

动荷载作用下组合支挡结构承载特性试验研究

张文贵¹, 罗文浩², 龚子罕¹, 陈 浩¹

¹兰州交通大学土木工程学院, 甘肃 兰州

²中国铁路西安局集团有限公司宝鸡工务段, 陕西 宝鸡

收稿日期: 2025年3月10日; 录用日期: 2025年4月1日; 发布日期: 2025年4月14日

摘 要

本文通过室内缩尺模型试验, 研究了动荷载作用下既有重力式挡土墙与新建桩板墙组合支挡结构的承载特性, 探讨了桩间距变化对结构受力性能的影响。试验基于相似理论, 设计了三种桩间距(200 mm、350 mm、500 mm)工况, 逐级施加动荷载至15 kPa, 分析了位移、应变、弯矩、土压力及荷载分担比的变化规律。结果表明, 随着荷载增加, 结构位移逐渐增大, 桩身应力和挡土板应力沿深度先增后减, 最大应力出现在悬臂段与锚固段交界处。桩身弯矩随荷载和桩间距增大而增大。桩后土压力随桩间距增大而增加, 挡土墙侧向土压力则减小。荷载分担比分析表明, 桩间距为200 mm时, 组合支挡结构的承载性能最佳。研究为动荷载下组合支挡结构的设计与优化提供了理论依据。

关键词

试验研究, 动荷载, 组合支挡结构

Experimental Study on the Bearing Characteristics of Composite Retaining Structures under Dynamic Loads

Wengui Zhang¹, Wenhao Luo², Zihan Gong¹, Hao Chen¹

¹School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou Gansu

²Baoji Engineering Section, China Railway Xi'an Bureau Group Co., Ltd., Baoji Shaanxi

Received: Mar. 10th, 2025; accepted: Apr. 1st, 2025; published: Apr. 14th, 2025

Abstract

This article studies the bearing characteristics of existing gravity retaining walls and newly

文章引用: 张文贵, 罗文浩, 龚子罕, 陈浩. 动荷载作用下组合支挡结构承载特性试验研究[J]. 土木工程, 2025, 14(4): 651-664. DOI: 10.12677/hjce.2025.144070

constructed pile sheet wall composite retaining structures under dynamic loads through indoor scaled model tests, and explores the influence of changes in pile spacing on the structural stress performance. Based on similarity theory, three pile spacing conditions (200 mm, 350 mm, 500 mm) were designed for the experiment, and dynamic loads were applied step by step to 15 kPa. The variation laws of displacement, strain, bending moment, soil pressure, and load sharing ratio were analyzed. The results show that as the load increases, the structural displacement gradually increases, and the stress of the pile body and the retaining plate first increase and then decrease along the depth. The maximum stress occurs at the junction of the cantilever section and the anchorage section. The bending moment of the pile increases with the increase of load and pile spacing. The soil pressure behind the pile increases with the increase of pile spacing, while the lateral soil pressure on the retaining wall decreases. The analysis of load sharing ratio shows that when the distance between piles is 200 mm, the bearing performance of the composite retaining structure is optimal. The study provides a theoretical basis for the design and optimization of composite retaining structures under dynamic loads.

Keywords

Experimental Research, Dynamic Load, Combined Support Structure

Copyright © 2025 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

随着近年来铁路建设越来越重视既有线的二次开发利用,对于既有线的扩建和改建项目逐渐增多,在原有路基挡土结构的基础上新建支挡结构进行路基帮宽可以满足既有线改建扩建的要求并且最大程度利用既有线原有支挡结构。铁路组合支挡结构长期承受列车荷载和结构自重,导致挡墙内力变化并引发结构变形。

罗一农[1]等提出,对于 2~4 m 的矮墙,路基面以上列车荷载可视为平均满铺,设置路肩挡墙时,墙顶置于路肩下 1 m 左右为宜,能增大墙背与列车荷载间距,减少动力作用,其形式与路堤墙相同。马斌研[2]究重力式挡土墙,分析荷载土压力与放坡高度、墙高、荷载作用距离的关系,通过胶济铁路现场实测,探究填土、上部结构自重土压力变化,挡土墙土压力的时间变化,列车动力荷载产生的动应力在路基中的消散规律及挡墙动土压力分布与影响因素,验证弹性理论计算荷载土压力的可行性,认为列车动力荷载影响可通过提高安全系数满足要求。赵勇[3]借助有限元程序,计算挡墙高度、荷载距离等对墙背土压力的影响,制作 1:1 尺寸模型试验,对比不同荷载幅值、作用距离下挡土墙土压力变化,得出动荷载对挡墙影响规律。李世元[4]通过室内模型试验,对不同类型挡土墙测试,控制加载幅值与距离,得出其对动土压力的影响并与理论值比较,明确动土压力分布及变化规律。刘少飞[5]针对换算土柱荷载图式,研究其对挡墙稳定性影响,分析多国荷载图式,经离心模型试验与数值分析,得出不同条件下墙背土压力与挡墙稳定系数。李存宝[6]等用足尺寸动态试验模型研究重力式挡墙,提出减小动土压力措施,指出低矮挡墙受抗滑力系数影响大,挡墙抗滑力与墙底摩擦系数密切相关。刘运涛[7]等运用 FLAC-3D 建立起三维有限差分平衡重力式挡墙模型,分析了在墙后填土自重和列车动荷载作用下挡土墙墙背土压力变化规律,得出车速对水平土压力作用点位置以及挡土墙稳定性影响较小。马少俊[8]等在平面滑裂面假设的情况下,得出了一种无粘性土与粘性土的土压力计算公式,该公式适用于

两种经典土压力的计算情况，得出了较为通用的计算方法。采用变分学原理，以微分单元为基础，对挡土墙进行研究，得出了滑裂面曲线的解析解。通过拟动力学的方法研究挡墙土压力的分布形式，分析了地震荷载对抗滑动与抗倾覆稳定性的影响，得出了稳定系数的公式。用水平层分析法和拟动力法，得到了动荷载作用下，主动土压力的分析模型，分析了动土压力的分布特点。曹琪[9]分析了在不同墙高、荷载作用距离、路基放坡高度、列车行驶速度时，重力式与悬臂式挡土墙墙背加速度、动位移以及土压力随着传递到挡墙上的动响应的变化，而产生的相应变化。白杨[10]等通过理论计算与 ANSYS 数值模拟相结合，对高速列车动荷载在有砟与无砟轨道结构中的传递规律进行了分析，研究了列车荷载作用下重力式挡土墙背动力响应，并且分析了在挡墙高度、荷载作用距离以及挡墙上部路基高度等不同因素下对其的影响规律。

为研究动荷载作用下既有重力式挡土墙和新建桩板墙组合支挡结构的承载特性，并对其结构形式进行优化，本文通过对现场工程地质条件进行勘察，同时对支挡结构的参数进行调查，利用相似理论对模型试验所需要的填土以及桩板材料进行选取，通过室内缩尺模型试验分析支挡结构变形及受力情况，计算新建桩板墙与既有重力式挡土墙的土压力荷载分担比来分析组合支挡结构承载性能的优劣，明确桩间距的变化对组合支挡受力的影响。

2. 模型试验概况

2.1. 模型试验方案

以中兰客专引入兰州枢纽工程 DK7 + 831.755-DK10 + 133.64 断面路基为研究对象，该断面为既有重力式挡土墙和新建桩板墙组合支挡结构，既有衡重式挡土墙墙高 5 m，托梁宽 4.5 m、厚 1.5 m，桩基础为双排桩，桩长 10 m，桩间距 2.5 m，桩径 1.0 m。新建桩板墙桩长 27 m，其中变截面高 2 m，桩顶截面尺寸为宽 2 m、长 1 m，桩身截面尺寸为宽 2 m、长 3 m，两侧翼缘板高 9 m，宽 50 cm，厚 50 cm。挡土板长 2.6 m，高 0.5 m，厚 0.4 m。工程中土体自上而下分别为人工填筑土、卵石土、粗圆砾土、卵石土、粗圆砾土，分层层状分布，本文选取兰州新区某工地的黄土作为试验填土。试验时以组合支挡结构中的重力式挡土墙、五根桩和挡土板为研究对象。为了保证模型代替原型的有效性，采用相似理论进行了推导，但由于难以完全满足相似关系，因此控制主要物理参数的相似率，忽略其他次要物理参数的影响。模型试验中选择密度、几何尺寸、动应力为基本物理量，几何尺寸相似参数取 1:15，密度参数取 1:1，动应力参数取 1:1，通过相似理论推导出其他物理参数应满足的相似关系，见表 1。

Table 1. Model experiment similarity constant
表 1. 模型实验相似常数

物理量	相似常数	物理量	相似常数
几何尺寸 L	$C_L = 15$	加速度 α	$C_\alpha = 0.067$
密度 ρ	$C_\rho = 1$	位移 ε	$C_\varepsilon = 15$
弹性模量 E	$C_E = 1$	动应力 σ_d	$C_{\sigma_d} = 1$
频率 ω	$C_\omega = 0.067$	泊松比 μ	$C_\mu = 1$
应力 σ	$C_\sigma = 1$	角位移 θ	$C_\theta = 1$

本文模型试验所用模型箱尺寸为 120 cm × 120 cm × 120 cm，桩板墙部分桩高 110 cm、桩截面尺寸 13.3 cm × 20 cm；挡土板截面尺寸 2.6 cm × 3.3 cm，挡土板板长随桩间距变化，具体布置如图 1 和图 2 所

示。以桩墙距变化梯度为 200~350~500 mm 设计了 3 组室内模型试验。

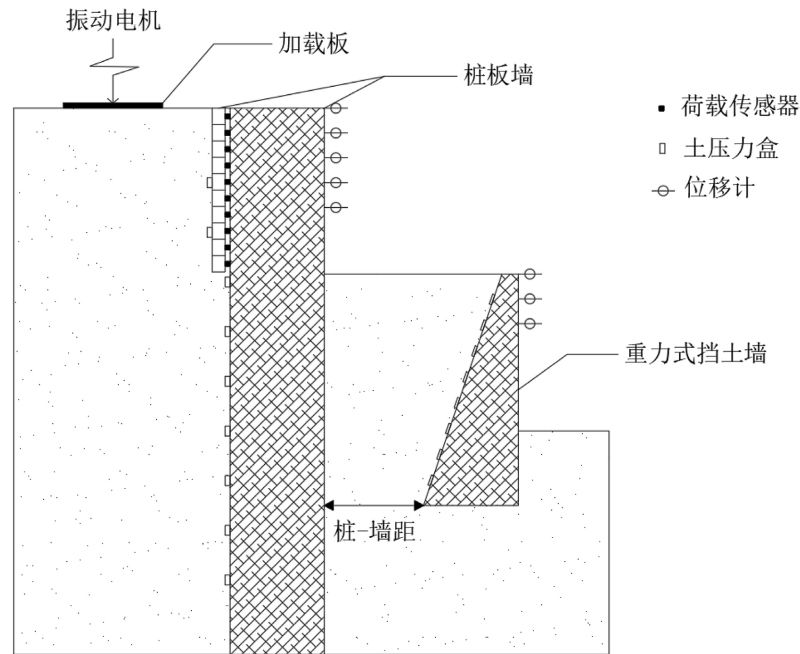


Figure 1. Side view of model box
图 1. 模型箱侧视图

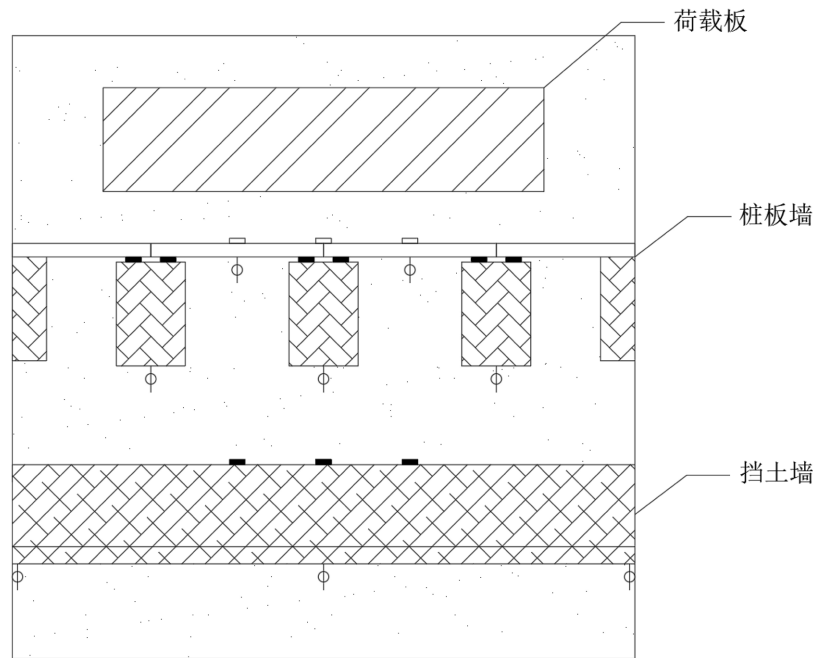


Figure 2. Top view of model box
图 2. 模型箱俯视图

2.2. 模型试验材料的选取与路基填筑

模型桩与挡土板均采用有机玻璃材质，其弹性模量为 2.86 GPa。在模型试验中桩板墙部分由有机玻

璃桩，有机玻璃板两部分组成，其弹性模量为 3.146 GPa。本次模型试验重力式挡土墙采用混凝土现浇制作。通过荷载传感器来测试加载过程中挡土板对桩传递的荷载，桩身布设应变片，桩后和挡土墙后布设土压力盒，桩板墙悬臂端和重力式挡土墙布设位移计。路基填料为最大干密度 1.78 g/cm³、含水率 14.2%、内摩擦角 32°、黏聚力 25.42 kPa 并经过 2 mm 筛的黄土，压实系数控制为 0.9。采用分层填筑(每层 10 cm)，分层击实。为了减小模型箱箱壁与土体的摩擦力对试验的影响，提前在箱壁均匀涂抹了凡士林润滑剂。最终确定的试验方案为三组对比试验，见表 2。模型试验见图 3。



Figure 3. Test model
图 3. 试验模型

Table 2. Working condition design
表 2. 工况设计

工况	桩墙距
工况一	200 cm
工况二	350 cm
工况三	500 cm

2.3. 加载系统及加载方式的选取

根据相关文献以及现场实测资料，高速列车在无砟轨道上运行时在路基表面产生的动应力在 10~20 kPa，动荷载频率的变化范围在 5~33 Hz，并且响应主频在 10 Hz 附近。由于高速列车荷载模拟较复杂，因此本次试验对动荷载的加载波形作了简化处理，采用半正弦波形的加载方式。动力加载系统由加载设备、反力系统和承载板共同组成，在该系统的作用下可产生 0~15 kPa 的半正弦波形的动应力，加载频率为 2 Hz，加载波形见图 4。

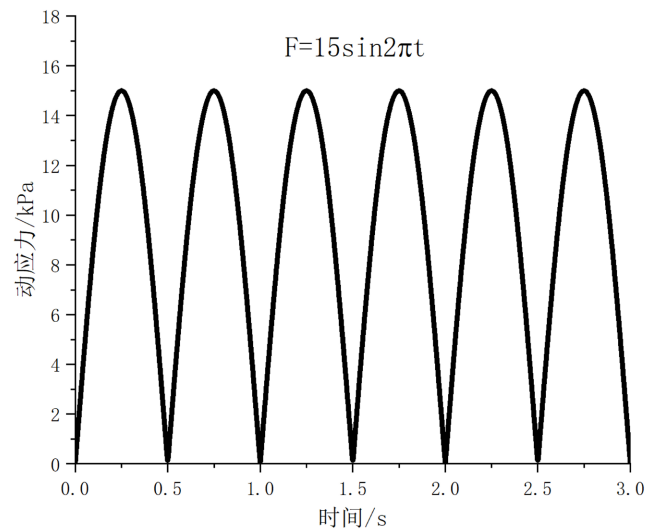


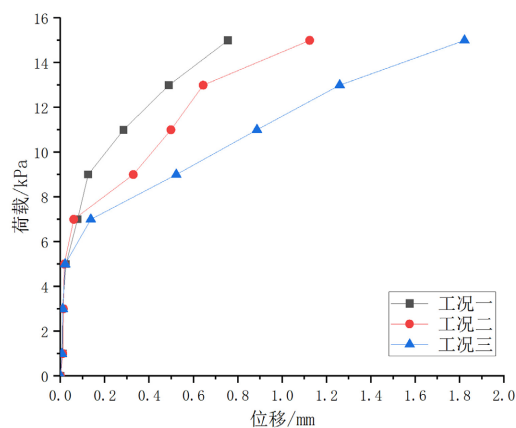
Figure 4. Experimental loading waveform
图 4. 试验加载波形

3. 试验结果及分析

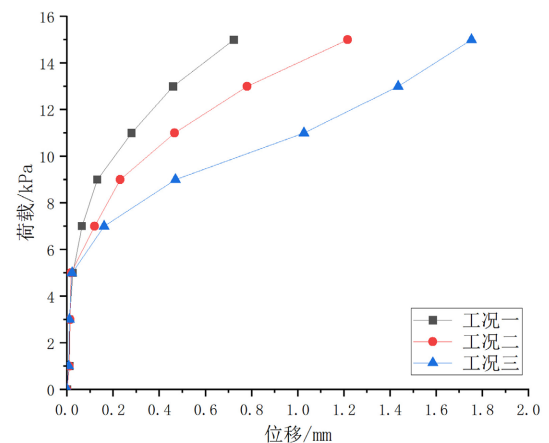
3.1. 位移分析

当各工况下动荷加载至各峰值(1 kPa、3 kPa、5 kPa、7 kPa、9 kPa、11 kPa、13 kPa、15 kPa)时,对模型实验中桩顶部、挡土板顶部和挡土墙顶部的水平位移结果进行汇总,当桩墙距离不同时,其水平位移变化情况,如图 5 所示。

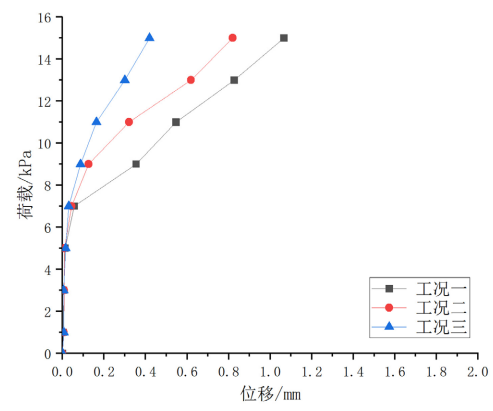
可见,随着荷载的增大,组合支挡结构的整体位移也逐渐增大。对三种不同工况的结构进行加载,施加动荷载时,在组合结构加载稳定之后,挡土墙顶和桩板墙顶的变化很小;继续加载,动荷载峰值从 1 kPa 增大至 5 kPa 时,位移变化速率缓慢,桩顶和挡土板顶的位移变化相似,三种工况下挡土墙与桩板墙的顶位移相差很小;而随着荷载的逐渐增大超出 5 kPa 之后,桩顶和挡土板顶的位移变化相似,200 mm 桩墙距下的挡土墙顶位移变化速率明显大于 500 mm 桩墙距,而 200 mm 桩墙距下的桩板墙顶位移变化速率则小于 500 mm 桩墙距。桩墙距越小挡土墙分担的荷载更多,而桩墙距越大桩板墙分担的荷载更多,这两种情况都容易发生失稳破坏。



(a) 桩顶

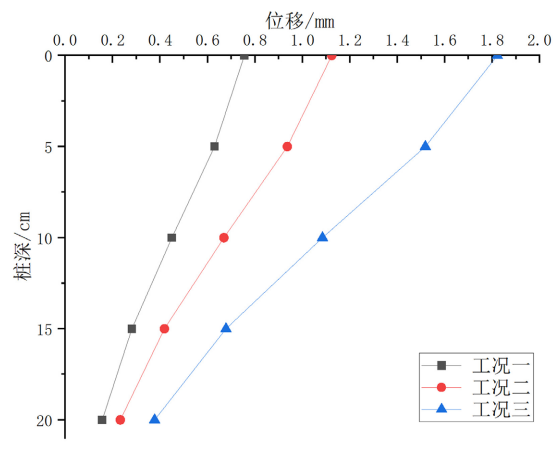


(b) 挡土板顶部

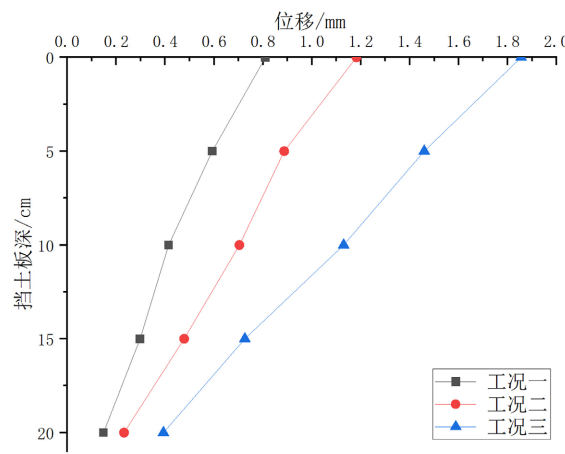


(c) 挡土墙顶

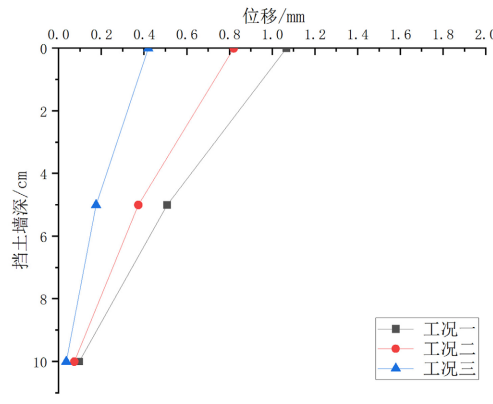
Figure 5. Displacement changes under different working conditions
图 5. 不同工况下位移变化



(a) 桩



(b) 挡土板



(c) 挡土墙

Figure 6. Structural displacement changes under different working conditions at a peak dynamic load of 15 kPa
图 6. 动荷载峰值 15 kPa 时不同工况下结构位移变化

图 6 为不同工况下动荷载峰值为 15 kPa 时桩身、挡土板和挡土墙墙面位移变化示意图。由图可知，对于挡土墙而言，随着挡土墙的深度，挡土墙墙面位移在逐渐减小，200 mm 桩墙距下墙面位移大于 500

mm 桩墙距；对于桩和挡土板而言，变化规律基本相似，随着桩板墙的深度，桩身和挡土板位移在逐渐减小，200 mm 桩墙距下桩身和挡土板的位移小于 500 mm 桩墙距。挡土墙位移增长趋势与桩板墙完全相反。

将三种不同工况下既有重力式挡土墙及新建桩板墙桩顶位移进行比较。三种工况下桩顶位移和挡土板顶部的位移变化规律基本相似，桩板墙桩顶位移均大于挡土墙墙顶位移。对于工况一，加载至 5 kPa 后，挡土墙墙顶位移速率增长很快，而桩板墙桩顶位移速率增长缓慢；对于工况三，在整个加载过程中，挡土墙墙顶位移变化速率缓慢，而桩板墙桩顶位移速率增长很快；对于工况二，荷载小于 5 kPa 时，位移变化很小，荷载超过 5 kPa 时，挡土墙墙顶位移介于工况一与工况三两者中间，桩板墙桩顶位移变化规律与挡土墙基本一致。

3.2. 应变分析

桩身在受拉侧产生拉应变，在受压侧产生压应变，取桩后受拉侧产生的拉应力为“+”，桩前受压侧产生的压应力为“-”对比动荷载峰值为 15 kPa 时不同工况下桩板墙桩身应力如图 7 所示。

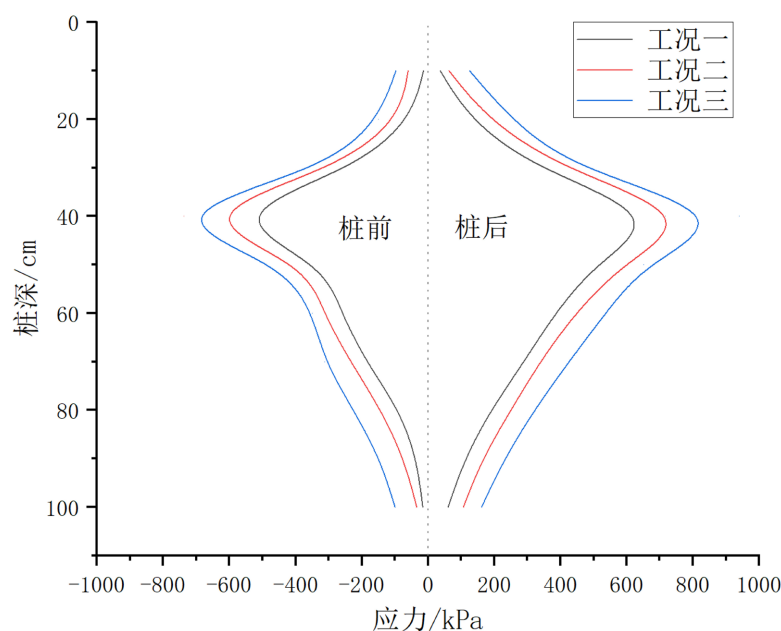


Figure 7. Stress distribution before and after the pile
图 7. 桩前和桩后应力分布

由图 7 可知中桩桩前和桩后应力曲线总体变化规律一致，均为桩身应力沿桩身深度方向先增大后减小，在 40 cm 处桩身应力达到最大，该处为桩板墙悬臂段与锚固段交界处。悬臂段仅受桩后荷载作用，桩前区域无约束导致悬臂段应力随深度增加而增大，锚固段随着深度增加应力逐渐减小。对于不同工况，工况一桩前后应力整体小于工况三，工况二则介于工况一和工况三之间。

由图 8 可知挡土板应力分布规律为随着深度增加先增大后减小，最大值出现在距桩顶 15 cm 处。对比不同工况发现桩身应力和挡土板应力变化规律一致，均为随着桩墙距增加时应力也随之增加。该现象说明组合支挡结构中随着桩墙距离的增大桩板墙承担的荷载越大，当桩墙距减小时桩身应力和挡土板应力均减小。且不同工况下桩身、挡土板应力分布规律一致，说明动荷载加载至 15 kPa 时各个工况下模型试验受力良好，结构未被破坏。

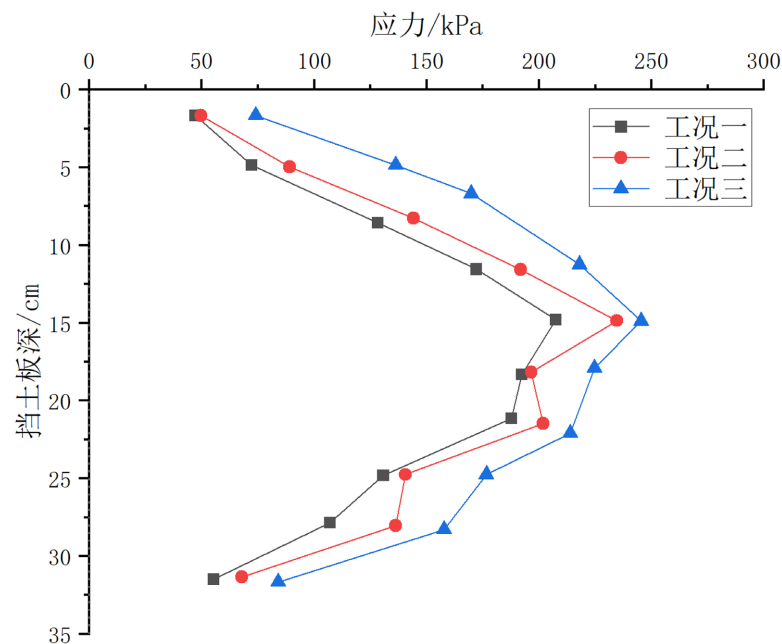


Figure 8. Stress distribution of retaining plate
图 8. 挡土板应力分布

3.3. 弯矩分析

选取中间桩对桩身弯矩进行分析, 如图 9 所示为中间桩在三种工况下桩身最大弯矩随荷载变化。随着动荷载峰值的增加, 桩身最大弯矩也逐渐增大, 并且增长幅度随荷载变大, 三种工况下的增长幅度基本一致, 同一荷载条件下工况一的弯矩最小, 工况三弯矩最大, 工况二则介于工况一和工况三之间。

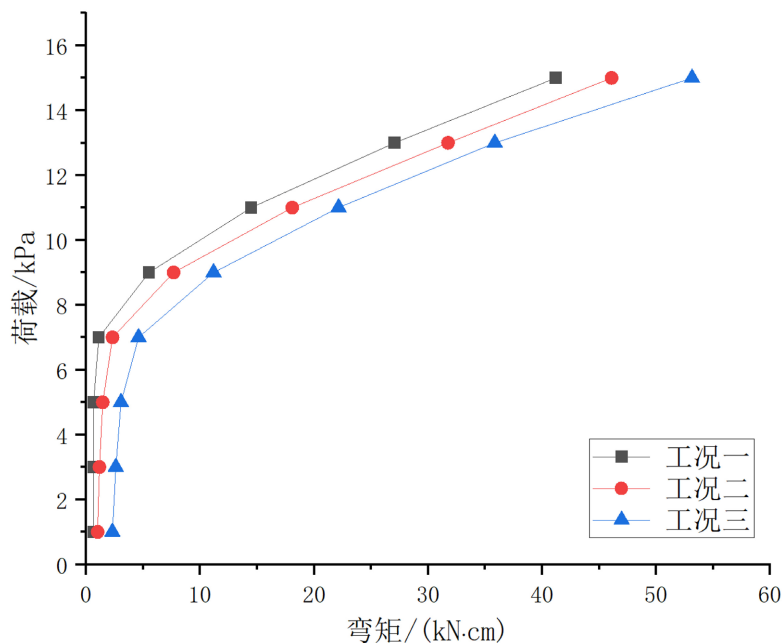


Figure 9. Maximum bending moment variation of piles under different working conditions
图 9. 不同工况下桩最大弯矩变化

图 10 为荷载 15 kPa 时不同工况下桩身弯矩变化, 弯矩沿桩身呈抛物线形, 最大弯矩点在桩埋深 40 cm 处, 工况一桩所承受的最大弯矩为 41.2 kN·cm, 工况二桩所承受的最大弯矩为 46.1 kN·cm, 工况三桩所承受的最大弯矩为 53.1 kN·cm; 工况二最大桩身弯矩相较于工况一增大了 11.9%, 工况三既有桩最大桩身弯矩相较于工况二增大了 15.2%。可见桩墙距越大桩身弯矩越大, 桩所承受的荷载越大。

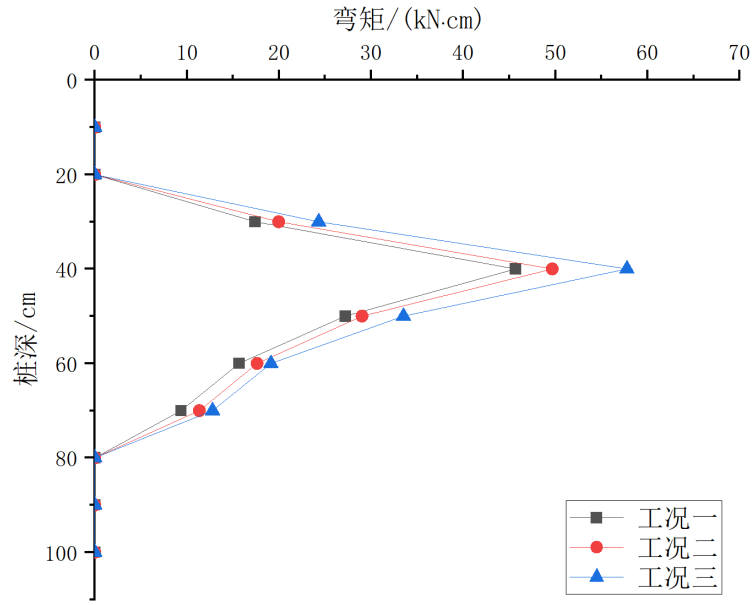


Figure 10. Changes in bending moment of pile body under different working conditions
图 10. 不同工况下桩身弯矩变化

3.4. 土压力分析

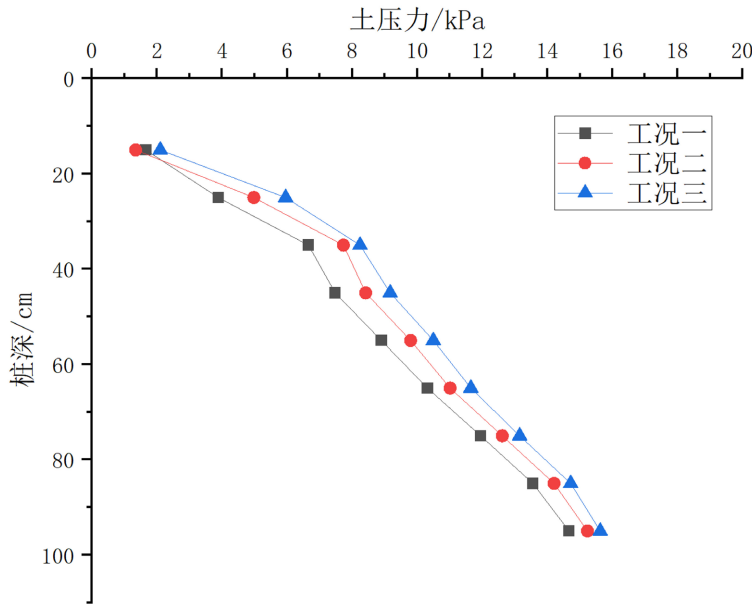


Figure 11. Soil pressure at the buried depth behind the pile when the peak dynamic load is 15 kPa
图 11. 动荷载峰值 15 kPa 时桩后埋深部分土压力

桩后土压力是利用荷载传感器通过挡土板的受力换算得出。动荷载峰值为 15 kPa 时，不同工况下桩板墙后土压力模型试验结果进行分析对比如下图所示。

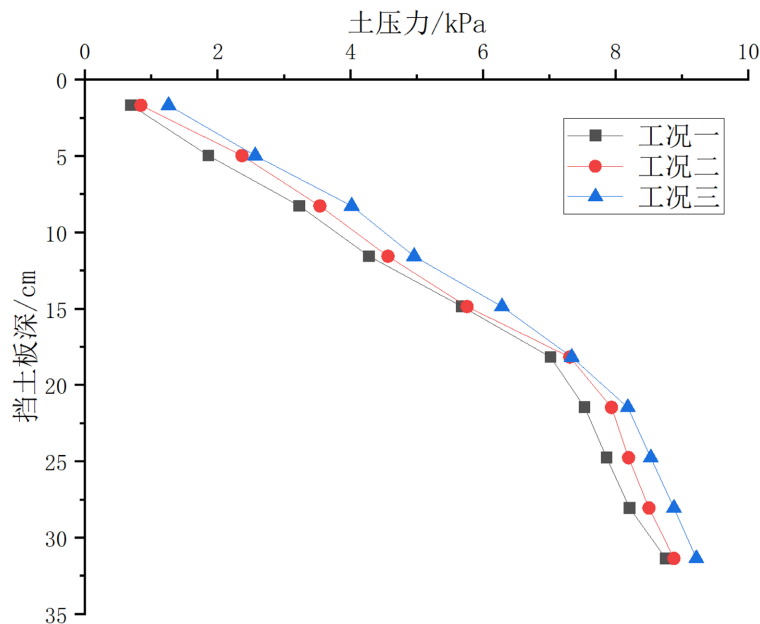


Figure 12. When the peak dynamic load is 15 kPa, the load sensing of the retaining plate is converted into soil pressure

图 12. 动荷载峰值 15 kPa 时挡土板荷载传感换算土压力

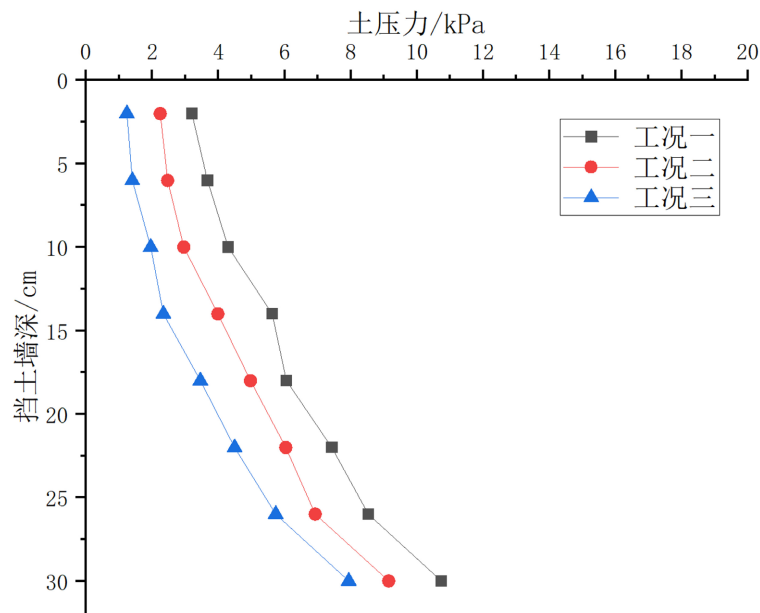


Figure 13. Lateral soil pressure of gravity retaining wall at peak dynamic load of 15 kPa

图 13. 动荷载峰值 15 kPa 时重力式挡土墙侧向土压力

由图 11 可知，桩后土压力随着深度增加而增大，在距桩顶 0~35 cm 深度范围内增大速率较快。图 12 可以看出挡土板后土压力随着深度增加而增大，且在距桩顶 0~18.15 cm 深度范围内增大速率较快。总体来看挡土板荷载传感器换算土压力与桩后土压力数值基本一致，在距离桩顶 0~35 cm 区域土压力出现局

部增大现象可能是由于附加荷载的作用导致。同时可以看出随着桩墙距的增加桩板墙后无限土体区域土压力也随之增加。

动荷载峰值为 15 kPa 时,不同工况下挡土墙侧向土压力如图 13 所示。挡土墙深 30 cm 时,工况一挡土墙侧向土压力为 10.73 kPa,工况二为 9.15 kPa,工况三为 7.94 kPa,说明随着桩间距的增加,挡土墙侧向土压力在逐渐减小。挡土墙侧向土压力随桩墙距离增加的变化规律与桩板墙相反,说明动荷载作用下挡土墙和桩板墙在承载性能上存在协同作用。

同时挡土墙土压力在距离墙顶 22 cm 以下区域土压力增长较快,这是由于该区域刚好位于重力式挡土墙墙前回填区,在土体发生挤压推动重力式挡土墙时由于重力式挡土墙顶部位移较大,墙底回填区位移受限挡墙产生 RB 模式变位。因此墙底的挤压作用更明显导致墙底土压力增长较快。

3.5. 组合支挡结构承载特性分析

在既有挡土墙单独作用时,其承担了所有的路基荷载,增建新桩板墙之后,路基上部荷载由新桩和既有桩共同承担。为评价组合支挡结构的承载特性,引入荷载分担比 λ_1 和 λ_2 ,计算公式如下:

$$\lambda_1 = \frac{P_1}{P_1 + P_2} \quad (1)$$

$$\lambda_2 = \frac{P_2}{P_1 + P_2} \quad (2)$$

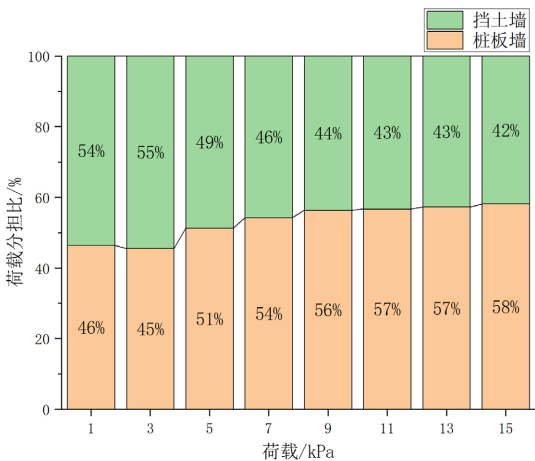
式中: P_1 为新建桩板墙桩后总土压力; P_2 为既有重力式挡土墙墙后总土压力; λ_1 为新建桩板墙的土压力分担比, λ_2 为既有重力式挡土墙的土压力分担比。

土压力在不同的深度点测得,土压力数据是离散的,用数值积分方法中的梯形法计算总土压力,计算公式如下:

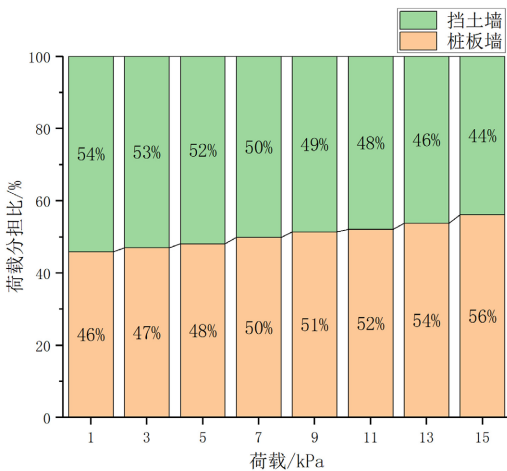
$$P = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{p(z_i) + p(z_{i+1})}{2} \cdot (z_{i+1} - z_i) \quad (3)$$

式中: z_i 和 z_{i+1} 是相邻两个测量点的深度; $p(z_i)$ 和 $p(z_{i+1})$ 是对应的土压力值。

新建桩板墙和既有重力式挡土墙承载性能的表现可以通过荷载分担比来体现。当荷载分担比 λ_1 和 λ_2 接近时,说明新建桩板墙和既有重力式挡土墙的荷载分配较为均衡,结构整体稳定性较好。如果 λ_1 远大于 λ_2 ,说明新建桩板墙承担了大部分荷载,可能导致桩板墙过载,影响其稳定性。



(a) 工况一



(b) 工况二

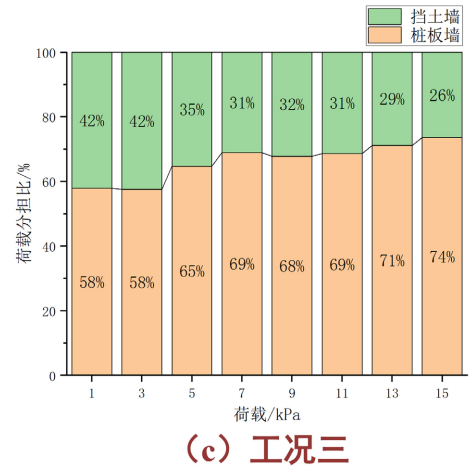


Figure 14. Load sharing ratio of soil pressure under different working conditions
图 14. 不同工况下土压力荷载分担比

不同工况下的土压力荷载分担比如图 14 所示。桩板墙的土压力荷载分担比随着荷载的增加在逐渐增大，并且不同工况下增长幅度也不相同。随着荷载增大，桩墙距为 200 mm 时桩板墙的荷载分担比为 46.5%~56.8%，增大了 22.2%；桩墙距为 350 mm 时桩板墙的荷载分担比为 46.2%~58.3%，增大了 26.2%；桩墙距为 500 mm 时桩板墙的荷载分担比为 58.2%~74.1%，增大了 27.3%。对比桩板墙的荷载分担比增长速率可知，桩墙距为 200 mm 时组合支挡结构的承载性能最好。

4. 结论

- (1) 本次试验填料经过室内土工试验进行物理力学性能的测定，得出本次实验填料最优含水率为 14.2%、填料最大干密度 1.78 g/cm³、内摩擦角 32°、粘聚力 25.42 kPa。
- (2) 随着动荷载峰值的增加，重力式挡土墙和桩板墙的位移均逐渐增大，位移增幅随荷载逐渐增大；同等荷载条件，不同工况下位移增长幅度以及速率也不相同，对于挡土墙而言，小桩墙距条件下的墙身位移大于大桩墙距，而小桩墙距条件下桩位移增长速率小于小桩墙距，重力式挡土墙墙身与桩板墙桩身位移规律相反。
- (3) 中桩桩身应力沿着深度方向先增大后减小，在悬臂段与锚固段交界处达到最大；挡土板应力随着深度增加先增大后减小，在距悬臂段顶 15 cm 处达到最大。同时桩板墙结构的应力随着桩墙距增大时逐渐增大。不同工况下桩身、挡土板应力分布规律一致，说明动荷载加载至 15 kPa 时各个工况下模型试验受力良好，结构未被破坏。
- (4) 对于同一工况下桩板墙桩身弯矩近似呈抛物线形，并且弯矩增幅随着荷载增加逐渐增大。施加相同荷载条件下，桩的最大弯矩随着桩墙距的增大也在逐渐增大。
- (5) 对于同一工况下，重力式挡土墙和桩板墙土压力沿深度方向逐渐增大，悬臂段桩和挡土板最大土压力相差较小；对比不同工况下，桩板墙墙后土压力随着桩墙距的增大逐渐增大，而重力式挡土墙侧向土压力随着桩墙距的增加逐渐减小。挡土墙土压力在距墙顶 22 cm 以下区域增长较快，因其位于重力式挡土墙墙前回填区，土体挤压挡土墙时，墙顶位移大，墙底回填区位移受限，挡土墙产生 RB 模式变位，墙底受挤压作用更显著，致使墙底土压力增长加快。
- (6) 对于同一工况下，随着动荷载峰值不断提高，桩后土压力荷载分担比持续上升，重力式挡土墙侧向土压力荷载分担比持续下降，两者的荷载分担比越接近时承载性能越好；对于不同工况下，土压力荷载分担比随着桩墙距的增加而增大，动荷载增加的过程中，当桩墙距为 200 mm 时荷载分担比的增长速

率最低,此时新建桩板墙与既有重力式挡土墙之间的承载性能最好。

参考文献

- [1] 罗一农,刘会娟,苏谦.动应力对支挡结构安全性影响的分析[C]//铁道部工程设计鉴定中心,中国铁道学会.铁路客运专线建设技术交流会论文集.武汉:长江出版社,2005:390-394.
- [2] 马斌.高速铁路刚性挡土墙土压力数值分析与现场试验研究[D]:[硕士学位论文].成都:西南交通大学,2006.
- [3] 赵勇.高速铁路刚性挡土墙土压力模型试验与数值分析[D]:[硕士学位论文].成都:西南交通大学,2006.
- [4] 李世元.重力式支挡结构列车动荷载试验研究[D]:[硕士学位论文].成都:西南交通大学,2010.
- [5] 刘少飞.重力式支挡结构的荷载图式研究[D]:[硕士学位论文].成都:西南交通大学,2010.
- [6] 李存宝,杨柳,向安田.动荷载对重力式路堤墙影响的研究[J].西南大学学报(自然科学版),2011,33(11):164-167.
- [7] 刘运涛,刘少飞,刘昌清.列车荷载对衡重式挡土墙土压力及稳定性影响研究[J].路基工程,2011(2):27-29.
- [8] 马少俊.动静荷载下挡土墙土压力计算及相关问题研究[D]:[博士学位论文].杭州:浙江大学,2012.
- [9] 曹琪.高速铁路路基挡土墙动响应分析[D]:[硕士学位论文].兰州:兰州交通大学,2015.
- [10] 白杨,曹琪.列车荷载作用下对重力式挡墙动响应的影响规律研究[J].南阳理工学院学报,2017,9(2):52-56.