

·土木工程·

DOI:10.12454/j.jsuese.202301044



基于相似原理的荷载传递模型及桩侧挤密加固效果数值分析

王衍升¹, 李召峰¹, 张明¹, 林春金^{1*}, 吕思忠², 姚望²

(1. 山东大学岩土与地下工程研究院, 山东 济南 250061; 2. 山东高速股份有限公司, 山东 济南 250014)

摘要:粉质黏土-粉砂地层桩侧注浆参数设计和桩基加固效果评价是在役桩基加固的关键和难点。针对在役摩擦桩桩侧注浆加固工程,采用桩基模型试验、数值模拟及现场试验,实现粉质黏土-粉砂地层桩基注浆加固。研发桩侧挤密注浆模型装置,将注浆加固体假设为沿桩长方向的圆柱体,采用圆柱形气囊的横向膨胀模拟桩侧挤密注浆加固方式,揭示桩侧挤密注浆提升在役摩擦桩承载力的作用机理。桩基模型试验中,注浆孔与桩侧距离 $< 15\text{ cm}$ 、注浆压力 $\geq 0.50\text{ MPa}$ 时桩基注浆加固效果明显。基于相似原理,通过桩基模型试验建立桩侧注浆加固荷载传递模型;并且,在数值分析软件中嵌入荷载传递模型以实现实际工程条件下桩侧注浆加固数值计算。数值模拟结果表明:桩基荷载传递符合指数模型,数值计算承载力与工程静载试验误差小于5%,具有可靠性。进一步分析加固位置和加固长度对桩基承载力的影响规律,结果表明:桩长40%~90%处加固效果最好,加固段长为4 m时承载力提升幅度10.7%~13.7%,实现粉质黏土-粉砂地层桩基承载力分析。随着加固长度的增加,桩基的极限承载力逐渐增加,当加固长度超过16 m(约占桩长的70%)时,能够大幅度提升桩中下部的极限摩阻力。研究结果可为在役桩基桩侧注浆加固提供指导。

关键词:摩擦桩;挤密注浆;荷载传递模型;数值模拟;承载力

中图分类号: TU473.1

文献标志码: A

文章编号: 2096-3246(2025)03-0134-13

进入21世纪以来,中国公路、铁路等交通基础设施建设蓬勃发展,桥梁桩基建设规模巨大^[1-2]。桥梁在交通工程建设中发挥了十分重要的作用,截至2022年底,中国公路桥梁总数达96.11万座,铁路桥梁总数约9.2万座,高铁桥梁累积长度超过1万千米,约占已通车的高铁运营里程的一半。摩擦桩是指桩底位于较软的土层内,其轴向荷载由桩侧摩擦阻力和桩底土反力来支承,而桩侧摩阻力起主要支撑作用的桩^[3]。河流冲积平原地区土层深厚,粉质黏土、粉砂地层交互分布,因此摩擦桩是冲积平原的主要荷载支撑结构,有效提高地基承载力、减少基础沉降,保持基础和上部结构的稳定性^[4-5]。

由于地质软弱、改扩建、周边工程扰动等原因,大量在役摩擦桩出现承载力不足的问题。注浆是一种常用的地基加固方法^[6-9]。在注浆压力作用下浆液劈开地层后向前辐射、扩展,浆液流动对劈裂通道侧壁

地层产生压力,挤密地层实现荷载的传递,提升地层力学参数。因此,摩擦桩注浆加固可有效地增强桩侧摩阻力、提升桩基承载力^[10]。但是,注浆工程具有一定的隐蔽性,地质条件和注浆效果难以准确预测,因此桩侧注浆参数设计和桩基加固效果评价成为研究的难点。

近年来,国内外研究者采用物理试验、数值模拟和工程现场试验,对桩基注浆加固开展研究工作,并取得了一定成果^[11-12]。周勇等^[13]通过注浆模拟试验,研究桩侧注浆提升既有桩基承载力的效果,浆液水灰比、注浆压力、注浆孔布设位置与注浆量为桩基加固效果的4个主控因素,桩侧注浆对桩基中下部的侧摩阻力影响更加明显。李龙起等^[14]通过物理模型试验验证数值模拟计算方法的可靠性,并分析竖向与横向荷载组合作用下倾斜桩基横向承载特性。周亚龙等^[15]通过工程现场试验研究桩底复合式后注浆过程中注浆压力、注浆量及桩顶位移的动态响应规律,并

收稿日期:2023-12-19 修回日期:2024-04-03 网络出版日期:2024-06-05

基金项目:国家自然科学基金面上项目(52178338);山东省重点研发计划项目(重大科技创新工程)(2021CXGC010301;2023ZLGX01);山东省竞争性创新平台项目(2023CXPT080);国家重点研发计划项目(2022YFB2601903)

作者简介:王衍升(1993—),男,博士生。研究方向:在役桩基注浆加固。E-mail: wangyansheng1993@163.com

*通信作者:林春金,副教授, E-mail: linchunjin@sdu.edu.cn

基于双曲线函数的荷载传递模型和桩端扩大头效应,建立后注浆桩基荷载-沉降计算方法。Gong等^[16]通过工程现场试验分析桩端-桩侧联合后注浆对钢管钻孔桩承载力的影响机制,水泥浆液分布于桩端以下0.5D至桩端以上5.3D(D为直径)的范围,显著改善桩侧土层的物理力学性能,降低荷载作用下试桩位移。Li等^[17]通过现场试验验证数值模型的可靠性,并通过数值计算分析既有桩基注浆加固机理和承载力提升效果。以上国内外研究者针对桩基注浆加固开展的模型试验、数值模拟和工程现场试验研究中,虽然现场试验能够如实地反映工程的实际情况,但是现场试验成本高、耗时长;模型试验在一定程度上反映地层特点,具有快速、成本低的特点,但对于桩基注浆加固模型,试验过程中浆液控制难度大,同时无法反映真实尺寸桩基的实际承载力。并且,对于3种试验方法结果的内在联系也鲜有研究,比如:模型试验与现场实际情况之间缺少联系,对工程指导具有一定的局限性^[18];尤其对于桩基桩侧注浆加固,注浆孔与桩侧距离和加固效果之间存在较大关联,但模型试验无法真实体现桩基与注浆的实际位置关系,导致无法准确指

导工程实际应用。

针对上述问题,本文研发桩侧挤密注浆模型装置,实现粉质黏土、粉砂地层桩侧注浆参数设计,分析桩侧注浆对桩基承载力和侧摩阻力的影响规律。基于物理相似理论,通过桩基模型试验数据建立桩侧注浆作用下桩-土接触面荷载传递模型,实现工程实际桩基注浆加固数值分析;并且,通过现场荷载-沉降曲线验证数值模型准确性,建立桩侧注浆提升在役桩基承载力分析方法。

1 桩侧挤密加固模型试验

1.1 挤密注浆模拟试验方法

传统注浆法的优点在于能够真实模拟浆液扩散及土体加固效果,但对于室内试验而言,传统注浆法对浆液的控制难度大。在分析桩侧挤密注浆加固特点的基础上,将注浆加固体假设为沿桩长方向的圆柱体^[19-20],通过圆柱形气囊的横向膨胀模拟桩侧挤密注浆加固过程,如图1所示。根据试验设计,将不同长度的气囊竖直埋置在桩侧一定距离处,模拟注浆时对桩基的挤压作用。

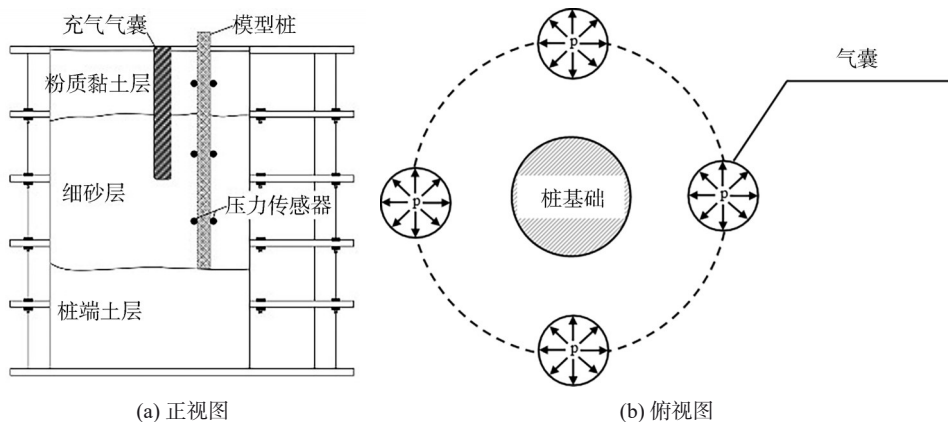


图1 桩侧加固示意图

Fig. 1 Schematic diagram of pile side reinforcement

1.2 桩侧挤密注浆模型装置

图2为桩侧挤密注浆模型装置。模型装置由试验箱主体、空心铝管模型桩、荷载加载系统、桩侧挤密加固装置、数据监测采集系统组成。为方便土体快速填埋与清理,试验箱主体由5个圆形钢筒层叠组成,每层钢筒高为30 cm、内径为120 cm。综合考虑试验箱尺寸效应,空心铝管模型桩尺寸直径为4.0 cm、桩长为120.0 cm、壁厚为0.1 cm,铝管表面刻花提高桩-土之间的摩擦系数。荷载加载系统固定在试验箱的顶部,加载装置的最大伸长位移为20 cm,荷载量程为0~20 000 N。数据采集系统由桩身粘贴的应变片和桩底的压力盒组成。



图2 桩侧挤密注浆模型装置

Fig. 2 Pile side compaction grouting mold device

1.3 被注介质

采用水洗法测试粉质黏土的颗粒级配,如表 1 所示。经测试发现,粉质黏土的密度为 1.8 g/cm³,含水率为 20%,黏粒含量达 35.3%,黏聚力为 17.5 kPa,内摩擦

角为 20.1°,土体塑限为 18.2%,液限为 32.3%,塑性指数为 14.1,符合软弱地层强变形的结构特征。粉砂粒径分布如表 2 所示。测试发现,粉砂黏聚力为 5.9 kPa,内摩擦角为 22.9°。

表 1 粉质黏土粒径分布
Tab. 1 Particle size distribution of silty clay

粒径区间/mm	<0.075	[0.075,0.250)	[0.250,0.500)	[0.500,1.000)	[1.000,2.000]
占比/%	96.4	1.5	1.1	0.5	0.5

表 2 粉砂的粒径分布
Tab. 2 Particle size distribution of silty clay

粒径区间/mm	<0.075	[0.075,0.100)	[0.100,0.250)	[0.250,0.500)	[0.500,1.000)	[1.000,2.000]
占比/%	70.2	21.6	7.3	0.2	0.1	0.1

1.4 试验方案与桩侧注浆参数设计

1.4.1 工况设计

设计 25 组模型试验的具体工况如表 3 所示。

表 3 注浆加固模型试验工况

Tab. 3 Model test conditions of grouting reinforcement

工况序号	加固深度/cm	注浆压力/MPa	注浆孔至桩侧距离/cm
1			10
2	0~100	0.25	15
3			20
4			25
5			10
6	0~100	0.50	15
7			20
8			25
9			10
10	0~100	0.75	15
11			20
12			25
13			10
14	0~100	1.00	15
15			20
16			25
17			10
18	0~100	1.25	15
19			20
20			25

研究注浆压力和注浆孔至桩侧距离对桩侧注浆加固效果的影响。试验中,粉质黏土与粉砂的层厚比为 1:3。

1.4.2 桩侧注浆压力设计

图 3 给出注浆孔距离桩侧 10、15、20、25 cm 时不同注浆压力下摩擦桩的极限承载力及极限承载力提升幅度。

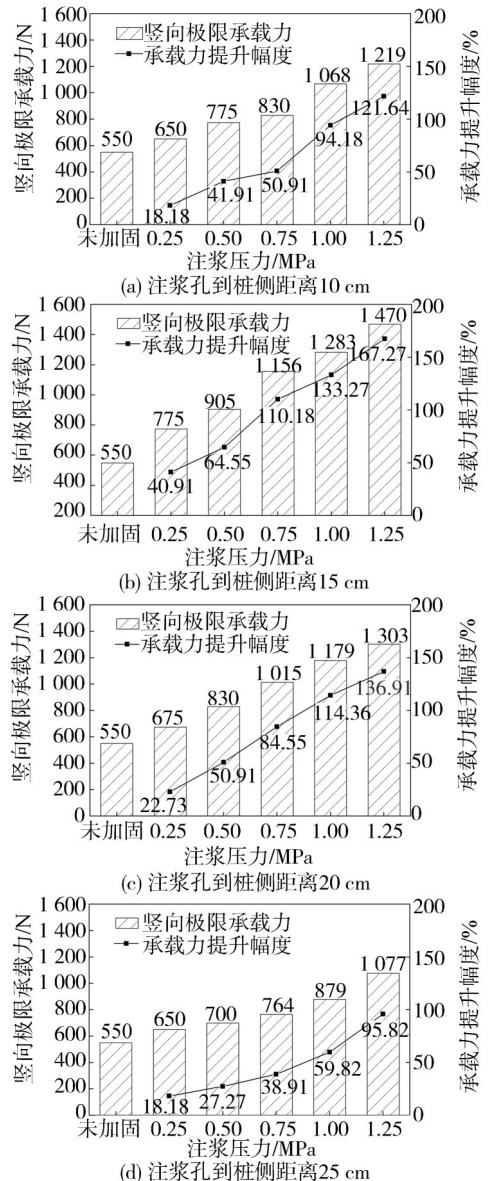


图 3 不同注浆压力下摩擦桩极限承载力及极限承载力提升幅度

Fig. 3 Ultimate bearing capacity and lifting range of friction piles under different grouting pressures

如图3所示:随注浆压力的增加,摩擦桩的极限承载力逐渐增大,摩擦桩极限承载力的提升幅度也逐渐增加,故增大注浆压力是提升桩基极限承载力的有效方法。以注浆孔距离桩侧10 cm为例,注浆压力0.25、0.50、0.75、1.00、1.25 MPa的桩基极限承载力提升幅度分别为40.91%、64.55%、110.18%、133.27%和167.27%。注浆压力每提升0.25 MPa,桩基极限承载力提升幅度约增加20%~40%。当注浆孔距离桩侧距离为15、20、25 cm,桩基承载力提升幅度呈现相同的规律。因为桩基加固前,桩侧土体较松散导致土体对桩的水平挤压力较小,所以桩基极限承载力较小。桩基加固后提升了桩-土之间抗剪强度,改善了接触面的力学特性,桩顶竖向荷载导致的桩-土间相对位移减小。并且,随着注浆压力逐渐增大,桩-土之间的力学性能改善越强,承载力提升越明显^[21-22]。

不同注浆压力对桩侧摩阻力的影响如图4所示。

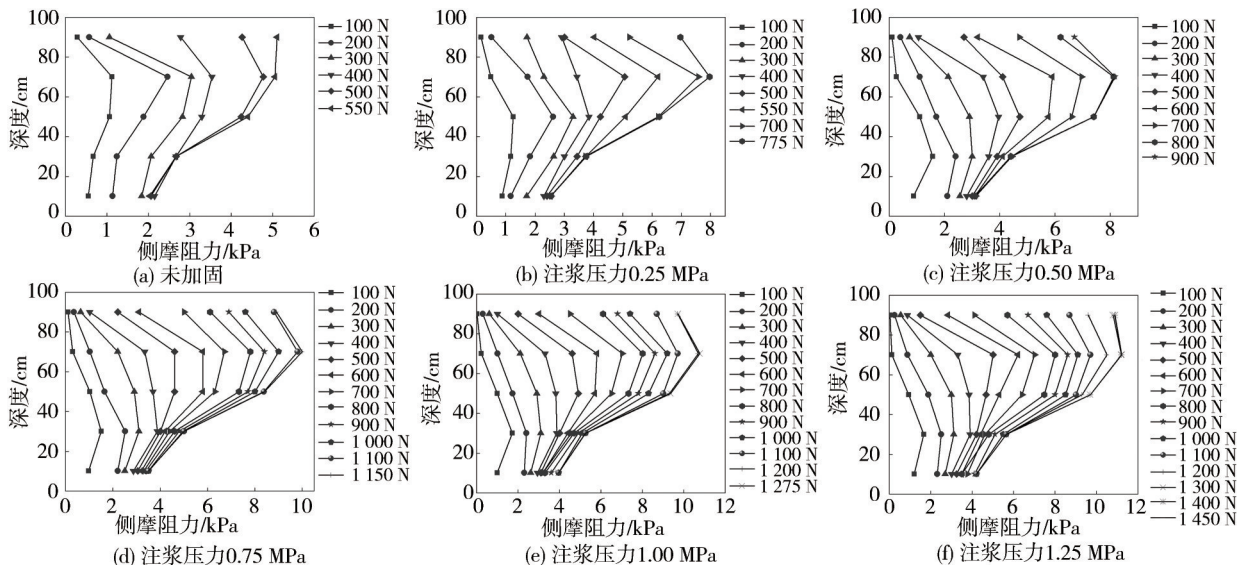


图4 不同注浆压力下桩侧摩阻力

Fig. 4 Lateral resistance of pile foundation under different grouting pressure

1.4.3 注浆孔至桩侧距离设计

图5给出注浆压力分别为0.25、0.50、0.75、1.00、1.25 MPa时不同注浆孔至桩侧距离下摩擦桩极限承载力及极限承载力提升幅度。由图5可知:注浆孔至桩侧距离由10 cm增加到25 cm,极限承载力及极限承载力提升幅度降低。以注浆压力为1.25 MPa为例,注浆孔至桩侧距离为10、15、20、25 cm时的桩基极限承载力的提升幅度分别为167.27%、136.91%、121.64%、95.82%;距离每增加5 cm,桩基承载力提升幅度下降15%~30%。其他注浆压力下,随着注浆孔至桩侧距离增大,桩基承载力提升幅度呈现相同的趋势。因为注浆孔至桩侧距离越大,挤密注浆产生的横向挤压力传递到桩侧路径越长,而压力在土体介质中传递呈指数

如图4(a)所示,当桩顶荷载为100~550 N时,未加固桩基侧摩阻力呈现先增大后减小的趋势,桩基中下部的桩侧摩阻力对桩基承载力的贡献占有很重要的地位。如图4(b)~(f)所示:当桩顶荷载为100 N时,桩顶荷载主要由中上部侧摩阻力承担,随着桩顶荷载增加,极限侧摩阻力逐渐向中下部转移;在极限荷载时,侧摩阻力的曲线呈抛物线形态,大致在入土深度[60,80] cm处出现极值点。随着注浆压力的增加,侧摩阻力达到极值所需的桩顶荷载逐渐增加。注浆压力为0.25、0.50、0.75、1.00、1.25 MPa下[0,20) cm处的极限侧摩阻力所需荷载分别为600、600、900、1 000和1 000 N,[20,40) cm处的极限侧摩阻力所需荷载分别为600、700、1 000、1 100、1 100 N。这是因为桩-土间的抗剪能力达到极致需要足够的桩顶位移,注浆压力增大,加固效果越好,相同的荷载下的桩顶位移逐渐减小,因此桩侧摩阻力需要在更高的桩顶荷载下才能达到极值。

衰减^[23],因此桩基承载力提升幅度会逐渐明显降低。

不同注浆压力对桩基侧摩阻力的影响如图6所示。由图6可知:随注浆孔与桩侧距离的增加,摩擦桩侧摩阻力达到极值所需的桩顶荷载降低。在注浆孔与桩侧距离为10、15、20、25 cm时,[0,20) cm处的极限侧摩阻力分别出现在桩顶荷载约900、800、700和600 N时,[20,40) cm处的侧摩阻力达到极值所需的荷载分别为1 000、900、800及700 N。这是因为桩土间的抗剪能力达到极值需要足够的桩顶位移或桩土间相对位移^[24]。随着注浆孔至桩侧距离的增加,桩周土体的挤密程度逐渐减弱,当桩顶承受相同的荷载时,桩土间的相对位移的增大速率加快,因此到达极限侧摩阻力所需的桩顶荷载变小。

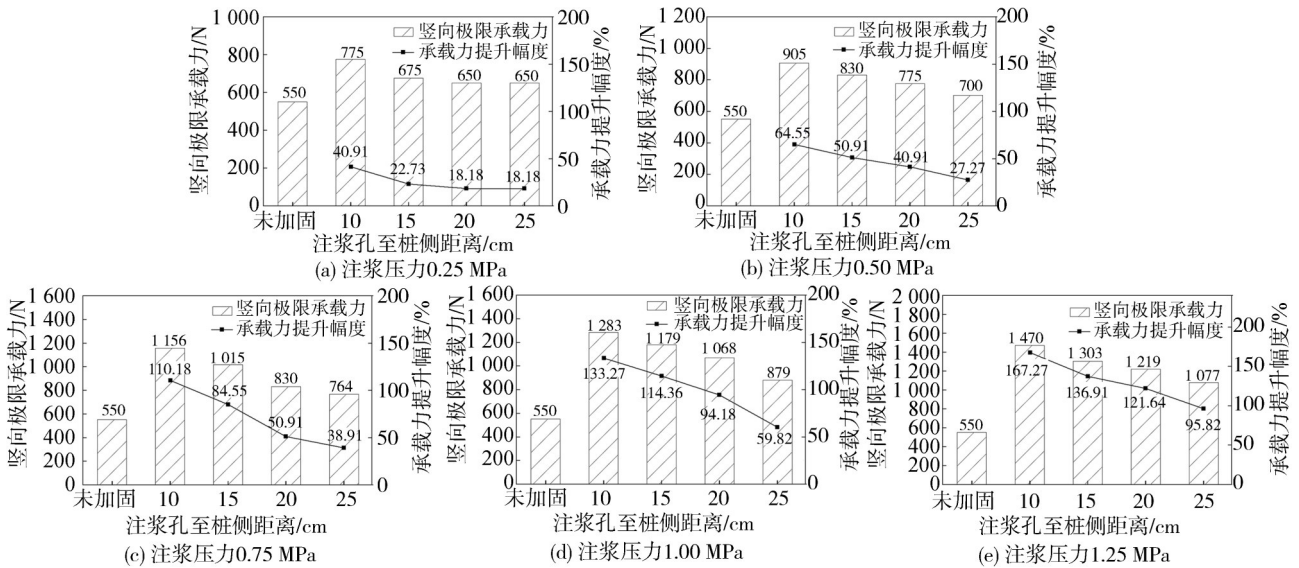


图 5 不同注浆孔到桩侧距离下摩擦桩极限承载力及极限承载力提升幅度

Fig. 5 Ultimate bearing capacity and ultimate bearing capacity improvement range of friction piles under different distances from grouting holes to pile side

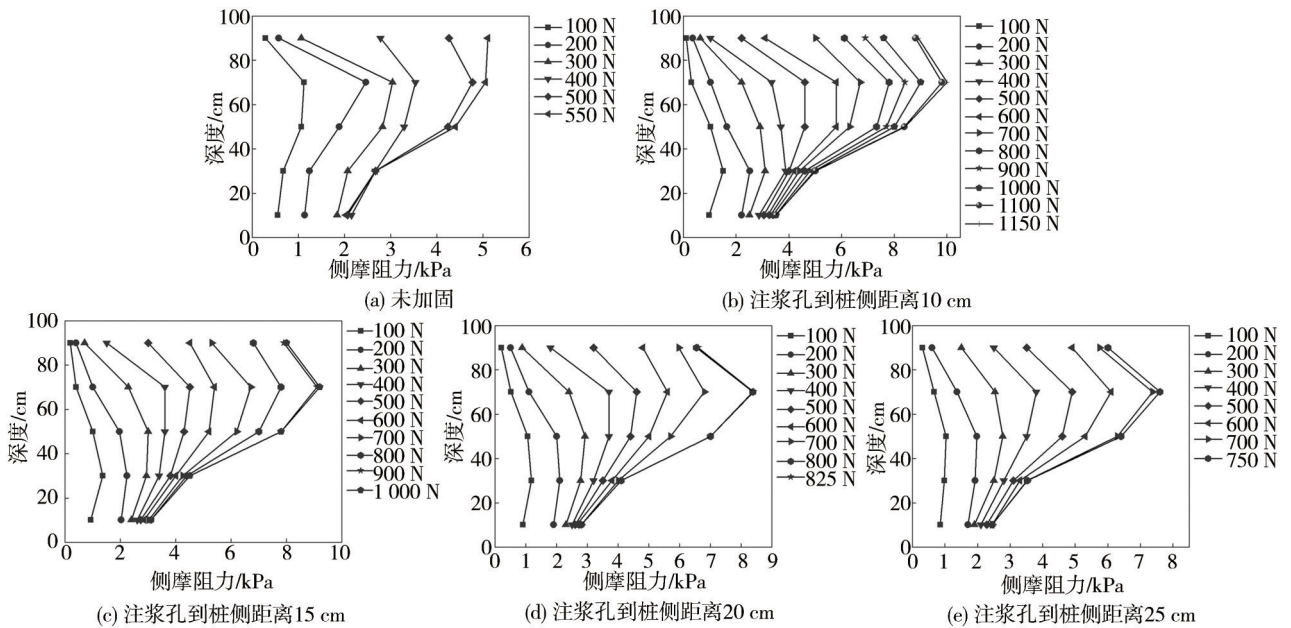


图 6 不同注浆孔与桩侧距离时桩基侧摩阻力

Fig. 6 Lateral resistance of different grouting holes to pile side under vertical load

由第 1.4.2 和 1.4.3 节可知：基于极限承载力提升幅度的注浆参数设计应综合考虑注浆压力与注浆孔至桩侧距离。注浆孔与桩侧距离较远时，可适当提升注浆压力，以达到设计要求，最小注浆压力应大于或等于 0.5 MPa。注浆压力为 0.5 MPa 时，极限承载力提升幅度大于 50% 的注浆孔至桩侧距离应小于 15 cm；注浆压力为 0.75 MPa 时，极限承载力提升幅度大于 50% 的注浆孔至桩侧距离应小于 20 cm。极限承载力提升幅度为 100% 的注浆孔至桩侧距离为 10~15 cm。因此，为保证注浆加固效果，注浆孔与桩侧距离应小于 15 cm。

2 基于相似原理的桩侧注浆加固荷载传递模型

2.1 相似参数

由于模型试验与实际工程之间缺少联系，对工程指导具有一定的局限性。模型试验中的注浆压力与实际工程中的注浆压力相近，因此注浆孔与桩侧距离和加固效果之间的关系是研究的关键。采用物理相似的方法将注浆孔与桩侧距离 d 无量纲化，通过定义桩与注浆有效加固区域之间的相对位置参数 k 建立模

型与工程桩基的关系。相对位置参数 k 值的计算式:

$$k = d/r \quad (1)$$

式中: d 为注浆孔至桩侧距离, m ; r 为注浆有效加固区域半径, m 。

图7为不同 k 值的示意图。

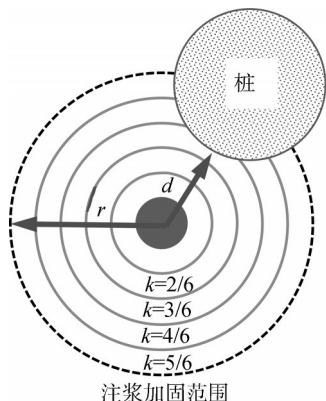


图7 k 值示意图
Fig. 7 k -value diagram

将桩长 120 cm 的空心铝管模型桩均分为 6 段, 每段长 20 cm, 土面以上长度为 20 cm, 入土深度为 100 cm。上部预留 20 cm 长是为了消除桩顶加压产生的应力集中和水平剪力对桩身轴向应力应变的干扰, 保证桩身数据的有效准确。入土桩以 20 cm 每段均分的原因是模型试验中在每段中间埋设应变片, 段长与桩身应变片的数量相关, 应变片间距越小, 数据监测越密集, 但应变片的埋设越多, 地层中的荷载传递影响越大, 经过试验不断探索后选择 20 cm 的每段段长。

桩体简化为一组线弹性单元, 假设土体上表面处的桩身轴力与桩顶荷载相同, 桩段中心处桩土间位移 S_s 包含 $S_{s0} \sim S_{s5}$, 桩段划分和桩土位移关系如图 8 所示。

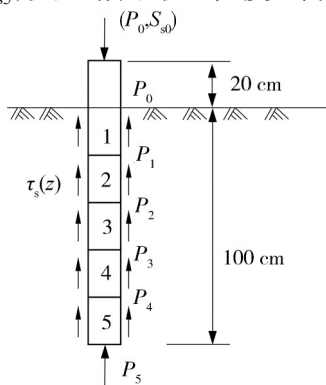


图8 模型桩桩段划分及桩土间位移分析
Fig. 8 Model pile segment division and pile-soil displacement analysis

图8中, $\tau_s(z)$ 为深度为 z 时的摩阻力, $P_0, P_1, P_2, P_3, P_4, P_5$ 分别为桩顶、第1段、第2段、第3段、第4段、第5段的荷载, S_{s0} 为桩顶的位移。 $S_{s1}, S_{s2}, S_{s3}, S_{s4}, S_{s5}$ 分别为第1段、第2段、第3段、第4段、第5段的位移, $S_{s1} \sim S_{s5}$

表达式分别为:

$$S_{s1} = S_{s0} - \frac{P_0}{EA} l_i - \frac{(P_0 + P_1)}{2EA} l_i,$$

$$S_{s2} = S_{s1} - \frac{(P_1 + P_2)}{2EA} l_i,$$

$$S_{s3} = S_{s2} - \frac{(P_2 + P_3)}{2EA} l_i,$$

$$S_{s4} = S_{s3} - \frac{(P_3 + P_4)}{2EA} l_i,$$

$$S_{s5} = S_{s4} - \frac{(P_4 + P_5)}{2EA} l_i.$$

其中, E 为空心铝管模型桩的弹性模量, A 为空心铝管模型桩的截面面积, l_i 为单个桩段的长度。通过模型试验建立不同地层、不同工况下的桩侧荷载传递模型 ($S_s/D - \tau_s/\tau_{su}$ 的数学关系), 将工程实际桩基直径 D 和桩-土界面力学强度参数引入到 $S_s/D - \tau_s/\tau_{su}$ 本构关系中, 再嵌入到模拟软件中即可计算桩侧注浆加固承载力提升效果。不同地层、埋深的桩侧摩阻力 τ_s 、极限侧摩阻力 τ_{su} 均取自模型试验中的实测数据。

2.2 粉质黏土地层桩侧荷载传递模型

图9给出 $k=2/6$ 时未加固和不同注浆压力下的粉质黏土地层 $S_s/D - \tau_s/\tau_{su}$ 关系。

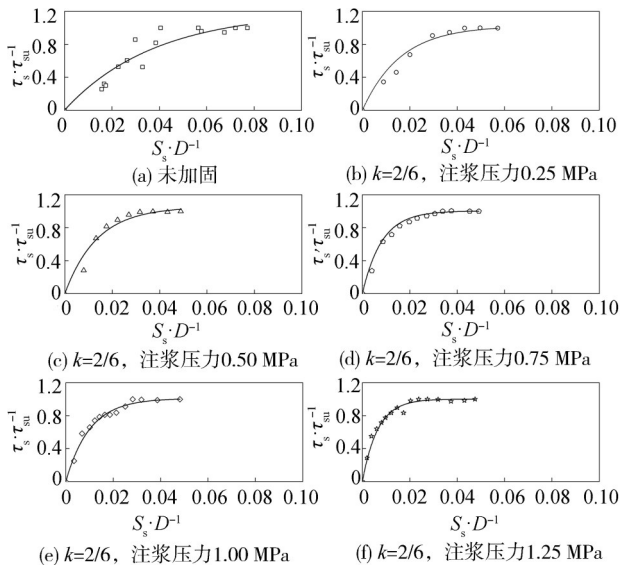


图9 未加固和不同注浆压力下粉质黏土 $S_s/D - \tau_s/\tau_{su}$ 关系 ($k=2/6$)

Fig. 9 Relationship $S_s/D - \tau_s/\tau_{su}$ of silty clay under different grouting pressures and unreinforced conditions ($k=2/6$)

由图9(a)~(f)可见: 粉质黏土地层中桩侧摩阻力的荷载传递过程大致分为3个过程, 即加载初期, 桩侧摩阻力快速上升; 随着荷载加大, 桩侧摩阻力开始缓慢增大, 这是由于随着桩身轴力向下传递, 桩基中下部侧摩阻力发挥, 地层中的桩侧摩阻力的增长速率变

小;桩侧摩阻力接近桩土抗剪强度的极限值,荷载传递趋于平稳。未加固桩基也呈现与加固桩基相似规律,但是增长更为缓慢。

张亦静等^[25]在膨胀土中桩基荷载模拟试验的基础上提出一种指数型身荷载传递模型,进一步推求桩-土共同作用的微分方程,得到桩顶的荷载-位移曲线,可用于确定桩的承载力,对比工程实测结果与本文解析解结果表明,二者较为吻合。Chang等^[26]研究温度对能桩承载力的影响时,建立一种改进的指数模型,该模型解释了桩土温度的影响,并通过室内模型测试和数值模拟验证了模型的可行性,指数模型和模型试验之间的最大侧摩擦误差分别达到0.8%和4.6%。Lai等^[27]在注浆加固的钻孔桩试验中利用指数荷载传递模型建立桩轴和桩顶的移动荷载与沉降之间的关系,分析结果与全尺寸桩荷载试验数据具有较好的一致性。上述相关研究表明指数荷载传递模型在桩基承载力计算中具有广泛的适用性。本文采用指数模型对桩侧荷载传递数据进行拟合^[25],具体公式如下:

$$\frac{\tau_s}{\tau_{su}} = \alpha \times \left[1 - e^{-\left(\beta \times \frac{S_s}{D}\right)} \right] \quad (2)$$

式中: α 为极限侧摩阻力影响参数; β 为侧摩阻力变化速率影响参数, β 越大说明达到极限侧摩阻力速率越快,所需的桩土间位移越小。

表4为 $k=2/6$ 时根据式(2)得到的不同注浆压力下的粉质黏土的 $S_s/D-\tau_s/\tau_{su}$ 关系(图9)拟合曲线参数。

表4 不同注浆压力下粉质黏土的 $S_s/D-\tau_s/\tau_{su}$ 关系拟合曲线的参数($k=2/6$)

Tab. 4 Parameters of $S_s/D-\tau_s/\tau_{su}$ relation fitting curves of silty clay under different grouting pressures ($k=2/6$)

注浆压力/kPa	α	β	拟合程度 R^2
0	1.196 70	26.295 03	0.883 98
0.25	1.025 68	61.919 50	0.963 57
0.50	1.051 10	73.583 52	0.958 61
0.75	1.002 52	121.654 50	0.981 28
1.00	1.008 67	98.716 68	0.983 18
1.25	1.000 68	153.374 23	0.983 14

根据表4可以发现:注浆压力 <0.75 MPa时,参数 α 与 β 值更加接近;注浆压力 ≥ 0.75 MPa时,参数 α 与 β 值更加接近。因此将荷载传递模型分为两类,一类是注浆压力 <0.75 MPa时的桩基侧摩阻力荷载传递模型,另一类是注浆压力为 $[0.75,1.25]$ MPa时桩基侧摩阻力荷载传递模型,通过上述归纳划分,实现实际应用对不同注浆压力的计算需求。图10为不同工况(注浆压力分别为 $[0.25,0.75]$ 、 $[0.75,1.25]$ MPa, k 为 $2/6$ 、 $3/6$ 、 $4/6$ 、

$5/6$)下粉质黏土地层桩侧荷载传递模型。观察图10可知,注浆压力 $[0.25,0.75]$ MPa时拟合曲线的曲率明显小于 $[0.75,1.25]$ MPa时的拟合曲线曲率,且侧摩阻力增加速率更快。

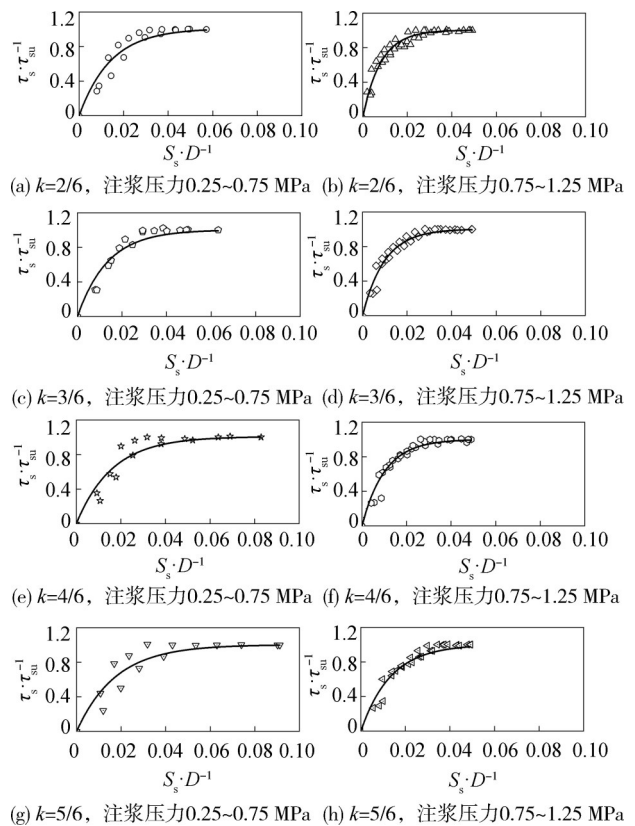


图10 不同工况下粉质黏土地层桩侧 $S_s/D-\tau_s/\tau_{su}$ 关系

Fig. 10 Relationship between $S_s/D-\tau_s/\tau_{su}$ on pile side of silty clay stratum under different working conditions

表5为不同工况下粉质黏土地层桩侧荷载传递拟合曲线参数。

表5 粉质黏土地层中不同工况下桩侧荷载传递模型拟合曲线的参数

Tab. 5 Parameters of fitting curves of pile-side load transfer model under different working conditions in silty clay stratum

k	注浆压力/kPa	α	β	R^2
未加固	0	1.196 70	26.295 03	0.883 98
2/6	$[0.25,0.75]$	1.009 12	70.274 07	0.918 15
	$[0.75,1.25]$	1.001 69	121.951 22	0.941 08
3/6	$[0.25,0.75]$	1.001 25	73.637 70	0.937 29
	$[0.75,1.25]$	1.001 97	101.214 57	0.959 09
4/6	$[0.25,0.75]$	1.007 06	61.996 28	0.896 38
	$[0.75,1.25]$	1.000 10	97.751 71	0.946 42
5/6	$[0.25,0.75]$	1.001 58	56.980 06	0.871 80
	$[0.75,1.25]$	1.000 06	74.850 30	0.942 10

由表5可知,相同 k 值下,随着注浆压力的增加, β 值逐渐增大,侧摩阻力的变化速率增大,荷载传递曲线的曲率逐渐增加。该规律不随 k 值改变而改变。再

结合图 10 可见:当 S_s/D 在 0~0.02 之间时荷载传递曲线的曲线上升更快;但当 S_s/D 到达一定值时,曲线趋于平稳,说明桩侧摩阻力逐渐趋于极值。

2.3 粉砂地层桩侧荷载传递模型

不同工况(注浆压力分别为[0.25,0.75]、[0.75,1.25] MPa, k 为 2/6、3/6、4/6、5/6)下粉砂地层桩侧荷载传递曲线 $S_s/D-\tau_s/\tau_{su}$ 关系如图 11 所示,拟合曲线参数如表 6 所示。

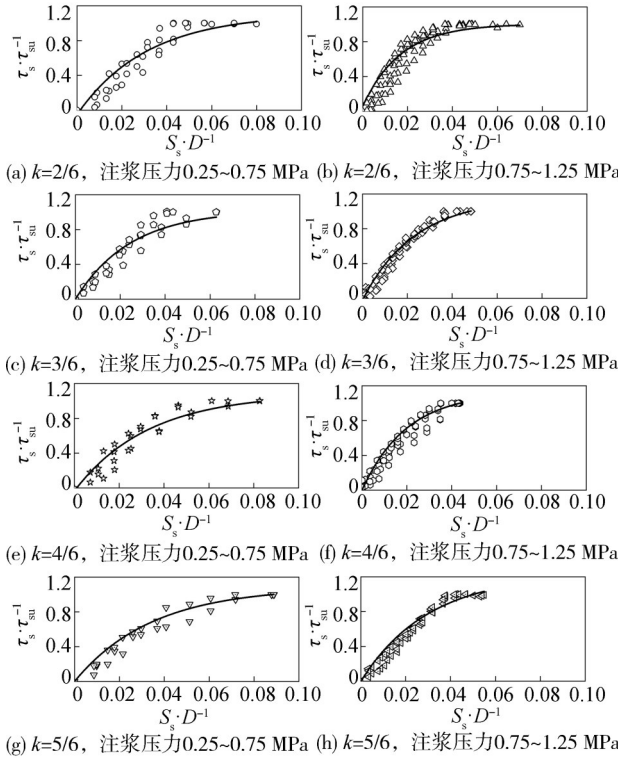


图 11 不同工况下粉砂地层桩侧 $S_s/D-\tau_s/\tau_{su}$ 关系

Fig. 11 Relationship between $S_s/D-\tau_s/\tau_{su}$ on pile side of silty sand stratum under different working conditions

表 6 不同工况下粉砂地层桩侧荷载传递模型拟合曲线参数

Tab. 6 Fitting curves parameters of pile-side load transfer model in silt stratum under different working conditions

k	注浆压力/kPa	α	β	R^2
未加固	0	1.022 81	32.195 75	0.909 52
2/6	[0.25,0.75]	1.130 60	32.041 01	0.877 55
	[0.75,1.25]	0.972 56	58.962 26	0.850 40
3/6	[0.25,0.75]	1.020 37	40.799 67	0.888 61
	[0.75,1.25]	1.159 84	42.900 04	0.958 87
4/6	[0.25,0.75]	1.100 84	30.330 60	0.905 34
	[0.75,1.25]	1.124 81	50.251 26	0.920 59
5/6	[0.25,0.75]	1.081 97	29.036 00	0.927 79
	[0.75,1.25]	1.229 84	33.211 56	0.935 90

由图 11 可知:与粉质黏土地层不同,粉砂地层中桩身的荷载传递曲线没有明显的平稳过程,所有曲线

斜率均逐渐减小。当 S_s/D 在 0~0.04 之间时,曲线斜率随注浆压力的增大逐渐提高,即随着桩顶位移的增加,桩侧摩阻力仍不断缓慢增大,与文献一样出现侧摩阻力的硬化现象^[28]。由表 6 可知:随着注浆压力的增加, β 值逐渐增大,侧摩阻力变化速率增大,荷载传递曲线的曲率逐渐增加。另外,随着 k 值逐渐增大,[0.25,0.75] MPa 注浆压力与 [0.75,1.25] MPa 相比 β 值下降。

3 粉质黏土-粉砂地层摩擦桩桩侧注浆加固效果数值分析

3.1 荷载传递模型的嵌入与准确度验证

根据徒骇河试验区地层及桩基实测数据资料建立数值模拟模型,工程现场桩基长度为 20 m、桩径为 1.2 m,桩体假定为均质弹性体,弹性模量为 20 GPa,泊松比为 0.15。表 7 为桩基的地层分布和物理参数。根据对称性,取四分之一圆截面的桩基建立 30 m×30 m×40 m 的长方体模型。

表 7 模型地层物理参数
Tab.7 Physical parameters of model formation

深度/m	地层	弹性模量/ MPa	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ (°)
[0,8.0)	粉质黏土	8 000	17.8	20.0
[8.0,14.0)	粉砂	10 000	3.5	22.9
[14.0,22.0)	粉质黏土	8 000	17.8	20.0
[22.0,27.0)	粉质黏土	8 000	17.8	20.0
[27.0,40.0]	粉砂	10 000	3.5	22.9

通过 Fortran 语言编写子程序嵌入 ABAQUS 软件可实现桩基承载力分析。本文用 FRIC 在接触面的分析中定义复杂的摩擦桩模型,其原理是通过表面接触模型表现摩擦的特性,以控制接触属性中的切向行为。ABAQUS 软件中,接触方向为主面的法线方向,从面的节点不会穿越到主面,但主面的节点则可以穿越到从面,所以,选择硬度较大的桩面为主面,土为从面。构建模型的过程中,定义桩土接触界面时,引入带有荷载传递模型的 FRIC 子程序。通过荷载传递模型得到摩阻力与桩-土相对位移之间的关系,从而得到桩基承载力。利用 Fortran 语言建立桩-土接触面的荷载传递指数模型,实现基于相似原理的桩基荷载传递模型的嵌入,具体见附录 A。进一步分析加固位置与加固长度对挤密注浆加固对桩基承载力的影响规律。

图 12 为桩基数值模拟与现场实测的荷载-沉降曲线对比。由图 12 可知:桩基实测极限承载力为 6 000 N,数值模拟得到的桩基极限承载力为 5 850 N。两条荷

载-沉降曲线之间的沉降值存在差异,但极限荷载下沉降量吻合程度较好,因此本文提出的荷载传递模型能够对在役桩桩基侧注浆加固效果进行较为准确的预测。

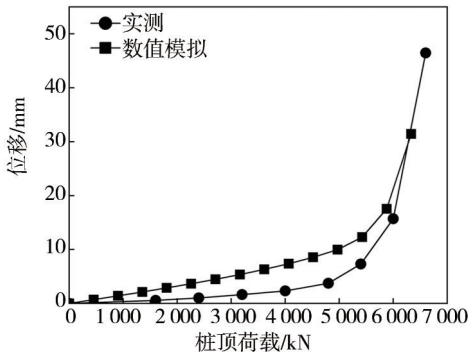


图 12 数值模拟与实测结果对比

Fig. 12 Comparison of numerical simulation and measured results

3.2 加固位置对桩侧注浆加固效果的影响

表 8 给出不同加固位置的桩基承载力及其提升幅度结果,数值模拟中,注浆压力 0.75 MPa, $k=5/6$, 桩基粉质黏土-粉砂-粉质黏土厚度分别为 8 m、6 m、8 m,未加固时桩基承载力为 5 850 kN。由表 8 可见,以 4 m 的加固长度为例,分别在 [0,4) m、[4,8) m、[8,12) m、[12,16) m、[16,20) m 处挤密注浆加固,承载力比未加固时分别提升 7.7%、8.9%、11.6%、13.0% 和 10.9%,两端加固桩基承载力提升幅度较小,加固 [12,16) m 时桩基承载力的提升幅度最大,加固深度为 [8,16) m 桩长处的加固效果明显。

表 8 不同加固位置的桩基承载力及桩基承载力提升幅度
Tab. 8 Bearing capacity of pile foundation with different reinforcement positions and its improvement range

加固位置/m	加固长度/m	桩基承载力/kN	承载力提升幅度/%
未加固	0	5 850	
[0,4)	4	6 300	7.7
[4,8)	4	6 370	8.9
[8,12)	4	6 525	11.6
[12,16)	4	6 610	13.0
[16,20)	4	6 490	10.9

不同加固位置下桩基的极限侧摩阻力分布如图 13 所示。由图 13 可知:随桩基埋深的增加,未加固桩基的极限侧摩阻力呈现先增加后减小的趋势,桩基顶端、底部的侧摩阻力小,桩基中间段的侧摩阻力大,在桩深 20 m 处存在侧摩阻力极值 34 kPa。此时数值模拟中桩基的极限侧摩阻力分布规律与模型试验中极限侧摩阻力分布规律相似,说明模型假设和参数选择合理。注浆加固后,加固区域的桩基极限侧摩阻力明显增大,离加固区域较远的桩基极限侧摩阻力基本保持不变。这是因为桩基加固后加固位置的土体被压密,土体抗剪强度增加,从而提升了侧摩阻力,这与文献中的结论相似^[29]。另外,加固 [0,4) m 时桩侧极限摩阻力提升幅度最弱,加固 [8,12) m 或 [12,16) m 时桩侧极限摩阻力提升幅度最大,此时桩基的承载力分别提升 11.6% 和 13.0% (表 8),加固效果最优,因此加固桩基中下部时桩基承载力提升幅度明显。

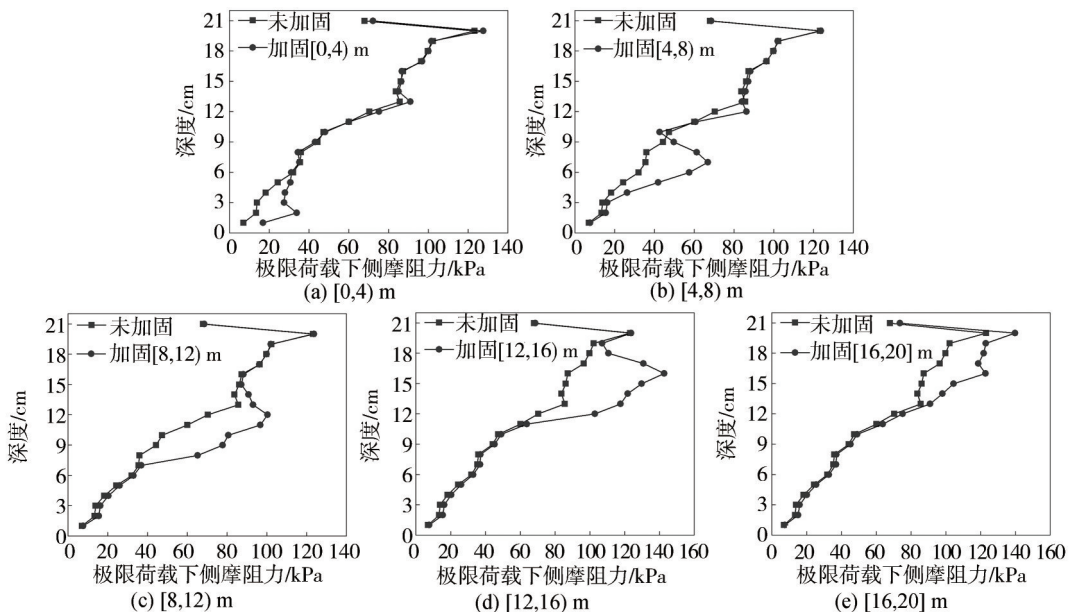


图 13 不同加固位置下桩基极限侧摩阻力分布

Fig. 13 Distribution of ultimate lateral friction of piles under different reinforcement positions

3.3 加固长度对桩侧注浆加固效果的影响

表9给出不同加固长度的桩基承载力及其提升幅度结果。模型试验中,注浆压力0.75 MPa, $k=5/6$ 。

表9 不同加固长度的桩基承载力及承载力提升幅度
Tab. 9 Bearing capacity of pile foundation with different reinforcement lengths and its improvement range

加固层位/m	加固长度/m	承载力/kN	承载力提升幅度/%
未加固	0	5 850	
[0,4]	4	6 300	7.7
[0,8]	8	6 450	10.3
[0,12]	12	6 750	15.4
[0,16]	16	7 200	23.1
[0,20]	20	8 550	46.1

由表9可知:未加固时桩基的初始承载力约为5 850 kN,加固[0,4]、[0,8]、[0,12]、[0,16]和[0,20] m时,桩基极限承载力分别为6 300、6 450、6 750、7 200和8 550 kN,桩基承载力相对于未加固桩基承载力分别提升7.7%、10.3%、15.4%、23.1%和46.1%。表明桩侧注浆加固提高了桩基抵抗荷载的能力,延缓了荷载向下传递速率,

在相同荷载下桩基沉降减少。随着加固长度的增加,桩基的极限承载力逐渐增大,当加固长度超过16 m(约占桩长的70%)时,能够大幅度提升桩中下部的极限摩阻力。

不同加固长度下桩基极限桩侧摩阻力分布如图14所示。由图14可知:随深度的增大,未加固桩基的极限侧摩阻力呈现先增大后减小的趋势。与未加固桩基的极限侧摩阻力相比,加固位置处的桩基的极限侧摩阻力明显提升,未加固位置的桩基的极限侧摩阻力基本保持不变。只加固浅部时,桩基的极限侧摩阻力增大不明显;当加固长度为20 m时,深度[16,20] m处的桩基极限侧摩阻力提升幅度最大。因此,当加固长度超过16 m(约占桩长的70%)时,能够大幅度提升桩中下部的极限摩阻力。在满足桩基承载力提升幅度的前提下,对桩基上部至中下部段进行加固,可节约人力、物力。桩基极限侧摩阻力的大小及分布与桩土性质、桩土接触面上的法向应力有关,挤密注浆加固不仅提高了桩侧土体的力学性能,还对桩土界面施加了法向应力,因此提高了桩基的极限侧摩阻力^[30]。

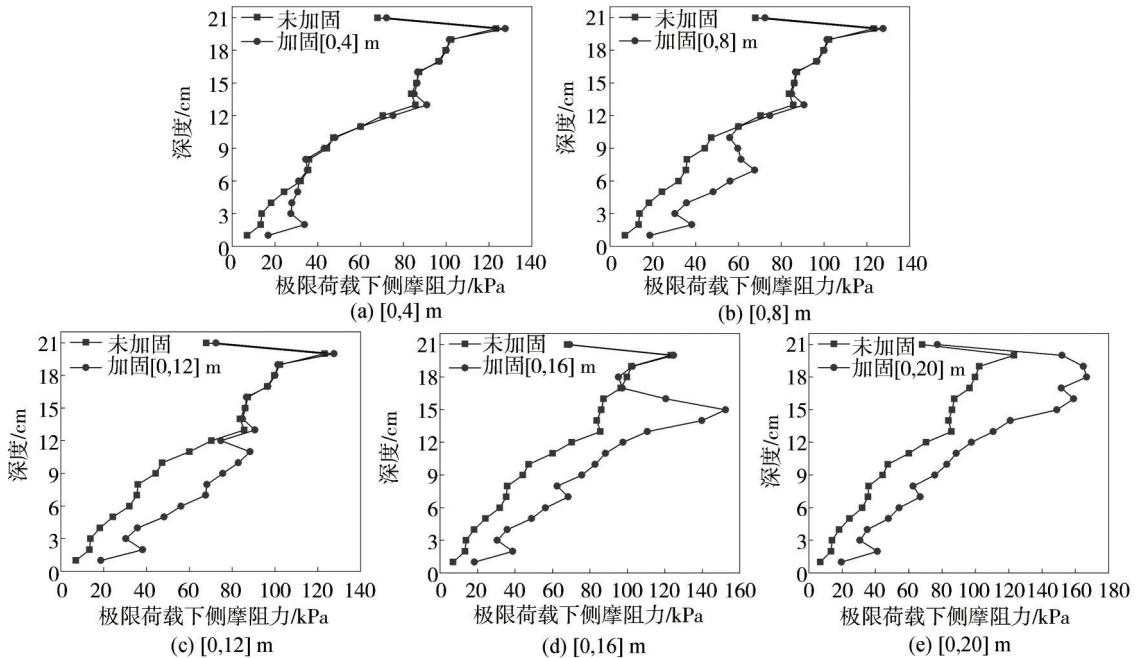


图14 不同加固长度下桩极限侧摩阻力分布

Fig. 14 Distribution of ultimate lateral friction of piles under different reinforcement lengths

4 结论

通过室内模型试验、数值模拟分析粉质黏土-粉砂地层在役桩基桩侧注浆对桩基承载力的作用机制。基于物理相似理论,通过桩基模型试验数据建立桩侧注浆作用下桩-土接触面荷载传递模型,实现工程实际桩基注浆加固数值分析,建立桩侧注浆提升在役桩基承载力的计算分析方法。

1)采用桩侧注浆加固模拟试验实现了桩侧挤密注浆加固参数的设计。随着注浆压力的增加,桩基侧摩阻力和桩基承载力增大。相对于未加固桩基,注浆压力为1.25 MPa时,桩基承载力最大提升167.27%。为保证桩基注浆加固效果,注浆孔与桩侧距离应小于15 cm。

2)基于物理相似理论,根据室内桩侧挤密注浆模拟试验数据建立指数型桩侧荷载传递模型,在数值分

析软件中嵌入荷载传递模型以实现了实际工程条件下桩侧注浆加固数值计算,数值计算承载力与工程静载试验误差小于5%,具有可靠性。

3)数值模拟表明:当加固段长为4 m时,桩基深度40%~90%处加固效果最好,承载力提升幅度为10.7%~13.7%。随着加固长度的增加,桩基的极限侧摩阻力逐渐提高。当加固长度超过16 m(约占桩长的70%)时,能够大幅度提升桩中下部的极限侧摩阻力,相同荷载等级下的沉降值明显下降。

附录见本刊网络版,扫描标题旁的二维码可阅读网络全文。

参考文献:

- [1] Zhang Yanjie, Yang Chengcheng, Wang Xu, et al. Calculation method of negative skin friction of railway bridge cast-in-situ pile in large thickness collapsible loess area[J]. *China Railway Science*, 2023, 44(5): 94–102. [张延杰, 杨成成, 王旭, 等. 大厚度湿陷性黄土场地铁路桥梁灌注桩负摩阻力计算方法[J]. *中国铁道科学*, 2023, 44(5): 94–102.]
- [2] Yan Nan, Sun Gan, Yuan Bingxiang, et al. Field test study on bearing behavior of the fourth strata prestressed concrete pipe pile[J]. *Journal of Central South University(Science and Technology)*, 2023, 54(8): 3273–3285. [闫楠, 孙淦, 袁炳祥, 等. 第四系地层预应力混凝土管桩承载性状现场试验研究[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2023, 54(8): 3273–3285.]
- [3] Chang Juyou, Wang Wenqiang, Yang Wenjie, et al. Research on the characteristics of pile bottom of bridge perfusion piles by reflectance wave method[J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2020, 37(10): 26–31. [常聚友, 汪文强, 杨文杰, 等. 反射波法检测桥梁灌注桩的桩底特征研究[J]. *铁道工程学报*, 2020, 37(10): 26–31.]
- [4] Ji Honglei, Yang Yabin, Zhang Yongwei, et al. Quaternary sedimentary characteristics and land subsidence model in north Shandong Plain[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2019, 93(Supp1): 241–250. [纪洪磊, 杨亚宾, 张永伟, 等. 鲁北平原第四纪沉积特征及地面沉降模式分析[J]. *地质学报*, 2019, 93(增刊1): 241–250.]
- [5] Wang Yonghong, Ma Jiachao, Zhang Mingyi, et al. Study on radial soil pressure at interface of jacked pile between silty soil and silty clay[J]. *Journal of Central South University(Science and Technology)*, 2021, 52(10): 3717–3727. [王永洪, 马加骁, 张明义, 等. 粉土与粉质黏土互层中静压桩桩土界面径向土压力研究[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2021, 52(10): 3717–3727.]
- [6] Zhang Cong, Feng Zhongju, Wang Fuchun, et al. Shaking table test of dynamic response of a single pile under different thicknesses of soft soil layers in a strong earthquake area[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2023, 44(4): 1100–1110. [张聪, 冯忠居, 王富春, 等. 强震区软弱土层差异厚度下单桩动力响应振动台试验[J]. *岩土力学*, 2023, 44(4): 1100–1110.]
- [7] Ni Xiaodong, Wang Chen, Tang Donghua, et al. Early-warning and inducement analysis of super-large deformation of deep foundation pit on soft soil[J]. *Journal of Central South University(Science and Technology)*, 2022, 53(6): 2245–2254. [倪小东, 王琛, 唐栋华, 等. 软土地区深基坑超大变形预警及诱因分析[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2022, 53(6): 2245–2254.]
- [8] Yu Jianlin, Yang Xiaomeng, Zhou Jiabin, et al. Load transfer law of embankment supported by pile-net composite foundation[J]. *Journal of Central South University(Science and Technology)*, 2022, 53(6): 2199–2210. [俞建霖, 杨晓萌, 周佳锦, 等. 桩-网复合地基支承路堤填土荷载传递规律[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2022, 53(6): 2199–2210.]
- [9] Yao Yuchun, Li Anhong, Zhou Bo, et al. Analysis on key technologies of high-speed railway subgrade in Karst foundation[J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2023, 40(8): 35–39. [姚裕春, 李安洪, 周波, 等. 岩溶地基高速铁路路基关键技术分析[J]. *铁道工程学报*, 2023, 40(8): 35–39.]
- [10] Ding Yang, Xiong Ye, Chen Zizi, et al. Field test and numerical simulation for dynamic characteristics of cast-in-place pile[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2022, 43(Supp2): 640–646. [丁扬, 熊晔, 陈孜孜, 等. 灌注桩动力特性试验与数值模拟研究[J]. *岩土力学*, 2022, 43(增刊2): 640–646.]
- [11] Zang Shiqi, Dai Guoliang, Qian Xiaonan. Analysis on mechanical properties of post-grouting pile-soil interface with different grouting materials[J]. *Journal of Southeast University(Natural Science Edition)*, 2023, 53(3): 496–503. [臧诗齐, 戴国亮, 钱晓楠. 不同注浆材料作用下后压浆桩-土界面力学特性分析[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2023, 53(3): 496–503.]
- [12] Cui Qiang, Guo Chaoyi, Zhang Kai, et al. Field test on the uplift bearing characteristics of thin-walled cone-end grouting micro-steel pipe pile[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2021, 53(5): 21–31. [崔强, 郭超溢, 张楷, 等. 薄壁锥端注浆微型钢管桩抗拔承载特性的现场试验[J]. *工程科学与技术*, 2021, 53(5): 21–31.]
- [13] Zhou Yong, Li Zhaofeng, Zuo Zhiwu, et al. Experimental study of the bearing capacity of existing pile foundation in silty clay stratum promoted by pile side grouting[J]. *Hazard Control in Tunnelling and Underground Engineering*, 2022, 4(1): 38–47. [周勇, 李召峰, 左志武, 等. 桩侧注浆提升

- 粉质黏土地层既有桩基承载力试验研究[J].隧道与地下工程灾害防治,2022,4(1):38-47.]
- [14] Li Longqi,Zhao Haoqiu.Lateral bearing characteristics of inclined pile foundation under combined load[J].Advanced Engineering Sciences,2022,54(6):124-134.[李龙起,赵皓璆.组合荷载作用下倾斜桩基横向承载特性[J].工程科学与技术,2022,54(6):124-134.]
- [15] Zhou Yalong,Wang Xu,Zhang Yanjie,et al.Composite post grouting at pile tip and bearing characteristics of cast-in-place pile foundation[J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2022,44(10):1864-1872.[周亚龙,王旭,张延杰,等.灌注桩基础桩底复合式后注浆及承载特性研究[J].岩土工程学报,2022,44(10):1864-1872.]
- [16] Gong Weiming,Zhang Zhitong,Lin Yifeng,et al.Full-scale field test study of bearing characteristics of post-grouting pile for offshore wind turbines[J].Ocean Engineering,2023,268:113451.
- [17] Li Xinran,Gong Quanmei,Shan Yao,et al.Influence of pile side grouting reinforcement on the compressive load bearing capacity of existing piles[C]//Advances in Transportation Geotechnics IV.Cham:Springer International Publishing,2022:947-962.
- [18] Wang Weiguo,Wan Zhihui,Dai Guoliang,et al.Experimental study on axial bearing behavior of super-long and large-diameter bored pile with distributed post-grouting[J].Journal of Building Structures,2024,45(4):155-165.[王卫国,万志辉,戴国亮,等.分布式后压浆超长直径灌注桩竖向承载性能试验研究[J].建筑结构学报,2024,45(4):155-165.]
- [19] Bouchelaghem F,Vulliet L,Leroy D,et al.Real-scale miscible grout injection experiment and performance of advection-dispersion-filtration model[J].International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics,2001,25(12):1149-1173.
- [20] Wu Boqiang,Liu Qing,Yang Dehong,et al.Study on stability of grouting reinforced soil slope in highway[J].Journal of Highway and Transportation Research and Development,2021,38(11):45-51.[武博强,刘青,杨德宏,等.公路土质边坡注浆加固稳定性研究[J].公路交通科技,2021,38(11):45-51.]
- [21] Xiong Caifeng,Xu Fu,Feng Hongming,et al.Laboratory model test study on optimization of post grouting at the end of bridge cast-in-place pile in loess area[J].Journal of Railway Science and Engineering,2022,19(6):1585-1593.[熊彩凤,徐甫,冯泓鸣,等.黄土地区桥梁灌注桩桩端后注浆优化室内模型试验研究[J].铁道科学与工程学报,2022,19(6):1585-1593.]
- [22] Zhou Zhijun,Xu Tianyu,Xu Fu,et al.Bearing characteristics of cast-in-place piles with different hole-forming methods before and after grouting in loess area[J].Journal of Traffic and Transportation Engineering,2021,21(4):84-93.[周志军,徐天宇,徐甫,等.黄土地区不同成孔方式灌注桩压浆前后承载特性[J].交通运输工程学报,2021,21(4):84-93.]
- [23] Zhou Zilong,Du Xueming,Chen Zhao,et al.Grout dispersion considering effect of pore tortuosity[J].The Chinese Journal of Nonferrous Metals,2016,26(8):1721-1727.[周子龙,杜雪明,陈钊,等.考虑孔隙曲折效应的浆液扩散压力[J].中国有色金属学报,2016,26(8):1721-1727.]
- [24] Hu Tao,Wan Zhihui,Dai Guoliang,et al.Regression analysis and optimization for grouting pressure of post-grouting pile in saturated soil[J].Journal of Southeast University (Natural Science Edition),2022,52(5):875-882.[胡涛,万志辉,戴国亮,等.饱和土中后注浆灌注桩的注浆压力回归分析及优化[J].东南大学学报(自然科学版),2022,52(5):875-882.]
- [25] Zhang Yijing,Xiao Hongbin.Analysis on bearing capacity of single pile based on exponential load transfer model[J].Building Structure,2012,42(7):119-122.[张亦静,肖宏彬.基于指数荷载传递模型的单桩承载力特性分析[J].建筑结构,2012,42(7):119-122.]
- [26] Chang Hong,Wu Qiqi,Gan Zhengheng,et al.Study on thermo-mechanical properties of energy piles based on the improved exponential model[J].Case Studies in Thermal Engineering,2023,52:103679.
- [27] Lai V Q,Keawsawasvong S,Shiau J.Analysis of shaft-grouted piles using load-transfer method[J].International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering,2022,8(1):4.
- [28] Zhu Mingxing,Lu Hongqian,Dai Guoliang,et al.Lateral bearing capacity of large-diameter pile foundation based on hardening and softening models of side resistance[J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2018,40(Supp2):132-136.[竺明星,卢红前,戴国亮,等.基于侧阻硬化与软化模型的大直径桩基水平承载力研究[J].岩土工程学报,2018,40(增刊2):132-136.]
- [29] Zheng Xing,Shi Bin,Sun Mengya,et al.Evaluating the effect of post-grouting on long bored pile based on ultra-weak fiber Bragg grating array[J].Measurement,2023,214:112743.
- [30] Zhu Nan,Cui Zhanes.Research on effect of post grouting at pile tip on bearing behavior of single pile[J].Rock and Soil Mechanics,2014,35(Supp2):267-271.[朱楠,崔自治.桩端后注浆对单桩承载性状的作用效应研究[J].岩土力学,2014,35(增刊2):267-271.]

Load Transfer Model Based on Similitude Principle and Numerical Analysis of Reinforcement Effect of Pile Side Compaction Grouting

WANG Yansheng¹, LI Zhaofeng¹, ZHANG Ming¹, LIN Chunjin^{1*}, LYU Sizhong², YAO Wang²

(1. Institute of Geotechnical and Underground Engineering, Shandong University, Ji'nan 250061, China;

2. Shandong High-speed Company Limited, Ji'nan 250014, China)

Abstract:

Objective Bridges play a vital role in the development of transportation infrastructure. The pile foundation is the main load-bearing structure of a bridge and plays a vital role in ensuring its structural safety. As the economy and society continue to advance, many highways experience severe traffic congestion and frequent safety accidents due to a significant increase in traffic volume and limited traffic capacity, necessitating the implementation of expansion projects. However, numerous existing bridge pile foundations fail to meet the load-bearing requirements of these expansion projects. Grouting technology, recognized for its efficiency, cost-effectiveness, and convenience, is widely applied to enhance the load-bearing capacity of pile foundations. Despite its extensive application, the mechanism by which grouting reinforces in-service pile foundations remains unclear, and quantitatively evaluating the grouting effect proves challenging. The design of grouting parameters along the pile side and the evaluation of the reinforcement effect on pile foundations remain key research difficulties. Therefore, it is of substantial scientific and engineering value to systematically and comprehensively investigate the reinforcement mechanism of grouting in existing bridge pile foundations.

Methods Focusing on the reinforcement project of friction piles on silty clay-fine sand formations, this study employed model experiments, finite element simulations, and field tests to clarify the mechanisms by which lateral densification grouting enhanced the load-bearing capacity of existing friction piles. It proposed design methods for lateral grouting parameters and conducted load-bearing capacity analysis for silty clay-fine sand formations, achieving reinforcement through grouting in pile foundations within such formations.

Results and Discussions The main research contents and achievements were as follows: a lateral densification grouting model device was developed, assuming the grouting reinforcement body to be cylindrical along the pile's length, using the lateral expansion of cylindrical airbags to simulate the lateral densification grouting reinforcement method. The study investigated the effects of grouting pressure and the distance between grouting holes and the pile's side on the effectiveness of grouting reinforcement. Based on the ultimate bearing capacity and lateral friction resistance of the pile foundation, a design method for grouting parameters in silty clay-fine sand composite formations was proposed. For every 0.25 MPa increase in grouting pressure, the ultimate bearing capacity of the pile foundation increased by approximately 20% to 40%. Compared to unreinforced pile foundations, when the grouting pressure reached 1.25 MPa, the maximum increase in the pile foundation's bearing capacity was 167.27%. The relative position of the grouting holes to the pile significantly affects the pile foundation's bearing capacity. For every 5 cm increase in the distance between the grouting hole and the pile's side, the decrease in bearing capacity was 12% to 25%. The distance between the grouting hole and the pile's side must be less than 15 cm to ensure the effectiveness of pile foundation grouting reinforcement. Based on the theory of physical similarity, an index-based load transfer model for pile side loads in silty clay and fine sand formations was established using simulated test data from indoor lateral densification grouting experiments. A load transfer index model for the pile-soil contact surface was developed using FORTRAN language and embedded into ABAQUS to conduct numerical calculations of lateral grouting on an engineering scale in existing pile foundations. The reliability of the model was verified by comparing the numerical simulation results with the measured values of pile bearing capacity in the field. The measured ultimate bearing capacity of the pile foundation on-site was 6 000 N, while the numerical simulation produced a value of 5 850 N, demonstrating good agreement in settlement under ultimate loads. Therefore, this load transfer model accurately predicted the effectiveness of lateral grouting reinforcement in existing pile foundations. The study also analyzed the effects of reinforcement position and length on lateral friction resistance and pile bearing capacity.

Conclusions When the length of the reinforced segment is 4 m, the optimal reinforcement effect is achieved when the reinforcement is positioned at a depth ranging from 40% to 90% of the pile length, resulting in a 10.7% to 13.7% increase in bearing capacity. When the reinforcement length exceeds 16 m (approximately 70% of the pile length), it significantly improves the ultimate lateral friction resistance in the lower part of the pile, leading to a noticeable reduction in settlement under the same load level.

Key words: friction pile; compaction grouting; load transfer model; numerical simulation; bearing capacity

(编辑 赵 婧)

引用格式: Wang Yansheng, Li Zhaofeng, Zhang Ming, et al. Load transfer model based on similitude principle and numerical analysis of reinforcement effect of pile side compaction grouting[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2025, 57(3): 134–146. [王衍升, 李召峰, 张明, 等. 基于相似原理的荷载传递模型及桩侧挤密加固效果数值分析[J]. *工程科学与技术*, 2025, 57(3): 134–146.]