

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2023.07.017

超长钻孔灌注桩竖向承载力当量 正态化法可靠度研究

宋春霞^{*1}, 任芳², 张学峰¹, 尼颖升¹, 马晔¹

(1. 交通运输部公路科学研究院, 北京 100088; 2. 中裕铁信交通科技股份有限公司, 河北 衡水 053020)

摘要: 为了了解超长钻孔灌注桩可靠度指标状态, 共收集整理不同场地11座桥的22根超长钻孔灌注桩竖向承载力荷载试验资料, 利用实测得到的219个侧摩阻力值和17个桩端承载力测试值, 建立了7类土侧摩阻力和1类土桩端承载力正态分布和对数正态分布的统计概率模型。采用公路规范中摩擦桩竖向承载力计算公式, 将桩顶荷载、各土层侧摩阻力和桩端反力视为变量, 利用Matlab编制了基于JC法的桩基可靠度指标计算程序, 对12根超长钻孔灌注桩按汽车荷载极值I型、恒载正态分布、不同荷载比情况下的可靠度指标进行了计算分析。结果表明: 各类土既满足正态分布也满足对数正态分布概率模型, 超长钻孔灌注桩抗力按对数正态分布时计算得到的可靠度指标均值在3.259~8.070之间, 抗力按正态分布计算得到的可靠度指标均值在2.851~7.495之间, 同普通桩基可靠度指标研究结果进行了对比, 略高于短桩可靠度指标计算结果; 由于桥梁工程地域分布广, 多个工程的样本数据离散性偏大, 超长钻孔灌注桩桩长增加了深度对可靠度的影响, 因此超长桩可靠度指标计算结果没有明显优于短桩计算结果; 利用JC法计算得到的超长桩可靠度指标分布区间合理, 同时考虑到土体的离散性, 建议超长桩可靠度指标标准值同上部结构相比可适当降低。

关键词: 桥梁工程; 可靠度; 统计分析; 承载力; 超长钻孔灌注桩; 当量正态化法

中图分类号: U443.154

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268 (2023) 07-0136-06

Study on Reliability of Obtaining Vertical Bearing Capacity of Ultra-long Bored Pile by Equivalent Normalization Method

SONG Chun-xia^{*1}, REN Fang², ZHANG Xue-feng¹, NI Ying-sheng¹, MA Ye¹

(1. Research Institute of Highway, Ministry of Transport, Beijing 100088, China;

2. Zhongyu Tiexin Transport Technology Co., Ltd., Hengshui Hebei 053020, China)

Abstract: In order to understand the reliability indicator status of ultra-long bored cast-in-place piles, the vertical bearing capacity load test data of 22 ultra-long bored cast-in-place piles from 11 bridges in different sites are collected. By using 219 lateral friction resistance values and 17 pile end bearing capacity test values, the statistical probability models of normal distribution and lognormal distribution of 7 types of lateral friction and 1 type of pile end bearing capacity are established. Using the formula for calculating the vertical bearing capacity of friction piles in highway specifications, regarding the pile top load, lateral friction resistance of each soil layer and pile end reaction as the variables, the calculation program of pile foundation reliability based on JC method is compiled by using Matlab, and the reliability index of 12 super long bored cast-in-place piles is calculated and analyzed under the conditions of extreme value I, dead load normal distribution and different load ratios. The reliability indicators of 12 ultra-long bored piles under the

收稿日期: 2022-11-29

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费项目 (2021-9073a); 宁夏回族自治区科技厅重点研发计划项目 (2022BEG07173)

作者简介 (* 通讯作者): 宋春霞 (1979-), 女, 天津人, 硕士, 副研究员. (715235504@qq.com)

conditions of extreme type I vehicle load, dead load normal distribution and different load ratios are calculated and analyzed. The result shows that (1) All kinds of soil meet both normal distribution and lognormal distribution probability model. The average reliability of resistance of ultra-long bored piles calculated according to lognormal distribution is 3.259–8.070, and those calculated according to the normal distribution is 2.851–7.495. Compared with the research result of the reliability of common pile foundation, they are slightly higher than the calculation result of the reliability of short piles. (2) Due to the wide geographical distribution of bridge projects, the dispersions of sample data of multiple projects are larger, the length of ultra-long bored cast-in-place pile increased the influence of depth on reliability. Therefore, the calculated reliability of ultra-long piles is not significantly better than that of short piles. (3) The distribution interval of the reliability of ultra-long piles calculated by the JC method is reasonable. Considering the discreteness of the soil, it is suggested that the standard value of the reliability of ultra-long piles can be appropriately reduced compared to that of superstructure.

Key words: bridge engineering; reliability; statistical analysis; bearing capacity; ultra-long bored pile; equivalent normalization method

0 引言

与上部结构相比,桩基所处的地质环境存在着许多不确定因素,桩土侧摩阻力和桩端阻力值的离散性是桩基承载力不确定性的主要来源。因此,合理统计分析桩土侧摩阻力和桩端阻力值,并建立合理的桩基可靠度评价方法,一直是桩基可靠性分析的主要目标。桩基可靠度研究比上部结构起步晚,但在可靠度指标计算方法、影响因素等方面已有大量研究成果。马晔、张书廷等^[1-2]利用JC法对单桩极限承载力可靠性进行研究,通过对105根试桩资料进行分析,给出了公路桥梁桩基可靠度指标建议值。刘尔烈^[3]等对水平荷载作用下的长桩进行可靠度分析,并对桩头简支和固支两种情况进行比较。王景梅等^[4-5]建立了基于随机场理论的桩基可靠度分析方法,并基于钻孔桩实例分析土性参数空间变异性对钻孔桩可靠度设计的影响。边晓亚等^[6-8]指出沉渣对桩的承载力可靠度指标和目标可靠度指标有显著影响并通过考虑群桩效应和系统效应的影响给出群桩承载力综合偏差系数。张树珩、杨庆年、郭大恒等^[9-11]采用贝叶斯信息融合技术,对基桩承载力可靠度进行研究,给出了考虑基桩破坏作用和竖向沉降不确定因素影响的基桩承载力可靠指标的计算方法。郭大恒等^[11]采用随机场理论和递推空间法计算土性参数相关距离,在此基础上采用蒙特卡洛法计算出了单桩失效概率和可靠指标。胡玉定等^[12]对黄土地区打入桩、静压桩、灌注桩3种桩型可靠度进行了对比分析,分别给出了3种桩承载力分项系数计算公式。徐宁、王丽娟等^[13-14]对某校区静力触

探方法测得的桩侧摩阻力和桩端阻力进行可靠度分析,提出了该场地桩侧桩端的抗力分项系数。另外部分学者^[15-18]还用对水平荷载作用下桩基可靠性进行了分析,杨莹^[18]探讨了斜坡坡度和水平荷载作用对斜坡桩基可靠性的影响。已有的桩基可靠性研究在可靠度计算方法、可靠度分析对象和可靠度指标评价方法等方面做了多方有益的探索并提出了很多有价值的结论供工程参考应用。由于桩基承载性能影响因素众多及离散性较大,需要研究者从不同影响因素细分,多维度建立桩基可靠度评价体系。超长钻孔灌注桩作为目前我国长大桥梁和软基桥梁主要基础形式,需要对其竖向承载力可靠性进行研究,以提升长大桥梁桩基设计水平,保障其运营安全。本研究拟利用超长桩桩侧摩阻力和桩端阻力测试数据进行超长桩可靠度研究,分析超长桩可靠度指标影响因素和指标分布情况,为合理确定超长桩可靠度指标提供参考。

1 可靠度指标计算方法

1.1 桩基极限状态方程

桩基的可靠性研究是分析在规定的条件和条件下桩基完成预定功能的能力、失效的概率,并提出相应的对策。桩基极限状态是指它的整个或部分超过某一特定状态,这一状态已完全不能满足设计规定或实际要求的某一功能要求。桩基极限状态可采用极限状态方程描述。结构极限状态方程是指功能函数 Z 的状态,如式(1)所示:

$$Z = g(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0, \quad (1)$$

式中, $Z \geq 0$ 时,满足功能要求; $Z < 0$ 时,不满足功

能要求,失效。

超长钻孔灌注桩往往穿越多个土层,其竖向承载力的极限状态可认为是各土层侧摩阻力、桩端阻力均达到极限值,桩身产生竖向大位移沉降。根据桩基极限承载力计算公式,桩基极限状态方程如式(2)~(3)所示:

$$Z = g(q_{si}, q_p, S_G, S_Q), \quad (2)$$

即

$$Z = \pi \sum_{i=1}^k d_i q_{si} l_i + q_p A_p - S_G - S_Q = 0, \quad (3)$$

式中, q_{si} , q_p 分别为桩基侧摩阻力极限值、桩端承载力极限值; d_i , A_p , l_i 分别为桩基直径、桩底面积、 q_{si} 对应的桩段长度; S_G , S_Q 分别为活载和恒载(考虑2倍安全系数),令 $\rho = S_Q/S_G$, 即活载和恒载值之比(荷载效应比)。

1.2 可靠度指标计算

多维坐标系 $\hat{O}-\hat{x}_1, \hat{x}_2 \cdots \hat{x}_n$ 中原点到极限状态曲面最短距离,即 P^* 点沿其在极限状态曲面的切平面法线方向至原点 $\hat{O}$ 的最短距离即为可靠度指标 β ,图1为3个变量时可靠度指标与极限状态方程的关系。

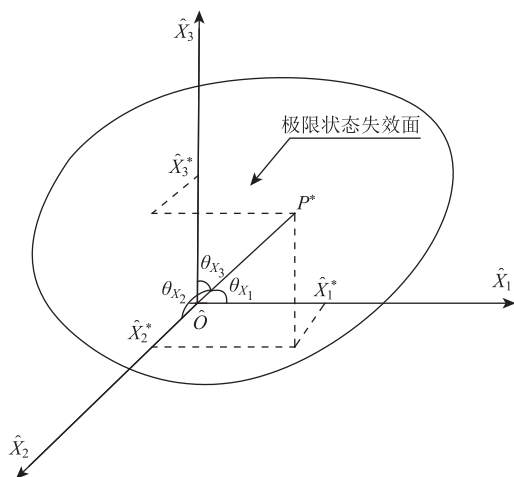


图1 三维可靠度指标与极限状态方程的关系

Fig. 1 Relationship between 3D reliability indicators and limit state equation

极限状态曲面在 P^* 点的法线 $\hat{OP}^*$ 对坐标向量的方向余弦如式(4)所示:

$$\cos \theta_{xi} = \frac{-\left. \frac{\partial g}{\partial x_i} \right|_{P^*} \cdot \sigma_{xi}}{\left[\sum_{i=1}^n \left(\left. \frac{\partial g}{\partial x_i} \right|_{P^*} \cdot \sigma_{xi} \right)^2 \right]^{1/2}}, \quad (4)$$

式中, $-\left. \frac{\partial g}{\partial x_i} \right|_{P^*}$ 为函数 $g(x_i)$ 对 x_i 的偏导数在 P^* 点

的赋值。由方向余弦定义如式(5)~(7)所示:

$$\begin{aligned} \hat{x}_i^* &= \overline{OP^*} \cos \theta_{xi} \quad (i = 1, 2, \cdots, n) \\ \hat{x}_i^* &= \frac{x_i^* - \mu_{xi}}{\sigma_{xi}} \quad (i = 1, 2, \cdots, n), \end{aligned} \quad (5)$$

得

$$\frac{x_i^* - \mu_{xi}}{\sigma_{xi}} = \beta \cos \theta_{xi}, \quad (6)$$

即得

$$x_i^* = \mu_{xi} + \beta \sigma_{xi} \cos \theta_{xi} \quad (i = 1, 2, \cdots, n), \quad (7)$$

式中, x_i^* 为 P^* 点原坐标值; μ_{xi} , σ_{xi} 分别为基本变量 x_i 均值和标准差。 P^* 为极限状态曲面上的点,对于桩基,满足极限状态方程(3),如式(8)所示:

$$Z = \pi \sum_{i=1}^k d_i q_{si}^* l_i + q_p^* A_p - S_G^* - S_Q^* = 0. \quad (8)$$

通过对侧摩阻力和桩端阻力实测值统计分析后得到 q_{si} , q_p 统计参数,并按照式(4)~(6)即可求出 β 值。

2 基本变量分布特征

2.1 恒载活载统计数据

根据公路桥梁结构主要荷载的统计结果,恒载和汽车荷载的主要统计参数及分布形式如表1所示。

表1 公路桥梁荷载参数

Tab. 1 Load parameters of highway bridge

荷载	分布概型	平均值/标准值	变异系数
		K_{SQ}	V_{SQ}
恒载	正态	1.014 8	0.043 1
汽车荷载	正态	0.668 4	0.199 4
	极值 I 型	0.686 1	0.156 9

2.2 侧摩阻力端阻力数据分析

本研究所采用的侧摩阻力及端阻力数据选自11个试桩项目,共22根超长钻孔灌注桩静荷载试验资料,如表2所示,所涉工程主要集中在东南沿海软土地区。图2为各类土实测侧摩阻力及端阻力直方图。

表2 试桩工程一览表

Tab. 2 List of pile test projects

编号	试桩编号	桩径/m	桩长/m	工程名称
1	QJ402	1.34	63.32	钱江四桥
	QJ403	1.33	69.32	
2	QJ501	1.20	69.96	钱江五桥
	QJ502	1.20	46.83	
3	XS03	1.20	77.29	下沙大桥
	XS04	1.20	80.64	

续表 2

编号	试桩编号	桩径/m	桩长/m	工程名称
4	ZJ01	1.20	60.32	湛江海湾桥
	ZJ02	1.20	67.82	
5	JF01	1.06	80.32	汕头金凤大桥
6	DY01	1.20	121.00	东营黄河公路大桥
	DY02	1.20	121.00	
	DY03	1.20	78.00	
	DY04	1.20	78.00	
7	4 [#] -1	1.6	91	禹阎太枣沟特大桥
	4 [#] -1 非	1.6	89	
8	B9-Z-8	2.5~2.8	85	杭州湾大桥
	B10-9	2.8~3.1	125	
9	SZ2-1	2.8	72	虎门二桥
	SZ2-2	2.8	67	
10	SZ5	1.8~2.0	38	港珠澳大桥
	SZ6	1.8~2.0	45	
11	SZ1	2.5~2.8	132	椒江二桥

3 可靠度指标计算

3.1 统计参数计算

对各类土的侧摩阻力及桩端土测试极限值样本进行统计分析,按正态分布及按对数正态分布计算各类土实测值的均值、方差和变异系数,按照 $\alpha = 0.05$ 的检验水平对各类土进行正态分布和对数正态

分布假设检验。得到统计参数如表 3 所示。各土类均接受正态分布假设和对数正态分布假设。

侧摩阻力按正态分布统计,各类土变异系数在 0.171~0.399 之间,强风化岩侧摩阻力变异系数最大,风化岩桩底的变异系数为 0.395 仅次于强风化岩侧摩阻力变异系数,主要是由于超长桩侧摩阻最大值往往位于桩身中上部,两端侧摩阻力值偏小,按照规范桩基荷载试验加载值已达到极限值,但桩端侧摩阻力和桩端阻力可能未达到极限值,增大了测试值的变异性。按对数正态分布统计后,各类土及桩端土的变异系数在 0.054~0.081 之间,强风化岩和风化岩桩底的变异性不再明显高于其他土类,可见按正态分布统计可在一定程度上降低统计参数的变异性。

3.2 可靠度指标 β 计算

采用 Matlab 编制可靠度指标 β 计算程序对 7 个工程 12 根东南沿海软土地区桩长大于 60 m 的桩进行了计算。桩径、桩段长度按定值考虑,抗力按对数正态、汽车按极值 I 型、恒载按正态分布计算结果如表 4 所示。抗力正态分布、汽车按极值 I 型、恒载按正太分布计算可靠度 β 值见表 5。抗力按对数正态分布时计算得到的不同荷载比下的可靠度值均值在 3.259~8.070 之间,抗力按正态分布,计算得到的可靠度 β 平均值在 2.851~7.495 之间,计算结果略低于抗力按对数正态分布的计算结果。文献 [1-2]

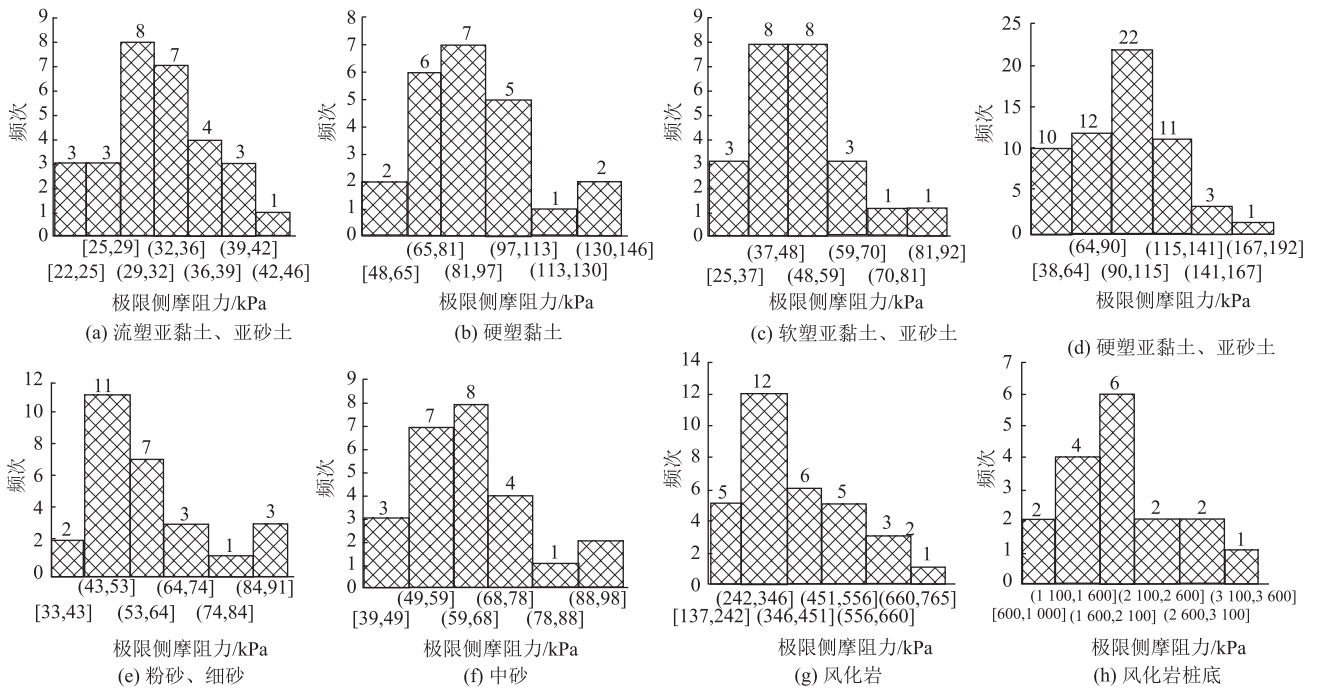


图 2 各类土实测侧摩阻力及端阻力直方图

Fig. 2 Histograms of measured side friction resistance and end resistance of all kinds of soil

表 3 侧摩阻力及端阻力极限值统计参数

Tab. 3 Statistical parameters of limit values of side friction and end resistance

土 类	样本数	按正态分布统计参数				按正对数正态分布极限值统计参数			
		均值	方差	变异系数	是否接受正态分布	均值	方差	变异系数	是否接受对数正态分布
流塑亚黏土、亚砂土	29	32. 49	5. 55	0. 171	是	3. 47	0. 17	0. 050	是
硬塑黏土	23	91. 69	23. 43	0. 255	是	4. 49	0. 25	0. 057	是
软塑亚黏土、亚砂土	24	50. 3	14. 87	0. 296	是	3. 88	0. 30	0. 076	是
硬塑亚黏土、亚砂土	59	96. 53	32. 45	0. 336	是	4. 51	0. 37	0. 081	是
粉砂、细砂	27	57. 34	15. 28	0. 266	是	4. 02	0. 24	0. 061	是
中砂	25	62. 87	13. 97	0. 222	是	4. 12	0. 22	0. 054	是
强风化岩石	32	378. 76	151. 3	0. 399	是	5. 86	0. 41	0. 070	是
风化岩桩底	17	1 929. 41	762. 2	0. 395	是	7. 48	0. 44	0. 059	是

表 4 抗力按对数正态分布、汽车荷载按极值 I 型、恒载按正态分布计算的可靠度值

Tab. 4 Reliability values calculated with resistances distributed in lognormal distribution, extreme type I vehicle loads and dead loads in normal distribution

序号	荷载比						
	0. 1	0. 25	0. 5	1. 0	1. 5	2. 5	平均
1	4. 331	4. 459	4. 578	4. 646	4. 654	4. 636	4. 551
2	4. 968	5. 066	5. 157	5. 209	5. 215	5. 201	5. 136
3	3. 417	3. 494	3. 578	3. 675	3. 724	3. 779	3. 611
4	3. 511	3. 609	3. 719	3. 848	3. 917	3. 995	3. 766
5	3. 140	3. 221	3. 297	3. 363	3. 378	3. 387	3. 298
6	8. 405	8. 850	8. 793	8. 083	7. 470	6. 819	8. 070
7	5. 949	6. 302	6. 747	7. 268	7. 621	7. 943	6. 972
8	2. 866	2. 939	3. 026	3. 146	3. 226	3. 266	3. 078
9	3. 071	3. 239	3. 447	3. 719	3. 809	4. 004	3. 548
10	5. 209	5. 478	5. 831	6. 301	6. 507	6. 799	6. 021
11	3. 338	3. 464	3. 613	3. 811	3. 939	4. 021	3. 697
12	5. 465	5. 751	6. 128	6. 623	6. 798	7. 154	6. 320

表 5 抗力按正态分布、汽车荷载按极值 I 型、恒载按正态分布计算的可靠度值

Tab. 5 Reliability values calculated with resistances distributed in normal distribution, extreme type I vehicle loads and dead loads in normal distribution

序号	荷载比						
	0. 1	0. 25	0. 5	1. 0	1. 5	2. 5	平均
1	3. 185	3. 284	3. 367	3. 387	3. 364	3. 330	3. 319
2	4. 223	4. 306	4. 383	4. 428	4. 433	4. 421	4. 366
3	2. 700	2. 759	2. 821	2. 888	2. 917	2. 963	2. 841
4	3. 124	3. 212	3. 310	3. 424	3. 486	3. 555	3. 352
5	2. 786	2. 856	2. 919	2. 966	2. 967	2. 970	2. 911
6	7. 915	8. 334	8. 238	7. 479	6. 843	6. 159	7. 495
7	5. 283	5. 596	5. 991	6. 454	6. 767	7. 053	6. 191
8	2. 621	2. 681	2. 749	2. 844	2. 912	2. 936	2. 790
9	2. 758	2. 909	3. 095	3. 339	3. 421	3. 595	3. 186
10	4. 367	4. 615	4. 947	5. 399	5. 601	5. 891	5. 137
11	2. 656	2. 745	2. 847	2. 985	3. 093	3. 132	2. 910
12	4. 680	4. 945	5. 303	5. 783	5. 954	6. 308	5. 495

通过对短桩试桩数据得到桩基可靠度指标在 2. 0 ~

8. 0 之间, 本研究利用超长桩试桩统计数据计算得到的可靠度指标略高于短桩统计数据计算结果。

4 结论

(1) JC 法计算简单, 参数意义明确, 便于工程理解和应用, 利用 JC 法计算得到的超长桩可靠度指标分布区间合理, 说明 JC 法适用于桩基可靠度分析。

(2) 桩基侧摩阻力和端阻力按对数正态分布计算得到的可靠度指标略大于按正态分布计算结果, 说明按对数正态分布可一定程度上降低数据的离散性, 但偏安全考虑, 在统计结果同时接受两种假设时, 采用正态分布计算结果。

(3) 本研究计算的 12 根超长桩可靠度值指标均在 2. 8 以上, 由于超长钻孔灌注桩竖向承载力失效概率远低于上部结构。因此考虑到土体的离散性, 建议超长桩可靠度指标标准值根据实际计算结果可适当降低。

(4) 可靠度分析高度依赖数据样本的可靠性和合理性, 桥梁工程地域分布广, 多个工程的样本数据离散性偏大, 超长钻孔灌注桩桩长长, 增加了深度对可靠度的影响, 因此超长桩可靠度指标计算结果没有明显优于短桩计算结果。

参考文献:
References:

[1] 马晔. 公路桥梁钻孔灌注桩桩侧摩阻力可靠度计算[J]. 公路交通科技, 2000, 17 (3): 25-28.
MA Ye. Reliability Calculation of Side Friction for Bored Pile of Highway and Bridge [J]. Journal of Highway and Transportation Science and Technology, 2000, 17 (3): 25-28.

[2] 张书廷, 马晔, 王尊, 等. 公路桥梁钻孔灌注桩单桩轴向承载力可靠度研究 [J]. 公路交通科技, 1998, 15 (增 1): 45-49, 68.
ZHANG Shu-ting, MA Ye, WANG Zun, et al. Reliability Study on the Single Pile Axial Bearing Capacity of Highway Bridge Bored-poured Piles [J]. Journal of Highway and Transportation Science and Technology, 1998, 15 (S1):

- 45-49, 68.
- [3] 刘尔烈, 汪克让, 杨凤祥. 单桩可靠度的分析与计算 [J]. 港工技术, 1990 (1): 6-9.
LIU Er-lie, WANG Ke-rang, YANG Feng-xiang. Analysis and Calculation of Reliability of Single Pile [J]. Port Engineering Technology, 1990 (1): 6-9.
- [4] 王景梅, 谢平. 考虑土性参数空间变异性的桩基可靠度分析 [J]. 土木工程与管理学报, 2020, 37 (1): 112-119, 125.
WANG Jing-mei, XIE Ping. Reliability Analysis for Pile Foundations Considering Spatial Variability of Soil Parameters [J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2020, 37 (1): 112-119, 125.
- [5] 王景梅, 肖芳, 陈家俊, 等. 基于贝叶斯理论和蒙特卡洛模拟的桩基可靠度分析 [J]. 地下空间与工程学报, 2017, 13 (增1): 85-90.
WANG Jing-mei, XIAO Fang, CHEN Jia-jun, et al. A Reliability Analysis Method for Pile Foundation Based on Bayesian Theory and Monte Carlo Simulation [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2017, 13 (S1): 85-90.
- [6] 边晓亚, 郑俊杰, 徐志军. 考虑桩基设计方法的基桩承载力可靠度分析 [J]. 岩土工程学报, 2013, 35 (增2): 1099-1102.
BIAN Xiao-ya, ZHANG Jun-jie, XU Zhi-jun. Reliability Analysis of Bearing Capacity of Foundation Piles Considering Pile Foundation Design Approach [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35 (S2): 1099-1102.
- [7] 边晓亚, 郑俊杰, 徐志军, 等. 考虑沉降控制条件的群桩可靠度分析 [J]. 东南大学学报 (自然科学版), 2015, 45 (4): 782-786.
BIAN Xiao-ya, ZHANG Jun-jie, XU Zhi-jun, et al. Reliability Analysis of Pile Groups Considering Settlement Control Requirements [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2015, 45 (4): 782-786.
- [8] 边晓亚, 郑俊杰, 徐志军. 考虑参数和模型不确定性的基桩正常使用极限状态可靠度分析 [J]. 岩土力学, 2014, 35 (11): 3317-3322.
BIAN Xiao-ya, ZHENG Jun-jie, XU Zhi-jun. Reliability Analysis of Serviceability Limit State of Foundation Piles Considering Uncertainties of Parameter and Model [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35 (11): 3317-3322.
- [9] 张树珺. 基于贝叶斯信息融合的基桩承载力可靠度研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2020.
ZHANG Shu-jun. Research on Reliability of Foundation Pile Bearing Capacity Based on Bayesian Information Fusion [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2020.
- [10] 杨庆年, 徐志军, 肖昭然, 等. 考虑破坏作用的基桩承载力可靠度分析 [J]. 兰州理工大学学报, 2014, 40 (2): 133-136.
YANG Qing-nian, XU Zhi-jun, XIAO Zhao-ran, et al. Reliability Analysis of Bearing Capacity of Piles by Considering Their Destruction [J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2014, 40 (2): 133-136.
- [11] 郭大恒. 土性相关距离对桩基承载力可靠度的影响 [D]. 石家庄: 河北地质大学, 2019.
GUO Da-heng. Influence of Soil Property Correlation Distance on Reliability of Bearing Capacity of Pile Foundation [D]. Shijiazhuang: Hebei GEO University, 2019.
- [12] 胡玉定. 黄土地区桩基承载力可靠性分析及概率统计推断研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2014.
HU Yu-ding. Reliability Analysis and Probability Statistical Inference of Bearing Capacity of Pile Foundation in Loess Region [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2014.
- [13] 徐宁, 葛忻声, 王丽娟, 等. 区域性场地土中桩基承载力可靠度及抗力分项系数的研究 [J]. 太原理工大学学报, 2014, 45 (6): 795-798.
XU Ning, GE Xin-sheng, WANG Li-juan, et al. Research of Resistant Coefficients and Reliability of the Load-carrying Capacity of the Pile on the Regional Site Soil [J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2014, 45 (6): 795-798.
- [14] 王丽娟, 葛忻声, 徐宁, 等. 长短桩复合地基稳定承载可靠度分析 [J]. 中国科技论文, 2015, 10 (7): 864-868.
WANG Li-juan, GE Xin-sheng, XU Ning, et al. Stability Bearing Reliability Analysis on Long-short-pile Composite Foundation [J]. China Sciencepaper, 2015, 10 (7): 864-868.
- [15] 王浩天, 董胜. 水平荷载作用下高桩码头整体可靠度研究 [J]. 中国海洋大学学报 (自然科学版), 2021, 51 (8): 65-71.
WANG Hao-tian, DONG Sheng. Study on Reliability of High-pile Wharf Subjected to Horizontal Loads [J]. Periodical of Ocean University of China, 2021, 51 (8): 65-71.
- [16] 田喆, 李帅. 内河高桩码头横向排架构件的模糊可靠度计算方法 [J]. 广东水利水电, 2020 (5): 12-18.
TIAN Zhe, LI Shuai. Fuzzy Reliability Calculation Method of Lateral Row Structural Members of Inland River High-pile Wharf [J]. Guangdong Water Resources and Hydropower, 2020 (5): 12-18.
- [17] 明敏. 海上风电单桩基础水平承载力影响参数不确定性研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
MING Min. Study on Uncertainty of Influence Parameters of Horizontal Bearing Capacity of Single Pile Foundation of Offshore Wind Power [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019.
- [18] 杨莹. 斜坡段桥梁基桩水平承载特性及其可靠性研究 [D]. 长沙: 长沙理工大学, 2018.
YANG Ying. Research on Horizontal Bearing Characteristics and Reliability of Bridge Foundation Piles in Slope Section [D]. Changsha: Changsha University of Science and Technology, 2018.