doi:10.3969/j.issn.1673−9833.2024.06.002

双排桩支承肋柱式桩板墙联合锚碇墙结构数值研究

吴　政，梁　斌，高乐星，贺　敏

（湖南工业大学 土木工程学院，湖南 株洲 412007）

摘　要：针对重力式挡墙无法满足错综复杂场地支护需要的问题，提出一种双排桩支承肋柱式桩板墙联合锚碇墙的新型支挡结构，依托青岛某高填方边坡工程项目，基于数值模拟软件 FLAC^{3D} 分别建立了锚索及刚性加筋板的新型锚碇板墙和双排桩支承肋柱式桩板墙联合锚碇墙的边坡支护数值模型。并对该边坡在两种支护结构下的安全稳定系数、挡墙位移及桩板墙弯矩受力情况进行对比分析。数据表明：采用锚索及刚性加筋板的新型锚碇板墙支护结构的边坡安全稳定系数、挡墙顶部位移及桩板墙最大弯矩分别为 13.6、0.261 m 及 593 kN·m；而采用双排桩支承肋柱式桩板墙联合锚碇墙支护结构的边坡安全稳定系数、挡墙顶部位移及桩板墙最大弯矩分别为 13.9、0.225 6 m、269.3 kN·m。双排桩支承肋柱式桩板墙联合锚碇墙支护结构具有更好的安全性及抗变形能力。随后对双排桩支承肋柱式桩板墙联合锚碇墙结构的设计参数进行研究，发现随着桩长、桩径增大，支护结构具有更强的抗横向变形能力。

关键词：锚碇板；双排桩；边坡支护；新型组合支挡结构；FLAC^{3D} 数值模拟

中图分类号：TU473.1　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1673−9833(2024)06−0009−07

引文格式：吴　政，梁　斌，高乐星，等 . 双排桩支承肋柱式桩板墙联合锚碇墙结构数值研究 [J]. 湖南工业大学学报，2024，38(6)：9−15.

A Numerical Study on the Combined Anchor Wall Structure of the Double-Row Pile-Supported Ribbed Column Pile Sheet Wall

WU Zheng，LIANG Bin，GAO Lexing，HE Min

（College of Civil Engineering，Hunan University of Technology，Zhuzhou Hunan 412007，China）

Abstract：In view of the problem that gravity retaining walls fail to meet the needs of complex site support, a new type of support structure has thus been proposed with the combined anchor wall of the double row pile supported ribbed column pile plate wall. Based on a high fill slope engineering project in Qingdao, numerical simulation software FLAC^{3D} is used to establish numerical models for slope support of new anchor plate walls with anchor cables and rigid reinforced plates, as well as the combined anchor wall of the double row pile supported ribbed column pile plate wall, followed by a comparison and analysis of the safety and stability coefficient, retaining wall displacement, and pile sheet wall bending moment stress of the slope under two types of support structures. The data shows that the slope safety stability coefficient, top displacement of the retaining wall, and maximum bending moment of the pile plate wall supported by a new type of anchor plate wall structure using anchor cables and rigid reinforced plates are 13.6, 0.261 m and 593 kN·m, respectively. The slope safety and stability coefficient, top displacement of the retaining wall, and

收稿日期：2023−10−18

基金项目：湖南省自然科学省市联合基金资助项目（2021JJ50039）

作者简介：吴　政，男，湖南工业大学硕士生，主要研究方向为边坡与隧道工程，E-mail：986833199@qq.com

通信作者：梁　斌，男，湖南工业大学讲师，博士，硕士生导师，主要研究方向为边坡与隧道工程，E-mail：252554582@qq.com

maximum bending moments of the pile sheet wall supported by double row piles and ribbed column pile sheet wall combined with anchor wall support structure are 13.9, 0.225 6 m and 269.3 kN·m respectively. The double row pile supported ribbed column pile plate wall combined with anchor wall support structure is characterized with a better safety and deformation resistance ability. Subsequently, a study is conducted on the design parameters of the combined anchor wall structure of the double row pile supported ribbed column pile sheet wall, and it is found that the support structure exhibits a stronger resistance to lateral deformation with the increase of the pile length and diameter.

Keywords：anchor plate；double row pile；slope support；new combined support structure；FLAC^{3D} numerical simulation

0 引言

在山区进行施工建设时，不可避免出现大量高填方边坡。为适应这些由于地形及周边环境限制导致无放坡条件的高填方边坡，新型组合支挡结构成为边坡支护设计的重点[1−3]。

20 世纪中旬，欧美学者开始对排桩体系进行研究及应用。Chang C. Y. 等[4]首次提出门架式双排桩的概念，并且进行了不同结构的试验对比，证实了门架式双排桩相对于其他传统支挡结构而言不仅支护能力更强，而且结构内力和变形更小。在计算方法方面，文献 [5−9] 基于现场监测结果，通过对门式双排桩结构内力与土体位移定量关系的研究，提出了土压力法等简化方法。组合式抗滑支挡结构在国内的研究与工程应用始于 20 世纪末。1986 年铁道部第二勘测设计院科研所分别建立了排架桩和双排单桩模型，通过试验对比表明，桩间设置圈梁可以增大双排抗滑桩稳定性[10]。徐良德等[11]进行的排架桩和双排单桩的室内模型试验结果显示：双排桩支护结构具有支护后位移小，桩弯矩小等特点。聂庆科等[12]基于双排桩室内试验、数值模拟及现场监测结果，对排桩上的结构内力以及变形情况进行研究。詹智麟等[13]通过有限元软件 PLAXIS 3D 研究了不同布桩方式对 h 型双排抗滑桩在基坑工程中的影响。

综观国内外以桩板墙为主的高轻型支挡措施中，普遍采用预应力锚索桩板墙、锚定板挡土墙、预应力锚索框架等支挡形式。尽管学者及工程技术人员对椅式桩板墙等组合式抗滑桩支挡结构进行过研究及应用，但双排桩支承肋柱式桩板墙联合锚碇墙支挡结构在工程中的研究及应用尚未见相关报道。因此，本文提出了一种方法，采用 FLAC^{3D} 数值模拟软件分析其受力、变形情况，并将其应用于青岛某建设项目 18 m 高回填边坡。并将其与原工程设计支挡结构进行对比分析，证实该类结构具有一定的优越性。

1 双排桩支承肋柱式桩板墙联合锚碇墙支护结构

双排桩支承肋柱式桩板墙联合锚碇墙支护结构包括钢筋混凝土双排桩、承台、挡土板、预应力拉杆与锚碇墙，结合了悬臂式桩板墙、抗滑桩、锚碇板挡土墙的技术特点。其结构形式如图 1 所示，肋柱平面布置方案如图 2 所示。

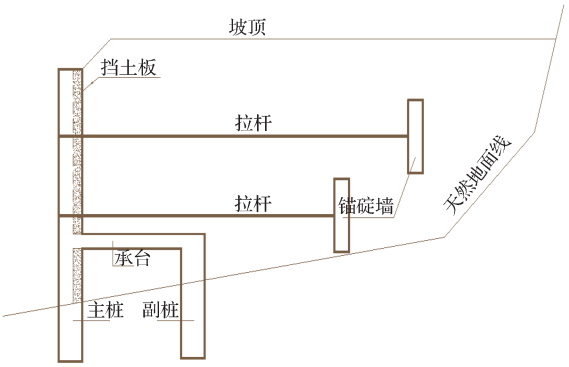


图 1 双排桩支承肋柱式桩板墙联合锚碇墙支护结构

Fig. 1 Double-row pile-supported ribbed column type pile sheet wall combined with the anchor-anchor wall support structure

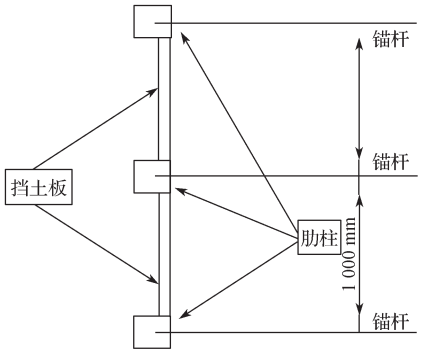


图 2 肋柱平面布置方案

Fig. 2 Ribbed column layout plan

双排桩支承肋柱式桩板墙联合锚碇墙支护结构主要有以下几个方面的特点：

1）桩板组合形式多样，适用于不同地质条件。锚碇板可以根据软弱夹层面的位置设置为分离式或整体式。承台以下的主副桩可以结合地形地质条件合理布置。

2）承台上部的填筑土体（包括荷载）不仅提高了支挡结构的抗滑、抗倾覆能力，而且由于桩基受到垂直向下的竖向力作用。使得桩身的抗剪强度得到进一步增强。在结构稳定性以及抗沉降方面，具有显著的优越性。

3）双排桩支承肋柱式桩板墙联合锚碇墙支护结构为超静定结构，受外力分布更加均匀，其结构强度更高，负载能力更强，在多余约束破坏后仍能承载原设计负荷。

4）当工程地质条件良好、岩层坚硬稳定时，可以将锚碇拉杆改为锚索，或者采用锚索与锚碇拉杆相结合的形式。

5）下部桩基设置可提高支挡结构的抗滑移能力。

2　工程概况

青岛某建设项目边坡支护工程的支护深度约 2.0~18.0 m，支护段周长约 1 780 m，属高填方边坡。场地地貌类型以剥蚀残丘地貌为主，东南丘陵起伏，北部岗地平缓，东北低平开阔，整个地势由西向东呈阶梯状倾斜。局部为山前冲积地貌，地形起伏较大，大体呈西高东低、南高北低的趋势 [14]。

地质条件。经过现场勘察调查，拟建场地内未发现明显活动性断裂带或其次生构造，勘察深度范围内未发现滑坡、泥石流和大面积地面沉降等不良地质作用。基岩面总体较平直，层间结合差。地层自上而下划分为 3 个工程地质层，分别为素填土层、耕土层、风化花岗片麻岩层。边坡断面图如图 3 所示。

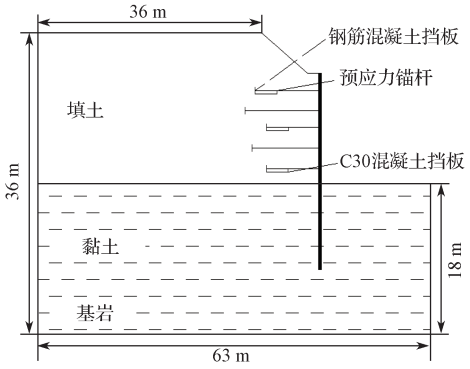


图 3　高填方边坡断面图

Fig. 3　High-fill slope cross-section diagram

素填土：红褐色、褐黄色，呈稍密－松散状，稍湿－湿，主要由硬塑－可塑状黏性土组成，局部混砖块及砼块，不均匀分布，堆填时间小于 5 a。

耕土：黄褐色，稍湿，松散，主要由粉土、黏性土组成，有少量的中细砂，地表见少量植物根系。

强风化花岗片麻岩：花岗片麻状构造，原岩结构大部分被破坏，主要矿物为钾长石、石英，次要矿物为黑云母、角闪石，成分显著变化，风化裂隙发育。

竣工后工程照片如图 4 所示。

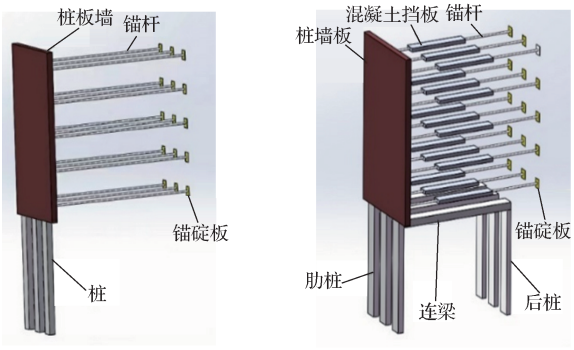
图 4　双排桩支承肋柱式桩板墙联合锚碇墙支护结构外立面

Fig. 4　External facade of double-row pile-supported ribbed column type pile-slab-wall combined with the anchor-anchor wall support structure

3　数值模型建立

3.1　模型尺寸

课题组利用有限差分软件 FLAC^{3D}，分别建立了锚索及刚性加筋板的新型锚碇板墙，以及双排桩支承肋柱式桩板墙联合锚碇墙，作为支护结构的高填方边坡工程三维数值模型。两种支护结构设计模型分别如图 5 所示。



a）锚索及刚性加筋板的新型锚碇板墙　　b）双排桩支承肋柱式桩板墙联合锚碇墙

图 5　两种支护结构示意图

Fig. 5　Schematic diagrams of the two structures

设定从左到右为 x 方向，从下到上为 z 方向，从外到内为 y 方向。建立的高填方边坡数值模型由填土、耕土、基岩和支挡结构组成。边坡总高度为 18 m，坡脚至下边界尺寸 0.75H（H 为边坡总高度），右边

界至坡顶边界尺寸取 2H，左边界至坡顶边界尺寸取 1H。模型总尺寸为 x 方向 63 m，z 方向 36 m，y 方向 4 m。

3.2 边界条件

数值模型边界条件的设定基于支护结构的实际应力状态。本文限制了模型的边界位移，根据平面应变计算，假定边坡工程数值模型周边无限延长。对于三维数值模型，顶部为自由边界，底部近似为边坡支护对其无影响（深度足够大），施加固定约束，模型四周施加法向约束，桩土间设置接触面，考虑桩土摩擦效应，接触面赋值（摩擦角、黏聚力）取桩周土体的 80%[15−18]。接触面切向刚度、法向刚度是桩土接触面的两个重要参数，切向刚度控制接触面的滑移，影响桩基承载力，而法向刚度控制接触面处桩基与桩周土体的压缩，影响桩体沉降。切向刚度 k_s 取 1 000 kN/m^3；法向刚度 k_n 取 100 000 kN/m^3[19]。通过在 pile 底部设置与土体新的连接，将桩底嵌固于岩土层。

3.3 模型参数

对于桩及锚碇板单元，分别采用 pile、shell 结构单元，参数见表 1。边坡土层参数根据实际场地工程地质条件和试验结果确定，具体物理力学参数如表 2 所示。

表 1 结构基础参数

Table 1 Structural foundation parameters

材料	弹性模量 E/MPa	泊松比 μ	重度 γ/(kN·m^{-3})	屈服强度 σ_s/MPa	桩径、板厚 D/m
桩	3×10^4	0.17	25	3.45×10^2	0.6
锚碇板	2×10^5	0.17	78	4×10^2	0.1

表 2 土层物理力学参数

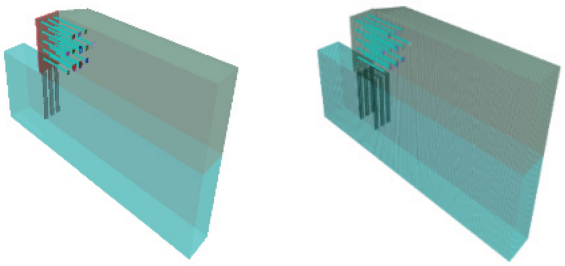
Table 2 Physical and mechanical parameters of soil layers

土层编号	土层名称	土层厚度 H/m	重度 γ/(kN·m^{-3})	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 φ/(°)	泊松比 μ
1	素填土	18	19.5	6	15	0.25
2	耕土	6	19.5	2	30	0.25
3	强风化基岩	12	20.5	40	35	0.32

3.4 模型建立

桩基础采用实体单元模拟，预应力锚索、锚碇板采用结构单元模拟。抗滑桩直径为 0.6 m，前排桩长 30 m，后排桩长 18 m，同排桩间距为 1 m，桩排距为 6 m。因在模型建立过程中无法完全模拟高填方边坡在填方时支挡结构的受力及变形状况，故本次建模假定填方是瞬间完成的，且假定沉降变形由填土自身重力产生，不考虑其他荷载。

采用 FLAC^{3D} 建立的锚索及刚性加筋板的新型锚碇板墙、双排桩支承肋柱式桩板墙联合锚碇墙支护结构数值模拟计算模型如图 6 所示。



a）锚索及刚性加筋板的新型锚碇板墙　b）双排桩支承肋柱式桩板墙联合锚碇墙

图 6 结构数值模型

Fig. 6 Structural Numerical Modeling

4 结果分析

4.1 边坡安全稳定系数和挡墙位移对比

本文基于 FLAC^{3D} 数值模拟软件通过差值修改强度参数，采用强度折减法对边坡稳定性进行计算。本文土体模型上采用 Mohr-Coulumb 模型，采用 solve 命令对本模型进行初始应力计算。

1）Mohr-Coulumb 屈服条件如下：

$$f=(\sigma_1-\sigma_3)/2+(\sigma_1+\sigma_3)\sin(\varphi)/2-c\cos(\varphi)=0。$$

式中：f 为屈服应力；c 为土的黏聚力；φ 为土的内摩擦角；σ_1 和 σ_3 为最大、最小主应力。

2）屈服准则。当有外力作用时，自身会发生流动屈服，即坡体最大应力大于或等于土体破坏极限时，边坡发生失稳破坏。边坡稳定性安全系数 F_s 的划分参考《建筑边坡工程技术规范》，如表 3 所示[19]。

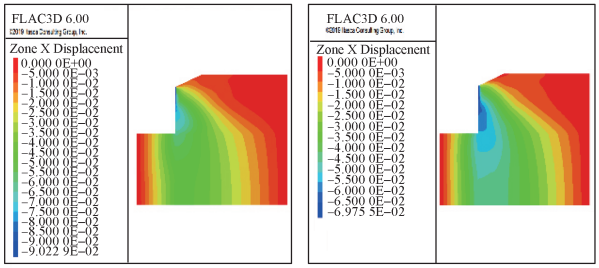
表 3 边坡安全系数 F_s

Table 3 Slope safety factor F_s

边坡类型		边坡工程安全等级		
		一级	二级	三级
永久边坡	一般工况	1.35	1.3	1.25
	地震工况	1.15	1.1	1.05
临时边坡		1.25	1.2	1.15

通过模拟计算，其中采用锚索及刚性加筋板的新型锚碇板墙的安全系数为 1.36，采用双排桩支承肋柱式桩板墙联合锚碇墙支护结构的安全系数为 1.39，均满足一级边坡于一般工况下的安全等级要求。其中采用双排桩支承肋柱式桩板墙联合锚碇墙支护结构支护的边坡安全系数更高。

此外，本文还对比了不同支护结构对坡顶土体位移的影响，其模拟结果如图 7。



a）锚索及刚性加筋板的新型锚碇板墙　b）双排桩支承肋柱式桩板墙联合锚碇墙

图 7　支护结构位移云图

Fig. 7　Displacement cloud map of supporting structures

提取两种支护结构桩板墙部分 x 方向位移随埋深的变化数据，见图 8。

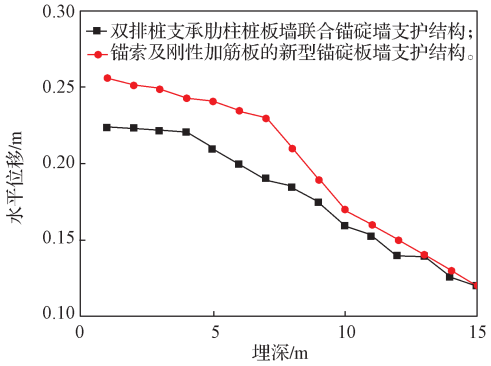


图 8　不同支护结构下位移与埋深关系曲线

Fig. 8　Relationship between displacement and burial depth under different supporting structures

由图 8 可见，随着桩埋深增大，两种挡墙 x 方向位移也增大，当埋深低于 2 m 时，其出现了一定的非线性，后呈线性增大。最大挡墙水平位移位于桩顶；采用双排桩支承肋柱式桩板墙联合锚碇墙支护结构的挡墙位移整体小于采用锚索及刚性加筋板的新型锚碇板墙支护结构的挡墙位移。其最大差值位于挡墙顶部，位移差为 3.334 cm，可见前者的承载能力更强。

4.2　两种支挡结构挡墙最大弯矩对比

对于桩身内力，支挡结构主要受到剪切力的影响，因此本文以桩板墙部分的弯矩为代表，对比两种不同支护结构桩弯矩情况。锚索及刚性加筋板的新型锚碇板墙结构的桩弯矩图如图 9 所示；双排桩支承肋柱式桩板墙联合锚碇墙支护结构前、后两桩弯矩图如图 10 所示。

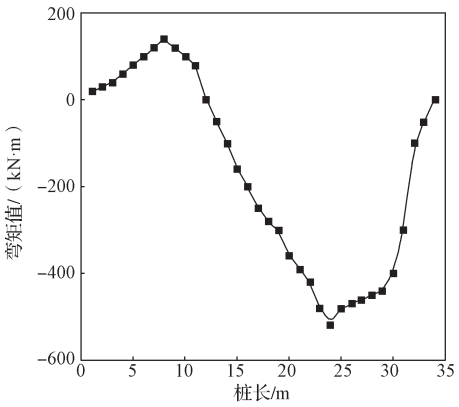


图 9　锚索及刚性加筋板的新型锚碇板墙结构桩弯矩图

Fig. 9　Bending moment diagram of a new anchor-anchored slabbed wall structure with anchor cables and rigid reinforced plates

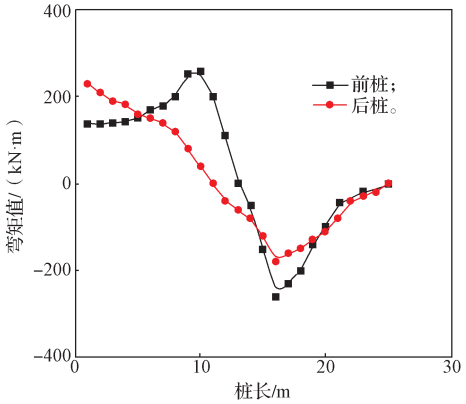


图 10　双排桩支承肋柱式桩板墙联合锚碇墙结构弯矩图

Fig. 10　Moment diagram of double-row pile-supported ribbed column type pile-slab-wall combined with the anchor-anchor wall structure

由图 9 可见，对于锚索及刚性加筋板的新型锚碇板墙结构，弯矩随埋深先增大后减小，最大弯矩为 593 kN·m。由图 10 可见，对于双排桩支承肋柱式桩板墙联合锚碇墙支护结构，其前排桩最大弯矩为 269.3 kN·m，后排桩最大弯矩为 186.5 kN·m。无论是后排桩还是前排桩，其最大弯矩都小于单排桩结构的最大弯矩。且双排桩内力分布更均衡，优于单排桩支护。

5　设计参数影响分析

为了探究不同桩径、桩长设计因素对双排桩支承肋柱式桩板墙联合锚碇墙支护结构支护效果的影响，通过控制双排桩的桩间距、半径及控制双排桩的桩间距、桩长进行探讨，具体参数变化见表 4。分别单一改变桩长和桩径，建立不同桩长、桩径配比模型，计算边坡水平变形及沉降，分析支护效果及沉降情况。

表 4 模型几何参数取值范围

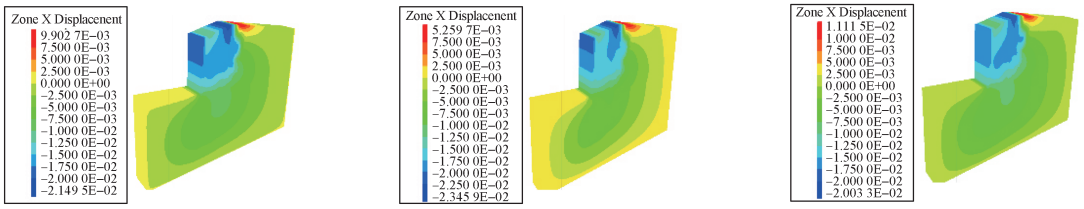
Table 4 Range of values for model geometric parameters

桩长 /m	间距 /m	桩半径 /m	桩排距 /m
8	2	0.5	6
12	2	0.5	6
16	2	0.5	6
12	2	0.2	6
12	2	0.5	6
12	2	0.8	6

双排桩支承肋柱式桩板墙联合锚碇墙支护结构改变桩长的模型位移变化如图 11 所示。

双排桩支承肋柱式桩板墙联合锚碇墙支护结构改变桩半径的模型位移变化，如图 12 所示。

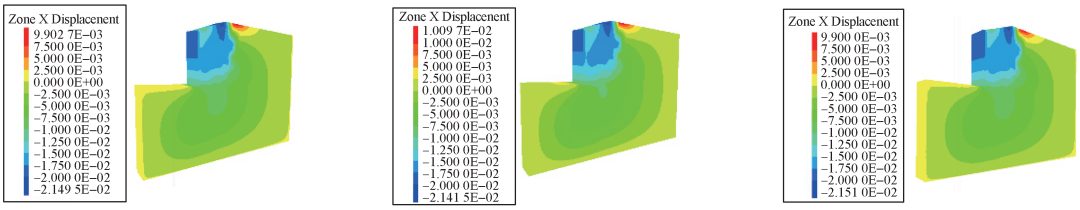
由图 11 和 12 可看出，对于双排桩支承肋柱式桩板墙联合锚碇墙支护结构，在相同用桩量的情况下，改善双排桩桩长、桩半径，能够更好地稳定支撑结构。



a）8 m b）12 m c）16 m

图 11 桩长 8, 12, 16 m 边坡位移云图

Fig. 11 Cloud map of slope displacement with pile lengths of 8, 12, 16 meters



a）0.2 m b）0.5 m c）0.8 m

图 12 桩半径为 0.2, 0.5, 0.8 m 边坡位移云图

Fig. 12 Cloud map of slope displacement with pile radius of 0.2, 0.5, 0.8 meters

6 结论

从实际工程角度出发，提出了一种双排桩支承肋柱式桩板墙联合锚碇墙支护结构，并依托青岛某建设项目 18 m 高回填边坡，通过 FLAC^{3D} 数值模拟对两种支护体系进行对比研究，得到以下结论：

1）双排桩支承肋柱式桩板墙联合锚碇墙支护结构与锚索及刚性加筋板的新型锚碇板墙结构相比，结构内力小、变形小，受力更均匀，沉降控制更优，支护效果更好。

2）结合高填方边坡实际工程，在进行支护设计时，采用双排桩支承肋柱式桩板墙联合锚碇墙支护结构，能更好地满足安全需求。

3）相同工况下，随着桩长及桩径的增加，双排桩支承肋柱式桩板墙联合锚碇墙支护结构横向抗变形能力增强。

参考文献：

[1] 魏海涛，穆伟刚，陈 曦 . 锚碇板在高填方边坡有限空间支护的应用研究 [J]. 山西建筑，2021，47(4)：45−47.
WEI Haitao，MU Weigang，CHEN Xi. Research on Application of Anchor Plate in Limited Space of High Fill Slope Support[J]. Shanxi Architecture，2021，47(4)：45−47.

[2] 曹文昭，郑俊杰，薛鹏鹏 . 抗滑桩－加筋土挡墙组合支挡结构开发 [J]. 中南大学学报 (自然科学版)，2019，50(1)：118−129.
CAO Wenzhao，ZHENG Junjie，XUE Pengpeng. Development of Combined Retaining Structure Composed of Anti-Slide Pile and Reinforced Earth Retaining Wall[J]. Journal of Central South University (Science and Technology)，2019，50(1)：118−129.

[3] 李海光 . 新型支挡结构设计与工程实例 [M]. 北京：人民交通出版社，2010：12.
LI Haiguang. Design and Engineering Example of a New Type of Retaining Structure[M]. Beijing：China Communications Press，2010：12.

[4] CHANG C Y，DUNCAN J M. Analysis of Soil Movement Around a Deep Excavation[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division，1970，

96(5)：1655−1681.

[5] 胡俊强 . 双排桩土拱效应及嵌固段受力特性研究 [D]. 重庆：重庆大学，2014.
HU Junqiang. Study on Soil Arching Effect and Mechanical Characteristics of Embedded Section of Double-Row Piles[D]. Chongqing：Chongqing University，2014.

[6] NICU N D，ANTES D R，KESSLER R S. Field Measurements on Instrumented Piles Under an Overpass Abutment[J]. Highway Research Record，1971：88−92.

[7] 陈昌富，杜翠翠，张根宝 . 基于双参数法刚性抗滑桩嵌固深度可靠性设计 [J]. 湖南大学学报 (自然科学版)，2014，41(2)：40−46.
CHEN Changfu，DU Cuicui，ZHANG Genbao. Reliability Design of the Embedded Depth of the Rigid Anti-Slide Piles Based on Bi-Parameter Method[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences)，2014，41(2)：40−46.

[8] 史建业 . 双排抗滑短桩前后排桩合理长度比的试验研究 [D]. 西安：长安大学，2023.
SHI Jianye. Experimental Study on Reasonable Length Ratio of Front and Back Row Piles of Double Row Anti-Slide Short Piles[D]. Xi'an：Chang'an University，2023.

[9] STEWART D P，JEWELL R J，RANDOLPH M F. Design of Piled Bridge Abutments on Soft Clay for Loading from Lateral Soil Movements[J]. Géotechnique，1994，44(2)：277−296.

[10] 铁道部第二勘测设计院科研所抗滑桩研究组 . 排架抗滑桩与双排单桩对比模型试验报告 [J]. 路基工程，1986(1)：70−81.
The Second Survey and Design Institute of Railways. Contrast Report of Model Test for Single Row Piles and Double Row Piles Retaining Sliding Slope[J]. Roadbed Engineering，1986(1)：70−81.

[11] 徐良德，唐志成，彭隆银 . 抗滑桩模型试验弹性阶段有限元分析 [J]. 重庆交通学院学报，1988，7(4)：51−60.
XU Liangde，TANG Zhicheng，PENG Longyin. Finite Element Analysis of Anti-Slide Pile Model Test in Elastic Stage[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University，1988，7(4)：51−60.

[12] 聂庆科，胡建敏，吴　刚 . 深基坑双排桩支护结构上的变形和土压力研究 [J]. 岩土力学，2008，29(11)：3089−3094.
NIE Qingke，HU Jianmin，WU Gang. Deformation and Earth Pressure of a Double-Row Piles Retaining Structure for Deep Excavation[J]. Rock and Soil Mechanics，2008，29(11)：3089−3094.

[13] 詹智麒，徐光黎 . 不同布桩方式对 h 型双排桩支护结构影响的数值模拟 [J]. 安全与环境工程，2020，27(3)：193−199.
ZHAN Zhiqi，XU Guangli. Numerical Simulation of the Impact of Different Pile Arrangement on the Supporting Structure of H-Shaped Double-Row Piles[J]. Safety and Environmental Engineering，2020，27(3)：193−199.

[14] 朱志华，孔锁财，王海亮 . 使用锚索及刚性加筋板的新型锚定板墙支护体系 [J]. 地下空间与工程学报，2017，13(增刊 2)：771−776.
ZHU Zhihua，KONG Suocai，WANG Hailiang. A New Type of Anchor Plate Wall Supporting System Using Anchor Cable and Rigid Stiffened Plate[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering，2017，13(S2)：771−776.

[15] 张鲁渝，郑颖人，赵尚毅，等 . 有限元强度折减系数法计算土坡稳定安全系数的精度研究 [J]. 水利学报，2003，34(1)：21−27.
ZHANG Luyu，ZHENG Yingren，ZHAO Shangyi，et al. The Feasibility Study of Strength-Reduction Method with FEM for Calculating Safety Factors of Soil Slope Stability[J]. Journal of Hydraulic Engineering，2003，34(1)：21−27.

[16] 陈　鑫 . 四川盆地公路建设典型软基处治沉降过程模拟与数值分析 [D]. 成都：西南交通大学，2011.
CHEN Xin. Simulation and Analysis on Settlement Process of Typical Soft Foundation Treatment for Highway Construction for Sichuan Basin[D]. Chengdu：Southwest Jiaotong University，2011.

[17] 陈育民，徐鼎平 . FLAC/FLAC^{3D} 基础与工程实例 [M]. 北京：中国水利水电出版社，2013：45−47.
CHEN Yumin，XU Dingping. FLAC/FLAC^{3D} Foundation and Engineering Examples[M]. Beijing：China Water & Power Press，2013：45−47.

[18] 伍伟林 . 预应力锚索抗滑桩加固边坡的计算与应用 [D]. 广州：华南理工大学，2010.
WU Weilin. Calculation and Application of Slope Reinforced with Pre-Stressed Anchored Cables[D]. Guangzhou：South China University of Technology，2010.

[19] BISHOP A W. The Use of the Slip Circle in the Stability Analysis of Slopes[J]. Geotechnique，1955，5(1)：7−17.

(责任编辑：申　剑)