

DOI: 10.16285/j.rsm.2019.2026

大直径后压浆灌注桩承载力和沉降的 实用计算方法研究

万志辉^{1,2}, 戴国亮^{1,2}, 高鲁超^{1,2}, 龚维明^{1,2}

(1. 东南大学 混凝土及预应力混凝土结构教育部重点实验室, 江苏 南京 211189;

2. 东南大学 土木工程学院, 江苏 南京 211189)

摘 要: 基于收集的 139 个工程中的 716 根试桩静载试验数据, 对大直径后压浆桩承载力和沉降的实用计算方法进行研究, 在统计分析的基础上给出了以土层为分类的侧摩阻力及端阻力增强系数, 建立了适用于不同压浆类型的大直径后压浆桩承载力实用计算方法, 并且通过大量的实测数据验证了该方法的可靠性。为了考虑后压浆对大直径桩基础沉降控制的影响, 在未经压浆的大直径桩基础沉降计算方法的基础上引入了后压浆沉降影响系数, 基于统计分析给出了后压浆沉降影响系数的建议取值范围, 提出了一种适用于不同土层的大直径后压浆桩沉降计算经验预估方法, 最后通过工程实例验证了该方法的适用性。该研究成果纳入了中华人民共和国行业标准《公路桥涵地基与基础设计规范》(JTJ3363—2019)及工程建设行业标准《公路桥梁灌注桩后压浆技术规程》(T/CECS G: D67-01—2018), 可为后压浆技术的广泛应用起到推动作用。

关 键 词: 大直径后压浆桩; 竖向承载力; 增强系数; 统计分析; 沉降计算; 后压浆沉降影响系数

中图分类号: TU 473

文献标识码: A

文章编号: 1000—7598 (2020) 08—2746—10

A practical method of calculation of bearing capacity and settlement of large-diameter post-grouting piles

WAN Zhi-hui^{1,2}, DAI Guo-liang^{1,2}, GAO Lu-chao^{1,2}, GONG Wei-ming^{1,2}

(1. Key Laboratory of Concrete and Prestressed Concrete Structures of the Ministry of Education, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 211189, China;

2. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 211189, China)

Abstract: Based on the static load test data of 716 test piles collected from 139 projects, the practical calculation method of bearing capacity and settlement of large-diameter post-grouted piles was studied. The improvement coefficients of the side friction and base resistance of soil layer were given primarily based on statistics analysis, and the practical calculation approach for the bearing capacity of large-diameter post-grouted piles applicable to different grouting types was presented. The reliability of the proposed approach was verified by a large number of measured data. Moreover, the influence coefficient of post-grouting settlement was introduced based on the settlement calculation method of large-diameter pile foundation without grouting. Based on the statistical analysis, the recommended range of influence coefficient of post-grouting settlement was given, and an empirical estimation method for calculating settlement of large-diameter post-grouted piles suitable for different soil layers was proposed. Finally, the applicability of the proposed method was verified using engineering examples. The research results have been incorporated into the industry standard of the People's Republic of China *Code for design of ground base and foundation of highway bridges and culverts* (JTJ 3363—2019) and the industry standard of national project construction *Technical specification for post-grouting of cast-in-place pile of highway bridges* (T/CECS G: D67-01—2018), which can promote the wide application of post-grouting technique.

Keywords: large-diameter post-grouted pile; bearing capacity; improvement coefficient; statistical analysis; settlement calculation; influence coefficient of post-grouting settlement

收稿日期: 2019-12-01

修回日期: 2020-05-05

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 51678145, No. 51878160); 国家重点研发计划专项 (No. 2017YFC0703408); 江苏省六大人才高峰项目 (No. XNY-047)。This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51678145, 51878160), the National Key Research and Development Program of China (2017YFC0703408) and the Six Talent Peaks Project in Jiangsu Province (XNY-047).

第一作者简介: 万志辉, 男, 1990 年生, 博士, 助理研究员, 主要从事后压浆理论与工程实践、桩基础与深基础工程等方面的科研工作。

E-mail: zhihuiwan@seu.edu.cn

1 引言

随着超高层建筑和大跨径桥梁的不断涌现,钻孔灌注桩的桩径和桩长不断增加,并且逐步向着大直径、超长的方向发展^[1]。为了提供更高的承载力,后压浆技术也得到了更广泛的应用。目前后压浆技术已被编入中华人民共和国行业标准《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008)^[2]和《公路桥涵地基与基础设计规范》(JTG D63—2007)^[3]。两部规范均给出了以承载力为基础的设计方法,其中现行的《建筑桩基技术规范》是在中小直径后压浆桩静载试验数据的研究基础上给出的,对大直径后压浆桩的承载力计算并不适用。而现行的《公路桥涵地基与基础设计规范》是通过收集的69根大直径桩桩端后压浆桩静载试验资料得出的。自两部规范颁布近10年来,后压浆工程在全国范围内得到了迅猛的发展与应用,也积累了众多的大直径后压浆桩的现场实测资料,同时桩侧后压浆桩、组合后压浆桩也不断地应用于实际工程^[4-8]。因此,文献[3]已不能满足当前大直径后压浆桩工程的设计需求,后压浆技术也不再局限于桩端后压浆类型,且应用的地层条件更为广泛,因而完善该规范是当前亟待解决的问题。

随着上部结构对基础沉降要求的提高,后压浆技术不仅作为提升承载力的措施,还逐渐成为沉降控制的手段,特别是对超高层建筑、大跨径桥梁和高速铁路等重要建(构)筑物^[9]。在高速铁路的基础设计中,为保证线路在长期动力作用下的平顺运营,规定工后沉降不得超过15 mm,且要求桥基相邻墩台沉降量之差不大于5 mm,因此,有效地控制桩基础沉降已成为实际工程中重点关注的问题。目前关于后压浆桩沉降计算的研究较少,笔者通过查阅国内外文献,发现规范或手册中涉及到的后压浆桩沉降计算主要有以下两种方法:①文献[2]对采用后压浆技术的灌注桩沉降计算作了相应的规定,桩基础沉降计算经验系数应根据桩端持力层类别乘以0.7(砂、砾、卵石)~0.8(黏性土、粉土)的折减系数,则可估算后压浆桩的沉降量。然而,规范中的桩基沉降计算方法主要是针对中小直径的普通中短桩,对于大直径后压浆桩的沉降计算不一定适用。②Mullins等^[10]提出了一种考虑压浆压力和端阻力提高系数之间相关性的设计方法,可根据不同的桩顶沉降获取相应的注浆压力比与压浆桩端阻力,从而得到压浆桩大致的荷载-位移关系,该设计方法也被佛罗里达交通运输部纳入了《Soils and Foundations Handbook》^[11]。然而,该方法未考虑压

浆对桩侧摩阻力的影响,导致该方法具有一定的局限性。因此,研究大直径后压浆桩沉降计算的设计方法,对后压浆技术的推广应用有着重要的实际意义。

本文以《公路桥涵地基与基础设计规范》(JTJ3363—2019)^[12]为依托,通过收集的139个工程中的716根试桩静载试验的实测数据,在统计分析的基础上给出不同土层的侧摩阻力及端阻力增强系数,采用侧摩阻力及端阻力增强系数法建立适用于不同压浆类型的大直径后压浆桩承载力计算的实用方法。针对目前大直径后压浆桩沉降计算尚未形成统一标准的问题,在未压浆的大直径桩基础沉降计算方法的基础上引入后压浆沉降影响系数,基于统计分析得到桩端后压浆、组合后压浆沉降影响系数的建议取值范围,提出适用于不同土层的大直径后压浆桩沉降计算经验预估方法。

2 静载试验资料

工程实践中,后压浆桩设计受到的影响因素较多,如桩径、桩长、桩端持力层、桩周土层、压浆类型以及压浆参数等。笔者根据本课题组完成的后压浆桩静载试验资料,并结合收集的已公开发表文献的试桩数据,对后压浆桩与未压浆桩具体参数进行统计。图1给出了全国范围内不同地区的工程数量与试桩数量的分布。

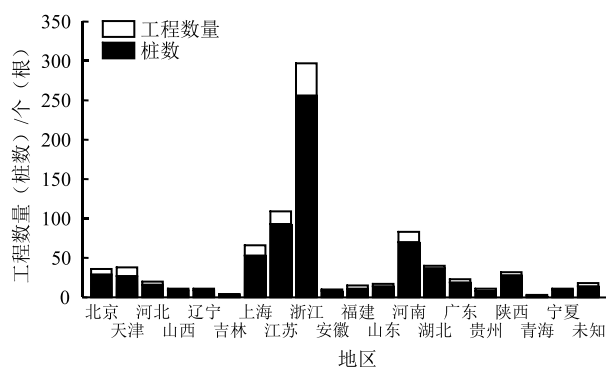


图1 各地区压浆桩的工程数量及桩数分布

Fig.1 Distribution of the number of engineering projects related to grouting piles and number of grouting piles in various areas

从统计结果可以看出,工程数量与试桩数量的总统计数分别为139个、716根,其分布范围基本覆盖我国大部分地区。本文将直径大于800 mm的桩视为大直径桩,统计的桩径变化分布范围为800~2 800 mm,其中桩径1 000~1 500 mm的大直径桩占大多数,且大于2 000 mm的大直径桩约占

总统计数量的 12.43%。通过统计分析桩径、桩长、持力层以及压浆类型等因素的结果显示,目前后压浆技术应用于灌注桩的桩径、桩长往更大、更长方向发展,且长径比大于 50 的超长桩使用比例呈现增加的趋势;后压浆技术可应用于土层为黏性土层、粉土层、砂土层、碎石土层以及风化岩层,而在工程实践中更适用于砂土层及碎石土层,且在粉质黏土层中也得到了大量的使用。此外,目前桩端后压浆类型应用于大直径桩最为普遍,而桩侧后压浆与组合后压浆类型也逐渐应用于实际工程中。需要指出的是,统计得到的未压浆桩是作为分析后压浆桩的对比试验资料。

3 后压浆桩承载力计算的实用方法

3.1 后压浆桩阻力增强系数与统计分析

后压浆桩竖向极限承载力受众多因素影响,而桩端、桩侧土体的性质是最为关键的因素之一。也就是说,土的极限侧摩阻力和极限端阻力决定了后压浆桩的极限承载力。因此,后压浆桩按承载力设计时考虑浆液加固桩端或桩侧土体而增强桩基阻力更为合理。为进一步完善大直径后压浆桩的承载力计算公式,根据收集的 716 根后压浆桩与未压浆桩的静载试验资料给出后压浆侧摩阻力及端阻力增强系数,并按土层分类进行归纳统计,从而使后压浆桩的承载力计算公式更具适用性。其中后压浆桩极限侧摩阻力增强系数 β_{si} 、端阻力增强系数 β_p 分别为

$$\beta_{si} = \frac{q'_{sik}}{q_{sik}}, \beta_p = \frac{q'_{pk}}{q_{pk}} \quad (1)$$

式中: q_{sik} 、 q_{pk} 分别为未压浆桩桩侧第 i 层土的极限侧摩阻力标准值和极限端阻力标准值; q'_{sik} 、 q'_{pk} 分别为后压浆桩桩侧第 i 层土的极限侧摩阻力标准值和极限端阻力标准值。

极限侧摩阻力增强系数 β_{si} 、端阻力增强系数 β_p 的数据收集按如下原则:①桩侧摩阻力增强系数。按土层性质分类,各土层后压浆桩与未压浆桩所对应的侧摩阻力比计算得到;对于桩端压浆桩在桩端以上一定范围内的数据进行归纳收集^[13],而桩侧压浆桩与组合压浆桩按全桩长范围内的数据进行罗列;对收集到的后压浆试桩未进行压浆前测试时,以岩土工程勘察报告提供的极限侧摩阻力标准值代替。②桩端阻力增强系数。以土层为分类,通过后压浆桩与未压浆桩端阻力比计算得到;对收集到的后压浆试桩未开展压浆前测试时,未压浆桩端阻力应根据桩的尺寸、地质资料及施工工艺由规范^[2-3]中的方法计算确定。

按上述收集方法得到的数据,往往需要对其采取舍弃处理的方法。具体舍弃原则如下:①对于压浆后的桩基阻力小于压浆前的数据,该数据理论上是不存在的,但在实际工程中可能由于测试、读数或其他方面的原因导致这类数据存在;②后压浆桩及所对应的未压浆桩均有测试,但未布设钢筋计的数据;③桩侧摩阻力因压浆效果不明显或桩土间的相对位移较小而未完全发挥,导致后压浆桩与未压浆桩的侧摩阻力比接近 1.0 甚至小于 1.0 的数据;④后压浆桩端阻力因加载设备达到限制而未发挥,或未发挥至极限而小于未压浆桩的数据。

由于所收集到的试验数据受施工、人为及环境等因素的影响,统计的数据样本量具有一定离散性。因此,在统计时利用数学方法对数据进行一定的筛选处理,也就是说对统计的数据求标准值 X_k 或平均值 X_m ,然后对整个区间内的样本点进行检查并舍弃偏差较大的数据。在实际的数据处理过程中,选用 3 倍的标准差 σ 方法来进行判别,可采用标准值加减 3 倍标准差,或采用平均值加减 3 倍标准差。若试验数据处于 $X_k - 3\sigma \leq X_i \leq X_k + 3\sigma$ 或 $X_m - 3\sigma \leq X_i \leq X_m + 3\sigma$ 范围内,即为正常数值,而在此范围之外的数据则作为异常数值舍弃。对处理后的试验数据进一步计算平均值、标准差、变异系数、标准值和统计修正系数。直至所有的试验数据均在 $X_k - 3\sigma \leq X_i \leq X_k + 3\sigma$ 或 $X_m - 3\sigma \leq X_i \leq X_m + 3\sigma$ 范围内,然后再计算平均值、标准差和变异系数。

在数据处理时,计算变异系数 δ 可以评价样本的离散程度,还能用于不同指标的测试样本离散程度的对比^[14]。为了得到精确的计算结果,在数据处理时引入置信度 $1-\alpha$,按标准正态分布原理可得到计算结果为 $X_m \pm z_{\alpha/2} \sigma / \sqrt{n}$,则置信区间为 $(X_m - z_{\alpha/2} \sigma / \sqrt{n}, X_m + z_{\alpha/2} \sigma / \sqrt{n})$,其中 n 为样本数。图 2 给出了正态分布函数的置信区间示意图。

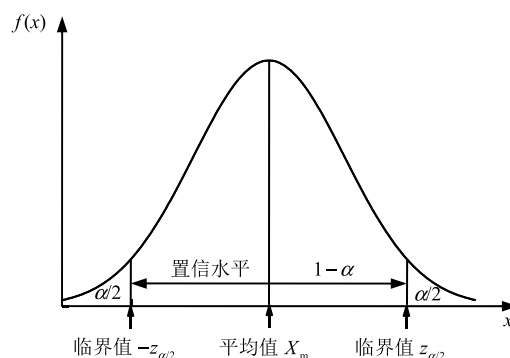


图 2 正态分布的置信区间示意图
Fig.2 Schematic diagram of confidence interval for normal distribution

通过设定不同的置信度，根据标准正态分布原理可得到不同的置信区间，且置信度越高所对应的临界值 $z_{\alpha/2}$ 越大。因而在其他因素不变的情况下，置信度越高，置信区间越宽。此外，置信区间不仅与置信度有关，还受样本量因素的影响。因此，在统计大直径后压浆桩阻力增强系数时，设定置信度的原则如下：①取值应满足精度需求；②估算区间应符合要求（即取值范围的大小）。

3.2 后压浆桩阻力增强系数取值分析

按上述数据收集方法及处理原则，可获得桩侧、桩端不同土层后压浆侧摩阻力及端阻力增强系数的样本数统计分布如图 3 所示。由图可知，本次归纳统计得到有效的后压浆侧摩阻力及端阻力增强系数的样本数据分别为 1 160 个、220 个，且桩侧、桩端均涉及到了主要土层。值得注意的是，本次通过收集到的组合压浆桩归纳统计了桩侧黄土层的分布。通过土层分布可以看出，后压浆技术可用于碎石土、砂土层，也可用于粉土、黏性土及风化岩层。

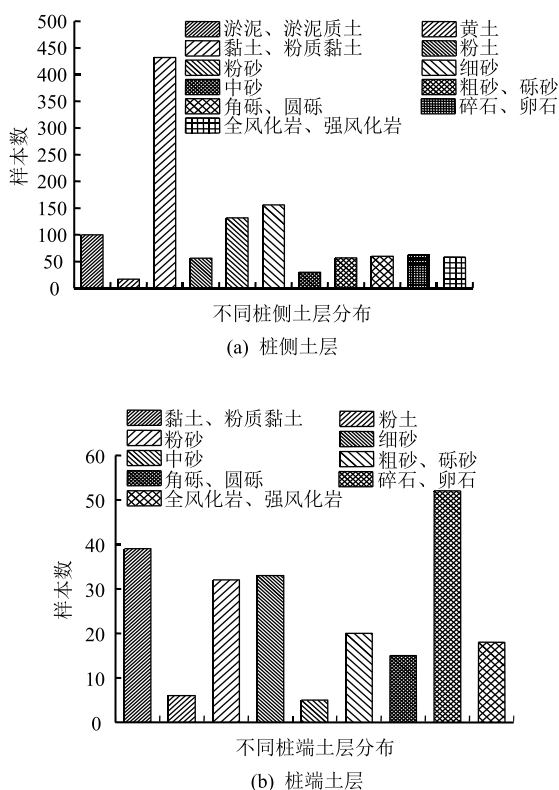


图 3 不同土层的样本数统计分布

Fig.3 Statistical distribution of sample numbers in different soil layers

对收集到的极限侧摩阻力及端阻力增强系数的数据处理按 3.1 节的原则进行统计分析，因此，可得到不同土层的后压浆侧摩阻力增强系数 β_{si} 、端阻力增强系数 β_p 如表 1、2 所示。从表中可以看出，

在不同土层中的后压浆桩基阻力比未压浆桩均有一定比例的提高，且提高幅度随着土体颗粒的变大而更加显著。其中，桩侧、桩端阻力增大幅度明显的土层是碎石、卵石层与粗砂、砾砂层，而黏土、粉质黏土与风化岩层中的桩侧、桩端阻力相比其他土层增大的幅度要小，这表明后压浆桩基阻力增加幅度与土层性质有明显的关系。

表 1 不同土层的后压浆侧摩阻力增强系数 β_{si} 的取值范围

Table 1 Improvement coefficients of side friction for post-grouting in different soil layers

土层名称	平均值	标准差	β_{si} 取值范围	变异系数
淤泥、淤泥质土	1.29	0.15	1.23~1.34	0.12
黏土、粉质黏土	1.38	0.22	1.34~1.41	0.16
黄土	1.53	0.23	1.44~1.62	0.15
粉土	1.47	0.30	1.41~1.52	0.21
粉砂	1.58	0.32	1.54~1.63	0.21
细砂	1.62	0.19	1.57~1.67	0.12
中砂	1.77	0.28	1.66~1.88	0.16
粗砂、砾砂	1.89	0.44	1.81~1.97	0.23
角砾、圆砾	1.66	0.26	1.56~1.75	0.16
碎石、卵石	1.86	0.43	1.77~1.96	0.23
全风化岩、强风化岩	1.32	0.27	1.20~1.44	0.20

表 2 不同土层的后压浆端阻力增强系数 β_p 的取值范围

Table 2 Improvement coefficients of base resistance for post-grouting in different soil layers

土层名称	平均值	标准差	β_p 取值范围	变异系数
黏土、粉质黏土	1.73	0.430	1.63~1.83	0.25
粉土	2.00	0.130	1.83~2.11	0.06
粉砂	2.06	0.490	1.92~2.21	0.24
细砂	2.15	0.710	1.97~2.33	0.33
中砂	2.15	0.195	2.03~2.28	0.09
粗砂、砾砂	2.27	0.210	2.17~2.37	0.09
角砾、圆砾	2.37	0.290	2.24~2.50	0.12
碎石、卵石	2.40	0.430	2.30~2.50	0.18
全风化岩、强风化岩	1.47	0.180	1.34~1.60	0.12

3.3 后压浆桩承载力实用计算公式

表 3 给出了不同土层后压浆侧摩阻力及端阻力增强系数的建议取值范围。因此，通过后压浆桩与未压浆桩基阻力比进行统计分析，可给出后压浆桩竖向极限承载力的实用计算公式：

$$Q_{uk} = u \sum \beta_{si} q_{sik} l_i + \beta_p q_{pk} A_p \quad (2)$$

式中： Q_{uk} 为后压浆桩极限承载力标准值； u 为桩身周长； l_i 为桩周第 i 层土的厚度； A_p 为桩的截面积。此外，极限侧摩阻力增强系数 β_{si} 、端阻力增强系数 β_p 可按表 3 取值。当在饱和土层中桩端压浆时，仅对桩端以上 10~12 m 范围内的桩侧摩阻力进行增强修正；当在非饱和土层中桩端压浆时，仅对桩端

以上 5~6 m 的桩侧摩阻力进行增强修正；在饱和土层中桩侧压浆时，对压浆断面以上 10~12 m 范围内的桩侧摩阻力进行增强修正；在非饱和土层中桩侧压浆时，对压浆断面上下各 5~6 m 范围内的桩侧摩阻力进行增强修正；对于非增强影响范围， $\beta_{si} = 1$ 。

表 3 后压浆侧摩阻力增强系数 β_{si} 、端阻力增强系数 β_p
Table 3 Improvement coefficients of side friction and base resistance for post-grouting

土层名称	β_{si}	β_p
淤泥质土	1.2~1.3	—
黏土粉质黏土	1.3~1.4	1.6~1.8
黄土	1.4~1.6	—
粉土	1.4~1.5	1.8~2.1
粉砂	1.5~1.6	1.9~2.2
细砂	1.6~1.7	2.0~2.3
中砂	1.7~1.9	2.0~2.3
粗砂砾砂	1.8~2.0	2.2~2.4
角砾圆砾	1.6~1.8	2.2~2.5
碎石卵石	1.8~2.0	2.3~2.5
全风化岩强风化岩	1.2~1.4	1.3~1.6

式 (2) 是基于工程实测数据得出，收集的数据覆盖全国范围内大部分地区，且均为大直径钻孔灌注桩，具有很大的实用价值。本公式已应用于《公路桥涵地基与基础设计规范》(JTJ 3363—2019) [12] 的编制，并且纳入了《公路桥梁灌注桩后压浆技术规程》(T/CECS G: D67-01—2018) [15]，具有很强的针对性。此外，本次统计补充了原规范 [3] 中未涉及到的桩端桩侧组合后压浆试桩资料，对于组合后压浆桩承载力计算按桩端压浆与桩侧压浆的增强影响范围进行修正，重叠部分应扣除。

3.4 实例分析验证

为了验证本文给出的后压浆桩竖向极限承载力实用计算公式的合理性及适用性，选取试验资料齐全的 190 根后压浆桩，根据式 (2) 计算求得 $Q_{uk计}$ 。其中 q_{sik} 、 q_{pk} 取岩土工程勘察报告提供的推荐值，侧摩阻力增强系数 β_{si} 、端阻力增强系数 β_p 取表 3 所列的上限值。后压浆桩极限承载力计算结果如图 4、5 所示。

由图 4 可以看出，计算结果与实测结果的比值服从正态分布，且比值接近 1.0 的样本约占总样本统计量的 54%。图 5 给出了 190 根后压浆桩极限承载力计算值与实测值的对比。图中显示了数据点主要集中在计算值与实测值的等值线两侧，且大多数的数据点位于等值线两侧 $\pm 20\%$ 的偏离曲线之内，

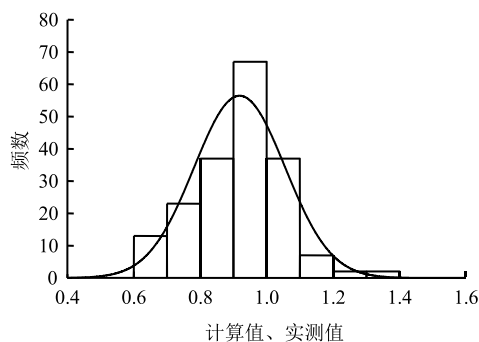


图 4 后压浆桩极限承载力计算值与实测值比较直方图
Fig.4 Histogram of calculated and measured values of ultimate bearing capacity for post-grouted pile

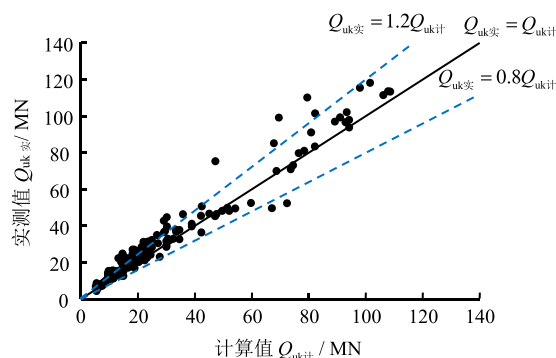


图 5 后压浆桩极限承载力计算值与实测值比较散点图
Fig.5 Scatter diagram of calculated and measured values of ultimate bearing capacity for post-grouted piles

而在 $\pm 20\%$ 的偏离曲线之外的样本为 35 个，约占总样本统计量的 18.4%。这说明承载力计算结果的保证率达到 81.6%。此外，数据点位于等值线以上的样本有 140 个，约占总样本统计量的 73.7%，即计算值小于实测值占大多数。这说明后压浆桩极限承载力按式 (2) 计算具有较高的可靠性。

通过验证分析表明本文所得到的侧摩阻力及端阻力增强系数是合理可行的，采用侧摩阻力及端阻力增强系数法给出的后压浆桩竖向极限承载力的实用计算公式具有较高的准确性及可靠性。该计算公式基于实测数据给出，具有很高的实用性，可供工程设计人员在大直径后压浆桩的设计时使用。

4 后压浆桩沉降计算经验预估方法

文献[3]未涉及后压浆桩沉降计算，造成大直径后压浆桩的沉降计算尚未有统一的标准。因此，参考文献[2]中的方法，对其沉降计算公式作相应的修正，以期完善大直径后压浆桩沉降计算的设计方法。

4.1 后压浆沉降影响系数

文献[3]针对墩台基础的沉降计算给出了一种简化了的分层总和法，但由于未明确给出桩基础沉

降计算公式,因而采用该沉降计算方法具有局限性。因此,结合《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011)^[16]计算方法:

$$s = \psi_s \sum_{i=1}^n \frac{\sigma_{zi}}{E_{si}} \Delta z_i \quad (3)$$

$$\sigma_{zi} = \sum_{j=1}^n \frac{Q_j}{l_j^2} \left[\alpha_j I_{p,ij} + (1 - \alpha_j) I_{s,ij} \right] \quad (4)$$

式中: ψ_s 为沉降计算经验系数; E_{si} 为基础底面下第 i 层土的压缩模量,应取土的自重压应力至土的自重压应力与附加压力之和的压力段计算; σ_{zi} 为桩端平面以下第 i 层土 1/2 厚度处产生的竖向附加应力之和; z_i 为基础底面至第 i 层土底面的距离; Q_j 为第 j 桩在荷载效应准永久组合作用下桩顶的附加荷载; l_j 为第 j 桩的桩长; α_j 为第 j 桩桩端阻力与桩顶荷载之比; $I_{p,ij}$ 、 $I_{s,ij}$ 分别为第 j 桩的桩端阻力和桩侧摩阻力对计算轴线第 i 计算土层的 1/2 厚度处的应力影响系数,可用对 Mindlin 应力公式进行积分的方式推导得出。

此外,由于在高应力荷载水平下大直径超长桩的桩顶沉降主要来自桩身压缩,该结论在文献[17]已有表述,因而在采用单向压缩分层总和法计算桩基础沉降时,应计入桩身压缩 s_e ,则由式(3)可得

$$s = \psi_s \sum_{i=1}^n \frac{\sigma_{zi}}{E_{si}} \Delta z_i + s_e \quad (5)$$

式(5)是未经后压浆的大直径桩基础沉降计算公式,为了考虑后压浆对大直径桩基础的沉降控制,本文引入后压浆沉降影响系数。后压浆沉降影响系数指的是同一荷载作用下压浆桩与未压浆桩所对应的桩顶沉降之比,其表达式为

$$\zeta = \frac{s'}{s} \quad (6)$$

式中: ζ 为后压浆沉降影响系数; s 、 s' 分别为同一荷载作用下未压浆桩与压浆桩所对应的桩顶沉降。

由式(5)和式(6)可得

$$s' = \zeta \left(\psi_s \sum_{i=1}^n \frac{\sigma_{zi}}{E_{si}} \Delta z_i + s_e \right) \quad (7)$$

式(7)即为大直径后压浆桩沉降计算公式。

为了进一步说明桩顶沉降对后压浆沉降影响系数取值的影响,根据大量实测的桩顶荷载 Q 与桩顶沉降 s 曲线绘制出了不同荷载条件下未压浆桩与压浆桩的沉降取值如图 6 所示。

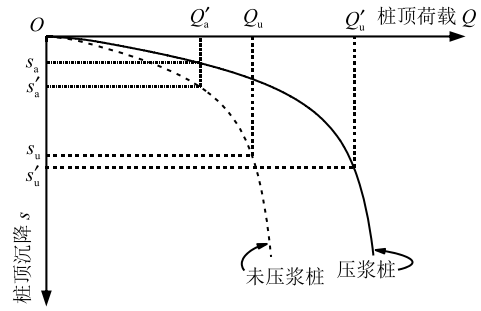


图 6 不同荷载条件下未压浆桩与压浆桩沉降取值示意图
Fig.6 Schematic diagram of settlement value of ungrouted and grouted piles under different loading conditions

从图 6 可以看出,极限荷载作用下压浆桩所对应的桩顶沉降要大于未压浆桩,这主要是由于压浆后的桩基承载力得到了大幅提升,使其加载至极限荷载时所对应的桩顶沉降也相应的增大。因此,应根据压浆桩正常使用极限状态的荷载条件下未压浆桩与压浆桩所对应的桩顶沉降来确定后压浆沉降影响系数。一般情况下,使用荷载为极限荷载的 1/2,因此可定义压浆桩的使用荷载 Q'_a 下所对应的沉降比为后压浆沉降影响系数,其表达式为

$$\zeta = \frac{s'_a}{s_a} \quad (8)$$

式中: s_a 、 s'_a 分别为使用荷载作用下未压浆桩与压浆桩所对应的桩顶沉降。

4.2 后压浆沉降影响系数取值分析

后压浆沉降影响系数 ζ 的取值可根据收集的 716 根后压浆桩与未压浆桩静载试验资料来确定。为了能给工程设计人员在大直径后压浆桩的初步设计时提供参考,将得到的后压浆沉降影响系数 ζ 作为随机变量,并以不同土层类别对后压浆沉降影响系数 ζ 进行统计分析,从而给出后压浆沉降影响系数 ζ 的取值范围。

本次统计涉及了不同压浆类型的试桩资料,但桩侧压浆桩所占总统计数量比例较小,而样本量对后压浆沉降影响系数的取值精度有较大影响。因此,为了满足取值范围的精度要求,本文仅对桩端压浆桩和组合压浆桩与未压浆桩进行对比给出后压浆沉降影响系数。另外,对计算得到的后压浆沉降影响系数的数据处理按 3.1 节的原则进行统计分析。因此,可得到不同类别土层的桩端后压浆、组合后压浆沉降影响系数 ζ 的取值范围,如表 4、5 所示。

由表 4、5 可知,相比未压浆桩,不同持力层中的压浆桩沉降均有所减小,且减小幅度随着粒径的增大而更加显著,这表明后压浆技术对控制桩基础沉降具有较为显著的效果。通过对比桩端后压浆

与组合后压浆沉降影响系数可以发现, 组合后压浆对控制桩基础沉降的效果要优于桩端后压浆。需要说明的是, 风化岩层主要来源于中风化、强风化和全风化岩层; 在中粗砂层、砾砂层、砾石层、卵石层以及风化岩层中组合压浆桩统计的样本量较少, 影响了后压浆沉降影响系数的取值精度, 特别是中粗砂层、砾砂层中组合后压浆沉降影响系数偏小, 但整体上还能反映出与桩端后压浆沉降影响系数相一致的规律。

根据收集的后压浆桩与未压浆桩静载试验资料, 统计得出了桩端压浆桩与组合压浆桩在不同土层中的后压浆沉降影响系数的建议取值范围, 如表 6 所示。

表 4 桩端后压浆沉降影响系数 ζ 的取值范围
Table 4 Influence coefficients of settlement for post-grouting at pile tip

土层名称	平均值	标准差	ζ 取值范围	变异系数
黏性土粉土层	0.72	0.12	0.68~0.79	0.16
粉砂细砂层	0.63	0.19	0.58~0.69	0.30
中粗砂砾砂层	0.62	0.19	0.53~0.71	0.30
砾石卵石层	0.66	0.20	0.57~0.71	0.30
风化岩层	0.74	0.29	0.56~0.93	0.29

表 5 组合后压浆沉降影响系数 ζ 的取值范围
Table 5 Influence coefficients of settlement for combined post-grouting at pile tip and side

土层名称	平均值	标准差	ζ 取值范围	变异系数
黏性土粉土层	0.71	0.16	0.62~0.78	0.23
粉砂细砂层	0.57	0.16	0.52~0.62	0.28
中粗砂砾砂层	0.22	0.02	0.20~0.27	0.11
砾石卵石层	0.54	0.34	0.36~0.72	0.63
风化岩层	0.47	0.12	0.38~0.56	0.26

表 6 后压浆沉降影响系数 ζ 的建议取值范围
Table 6 Recommended range of influence coefficients of settlement for post-grouting

压浆类型	黏性土 粉土层	粉砂 细砂层	中粗砂 砾砂层	砾石 卵石层	风化岩层
桩端压浆	0.7~0.8	0.6~0.7	0.5~0.7	0.6~0.7	0.6~0.9
组合压浆	0.6~0.8	0.5~0.6	0.2~0.3	0.4~0.7	0.4~0.6

将表 6 中的桩端后压浆沉降影响系数与文献[2]中所规定的采用后压浆桩技术的桩基础沉降计算经验系数 ψ 的折减系数进行对比, 可以发现两者随着不同桩端持力层表现出了相一致的规律, 且本次统计给出的后压浆沉降影响系数相比现行的《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008) [2]中的桩基础沉降计算经验系数的折减系数要小。这也从侧面反映了本

次统计大直径桩得到的后压浆沉降影响系数与规范中搜集到的中小直径桩具有差异, 并且进一步表明文献[2]给出的后压浆桩沉降计算方法用于大直径后压浆桩时会偏于保守。因此, 基于大直径桩的工程实测数据得出的后压浆沉降影响系数, 并结合式(7)对大直径后压浆桩沉降计算更符合工程实际。

4.3 计算实例

为了验证采用后压浆沉降影响系数给出的大直径后压浆桩沉降计算经验预估方法的合理性, 以台州某工程[18]为算例进行计算与对比分析, 基础采用大直径超长钻孔灌注桩, 同时采用桩端后压浆施工工艺。试桩 SZ4 桩径为 1 500 mm, 桩长为 82 m, 桩身混凝土强度等级为 C30, 桩端持力层为黏土层, 桩长范围内的土层类型主要为粉质黏土和黏土。试桩 SZ4 各土层的基本参数见表 7。

表 7 试桩 SZ4 各土层物理力学参数
Table 7 Physico-mechanical parameters of soil layers for trial pile SZ4

土层名称	l_i /m	ω /%	γ /(kN·m ⁻³)	E_{s1-2} /MPa	f_{a0} /kPa	q_{sik} /kPa
① ₁ 粉质黏土	1.8	24.20	19.42	6.54	100	30
② ₂ 淤泥质黏土	24.0	49.50	16.48	1.92	55	12
③ ₃ 黏土	8.0	44.80	17.36	3.40	80	20
④ ₂ ¹ 粉质黏土	19.7	30.20	18.15	3.82	120	20
④ ₂ ¹ 粉质黏土	4.2	31.20	18.44	4.87	140	30
⑤ ₂ ¹ 粉质黏土	12.3	32.40	18.34	6.42	140	35
⑤ ₅ 黏土	14.8	34.80	18.44	5.35	160	35
⑥ ₁ 粉质黏土	12.5	29.40	19.13	5.82	180	45
⑥ ₂ 粉质黏土	28.6	27.50	18.74	5.65	140	40

注: l_i 为各土层的厚度; ω 为土的含水率; γ 为土的重度; E_{s1-2} 为土体压缩模量; f_{a0} 为地基承载力特征值; q_{sik} 为与 l_i 对应的各土层与桩侧的摩阻力标准值。

计算后压浆单桩沉降之前, 应根据式(2)估算后压浆单桩竖向极限承载力。其中, 侧摩阻力增强系数 β_{si} 、端阻力增强系数 β_p 取表 3 所列的上限值, 桩端压浆对桩侧摩阻力增强的范围取 12 m。因此, 通过后压浆桩竖向极限承载力的实用计算公式得到试桩 SZ4 压浆后承载力如表 8 所示。

根据计算得到后压浆单桩极限承载力 Q_u' , 可假定试桩 SZ4 压浆后的使用荷载 Q_a' 接近于 9 313 kN, 则 Q_a' 即为桩顶的附加荷载。在压浆后使用荷载所对应的未压浆时的试桩 SZ4 桩端阻力比 $\alpha=0.08$ 。桩端处的自重应力 $\sigma_c=647$ kPa, 而沉降计算深度 z_n 由 $\sigma_z=0.2\sigma_c$ 可计算得到, $z_n=1.2$ m。由式(5)可计算得到基桩引起的沉降 $s_p=14.09$ mm, 桩身压缩量 $s_c=7.2$ mm, 则在压浆后使用荷载下未压浆桩沉

降量 $s = 21.29$ mm。需要说明的是,表 7 中给出的压缩模量是取自 100~200 kPa 区间,对于浅基础直接采用 E_{s1-2} 计算沉降的结果影响不大,而对于深度较大时该范围内的自重应力已超过 200 kPa,若直接采用地勘报告给出的压缩模量计算桩基沉降则不符合规范要求。因此,本文根据文献[19]修正土体模量计算公式 $E_s = (2.5 \sim 3.5) E_{s1-2}$,计算桩基沉降时采用了表 7 中给出的压缩模量的 2.5 倍。另一方面,由式(7)可计算得到试桩 SZ4 压浆后的沉降值,根据表 6 可知黏性土层后压浆沉降影响系数 ζ 可取 0.8,则 $s' = \zeta_s = 17.03$ mm。

表 8 试桩 SZ4 压浆后承载力计算表
Table 8 Calculation of bearing capacity of trial pile SZ4 after grouting

土层名称	l_i /m	q_{sik} /kPa	$\beta_{si} q_{sik} l_i$ /kPa	后压浆单桩承载力计算
① ₁ 粉质黏土	1.8	30	1.0×54	桩端承载力容许值/kPa
② ₂ 淤泥质黏土	24.0	12	$q_r = m_0 \lambda [f_{a0} + k_2 \gamma_2 (h - 3)]$	1 416
③ ₃ 黏土	8.0	20	1.0×160	压浆后桩端极限值/kN
④ ₂ ¹ 粉质黏土	19.7	20	1.0×394	$Q'_p = 2\beta_p q_r$
④ ₂ ¹ 粉质黏土	4.2	30	1.0×126	压浆后总侧摩阻力/kN
⑤ ₂ ¹ 粉质黏土	12.3	35	1.0×431	$Q'_s = u \sum \beta_{si} q_{sik} l_i$
⑤ ₃ 黏土	12.0	35	1.4×420	后压浆单桩极限值/kN
				$Q'_u = Q'_p + Q'_s$
				18 625

图 7 为试桩 SZ4 压浆前、后实测的桩顶荷载-沉降曲线,表 9 给出了试桩 SZ4 桩顶荷载-沉降的实测值与计算值对比结果。结合图 7 和表 9 可以看出,本文所得到的后压浆沉降影响系数具有较好的适用性,能满足大直径后压浆桩沉降计算的精度要求。通过对比压浆后承载力的实测值与计算值可以发现两者数值较为接近,进一步表明本文给出的侧摩阻力及端阻力增强系数是合理可行的。因此,根据本文给出的侧摩阻力及端阻力增强系数法与后压浆沉降影响系数能较好地计算大直径后压浆桩在正常使用极限状态下的沉降。

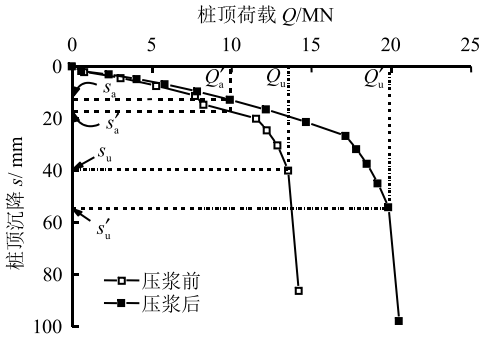


图 7 试桩 SZ4 压浆前、后实测 Q - s 曲线
Fig.7 Measured Q - s curve of trial pile SZ4 before and after grouting

表 9 试桩 SZ4 荷载-沉降的实测结果与计算结果对比
Table 9 Comparison of measured and calculated values of load-settlement of trial pile SZ4

压浆模式	使用荷载实测值		使用荷载计算值		极限荷载实测值		极限荷载计算值	
	桩顶荷载 /kN	桩顶沉降 /mm	桩顶荷载 /kN	桩顶沉降 /mm	桩顶荷载 /kN	桩顶沉降 /mm	桩顶荷载 /kN	桩顶沉降 /mm
压浆前	9 917	17.38	9 313	21.29	13 531	39.94	13 829	N/A
压浆后	9 917	12.61	9 313	17.03	19 833	54.27	18 625	N/A

为了进一步说明采用后压浆沉降影响系数给出的大直径后压浆桩沉降计算经验预估方法的适用性,以某跨海大桥工程试桩为算例进行计算与对比分析。该工程基础采用大直径钻孔灌注桩,同时采用桩端后压浆施工工艺。其中试桩桩径为 1 600 mm,桩长为 57.6 m,桩身混凝土强度等级为 C30,桩端后压浆浆液采用 P.O.42.5 普通硅酸盐水泥配制,水灰比为 0.5,单根桩压浆水泥用量为 6.9 t,压浆终止压力为 2.3 MPa。试桩现场静载试验场地勘探深度 60 m 范围内主要土层为粉质黏土、黏土和细砂。试桩的桩端持力层为黏土层,其桩长范围内土层类型及基本参数见表 10。地下水位在地表以下 1.5 m 的位置。

根据式(2)估算后压浆单桩竖向极限承载力,其中侧摩阻力增强系数 β_{si} 、端阻力增强系数 β_p 取

表 3 所列的上限值,桩端压浆对桩侧摩阻力增强的范围取 12 m。因此,通过后压浆桩竖向极限承载力的实用计算公式可得到试桩压浆后极限荷载 $Q'_u = 19\,325$ kN。试桩压浆后的使用荷载 $Q'_a = 9\,662$ kN,在压浆后使用荷载所对应的未压浆时的试桩端阻力比 $\alpha = 0.13$,桩端处的自重应力 $\sigma_c = 451$ kPa,而降降计算深度 $z_n = 1.8$ m。通过式(5)可求得在压浆后使用荷载下未压浆桩沉降量 $s = 13.84$ mm,其中桩身压缩量 $s_c = 5.69$ mm。因此,根据式(7)可计算得到试桩压浆后的沉降值 $s' = 11.07$ mm,其中黏性土层后压浆沉降影响系数 ζ 取 0.8。该试桩压浆后的极限荷载实测值为 20 209 kN,在压浆后使用荷载下未压浆桩与压浆桩实测沉降量分别为 12.09、9.69 mm。通过对比压浆后桩基沉降量可知,计算结果与实测结果略有差异,但基本能反映实际情况,

进一步表明本文给出的大直径后压浆桩沉降计算经验预估方法是合理可行的。

表 10 试桩各土层物理力学参数
Table 10 Physico-mechanical parameters
of soil layers for trial pile

土层名称	l_i / m	ω / %	γ / (kN·m ⁻³)	E_{s1-2} / MPa	f_{a0} / kPa	q_{sk} / kPa
② ₁ 淤泥	4.09	63.10	16.09	1.72	50	10.0
② ₃ 淤泥质黏土	6.00	52.30	16.19	1.41	60	13.5
③ ₁ 黏土	3.00	32.10	18.54	5.43	180	45.0
③ ₃ 黏土	6.00	43.10	17.66	3.11	100	30.0
④ ₁ 黏土	7.00	33.80	18.54	4.60	180	45.0
④ ₄ 黏土	10.00	34.00	18.05	4.73	140	35.0
④ ₄ 粉质黏土	8.00	32.80	18.25	7.47	140	35.0
④ ₃ ² 细砂	3.51	—	—	—	180	45.0
⑤ ₃ 黏土	2.69	34.20	18.34	3.56	160	40.0
⑤ ₃ 粉质黏土	1.80	29.40	19.13	9.50	180	70.0
⑥ ₁ 黏土	4.00	34.60	18.44	3.76	200	50.0
⑨ ₂ ¹ 黏土	4.00	33.40	18.74	13.62	220	55.0

5 结 论

(1) 通过对收集的试桩静载试验实测数据进行统计分析, 给出了以土层为分类的侧摩阻力及端阻力增强系数, 采用侧摩阻力及端阻力增强系数法建立了适用于不同压浆类型的大直径后压浆桩承载力实用计算公式, 并结合试验资料齐全的实测数据对其进行了验证, 表明公式具有较高的可靠性, 可供工程设计人员在大直径后压浆桩设计时使用。

(2) 由于后压浆桩沉降计算尚未形成统一的标准, 在未经压浆的大直径桩基础沉降计算的基础上引入了后压浆沉降影响系数, 基于统计分析给出了桩端后压浆、组合后压浆沉降影响系数的建议取值范围, 提出了一种适用于不同土层的大直径后压浆桩沉降计算经验预估方法。

(3) 通过工程实例验证了本文给出的后压浆桩沉降计算方法的适用性, 且能满足大直径后压浆桩沉降计算的精度要求, 可供工程设计人员在大直径后压浆桩设计时参考使用。

(4) 研究成果已纳入中华人民共和国行业标准《公路桥涵地基与基础设计规范》(JTJ 3363—2019) 及工程建设行业标准《公路桥梁灌注桩后压浆技术规程》(T/CECS G: D67-01—2018), 为公路桥梁后压浆灌注桩的设计提供了可靠的依据, 同时可进一步推动后压浆技术广泛应用于公路桥梁工程。

参 考 文 献

- [1] 龚维明, 戴国亮, 黄生根. 大型深水桥梁钻孔桩桩端后压浆技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2009.
- [2] 中国建筑工程研究院. JGJ 94—2008 建筑桩基技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- [3] 中交公路规划设计院有限公司. JTJ D63—2007 公路桥涵地基与基础设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
- [4] 刘念武, 龚晓南, 俞峰. 大直径钻孔灌注桩的竖向承载性能[J]. 浙江大学学报(工学版), 2015, 49(4): 763-768.
- [5] 万志辉, 戴国亮, 龚维明. 珊瑚礁灰岩层后压浆桩增强效应作用机制[J]. 岩土力学, 2018, 39(2): 467-473.
- [6] 万志辉, 戴国亮, 龚维明, 等. 超厚粉细砂地层组合压浆桩压浆效果试验[J]. 中国公路学报, 2018, 31(3): 59-67.
- [7] 万志辉, 戴国亮, 龚维明. 超厚细砂地层大直径后压浆桩荷载传递计算与分析[J]. 岩土力学, 2018, 39(4): 1386-1394.
- [8] 戴国亮, 万志辉, 龚维明, 等. 基于沉降控制的组合后压浆灌注桩承载力计算研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(12): 2172-2181.
- [9] 中国建筑工程研究院. JGJ 94—2008 建筑桩基技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- [10] China Academy of Building Research. JGJ 94—2008 Technical code for building pile foundations[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008.
- [11] CCCC Highway Consultants Co., Ltd. JTJ D63—2007 Code for design of ground base and foundation of highway bridges and culverts[S]. Beijing: China Communications Press, 2007.
- [12] LIU Nian-wu, GONG Xiao-nan, YU Feng. Vertical bearing capacity of large-diameter bored pile[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2015, 49(4): 763-768.
- [13] WAN Zhi-hui, DAI Guo-liang, GONG Wei-ming. Enhanced mechanism of post-grouting pile in coral-reef limestone formations[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(2): 467-473.
- [14] WAN Zhi-hui, DAI Guo-liang, GONG Wei-ming, et al. Experiment on grouting effects of combined grouting piles under extra-thick fine silty sand layer[J]. China Journal of Highway and Transportation, 2018, 31(3): 59-67.
- [15] WAN Z H, DAI G L, GONG W M. Field study on post-grouting effects of cast-in-place bored piles in extra-thick fine sand layer[J]. Acta Geotechnica, 2019, 14(5): 1357-1377.

- DAI Guo-liang, WAN Zhi-hui, GONG Wei-ming, et al. Study on calculation of bearing capacity for combined post-grouting bored piles based on settlement control[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2018, 40(12): 2172-2181.
- [10] MULLINS G, WINTERS D, STEVEN D. Predicting end bearing capacity of post-grouted drilled shaft in cohesionless soils[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2006, 132(4): 478-487.
- [11] Florida Department of Transportation. Soils and foundations handbook[S]. Florida: State Materials Office Gainesville, 2012.
- [12] 中交公路规划设计院有限公司. JTJ 3363—2019 公路桥涵地基与基础设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2019.
- CCCC Highway Consultants Co., Ltd. JTJ 3363—2019 Code for design of ground base and foundation of highway bridges and culverts[S]. Beijing: China Communications Press, 2019.
- [13] 戴国亮, 龚维明, 薛国亚, 等. 超长钻孔灌注桩桩端后压浆效果检测[J]. 岩土力学, 2006, 27(5): 849-852.
- DAI Guo-liang, GONG Wei-ming, XUE Guo-ya, et al. Effect examination for a base post-grouting overlength drilling pile[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(5): 849-852.
- [14] 石名磊, 龚维明, 季鹏, 等. 基础工程[M]. 南京: 东南大学出版社, 2002.
- SHI Ming-lei, GONG Wei-ming, JI Peng, et al. Foundation engineering[M]. Nanjing: Southeast University Press, 2002.
- [15] 东南大学. T/CECS G: D67-01—2018 公路桥梁灌注桩后压浆技术规程[S]. 北京: 人民交通出版社, 2018.
- Southeast University. T/CECS G: D67-01—2018 Technical specification for post-grouting of cast-in-place of highway bridges[S]. Beijing: China Communications Press, 2018.
- [16] 中国建筑科学研究院. GB50007—2011 建筑地基基础设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- China Academy of Building Research. GB50007—2011 Code for design of building foundation[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.
- [17] LI S C, ZHANG Q, ZHANG Q Q, et al. Field and theoretical study of the response of super-long bored pile subjected to compressive load[J]. **Marine Georesources & Geotechnology**, 2016, 34(1): 71-78.
- [18] 戴国亮, 万志辉. 后压浆桩增强效应作用机制及荷载沉降关系研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(12): 2235-2244.
- DAI Guo-liang, WAN Zhi-hui. Study on enhanced mechanism and load settlement relationship of post grouting pile[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2017, 39(12): 2235-2244.
- [19] 杨敏, 赵锡宏. 分层土中的单桩分析法[J]. 同济大学学报, 1992, 20(4): 421-428.
- YANG Min, ZHAO Xi-hong. An approach for a single pile in layered soil[J]. **Journal of Tongji University**, 1992, 20(4): 421-428.
- [13] 王亮亮, 杨果林, 房以河, 等. 高速铁路膨胀土路堑全封闭基床动力特性现场试验[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(4): 640-645.
- WANG Liang-liang, YANG Guo-lin, FANG Yi-he, et al. In-situ tests on dynamic character of fully-enclosed cutting subgrade of high-speed railways in expansive soil areas[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2014, 36(4): 640-645.
- [14] 杨果林, 邱明明, 何旭, 等. 膨胀土路堑基床新型防水层振动荷载下服役性能试验研究[J]. 振动与冲击, 2016, 35(5): 1-7, 20.
- YANG Guo-lin, QIU Ming-ming, HE Xu, et al. Tests for working property of water-proof layer of cutting subgrade in expansive soil under vibrating load[J]. **Journal of Vibration and Shock**, 2016, 35(5): 1-7, 20.
- [15] 苏谦, 白皓, 黄俊杰, 等. 刚性地基低路堤长期动力特性原位试验研究[J]. 土木工程学报, 2011, 44(增刊 1): 147-151.
- SU Qian, BAI Hao, HUANG Jun-jie, et al. In-situ tests on long-term dynamic characteristics of low embankment on rigid foundation[J]. **Chian Civil Engineering Journal**, 2011, 44(Suppl.1): 147-151.
- [16] 肖世伟, 雷长顺. 重载铁路路基荷载特征和路基动力响应分析[J]. 铁道工程学报, 2014(4): 51-56.
- XIAO Shi-wei, LEI Chang-shun. Loading characteristics and dynamic response analysis of subgrade for heavy haul railway[J]. **Journal of Railway Enggineering Society**, 2014(4): 51-56.
- [17] SHANG Yong-hui, XU Lin-rong, HUANG Ya-li, et al. Experimental study on the dynamic features of cement-stabilized expansive soil as subgrade filling of heavy haul railway[J]. **Journal of Engineering Science and Technology Review**, 2017, 10(6): 136-145.
- [18] 梅慧浩, 冷伍明, 刘文劫, 等. 持续动荷载作用下基床粗粒土填料累积塑性应变试验研究[J]. 铁道学报, 2017, 39(2): 119-126.
- MEI Hui-hao, LENG Wu-ming, LIU Wen-jie, et al. Experimental study on accumulative plastic strain of coarse grained soil filling material under continuous dynamic load[J]. **Journal of the China Railway Society**, 2017, 39(2): 119-126.

上接第 2745 页