

DOI:10.20035/j.issn.1671-2668.2025.02.023

引用格式:别红亮,王振军,仪晓立,等.桩端桩侧联合后注浆对基桩竖向承载力发挥的影响分析[J].公路与汽运,2025,41(2):107-112.

Citation: BIE Hongliang, WANG Zhenjun, YI Xiaoli, et al. Analysis on the influence of end-pile and side-pile combined post-grouting on the vertical bearing capacity of foundation pile[J]. Highways & Automotive Applications, 2025, 41(2): 107-112.

桩端桩侧联合后注浆对基桩竖向承载力发挥的影响分析*

别红亮¹, 王振军², 仪晓立¹, 惠冰², 侯向阳¹, 付邦萌³

(1. 中铁一局集团建设安装工程有限公司, 陕西 西安 710043; 2. 山东省交通科学研究院, 山东 济南 250104; 3. 大连海事大学, 辽宁 大连 116026)

摘要: 为研究桩端桩侧联合后注浆对基桩竖向承载能力发挥的影响, 依托济南城市轨道交通 6 号线里庄车辆段基桩工程, 从荷载-沉降(Q-s)关系、桩身轴力、侧摩阻力和桩端端承力方面对比分析同一场地且相同尺寸试桩注浆前后的静载试验结果。结果表明, 桩端桩侧联合后注浆可提高基桩预估承载力约 61%, 注浆后基桩 Q-s 曲线变得平缓, 残余沉降明显减小, 桩侧土体摩阻力提高, 联合注浆对桩周泥皮及桩端沉渣起到较好的加固作用, 可改善桩-土的接触条件, 提高基桩对变形的抵抗能力和桩-土整体性; 随着基桩总端阻力的增加, 端阻比减小, 无法改变超长桩承载力的发挥规律, 仍然以侧阻力主导承载。桩端桩侧联合后注浆对减小桩体沉降、增大桩侧摩阻力等具有较好的效果。

关键词: 隧道; 钻孔灌注桩; 桩端桩侧联合后注浆; 竖向承载力

中图分类号: U455.4

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2025)02-0107-06

随着经济的不断发展, 工程建设规模逐渐扩大, 对钻孔灌注桩单桩承载特性的要求越来越高。桩侧阻力、桩体本身材质、地质条件均会影响基桩承载特性的发挥^[1], 因桩侧泥皮及桩底沉渣问题导致单桩承载力降低的现象引起广泛关注。钻孔灌注桩后注浆能很好地解决因施工工艺限制所出现的桩侧泥皮和桩底沉渣影响基桩承载力发挥的问题, 是一项改善桩-土间相互作用关系、提升单桩竖向承载力、减小桩基沉降的有效措施^[2-10], 已在地铁工程、高层建筑、高速公路等工程领域得到广泛应用。

近年来相关学者对灌注桩注浆工艺开展了诸多研究。牛浩宇等通过对 4 根位于均质黄土层的模型桩分别开展桩端开式、闭式、复合式注浆、未注浆试验, 基于竖向抗压静载试验方法揭示了桩端不同后注浆方式对灌注桩承载特性的影响, 结果表明桩端复合式注浆能大大提高基桩承载力^[11]。林志豪等通过灌注桩破坏性静载试验, 对比分析软基中桩端桩侧复合式注浆灌注桩与仅桩底注浆灌注桩的承载特

性, 结果表明桩端桩侧复合式注浆基桩的承载力比仅桩底注浆基桩的承载力提升 1.35~1.50 倍^[12]。周亚龙等基于桩底复合式后注浆工艺对工程现场灌注桩开展静载试验, 分析注浆压力等对桩顶位移、承载变形能力的影响, 并基于荷载传递模型提出了复合式后注浆基桩承载力计算方法, 得到了荷载与沉降之间的对应关系^[13]。万志辉等对桩底注浆与未注浆的灌注桩进行现场实测, 分析了黏性土层中桩端后注浆对灌注桩沉降变形、桩端阻力及桩侧阻力发挥性状的影 响^[14]。由于各地区的地质条件差异较大, 且之前对后注浆技术的研究侧重于桩端后注浆, 对桩端桩侧联合后注浆效用机制的研究还不够成熟, 明确桩端桩侧联合后注浆工艺在不同地区的应用效果是目前该技术的重点。本文依托济南城市轨道交通 6 号线里庄车辆段基桩工程, 从荷载-沉降关系、桩身轴力、侧摩阻力和桩端端承力方面对比分析同一场地且相同尺寸试桩注浆前后的静载试验结果, 研究桩端桩侧联合后注浆对基桩竖向承载

* 基金项目: 山东省交通运输科技计划项目(2023B46)

力的增强效应,为黄河流域钻孔灌注桩施工工艺优化提供借鉴。

1 工程概况

济南城市轨道交通 6 号线里庄车辆段工程采用钢筋混凝土盖体结构,主要包括盖体上开发住宅、盖下水处理与换热站、盖外 A 区易燃品库和蓄电池

间、盖外 B 区高层塔楼和裙房等建筑物。根据前期勘察揭露地层情况,该车辆段建设区域属黄河小清河冲洪积平原地貌,未见地面沉降、岩溶塌陷、采空区、滑坡、泥石流等地质灾害和不良地质,无全新活动断裂带通过,除有人工填土、胶结砂、胶结砾岩、混合土及有机质土分布外,无其他特殊性岩土。各土层岩土参数见表 1。

表 1 各土层岩土参数

岩土分层	岩土名称	天然密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)	天然含水量/ %	黏聚力/ kPa	内摩擦 角/($^{\circ}$)	地基基本承 载力/kPa	钻孔灌注桩侧阻 力标准值/kPa	钻孔灌注桩端阻 力标准值/kPa
① ₁	素填土	1.65	—	10	12	—	—	—
① ₂	杂填土	1.70	—	8	10	—	—	—
⑨ ₁	粉质黏土	1.95	27.3	26	16	140	50	400
⑨ ₁₋₁	粉质黏土	1.89	29.2	17	9	120	50	380
⑨ ₃	粉土	1.97	21.5	16	23	160	53	420
⑨ ₃₋₁	粉土	1.96	22.1	15	23	160	53	420
⑨ ₅	卵石	2.00	—	0	35	310	100	1 600
⑨ ₇	中细砂	2.00	—	0	28	170	53	480
⑩ ₁	粉质黏土	1.97	24.6	27	16	170	55	600
⑩ ₁₋₁	胶结粉质黏土	2.05	—	—	—	210	60	1 000
⑩ ₄	中细砂	2.02	—	0	28	190	60	1 000
⑩ ₄₋₁	胶结砂	2.08	—	10	32	230	80	1 400
⑩ ₅	卵石	2.10	—	0	35	330	120	1 800
⑩ ₆	圆砾	2.10	—	0	35	320	110	1 600
⑩ ₇	粉土	2.03	20.5	17	22	170	55	600
⑭ ₁	粉质黏土	1.92	26.8	28	15	200	60	800
⑭ ₃	细中砂	2.03	—	0	30	220	70	1 500
⑭ ₄	卵石	2.10	—	0	40	390	120	2 000
⑭ ₄₋₁	胶结砂	2.00	—	—	—	410	100	2 000
⑰ ₁	粉质黏土	1.93	26.3	28	15	220	65	900
⑰ ₁₋₁	胶结粉质黏土	2.05	—	—	—	240	70	1 200
⑰ ₃	含碎石粉质黏土	1.94	—	30	20	260	90	1 500
⑰ ₅	卵石	2.10	—	0	42	410	140	2 300
⑰ ₆	细中砂	2.05	—	0	27	260	75	1 800
⑰ ₆₋₁	胶结砂	2.10	—	—	—	410	100	2 000
⑰ ₈	胶结砾岩	2.10	—	—	—	510	150	2 500

该车辆段工程采用泥浆护壁钻孔灌注桩进行地基加固处理,护壁泥浆采用人工造浆,桩身材料主要为水下 C35 混凝土、HPB300 和 HRB400 钢筋。为

防止桩身变形,钢筋笼采用螺旋箍,与桩纵向钢筋局部点焊。纵向钢筋采用机械连接或焊接连接,接头间距为 $35d$ (d 为钻孔灌注桩桩径)。如图 1 所示,

工程现场采用的钻孔灌注桩桩型参数如下:桩径为 800 mm,桩长为 45 m,单桩竖向抗压承载力特征值为 4 200 kN;桩基持力层为⑭₁粉质黏土层或⑯₁粉质黏土层,桩端嵌入持力层深度大于 3 倍桩径 d 。本文仅对该桩型开展研究。

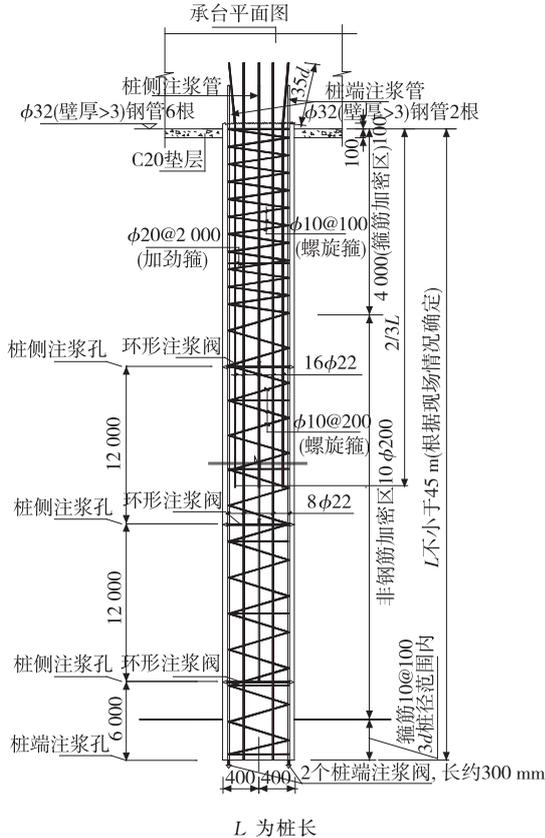


图 1 钻孔灌注桩桩身示意图(单位:mm)

为研究后注浆技术对基桩竖向承载力发挥的增强效果,采用桩端桩侧联合后注浆技术进行施工。在桩端设置 2 个桩端注浆阀,在桩侧对称位置设置 4 个桩侧注浆阀,注浆导管采用钢管,注浆导管连接采用套丝,注浆钢管与加劲箍点焊、与箍筋绑扎或焊接。注浆水泥采用普通硅酸盐 P.O 42.5 水泥,水灰比为 0.45~0.65,注浆压力为 1.2~4.0 MPa,注浆流量不超过 75 L/min。图 1 所示桩型单桩注浆量不少于 2.5 t。

2 竖向承载力增强效应研究

为分析桩侧桩端联合后注浆对基桩竖向承载力发挥的影响,采用平行对比试验法,对 5 根未注浆试桩和 5 根桩端桩侧联合后注浆试桩进行竖向抗压静载试验。10 根试桩为同一场地的相邻桩,桩径、桩长和桩端持力层相同,所穿过的地层结构、土层厚度

一致,设计参数见表 2。

表 2 试桩的设计参数

试桩编号	桩径/mm	设计桩长/m	持力层	设计承载力特征值/kN	施工工艺
1	800	45		4 200	
2	800	45		4 200	
3	800	45	粉质黏土层	4 200	未注浆
4	800	45		4 200	
5	800	45		4 200	
6	800	45		4 200	
7	800	45	粉质黏土层	4 200	桩端桩侧联合后注浆
8	800	45		4 200	
9	800	45		4 200	
10	800	45		4 200	

静载试验采用堆载反力装置,用油压千斤顶加载,用位移传感器测量各级荷载下桩顶沉降。钢筋应力计埋设在土层分层处、桩顶及桩端附近,且在桩身同一截面位置至少埋设 2 个钢筋计,钢筋计数据采集与静载试验同时进行。加载方式采用慢速维持荷载法,每级加载时,同时观测桩顶沉降和钢筋应力计的读数。试验过程按 JGJ 106—2014《建筑基桩检测技术规范》执行。

2.1 荷载-沉降曲线对比分析

试桩静载试验结果见表 3,荷载-沉降($Q-s$)曲线见图 2。

表 3 试桩静载试验结果

试桩编号	最大加载/kN	最大沉降量/mm	最大回弹量/mm	回弹率/%
1	6 975	40.15	0.00	0.00
2	6 975	42.87	0.00	0.00
3	6 975	43.79	0.00	0.00
4	6 200	46.83	0.00	0.00
5	6 975	40.15	0.00	0.00
6	10 080	26.61	10.68	40.14
7	10 080	39.32	14.20	36.11
8	11 200	28.86	11.46	39.71
9	10 080	38.97	8.75	22.45
10	11 200	15.51	6.56	42.30

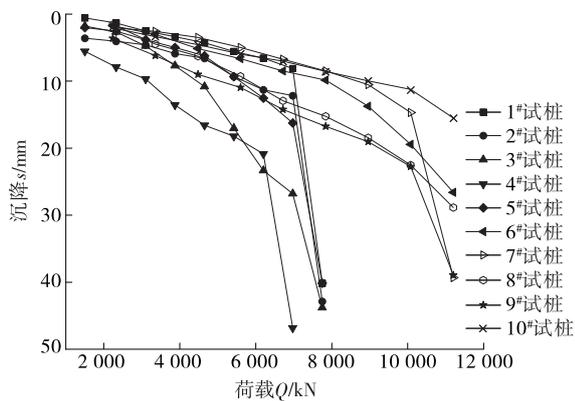


图 2 试桩静载试验 Q-s 曲线

由表 3、图 2 可知:1) 5 根未注浆试桩在静载试验后均被破坏,单桩竖向抗压极限承载力仅为 6 200 kN、6 975 kN,最大沉降量为 46.83 mm,未达到设计承载力要求。桩端桩侧联合后注浆试桩单桩竖向抗压极限承载力最大为 11 200 kN,提高约 61%;加载至最大预设荷载时 5 根试桩均未被破坏,对应最大沉降量分别为 26.61 mm、39.32 mm、

28.86 mm、38.97 mm、15.51 mm,最大回弹率达 42.30%,满足承载力设计要求。2) 荷载较小时,两种施工工艺下试桩的 Q-s 曲线基本一致,但注浆后的 Q-s 曲线比注浆前的平缓,且在相同荷载作用下,注浆后桩顶沉降较小,在相同沉降下,注浆后桩顶荷载较大。联合后注浆技术可提高基桩承载力,减小桩顶位移沉降。3) 回弹量较大,残余沉降较小,即弹性变形大、塑性变形小。后注浆试桩的残余沉降更小,说明其桩-土间主要发生的是弹性变形,桩侧桩端后注浆对桩周泥皮及桩端沉渣起到较好的加固作用,后注浆试桩抵抗变形的能力比未注浆试桩强,桩-土整体性得到有效提升。

2.2 桩身轴力对比分析

利用钢筋应力计荷载转换公式,将应力计采集的应力转化成轴力,得到各试桩加载阶段截面轴力沿桩身埋深的分布。图 3 为其中典型试桩(3[#]试桩、4[#]试桩、9[#]试桩、10[#]试桩)的轴力分布。

由图 3 可知:随着荷载的增大,特征截面的轴力

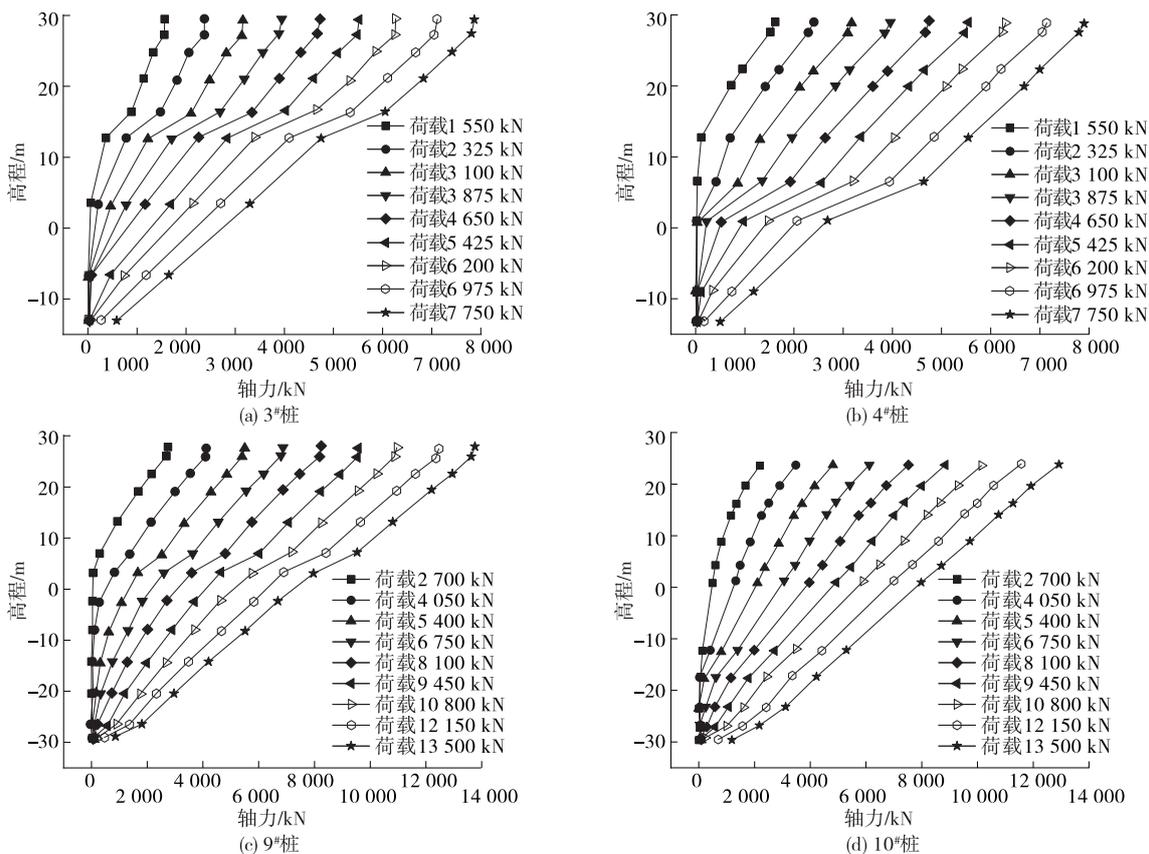


图 3 典型试桩桩身轴力沿深度的变化

增大;相同荷载下,随着桩基埋深的增加,特征截面的轴力减小。轴力分布曲线斜率与特征截面之间的轴力差呈负相关关系,斜率越大,轴力差越小,桩侧

摩阻力越小。在荷载加荷初期,桩身轴力沿深度衰减较慢;随荷载的增大,侧摩阻力逐渐占据主导作用,轴力沿深度方向衰减的速率增大。与未注浆试

桩相比,桩顶荷载达到最大值时,注浆后试桩的轴力曲线斜率更小,桩侧土体的摩阻力提高。

2.3 侧摩阻力对比分析

图 4 为试桩桩侧摩阻力与桩端位移的关系。由图 4 可知:桩顶荷载较小时,后注浆对试桩桩侧摩阻力的影响不显著,侧摩阻力与端部位移大致呈线性关系。桩顶荷载为 6 200 kN 左右时,未注浆试桩桩侧摩阻力增长速率减慢,沉降量急剧增加直至达到极限侧摩阻力,试桩被破坏;而后注浆试桩桩侧摩阻力与端部位移关系曲线的斜率无明显变化,说明未达到桩侧极限摩阻力。后注浆技术可改善基桩-土体的相互作用关系,削弱桩周泥皮对基桩竖向承载力的影响,极限侧摩阻力增加,基桩竖向抗压承载力提高。

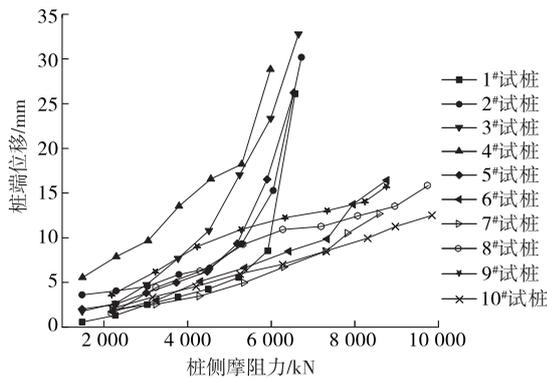


图 4 桩侧摩阻力与桩端位移的关系

2.4 桩端端承载力对比分析

试桩桩端阻力分担荷载比例见表 4。由表 4 可知:试桩桩端荷载分担比例均不超过 15%,荷载主

表 4 桩端参数

试桩编号	极限承载力/kN	总桩侧摩阻力/kN	总桩端阻力/kN	端阻比/%
1	6 975	6 573	402	5.76
2	6 975	6 722	253	3.63
3	6 975	6 655	320	4.59
4	6 200	5 985	215	3.47
5	6 975	6 542	433	6.21
6	10 080	8 764	1 316	13.06
7	10 080	8 600	1 480	14.68
8	11 200	9 760	1 440	12.86
9	10 080	8 756	1 324	13.13
10	11 200	9 845	1 355	12.10

要由桩侧摩阻力承担,属端承摩擦桩。采用桩端桩侧后注浆工艺并不能改变超长桩的承载力发挥规律,承载力主要由侧阻力提供,端阻力占比很小。在单桩极限承载力方面,注浆后试桩的总桩端阻力和荷载分担比明显提高,说明联合注浆对桩端阻力发挥有积极作用。在总桩端阻力方面,总端阻力增加对承载力提高作用并不显著,注浆前后端阻比均不高,显示桩主要承担摩阻力,类似于摩擦桩破坏形式。注浆后桩侧摩阻力得到提升,从而显著提高了钻孔灌注桩的极限竖向承载能力。

桩端阻力与桩顶荷载的关系见图 5。由图 5 可知:桩顶荷载较小时,桩顶荷载主要由侧摩阻力平衡,桩端阻力未发挥作用。随着桩顶荷载的增大,荷载开始传递到桩端。未注浆试桩桩顶荷载超过 6 200 kN 时,桩端阻力-荷载曲线的斜率陡增,侧摩阻力达到极限值,桩顶荷载增加量全部由桩端阻力承担。后注浆试桩桩端阻力-荷载曲线的斜率基本不变,表明桩端阻力与桩侧摩阻力仍在同步增长,未达到极限值。

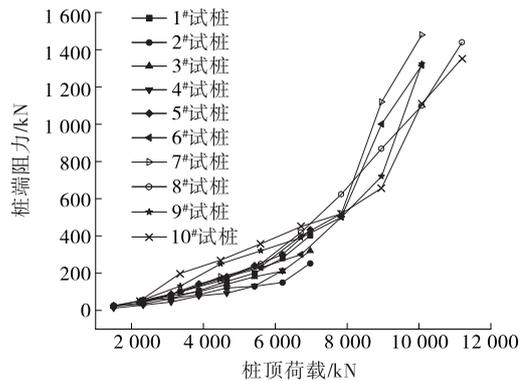


图 5 桩端阻力与桩顶荷载的关系

综合图 2 和图 5,桩端阻力与桩端沉降存在正相关关系,桩端阻力越大,桩顶沉降越大;桩端阻力越小,桩顶沉降越小,且桩端阻力与桩端沉降关系曲线的斜率逐渐增大。对于相同的桩端位移,后注浆试桩的试验荷载值比未注浆试桩的大,且对应的桩端阻力更大。表明在桩端位移较小的情况下,后注浆试桩能产生较大的桩端阻力,从而降低基桩沉降,增强其竖向承载力。

3 结论

本文对比分析济南城市轨道交通 6 号线里庄车辆段钻孔灌注桩在桩端桩侧联合后注浆前后的静载试验结果,从荷载-沉降关系、桩身轴力比、桩侧摩阻

力、桩端端承力方面分析桩端桩侧联合后注浆对基桩竖向承载力发挥的影响,结论如下:

(1) 桩端桩侧联合注浆后单桩竖向抗压极限承载力提高约 61%,最大沉降量由注浆前 46.83 mm 降低至 39.32 mm,注浆后加载至最大预设荷载时仍未破坏,试桩最大回弹率达 42.30%,且注浆后试桩的 Q-s 曲线比注浆前平缓,联合后注浆对提高基桩承载力、降低沉降量的效果显著。

(2) 后注浆产生的加固作用可改善基桩-土体的相互作用关系,提高基桩对变形的抵抗能力和整体性,增强桩身的极限侧摩阻力,从而提高桩基竖向承载力。

(3) 虽然后注浆试桩总端阻力增加,但端阻力占比仍然较小,无法改变超长桩承载力的发挥规律,仍然以侧阻力主导承载。

参考文献:

[1] 尹平保,邹靖,曹先慧,等.斜坡段桥梁基桩竖向承载力试验及数值模拟研究[J].公路与汽运,2019(3):119-122.

[2] 陈祉阳,龚维明,靳朋刘,等.基于分布式后压浆的灌注桩承载力试验研究[J].地下空间与工程学报,2022,18(增刊2):689-695.

[3] 刘红艳,万志辉.桩端后压浆对钻孔灌注桩侧摩阻力的增强作用[J].武汉大学学报(工学版),2020,53(12):1078-1084.

[4] 李锋,王康超,朱珊珊,等.黄土地区桩端注浆群桩承载特性[J].铁道科学与工程学报,2021,18(12):3210-3218.

[5] 李乾,陈金科,李志新.大直径后注浆钻孔压灌桩在某地铁车辆段的应用[J].建筑结构,2016,46(24):76-79.

[6] 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.

[7] 王思,张永杰,程鑫,等.大直径超长桩承载性状影响研究[J].交通科学与工程,2021,37(2):68-75.

[8] 严伟飞,尚佩,陈永生,等.后压浆法对桥梁单桩承载力增强效应研究[J].公路与汽运,2020(3):110-112+117.

[9] WAN Z H,DAI G L,GONG W M.Field and theoretical analysis of response of axially loaded grouted drilled shafts in extra-thick fine sand[J].Canadian Geotechnical Journal,2020,57(3):391-407.

[10] 邱力杰,尹平保,王礼华,等.考虑空间效应的深长基坑围护结构受力与变形分析[J].交通科学与工程,2023,39(4):70-79.

[11] 牛浩宇,李永升,王旭,等.桩端不同后注浆方式模型桩力学特性室内试验研究[J/OL].水利水运工程学报:1-8[2023-10-27].

[12] 林志豪,陈宏湛,陈仁伟,等.滨海软基后注浆灌注桩承载性状现场试验研究[J].地下空间与工程学报,2022,18(增刊2):578-586.

[13] 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.

[14] 万志辉,戴国亮,王磊,等.黏性土层中后压浆桩承载性状的对比试验研究[J].岩土工程学报,2018,40(增刊2):194-198.

收稿日期:2023-11-29

(上接第 102 页)

[5] 李宁,杜松,王振,等.中马友谊大桥主桥深水基础临时结构设计及施工技术[J].桥梁建设,2023,53(4):147-154.

[6] 张文军.环境敏感库区深水浅覆盖层大跨钢便桥快速施工技术[J].大众标准化,2022,4(10):175-177.

[7] 曾健,关小会,郭志伟.深水硬质岩嵌入式承台无封底施工关键技术[J].中外公路,2024,44(2):207-213.

[8] 李怡辰,冯仲仁,吕尔燕.基于云模型的深水桥梁基础施工风险评估[J].中外公路,2021,41(1):164-169.

[9] 张豪,郑义,韩庆雄.三峡库区桥梁深水基础围堰施工技术[J].中外公路,2020,40(5):118-121.

[10] 田杰.秀山跨海大桥深水无覆盖层基础设计与施工[J].中外公路,2020,40(3):142-145.

[11] 中交一局集团有限公司.公路桥涵施工技术规范:JTG/T 3650—2020[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2020.

收稿日期:2024-12-23