

# 既有桩板墙增加冠梁的结构数值研究

蔡禄元<sup>1</sup>, 白天晟<sup>2</sup>, 李 伟<sup>3</sup>

<sup>1</sup>兰州交通大学土木工程学院, 甘肃 兰州

<sup>2</sup>中国铁路兰州局集团有限公司兰州电务段, 甘肃 兰州

<sup>3</sup>兰州交通大学土木工程学院, 甘肃 兰州

Email: 756347215@qq.com, 810783386@qq.com, 1239741040@qq.com

收稿日期: 2020年12月27日; 录用日期: 2021年1月19日; 发布日期: 2021年1月28日

## 摘 要

以某铁路枢纽配套工程新建客线为背景。货线已沿坡脚间隔设置桩板式挡土墙, 新建客线左线需拆除货线, 在原位置修建左线, 并在右侧位置增建右线, 由于用地宽度有限, 需在既有支挡工程范围以内设置支挡工程收坡。于里程内6根既有桩桩顶设高1.20 m、宽2.0 m、长31.5 m的冠梁, 用既有桩板墙增加冠梁这种新旧支挡结构, 联合支挡新建的客线荷载, 运用MIDAS GTS-NX有限元软件, 研究在货线作用下和拆除货线新建客线作用下既有桩的受力特性对比分析。既有桩的墙背土压力增大幅度不明显, 桩身最大剪力出现在距离桩顶2 m位置, 桩身最大弯矩出现在距离桩顶4 m位置。

## 关键词

桩板式挡土墙, 冠梁, 受力特性, 数值计算

# Numerical Study on the Structure of Existing Pile Slab Wall with Crown Beams

Luyuan Cai<sup>1</sup>, Tiancheng Bai<sup>2</sup>, Wei Li<sup>3</sup>

<sup>1</sup>College of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou Gansu

<sup>2</sup>China Railway Lanzhou Bureau Group Co. LTD., Lanzhou Electrical Depot, Lanzhou Gansu

<sup>3</sup>College of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou Gansu

Email: 756347215@qq.com, 810783386@qq.com, 1239741040@qq.com

Received: Dec. 27<sup>th</sup>, 2020; accepted: Jan. 19<sup>th</sup>, 2021; published: Jan. 28<sup>th</sup>, 2021

## Abstract

The background is the new passenger line of a railway hub supporting project. Pile and plate retaining wall has been set up along the foot of the freight line. The left line of the new passenger line

文章引用: 蔡禄元, 白天晟, 李伟. 既有桩板墙增加冠梁的结构数值研究[J]. 土木工程, 2021, 10(1): 57-66.

DOI: 10.12677/hjce.2021.101007

shall be dismantled, the left line shall be built at the original position, and the right line shall be added at the right position. Due to the limited width of the land, the slope of the retaining project shall be set up within the scope of the existing retaining project. Crown beams of 1.20 m in height, 2.0 m in width and 31.5 m in length were set at the top of six existing piles within the mile. The existing pile slab wall was used to add the new and old retaining structure of crown beam, and the newly built passenger line load was combined with the newly built passenger line load. MIDAS GTS-NX finite element software was used to study the comparative analysis of the stress characteristics of the existing piles under the action of cargo line and the action of the newly built passenger line when the cargo line was removed. The increase of soil pressure on the wall back of the existing pile is not obvious. The maximum shear force of the pile appears 2 m away from the pile top, and the maximum bending moment of the pile appears 4 m away from the pile top.

## Keywords

Pile Plate Retaining Wall, Crown Beam, Mechanical Characteristics, Numerical Calculation

Copyright © 2021 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

随着我国铁路建设规模的不断扩大, 铁路既有线改建及临近既有线新建项目将会逐年递增, 如何准确评估既有路基变形, 如何利用先进的科学技术手段和方法, 快速给出高质量的设计方案, 如何有效加固利用既有结构物以最大限度节省投资就成为工程设计的关键, 也是目前迫切需要解决的技术难题。因此, 对本项目进行专题研究十分必要。本文针对某高铁基于既有路基支挡结构新建客线路基拓宽项目, 采用 MIDAS GTS-NX 三维有限元软件结合实际工程开展数值模拟, 分析既有桩板墙增加冠梁的受力与变形机理。

秦旗等[1]运用二维有限元分析, 针对高度超过 15 m 的深路堑桩板墙进行比选设计。

柳彬[2]等人将目前已有的抗滑桩联合支挡工程实例进行整理, 将土拱效应计算的方法运用在联合支挡结构设计的计算中, 结果具有普适性。

曾新平[3]对抗滑桩与挡土墙新型联合支挡进行了理论计算与数值模拟两种方法的研究分析。

王恒强[4]指出可将挡土墙与抗滑桩进行组合将会把优点放大化, 对于这类组合支挡的结构体系, 我们应该将它们视为一个整体, 其表现出来的力学特征与两者单独作为知道那个结构时有较大的区别。

柳滨源[5]分别通过理论计算与数值模拟, 对悬臂式抗滑桩与抗滑桩 - 挡土墙协同作用组合支挡结构两种支挡形式进行对比研究, 发现了该支挡结构受力特性与支挡效果更优。

石志龙[6]通过对某既有线路基加宽, 边坡支挡采用桩板墙支护的工程背景, 运用 MIDAS-GTS 有限元分析软件建立了三维数值模型, 研究了新建支挡结构以及既有桩板墙的受力特性。

曾新平[7]主要从理论计算和数值分析两个方面着手, 对于理论计算而言, 可从支挡结构的作用机理及其侧向压力计算着手, 进而分析得出该支挡结构的受力特性。

张长江[8]指出在现有的桩基扶壁式挡土墙理论计算中, 将桩基和扶壁式挡土墙分开计算是不科学且不合理的, 应将两者视为统一整体进行理论计算分析。

华宏亮[9]等人从数值分析及现场模型试验对路基边坡支挡结构展开研究, 在现场试验中采用水平滑坡推力的方法分析模型中路基边坡支挡结构受力的合理性及可行性。

分析发现, 现有的研究成果大都基于新建线路或工程情况下桩板墙结构的研究, 而依托实际工程, 对既有路堤式桩板墙在货线的作用下和既有路堤式桩板墙增加冠梁在拆除货线新建客线作用下既有桩的受力特性分析鲜有成果出现。所以本文以某实际工程为背景, 采用数值模拟分析方法, 研究在货线作用下和拆除货线新建客线作用下既有桩的受力特性对比分析。

## 2. 有限元模型

### 2.1. 工程地质概况

在某铁路枢纽配套工程新建客线工程中, 路基施工全部临近既有线, 设计挡护措施时需考虑对既有路基稳定的影响, 施工难度较大。2013 年铁路设计时新建货线, 货线已沿坡脚间隔设置桩板式挡土墙。此次新建客线左线需拆除货线, 在原位置修建左线, 并在右侧位置增建右线, 由于用地宽度有限, 需在既有支挡工程范围以内设置支挡工程收坡。于 DK9+117.25~DK9+148.75 段 6 根既有桩桩顶设高 1.20 m、宽 2.0 m、长 31.5 m 的冠梁, 用既有桩板墙增加冠梁这种新旧支挡结构, 联合支挡新建的客线荷载, 其中既有桩桩长 15 m, 其中悬臂部分 4 m, 嵌固部分 11 m, 本次研究为了降低边界效应对结果的影响选取 6 根既有桩中间的#3、#4 桩。桩板墙横断面示意图, 见图 1。

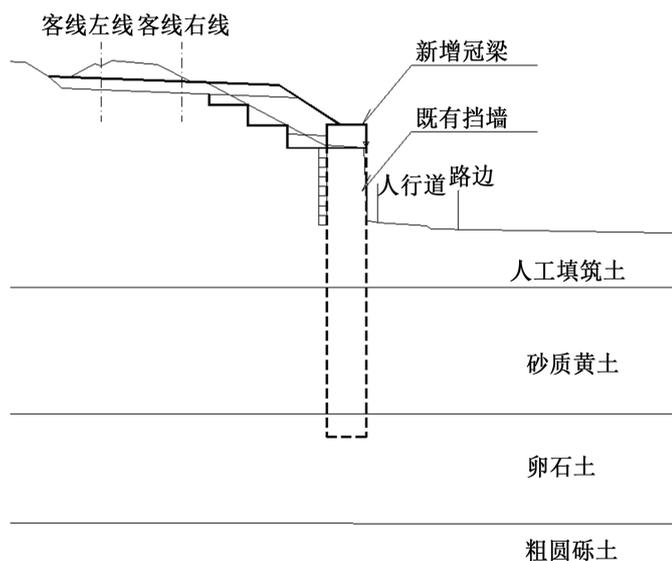


Figure 1. Schematic diagram of transverse section of pile slab wall

图 1. 桩板墙横断面示意图

边坡场地内各岩土层特性分述如下:

1) 人工填筑土: 分布于既有铁路路堤及公路地表, 杂色, 成份以砂质黄土、细砂、圆砾、卵石等为主, 岩芯呈散状, 稍密 - 中密, 稍湿, II 级普通土。

2) 砂质黄土: 局部分布于人工填筑土层以下, 浅黄色, 成份以粉粒为主, 具层理, 手搓有砂感, 稍密, II 级普通土。

3) 卵石土: 青灰色, 成分以砂岩、花岗岩、石英岩为主, 浑圆状, 岩芯呈散状, 潮湿 - 饱和, 密实, IV 级软石。

4) 粗圆砾土: 青灰色, 成份以砂岩、花岗岩、石英岩等为主, 圆棱状, 潮湿 - 饱和, 密实, IV 级软石。

## 2.2. 模型的建立

根据具体施工工况结合桩板墙横断面示意图建立模型,使用三维有限元软件 MIDAS GTS-NX 进行数值模拟,模型长为 37 m,高 37 m,宽 35.5 m;基床表层、基床底部、路基下部、人工填筑土、砂质黄土、卵石土、粗圆砾土均采用摩尔-库伦本构模型,既有桩、挡土板、冠梁采用弹性本构模型。为了便于对既有桩的内力(剪力、弯矩等)进行分析,既有桩、冠梁、挡土板均采用梁单元来模拟,模型中的其他结构均采用实体单元。模型由上至下一共有七个土层,模型底面设置全约束,两侧设置 X、Y 两个方向的约束,前后面设置 Y 向约束,桩体设置 Rz 约束,约束桩体绕 z 轴转动。计算中轨道荷载、列车荷载均采用三维单元面荷载来模拟。建立的有限元模型,如图 2~4。

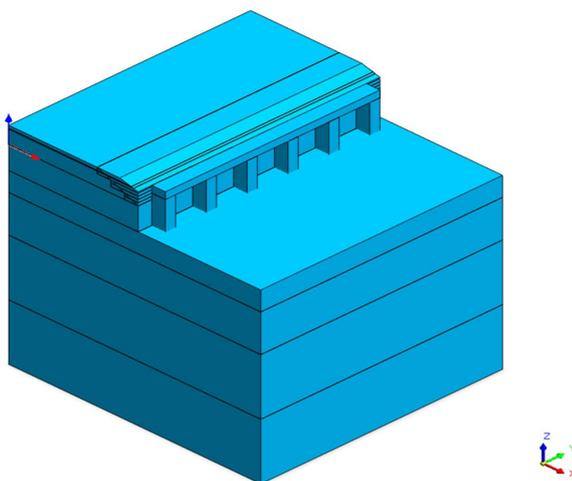


Figure 2. Finite element model

图 2. 有限元计算模型

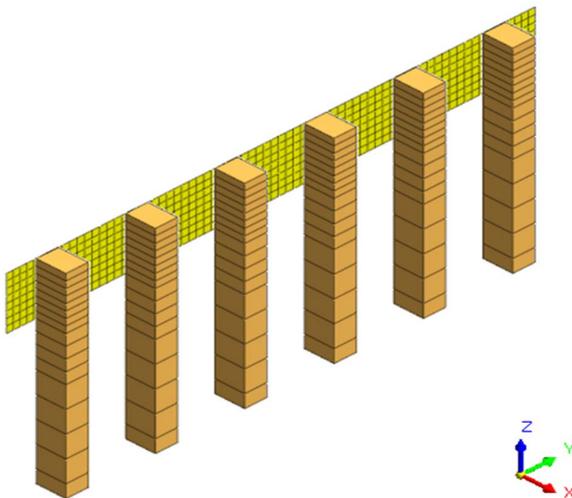


Figure 3. Grid division of existing piles and existing baffles

图 3. 既有桩和既有挡板的网格划分

冠梁于 DK9+117.25~DK9+148.75 段 6 根既有桩桩顶设高 1.20 m、宽 2.0 m 冠梁,冠梁施工前,需将既有灌注桩顶部 0.5 m 厚左右的混凝土凿除并清洗,采用直径 25 mm 的 HRB400 钢筋与桩体周围纵向钢筋焊接,焊接完成后恢复浇筑既有桩体至设计标高。接长的桩体纵向钢筋伸入冠梁内长度不小于 1.1 m。

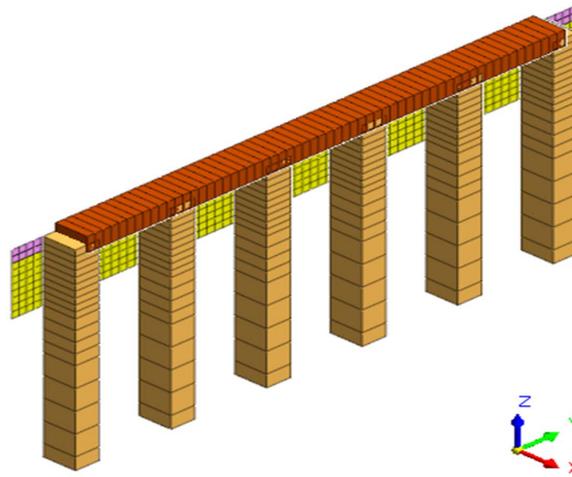


Figure 4. Grid division of existing pile slab structure and new crown beam  
图 4. 既有桩板墙结构和新增冠梁的网格划分

### 2.3. 材料参数的选择

路堤填料和地基土材料本构模型均选用 Mohr-Coulomb 模型，土体计算参数来源于实际勘察报告及相关工程经验。材料相关参数的取值，见表 1。

Table 1. The value of material related parameters

表 1. 材料相关参数的取值

名称	单元类型	重度(KN/m <sup>3</sup> )	泊松比	弹性模量(Mpa)	内摩擦角(°)	粘聚力(Kpa)	厚度(m)
基床表层	3D 实体	19.5	0.28	190	38	15	0.6
基床底部	3D 实体	19	0.3	110	35	20	2.4
路基下部	3D 实体	18.5	0.35	90	22	20	4.0
人工填筑土	3D 实体	19	0.30	5.0	15	27	3.2
砂质黄土	3D 实体	19	0.28	9.2	16	28	6.8
卵石土	3D 实体	19	0.25	50	35	8	10.0
粗圆砾土	3D 实体	20	0.25	30	30	10	10.0
冠梁	1D 梁单元	26	0.20	32500	-	-	-
既有桩新挡板	1D 梁单元	26	0.20	32500	-	-	-
既有桩挡板	1D 梁单元	25	0.20	31500	-	-	-
既有桩	1D 梁单元	25	0.20	31500	-	-	-

### 2.4. 既有桩受弯承载力计算

图 5 为既有桩板墙桩截面钢筋布置图，表 2 为既有桩桩截面配筋表。依据《正截面受弯承载力计算的基本规定》用数值模拟的计算结果对既有桩进行受弯承载力验算，该目的是验算在拆除货线新增客线后既有桩能继续良好的工作。

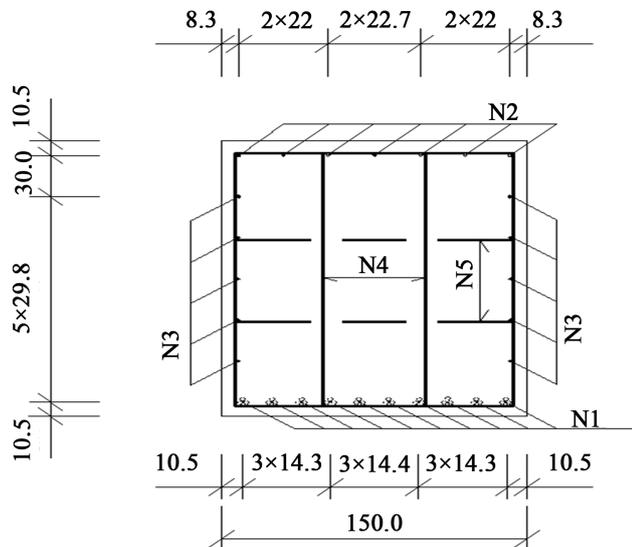


Figure 5. Section reinforcement drawing of existing pile  
图 5. 既有桩桩截面配筋图

Table 2. Existing pile section reinforcement table  
表 2. 既有桩桩截面配筋表

钢筋编号	直径(mm)	每根长度(mm)	总长度(m)	每米重量(kg)	备注
N1	Φ32	1480	444.00	6.313	HRB400
N2	Φ25	1480	103.60	3.853	HRB400
N3	Φ25	1820	148.00	3.853	HRB400
N4	Φ20	570.2	416.25	2.466	HRB335
N5	Φ20	154.2	27.76	2.466	HRB335

根据既有桩桩截面配筋图和既有桩桩截面配筋表可以得到：  
计算极限状态受拉钢筋应力：

$$\sigma_s = f_y = 360 \text{ N/mm}^2$$

∴抗弯承载力：

$$M_u = f_y \times A_s \times (h_0 - 0.5x) = 13232.62 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

### 3. 数值模拟结果分析

#### 3.1. 模拟工况

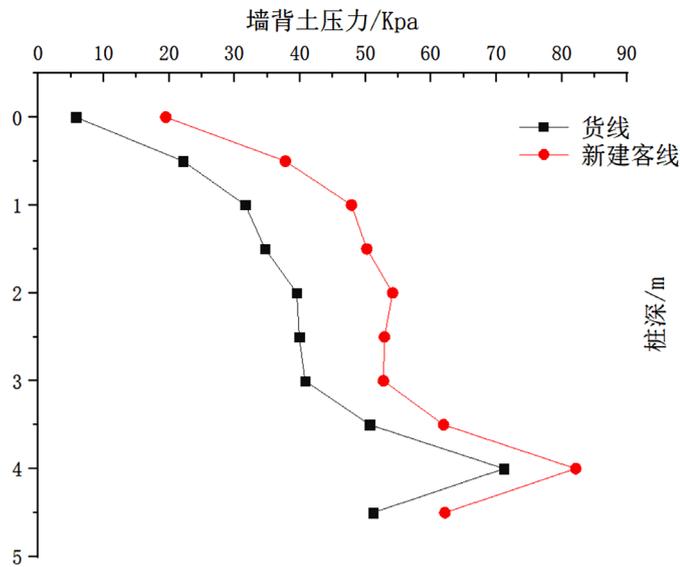
主要模拟计算路基边坡不同施工过程中对既有桩的影响，结合工况要求，重点对既有桩板墙墙背土压力、既有桩桩身内力(剪力、弯矩)、既有桩桩身位移等进行分析。计算分析时，工况要求如下：

工况 1：货线作用下既有桩的受力特性

工况 2：拆除货线后新建客线作用下(既有桩板墙和冠梁联合支挡)既有桩的受力特性

#### 3.2. 桩身土压力值沿桩深的分布

工况 1、工况 2 下既有桩墙背竖线土压力分布对比图，如图 6。

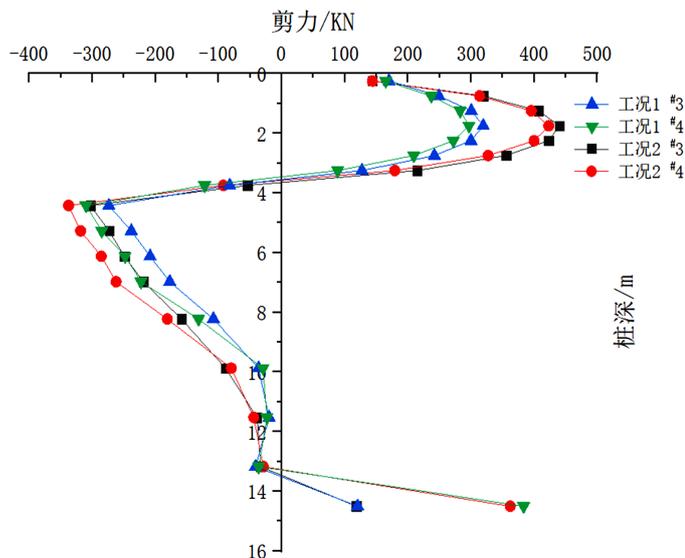


**Figure 6.** Comparison diagram of soil pressure distribution of pile slab wall under Working Conditions 1 and 2  
**图 6.** 工况 1、工况 2 桩板墙墙背土压力分布对比图

由图 6 可以看出，在两种工况下，墙背土压力的大小分布均沿墙背呈现出先增大后减小的趋势，最大的土压力均出现在距离既有桩顶部以下 4 m 位置，桩底部的土压力变化幅度较桩身的幅度明显偏小，这是因为下部土体在上部土体自重逐渐增大的过程中，加速了土体的固结沉降作用，使得土体变得越来越密实，故土的强度参数相应提高，使得悬臂段底端的土压力呈减小的趋势。而对于两种工况下的土压力变化幅度而言，客线作用下既有桩板墙增加冠梁协同工作情况下的墙背土压力变化幅度较在货线作用下既有桩板墙的偏大，但是幅度并不明显。

### 3.3. 桩身剪力结果分析

工况 1、工况 2 下既有桩身剪力随桩深变化曲线。如图 7。



**Figure 7.** Under working conditions 1 and 2, the shear of existing piles varies with pile depth  
**图 7.** 工况 1、工况 2 既有桩桩身剪力随桩深变化曲线

由图 7 可以看出桩身剪力值的变化情况较为复杂, 在工况 1、工况 2 条件下都呈现出正负交替的变化, 在既有桩桩深 2 m 的位置剪力值最大, 分析后可以发现, 此位置正是既有桩板墙中心与既有桩连接的部位, 桩板墙受到土体压力作用于既有桩, 使得桩体在此处受到剪力最大, 易发生剪切破坏。在工况 1、工况 2 条件下, 既有桩在距离桩顶 4 m 的位置桩身剪力值最小, 而此处为既有桩锁口位置, 其中在工况 1 条件下#3、#4 桩身剪力最大值分别为 319.25 kN、296.74 kN, 在工况 2 条件下#3、#4 桩身剪力最大值分别为 439.95 kN、422.98 kN, 得出在工况 2 即拆除货线新建客线作用下比工况 1 只有货线作用下既有桩 #3、#4 的桩身剪力最大值分别增大 120.7 kN、126.24 kN。但可以看出在工况 2 条件下#3、#4 桩身剪力最大值都小于既有桩的抗弯承载力。得到在既有桩板墙增加冠梁新旧组合支挡结构协同作用下能够保证既有桩板墙在货线作用下和拆除货线新建客线作用下都能继续正常工作, 从而避免既有桩发生剪切破坏, 可以用于铁路既有线改建工程, 使铁路既有防护措施及支挡结构加固利用得到了充分的发挥。

### 3.4. 桩身弯矩结果分析

工况 1、工况 2 下既有桩身弯矩随桩深变化曲线。如图 8。

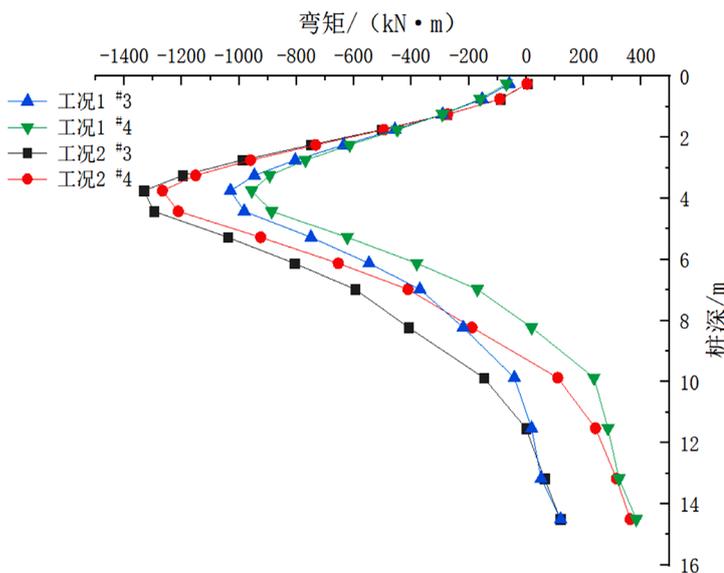
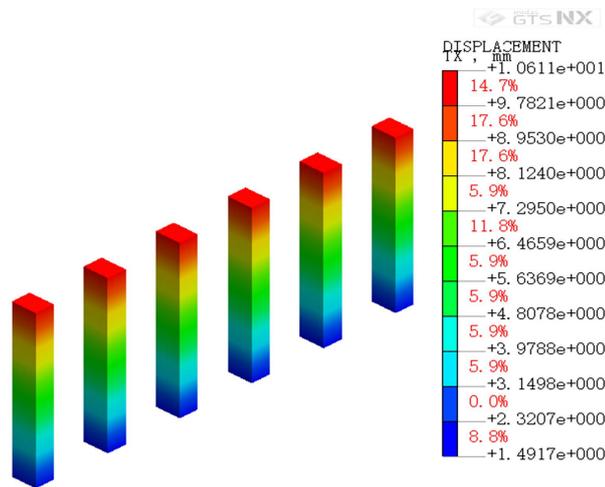


Figure 8. Under working conditions 1 and 2, the bending moment of existing pile varies with pile depth  
图 8. 工况 1、工况 2 既有桩桩身弯矩随桩深变化曲线

由图 8 可以看出在 2 种工况下既有桩的桩身弯矩随桩深变化较为一致, 都是随桩深先逐渐增大, 在桩深的某个截面达到最大值, 然后逐渐减小。既有桩#3、#4 桩身两端受到的弯矩较小, 桩身最大弯矩都出现在距桩顶 4m 的位置。其中在工况 1 条件下#3、#4 弯矩最大值分别为-1030.36 kN·m、-956.11 kN·m, 在工况 2 条件下#3、#4 桩身弯矩最大值分别为-1331.72 kN·m、-1267.18 kN·m, 得出在工况 2 即拆除货线新建客线作用下比工况 1 只有货线荷载作用下既有桩的#3、#4 的桩身最大弯矩值分别增大 301.36kN·m、311.07 kN·m, 但是在工况 2 条件下#3、#4 桩身弯矩最大值弯矩最大值小于既有桩的抗弯承载力, 对比弯矩图和剪力图也可以发现, 在弯矩最大位置处剪力为零, 符合基本力学规律。得到在既有桩板墙增加冠梁新旧组合支挡结构协同作用下能够保证既有桩板墙在货线作用下和拆除货线新建客线作用下都能继续正常工作, 从而避免既有桩发生剪切破坏, 这种结构可以用于铁路既有线改建工程, 使铁路既有防护措施及支挡结构加固利用得到了充分的发挥。

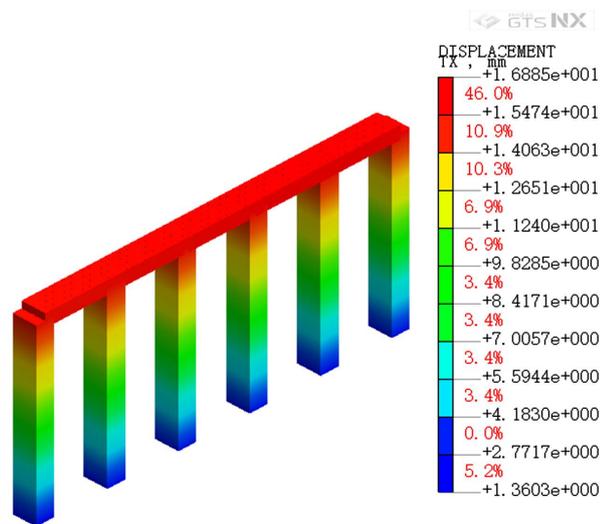
### 3.5. 桩身位移云图

将建立的模型进行计算分析，得到工况 1 条件下既有桩水平位移云图，并提取#3、#4 桩顶水平位移，工况 1 下既有桩 X 向桩身位移，如图 9。



**Figure 9.** Under working condition 1, the displacement of existing pile X to pile body  
**图 9.** 工况 1 下既有桩 X 向桩身位移

将建立的模型进行计算分析，得到工况 2 条件下既有桩水平位移云图，并提取#3、#4 桩顶水平位移，工况 2 下既有桩 X 向桩身位移，如图 10。



**Figure 10.** Under working condition 2, the displacement of existing pile X to pile body  
**图 10.** 工况 2 下既有桩 X 向桩身位移

图 9、图 10 分别为工况 1、2 的桩身水平位移云图，可以看到在桩低处水平位移最小，在桩顶处水平位移最大。其中在工况 1 条件下#3、#4 桩顶位移分别为 10.5959 mm、10.5654 mm，在工况 2 条件下#3、#4 桩顶位移分别为 16.8121 mm、16.8658 mm，得出在工况 2 即拆除货线后新建客线作用下与工况 1 即只有货线作用下既有桩#3、#4 的桩顶最大位移分别增大 6.2162 mm、6.3004 mm，得到既有桩在货线作用下

和拆除货线新建客线作用下,既有桩桩身最大位移值都小于规范的桩顶设限位移 40 mm。得到在既有桩板墙增加冠梁新旧组合支挡结构协同作用下能够保证既有桩板墙在货线作用下和拆除货线新建客线作用下都能继续正常工作,可以用于铁路既有有线改建工程,使铁路既有防护措施及支挡结构加固利用得到了充分的发挥。

#### 4. 结论

以某高铁基于既有路基支挡结构新建客线的路基拓宽项目,采用三维有限元软件 MIDAS GTS-NX 进行数值模拟,对路基桩板墙帮宽结构的受力特性进行了较为详细地研究,得到了以下主要结论:

1) 两种工况下,墙背最大的土压力均出现在距离既有桩顶部以下 4 m 位置,桩底部的土压力变化幅度较桩身的幅度明显偏小,客线作用下既有桩板墙增加冠梁协同工作情况下的墙背土压力变化幅度较在货线作用下既有桩板墙的偏大,但是幅度并不明显。

2) 两种工况下,桩身剪力值的变化情况较为复杂,都呈现出正负交替的变化,在既有桩桩深 2 m 的位置剪力值最大,得到在工况 2 条件下#3、#4 桩身剪力最大值都小于既有桩的抗弯承载力。得到在既有桩板墙增加冠梁新旧组合支挡结构协同作用下能够保证既有桩板墙在货线作用下和拆除货线新建客线作用下都能继续正常工作,从而避免既有桩发生剪切破坏,可以用于铁路既有有线改建工程,使铁路既有防护措施及支挡结构加固利用得到了充分的发挥。

3) 两种工况下,既有桩的桩身弯矩随桩深变化较为一致,都是随桩深先逐渐增大,在桩深的某个截面达到最大值,然后逐渐减小。但是在工况 2 条件下#3、#4 桩身弯矩最大值弯矩最大值小于既有桩的抗弯承载力,对比弯矩图和剪力图也可以发现,在弯矩最大位置处剪力为零,符合基本力学规律。得到在既有桩板墙增加冠梁新旧组合支挡结构协同作用下能够保证既有桩板墙在货线作用下和拆除货线新建客线作用下都能继续正常工作,从而避免既有桩发生剪切破坏,这种结构可以用于铁路既有有线改建工程,使铁路既有防护措施及支挡结构加固利用得到了充分的发挥。

4) 两种工况下,既有桩桩身水平位移在桩低处水平位移最小,在桩顶处水平位移最大。得到既有桩在货线作用下和拆除货线新建客线作用下,既有桩桩身最大位移值都小于规范的桩顶设限位移 40 mm。得到在既有桩板墙增加冠梁新旧组合支挡结构协同作用下能够保证既有桩板墙在货线作用下和拆除货线新建客线作用下都能继续正常工作,可以用于铁路既有有线改建工程,使铁路既有防护措施及支挡结构加固利用得到了充分的发挥。

#### 参考文献

- [1] 秦旗,韩仙华. 高速铁路深路堑框架型桩板墙二维有限墙联合支挡结构受力特性分析[J]. 山东工业技术, 2015(22): 83-91.
- [2] 柳彬,程心意,孟照蔚,等. 抗滑桩桩间支护结构分析[J]. 资源环境与工程, 2013(4): 509-512.
- [3] 曾新平. 抗滑桩与重力式挡土墙联合支挡结构受力特性分析[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2012.
- [4] 王恒强. 抗滑桩与重力式挡土墙联合支挡结构受力特性分析[J]. 山东工业技术, 2015(22): 83-91.
- [5] 柳滨源. 桩-墙复合抗滑支挡结构工程计算与设计方法研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆交通大学, 2016.
- [6] 石志龙. 既有有线条件下路基桩板墙帮宽结构数值研究[J]. 路基工程, 2019, 203(2): 92-96.
- [7] 曾新平. 抗滑桩与重力式挡土墙联合支挡结构受力特性分析[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2012.
- [8] 张长江. 桩基扶壁式挡土墙设计理论及工程应用[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国地质大学, 2013.
- [9] 华宏亮,李亚军,马力,等. 水平推力模拟路基边坡支挡结构受力的数值及模型试验研究[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2015(9): 33-35.