

桩长比影响路堤坡脚正-负斜桩组合体受力特性数值研究

周毅^{1,2}, 陈伟^{1*}, 谢主清³, 夏旺^{1,4}, 周德泉¹

(1.长沙理工大学 土木与环境工程学院,湖南长沙 410114;2.湖南建设投资集团有限责任公司,湖南长沙 410004;
3.中国路桥工程有限责任公司,北京市 100011;4.中铁七局集团第四工程有限公司,湖北武汉 430074)

摘要:在软弱路基进行路堤填筑时,容易发生滑坡、垮塌破坏。拟在路堤坡脚处设置正-负斜桩组合体,约束坡脚处侧向变形,但正-负斜桩组合体受力特性尚缺乏系统探究。该文通过Abaqus有限元软件,系统研究不同桩长比(1/2、2/3、1、3/2、2/1)下正负斜桩组合体在侧向荷载下的受力响应,并采用结构力学法计算验证,为坡脚处正-负斜桩组合体设计提供依据。结果表明:①对比双排直桩,相同桩长比下正-负斜桩组合体大约能减少25%的水平位移,后排正斜桩桩身位移随前排负斜桩长度的增加而减少;后排正斜桩位移表现出“绕嵌固端旋转+中上部向外移动”,其水平位移的峰值出现在桩身中上部;②桩身弯矩峰值出现在桩身中上部,后排正斜桩和前排负斜桩的弯矩随前排负斜桩长度的增大而增大,正负斜桩的桩身中上部容易发生弯曲破坏,后排正斜桩较前排负斜桩先发生弯曲破坏。随着前排负斜桩和后排正斜桩桩长比的增加,其负斜桩与正斜桩的弯矩峰值比逐渐减小到1;③综合考虑受力机制和施工可行性,实际工程的前排负斜桩长度宜大于后排正斜桩长度,以减小后排正斜桩水平位移和弯矩峰值比、提高路基的整体稳定性。

关键词:路基工程;正-负倾斜桩;数值模拟;桩长比;水平位移;弯矩

中图分类号:U416.12

文献标志码:A

Numerical Study on Mechanical Characteristics of Positive-Negative Batter Pile Combinations at Embankment Slope Toe under Different Pile Length Ratios

ZHOU Yi^{1,2}, CHEN Wei^{1*}, XIE Zhuqing³, XIA Wang^{1,4}, ZHOU Dequan¹

(1. School of Civil and Environmental Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha, Hunan 410114, China;
2. Hunan Construction Investment Group Co., Ltd., Changsha, Hunan 410004, China; 3. China Road & Bridge Corporation, Beijing 100011, China; 4. The Fourth Engineering Co., Ltd. of China Railway Seventh Group, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract: Embankment filling on weak subgrades is prone to sliding and collapse failures. Positive-negative batter pile combinations were proposed to be installed at the embankment slope toe to constrain lateral deformations, but systematic inquiries into the mechanical characteristics of positive-negative batter pile combinations are still lacking. The mechanical responses of positive-negative batter pile combinations under lateral loads with different pile length ratios (1/2, 2/3, 1, 3/2, and 2/1) were systematically investigated by the finite element software Abaqus, and calculation and verification were conducted by the structural mechanics force method, providing a basis for the design of positive-negative batter pile combinations at the slope toe. The results indicate that: ① Compared with vertical double-row piles, positive-negative batter pile combinations with the same pile length ratio reduce horizontal displacement by approximately 25%, and displacement of pile bodies of rear-row positive batter piles decreases with the increase of lengths of front-row negative batter piles; displacement of rear-row positive batter piles exhibit “rotation around the fixed end + outward movement in the upper-middle section”, and peak values of horizontal displacement appear in the upper-middle section of pile

收稿日期:2025-04-03 修回日期:2026-02-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:52278329);湖南省交通运输厅科技项目(编号:202019.202247)

作者简介:周毅,男,博士研究生,高级工程师.E-mail:45271750@qq.com

*通信作者:陈伟,男,硕士研究生.E-mail:1634133798@qq.com

bodies; ② Peak values of bending moments of pile bodies appear in the upper-middle section of pile bodies; bending moments of rear-row positive batter piles and front-row negative batter piles increase with the increase of lengths of front-row negative batter piles; bending failures easily occur in the upper-middle section of pile bodies of positive and negative batter piles, and rear-row positive batter piles experience bending failures earlier than front-row negative batter piles. As the pile length ratio of front-row negative batter piles to rear-row positive batter piles increases, the peak bending moment ratio of negative batter piles to positive batter piles gradually decreases to 1; ③ By comprehensively considering mechanical mechanisms and construction feasibility, lengths of front-row negative batter piles in actual engineering should be greater than lengths of rear-row positive batter piles, so as to reduce horizontal displacement and peak bending moment ratios of rear-row positive batter piles and improve the overall stability of the subgrade.

Keywords: subgrade engineering; positive-negative batter pile; numerical simulation; pile length ratio; horizontal displacement; bending moment

0 引言

当高速公路、铁路修建于软土地区时,路堤荷载传递至坡脚处易导致路基、路堤滑移破坏^[1-2]。有学者提出了在路堤坡脚设置倾斜桩加固软基的新方案^[3],以减少路堤滑移风险,但是,相关研究才刚刚起步。

研究表明^[4-7],特定倾斜方向和角度的倾斜桩较竖直桩具有更优的水平承载性能,在边坡工程^[8-10]和基坑工程中^[11-13]已有较丰富的研究成果,并得到应用。边坡抗滑方面,胡毅夫等^[8]通过数值分析,对人字形微型抗滑桩进行分析,发现其受力性能优于传统双排桩;Chen等^[9]开展数值模拟,发现斜桩上部弯矩比竖直桩小;王洋等^[10]通过现场试验发现倾斜桩可控制坡体内塑性区发展,提高边坡稳定性。基坑支护方面,郑刚等^[11]通过大型倾斜支护桩模拟试验,发现适当角度的倾斜桩能有效减小排桩的位移和内力、提高稳定性;叶金铨等^[12]开展模型试验,认为双排倾斜桩在开挖过程中位移增长较缓,桩身弯矩较小;郭景琢等^[13]使用数值模拟结合推理计算的方法,发现倾斜桩能有效减少桩顶位移。但是,倾斜桩在路基工程中的应用案例少见,研究工作仍十分有限。

桩长比(前排桩长度与后排桩长度之比)和桩间距等是影响双排桩工程特性的重要参数^[14]。边坡工程中,申永江等^[15]基于双排长短组合抗滑桩建立有限元模型,分析后排桩在不同沉埋深度时前、后排桩桩身最大弯矩和剪力,发现随着后排桩沉埋深度的增大,前排桩桩身最大弯矩和剪力逐渐增大,后排桩桩身最大弯矩和剪力逐渐减小,提出将前后排桩桩身内力与变形最接近时的后排桩沉埋深度作为设计沉埋深度;申永江等^[16]开展 Ansys 数值模拟与监测分

析,认为锚索双排桩的前排桩侧向位移和弯矩均远小于后排桩,刚架双排桩前后两排桩的位移和弯矩比较接近,刚架双排桩具有更好地抗滑效果。基坑工程中,任鹏等^[17]采用大型岩土软件对基坑进行实体单元模拟,分析前排桩长度变化对支护效果的影响,发现随着前排桩长度的增加,前、后排桩桩顶的水平位移和弯矩峰值都逐渐减小;朱隆奇等^[18]使用 Midas GTS /NX 软件模拟深基坑双排桩,认为适当增加前排桩的长度、增大桩长比能减少前、后排桩的水平位移。路基工程中,周德泉等^[19]通过侧向堆载试验,研究了前排斜桩长度对斜-直双排桩受力响应的影响,发现后排直桩的侧移峰值及后排直桩与前排斜桩的弯矩峰值比随前排斜桩长度增大而减小,而前、后排桩的弯矩均增大。

显然,设置合理的双排桩桩长比,可以得到更合理的内力分布,提高约束能力。但是,桩长比对路堤坡脚正-负斜桩组合体受力特性的影响尚不清楚。本文通过数值模拟,探究桩长比(1/2、2/3、1、3/2、2/1)对正-负斜桩组合体的桩身侧移和桩身弯矩的影响规律,为正-负斜桩组合体的设计应用提供依据。

1 数值模拟设计

为了方便表达,将位于潜在滑移方向前端的桩称为前排桩,后侧的桩称为后排桩;倾斜角具有增大趋势的桩称为正斜桩,倾斜角呈减小趋势的桩称为负斜桩^[4],如图1所示。

本文通过有限元软件 Abaqus,分析路堤荷载作用下不同桩长比的正-负斜桩组合体的水平位移和弯矩的工程特性差异。

参考广东惠(州)一增(城)高速公路某路段工程,取路堤边坡的一半进行模拟。该模型长 60 m,宽

11 m,高 40 m,延长 X 轴和 Z 轴方向以体现桩周土体变化,在路堤坡脚设置两组正-负斜桩组合体以互相检验结果正确性。使用摩尔-库仑为本构模型,土层结构见图 2。

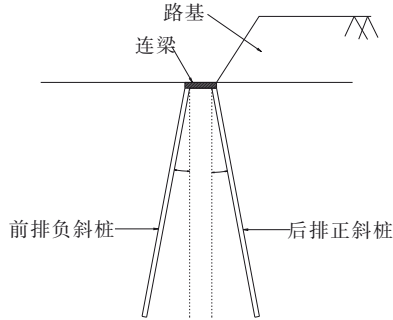


图 1 正-负倾斜桩组合体示意图

Figure 1 Schematic diagram of positive-negative batter pile combination

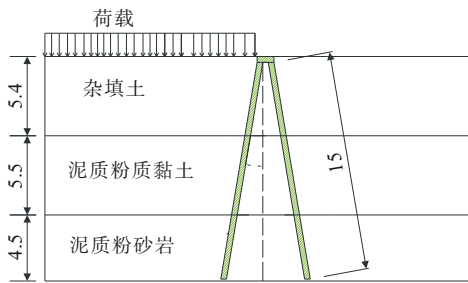


图 2 土层示意图(单位:m)

Figure 2 Schematic diagram of soil layers (unit: m)

路基网格有限元模型见图 3,路基下桩身嵌固见图 4。桩体材料为 C30 混凝土,弹性模量 $E=20 \text{ GPa}$,泊松比为 0.3,正-负斜桩组合体桩身截面为 $0.4 \text{ m} \times 0.4 \text{ m}$ 的矩形,排距为 0.8 m,桩距为 1.6 m,桩顶通过刚性连梁连接。土层参数见表 1,组合体尺寸见表 2。路堤加载分级见表 3。

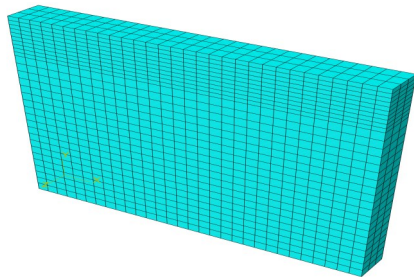


图 3 路基网格有限元模型

Figure 3 Finite element model of subgrade mesh

土体模型网格类型采用 C3D8R 实体单元,单个网格尺寸约为 $0.2 \text{ m} \times 0.2 \text{ m} \times 0.2 \text{ m}$ 。双排桩组合体

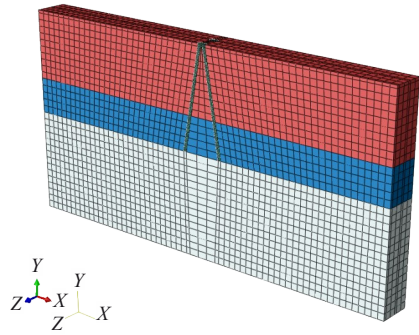


图 4 路基下桩身嵌固示意图

Figure 4 Schematic diagram of pile embedding under subgrade

表 1 土层参数

Table 1 Parameters of soil layers

土层	重度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ ($^\circ$)	弹性模量/ MPa
杂填土	16.9	2.0	6.0	20.00
泥质粉质黏土	17.9	8.5	9.3	10.05
泥质粉砂岩	19.5	50.0	20.0	20.50
水泥搅拌桩	20.0	—	—	20 000.00

表 2 双排桩组合体模型尺寸

Table 2 Model dimensions of double-row pile combinations

组合	负斜桩长/m	正斜桩长/m	桩长比	倾斜角/ $(^\circ)$
直桩	15.0	15	1	0
N1	7.5	15	1/2	10
N2	10.0	15	2/3	10
N3	15.0	15	1	10
N4	22.5	15	3/2	10
N5	30.0	15	2/1	10

表 3 荷载分级

Table 3 Load gradations

分析步	荷载大小/kPa	分析步	荷载大小/kPa
Load 1	5	Load 3	50
Load 2	10	Load 4	100

(包括前排负斜桩、后排正斜桩和冠梁)和土体间的切向接触设定为“罚”接触,摩擦系数为 0.2,法向接触设定为硬接触。

假设土体为满足莫尔-库仑屈服准则的理想弹塑性材料。网格模型规则为由路堤区域向较远区域由密到疏的单精度划分。

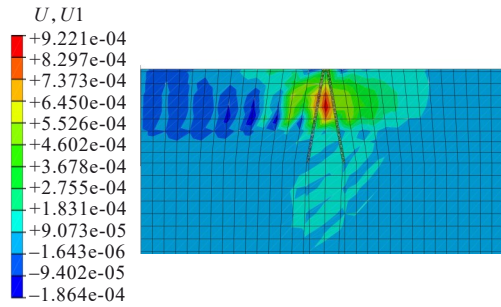
2 数值模拟结果与分析

2.1 坡脚处桩周土体的水平位移

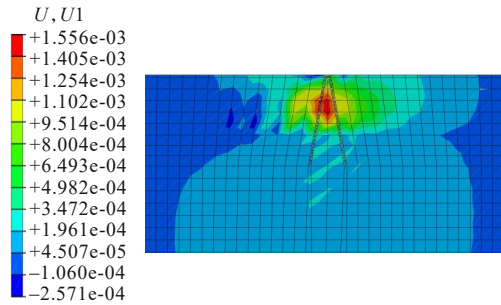
图 5 和图 6 为侧向加载下长度比为 1 的正-负斜

桩组合体(组合 N3)和直桩组合体在 4 次加载完成后的桩周土水平位移云图。

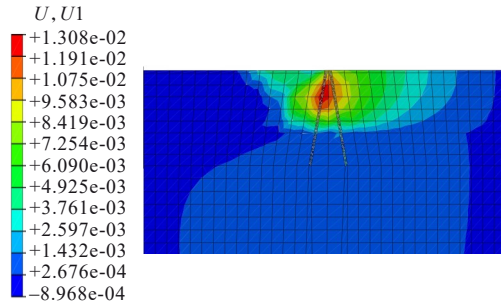
中,土体的最大水平位移出现在后排桩上部,而随着荷载的增加,土体的最大位移沿桩身不断向上移动,在最大荷载时出现在桩顶处。



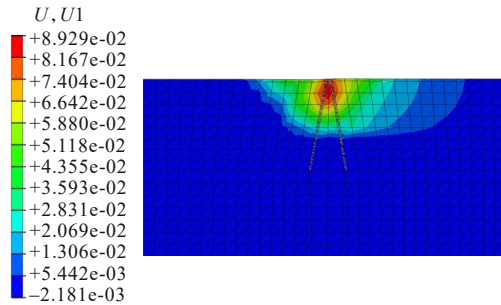
(a) 5 kPa



(b) 10 kPa



(c) 50 kPa



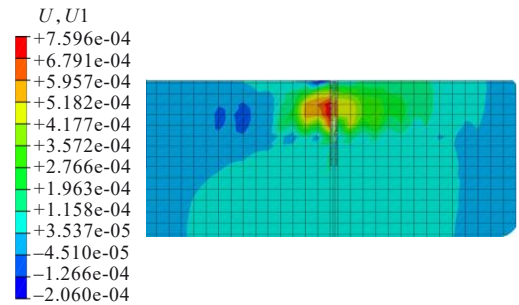
(d) 100 kPa

图 5 长度比为 1 的正-负斜桩组合体周围土体位移云图(单位:m)

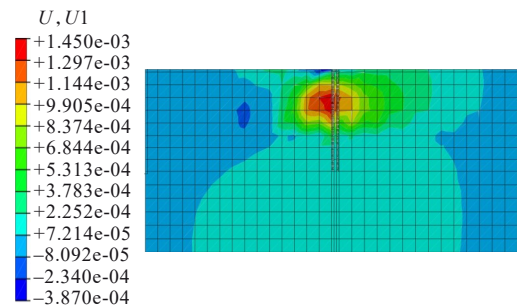
Figure 5 Contour of soil displacement around positive-negative batter pile combinations with pile length ratio of 1 (unit: m)

由图 5、图 6 可知:

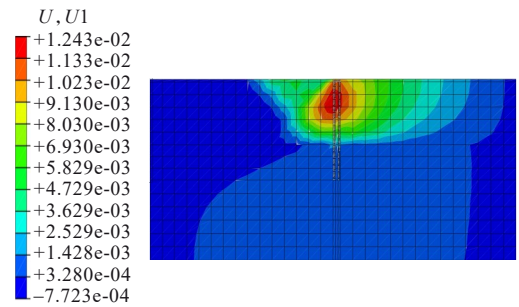
(1) 本次模拟土体主要为淤泥质黏土,塑性区域集中在靠近荷载施加区域,由桩身中上部向四周辐射并逐渐减小。在正-负斜桩组合体、直桩组合体



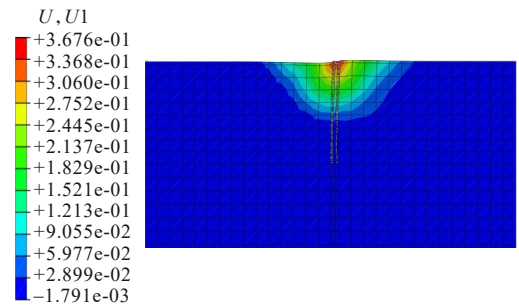
(a) 5 kPa



(b) 10 kPa



(c) 50 kPa



(d) 100 kPa

图 6 长度比为 1 的直桩组合体周围土体总位移云图(单位:m)

Figure 6 Contour of total soil displacement around vertical pile combinations with pile length ratio of 1 (unit: m)

(2) 两组模拟都出现了圆弧滑裂面,随着上部侧向荷载的增加,在 Load 4 下,正-负斜桩的桩周土最大水平位移大幅小于直桩组合体;正-负斜桩的桩周土最大水平位移为 89.296 mm[图 5(d)],直桩组合体

的桩周土最大水平位移为 367.6 mm[图 6(d)],是正-负斜桩组合体的 4.5 倍左右,说明正-负斜桩组合体能有效抵抗土体位移。

2.2 正-负斜桩组合体水平位移变化规律

2.2.1 正斜桩和负斜桩水平位移变化

图 7、图 8 分别为 4 次分级加载下后排正斜桩和前排负斜桩的水平位移随深度变化规律曲线。由于 15 m 以下的桩身水平位移很小,图 8 中“离桩顶的距离”仅取至 15 m 处。

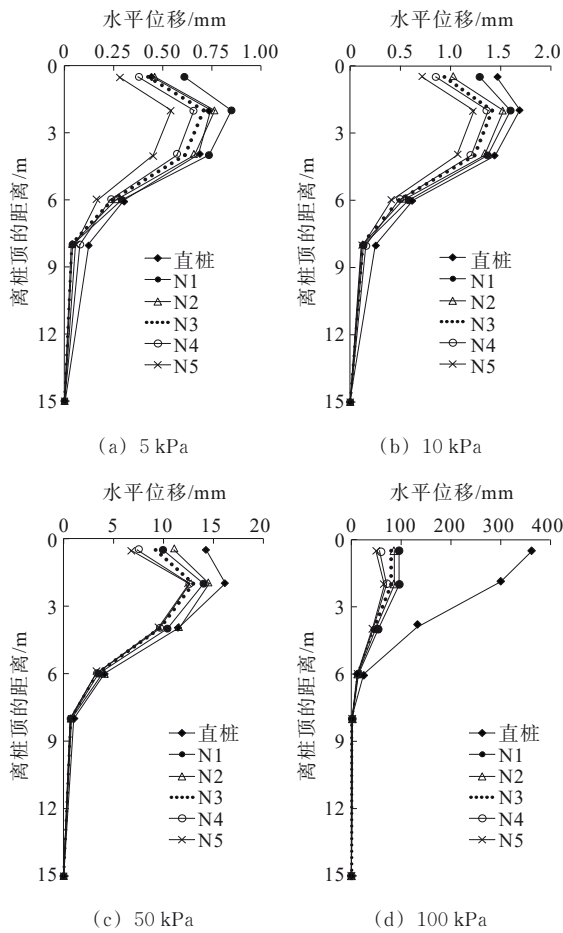


图 7 正斜桩水平位移随深度变化规律
Figure 7 Variation of horizontal displacement of positive batter piles with depth

由图 7、图 8 可知:

(1) 垂直双排桩和正-负斜双排桩的前排桩和后排桩桩身水平位移沿深度变化曲线均呈“C”形,沿桩身随着深度的增加先增大后减小,水平位移最大值均出现在桩身中上部,桩底的水平位移远远小于桩顶。前排负斜桩和后排正斜桩的水平位移表现出“绕嵌固端旋转+中上部向外移动”。高荷载时,垂直双排桩的水平位移峰值向上移动到桩顶,而正-负

斜双排桩的水平位移峰值维持在桩身中上部。

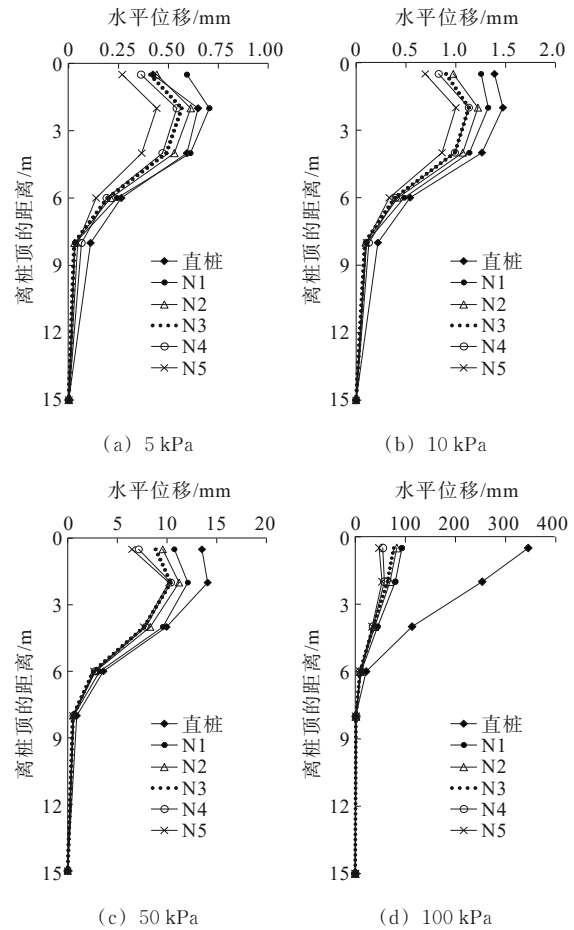


图 8 负斜桩水平位移随深度变化规律
Figure 8 Variation of horizontal displacement of negative batter piles with depth

(2) 分析曲线的左右位置,认为正-负斜双排桩的前排桩和后排桩桩身水平位移均随桩长比增大而减小。等长配置时,正-负斜桩组合体的桩顶水平位移比直桩小,说明正-负斜桩组合体可有效减少坡脚处的水平位移,加固效果明显。

为了比较后排桩和前排桩水平位移的差异,绘制第 3 级加载时等长正-负倾斜桩和竖直双排桩的水平位移随深度变化规律曲线,见图 9。由图 9 可知:无论是等长正-负倾斜桩还是竖直双排桩,后排桩水平位移均大于前排桩,且等长正-负倾斜桩的前排桩和后排桩水平位移均比竖直双排桩小。两种桩型桩顶水平位移接近,说明连梁的变形较小,改变桩身倾斜角对连梁的承载能力要求不高。

图 10 为不同桩长比的正斜桩桩顶水平位移随荷载变化曲线。由图 10 可知:各双排桩组合的后排正斜桩桩顶水平位移均随荷载增大而增大。其中,竖

直双排桩位移增速最大,正-负斜桩的位移增速随桩长比增大而减小。说明正-负斜桩抵抗水平位移的能力远大于竖直桩,增大前排负斜桩长度有助于进一步提高抗侧移能力。

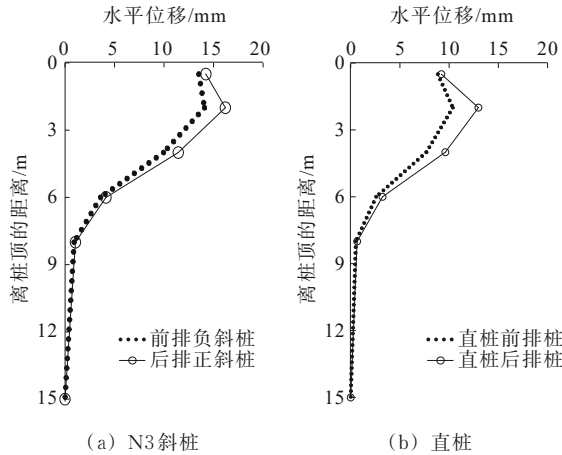


图9 等长正-负斜桩和竖直桩水平位移对比

Figure 9 Comparison of horizontal displacement between equal-length positive-negative batter piles and vertical piles

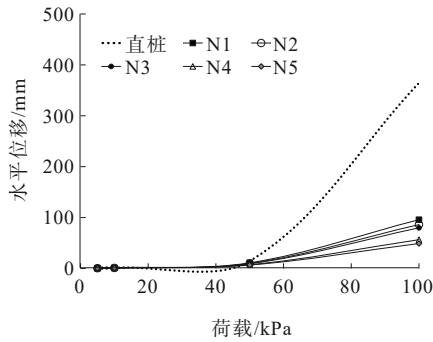


图10 正斜桩桩顶水平位移对比

Figure 10 Comparison of horizontal displacement of pile tops for positive batter piles

2.2.2 正斜桩桩顶水平位移随桩长比变化

图11为不同荷载下后排正斜桩桩顶水平位移随桩长比变化曲线。

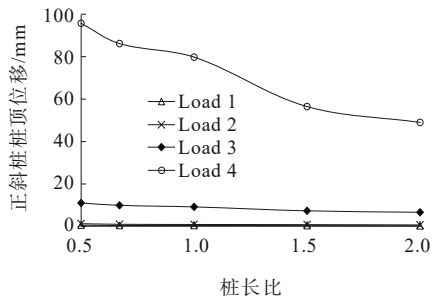


图11 正斜桩桩顶水平位移随桩长比变化规律

Figure 11 Variation of horizontal displacement of pile tops for positive batter piles with pile length ratio

由图11可知:随着桩长比的增加,后排正斜桩桩顶的水平位移趋于减小,但在桩长比超过1.5时,其桩顶水平位移基本稳定。这说明后排正斜桩的抗滑移能力随桩长比的增加而增强,但是增强的速率越来越小。综合考虑经济性和施工可行性,建议实际工程中前排负斜桩长度略大于后排正斜桩,桩长比不超过1.5。

2.3 正-负斜桩组合体弯矩变化规律

2.3.1 正斜桩和负斜桩弯矩变化

图12为4级加载下竖直双排桩及正-负倾斜双排桩的后排正斜桩弯矩随深度变化曲线。

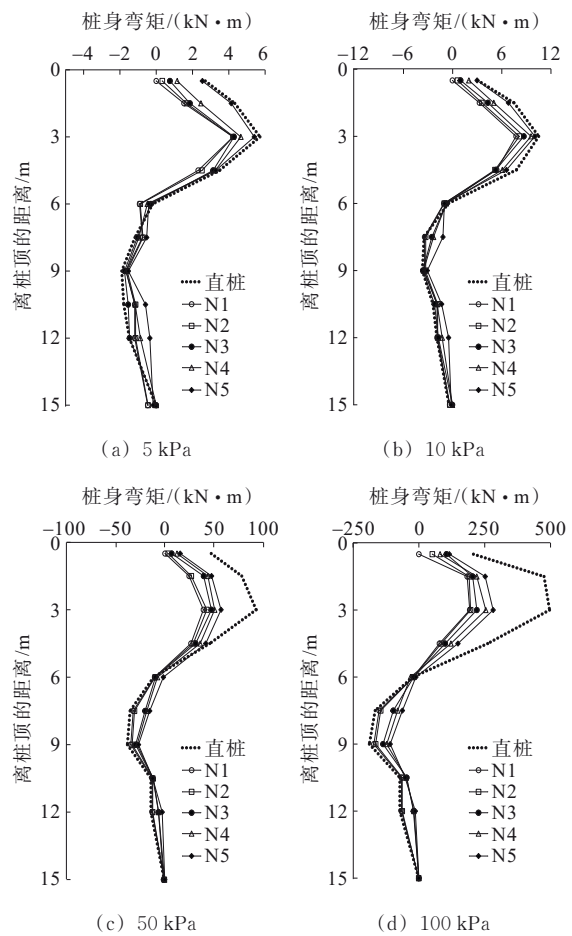


图12 正斜桩弯矩随深度变化曲线

Figure 12 Variation curves of bending moment of positive batter piles with depth

由图12可知:

(1) 后排正斜桩的桩身弯矩曲线沿桩身随深度先增加后减小,再增加再减小,桩身曲线呈“S”形,桩身弯矩峰值出现在桩身中上部,距桩顶3m和9m,反弯点出现在约6m处,推测其在桩身中上部及土岩界面偏上容易发生弯曲破坏;正弯

矩峰值大于负弯矩峰值。后排直桩弯矩峰值也出现在桩身中上部和土岩界面偏上,桩身中上部较长范围内弯矩都较大。对比双排直桩,正-负斜桩发生弯曲变形的范围更小。

(2) 相同荷载作用下,后排正斜桩在相同位置的弯矩从小到大的排序分别为:N1、N2、N3、N4、N5,说明后排正斜桩弯矩随前排负斜桩长度的增加而增加。

图 13 为 4 级加载下竖直双排桩及正-负倾斜双排桩的前排负斜桩弯矩随深度变化曲线。由于 15 m 以下的桩身弯矩值很小,该图“离桩顶的距离”仅取至 15 m 处。

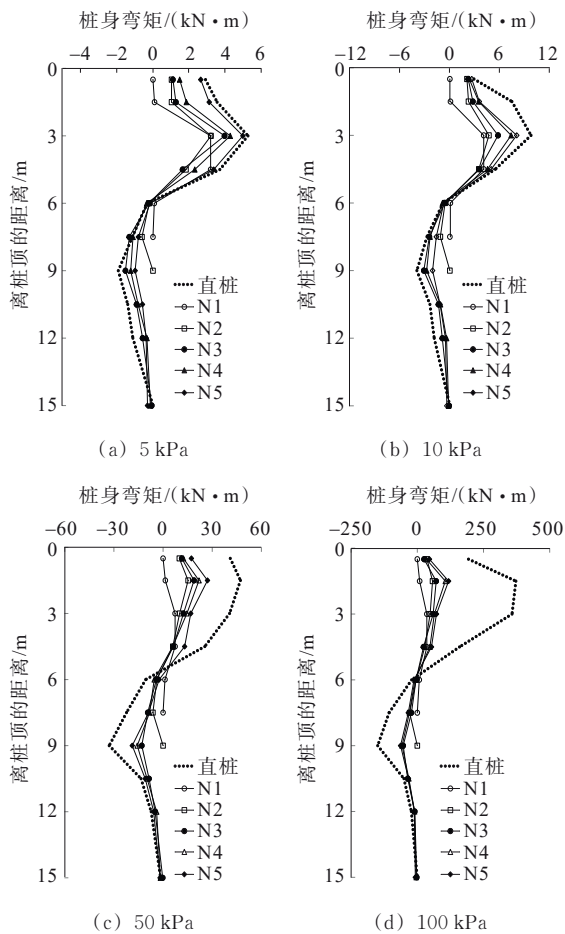


图 13 负斜桩弯矩随深度变化曲线

Figure 13 Variation curves of bending moment of negative batter piles with depth

由图 13 可知:

(1) 前排负斜桩弯矩沿桩身随深度先增加后减小,再增加再减小,呈“S”形,正弯矩峰值出现在桩身上部。弯矩峰值位置随荷载增加而向上移动,逐渐向桩顶靠近。前排负斜桩弯矩峰值比后排正斜桩

小,推测原因是前排负斜桩受到后排正斜桩的遮拦作用。

(2) 相同荷载作用下,前排负斜桩桩身弯矩由小到大依次为:N1、N2、N3、N4、N5。说明前排负斜桩弯矩峰值随桩长比增加而增大。

为了比较后排桩和前排桩弯矩的差异,绘制第 3 级加载时等长正-负倾斜桩和竖直双排桩的弯矩随深度变化规律曲线,见图 14。

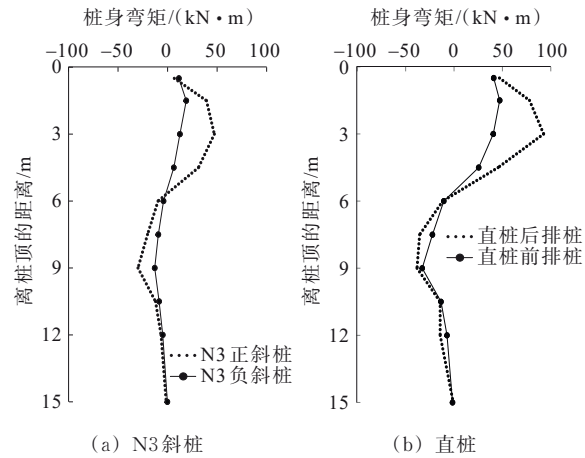


图 14 等长正-负斜桩和竖直桩弯矩对比

Figure 14 Comparison of bending moments between equal-length positive-negative batter piles and vertical piles

由图 14 可知:无论等长正-负倾斜桩还是竖直双排桩,后排桩弯矩均大于前排桩,且等长正-负倾斜桩的前排桩和后排桩弯矩均比竖直双排桩小。

2.3.2 弯矩峰值比随桩长比变化

图 15 为不同荷载作用下正-负斜桩组合体的弯矩峰值比(后排正斜桩与前排负斜桩弯矩峰值之比)随桩长比变化曲线。

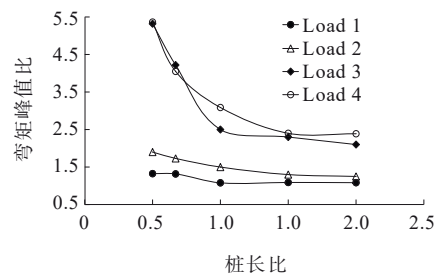


图 15 弯矩峰值比随桩长比变化

Figure 15 Variation of peak bending moment ratios with pile length ratio

由图 15 可知:当桩长比趋于 0,弯矩峰值比显著增大,此时双排桩退变为单排桩。桩长比相同时,弯矩峰值比随荷载增大而增大,这与斜直双排桩的试

验结果^[20]一致。对比发现:

(1) 荷载一定时,弯矩峰值比随桩长比增大而减小。荷载越大,桩长比对弯矩峰值比的影响越显著。这表明在高荷载阶段,增大前排负斜桩长度能显著降低弯矩峰值比、缩小弯矩差,使后排正斜桩与前排负斜桩的破坏荷载趋于接近,设计更加优化。

(2) 桩长比小于 1.0 时,弯矩峰值比显著增大;桩长比超过 1.5 时,弯矩峰值比接近。工程中,综合考虑施工的可行性,建议桩长比取 1.0~1.5,即前排负斜桩长度略大于后排正斜桩长度,但桩长比不宜超过 1.5。

2.3.3 力法推导最佳桩长比

基于上述结果,增大前排负斜桩长度以提高桩长比可有效改变正、负斜桩弯矩分配情况。现采用结构力学力法原理计算内力,佐证模拟结果。取正-负斜桩横截面为 0.4 m×0.4 m 的矩形,将正-负斜双排桩计算模型简化为受侧向均布荷载作用的平面刚架,利用力法对其弯矩分布进行分析验证。取均布荷载 $q=40 \text{ kN/m}$,正、负斜桩桩长同表 2(N1、N2 长度不足,不满足力法假定,不参与计算),连梁长 0.8 m,斜桩抗弯刚度为 EI ,计算模型如图 16 所示。

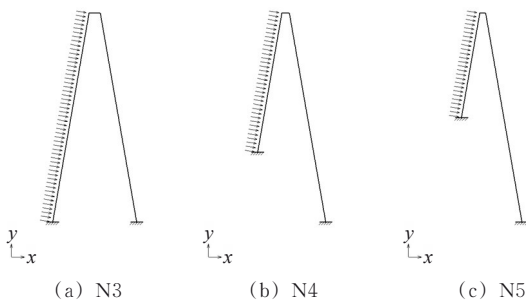


图 16 受力模型图

Figure 16 Diagram of mechanical model

基于力法计算理论及叠加原理,求得不同桩长下正-负斜桩组合体弯矩分布,如图 17 所示。

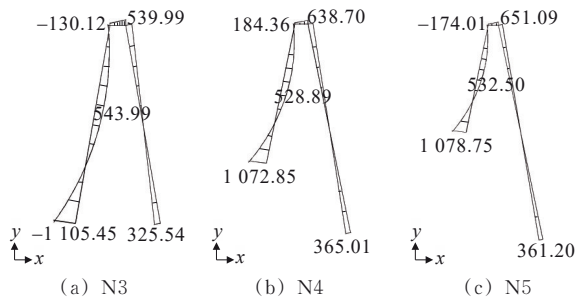


图 17 弯矩计算结果(单位:kN·m)

Figure 17 Calculation results of bending moment (unit: kN·m)

基于图 17 的弯矩计算结果,绘制力法推导下弯矩峰值比随桩长比变化的曲线,如图 18 所示。

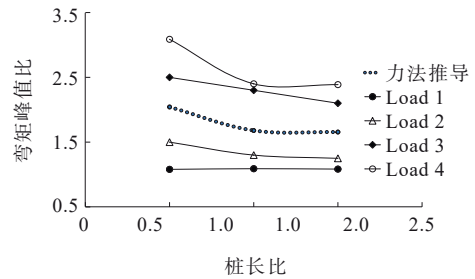


图 18 弯矩峰值比随桩长比变化

Figure 18 Variation of peak bending moment ratio with pile length ratio

由图 18 可知:弯矩峰值比随桩长比增大而不断减小;当桩长比超过 1.5 时,弯矩峰值比接近,减小速率趋于平缓,此时增大桩长比不能有效分配正-负斜桩组合体的弯矩。因此,建议桩长比取 1.0~1.5,与上文数值模拟结果相符。

通过理论计算,力法进一步验证了数值模拟结果的正确性和合理性。

3 分析与讨论

为对比桩长比在不同工况下对双排桩工程特性的影响,将不同工况的双排桩工程特性随桩长比变化规律汇总于表 4。

由表 4 可知:

(1) 对于边坡抗滑双排桩,前排桩长度与后排桩长度之比主要体现为后排桩沉埋一定深度。沉埋深度越大,则桩长比越大,后排桩弯矩峰值逐渐减小,前排桩弯矩峰值逐渐增大;沉埋深度增大到一定值时,前、后排桩弯矩峰值相等。等长双排桩的后排桩弯矩和侧移均大于前排桩。

(2) 对于基坑支护双排桩,随桩长比的增加前、后排桩弯矩峰值和水平位移均减小。

(3) 路堤坡脚处正-负斜双排桩和前排斜后直双排桩弯矩和侧移随桩长比变化规律相似:后排桩和前排桩弯矩峰值随桩长比增大而增大,峰值比减小;后排桩和前排桩的侧移随桩长比的增大而减小。这表明增大前排桩长度有利于使前、后排桩弯矩接近,减小水平位移,整体稳定性更好。

4 结论

(1) 在正-负斜桩组合体、直桩组合体中,土体的

表4 不同工况的双排桩工程特性随桩长比变化规律

Table 4 Variation of engineering characteristics of double-row piles with pile length ratio under different working conditions

桩型	后排桩弯矩	前排桩弯矩	后排桩侧移	前排桩侧移
边坡抗滑双排桩	桩身范围内呈“S”形,峰值随沉埋深度或桩长比增大而减小 ^[15] 。桩长比为1时后排桩弯矩大于前排桩弯矩	桩身范围内呈“S”形,峰值随沉埋深度或桩长比增大而增大 ^[15]	等长双排桩的桩身范围内侧移曲线呈“C”形,后排桩侧移大于前排桩侧移 ^[16]	等长双排桩的桩身范围内侧移曲线呈“C”形,前排桩侧移小于后排桩侧移 ^[16]
基坑支护双排桩	桩身范围内呈“S”形,后排桩峰值随桩长比的增加而减小 ^[17]	桩身范围内呈“S”形,前排桩峰值随桩长比的增加而减小 ^[17]	峰值出现在桩身上部或桩顶,峰值随桩长比的增加而减小 ^[18]	峰值出现在桩身上部或桩顶,峰值随桩长比的增加而减小 ^[18]
路堤坡脚桩	前斜后直双排桩: 后排桩弯矩峰值随桩长比增大而增大 ^[19] , 后排桩弯矩大于前排桩弯矩,峰值比减小 正-负斜双排桩(本文): 桩身范围内呈“S”形,峰值出现在桩身中上部,随桩长比增大而增大。后排桩弯矩大于前排桩弯矩,峰值比减小	前斜后直双排桩: 前排桩弯矩峰值随桩长比增大而快速增大 ^[19] 正-负斜双排桩(本文): 桩身范围内呈“S”形,峰值出现在桩身中上部,随桩长比增大而增大	前斜后直双排桩: 侧移峰值随桩长比增大而减小 ^[19] 正-负斜双排桩(本文): 桩身范围内呈“C”形,侧移峰值出现在桩身中上部,随桩长比的增加而减小	前斜后直双排桩: 侧移峰值随桩长比增大而减小 ^[19] 正-负斜双排桩(本文): 桩身范围内呈“C”形,侧移峰值出现在桩身中上部,随桩长比的增加而减小

注:桩长比指前排桩长度与后排桩长度之比,据此引述文献[15-19]的结论。

最大水平位移出现在后排桩上部。随着荷载的增加,土体的最大位移点沿桩身不断向上移动,可能到达桩顶。正-负斜桩的桩周土最大水平位移明显小于直桩组合体,说明正-负斜桩组合体比直桩组合体抵抗土体位移的能力更强。

(2) 随着桩长比的增加,后排正斜桩桩顶的水平位移趋于减小,但当桩长比超过1.5时,其桩顶水平位移基本稳定。

(3) 荷载一定时,弯矩峰值比随桩长比增大而减小。荷载越大,桩长比对弯矩峰值比的影响越显著。在高荷载阶段,增大前排负斜桩长度可显著降低弯矩峰值比、缩小弯矩差,使后排正斜桩与前排负斜桩的破坏荷载趋于接近。桩长比相同时,弯矩峰值比随荷载增大而增大。

(4) 对于路堤坡脚正-负斜桩组合体,增加前排负斜桩长度的工程效果包括:后排正斜桩顶部的水平位移减小、正斜桩与负斜桩的弯矩峰值比减小,后排正斜桩与前排负斜桩的破坏荷载趋于接近,整体稳定性更好。工程中,建议桩长比取1.0~1.5,即前排负斜桩长度尽量超过后排正斜桩长度,但桩长比值不宜超过1.5。

参考文献:

References:

[1] 刘金龙,刘洁群,陈陆望. 倾斜软弱地基上路堤的变形特征研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2007, 39(6): 818-823.
LIU Jinlong, LIU Jiequn, CHEN Luwang. Study on the

deformation behavior of subgrade embankments on inclined weak foundation[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2007, 39(6): 818-823.
[2] 蒋鑫,邱延峻,魏永幸. 斜坡软弱地基填方工程研究[J]. 铁道工程学报, 2006, 23(1): 32-35,39.
JIANG Xin, QIU Yanjun, WEI Yongxing. Research on the subgrade embankments engineering on sloped weak ground[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2006, 23(1): 32-35,39.
[3] 周德泉,周果子. 一种加固倾斜软基的组合型复合地基: CN206233257U[P]. 2017-06-09.
ZHOU Dequan, ZHOU Guozi. A combined composite foundation for reinforcing inclined soft soil foundations: CN206233257U[P]. 2017-06-09.
[4] 周德泉,王创业,周毅,等. 被动倾斜桩应用研究与展望[J]. 中外公路, 2023, 43(2): 1-10.
ZHOU Dequan, WANG Chuangye, ZHOU Yi, et al. Application research and prospect of passive battered pile [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2023, 43(2): 1-10.
[5] 周毅,张宁,王艳华,等. 斜直组合型双排锁扣钢管桩支护性能数值模拟分析[J]. 中外公路, 2025, 45(6): 10-16.
ZHOU Yi, ZHANG Ning, WANG Yanhua, et al. Numerical simulation analysis on support performance of inclined-vertical combined double-row interlocked steel pipe piles[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2025, 45(6): 10-16.
[6] 陈娥梅,李红顺,颜棕松,等. 坡顶超载下倾斜桩和直桩加固边坡效果的数值模拟分析[J]. 中外公路, 2023, 43(6): 15-20.
CHEN Emei, LI Hongshun, YAN Zongsong, et al. Numerical simulation of slope reinforcement effect with inclined and vertical piles under overloading at slope top [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2023, 43(6): 15-20.

- [7] 王恩钰,周海祚,郑刚,等. 基坑倾斜桩支护的变形数值分析[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(增刊1): 73-76.
WANG Enyu, ZHOU Haizuo, ZHENG Gang, et al. Numerical analysis of deformation of inclined pile support in foundation pit[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(sup 1): 73-76.
- [8] 胡毅夫,乌青松. 前后桩夹角对人字型微型抗滑桩内力影响研究[J]. 水文地质工程地质, 2014, 41(4): 92-96.
HU Yifu, WU Qingsong. A study of the influence of internal force of herringbone micro-pile included angle [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2014, 41(4): 92-96.
- [9] CHEN C Y, TSAI C X. Batter pile behavior modeling using finite difference analysis[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 566: 199-204.
- [10] 王洋,冯君,谢先当,等. 微型桩组合抗滑结构受力机制的现场试验研究[J]. 岩土力学, 2018, 39(11): 4226-4231, 4250.
WANG Yang, FENG Jun, XIE Xiandang, et al. In-situ experimental study of anti-sliding mechanism of micro-pile combined structure[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(11): 4226-4231,4250.
- [11] 郑刚,王玉萍,程雪松,等. 基坑倾斜桩支护性能及机理大型模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(9): 1581-1591.
ZHENG Gang, WANG Yuping, CHENG Xuesong, et al. Large-scale model tests on performance and mechanism of inclined retaining structures of excavations[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(9): 1581-1591.
- [12] 叶金铎,周先齐,王晨飞,等. 基坑双排斜桩模型试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(2): 398-404,519.
YE Jinbo, ZHOU Xianqi, WANG Chenfei, et al. Model test of double-row inclined piles in foundation pit[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021, 17(2): 398-404,519.
- [13] 郭景琢,李昕昊,程雪松,等. 基坑斜直组合倾斜桩支护结构设计计算方法研究[J]. 土木工程学报, 2023, 56(8): 153-163.
GUO Jingzhuo, LI Xinhao, CHENG Xuesong, et al. Study on design and calculation method for vertical and inward-inclined pile retaining structure of excavation[J]. China Civil Engineering Journal, 2023, 56(8): 153-163.
- [14] 周德泉,李万阳,夏旺,等. 桩间距影响路堤坡脚正-负斜桩组合体受力特性数值研究[J/OL]. 中外公路, (2025-03-24) [2025-10-15]. <https://link.cnki.net/urlid/43.1363.U.20250324.1550.002>.
ZHOU Dequan, LI Wanyang, XIA Wang, et al. Numerical study on mechanical characteristics of positive-negative batter pile combination with different pile spacing at the slope toe of the embankment[J/OL]. Journal of China & Foreign Highway, (2025-03-24) [2025-10-15]. <https://link.cnki.net/urlid/43.1363.U.20250324.1550.002>.
- [15] 申永江,杨明,项正良. 双排长短组合桩与常见双排桩的对比研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(增刊2): 96-100.
SHEN Yongjiang, YANG Ming, XIANG Zhengliang. Comparative study on double-row piles with different lengths several common anti-slide piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(sup 2): 96-100.
- [16] 申永江,孙红月,尚岳全,等. 锚索双排桩与刚架双排桩的对比研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(6): 1838-1842.
SHEN Yongjiang, SUN Hongyue, SHANG Yuequan, et al. Comparative study of anchor double-row piles and frame double-row piles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(6): 1838-1842.
- [17] 任鹏,唐印,王鹏. 非等长双排桩的受力性状研究[J]. 水利水电技术, 2018, 49(5): 153-164.
REN Peng, TANG Yin, WANG Peng. Study on stress behavior of non-equal length double-row pile[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2018, 49(5): 153-164.
- [18] 朱隆奇,马闯,安广强,等. 双排长短桩前后排桩配比组合的支护效果[J]. 工程建设, 2023, 55(8): 22-28.
ZHU Longqi, MA Chuang, AN Guangqiang, et al. Supporting effect of the ratio combination of two row long and short piles[J]. Engineering Construction, 2023, 55(8): 22-28.
- [19] 周德泉,肖灿,冯晨曦,等. 侧向堆载下斜桩长度影响斜-直双排桩受力响应试验研究[J]. 公路交通科技, 2021, 38(2): 24-32.
ZHOU Dequan, XIAO Can, FENG Chenxi, et al. Experimental study on influence of inclined pile length on mechanical response of inclined-straight double-row piles under lateral surcharge[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2021, 38(2): 24-32.
- [20] 周德泉,冯晨曦,肖灿,等. 倾斜软基上斜直桩组合结构单侧受力破坏模式试验[J]. 中国公路学报, 2021, 34(7): 201-214.
ZHOU Dequan, FENG Chenxi, XIAO Can, et al. Experimental study on the failure mode of inclined-straight pile composite structure on declining soft foundation under single side load[J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(7): 201-214.