. in Chinese)

[7] 孟亚,徐超,杨阳,等.不同坡面形式加筋土边坡抗震性能的振动台试验研究[J].振动与冲击,2025,44(9):195-202.
(MENG Ya, XU Chao, YANG Yang, et al. Shaking Table Test Study on Aseismic Performance of Reinforced Soil Slopes with Different Slope Face Patterns [J]. Journal of Vibration and Shock, 2025, 44 (9): 195-202. in Chinese)

[8] YUE M, QU L M, ZHOU S G, et al. Dynamic Response Characteristics of Shaking Table Model Tests on the Gabion Reinforced Retaining Wall Slope under Seismic Action [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2024, 52 (2): 167-183.

[9] 李思汉,王学鹏,蔡晓光,等.地震作用下复合格宾土工格栅加筋土挡墙筋材受力分析[J].铁道科学与工程学报,2024,21(12):5030-5041.
(LI Sihan, WANG Xuepeng, CAI Xiaoguang, et al. Analysis of Reinforcement Force of Reinforced Soil Retaining Wall with Composite Gabion and Geogrid under Seismic Loading [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2024, 21 (12): 5030-5041. in Chinese)

[10] 蔡晓光,蔡博渊,李思汉,等.加筋土挡墙自振频率计算方法对比分析[J].长江科学院院报,2025,42(4):120-126.
(CAI Xiaoguang, CAI Boyuan, LI Sihan, et al. Comparative Analysis of Calculation Methods for Natural Frequency of Reinforced Soil Retaining Walls [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2025, 42 (4): 120-126. in Chinese)

[11] 伍永胜.加筋土挡墙动力特性及抗震设计方法研究[D].长沙:湖南大学,2006.
(WU Yongsheng. Study on Dynamic Characteristics and Seismic Design Method of Reinforced Earth Retaining Wall [D]. Changsha: Hunan University, 2006. in Chinese)

[12] GHANBARI A, HOOMAAN E, MOJALLAL M. An Analytical Method for Calculating the Natural Frequency of Retaining Walls [J]. International Journal of Civil Engineering, 2013, 11 (1): 1-9.

[13] 杨毅,王源,李军.加筋格宾挡墙在高填方路基边坡中的设计应用——以贵州省某道路边坡工程为例[J].中国资源综合利用,2025,43(7):127-130.
(YANG Yi, WANG Yuan, LI Jun. Design and Application of Reinforced Gabion Retaining Wall in High Fill Roadbed Slopes—Taking a Road Slope Project in Guizhou Province as an Example [J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2025, 43 (7): 127-130. in Chinese)

[14] 周君波.加筋格宾挡土墙加固高填方陡边坡路基施工技术应用[J].四川水利,2022(2):109-113,167.
(ZHOU Junbo. Application of Gabion Reinforced Soil Retaining Wall for High Fill Steep Slope Subgrade [J]. Sichuan Water Resources, 2022 (2): 109-113, 167. in Chinese)

[15] 刘长伟,刘敏捷,彭荟茹.超高加筋格宾挡墙在高速公路填方路基中的应用[J].建筑安全,2023,38(8):51-55.
(LIU Changwei, LIU Minjie, PENG Huiru. Application of Ultra-High Reinforced Gabion Retaining Wall in Subgrade of Expressway [J]. Construction Safety, 2023, 38 (8): 51-55. in Chinese)

[16] 白龙威,方鹏飞,洪灿程,等.加筋格宾组合式挡墙的施工力学特性研究[J].路基工程,2023(6):122-127.
(BAI Longwei, FANG Pengfei, HONG Cancheng, et al. Study on Mechanical Characteristics of Construction Process of Combined Reinforced Gabion Retaining Wall [J]. Subgrade Engineering, 2023 (6): 122-127. in Chinese)
[17] 龙祖惠,高文慧,何彬,等.施工条件下双级组合式绿色加筋格宾挡墙的工程特性研究[J].河南科技,2025,52(16):64-69.
(LONG Zuhui, GAO Wenhui, HE Bin, et al. Study on Construction Mechanical Properties of Two-Stage Combined Green Reinforced Gabion Retaining Wall [J]. Henan Science and Technology, 2025, 52 (16): 64-69. in Chinese)
[18] 欧冬,颜春,贺剑辉,等.加筋格宾挡墙在用地受限边坡防护中的应用[J].西部交通科技,2022(6):51-53.
(OU Dong, YAN Chun, HE Jianhui, et al. Application of Reinforced Gabion Retaining Wall for Slope Protection in Land Restricted Areas [J]. Western China Communications Science & Technology, 2022 (6): 51-53. in Chinese)
[19] MORSY K M, THAKEB H. Comparative Evaluation of the Environmental Impacts of Geosynthetic Mechanically Stabilized Earth Walls [J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 374 (Supplement C): 133912.

Field Test of Mechanical Behavior of Two-Tier Reinforced Gabion Retaining Wall for Railway Construction in Rainy Hilly Areas

ZHOU Xiancai[1], XU Jiannan[1], YANG Guangqing[2], ZHOU Shiguang[3], MENG Xiaokang[2], WANG He[2]

(1. China Railway Engineering Design and Consulting Group Co., Ltd., Beijing 100055, China;
2. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang Hebei 050043, China;
3. China Railway Society, Beijing 100844, China)

Abstract: To investigate the mechanical behavior of two-tier reinforced gabion retaining walls for railways in rainy hilly areas during construction, a field test was conducted to study the structural deformation, soil pressure in the wall, and reinforcement strain. Findings reveal that horizontal displacements at the anti-slide pile top, upper/lower-tier wall surfaces, and non-reinforced soil zone gradually increased and stabilized over time. Horizontal displacements of upper/lower-tier wall surfaces and non-reinforced soil zone showed approximate linear growth from bottom to top along the wall height, with non-reinforced soil zones exhibiting greater displacement than reinforced soil zone. Settlements at the wall base and the tops of lower-tier and upper-tier progressively increased then stabilized over time. Compression deformation in reinforced soil zone was smaller than that in non-reinforced soil zone during standing period, and settlement increased with horizontal distance from the wall face. Measured vertical soil pressures at the upper/lower-tier wall bases were lower than theoretical calculation values of soil self-weight. For horizontal soil pressure, the measured horizontal soil pressure acting on upper-tier wall panel were greater at the top and smaller at the bottom compared to theoretical values, while those on the lower wall panel were significantly reduced. Horizontal soil pressure acting on the back of reinforced soil zone (the section connecting ends of all reinforced layers) was close to the theoretical static soil pressure in the upper-tier wall, but substantially lower in the lower-tier wall. In terms of geogrid strain and potential failure surface, the maximum geogrid strain was 0.7%, and the measured potential failure surface was close to that predicted by the Federal Highway Administration (FHWA) design method for reinforced soil retaining wall. During rainy seasons, structural deformation and soil pressure showed slight increase, while the geogrid strain decreased slightly.

Key words: Railway; Two-tier reinforced gabion retaining wall; Anti-slide pile; Mechanical behavior; Field test

(责任编辑 王蕴嘉)