

组合支挡作用下桩板墙与悬臂式挡墙协同作用分析研究

雷子恒¹, 韩高孝¹, 郭智斌²

¹兰州交通大学, 甘肃 兰州

²兰州铁道设计院有限公司, 甘肃 兰州

收稿日期: 2022年2月26日; 录用日期: 2022年3月21日; 发布日期: 2022年3月28日

摘要

当路基帮宽受地形条件和建设用地等限制而无法实施时, 在路基边坡处增设桩板墙等支挡结构, 与既有结构相结合, 形成新型组合支挡结构, 可以很好地实现路基的帮宽, 既不占用新的建设用地, 又能够充分利用既有支挡结构。由于组合支挡结构的复杂性, 设计了相似比为1:25的路基边坡模型, 通过室内模型试验, 研究了竖向分级荷载作用下组合支挡结构的受力状态和变形特点。研究表明: 64 kPa等效荷载作用下, 桩身与悬臂墙位移变形比为7:1, 最大拉应力和最大弯矩分担比分别为1.67:1和3.77:1, 各级荷载下土压力的分担比均接近2:1, 既有悬臂墙支挡作用明显, 仍有较大的利用价值。

关键词

铁路路基, 受力变形分析, 模型试验, 组合支挡, 桩板墙, 悬臂式挡墙

Analysis and Research on the Synergy of Pile Sheet Wall and Cantilever Retaining Wall under the Action of Combined Retaining Wall

Ziheng Lei¹, Gaoxiao Han¹, Zhibin Guo²

¹Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou Gansu

²Lanzhou Railway Survey and Design Institute Co. Ltd., Lanzhou Gansu

Received: Feb. 26th, 2022; accepted: Mar. 21st, 2022; published: Mar. 28th, 2022

文章引用: 雷子恒, 韩高孝, 郭智斌. 组合支挡作用下桩板墙与悬臂式挡墙协同作用分析研究[J]. 土木工程, 2022, 11(3): 385-400. DOI: 10.12677/hjce.2022.113042

Abstract

When the subgrade widening cannot be implemented due to the limitations of topographic conditions and construction land, pile sheet wall and other retaining structures shall be added at the subgrade slope to form a new combined retaining structure combined with the existing structure, which can well realize the subgrade widening, not only do not occupy new construction land, but also make full use of the existing retaining structure. Due to the complexity of composite retaining structure, a subgrade slope model with similarity ratio of 1:25 is designed. Through indoor model test, the stress state and deformation characteristics of composite retaining structure under vertical graded load are studied. The results show that under the equivalent load of 64 kpa, the displacement deformation ratio of pile body and cantilever wall is 7:1, the sharing ratio of maximum tensile stress and maximum bending moment is 1.67:1 and 3.77:1 respectively, and the sharing ratio of earth pressure under various loads is close to 2:1. The existing cantilever wall has obvious retaining effect and still has great utilization value.

Keywords

Railway Subgrade, Stress and Deformation Analysis, Model Test, Combined Support, Pile Sheet Wall, Cantilever Retaining Wall

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着我国铁路快速发展,既有线改造及扩建项目日益增多。由于受到运营条件、地形和环境限制,在改扩建工程中会出现既有支挡结构与新建支挡结构并存且共同承担荷载的现象。

桩板墙是一种抗滑支挡结构,利用深埋入稳定地层的桩体与桩周岩土体的相互嵌制作用,将上部岩土体剩余下滑推力(或土压力)传递至稳定地层,利用稳定地层的锚固作用和被动抗力来保证岩土体整体稳定性[1]。

刘洋[2]通过桩板墙的受力与施工分析,得出桩板墙有抗滑桩和挡土墙的双重作用。张钦鹏、梁庆国、刘璐等人[3]在模型试验中对桩板墙有桩和无桩两种不同工况下的受力机理及变形情况,以及整体边坡的稳定性进行分析对比。蒲建军、梁庆国、刘璐等人[4]以 1/25 比例的室内模型试验,对比分析了在横向荷载作用下抗滑桩和桩板墙两种支护结构的受力特性和变形规律。张成武、豆红强、黄真萍等人[5]采用优化的卸荷拱模型计算了 T 型桩板墙挡土板的土压力。豆红强、孙永鑫、王浩等人[6]采用室内物理模型试验,研究了桩-板土压力的传力规律和特性。李梅和刘校[7]研究了改变桩间距和挡土板强度等参数时桩板墙加固边坡的加固效果和桩板结构各自的受力和变形规律等。李珠军、吴顺川、韩文涛[8]针对山区高速公路拓宽工程,提出了路肩式悬臂桩板墙的支护方案。梁桥、陈翔、周文权[9]探讨了两级垛式新型悬臂式挡墙的土压力计算方法。侯卫红和侯永峰[10]采用有限元法,在考虑挡墙与地基之间相互作用的情况下,得出了悬臂式挡墙墙背所受的剪力和弯矩,并将结果与朗金理论计算结果进行了对比。

综上所述,目前的研究主要针对单个支挡结构,组合支挡结构的研究处于起步阶段,研究成果较少,没有形成完整的体系化的研究成果。

2. 工程概况

中兰客专引入兰州枢纽新建三四线 DK7 + 831.755~DK10 + 133.64 段路基左线占用既有柳家营货线，右线在货线右侧边坡上帮填修建。为了保证新建帮填路基的稳定性，在货线右侧边坡范围内设置桩板墙。柳家营货线南邻兰新线相，北邻城市主干道，为避免占压城市主干道，货线已在右侧边坡坡脚处设置了桩板式、悬臂式、衡重式、L 型挡土墙进行收坡，与新建线路桩板墙组成了复合支挡结构，如图 1 所示。

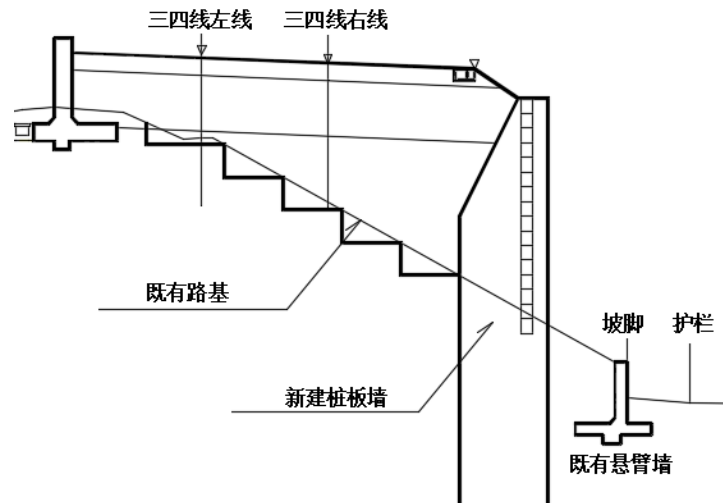


Figure 1. Actual working condition section

图 1. 实际工况断面

3. 试验设计

3.1. 试验方案

试验在模型箱中进行，其尺寸为长 90 cm，宽 57 cm，高 115 cm，由角钢焊接边框，箱体四周镶嵌 1 cm 厚有机玻璃板，模型箱底部焊接 1 cm 厚钢板防止变形，在模型箱顶部安装加载反力架，如图 2 所示。



Figure 2. Schematic diagram of the model box

图 2. 模型箱示意图

根据模型箱尺寸及现场实际,确定模型试验各构件尺寸为:悬臂墙高 0.2 m, 墙长 0.2 m, 墙厚 0.02 m, 墙体埋深 4 cm; 桩板墙桩长 1.05 m, 桩间距均为 0.06 m, 桩体截面尺寸为 0.02 m × 0.03 m, 桩身锚固段 0.93 m; 挡土板截面尺寸 0.008 m × 0.012 m, 板长 0.06 m; 桩身与悬臂式挡墙踵板边缘距离为 2 cm。模型试验布置方案如图 3 所示。桩板墙与悬臂式挡墙均采用有机玻璃制作, 通过试验测得有机玻璃弹性模量为 3.14 Gpa。

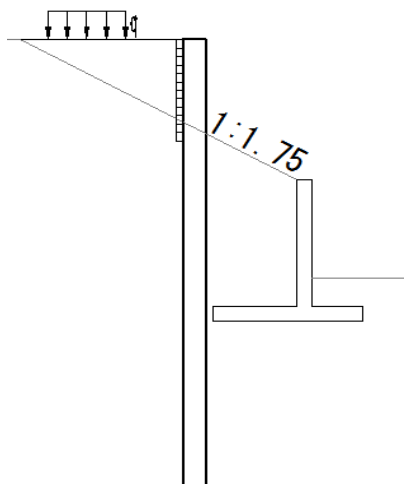


Figure 3. Model test layout plan

图 3. 模型试验布置方案

根据实际情况,模型试验填土采用黄土。按照《铁路工程土工试验规范》对土样进行了击实试验,得到击实曲线如图 4 所示,确定填土最优含水率 $\omega_{op} = 16.91\%$, 对应的最大干密度 $\rho = 1.85 \text{ g/cm}^3$, 模型试验填筑过程中压实度控制在 93% 以上。

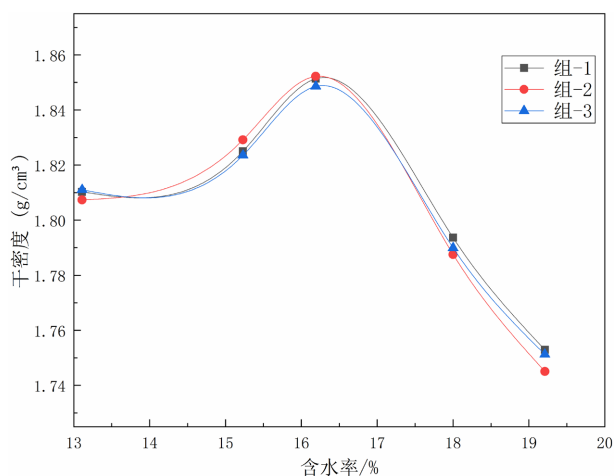


Figure 4. Soil compaction curve

图 4. 土样击实曲线

桩身应变片布设如图 5 所示,在 5、6、7 号桩两侧对称布设应变片,悬臂段应变片间距为 50 mm,锚固段应变片间距为 100 mm、150 mm 和 200 mm。

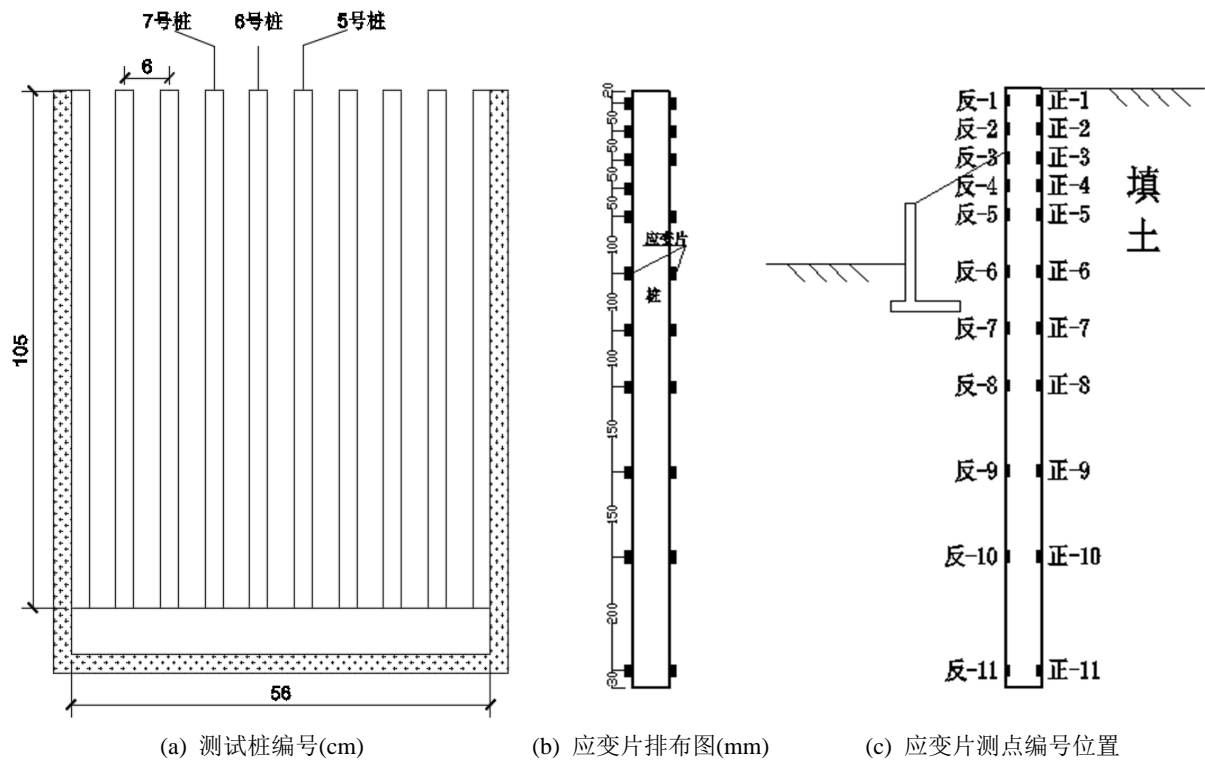


Figure 5. Pile body strain gauge layout
图 5. 桩身应变片布设

悬臂式挡墙立壁板和踵板均布设应变片，采用沿中线等距离均匀布设，方案如图 6 所示。

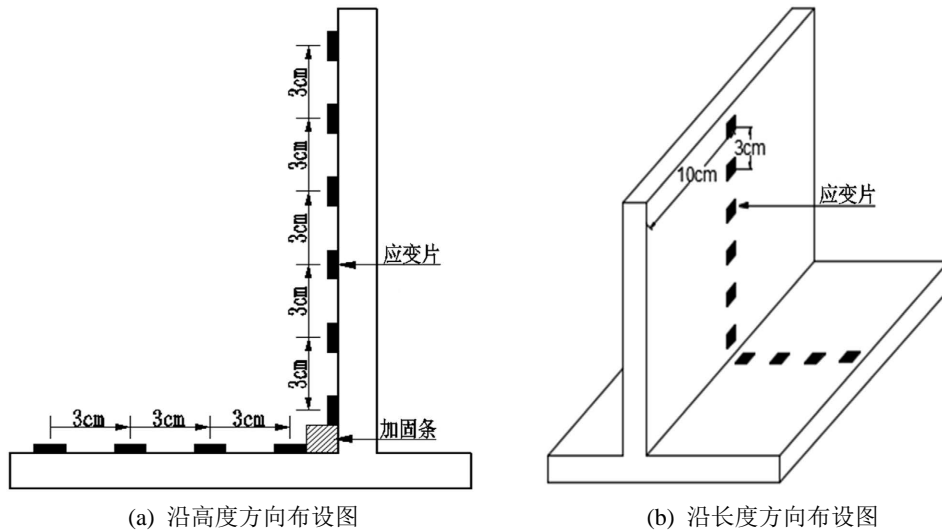


Figure 6. Suspension wall strain gauge layout
图 6. 悬壁墙应变片布设

在 5、6、7 号桩架设百分表，每根桩悬臂段布设三个位移计，分别在悬臂段顶、中间和底部，悬臂段测点布置编号如图 7 所示。悬臂墙不同位置百分表布设方案如图 8 所示。

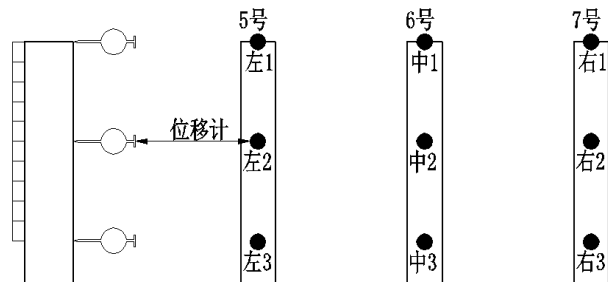


Figure 7. Pile body dial indicator layout
图 7. 桩身百分表布设

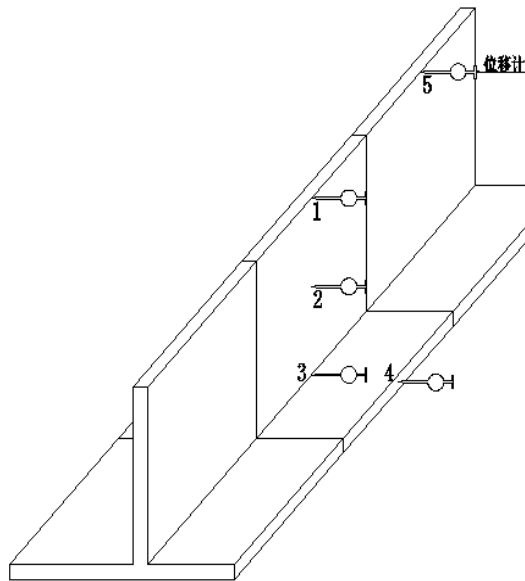


Figure 8. Cantilever wall dial indicator layout
图 8. 悬臂墙百分表布设

为研究桩板墙和悬臂墙组合支挡结构之间荷载的传递特性，分别在悬臂墙和桩板墙挡土板背面等间距布设土压力盒，布设方案如图 9 所示。

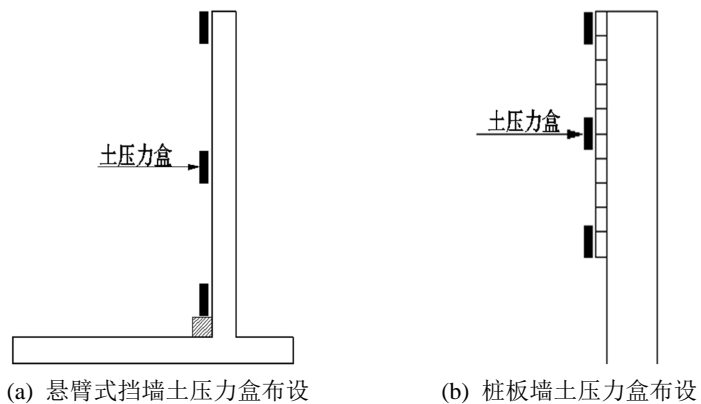


Figure 9. Earth pressure cell layout
图 9. 土压力盒布设

3.2. 模型填筑及加载

3.2.1. 模型填筑

试验模型自下向上分层填筑，每层填筑 10 cm，待土铺平后进行人工夯实。在底层土填筑完成后，按设定好的位置将试验桩放入，确保桩身垂直后再继续填筑。待土体填筑至相应高度时，将有机玻璃挡土板固定在桩身后缘，如图 10 所示。填土完成后用塑料布盖好，静置 24 h。在设计位置架设磁性表座，安装百分表，并且确保百分表水平放置，如图 11 所示。



Figure 10. Pile structure location

图 10. 桩板结构位置



Figure 11. Pile body dial gauge arrangement

图 11. 桩身百分表排布

3.2.2. 加载系统

本次加载所需设备有液压千斤顶、反力架、荷载板等，加载设备布置如图 12 所示，荷载板安放之前，在土体表面均匀撒铺一层细沙，确保板上集中荷载能均匀的分摊到钢板上并由钢板均匀传递给填土。为准确控制每级增加荷载量，在反力架和千斤顶之间安装一个荷载传感器。采用静压法逐级加载，钢板截

面积 $A = 0.09 \text{ m}^2$ ，计划每级加载 4 kPa ，即千斤顶每级加载 352 N （荷载传感器对应数值 36 kg ），应变仪每 2 min 记录保存一次数据，百分表按每级加载后 $5、15、30、45、60$ 分钟读数五次，待累计位移小于 0.1 mm 时施加下一级荷载。



Figure 12. Loading system
图 12. 加载系统

4. 试验结果分析

4.1. 模型试验应力分析

4.1.1. 试验桩应力分析

三根试验桩应力应变结果趋势相似，此处列举 6 号桩各级荷载下桩身最大应力分布如图 13 所示，横轴左半轴为桩身反面应力曲线，右半轴桩身正面应力曲线。

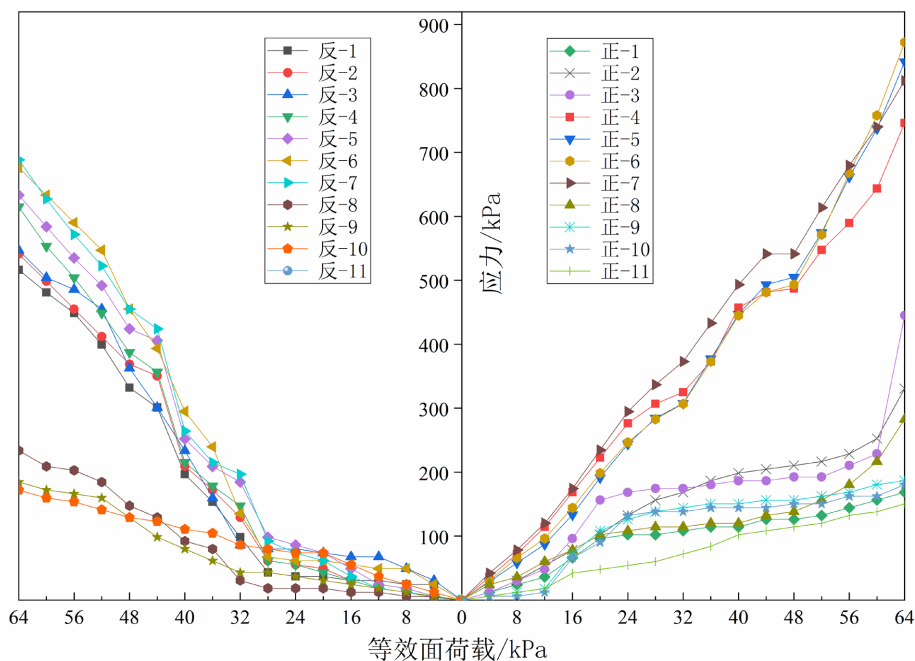


Figure 13. Maximum stress of pile
图 13. 桩体最大应力

由图可知,桩身在受拉和受压侧产生应力应变曲线总体呈对称趋势,且均随着加载值的增大而增加,在 64 kPa 等效荷载作用下结构边坡未被破坏,边坡未失稳。加载至第 8 级荷载之前,反-1 至反-11 号应力曲线均随荷载逐级递增且发展趋势相似,每级荷载下应力值接近,试验桩整体受力;加载至第 8 级荷载后,反-8、反-9、反-10、反-11 号继续呈线性增长,在加载到第 16 级荷载时达到最大应力值,而反-1 至反-7 号各级荷载下应力增大速度提高,在第 16 级荷载达到最大应力值。加载至第 5 级荷载之前,正-1 至正-11 号应力曲线均随荷载逐级递增且发展趋势相似,每级荷载下应力值接近,试验桩整体受力;加载至第 5 级荷载后,正-4、正-5、正-6、正-7 号均继续呈线性增长,在加载到第 16 级荷载时达到最大应力值,而正-1、正-2、正-3、正-8、正-9、正-10、正-11 号应力曲线斜率减小,在第 16 级荷载达到最大应力值。

分析拉应力大于对称点压应力的原因:① 试验数据采集过程中测试结果存在误差;② 从理论变形的角度分析,桩身的拉应变不仅由桩身弯曲引起,同时还因荷载施加后,应力通过土体传递给桩正侧,对应变片产生挤压,此时应变片的实际变形由桩弯曲拉伸和土体挤压两部分产生;同理反侧应变片受压,实际应变为桩弯曲变形一被动土体挤压变形,故拉应变累积值小于压应变累积值;③ 温度等其他因素。

根据各测点应力可计算出各截面桩身弯矩,如图 14 所示。左轴为测点至桩顶距离,右轴为测点编号,下轴为累积弯矩值,由图可见,在施加 16 级最大荷载时,1~6 号测点桩身弯矩沿深度方向迅速增大,在 6 号测点即距离桩顶 0.32 m 处达到最大弯矩,分别为左桩 $13.43 \times 10^{-4} \text{ kN}\cdot\text{m}$ 、中桩 $13.08 \text{ k} \times 10^{-4} \text{ kN}\cdot\text{m}$ 、右桩 $13.67 \times 10^{-4} \text{ kN}\cdot\text{m}$ 。而 7、8、9 号测点桩身弯矩沿深度方向迅速减小,9 号测点即距离桩顶 0.67 m 以下,桩身弯矩基本不发生变化。

总体而言,分级荷载增加到 64 kPa 时桩身对应的弯矩均逐渐增大,边坡结构未失稳,桩身处于弹性变形范围。

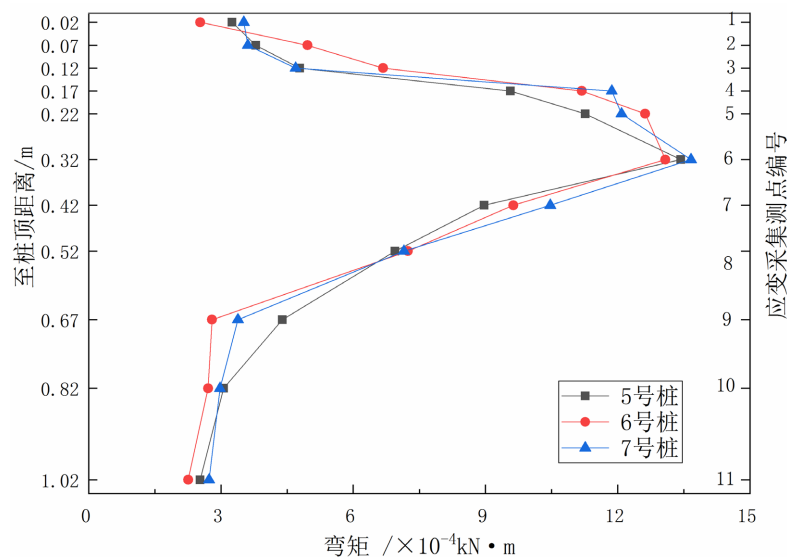


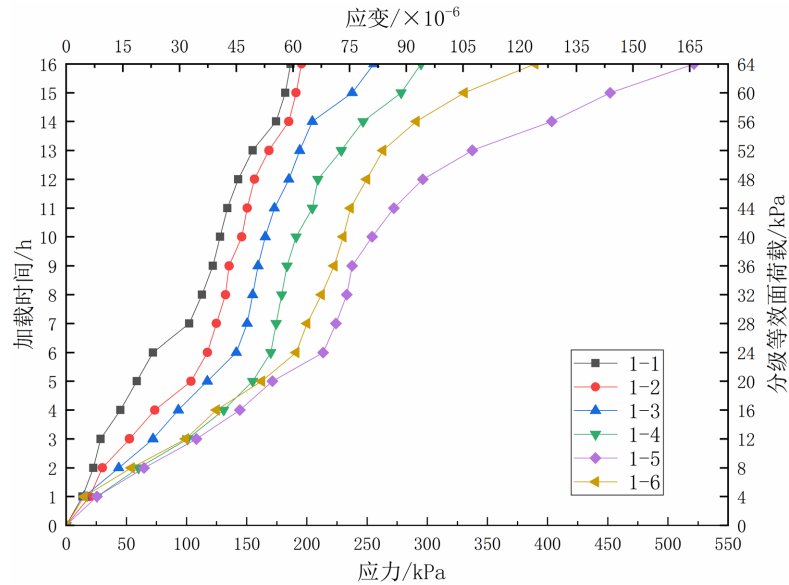
Figure 14. Distribution characteristics of bending moment at each measuring point of pile body

图 14. 桩体各测点弯矩分布特征

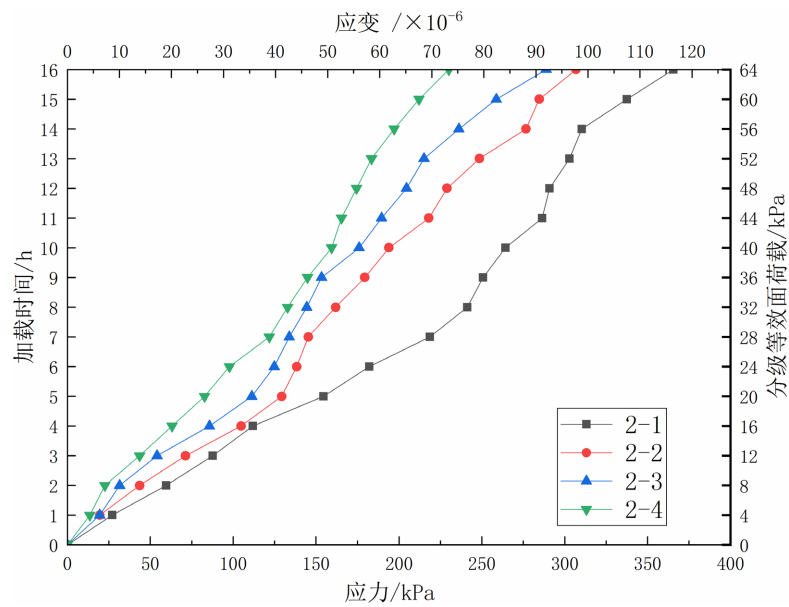
4.1.2. 悬臂墙应力分析

悬臂墙立壁部分各测点编号从墙顶至墙趾分别为 1-1、1-2、1-3、1-4、1-5、1-6,踵板部分从墙趾至板边缘依次编号为 2-1、2-2、2-3、2-4。

通过测得的应变，可计算出悬臂墙立壁和踵板的应力，如图 15 所示。上轴为应变累计值、下轴为与其对应的应力、左轴为加载时间、右轴为分级荷载累积值。由图可知，应力随荷载的增加而增大，加载至 64 kPa 时分别达到最大值 521.584 kPa、365.51 kPa。



(a) 悬臂墙立壁板应力结果



(b) 悬臂墙踵板应力结果

Figure 15. Cantilever wall stress strain diagram

图 15. 悬臂墙应力应变图

图 16 为悬臂墙立壁各测点弯矩随荷载的变化曲线，由图可知从墙顶至墙底弯矩均先增大再减小，最大值出现位置到墙顶的竖向距离为 0.14 m，最大弯矩为 $3.477 \times 10^{-3} \text{ kN}\cdot\text{m}$ 。

图 17 为悬臂墙踵板弯矩随荷载的变化曲线，由图可知，踵板弯矩随着荷载的增加而增大，并且在同

级荷载作用下测点 2-1、2-2、2-3、2-4 的弯矩逐渐减小,即从立壁向踵板边缘逐渐减小;当荷载为 64 kPa 时,2-1 号测点最大弯矩为 $2.437 \times 10^{-3} \text{ kN}\cdot\text{m}$,2-4 号测点最小弯矩为 $1.534 \times 10^{-3} \text{ kN}\cdot\text{m}$ 。

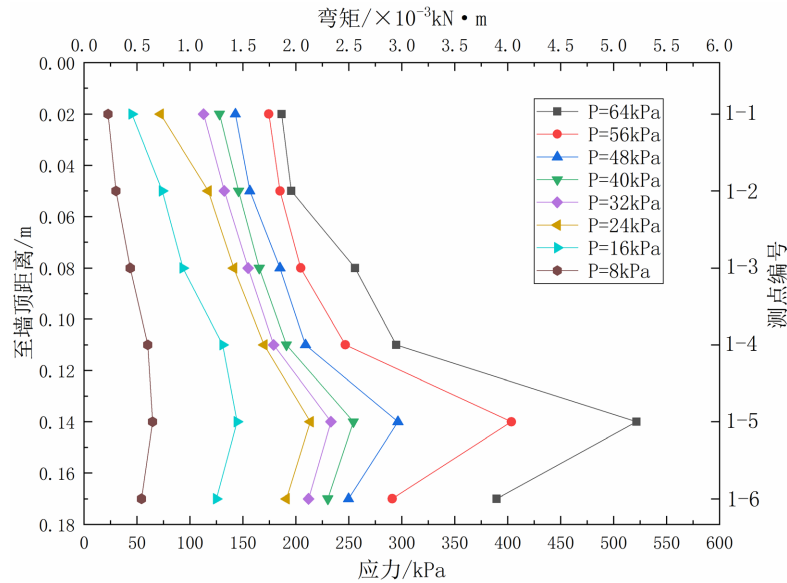


Figure 16. Distribution characteristics of bending moment of cantilever wall standing siding

图 16. 悬臂墙立壁板弯矩分布特征

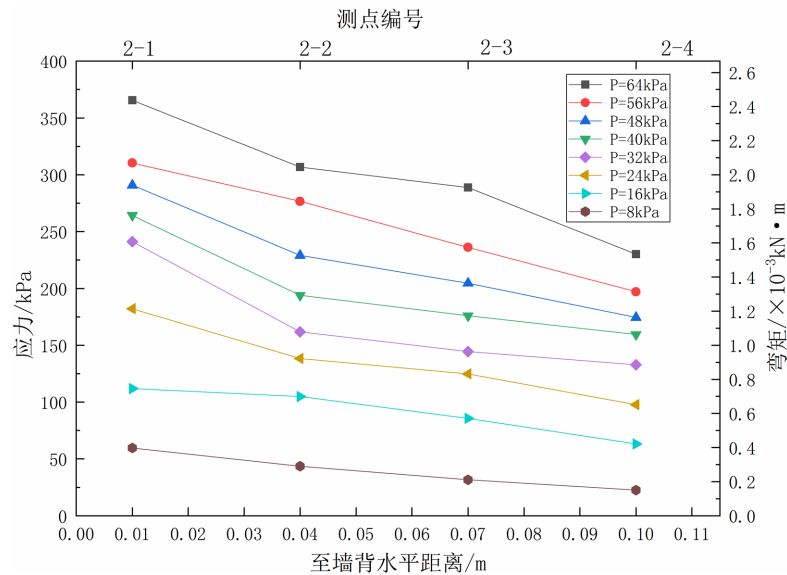


Figure 17. Distribution characteristics of bending moment of cantilever wall heel plate

图 17. 悬臂墙踵板弯矩分布特征

4.2. 模型试验位移分析

4.2.1. 试验桩位移分析

对三根试验桩位移数据进行分析处理,发现三根桩位移结果大致相同,此处只列举 6 号桩位移分析

结果。如图 18 所示, 桩身位移随荷载的增大而增大, 中 1、中 2、中 3 号位移曲线在第 4 级荷载之前整体呈阶梯形线性增长, 在第 4 级荷载之后, 位移曲线虽然仍呈线性增长, 但是每一级的位移量较之前明显提高, 其中中 1 号在 12 级荷载之后每级位移量较之前进一步提高且增加速率提高, 在 16 级荷载达到最大位移量 1.46 mm; 中 2、中 3 号最大位移量为 1.19 mm、1.02 mm。总体而言, 随着荷载的施加, 桩身的位移初期增大的很慢, 后续增加的较快, 说明组合支挡结构主要经历了压缩、变形两个阶段。桩顶位移最大, 中间次之, 底部位移最小。

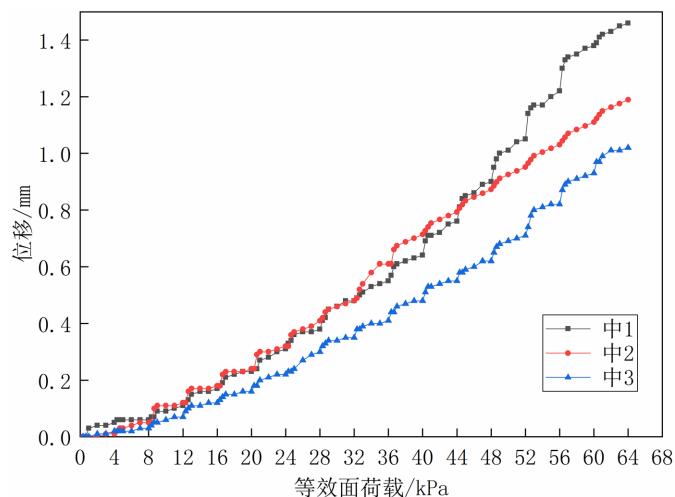


Figure 18. Horizontal displacement results of the cantilever section of the No. 6 pile

图 18. 6 号桩悬臂段水平位移结果

4.2.2. 悬臂墙位移分析

图 19 为悬臂墙立壁位移, 由图可知, 在 64 kpa 最大荷载作用下, 墙体水平位移达到最大, 立壁板顶部位移为 0.38 mm, 立壁中部位移为 0.28 mm, 立壁底部位移为 0.14 mm。从宏观上分析, 符合悬臂墙位移变形特征, 且悬臂式挡墙抗滑移稳定性满足要求。

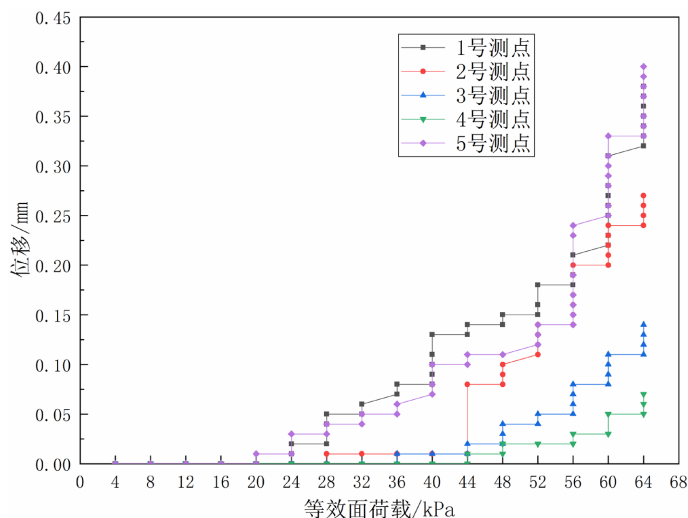


Figure 19. Cantilever wall horizontal displacement results

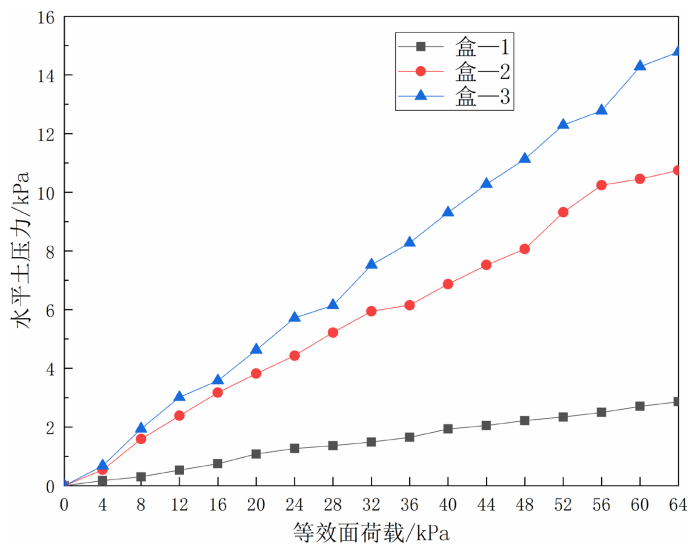
图 19. 悬臂墙水平位移结果

在等效列车荷载 54.1 kPa 作用下, 试验桩与悬臂墙顶部最大水平位移平均值分别为 0.42 mm 和 0.06 mm, 位移变形比为 7:1, 说明正常条件下, 组合支挡结构中荷载对桩板墙产生的影响大于悬臂墙。

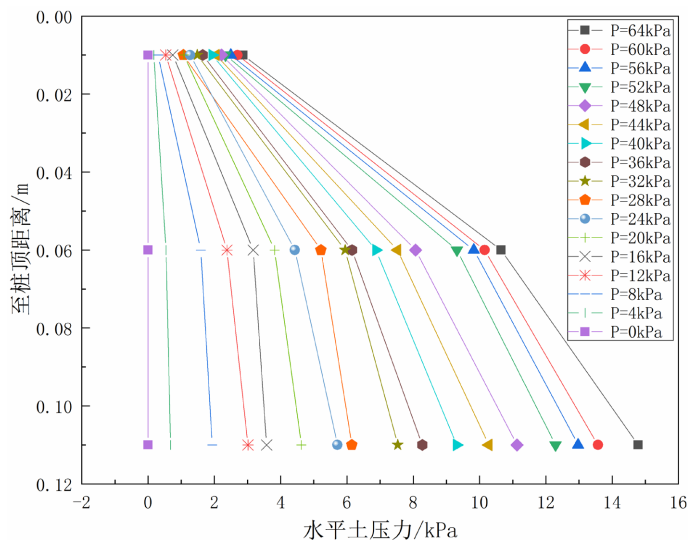
4.3. 模型试验土压力分析

4.3.1. 桩板墙土压力结果

土压力盒在中桩对应的位置挡土板范围内自上而下依次等间距放置, 编号为 1、2、3。图 20(a)为桩板墙后各测点压力变化曲线, 由图可知, 压力随荷载的增加而增大, 从上至下, 压力逐渐增大, 加载到 64 kPa 时, 盒-1 至盒-3 的压力值分别为 2.864 kPa、10.649 kPa、14.783 kPa, 底部土压力值大约为顶部的三倍。图 20(b)为桩板墙土压力沿深度方向分布情况, 可知悬臂段中部和底部土压力增长速率明显大于顶部, 这是由于土体作用使得土压力随深度增加。



(a) 桩板墙各测点土压力变化曲线



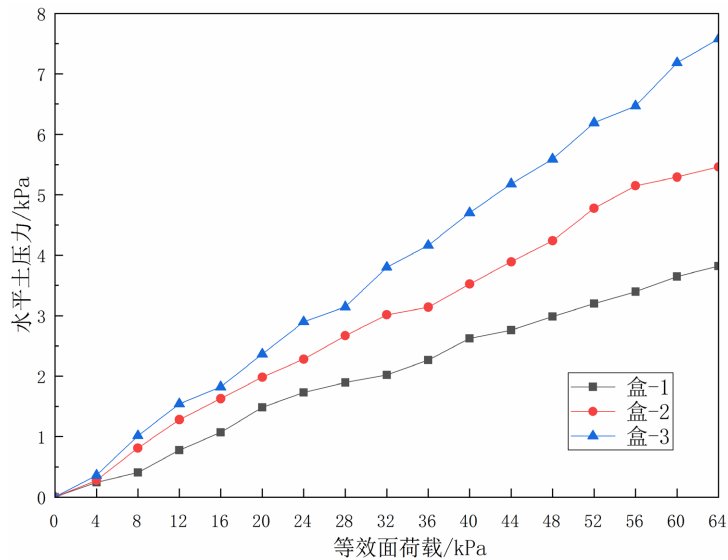
(b) 桩板墙土压力沿深度方向分布图

Figure 20. Pile-sheet wall earth pressure results

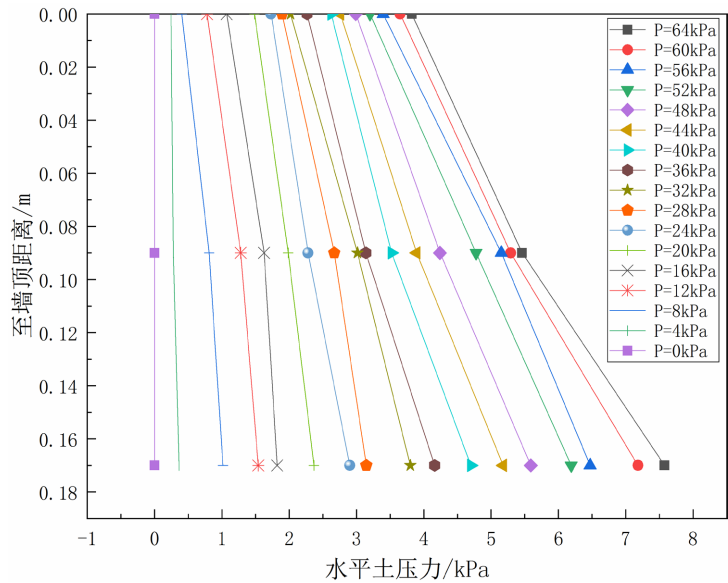
图 20. 桩板墙土压力结果

4.3.2. 悬臂墙土压力结果

如图 21(a)为悬臂墙墙后各测点压力值，由图可知，随着荷载的增加，墙后各位置压力逐渐增大，从上至下，压力逐渐增大，且呈线性分布。加载到 64 kPa 时，盒-1 至盒-3 的压力值分别为 3.821 kPa、5.461 kPa，7.577 kPa。图 21(b)为悬臂墙土压力沿深度方向分布情况，可以看出，立壁板顶部位置土压力值增长速率保持稳定，靠近立壁板底位置土压力值增长速率逐渐变大。



(a) 悬臂墙各测点土压力变化曲线



(b) 悬臂墙土压力沿深度方向分布图

Figure 21. Cantilever wall earth pressure results

图 21. 悬臂墙土压力结果

总体对比而言，将各级荷载下悬臂墙与桩板墙最大土压力做比值进行分担比计算，得到如图 22 所示结果，可以看出，每一级荷载下最大土压力分担比都趋近于 1:2。

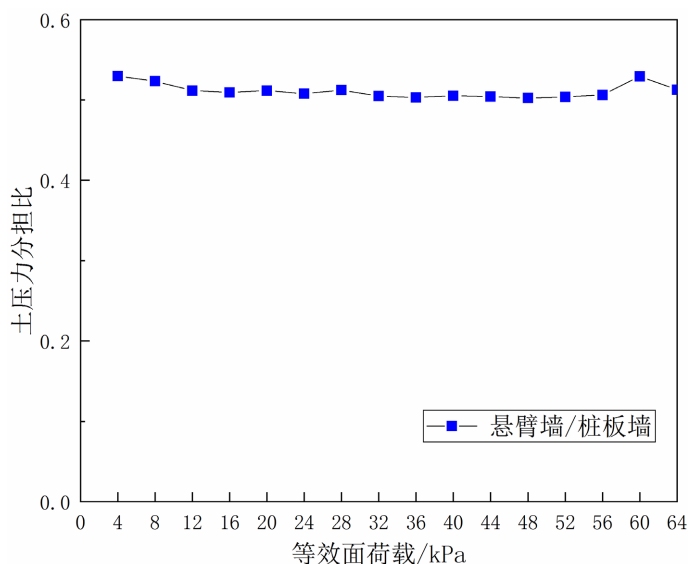


Figure 22. Maximum earth pressure sharing ratio of all levels of load
图 22. 各级荷载最大土压力分担比

5. 结论

本文通过模型试验，分析了组合支挡结构在竖向分级荷载作用下的受力状态和变形特点，得出以下结论：

1) 总体上各级荷载下桩体正面位置应力大于相同位置处反面，即受拉侧应力大于受压侧应力；不同级别的荷载下，桩体应力增长速率也不同；最大应力均出现在正、反 6 号测点即距离桩顶 0.32 m 附近；在 64 kPa 等效荷载作用下结构边坡未被破坏，边坡未失稳；

2) 从三根桩水平位移结果来看，桩顶位移最大，中间次之，底部位移最小，其变形结果符合悬臂梁悬臂段变形机理；在前 13 级荷载，内侧桩体位移小于外侧桩体；自第 13 级荷载开始，外侧桩体位移开始大于内侧桩体；

3) 桩身水平位移比悬臂墙大很多，位移变形比为 7:1，说明组合支挡结构中荷载对桩板墙产生的影响大于悬臂式挡墙。根据规范计算悬臂桩顶水平位移允许值为 $12 \text{ cm}/100 = 1.2 \text{ mm}$ ，而正常轨道列车荷载对桩顶产生的水平位移均小于允许值 1.2 mm，故在正常荷载作用下桩顶位移变形不超限，从宏观上判断悬臂墙抗滑移稳定性满足要求；

4) 在等效列车荷载作用下悬臂墙承担的水平土压力最大值在 6.190 kPa~6.471 kPa 范围内，桩板墙承担的水平土压力最大值在 12.29 kPa~12.784 kPa 范围内，作用点分别出现在立壁板底和挡土板底；

5) 桩身和立壁最大拉应力和最大弯矩分担比分别为 1.67:1 和 3.77:1，各级荷载下土压力的分担比均接近 2:1，说明边坡组合支挡结构中桩板墙承担了较多的土压力；悬臂式挡墙承担了水平土压力的 1/3，证明其支挡作用还非常明显，仍有较大的利用价值。

参考文献

- [1] 巨能攀, 黄润秋, 涂国祥. 桩板墙桩土作用机理有限元分析[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2006, 33(4): 365-370.
- [2] 刘洋. 桩板式挡土墙的受力分析与施工[J]. 交通世界(建养·机械), 2015(Z1): 92-93+109.
- [3] 张钦鹏, 梁庆国, 刘璐, 徐善常. 路肩桩板墙受力特性的室内模型试验研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2016, 36(4):

528-536.

- [4] 蒲建军, 梁庆国, 刘璐, 刘贵应. 桩及桩板墙加固路基边坡的对比室内模型试验研究[J]. 工程地质学报, 2017, 25(6): 1583-1592.
- [5] 张成武, 豆红强, 黄真萍, 王浩. 桩板式挡土墙桩间挡土板土压力计算方法研究[J]. 自然灾害学报, 2018, 27(5): 46-53.
- [6] 豆红强, 孙永鑫, 王浩, 聂文峰. 桩板式挡土墙桩-板土压力传递特性的试验研究[J]. 工程科学与技术, 2019, 51(3): 77-84.
- [7] 李梅, 刘校. 桩板墙加固边坡作用效果及结构受力影响试验研究[J]. 金属矿山, 2020(10): 190-196.
- [8] 李珠军, 吴顺川, 韩文涛. 高填拼宽路堤桩板墙处治方案与数值模拟[J]. 中国建筑金属结构, 2013(20): 226-227.
- [9] 梁桥, 陈翔, 周文权. 二级垛式新型悬臂式支挡结构分析探讨[J]. 湖南工程学院学报(自然科学版), 2016, 26(3): 76-80.
- [10] 侯卫红, 侯永峰. 悬臂式挡土墙受力分析[J]. 北方交通大学学报, 2004(4): 16-18+26.