

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2014.07.003

桩端桩侧后注浆钻孔灌注桩承载性能试验研究

郭院成¹, 张景伟¹, 董晓星²

(1. 郑州大学 土木工程学院, 河南 郑州 450000; 2. 河南农业大学新校区建设指挥部, 河南 郑州 450002)

摘要: 从钻孔灌注桩竖向承载机理及其承载能力影响因素出发, 考虑桩端桩侧复式后注浆施工对钻孔灌注桩端土层和桩侧泥皮的加固效应, 初步探讨了郑州地区复式后注浆钻孔灌注桩的承载能力和变形特性, 通过郑州某工程复式后注浆钻孔灌注桩现场足尺寸静载荷试验, 研究了后注浆对钻孔灌注桩桩端阻力、桩侧摩阻力的提高效应, 对桩端桩侧荷载分担比以及对沉降变形和整体竖向承载力的影响等。结果表明: 桩侧注浆很好地改善了桩土界面力学性质, 使侧阻力得到有效发挥; 桩端注浆使沉渣层等桩端土层得以加固, 桩端阻力提前发挥; 复式注浆作用使桩土界面塑性位移减小, 桩顶沉降变缓, 灌注桩承载能力得到明显提高。

关键词: 道路工程; 地基基础工程; 承载性能; 试验研究; 复式后注浆; 钻孔灌注桩

中图分类号: U416.1, TU473.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268 (2014) 07-0014-05

Experimental Study on Bearing Capacity of Bored Piles Using Pile Tip and Side Post-grouting Technology

GUO Yuan-cheng¹, ZHANG Jing-wei¹, DONG Xiao-xing²

(1. School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou Henan 450000, China;

2. New Campus Construction Headquarters, Henan Agriculture University, Zhengzhou Henan 450002, China)

Abstract: In view of the vertical bearing mechanism of bored cast-in-place piles and the influencing factors of their bearing capacity, considering the reinforcement effect on pile tip soil and pile side mud cake by compound post-grouting at pile tip and side, the bearing capacity and deformation property of compound post-grouted bored piles in Zhengzhou area are preliminary discussed. By full-scale static loading test on the post-grouted bored piles of a project in Zhengzhou, the improving effect of pile tip resistance and pile side frictional resistance, the load share of pile tip and side by composite post-grouting, and its influence on settlement deformation as well as the whole vertical bearing capacity are researched. The results show that (1) grouting at pile side has improved the mechanical property of interface between pile and soil, which made the resistance of pile side play effectively; (2) grouting at pile tip has reinforced soil layer of pile tip such as sediment layer, which made the resistance of pile tip play in advance; (3) compound grouting has decreased the plastic displacement of interface between pile and soil, which made pile tip settlement slowly and obviously improved the bearing capacity of bored piles.

Key words: road engineering; ground foundation engineering; bearing capacity; experimental study; composite post-grouting; bored cast-in-place pile

0 引言

钻孔灌注桩是目前桥梁、港口和高层建筑物最

常用的基础形式^[1-5]。钻孔灌注桩由于在成孔过程中, 为了平衡地层土压力, 防止孔壁坍塌、孔缩等, 采用泥浆护壁措施, 并且不可避免的有一部分土体

收稿日期: 2013-07-13

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50978235)

作者简介: 郭院成 (1965-), 男, 河南辉县人, 教授, 博士生导师. (guoyuancheng@163.com)

颗粒沉淀在孔底形成沉渣,而泥皮和沉渣的存在对灌注桩的承载力有较大的不利影响^[6-10]。钻孔灌注桩后注浆技术是在工程实践的基础上为解决上述缺陷而发展起来的一种先进技术。因此,对后注浆钻孔灌注桩承载性能的研究有着非常重要的工程意义和实践价值。

1 工程概况与地质条件

本试验以郑州某快速路工程西三环段桩基工程为依托。郑州某快速路工程西三环段沿线岩土工程勘察揭露地表下 60 m 深度内的地基土,为第四系松散沉积物,岩性以粉质黏土、粉土为主,40~50 m 为钙质胶结层,各岩土层的设计参数值如表 1 所示。初步设计桩型为直径 1.5 m、桩长 55 m 的钻孔灌注桩。由于钙质胶结层施工周期长、难度大、费用高,为避免设计桩长穿越胶结层,并达到设计要求的承载力,经论证决定通过桩端桩侧后注浆技术来解决此问题。

表 1 各土层力学参数

Tab. 1 Mechanical parameters of each soil layer

土层编号	岩土名称	层底埋深/m	承载力基本容许值 [f_{a0}]/kPa	钻孔桩桩侧土摩阻力标准值 q_{ik} /kPa
②	粉土	16.2~19.0	200	50
③ ₁	粉土	25.2~31.2	240	70
③ ₂	粉质黏土	29.6~45.6	390	80
③ ₃	粉土	34.2~52.2	220	70
③ ₄	粉质黏土	未揭穿	410	80

2 试桩试验方案

试桩试验数量为钻孔灌注桩 6 根,其中 S_1 桩不进行注浆施工, $S_4 \sim S_6$ 桩进行桩端桩侧复式注浆。试桩桩径均为 1.2 m,桩长 38.0 m,混凝土强度等级为水下 C30,桩端持力层为③₃粉土、③₂粉质黏土层,桩周土体以粉土、粉质黏土为主。注浆工艺参数为:桩侧注浆水泥用量为 2 t,注浆压力为 1 MPa 左右;桩端注浆水泥用量 3 t,注浆压力约为 2 MPa;单根桩注浆水泥总用量为 5 t,水灰比为 0.6。本试桩试验桩端桩侧复式注浆施工流程如图 1 所示。

为了详细地测试分层桩侧阻力和桩端阻力,本试验采用振弦式钢筋应变计来监测有效桩长承载力和有效桩长范围内桩身轴力的分布情况以及桩身受力变形情况,其详细布设方案如图 2、图 3 所示。

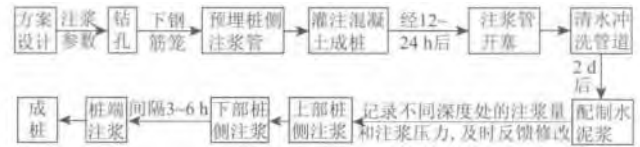


图 1 注浆施工流程图

Fig. 1 Flowchart of grouting construction

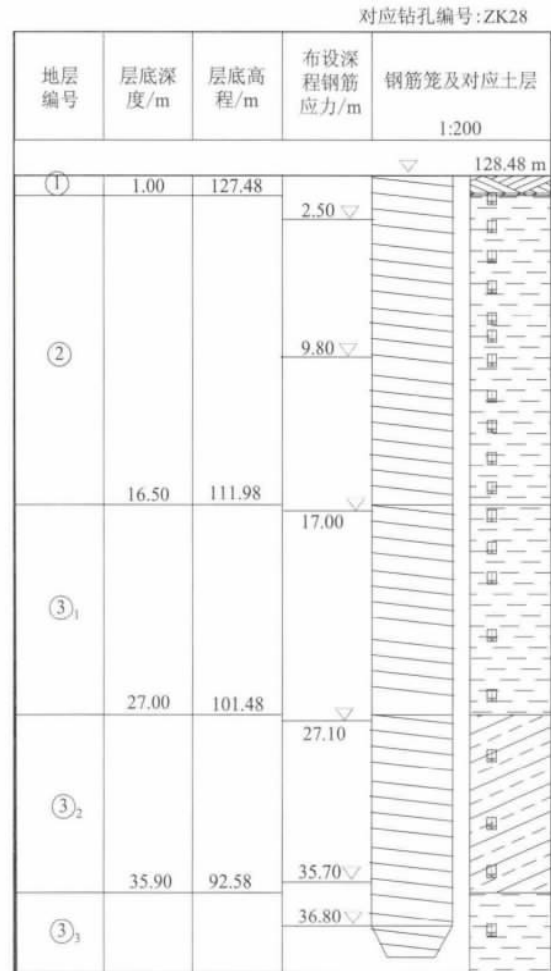


图 2 S1 桩钢筋应力计布置方案

Fig. 2 Arrangement scheme of steel bar stress meters on pile S1

3 试桩试验结果

3.1 桩基承载力性状分析

现场静载荷试验反力装置采用锚桩作为反力系统,并采用慢速维持荷载法进行试验,在桩顶位置设置了 4 个位移传感器来测量沉降量。由于试验条件有限,本试验最大加载量为 22 000 kN。4 根试桩的 $Q-s$ 曲线如图 4 所示。

从图 4 可看出: S_1 破坏特征点明显,极限承载力为 16 800 kN;注浆灌注桩 S_4 , S_5 最大加载量下其最大位移未超过 10 mm,竖向承载能力仍有较大潜力

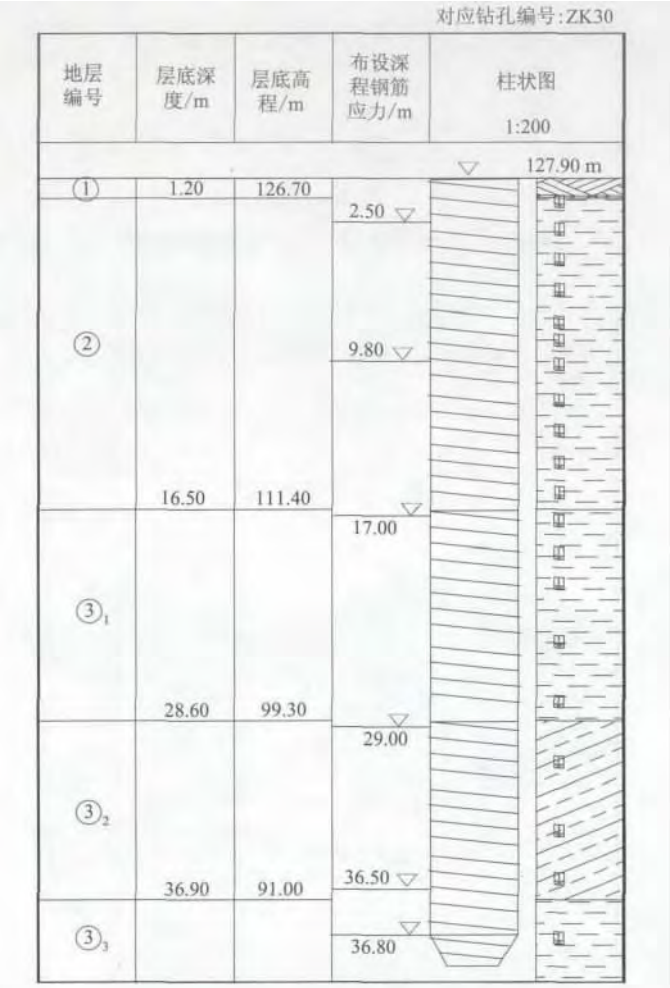


图 3 S1 桩钢筋应力计布置方案

Fig. 3 Arrangement scheme of steel bar stress meters on piles S4 ~ S6

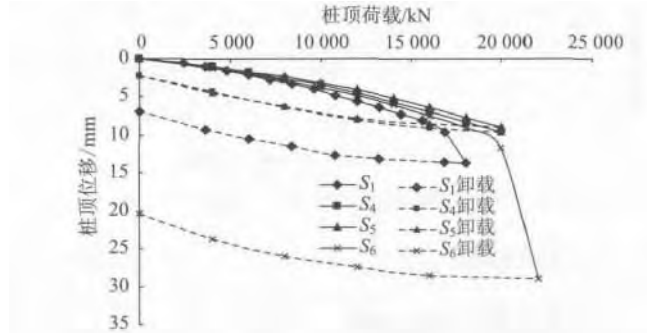


图 4 注浆前后桩基 $Q-s$ 曲线对比

Fig. 4 Comparison of $Q-s$ curves before and after grouting

可以发挥, S_4 和 S_5 的极限承载能力 $\geq 20\,000\text{ kN}$; S_6 注浆桩其竖向极限承载力为 $20\,000\text{ kN}$ 。复式注浆灌注桩相比未注浆灌注桩其承载力提高幅度 $\geq 19\%$ 。注浆后灌注桩承载能力得到明显提高, 满足单桩极限承载力 $\geq 18\,000\text{ kN}$ 的设计要求。

对比未注浆灌注桩和注浆灌注桩的 $Q-s$ 曲线, 注浆后灌注桩的曲线斜率小于未注浆桩, 相同荷载作用下桩顶位移变小。从图 4 可以看出, 在 $16\,800\text{ kN}$ 作用下, 未注浆桩 S_1 已经达到极限承载力, 其桩顶位移为 9.6 mm ; 而 S_4, S_5, S_6 桩在本级荷载作用下, 还未达到极限承载力, 其桩顶位移分别为 $7.5, 6.95\text{ mm}$ 和 8.33 mm , 位移量分别为 S_1 桩的 $78\%, 72\%, 87\%$ 。桩顶荷载大于 $16\,800\text{ kN}$ 时, 未注浆灌注桩 S_1 沉降量迅速增大, 发生陡降型破坏, 注浆灌注桩 S_4, S_5 桩顶基沉降量仍然较小, 竖向承载能力还具有较大潜力可以发挥。

卸载后, S_1, S_4, S_5, S_6 桩的塑性位移分别为 $7, 2.2, 2.2\text{ mm}$ 和 20.4 mm , 未注浆灌注桩是注浆灌注桩 S_4, S_5 的 3.2 倍, 说明注浆灌注桩 S_4, S_5 桩土间的弹性工作作用的贡献比未注浆桩明显增大, 桩端桩侧复式注浆对桩周泥皮及桩端沉渣起到较好的加固作用, 使桩与土之间的整体性得到有效提升。灌注桩后注浆技术可以明显地改善桩的受力性状^[3-4], 增强钻孔灌注桩的安全保障。

另外, 由图 4 可以看出, S_6 注浆桩其竖向极限承载力为 $20\,000\text{ kN}$, 属于陡降型破坏。同为注浆灌注桩, S_6 桩相比 S_4 和 S_5 桩其极限承载力较小和沉降量较大, 经查询 S_6 桩注浆记录, S_6 桩是桩底开塞不及时, 导致注浆不顺畅, 进而影响了其竖向承载力的提高。因此, 只有严格操作程序进行注浆, 才能保障注浆的效果, 发挥注浆技术的优势。

3.2 注浆前后桩端阻力对比

由桩端应变计算得出桩端阻力数值, 分析注浆前后桩端阻力和桩端荷载分担比的变化, 如表 2 所示。

表 2 桩基注浆前后桩端阻力对比

Tab. 2 Comparison of pile tip resistances before and after grouting

桩号	S_1 (未注浆)	S_4 (注浆)	S_5 (注浆)	S_6 (注浆)
极限承载力/kN	16 800	>200 00	>20 000	20 000
总桩端阻力/kN	923	1 549	1 751	2 679
增大系数		1.679	1.897	2.904
平均增大系数	2.16			
桩端荷载分担比/%	5	8	9	13.4
总桩侧摩阻力/kN	15 877	18 451	18 429	17 321
桩侧荷载分担比/%	95	92	91	86.6

从表 2 可以看出, S_4, S_5, S_6 桩端阻力的分别为 S_1 桩的 1.7 倍, 1.9 倍, 2.9 倍, 平均提高系数为

2.16,说明后注浆灌注桩桩端阻力较未注浆桩有明显的提高。

对比注浆前后桩侧、桩端荷载分担比可知:在极限荷载作用下,不论是注浆桩还是未注浆桩,桩侧阻力荷载分担比都比较大,在90%左右,属端承摩擦桩^[2]。后注浆使桩端荷载分担比由未注浆时的5%增大到8%以上,后注浆使桩端阻力承担荷载的比例有较明显增大,有效地改善了端阻侧阻异步发挥的情况。

3.3 桩身侧摩阻力发挥特性

本文根据桩身不同桩顶荷载作用下的轴力数值反算出桩周各土层侧摩阻力数值,得出了不同桩顶荷载下侧摩阻力的分布曲线如图5所示。

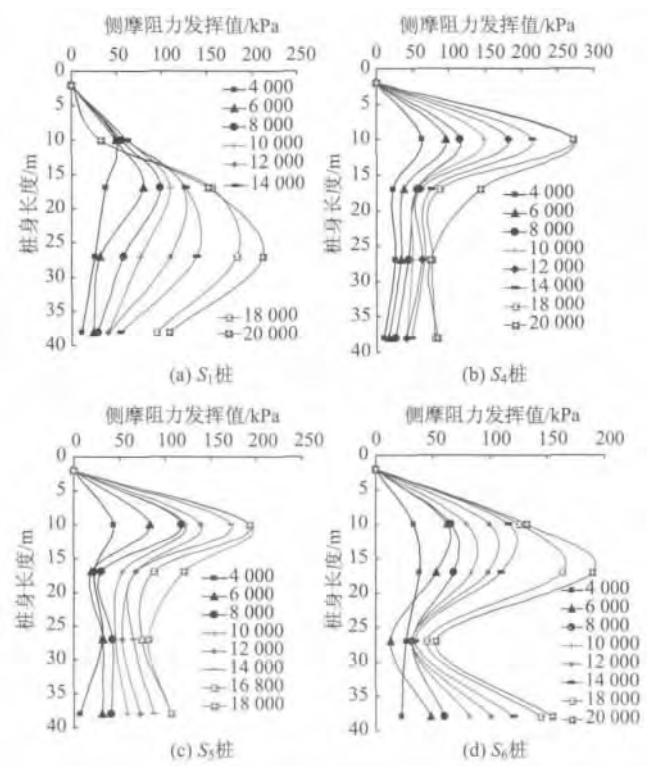


图5 桩在各级荷载作用下的侧摩阻力

Fig.5 Pile side frictions under different loading levels

由图5可知,在桩顶荷载作用下,桩侧阻力自上而下逐步发挥。随着荷载的逐步增大,各土层各区段桩侧阻力逐渐发挥,直至达到极限侧阻力值。图5中, S_1 桩桩顶荷载超过16800 kN后,上部桩侧阻力出现明显的跌落现象,说明桩土相对位移已超过极限值,开始出现滑移。 S_4 , S_5 和 S_6 桩注浆后,桩土界面力学性质得到改善,桩身上部(0~17 m)为侧阻力的主要发挥段,桩身下部侧阻力还没有完全发挥^[11]。另外,前文研究表明注浆后桩端阻力得以提前发挥,桩端阻力增大,桩端区段侧阻力也有

提前发挥的趋势,整根桩侧阻发挥呈R型,对桩基整体受力较为有利。

3.4 试桩侧摩阻力与规范值对比

根据桩身轴力,反算出注浆后桩各土层的侧阻力平均值,将其与《公路桥涵地基与基础设计规范》^[12]中的钻孔桩桩侧土侧阻力标准值对比如表3所示。

表3 桩侧阻力实测值与规范值分布(单位:kPa)

Tab.3 Distribution of measured values and code values of pile side resistance (unit: kPa)

	规范规定值	S_6 较规范值 (注浆)	S_5 较规范值 (注浆)	S_4 较规范值 (注浆)
第2层上部	50	116 2.3	33 0.7	272 5.4
第2层下部	50	190 3.8	152 3.0	144 2.9
第3~1层	70	56 0.8	212 3.0	74 1.1
第3~2层	80	164 2.0	109 1.4	84 1.1
增强系数		2.2	2.0	2.6
平均增强幅度		2.3		

由表3可知:注浆灌注桩在各土层的侧阻力相比侧阻力标准值平均增强系数为2.3。但是由于岩土工程本身的复杂性及现场施工诸多不可控因素,各土层增强系数差别较大,某些土层的增强系数相对较低。注浆灌注桩设计计算时,侧阻力值单纯地按照规范规定的增强系数选用,这对于设计人员来说,承担的风险较大。因此,本次后注浆灌注桩试桩试验十分必要。

4 结论

(1) 注浆作用减小了桩土界面塑性位移,增强了桩和桩周土体的整体性,将桩身位移和桩顶荷载传递到了土体更大的范围内,显著减小了桩顶沉降,灌注桩承载能力得到明显提高,满足单桩极限承载力 $\geq 18\ 000$ kN的设计要求,避免了穿越胶结层,加快了工期,节约了资源,为类似项目的桩基处理提供了宝贵的经验。

(2) 桩端注浆使沉渣层等桩端土层得以加固,桩端阻力提前发挥。在持力层为粉土、粉质黏土地层中进行桩端注浆,不仅加固了沉渣层,并且提高了桩端土的强度,降低了其压缩性,改善了桩端土的力学性能,使桩端阻力发挥值大幅提高,桩端荷载分担比增大,桩端阻力提前发挥。因此,对郑州地区典型粉土、粉质黏土地层和类似地质条件进行桩端注浆,可以有效提高其承载力,减小沉降。

(3) 桩侧注浆很好地改善了桩土界面力学能质, 使侧阻力得到有效发挥。在粉土、粉质黏土地层中, 注浆前后桩侧阻力提高幅值比较大, 因此, 对郑州地区典型粉土、粉质黏土地层和类似地质条件进行桩侧注浆, 是提高桩基承载能力较为有效地途径。

参考文献:

References:

- [1] 刘金砺. 桩基工程技术进展 2009 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
LIU Jin-li. Advances in Pile Foundation Technology 2009 [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009.
- [2] 史佩栋, 高大钊, 钱力航. 21 世纪高层建筑基础工程 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000.
SHI Pei-dong, GAO Da-zhao, QIAN Li-hang. Foundation Engineering of Tall Buildings in 21st Century [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2000.
- [3] 丁大钧. 中国桥梁建设新进展 (1991—) [M]. 南京: 东南大学出版社, 2009.
DING Da-jun. New Advances of Bridge Construction in China (1991—) [M]. Nanjing: Southeast University Press, 2009.
- [4] 王中文. 钻孔灌注桩孔壁稳定性的影响因素研究 [J]. 公路交通科技, 2011, 28 (1): 86–91.
WANG Zhong-wen. Research of Factors Affecting Stabilization of Hole Wall of Bored Pile [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2011, 28 (1): 86–91.
- [5] 王卫东, 李永辉, 吴江斌. 上海中心大厦大直径超长灌注桩现场试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2011, 33 (12): 1817–1826.
WANG Wei-dong, LI Yong-hui, WU Jiang-bin. Field Loading Tests on Large-diameter and Super-long Bored Piles of Shanghai Center Tower [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33 (12): 1817–1826.
- [6] 吴鹏, 龚维明, 任伟新, 等. 钻孔灌注桩护壁泥浆对桩基承载性能的影响 [J]. 岩土工程学报, 2008, 30 (9): 1327–1332.
WU Peng, GONG Wei-ming, REN Wei-xin, et al. Effect of Slurry on Bearing Performance of Bored Piles [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30 (9): 1327–1332.
- [7] 张忠苗, 张乾青. 后注浆抗压桩受力性状的试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28 (3): 475–482.
ZHANG Zhong-miao, ZHANG Qian-qing. Experimental Study on Mechanical Properties of Post-grouting Compressive Pile [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28 (3): 475–482.
- [8] 何剑. 后注浆钻孔灌注桩承载性状试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2002, 24 (6): 743–746.
HE Jian. Experimental Research on Vertical Bearing Properties of Base-grouting Bored Cast-in-place Pile [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24 (6): 743–746.
- [9] 费鸿庆, 王燕. 黄土地基中超长钻孔灌注桩工程性状研究 [J]. 岩土工程学报, 2000, 22 (5): 576–580.
FEI Hong-qing, WANG Yan. Research of Super-long Hole Bored Pile in Loess Subsoil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22 (5): 576–580.
- [10] 龚维明, 于清泉, 戴国亮. 越南大翁桥桩基承载性能试验研究 [J]. 岩土力学, 2009, 30 (2): 558–562.
GONG Wei-ming, YU Qing-quan, DAI Guo-liang. Experimental Research on Bearing Behavior of Piles with Self-balanced Method in Daweng Bridge in Vietnam [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30 (2): 558–562.
- [11] 董晓星. 桩端桩侧后注浆钻孔灌注桩竖向承载机制研究 [D]. 郑州: 郑州大学, 2012.
DONG Xiao-xing. Study on Vertical Bearing Mechanism of Bored Pile with Post-Grouting to Soil Around and Bottom [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2012.
- [12] JTG D63—2007, 公路桥涵地基与基础设计规范 [S].
JTG D63—2007, Code for Design of Ground Base and Foundation of Highway Bridges and Culverts [S].