

# 桩板墙在深路堑中的应用分析与优化设计

李 伟, 蔡禄元, 胡文华

兰州交通大学土木工程学院, 甘肃 兰州  
Email: 1239741040@qq.com, 756347215@qq.com, 1424752982@qq.com

收稿日期: 2020年12月28日; 录用日期: 2021年1月20日; 发布日期: 2021年1月29日

## 摘 要

随着社会的发展, 铁路, 公路领域工程建设中, 出现了一些深路堑工程。在深路堑工程中由于挖方的原因会导致初始地应力的重新分布, 使得原有的地应力平衡被打破, 由此引发了一系列的工程边坡稳定性问题, 所以在工程中选择合适的结构至关重要。本文采用Midas GTS有限元软件对某深路堑桩板墙进行数值模拟受力分析, 并且对比研究在不同工况下的桩板墙, 进行优化设计。最终得到其受力特性, 选择桩身20 m, 截面尺寸2 × 2.5 m, 桩间距6 m作为最优方案。

## 关键词

深路堑桩板墙, 受力分析, 数值模拟, 优化设计

# Analysis and Optimization Design of Pile Slab Wall on Deep Cut

Wei Li, Luyuan Cai, Wenhua Hu

College of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou Gansu  
Email: 1239741040@qq.com, 756347215@qq.com, 1424752982@qq.com

Received: Dec. 28<sup>th</sup>, 2020; accepted: Jan. 20<sup>th</sup>, 2021; published: Jan. 29<sup>th</sup>, 2021

## Abstract

With the development of society, some deep cutting projects have appeared in the construction of railway and highway projects. In deep cutting engineering, excavation will lead to the redistribution of initial ground stress and break the original ground stress balance, thus causing a series of stability problems of engineering slope. Therefore, it is very important to choose the proper structure in the engineering. In this paper, Midas GTS finite element software is used to carry out numerical simulation stress analysis on a pile slab wall in a deep cutting, and a comparative study is conducted on the pile slab wall under different working conditions to optimize the design. Finally, its stress characteristics are obtained. The optimal scheme is 20 m pile, 2 × 2.5 m section size and 6 m pile spacing.

## Keywords

Deep Cut Pile-Board Wall, Force Analysis, Numerical Simulation, Optimum Design

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

在公路铁路工程大力发展下,高边坡的支挡防护变得尤为重要,在众多的支挡结构中新型支挡结构桩板墙脱颖而出,桩板墙是近年来比较适用于高边坡工程的一种新型支挡结构[1],具有良好的收坡作用且加固效果很好,桩板墙结构施工便捷,节约土地外形美观,支护效果好,在岩土边坡工程[2]中广泛使用。

Begemann 和 De Leeuw [3]定义了压力法,并且给出了压力的计算方法:在计算从地面来的荷载作用在桩上的力时,可以将桩看成是刚性桩,当计算水平位移和应力分布时,可以用弹性法,桩则可以看作等值桩板墙。

巨能攀[4]等利用数值模拟分析方法对土体和桩共同作用下,桩上部土体的剩余下滑力形式,桩身传力模式以及内力计算方法进行分析,得出结论,桩板墙可以改善桩后土体的应力分布特征。

袁正龙[5]桩板墙路基在城市、增建二线等用地受限地区可有效减少占地、节约投资。

罗渝[6]根据多块体滑移理论,采用极限分析上限定理,提出了一种利用桩板墙增强边坡稳定性的新分析方法。

## 2. 桩板墙理论计算

### 2.1. 土压力分类

由支挡结构的移动方向可将土压力分为:静止土压力  $E_0$ 、主动土压力  $E_a$  和被动土压力  $E_p$ 。数值上的大小排列为  $E_a < E_0 < E_p$ 。如图 1 所示。

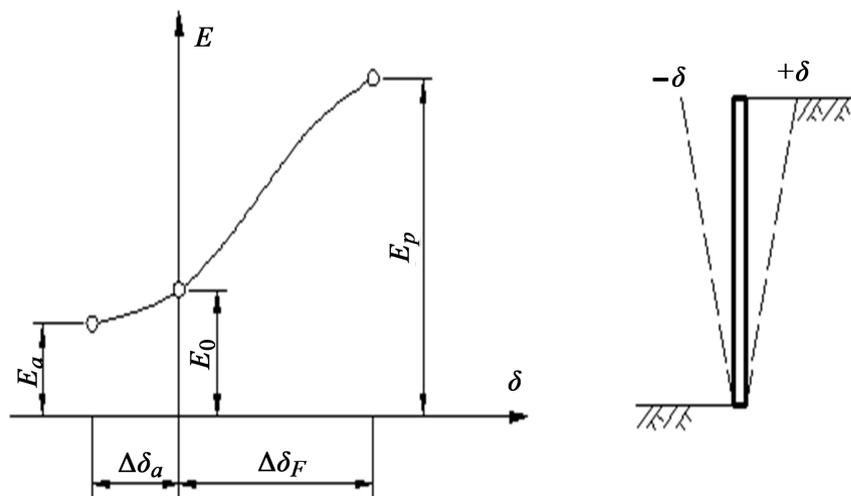


Figure 1. Diagram of displacement of retaining wall and earth pressure

图 1. 挡土墙位移与土压力关系图

在墙后填土的土压力下，土体处于弹性平衡状态，墙体没有位移，此时土压力为静止土压力  $E_0$ ；当挡土墙离开土体位移，土体处于主动极限平衡状态，此时土压力为主动土压力  $E_a$ ；当挡土墙挡土墙向填土方向位移，土体处于被动极限平衡状态，时土压力为被动土压力  $E_p$ 。

## 2.2. 桩身内力计算

桩的内力计算可将桩分为悬臂端和锚固段进行计算。悬臂段按悬臂梁的计算方法进行计算，锚固段采用弹性抗力法进行计算。

当受到的荷载类型不同时，采用不同公式计算，如下所示：

① 当受到的荷载为均布荷载时(k 法)，桩顶的挠曲微分方程为

$$EI \frac{d^4 x}{dy^4} + xKB_p = 0 \quad (1)$$

式中  $xKB_p$ ，为地基作用于桩上的水平抗力。

② 当所受荷载为线性分布荷载时(m 法)，桩的挠曲微分方程为

$$EI \frac{d^4 x}{dy^4} + myxB_p = 0 \quad (2)$$

将此微分方程求解，可计算出锚固段任意截面的位移和内力结果。

## 3. 三维模型的建立及参数选取

### 3.1. 本构模型和单元体的选择

1) 本构模型的选择

根据某工程的土体参数以及具体的施工步骤，本文采用 Midas GTS[7]软件建模，拟采用摩尔-库仑准则[8]模拟整个结构的施工过程。

2) 单元体的选择

桩体采用一维梁单元模拟[9]；两侧挡土板采用二维板单元模拟，土体选用三维实体单元模拟。

### 3.2. 几何模型的建立

1) 模型尺寸

本文选取最不利位置进行数值模拟分析，建立  $100 \text{ m} \times 40 \text{ m} \times 18 \text{ m}$  的模型。如图 2 所示。

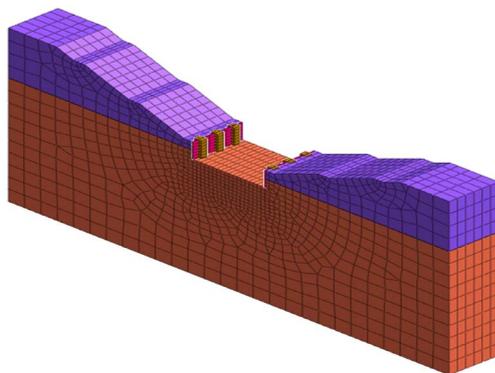


Figure 2. Three-dimensional finite element model of cutting pile wall  
图 2. 路堑桩板墙三维有限元模型

## 2) 土体参数

依据工程勘察报告，该地段各土层土质参数均参考地勘报告，具体取值见表 1。

**Table 1.** The value of material related parameterst

**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)
全风化层	3D 实体	18.9	0.33	50
强风化层	3D 实体	20	0.3	150
桩	1D 梁单元	20	0.25	31,500
挡土板	2D 板单元	20	0.25	31,500

## 3.3. 开挖过程模拟

数值模拟的施工步骤分为 6 步：

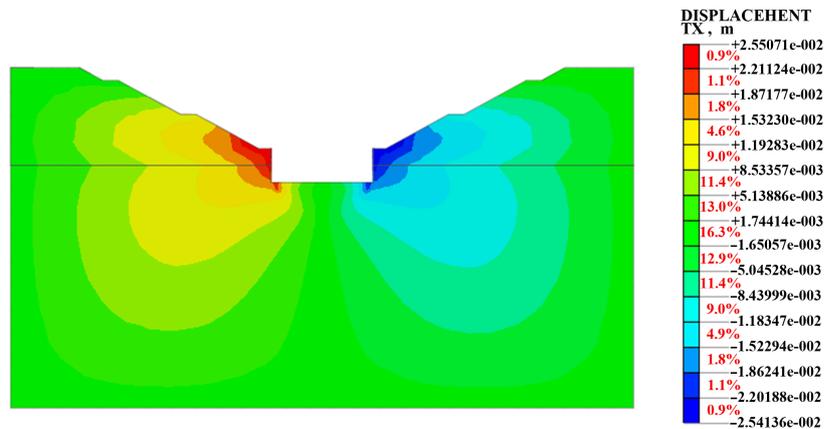
- ① 初始应力阶段；
- ② 开挖第一层土；
- ③ 开挖第二层土；
- ④ 开挖第三层土；
- ⑤ 挖孔建桩；
- ⑥ 安装挡土板。

## 4. 桩板墙三维数值模拟结果分析

### 4.1. 整体应力

#### 4.1.1. 整体水平应力

如图 3 所示，水平最大位移出现在路堑两侧桩顶处。呈蝴蝶状逐渐扩散减小。



**Figure 3.** Horizontal displacement contour map

**图 3.** 水平位移等值云图

如图 4 所示，结构土体水平应力法人整体分布较均匀，分布趋势随土层深度的增加而递增。水平位移的峰值出现在桩顶部位，越靠近路堑位移趋于变大。应力集中发生在路堑底部中心位置，越往下桩侧土体的水平位移越小。

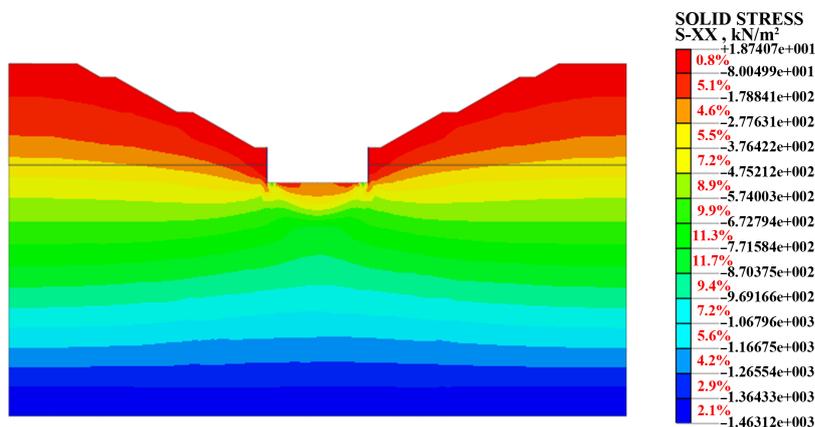


Figure 4. Curve: system result of standard experiment

图 4. 标准试验系统结果曲线

#### 4.1.2. 整体竖向应力

如图 5 所示, 结构整体的竖向位移由上到下由中心向两边呈现扩散式的减小趋势, 竖向位移的最大值在路堑底部中心位置。

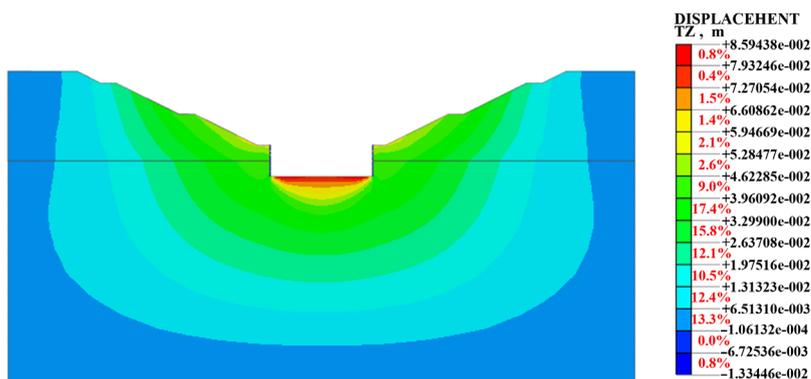


Figure 5. Vertical displacement contour map

图 5. 竖向位移等值云图

如图 6 所示, 结构整体的竖向应力分布也较均匀, 分布趋势为从上到下依次随地层深度而增大。

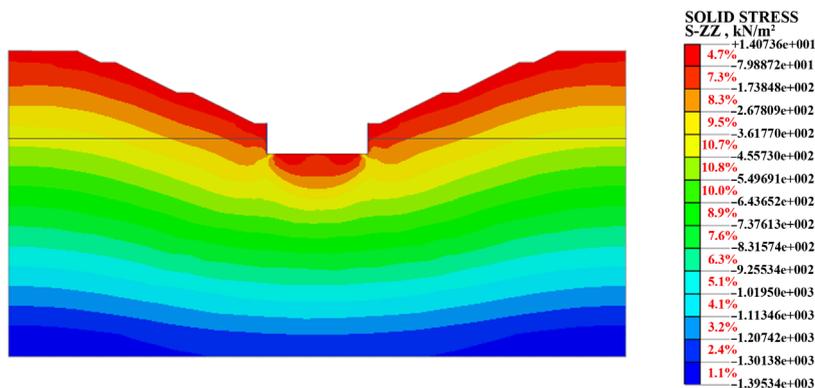


Figure 6. Vertical stress equivalent nephogram

图 6. 竖向应力等值云图

## 4.2. 桩身应力

由图 7 可知，桩身的最大剪力值为 508 KN。

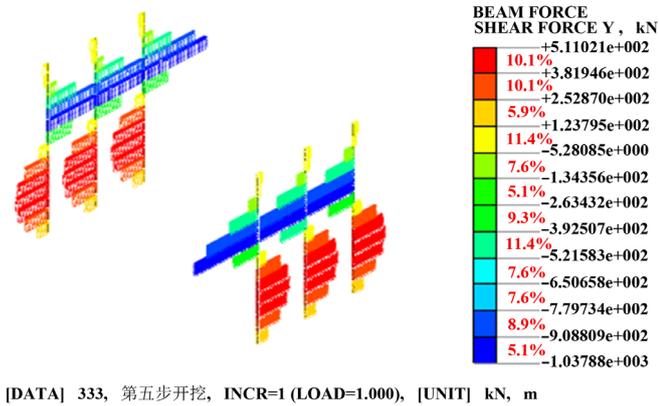


Figure 7. Pile shear diagram  
图 7. 桩身剪力图

由图 8 可知，桩身弯矩的最大值出现在剪力为零的拐点处， $M_{\max} = 3532 \text{ kN}\cdot\text{m}$ ，由相关公式可得桩身的抗弯承载力为  $14,567 \text{ kN}\cdot\text{m}$  远大于桩身最大弯矩，所以安全储备量较大。

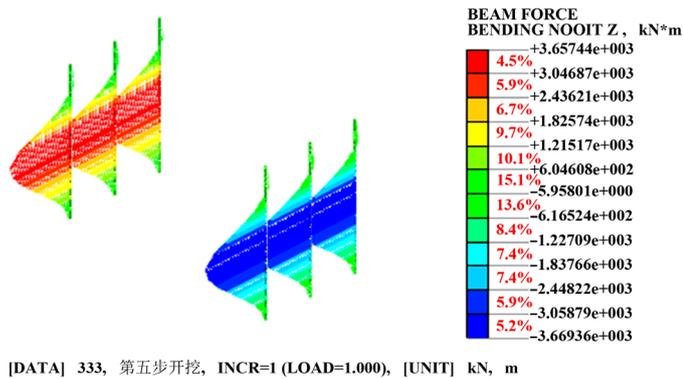


Figure 8. Pile bending moment diagram  
图 8. 桩身弯矩图

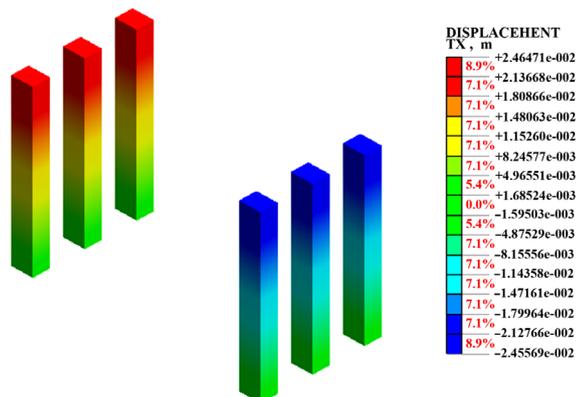


Figure 9. Pile displacement diagram  
图 9. 桩身位移图

由图 9 可知桩身的最大位移在桩顶处, 最大位移为 2.045 cm。根据《铁路路基支挡结构设计规范》(TB 10025-2006) [10] 的规定: 桩顶位移应小于桩悬臂段长度的 1/100, 且不大于 8 cm。

综合以上分析可知, 结构内力、变形和稳定性满足要求。

### 4.3. 桩身长度长对比

桩身长度分别取 17 m、19 m、21 m、22 m 几种不同工况进行计算。桩体出地面 8 m 固定, 锚固深度分别 9 m, 11 m, 12 m, 13 m, 14 m。

由图 10 与图 11 可知, 随着锚固深度的增加, 桩身的最大剪力和最大弯矩随之增加。

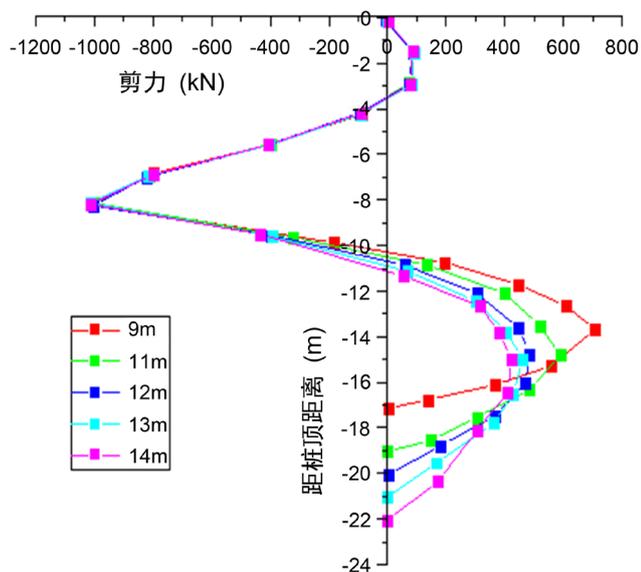


Figure 10. Comparison diagram of shear force under different pile anchorage depths  
图 10. 不同桩锚固深度下剪力对比图

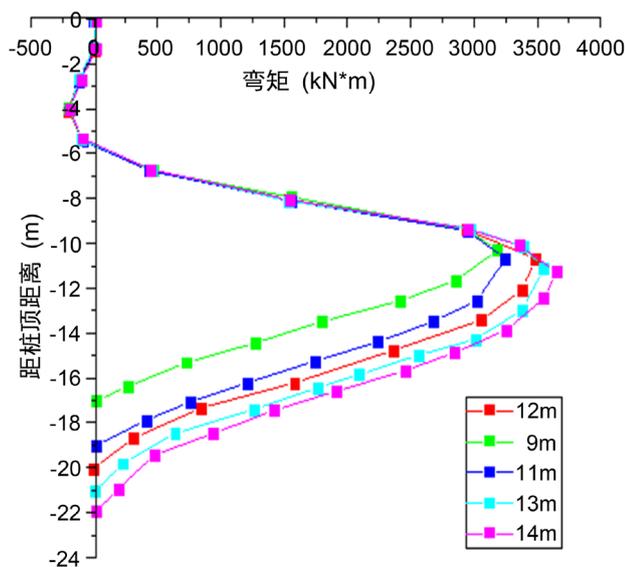


Figure 11. Comparison diagram of bending moment at different pile anchorage depths  
图 11. 不同桩锚固深度下弯矩对比图

由表 2 数值所示, 以锚固深度 12 m 作为基准, 当深度为 10 m 时, 桩顶位移减小了 0.1 mm, 最大剪力减小了 40 kN, 最大弯矩减小了 443 kN·m; 当深度为 11 m 时, 桩顶位移增大了 0.7 mm, 最大剪力减小了 22 kN, 最大弯矩减小了 172 kN·m; 当深度为 13 m 时, 桩顶位移减小了 0.7 mm, 最大剪力减小了 102 kN, 最大弯矩增大了 443 kN·m; 当深度为 14 m 时, 桩顶位移减小了 0.4 mm, 最大剪力减小了 128 kN, 最大弯矩增大了 443 kN·m。

**Table 2.** Calculation results of pile stress of different pile length

**表 2.** 不同桩长桩身应力计算结果

桩身长度(m)	桩顶水平位移(mm)	桩身最大弯矩(kN·m)	桩身最大剪力(kN)
17	21.1	3114	987
19	21.9	3385	1005
20	21.2	3557	1027
21	20.5	3659	982
22	20.8	3685	994

由对比可得, 随着桩身锚固深度的增加, 内力的变化幅值的逐渐变小, 说明超过某一锚固深度后, 对桩身内力影响有限。考虑到地下水以及经济性要求的限制, 最终取桩长取 20 m 最为合理。

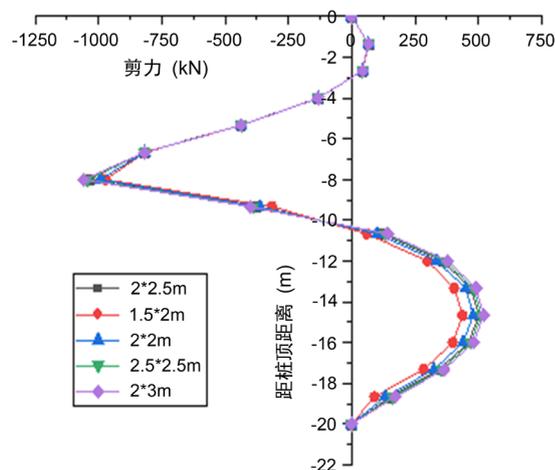
#### 4.4. 桩截面尺寸对比

分别取  $1.5 \times 2$  m,  $2 \times 2$  m,  $2 \times 2.5$  m,  $2.5 \times 2.5$  m,  $2.5 \times 3$  m 的截面尺寸进行数值分析来研究不同尺寸下桩的内力和变形的变化。

如图 12, 图 13 所示, 随着桩的截面尺寸的增大, 桩身的最大剪力以及最大弯矩都趋于变大的趋势。

由表 3 可知以桩身截面尺寸  $2 \times 2.5$  m 作比较,  $1.5 \times 2$  m 的桩桩顶位移增大了 1.3 mm, 最大剪力减小了 64 kN, 桩最大弯矩减小了 532 kN·m;  $2 \times 2$  m 的桩, 桩顶位移增加了 0.8 mm, 桩最大剪力减小了 41 kN, 桩最大弯矩减小了 341 kN·m;  $2.5 \times 2.5$  m 的桩桩顶位移减小了 0.2 mm, 桩最大剪力增加了 8 kN, 桩最大弯矩增加了 93 kN·m;  $2 \times 3$  m 的桩桩顶位移减小了 0.5 mm, 桩最大剪力增大了 22 kN, 桩最大弯矩增大了 189 kN·m。

由对比分析可知: 随着桩身截面尺寸的变大, 桩顶最大位移逐渐变小, 最大剪力以及最大弯矩都是逐渐变大, 但是变化幅度越来越小。考虑经济性, 施工难度以及安全性取  $2 \times 2.5$  m。



**Figure 12.** Comparison diagram of section shear force under different section sizes of pile  
**图 12.** 不同桩截面尺寸下截面剪力对比图

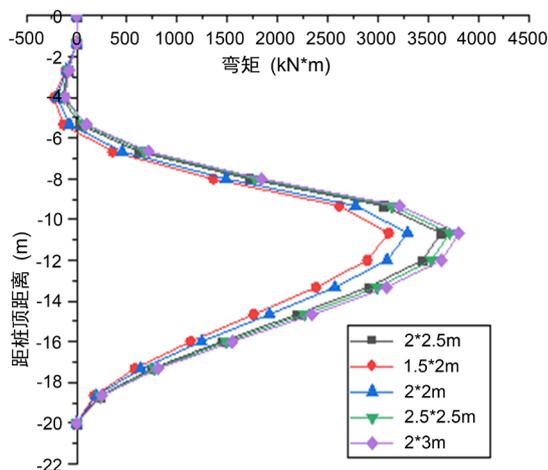


Figure 13. Comparison diagram of bending moment under different section sizes of pile  
图 13. 不同桩截面尺寸下弯矩对比图

Table 3. Calculation results of pile stress of different pile sections

表 3. 不同桩截面桩身应力计算结果

桩截面高度 h (m)	桩截面宽度(b)	桩最大水平位移(mm)	桩最大弯矩(kN·m)	桩最大剪力(kN)
1.5	2	22.5	3105	953
2	2	22.0	32916	976
2	2.5	21.2	3457	1017
2.5	2.5	21.0	3550	1025
2	3	20.7	3646	1039

#### 4.5. 桩间距对比

在其他条件不变的情况下, 分别取 4 m, 5 m, 6 m, 7 m 和 8 m 的桩间距进行数值模拟计算, 对比分析其内力变形规律。

由图 14 和图 15 可知, 在不同的桩间距下, 随着桩间距的增加, 桩身最大剪力以及最大弯矩逐渐增大。

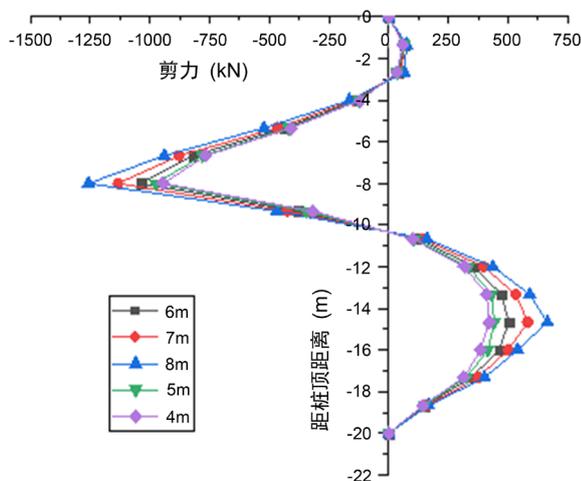


Figure 14. Comparison diagram of shear force under different pile spacing  
图 14. 不同桩间距下剪力对比图

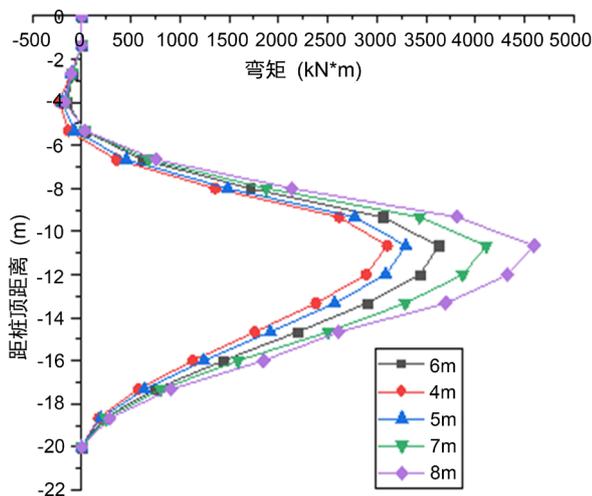


Figure 15. Comparison diagram of bending moment under different pile spacing  
图 15. 不同桩间距下弯矩对比图

由表 4 可得以桩间距 6 m 最作为基准作比较。4 m 桩间距时, 相比其桩顶位移减小了 1.5 mm, 桩最大剪力减小了 140 kN, 最大弯矩减小了 512 kN·m; 5 m 桩间距时, 相比其桩顶位移减小了 1.4 mm, 桩最大剪力减小了 82 kN, 最大弯矩减小了 314 kN·m; 7 m 桩间距时, 相比其桩顶位移增大了 6.1 mm, 桩最大剪力增大了 98 kN, 最大弯矩增大了 502 kN·m; 8 m 桩间距时, 相比其桩顶位移增大了 11.1 mm, 桩最大剪力增大了 970 kN, 最大弯矩增大了 189 kN·m。

Table 4. Calculation results of pile stress at different pile spacing  
表 4. 不同桩间距桩身应力计算结果

桩间距(m)	桩最大水平位移(mm)	桩最大弯矩(kN·m)	桩最大剪力(kN)
4	18.3	3030	860
5	19.5	3228	918
6	21.2	3542	1000
7	25.7	4044	1098
8	32.3	4512	1310

通过对比分析可知, 桩间距越小, 相应的桩顶最大位移和最大剪力最大弯矩也呈递减趋势。当桩间距减小到 6 m 时, 其位移剪力以及弯矩的变化幅度明显较小, 考虑安全经济性选择 6 m 桩间距。

## 5. 结论

本文就深路堑桩板墙做数值模拟分析, 分析其受力特性以及不同施工状况下的桩板墙内力分析对比做出优化设计。

主要结论如下:

1) 整个结构的水平应力分布较为均匀, 水平位移倾向于桩板墙内侧方向, 水平最大位移出现在桩顶。竖向应力分布也较均匀, 竖向位移的最大值出现在路堑底部中心位置。竖向应力与水平应力的变化趋势均为随地层深度的增加而递增。路堑两侧的桩体的弯矩极值均在锚固段顶部, 桩体的最大位移出现在桩顶且满足规范要求, 此桩板墙结构满足设计要求不会发生失稳现象。

2) 不同的桩长截面尺寸以及桩间距下, 桩身的内力以及位移均有所变化, 但在到达某一数值后变化幅度明显减小说明在桩身的锚固段达到一定的长度后, 对桩身内力逐渐没有了影响。在考虑地质概况, 施工难度以及经济安全可行性的条件下选择桩身 20 m, 截面尺寸  $2 \times 2.5$  m, 桩间距 6 m 作为最优方案。

## 参考文献

- [1] 李海光. 新型支挡结构设计工程实例[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004: 145-148.
- [2] 刘兴远. 边坡工程[M]. 北京: 中国建筑工程出版社, 2007: 121-126.
- [3] Begemann, H.K.S. and De Leeuw, E.H. (1972) Horizontal Earth Pressures on Foundation Piles as a Result of Nearby Soil Fills. *Proceedings of the 5th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Madrid, 17-22 July 1961, 3-9.
- [4] 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(4): 365-370.
- [5] 袁正龙. 桩板墙内侧土压力与工程特性研究[J]. 施工技术, 2019: 13-16.
- [6] 罗渝, 许强, 何思明, 等. 桩板墙结构加固边坡的稳定性分析[J]. 西南交通大学学报, 2014, 49(6): 1-6.
- [7] 李治. Midas/GTS 在岩土工程中的应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012: 2413-2413.
- [8] 东南大学, 浙江大学, 湖南大学等. 土力学[M]. 北京: 中国建筑出版社, 2001: 72-78.
- [9] 许宏发, 吴华杰. 桩土接触单元参数分析[J]. 探矿工程, 2002(5): 10-12.
- [10] 铁道第二勘察设计院. TB 10025-2006 铁路路基支挡结构设计规范[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2006.