

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2018.06.005



嵌岩桩嵌岩段的岩石极限侧阻力系数

鲁先龙¹, 乾增珍², 杨文智¹, 郑卫锋¹

(1. 中国电力科学研究院, 北京 100192; 2. 中国地质大学 (北京) 工程技术学院, 北京 100083)

摘要:嵌岩桩在岩土工程中已得到广泛应用, 但如何准确计算嵌岩段桩的极限侧阻力仍是工程设计人员面临的重要课题。收集整理了不同时期、不同地区、不同岩石强度和不同嵌岩条件下开展的 145 个嵌岩桩竖向压承载力试验成果, 主要包括嵌岩段岩石类型及其单轴抗压强度、嵌岩桩的直径与嵌岩深度、嵌岩段桩的极限侧阻力等。定义嵌岩段桩的极限侧阻力和岩石单轴抗压强度的比值为嵌岩桩嵌岩段岩石极限侧阻力系数, 分析了桩径、嵌岩深度、嵌岩深径比和岩石强度对嵌岩段极限侧阻力和岩石极限侧阻力系数的影响规律, 建立了嵌岩段岩石极限侧阻力系数与岩石单轴抗压强度之间的拟合关系式, 给出了不同可靠度水平下岩石侧极限阻力系数取值。

关键词:嵌岩桩; 极限侧阻力系数; 嵌岩深径比; 抗压强度

中图分类号: TU411 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2018)06-0029-10

Analysis on ultimate side shear resistance factor of piles socketed into rocks

Lu Xianlong¹, Qian Zengzhen², Yang Wenzhi¹, Zheng Weifeng¹

(1. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, P. R. China;

2. School of Engineering and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, P. R. China)

Abstract: Rock-socket pile foundations have been widely used in engineering practices. It is important to determine the ultimate side shear resistance of the piles socketed into rock for designers. In this study, the results of 145 compression load tests were collected to examine several issues related to the bearing capacity behavior of rock-socket piles. All these load test results were representative since they were carried out worldwide, on different rock types and rock-socket conditions, for a long time period. Using these available load test case history data, the socketed rock type of piles, diameter and embedment depth of socketed piles, uniaxial compressive strength of rock in nature, and the ultimate bearing side resistances were collected. The ratio of ultimate side shear resistance to unconfined compressive strength of the rock was denoted as the ultimate side shear resistance factor of the piles socketed into rocks. Effects of pile diameter, rock depth, ratio of rock socketed depth to diameter, and the unconfined compressive strength of the rock on ultimate side shear resistance and the influential factors were evaluated. Empirical relationships between the ultimate side shear resistance factor and the unconfined compressive strength are

收稿日期: 2017-12-04

基金项目: 国家电网公司科技项目 (GCB17201600230)

作者简介: 鲁先龙 (1972-), 男, 高级工程师 (教授级), 博士, 主要从事电力工程地基基础研究。E-mail: luxianlong@163.com。

Received: 2017-12-04

Foundation item: Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. GCB17201600230)

Author brief: Lu Xianlong (1972-), senior engineer (professor), PhD, main research interests: subgrad and foundation engineering in power electricity, E-mail: luxianlong@163.com.

suggested, and based on the statistical results, the specific design recommendations for the ultimate side shear resistance factor are provided.

Keywords: rock-socket pile; ultimate side shear resistance factor; ratio of pile rocketed depth to diameter; compressive strength

嵌岩桩是大型建(构)筑物的主要基础型式,已在工程中得到了广泛应用,主要用于承受上部结构的下压或上拔荷载。对抗压和抗拔嵌岩桩,嵌岩段桩的侧阻力通常都占总承载力较大比例。嵌岩桩荷载传递是桩-土-岩相互作用的复杂过程。目前,学术界和工程界普遍认为,嵌岩桩抗压承载力主要由基岩上覆土层的桩侧阻力、嵌岩段桩侧阻力和桩端阻力 3 部分组成。这在中国相关规范^[1-4]给出的嵌岩桩承载力设计计算方法中均得到体现。嵌岩桩抗拔承载力主要由基岩上覆土层桩侧阻力和嵌岩段桩侧阻力 2 部分组成。通常采用折减系数,对土层和岩层抗压极限侧阻力进行折减。如文献^[5]建议该折减系数为 0.7。因此,研究嵌岩桩嵌岩段桩侧极限侧阻力及岩石极限侧阻力系数对嵌岩桩的抗压和抗拔承载性能都具有重要的理论和工程意义。

目前,抗压嵌岩桩承载力计算主要是经验和半经验公式,经验参数较多。以中国现行行业标准《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008)^[1]为例,其采用嵌岩段侧阻和端阻综合系数乘以相应岩石饱和单轴抗压强度的方法,计算得到嵌岩桩嵌岩段下压极限承载力。该方法简单且工程意义明确,便于工程设计使用^[6]。然而,嵌岩段侧阻和端阻综合系数取值存在一定局限性。首先,侧阻力系数与端阻力系数来源不同,侧阻力系数来源于假定侧阻力分布模式的计算结果,而端阻力系数则来源于试验数据的统计结果。其次,综合系数中侧阻力系数仅按照软质岩和硬质岩 2 大档次取值,缺少进一步细划分,难以充分体现岩性差异。因此,迫切需要收集更多嵌岩桩试验数据,对嵌岩桩嵌岩段岩石极限侧阻力和岩石极限侧阻力系数进行分析,也为相关设计规范的完善提供参考。

收集了在不同时期、不同地区、不同岩石强度和不同嵌岩条件下所完成的 145 个嵌岩桩竖向压承载力试验成果,分析了桩径、嵌岩深度、嵌岩深径比和岩石强度等因素对嵌岩桩嵌岩段桩侧极限侧阻力及岩石极限侧阻力系数的影响规律,建立了嵌岩段岩石极限侧阻力系数与岩石单轴抗压强度之间的拟合关系式。基于统计分析结果,给出了不同可靠度水平下嵌岩桩嵌岩段岩石极限阻力系数的取值,可

为嵌岩桩极限侧阻力计算提供借鉴。

1 数据收集与整理

1.1 数据收集

试验资料来源于 34 篇文献^[7-40],共 145 个嵌岩桩竖向压承载力试验成果,主要包括嵌岩段岩石类型、嵌岩段桩的直径 d 与嵌岩深度 h_r 、岩石天然单轴抗压强度 σ_c 及嵌岩段桩的极限侧阻力 q_s 等。相关文献作者及发表时间如表 1 所示。全部嵌岩桩嵌岩段下压承载力试验结果列于表 2。

当前,学者们通常定义嵌岩段桩的极限侧阻力 q_s 和岩石单轴抗压强度 σ_c 之间的比值为嵌岩桩嵌岩段岩石极限侧阻力系数,记为 ξ_s ,即

$$\xi_s = q_s / \sigma_c \quad (1)$$

根据表 2 试验结果,按式(1)得到各试验基础嵌岩段岩石极限侧阻力系数 ξ_s 值,结果也列于表 2。

文献中的试验工作不同时期、不同地区学者在不同岩石类型与强度、不同桩端嵌岩条件下完成的,作者对嵌岩桩的极限侧阻力测试方法、极限承载力的确定原则也不尽相同。分析中均直接采用原文献结果,这种分析方法得到的研究结论应更具有—般性。

1.2 数据整理与分析

表 2 结果表明,不同岩性中嵌岩桩抗压承载力差异主要由嵌岩段岩体性质和桩端嵌岩特征的不同引起。桩端嵌岩特征主要包括桩径、嵌岩深度、嵌岩深径比。表 2 中嵌岩段岩石主要包括页岩、泥灰岩、安山岩、泥岩、砂岩、花岗岩、石灰岩、粉砂岩、凝灰岩、辉绿岩等多种类型。中国《工程岩体分级标准》(GB/T 50218—2014)^[41]指出,影响嵌岩段岩体性质的因素主要是岩石物理力学性质、构造发育情况、承受的荷载(工程荷载和初始应力)、应力应变状态、几何边界条件、水的赋存状态等。在这些因素中,岩石坚硬程度则是反映岩体基本特性的一个重要因素。此外,学者们和工程界也都是采用嵌岩桩嵌岩段岩石极限侧阻力系数乘以岩石单轴抗压强度计算得到嵌岩桩嵌岩段桩侧岩石极限侧力。因此,为便于分析,根据表 2 试验成果,并参考《岩土工程勘察规范》(GB 50021—2001)(2009 版)^[42]中岩石坚硬程度分类规定,根据 σ_c 的大小不同,将试验数据分为 5 组:

$\sigma_c \leq 5 \text{ MPa}$, $5 \text{ MPa} < \sigma_c \leq 15 \text{ MPa}$, $15 \text{ MPa} < \sigma_c \leq 30 \text{ MPa}$, $30 \text{ MPa} < \sigma_c \leq 60 \text{ MPa}$ 和 $\sigma_c > 60 \text{ MPa}$ 。据此分析嵌岩段岩体性质对嵌岩段桩极限侧阻力及岩石极限侧阻力系数的影响规律。各分组的试验样本量分别为 40、49、23、22 和 11。

文献[42]中岩石坚硬程度按岩石饱和单轴抗压强度 f_{rk} 大小进行划分,而本文引用文献中的岩石强度 σ_c 均为岩石天然单轴抗压强度,这是二者的不同。采用根据 σ_c 大小进行试验数据分组的方法,主要是便于问题分析与成果对比。

表 1 文献作者与年代^[7-40]

Table 1 Authors and years for the references in this study^[7-40]

序号	作者及年代	序号	作者及年代
1	Mason (1960)	18	Webb and Davies (1980)
2	Thorburn (1966)	19	Williams (1980)
3	Matich and Kozicki (1967)	20	Williams and Ervin (1980)
4	Seychuck (1970)	21	Williams, et al. (1980)
5	Osterberg and Gill(1973)	22	Williams and Pells (1981).
6	Davis (1974)	23	Horvath, et al. (1983)
7	Buttling (1976)	24	Lam, et al. (1991)
8	Rosenberg and Journeaux (1976)	25	McVay, et al. (1992)
9	Webb (1976)	26	Leung (1996)
10	Wilson (1976)	27	Carrubba (1997)
11	Vogan (1977)	28	Walter, et al. (1997)
12	Pells, et al. (1978)	29	Gunnick and Kiehne (1998)
13	Horvath and Kenney (1979)	30	Long (2000)
14	Johnston and Donald (1979)	31	Zhan and Yin (2000)
15	Horvath, et al. (1980)	32	Ng, et al. (2001)
16	Pells, et al. (1980)	33	Castelli and Fan (2002)
17	Thorne (1980)	34	Gordon, et al. (2004)

表 2 嵌岩桩嵌岩段承载力试验结果

Table 2 Database for the load test results of piles socketed into rock

基础编号	岩石类型	d/mm	h_r/mm	σ_c/MPa	q_s/MPa	ξ_s
1/1	页岩	610	1 800	1.5	0.417	0.278
2/1	页岩	762	3 650	12.2	0.242	0.020
3/1	页岩	610	6 000	0.48	0.310	0.646
4/1	页岩	480	1 800	50.0	3.030	0.061
5/1	页岩	1 220	1 200	11.1	1.040	0.094
6/1	泥灰岩	760	4 000	1.3	0.230	0.177

续表 2

基础编号	岩石类型	d/mm	h_r/mm	σ_c/MPa	q_s/MPa	ξ_s
7/1	白垩	1 050	8 000	1.1	0.190	0.173
8/1	页岩	203	900	20.7	2.140	0.103
8/2	安山岩	450	560	10.55	1.120	0.106
8/3	页岩	200	910	21.1	1.720	0.082
9/1	辉绿岩	615	12 200	0.4	0.122	0.305
10/1	泥岩	900	1 000	1.09	0.120	0.110
10/2	泥岩	900	1 000	1.09	0.180	0.165
11/1	页岩	610	2 900	7.0	0.932	0.133
12/1	泥岩	1 090	1 500	2.3	0.800	0.348
13/1	页岩	635	900	15.2	0.830	0.055
13/2	页岩	635	900	15.2	0.830	0.055
14/1	泥岩	1 200	1 000	3.06	1.050	0.343
14/2	泥岩	1 200	1 000	1.93	0.940	0.487
15/1	页岩	710	1 400	10.4	1.090	0.105
16/1	砂岩	75	960	6.0	0.820	0.137
16/2	砂岩	210	920	6.0	1.120	0.187
16/3	砂岩	315	400	6.0	1.410	0.235
16/4	砂岩	210	1 370	6.0	0.890	0.148
16/5	砂岩	210	518	6.0	0.810	0.135
16/6	砂岩	160	460	6.0	0.940	0.157
16/7	砂岩	160	450	6.0	1.160	0.193
16/8	砂岩	315	520	6.0	0.890	0.148
16/9	砂岩	255	330	6.0	1.650	0.275
16/10	砂岩	160	620	6.0	1.130	0.188
16/11	砂岩	310	450	6.0	0.480	0.080
16/12	砂岩	210	600	6.0	1.200	0.200
16/13	砂岩	210	700	6.0	1.170	0.195
16/14	砂岩	290	1 300	6.0	0.320	0.053
16/15	砂岩	710	900	6.0	0.650	0.108
16/16	砂岩	290	1 270	6.0	0.680	0.113
16/17	砂岩	210	340	30.0	4.750	0.158
16/18	砂岩	160	184	14.0	2.300	0.164
16/19	砂岩	64	160	14.0	2.600	0.186
16/20	砂岩	84	130	14.0	3.460	0.247
16/21	砂岩	84	330	14.0	2.430	0.174
16/22	砂岩	84	385	14.0	2.590	0.185
16/23	砂岩	160	112	14.0	5.220	0.373
16/24	砂岩	160	160	14.0	2.690	0.192
16/25	砂岩	91	255	14.0	0.150	0.011
17/1	页岩	900	1 300	21.0	1.260	0.060
17/2	页岩	450	700	34.0	2.500	0.074
18/1	砂岩	471	1 080	2.5	0.530	0.212
18/2	砂岩	450	1 750	2.5	0.730	0.292

续表 2

基础编号	岩石类型	d/mm	h_r/mm	σ_c/MPa	q_s/MPa	ξ_s
18/3	砂岩	450	2 770	2.5	0.680	0.272
18/4	砂岩	450	900	2.5	0.630	0.252
18/5	砂岩	536	1 300	2.5	0.480	0.192
18/6	砂岩	450	500	2.5	0.420	0.168
18/7	砂岩	436	1 670	2.5	0.910	0.364
18/8	砂岩	450	600	18.0	0.590	0.033
18/9	砂岩	450	800	18.0	3.180	0.177
18/10	砂岩	450	1 600	18.0	2.260	0.126
19/1	泥岩	660	1 520	0.83	0.560	0.675
19/2	泥岩	1 120	2 590	0.57	0.510	0.895
19/3	泥岩	1 170	2 510	0.59	0.410	0.695
19/4	泥岩	395	870	0.58	0.500	0.862
19/5	泥岩	395	870	0.6	0.410	0.683
19/6	泥岩	395	885	0.58	0.360	0.621
19/7	泥岩	1 220	2 000	2.46	0.600	0.244
19/8	泥岩	1 300	2 000	2.3	0.640	0.278
19/9	泥岩	1 230	2 000	2.3	0.710	0.309
19/10	泥岩	1 350	2 000	2.34	0.620	0.265
20/1	泥岩	—	—	7.2	0.860	0.119
21/1	泥岩	660	1 800	2.3	0.965	0.420
22/1	页岩	690	3 400	3.1	1.100	0.355
22/2	页岩	660	5 200	0.5	0.300	0.600
22/3	页岩	790	8 900	2.7	0.720	0.267
23/1	页岩	710	1 370	5.4	1.110	0.206
23/2	页岩	710	1 370	11.1	1.110	0.100
23/3	页岩	710	1 370	5.6	2.000	0.357
23/4	页岩	710	1 370	5.5	1.750	0.318
23/5	页岩	710	1 370	10.4	1.090	0.105
24/1	花岗岩	1 000	800	120.0	0.695	0.006
25/1	石灰石	760	1 100	1.72	0.480	0.279
25/2	石灰石	760	2 450	2.3	0.390	0.170
25/3	石灰石	760	1 000	6.71	1.200	0.179
25/4	石灰石	760	3 100	3.55	0.690	0.194
25/5	石灰石	760	1 200	4.41	0.710	0.161
25/6	石灰石	910	3 700	4.55	0.820	0.180
26/1	花岗岩	1 000	1 000	12.5	0.800	0.064
26/2	粉砂岩	810	1 0000	6.0	0.560	0.093
26/3	粉砂岩	1 350	6 800	7.0	0.600	0.086
26/4	粉砂岩	1 500	11 500	9.0	0.800	0.089
26/5	粉砂岩	710	7 300	9.0	0.700	0.078

续表 2

基础编号	岩石类型	d/mm	h_r/mm	σ_c/MPa	q_s/MPa	ξ_s
26/6	粉砂岩	1 400	2 500	3.5	0.390	0.111
26/7	粉砂岩	1 400	3 000	6.5	0.620	0.095
27/1	泥灰岩	1 200	7 500	0.9	0.140	0.156
27/2	辉绿岩	1 200	2 500	15.0	0.490	0.033
27/3	石膏岩	1 200	11 000	6.0	0.120	0.020
27/4	辉绿岩	1 200	2 000	40.0	0.890	0.022
27/5	石灰石	1 200	2 500	2.5	0.400	0.160
28/1	泥岩	910	1 000	3.2	0.600	0.188
28/2	粉砂岩	910	2 100	8.9	1.110	0.125
28/3	砂岩	910	2 200	11.6	2.160	0.186
29/1	石灰石	457.2	4 120	43.6	2.343	0.054
29/2	石灰石	457.2	4 020	73.8	0.916	0.012
29/3	石灰石	457.2	3 770	64.7	2.278	0.035
30/1	花岗岩	350	1 500	50.0	2.015	0.040
30/2	石灰石	350	2 800	25.0	0.750	0.030
30/3	石灰石	350	2 800	54.0	1.500	0.028
30/4	石灰石	350	2 300	29.0	1.000	0.034
30/5	石灰石	350	2 300	54.0	1.880	0.035
30/6	石灰石	350	3 300	51.0	1.920	0.038
30/7	石灰石	350	2 000	50.0	1.455	0.029
30/8	石灰石	300	3 000	92.0	0.550	0.006
30/9	石灰石	325	2 250	51.0	0.765	0.015
30/10	石灰石	350	2 700	51.0	1.620	0.032
30/11	石灰石	350	3 150	51.0	1.270	0.025
30/12	石灰石	210	500	78.0	0.620	0.008
30/13	石灰石	190	1 000	84.0	0.420	0.005
30/14	石灰石	600	2 000	50.0	1.950	0.039
30/15	石灰石	600	1 750	51.0	1.670	0.033
30/16	石灰石	600	2 100	50.0	0.500	0.010
30/17	石灰石	800	1 500	52.0	0.470	0.009
30/18	石灰石	800	200	50.0	2.000	0.040
30/19	石灰石	600	1 600	50.0	1.300	0.026
30/20	石灰石	600	3 000	16.0	0.910	0.057
30/21	石灰石	600	3 000	16.0	0.975	0.061
30/22	石灰石	800	3 000	25.0	0.995	0.040
30/23	石灰石	800	3 000	25.0	0.995	0.040
30/24	石灰石	190	500	40.0	3.000	0.075
30/25	石灰石	170	500	75.0	1.500	0.020
31/1	凝灰岩	1 050	2 000	30.0	2.630	0.088
32/1	凝灰岩	1 200	2 000	105.0	2.900	0.028

续表 2

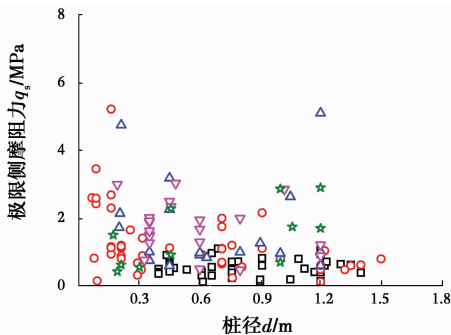
基础编号	岩石类型	d/mm	h_r/mm	σ_c/MPa	q_s/MPa	ξ_s
32/2	凝灰岩	1 060	6 000	156.0	1.740	0.011
32/3	凝灰岩	1 020	2 000	40.0	2.860	0.072
32/4	砂岩	1 200	1 500	28.8	5.100	0.177
32/5	凝灰岩	1 320	2 100	6.0	0.480	0.080
32/6	凝灰岩	1 200	1 200	82.5	1.700	0.021
32/7	凝灰岩	1 200	3 600	10.0	0.610	0.061
32/8	凝灰岩	1 000	900	125.0	2.865	0.023
32/9	凝灰岩	1 000	2 500	28.8	0.960	0.033
32/10	凝灰岩	1 200	1 500	23.0	1.000	0.043
32/11	凝灰岩	1 200	3 000	38.0	1.210	0.032
32/12	凝灰岩	1 200	1 100	18.8	0.600	0.032
33/1	石灰石	1 830	5 250	7.5	0.977	0.130
34/1	粉砂岩	1 829	2 410	20.0	0.977	0.049
34/2	砂岩	1 829	2 130	17.0	0.756	0.044
34/3	砂岩	1 829	2 350	17.0	1.006	0.059
34/4	砂岩	1 829	2 180	33.0	0.191	0.006

注:1)基础编号中“/”的前一个数字代表文献序号,后一个数字代表该文献中试验基础个数的序号。2)表中“—”表示原文献中无相应数据。

2 嵌岩段桩的极限侧阻力及岩石极限侧阻力系数影响因素

2.1 桩径

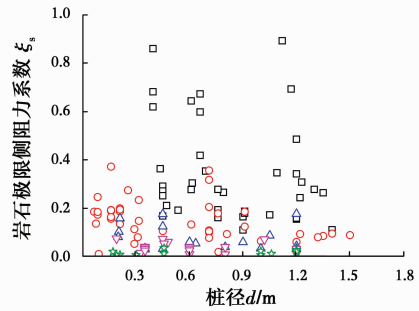
图 1 和图 2 分别为嵌岩段桩的极限侧阻力和嵌岩段岩石极限侧阻力系数随桩径的变化规律。



注: $\square \sigma_c \leq 5 \text{ MPa}$ $\circ 5 \text{ MPa} < \sigma_c \leq 15 \text{ MPa}$ $\triangle 15 \text{ MPa} < \sigma_c \leq 30 \text{ MPa}$
 $\nabla 30 \text{ MPa} < \sigma_c \leq 60 \text{ MPa}$ $\star \sigma_c > 60 \text{ MPa}$

图 1 嵌岩段桩的极限侧阻力随桩径变化关系
 Fig. 1 Variation of ultimate side shear resistance with diameter of the pile socketed into rock

从图 1 和图 2 可看出,嵌岩段桩的极限侧阻力及嵌岩段岩石极限侧阻力系数随桩径变化均具有较大的离散性,二者之间无明显的相关性。Williams



注: $\square \sigma_c \leq 5 \text{ MPa}$ $\circ 5 \text{ MPa} < \sigma_c \leq 15 \text{ MPa}$ $\triangle 15 \text{ MPa} < \sigma_c \leq 30 \text{ MPa}$
 $\nabla 30 \text{ MPa} < \sigma_c \leq 60 \text{ MPa}$ $\star \sigma_c > 60 \text{ MPa}$

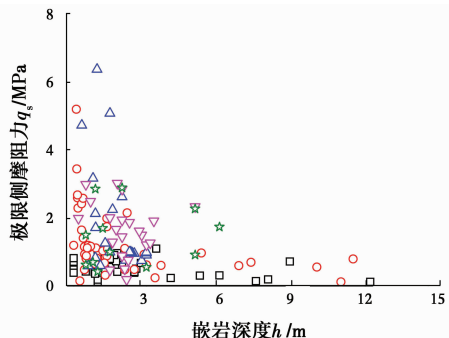
图 2 嵌岩段岩石极限侧阻力系数随桩径变化关系
 Fig. 2 Variation of ultimate side shear resistance factor with diameter of the pile socketed into rock

等的试验也表明^[28],当桩径大于 150 mm 时,桩径对嵌岩桩的极限侧阻力影响可忽略不计。可能因为:嵌岩桩嵌岩段桩侧阻力主要靠桩-岩间相对位移发挥,但岩体发挥极限侧阻所需的相对位移较小,对破碎砂质粘土岩和细砂岩约 4 mm,完整细砂岩约 3 mm,完整石灰岩和花岗岩 $\leq 2 \text{ mm}$ ^[43]。由于桩-岩间极限侧阻发挥所需的相对位移主要与岩体类别有关,从而使得嵌岩段岩石极限侧阻力与桩径之间的相关性不强。

2.2 嵌岩深度

嵌岩深度是嵌岩桩设计的重要参数之一,直接关系嵌岩桩设计的安全性和经济性。嵌岩深度过大,虽然安全可靠,但施工难度大、费用高。反之,嵌岩深度过小,若桩端岩层性质差,嵌岩桩承载力和沉降可能不满足上部结构要求。

图 3 和图 4 分别给出了嵌岩段桩的极限侧阻力和岩石极限侧阻力系数随嵌岩深度变化规律。



注: $\square \sigma_c \leq 5 \text{ MPa}$ $\circ 5 \text{ MPa} < \sigma_c \leq 15 \text{ MPa}$ $\triangle 15 \text{ MPa} < \sigma_c \leq 30 \text{ MPa}$
 $\nabla 30 \text{ MPa} < \sigma_c \leq 60 \text{ MPa}$ $\star \sigma_c > 60 \text{ MPa}$

图 3 嵌岩段桩的极限侧阻力随嵌岩深度变化关系
 Fig. 3 Variation of ultimate side shear resistance with depth of the pile socketed into rock

图 3 和图 4 表明,嵌岩段桩的极限侧阻力和嵌岩段岩石极限侧阻力系数随嵌岩深度的变化都具有

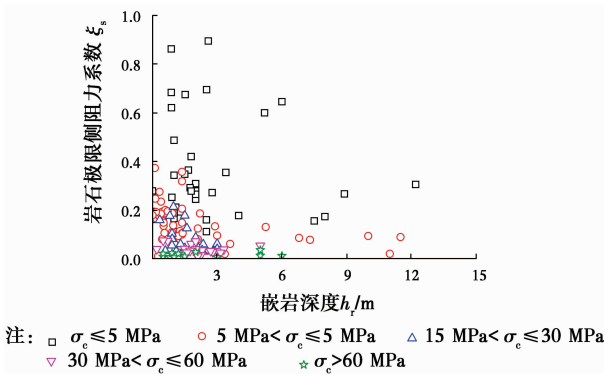


图 4 嵌岩段岩石极限侧阻力系数随嵌岩深度变化关系
Fig. 4 Variation of ultimate side shear resistance factor with depth of the pile socketed into rock

一定离散性,但总体随嵌岩深度的增加而减小。这与 Rowe 等^[44]研究结论一致。即在一定嵌岩深度范围内,增加嵌岩深度可提高嵌岩桩承载力,但超过某一深度后,增加嵌岩深度对单桩承载力几乎没有影响,嵌岩桩存在最佳嵌岩深度,这也与中国学者对嵌岩深度普遍看法一致^[44-49],即嵌岩桩存在最佳嵌岩深度,可使嵌岩段桩侧阻力和桩端阻力发挥最为协调和充分。

2.3 嵌岩深径比

图 5 为嵌岩段桩的极限侧阻力随嵌岩深径比 h_r/d 的变化规律。结果表明,嵌岩段桩的极限侧阻力总体随嵌岩深径比的增大而减小。中国学者对嵌岩桩最佳嵌岩深径比取值的研究结论也不一致。黄求顺^[45]认为嵌岩桩最佳嵌岩深径比为 3,而刘兴远等^[46]认为一律将嵌岩深径比等于 3 作为最佳嵌岩深度不合理,应根据桩端所嵌入岩体状态确定。明可前^[47]通过试验认为最佳嵌岩深径比为 4。许锡宾等^[48]认为硬质岩和软质岩最佳嵌岩深径比分别取 3 和 5 较合理。

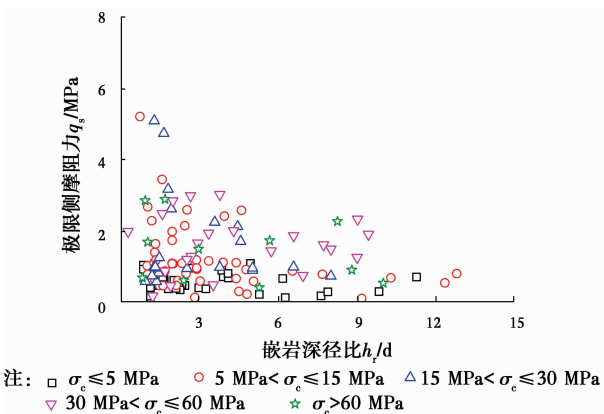


图 5 嵌岩段桩的极限侧阻力随嵌岩深径比变化关系
Fig. 5 Variation of ultimate side shear resistance with the ratio of rock rocketed depth to diameter

图 6 为采用双对数坐标轴绘制的嵌岩段岩石极限侧阻力系数随嵌岩深径比变化规律。中国桩基规范^[1]中岩石极限侧阻力系数与岩石强度、嵌岩深径比有关。图 6 中也给出了中国桩基规范中嵌岩段岩石极限侧阻力系数随嵌岩深径比的变化曲线。

从图 6 可看出,对极软岩和软岩($\sigma_c \leq 15$ MPa),规范取值总体偏小,而对较硬岩和硬岩($\sigma_c > 30$ MPa),规范取值又总体偏大。同时,图 6 中相同和不同岩石强度下,嵌岩段岩石极限侧阻力系数与嵌岩深径比之间无明显的相关性。然而,中国桩基规范^[1]中,不论是极软岩和软岩,还是较硬岩和硬岩,嵌岩段岩石极限侧阻力系数取值与嵌岩深径比相关,且随嵌岩深径比增加均略有下将,这显然不尽合理。

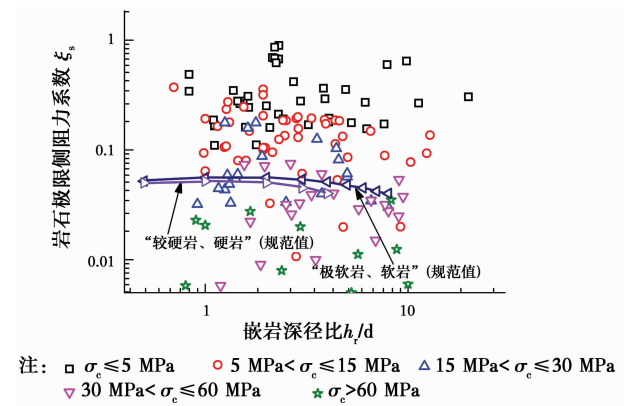


图 6 嵌岩桩岩石极限侧阻力系数随嵌岩深径比变化关系

Fig. 6 Log-log plots of ultimate side shear resistance factor with the ratio of rock rocketed depth to diameter

2.4 岩石强度

学者们都是将嵌岩段桩的极限侧阻力和岩石单轴抗压强度联系在一起。这既表明嵌岩段桩的极限侧阻力和岩石单轴抗压强度之间有良好的相关性。学者们多采用 $q_s = b(\sigma_c)^{0.50}$ 拟合嵌岩段桩的极限侧阻力 q_s 和岩石单轴抗压强度 σ_c 之间关系,不同学者之间系数 b 的取值不同,如表 3 所示。

表 3 嵌岩段桩的极限侧阻力表达式

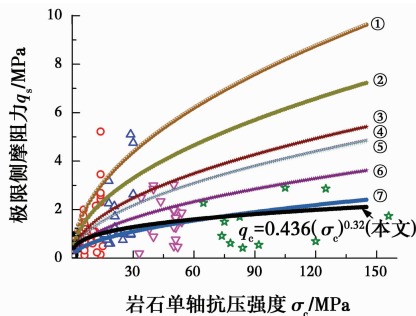
Table 3 Summary of equations of ultimate side shear resistance for piles rocketed into the rocks

文献作者与年代	极限侧阻力 q_s /MPa
Rosenberg and Joumeaux (1976) ^[14]	$q_s = 0.375(\sigma_c)^{0.515}$
Horvath, et al. (1983) ^[29]	$q_s = b(\sigma_c)^{0.50}, b = 0.20 \sim 0.30$
Rowe and Anntage (1987) ^[44]	$q_s = 0.45(\sigma_c)^{0.50}$ (侧壁光滑) $q_s = 0.60(\sigma_c)^{0.50}$ (侧壁粗糙)

续表 3

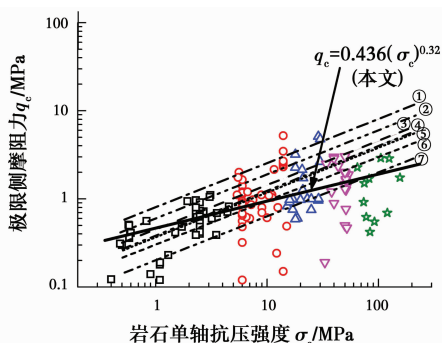
文献作者与年代	极限侧阻力 q_s/MPa
Reese and O'Neill (1988) ^[50]	$q_s = 0.15\sigma_c (\sigma_c \leq 1.90 \text{ MPa})$ $q_s = 0.20(\sigma_c)^{0.50} (\sigma_c > 1.90 \text{ MPa})$
Zhang and Einstein (1998) ^[51]	$q_s = 0.40(\sigma_c)^{0.50}$, (侧壁光滑) $q_s = 0.80(\sigma_c)^{0.50}$, (侧壁粗糙)
Carrubba (1997) ^[33]	$q_s = b(\sigma_c)^{0.50}$, $b = 0.13 \sim 0.25$

根据表 2 数据,可得到嵌岩段桩的极限侧阻力随岩石单轴抗压强度变化如图 7 所示。图 7 给出了表 3 中不同系数 b 所对应的嵌岩段桩侧极限阻力和岩石单轴抗压强度的变化曲线。为便于进一步比较,将图 7 采用双对数坐标轴表示,结果如如图 8 所示。



注: $\square \sigma_c \leq 5 \text{ MPa}$ $\circ 5 \text{ MPa} < \sigma_c \leq 15 \text{ MPa}$ $\triangle 15 \text{ MPa} < \sigma_c \leq 30 \text{ MPa}$
 $\nabla 30 \text{ MPa} < \sigma_c \leq 60 \text{ MPa}$ $\star \sigma_c > 60 \text{ MPa}$
①Zhang and Einstein(1998), $b=0.80$ ②Rowe and Anntage(1987), $b=0.60$
③Rowe and Anntage(1987), $b=0.45$ ④Zhang and Einstein(1998), $b=0.40$
⑤Rosenberg and Joumeaux(1976), $b=0.375$
⑥Horvath,et al.(1983), $b=0.30$
⑦Horvath,et al.(1983), $b=0.20$;Reese and O' Neill(1988), $b=0.20$

图 7 嵌岩段桩的极限侧阻力随岩石强度变化关系
Fig. 7 Ultimate side shear resistance versus unconfined compressive strength of rock



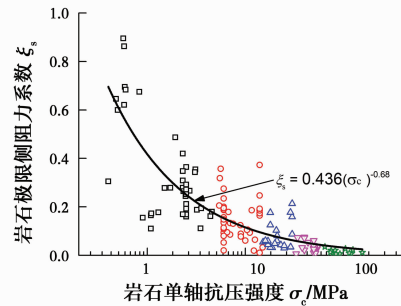
注: $\square \sigma_c \leq 5 \text{ MPa}$ $\circ 5 \text{ MPa} < \sigma_c \leq 15 \text{ MPa}$ $\triangle 15 \text{ MPa} < \sigma_c \leq 30 \text{ MPa}$
 $\nabla 30 \text{ MPa} < \sigma_c \leq 60 \text{ MPa}$ $\star \sigma_c > 60 \text{ MPa}$
①Zhang and Einstein(1998), $b=0.80$ ②Rowe and Anntage(1987), $b=0.60$
③Rowe and Anntage(1987), $b=0.45$ ④Zhang and Einstein(1998), $b=0.40$
⑤Rosenberg and Joumeaux(1976), $b=0.375$
⑥Horvath,et al.(1983), $b=0.30$
⑦Horvath,et al.(1983), $b=0.20$;Reese and O' Neill(1988), $b=0.20$

图 8 双对数坐标轴下嵌岩段岩石极限侧阻力随岩石强度变化
Fig. 8 Log-log plots of ultimate side shear resistance versus unconfined compressive strength of rock

图 7 和图 8 均表明,嵌岩段桩的极限侧阻力随岩石单轴抗压强度增加而增加,可采用式(2)拟合。

$$q_s = 0.436(\sigma_c)^{0.32} \quad (2)$$

图 9 给出了按表 2 数据得到的嵌岩桩岩石极限侧阻力系数随岩石单轴抗压强度的变化规律。



注: $\square \sigma_c \leq 5 \text{ MPa}$ $\circ 5 \text{ MPa} < \sigma_c \leq 15 \text{ MPa}$ $\triangle 15 \text{ MPa} < \sigma_c \leq 30 \text{ MPa}$
 $\nabla 30 \text{ MPa} < \sigma_c \leq 60 \text{ MPa}$ $\star \sigma_c > 60 \text{ MPa}$

图 9 嵌岩桩岩石极限侧阻力系数随岩石强度变化关系
Fig. 9 Ultimate side shear resistance factor versus unconfined compressive strength of rock

图 9 中岩石极限侧阻力系数 ξ_s 随岩石单轴抗压强度 σ_c 增加而下将, ξ_s 和 σ_c 间可采用式(3)拟合。

$$\xi_s = 0.436(\sigma_c)^{-0.68} \quad (3)$$

显然,式(3)与按照式(1)、式(2)计算结果一致。

3 岩石极限侧阻力系数的取值建议

中国现行桩基规范^[1]中嵌岩段岩石极限阻力系数的取值与岩石强度、嵌岩深径比和成桩工艺有关。但如前所述,桩径、嵌岩深度及嵌岩深径比对嵌岩段岩石极限侧阻力系数影响并不显著。岩石强度是影响嵌岩段岩石极限侧阻力系数的主要因素。

根据表 2 结果,对 $\sigma_c \leq 5 \text{ MPa}$ 、 $5 \text{ MPa} < \sigma_c \leq 15 \text{ MPa}$ 、 $15 \text{ MPa} < \sigma_c \leq 30 \text{ MPa}$ 和 $30 \text{ MPa} < \sigma_c \leq 60 \text{ MPa}$ 各分组的岩石极限侧阻力系数进行统计分析,结果如表 4。总的规律是岩石强度愈高, ξ_s 愈低。

表 4 不同岩石强度下嵌岩段岩石极限侧阻力系数统计结果
Table 4 Summary of the statistics of ultimate side shear resistance factors for different unconfined compressive strength of rock

统计参数	$\sigma_c \leq 5$	$5 < \sigma_c \leq 15$	$15 < \sigma_c \leq 30$	$30 < \sigma_c \leq 60$	$\sigma_c > 60$
样本量	40	49	23	22	11
最小值	0.110	0.011	0.030	0.006	0.005
均值	0.339	0.144	0.071	0.036	0.016
最大值	0.895	0.373	0.177	0.075	0.035
标准差	0.209	0.080	0.046	0.020	0.010
90%	0.150	0.053	0.032	0.008	0.005
保证率					

图 10 为不同岩石强度分组条件下,嵌岩段岩石极限侧阻力系数的累积分布曲线,其横轴为岩石极限侧阻力系数 ξ_s 值,纵轴为小于某 ξ_s 值数据个数所占的百分比。

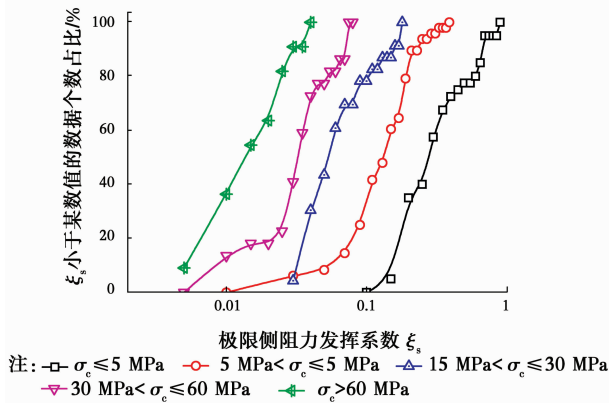


图 10 嵌岩段岩石不同强度下极限侧阻力系数累积分布曲线

Fig. 10 Cumulative distribution of ultimate side shear resistance factors for different unconfined compressive strength of rock

根据图 10 所示的极限侧阻力系数累积分布曲线,得到不同岩石强度条件下,具有给定保证概率的嵌岩段岩石极限侧阻力系数 ξ_s 取值。若以 ξ_s 小于某一数值的数据个数百分比为 90%,则由此确定的 ξ_s 值将具有 90% 的保证概率,结果如表 4 所示。

4 结论

根据不同时期完成的 145 个嵌岩桩承载力试验成果,分析了桩径、嵌岩深度、嵌岩深径比和岩石强度对嵌岩桩嵌岩段桩的极限侧阻力和岩石侧极限阻力系数的影响规律,主要结论如下:

1) 岩石强度是影响岩石极限侧阻力系数的最主要因素,可采用 $\xi_s = 0.436(\sigma_c)^{-0.68}$ 拟合嵌岩段岩石极限侧阻力系数与岩石天然单轴抗压强度之间的关系。嵌岩桩嵌岩段岩石极限侧阻力系数与桩径间无显著相关性。相同岩石条件下,岩石极限侧阻力系数总体上随嵌岩深度增加呈下将趋势,但二者之间相关性不显著。

2) 嵌岩段桩的极限侧阻力总体上随嵌岩深径比增大而减小。嵌岩段岩石极限侧阻力系数与嵌岩深径比间无显著相关性。中国现行桩基规范中,岩石极限侧阻力系数取值与嵌岩深径比相关,且随嵌岩深径比增加而减小,显然并不合理。此外,中国桩基规范对极软岩和软岩的岩石极限侧阻力系数取值总体偏小,而较硬岩和硬岩的取值又总体偏大。

3) 针对岩石天然单轴抗压强度 σ_c 分组 ($\sigma_c \leq 5$

MPa, 5 MPa $< \sigma_c \leq 15$ MPa, 15 MPa $< \sigma_c \leq 30$ MPa, 30 MPa $< \sigma_c \leq 60$ MPa) 所推荐的岩石极限侧阻力系数的均值及具有 90% 保证概率的岩石极限侧阻力系数取值,可作为不同可靠度水平下的工程设计依据。

参考文献:

- [1] 建筑桩基技术规范: JGJ 94—2008 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
Technical code for building pile foundations: JGJ 94-2008 [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2008. (in Chinese)
- [2] 铁路桥涵地基和基础设计规范: TB 10002. 5—2005 [S]. 北京: 中国铁道出版社, 2005.
Code for design on subsoil and foundation of railway bridge and culvert: TB 10002. 5-2005 [S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2005. (in Chinese)
- [3] 公路桥涵地基与基础设计规范: JTG D63—2007 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
Code for design of ground base and foundation of highway bridges and culverts: JTG D63-2007 [S]. Beijing: China Communications Press, 2007. (in Chinese)
- [4] 港口工程桩基规范: JTS 167—4—2012 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2012.
Code for pile foundation of harbor engineering: JTS 167-4-2012 [S]. Beijing: China Communications Press, 2012. (in Chinese)
- [5] AASHTO. Standard specifications for highway bridges [S]. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D. C., 1996.
- [6] 王卫东, 吴江斌, 王向军. 嵌岩桩嵌岩段侧阻和端阻综合系数研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(Sup 2): 289-295.
WANG W D, WU J B, WANG X J. Study of comprehensive coefficient of shaft/tip resistance for rock-socketed piles [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(Sup 2): 289-295. (in Chinese)
- [7] MASON R C. Transmission of high loads to primary foundations by large diameter shafts [C]// Proceedings of ASCE Convention, ASCE, New York, 1960.
- [8] THORBURN S. Large diameter piles founded on bedrock [C]// Symposium on Large Bored Piles, Institution of Civil Engineers, London, 1966: 120-129.
- [9] MATICH M A J, KOZICHI P. Some load tests on drilled cast-in-place concrete caissons [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1967, 4(4): 367-375.
- [10] SEYCHUCK J L. Load tests on bedrock [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1970, 7(4): 464-469.
- [11] OSTERBERG J O, GILL S A. Load transfer

- mechanism for piers socketed in hard soils or rock [C]// Proceedings of 9th Candian Rock Mechanics Symposium, 1973:235-262.
- [12] DAVIS A G. Contribution to discussion IV, rocks. [C]// Proceedings of Cambridge Conference on Settlement of Structure, 1974:757-759.
- [13] BUTTLING S. Estimates of shaft and end loads in piles in chalk using strain gauge instrumentation [J]. Géotechnique, 1976, 26: 133-147.
- [14] ROSENBERG P, JOURNEAUX N L. Friction and end bearing tests on bed-rock for high capacity socket design [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1976, 13 (3): 324-333.
- [15] WEBB D L. The behaviour of bored piles in weathered diabase [J]. Géotechnique, 1976, 26: 63-72.
- [16] WILSON L C. Tests of bored and driven piles in cretaceous mudstone at Port Elizabeth, South Africa [J]. Géotechnique, 1976, 26: 5-12.
- [17] VOGAN R W. Friction and end bearing tests on bedrock for high capacity socket design: Discussion [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1977, 14(1): 156-158.
- [18] PELLIS P J N, DOUGLAS D J, RODWAY B T, et al. Design loadings for foundations on shale and sandstone in the Sydney region [R]. University of Sydney, Sydney, Australia, 1978.
- [19] HORVATH R G, KENNEY T C. Shaft resistance of rock socketed drilled piers [C]// Proceedings on Deep Foundations, ASCE, New York, 1979:182-214.
- [20] JOHNSTON I W, DONALD I B. Final report on rock socket pile tests [R]. Department of Civil Engineering, Monash University, Melbourne, Australia, 1979.
- [21] HORVATH R G, TROW W A, KENNEY T C. Results of tests to determine shaft resistance of rock-socketed drilled piers [C]// Proceedings of International Conference on Structure Foundations on Rock, 1980.
- [22] PELLIS P J N, ROWE R K, TURNER R M. An experimental investigation into side shear for socketed piles in sandstone [C]// Proceedings of International Conference on Structural Foundations Rock, Sydney, 1980.
- [23] THORNE C P. The capacity of piers drilled into rock [C]// Proceedings of International Conference on Structural Foundations on Rock, Sydney, 1980.
- [24] WEBB D L, DAVIES P. Ultimate tensile loads of bored piles socketed into sandstone rock [C] // Proceedings of International Conference on Structural Foundations on Rock, Sydney, 1980.
- [25] WILLIAMS A F. The design and performance of piles socketed into weak rock [D]. Monash University, Melbourne, 1980.
- [26] WILLIAMS A F, ERVINM C. The design and performance of cast-in-situ piles in extensively jointed silurian mudstone [C]//Proceedings of 3rd Australian-New Zealand Conference on Geomechanics, Wellington, 1980.
- [27] WILLIAMS A F, DONALD I B, CHIU H K. Stress distributions in rock socketed piles [C]//Proceedings of International Conference on Structural Foundations on Rock, Sydney, 1980.
- [28] WILLIAMS A F, PELLIS P J N. Side resistance rock sockets in sandstone, mudstone, and shale [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1981, 18(4):502-513.
- [29] HORVATH R G, KENNEY T C, KOZICKI P. Methods of improving the performance of drilled piers in weak rock [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1983, 20(4), 758-772.
- [30] LAM T S K, YAU J H W, PREMCHITT J. Side resistance of a rock-socketed caisson [J]. Hong Kong Engineer, 1991, 2: 17-28.
- [31] MCVAY M C, TOWNSEND F C, WILLIAMS R C. Design of socketed drilled shafts in limestone [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1992, 118(10): 1626-1637.
- [32] LEUNG C F. Case studies of rock-socketed piles[J]. Geotechnical Engineering, 1996, 27: 51-67.
- [33] CARRUBBA P. Skin friction of large-diameter piles socketed into rock [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1997, 34(2): 230-240.
- [34] WALTER D J, BURWASH W J, MONTGOMERY R A. Design of large-diameter drilled shafts for Northumberland Strait bridge project [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1997, 34(4), 580-587.
- [35] GUNNICK B, KIEHNE C. Pile bearing in Burlington limestone [C]// Proceedings of Transportation Conference, 1998: 145-148.
- [36] LONG M. Skin friction for piles socketed in hard rock [C]// Proceedings of the International Conference on Geotechnical and Geological Engineering (GeoEng 2000), Melbourne, Australia, 2000.
- [37] ZHAN C Z, YIN J H. Field static load tests on drilled shaft founded on or socketed into rock [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2000, 37(6): 1283-1294.
- [38] NG C W W, YAU T L Y, LI J H M, et al. Side resistance of larger diameter bored piles socketed into decomposed rocks [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2001, 127 (8):

- 642-657.
- [39] CASTELLI R J, FAN K. O-cell test results for drilled shafts in marl and limestone [C]// Proceedings of International Deep Foundations Congress, 2002; 807-823.
- [40] GORDON B B, HAWK J L, MCCONELL O T. Capacity of drilled shafts for the proposed susquehanna river bridge [C]// Proceedings of ASCE Geosupport Conference, 2004;96-109.
- [41] 工程岩体分级标准:GB/T 50218—2014 [S]. 北京:中国计划出版社,2014.
Standard for engineering classification of rock mass: GB 50021—2001 [S]. Beijing: China Planning Press, 2014. (in Chinese)
- [42] 岩土工程勘察规范:GB 50021—2001 [S]. 北京:中国建筑工业出版社,2009.
Code for investigation of geotechnical engineering: GB 50021—2001 [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2008. (in Chinese)
- [43] 刘金砺. 桩基础设计与计算[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1990:85-95.
LIU J L. Design and calculation of pile foundations [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1990:85-95. (in Chinese)
- [44] ROWE R K, ARMITAGE H H. Theoretical solutions for axial deformation of drilled shafts in rock [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1987, 24(1): 114-125.
- [45] 黄求顺. 嵌岩桩承载力的试验研究[C]//中国建筑学会地基基础学术委员会论文集,太原,山西高校联合出版社,1992: 47-52.
HUANG Q S. Load tests on bearing capacity of rock socketed piles [C]//Proceedings of the Chinese Academy of Architecture Foundation, Taiyuan; Shanxi United University Press, 1992; 47-52. (in Chinese)
- [46] 刘兴远,郑颖人,林文修. 关于嵌岩桩理论研究的几点认识[J]. 岩土工程学报,1998,20(5):118-119.
- LIU X Y, ZHENG Y R, LIN W X. Some understanding on the theories of rock socketed pile foundations [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, 20(5): 118-119. (in Chinese)
- [47] 明可前. 嵌岩桩受力机理分析[J]. 岩土力学,1998,19(1):65-69.
MING K Q. Analysis of bearing mechanism of socketed pile [J]. Rock and Soil Mechanics, 1998, 19(1): 65-69. (in Chinese)
- [48] 许锡宾,周亮,刘涛. 大直径嵌岩桩单桩承载性能的有限元分析[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2010, 29(6): 942-946.
XU X B, ZHOU L, LIU T. Finite element analysis on load-bearing properties of large diameter rock-socketed single pile [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2010, 29(6): 942-946. (in Chinese)
- [49] 张忠苗. 软土地基超长嵌岩桩的受力性状[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(5):552-556.
ZHANG Z M. The endurance of super-long piles in soft soil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(5): 552-556. (in Chinese)
- [50] REESE L C, O'NEILL M W. Drilled shafts: Construction procedures and design methods : Publication No. ADSC-TL-4 [R]. International Association of Foundation Drilling, Federal Highway Administration, Washington, D. C. , 1988.
- [51] ZHANG L, EINSTEIN H H. End bearing capacity of drilled shafts in rock [R]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1998, 124 (7): 574-584.

(编辑 胡玲)