

文章编号: 1007-2993(2026)05-0693-10

破碎基岩建筑桩基承载力理论研究与应用

袁建飞¹ 王鲲鹏² 李胜群^{3,4} 张建伟⁵ 李连祥^{3,4,6} 国睿^{3,4}

(1. 中铁一局集团第五工程有限公司, 陕西宝鸡 712100; 2. 中铁十七局集团第一工程有限公司, 山东青岛 030006;
3. 山东大学土建与水利学院, 山东济南 250061; 4. 山东大学基坑与深基础工程技术研究中心, 山东济南 250061;
5. 山东轨道交通勘察设计院有限公司, 山东济南 250014; 6. 山东高速岩土工程有限公司, 山东济南 250102)

【摘要】 为解决破碎基岩区嵌岩桩设计问题, 通过分析国内两种行业规范嵌岩桩承载力计算方法、计算参数和适用范围, 根据《公路桥涵地基与基础设计规范》计入岩石完整程度的基桩端阻、侧阻发挥系数的思路, 确定了破碎基岩对应的承载力折减比例, 对《建筑桩基技术规范》的嵌岩桩计算系数进行了修正, 获得适于建筑桩基的破碎基岩嵌岩桩承载力计算方法。使用基于修正 Hoek-Brown 准则等效的 Mohr-Coulomb 抗剪强度指标进行有限元模拟, 得到较破碎基岩嵌岩桩单桩极限承载力, 针对不同完整程度持力层建立桩筏基础模型, 分析其承载能力与单桩承载性状。结果表明, 修正后的承载力计算方法具有合理性, 较破碎基岩作为群桩基础的持力层具有较好的承载能力。研究成果应用于济南破碎基岩区某超高层项目的桩基优化设计, 相关成果可供同类工程参考。

【关键词】 破碎基岩; 嵌岩桩; 承载性状; 桩基优化

【中图分类号】 TU473; TU443

【文献标识码】 A

doi: 10.20265/j.cnki.issn.1007-2993.2025-0244

Theoretical study and application of pile foundation bearing capacity of broken bedrock building

YUAN Jianfei¹ WANG Kunyi² LI Shengqun^{3,4} ZHANG Jianwei⁵
LI Lianxiang^{3,4,6} GUO Rui^{3,4}

(1. China Railway First Group Fifth Engineering Co., Ltd., Baoji 712100, Shaanxi, China; 2. China Railway 17th Bureau Group First Engineering Co., Ltd., Qingdao 030006, Shandong, China; 3. School of Civil and Hydraulic Engineering, Shandong University, Jinan 250061, Shandong, China; 4. Foundation Pit and Deep Foundation Engineering Research Center, Shandong University, Jinan 250061, Shandong, China; 5. Shandong Railway Transit Survey and Design Institute Co., Ltd., Jinan 250014, Shandong, China; 6. Shandong High-Speed Geotechnical Engineering Co., Ltd., Jinan 250102, Shandong, China)

【Abstract】 In order to solve the problem of designing embedded piles in fractured bedrock areas, the bearing capacity calculation methods, calculation parameters and application scope of embedded piles used in two domestic codes are analysed. According to the “Code for Design of Foundation and Subgrade of Highway Bridges and Culvert”, the approach to accounting for the bearing capacity factors of end and side resistance of piles considering rock integrity, the method of calculating the bearing capacity of embedded piles with broken bedrock is modified to obtain a method suitable for broken bedrock building. The Mohr-Coulomb parameter based on the modified Hoek-Brown criterion is used to carry out finite element simulations to obtain the ultimate bearing capacity of monopiles with fractured bedrock embedded piles, and to model pile raft foundations with different degrees of integrity and analyse their bearing capacity and monopile bearing properties. The results show that the modified bearing capacity calculation method is scientific and the fractured bedrock still has good bearing capacity as the bearing layer of group pile foundation. The results are applied to the optimal design of pile foundation for a super high-rise project in the fractured bedrock area of Jinan, and the relevant results can be used as reference for similar projects.

【Key words】 broken bedrock; rock-socketed pile; load-bearing properties; pile foundation optimization

0 引言

地质构造及其活动性使得破碎基岩广泛分布。

随着工程建设不断拓展, 桩基成为破碎基岩区高层特别是超高层建筑的重要基础型式^[1-3]。现有建筑桩基

基金项目: 国家自然科学基金项目(51508310); 山东省优秀中青年科学家科研基金项目(BS2013SF024); 济南市科技计划项目(201201145)

作者简介: 袁建飞, 男, 1979 年生, 大学本科, 正高级工程师, 主要从事隧道与桥梁工程施工和技术研究。E-mail: 10368564@qq.com

理论和设计方法^[4-5]仅适用于完整、较完整基岩,不考虑以破碎基岩作为嵌岩桩持力层,工程中往往穿过破碎基岩,向下寻找完整、较完整基岩作为桩端持力层。然而,对于破碎基岩厚度大且分布广泛的地区,嵌岩桩的设计和施工一直面临着极大的困难和挑战。

国内外学者针对完整、较完整岩嵌岩桩承载力理论进行了大量的研究。Serrano等^[6-8]基于 Meyerhof 岩基剪切破坏模型和 Hoek-Brown 破坏准则得到了嵌岩桩侧阻力和端阻力的理论算法;叶观宝等^[9]考虑了桩-岩界面剪胀效应,使用量化的桩-岩界面粗糙度对 Serrano 桩侧阻力算法进行了修正;孟明辉等^[10]根据不同剪切阶段的力学特性建立了完整的桩-岩界面剪切本构方程;赵明华等^[11]根据桩岩界面的摩阻力特性与结构面抗剪强度理论研究了嵌岩桩的荷载传递特性。

以上成果都是基于完整均质岩体得到的,并未考虑岩体完整程度对嵌岩桩承载力的影响,而实际工程中的岩体主要以较完整、较破碎为主,因此开展以破碎基岩作为嵌岩桩基持力层的研究具有理论意义和工程价值。

实际上,对于破碎岩石,由于其内部存在的大量裂隙和节理,桩岩界面更加粗糙,混凝土浆液会渗入裂隙提高桩侧、桩端阻力^[12]。Hoek等^[13]提出反映岩体与岩块破坏时极限主应力关系的 Hoek-Brown 强度准则,由于考虑了岩体质量的影响,适用于破碎岩体以及各向异性非均质岩体,已被大量应用于嵌岩桩研究^[14-16]。同时,针对嵌岩桩侧阻、端阻计算和嵌岩深度的研究也取得明显进展^[17-21]。另一方面,根据经典土力学与桩基工程经验,密实的碎石土、砂土、粉土等均可以作为土层桩基持力层,而破碎基岩相比上述土体具有更好的承载特性。

因此,综合上述成果,在现有完整、较完整基岩桩基承载力理论基础上,基于济南破碎基岩地区某超高层项目的实际工程问题,探索破碎基岩桩基设计方法,研究以破碎基岩为持力层的嵌岩桩承载能力和单桩承载性状,可为同类工程设计提供参考。

1 破碎基岩嵌岩桩承载力设计计算

1.1 现行规范计算方法

(1)《建筑桩基技术规范》

文献[4]规定,桩端置于完整、较完整基岩的嵌岩桩单桩竖向极限承载力,由桩周土总极限侧阻力和嵌岩段总极限阻力组成,按下式计算:

$$Q_{uk} = Q_{sk} + Q_{rk}$$
 (1)

$$Q_{sk} = u \sum q_{sik} l_i$$
 (2)

$$Q_{rk} = \zeta_r f_{rk} A_p$$
 (3)

$$\zeta_r = \zeta_s \frac{4h_r}{d} + \zeta_p$$
 (4)

式中: f_{rk} 为岩石饱和单轴抗压强度标准值; Q_{sk} , Q_{rk} 分别为土总极限侧阻力标准值、嵌岩段极限阻力标准值; q_{sik} 为桩周第 i 层土的极限侧阻力; ζ_r 为嵌岩段侧阻与端阻综合影响系数; ζ_s 为嵌岩段侧阻影响系数; ζ_p 为嵌岩段端阻影响系数,按表1取值。

表 1 嵌岩段侧阻力系数、端阻系数及侧阻和端阻综合系数
Tab. 1 End resistance coefficient and side resistance and end resistance composite coefficient of the embedded rock segment

嵌岩深度比 h_r/d	0	0.5	1	2	3	4	5	6	7	8
极软岩和软岩	ζ_s	0	0.052	0.056	0.056	0.054	0.051	0.048	0.045	0.042
	ζ_p	0.6	0.7	0.73	0.73	0.7	0.66	0.61	0.55	0.48
	ζ_r	0.6	0.8	0.95	1.18	1.35	1.48	1.57	1.63	1.66
较硬岩和坚硬岩	ζ_s	0	0.05	0.052	0.05	0.045	0.04			
	ζ_p	0.45	0.55	0.6	0.5	0.46	0.4			
	ζ_r	0.45	0.65	0.81	0.9	1	1.04			

(2)《公路桥涵地基与基础设计规范》

根据文献[22],支撑在基岩上或嵌入基岩内的钻(挖)孔桩、沉桩的单桩轴向受压承载力容许值 R_a ,可按式(5)计算:

$$R_a = c_1 A_p f_{rk} + c_2 u h_r f_{rk}$$
 (5)

式中: c_1 为根据岩石破碎程度等因素而定的端阻发挥系数,按表2取值; c_2 为根据岩石破碎程度等因素而定的侧阻发挥系数,按表2取值; f_{rk} 为岩石饱和单轴抗压强度标准值。

表 2 嵌岩桩侧阻与端阻发挥系数
Tab. 2 Exertion coefficients of side and end resistance of rock-socketed piles

岩石情况	c_1	c_2
完整、较完整	0.6	0.05
较破碎	0.5	0.04
破碎、极破碎	0.4	0.03

注: ①当嵌岩深度 ≤ 0.5 m 时, c_1 乘以 0.75 的折减系数, $c_2=0$; ②对钻孔桩, 系数 c_1 , c_2 在列表值乘 0.8 使用; ③持力层为中等风化岩石, 系数 c_1 , c_2 在列表值乘 0.75 使用。

1.2 破碎基岩嵌岩桩承载力修正

将式(4)带入式(3)可得

$$Q_{rk} = f_{rk}A_s\zeta_s\frac{4h_r}{d} + \zeta_p f_{rk}A_p \tag{6}$$

将其进行数学变换得

$$Q_{rk} = \zeta_p A_p f_{rk} + \zeta_s u h_r f_{rk} \tag{7}$$

对比式(7)与式(5), 除侧阻和端阻系数的取值存在差异外, 两式中其余计算参数均相同, 即文献 [4] 与文献 [22] 所依据的嵌岩桩承载力计算理论基本一致, 具体异同见表 3。

表 3 不同规范嵌岩桩承载力计算理论对比

Tab. 3 Comparison of the theory of carrying capacity calculation of different specifications of embedded rock piles

计算公式		计算参数	适用条件	侧阻系数	端阻系数
文献[4]	$Q_{rk} = \zeta_p A_p f_{rk} + \zeta_s u h_r f_{rk}$	直径、嵌岩深度、岩石饱和单轴抗压强度、侧阻影响系数、端阻影响系数	持力层为完整、较完整基岩	与岩性、桩身材料、成桩清孔情况有关	与岩性、嵌岩深度、成桩清底情况有关
文献[22]	$R_a = c_1 A_p f_{rk} + c_2 u h_r f_{rk}$	直径、嵌岩深度、岩石饱和单轴抗压强度、侧阻发挥系数、端阻发挥系数	持力层为任意完整程度基岩	与岩石破碎程度、清孔情况、施工工艺、岩石风化程度有关	与岩石破碎程度、清孔情况、施工工艺、岩石风化程度有关

由表 3 可知, 文献 [4] 和文献 [22] 在确定侧阻系数、端阻系数时考虑的因素是不同的, 因此两个公式采用的计算系数是无法互换的, 但式(5)计算的破碎基岩、完整基岩嵌岩桩承载力的比例关系是可以借鉴的。根据式(5)在不同岩石破碎程度下对承载力的折减比例确定适用于式(3)的折减系数, 从而对文献 [4] 的建筑嵌岩桩承载力计算公式进行修正, 扩大其适用范围。

按照式(4)的形式, 用 c_1, c_2 表示出对应的综合系数 c_3 :

$$c_3 = c_1 + c_2 \frac{4h_r}{d} \tag{8}$$

对于较破碎、破碎、极破碎基岩嵌岩桩, 引入折

减系数 C_a :

$$C_a = \frac{c'_3}{c_3} \tag{9}$$

式中: c_3 为完整、较完整岩石对应的综合系数; c'_3 为较破碎、破碎、极破碎岩石对应的综合系数。

综合系数 c_3 的取值主要取决于 c_1, c_2 和嵌岩深径比, 则折减系数 C_a 与嵌岩深径比也相关, 因此需要分别计算不同嵌岩深径比的折减系数。根据表 2 与式(8)、式(9)进行计算, 得到不同嵌岩深径比和不同破碎程度岩石对应的折减系数 C_a (见表 4)。

使用折减系数 C_a 对式(3)进行修正, 得到考虑岩体完整程度的建筑嵌岩桩嵌岩段承载力计算公式:

$$Q_{rk} = C_a \zeta_r f_{rk} A_p \tag{10}$$

表 4 不同嵌岩深径比下的折减系数

Tab. 4 Reduction factor under the depth-diameter ratio of different embedded rocks

嵌岩深径比 h_r/d	0	0.5	1	2	3	4	5	6	7	8
完整、较完整	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
较破碎	0.833	0.829	0.825	0.820	0.817	0.814	0.813	0.811	0.810	0.809
破碎、极破碎	0.667	0.657	0.650	0.640	0.633	0.629	0.625	0.622	0.620	0.618

2 工程背景

2.1 工程概况

某工程位于济南东部, 主体结构为框架核心筒结构, 项目塔楼地上层数为 74 层, 塔楼总高度为 360 m, 基础采用桩基础, 该区域基底岩土构成如表 5 所示。塔楼总荷载约 4000 MN, 核心筒总荷载约 2400 MN, 外框柱荷载约 1600 MN。桩基设计方案采用人工挖孔灌注桩, 选用⑤-3 较完整中等风化石灰岩作为持

力层, 具体参数如表 6 所示。

2.2 工程问题

桩基施工平面图见图 1, 原设计方案以较完整岩石作为持力层, 按照端承桩进行设计, 为满足总承载力要求, 最大设计桩径高达 3 m。由于基底以下破碎基岩厚度大且分布不均, 如按设计桩长施工, 大部分桩无法满足桩端下方 3 倍桩径且不小于 5 m 深度范围内不能存在破碎带和断裂层的规范 [5] 要求, 且已探

式中: D 为爆破破坏和开挖卸荷对节理岩体的扰动程

度; m_i 为完整岩块的 Hoek-Brown 准则常数, 反映岩石的软硬程度。

GSI 值可按 Hoek 提供的经验方法, 根据岩体风化程度和完整程度确定具体数值。但此方法需要观察岩体露头面, 主观性较强, 在桩端持力层基岩的勘察中不具可操作性。波速测试是岩土工程勘察中的常用手段, 夏开宗等^[23] 建立了岩体纵波波速 v_p 与 GSI 值之间的定量关系:

$$c = \frac{\sigma_c [(1+2a)s + (1-a)m_b \sigma_{3n}] (s + m_b \sigma_{3n})^{a-1}}{(1+a)(2+a) \sqrt{1 + [6am_b (s + m_b \sigma_{3n})^{a-1}] / [(1+a)(2+a)]}}$$

(15)

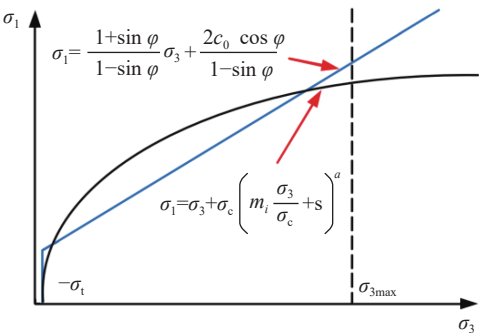


图 2 平面面积等效法
Fig. 2 Plane area equivalence method

其中

$$\sigma_{3n} = \sigma_{3max} / \sigma_c$$

式中: σ_{3max} 为考虑 H-B 准则和 M-C 准则之间关系的约束应力上限。

岩体的弹性模量可用 Hoek^[25] 提供的经验公式估算:

$$E = E_i \left[0.02 + \frac{1 - D/2}{1 + e^{(60+15D-GSI)/11}} \right]$$

(16)

式中: E_i 为完整岩石弹性模量。

3.2 岩土参数

背景项目桩基使用 SD360R 旋挖钻机进行钻孔作业, 使用套挖工艺多次成孔, 不涉及爆破作业, 对岩体扰动较少, 取扰动系数 D 为 0。根据波速测试结果, 应用式(13)分别确定⑤-2 中等风化石灰岩和⑤-3 中等风化石灰岩的 GSI 值。根据表 8 参数, 应用式

$$GSI = 15v_p - 7.5$$

(13)

为了在数值模拟中体现出岩体完整程度, 采用 Hoek-Brown 准则描述破碎基岩的强度特性, 按照图 2 所示的平面面积等效法^[24], 确定等效的 MC 准则抗剪强度指标 c , φ :

$$\varphi = \sin^{-1} \left[\frac{6am_b (s + m_b \sigma_{3n})^{a-1}}{2(1+a)(2+a) + 6am_b (s + m_b \sigma_{3n})^{a-1}} \right]$$

(14)

(12)、式(14)、式(15)和式(16)计算, 得到等效的 MC 准则抗剪强度指标 c 、 φ 和弹性模量 E , 有限元模拟使用的材料参数如表 9 所示。

表 8 持力层岩体参数
Tab. 8 Rock parameters of the bearing layer

编号	GSI	σ_c /MPa	E_i /MPa	m_i	v_p /(m·s ⁻¹)	D
⑤-2	38.73	30	21210	10	3082	0
⑤-3	50.19	45	23565	10	3846	0

3.3 单桩极限承载力

3.3.1 数值模拟方法可靠性验证

为确定破碎基岩嵌岩桩极限承载力, 使用有限元软件 ABAQUS 对不同直径的桩进行数值模拟, 采用荷载增量法模拟桩的极限状态, 得到桩的极限承载力。使用文献^[26] 中离心模型试验数据, 通过有限元模拟回溯其试验结果, 证明有限元模拟方法、本构模型以及相关参数的科学性。保持本构模型与力学模型不变, 只改变模型几何参数与各地层物理参数, 保证数值模拟结果的可靠性。

数值模拟的模型几何尺寸按离心模型试验的几何相似比例尺确定, 即与其原型保持一致, 桩径 5.7 m, 桩长 30 m, 岩土参数如表 10 所示。考虑边界效应的影响, 模型的影响范围取深度为 50 m, 长宽均为 50 m。岩层之间使用绑定约束连接, 桩侧与岩石之间设置接触关系, 法向定义硬接触, 切向定义罚函数, 桩底与岩石之间使用绑定约束连接。在桩顶圆心添加参考点与顶面耦合, 对耦合点施加竖向集中力。采

表 9 数值模拟地层参数
Tab. 9 Numerical simulation of formation parameters

地层编号	岩土层	厚度/m	天然重度/(kN·m ⁻³)	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	膨胀角/(°)	弹性模量/MPa	泊松比
1	⑤-1 强风化石灰岩	3	24.64	100	25	12.5	110	0.27
2	⑤-2 中等风化石灰岩	7	24.92	761	33.2	16.2	3104	0.23
3	⑤-3 中等风化石灰岩	7	24.87	1389	36.9	18.5	7322	0.23

表 10 各岩层物理参数^[26]
Tab. 10 Physical parameters of rock formations^[26]

名称	厚度/m	弹性模量/MPa	泊松比	内摩擦角/(°)	黏聚力/kPa	重度/(kN·m ⁻³)
强风化花岗岩	20	40	0.27	28	47.5	21.0
中等风化花岗岩	20	6500	0.25	35	4000	25.5
微风化花岗岩	10	30000	0.2	45	9000	26.3

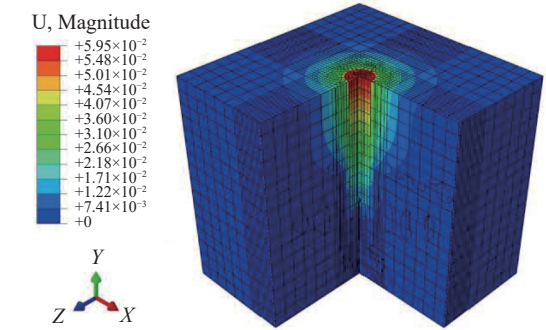
用 C3D8R 单元设置网格属性。共设置 7 级荷载, 每级荷载 100 MN。

嵌岩桩在进行数值模拟的过程中一般不会出现位移突变的现象, 因此以计算程序不收敛、桩端塑性区贯通作为判断嵌岩桩极限状态的标志^[27]。离心试验回溯计算结果如图 3 所示, 由图 3 可知, 在加载至 400 MN 之前, 模拟结果略高于试验结果, 而 400 MN 之后模拟结果略低于试验值, 这是由于在线弹性阶段有限元计算值一般高于试验值, 进入塑性阶段以后有限元计算结果略微降低, 此现象并不影响总体的模拟结果。由于第七级荷载有限元计算程序不收敛, 最大加载至 600 MN 时模型桩达到极限状态, 即其极限承载力为 600 MN, 此时其沉降量为 58 mm。离心模型试验桩加载至 578 MN 时发生破坏, 其极限状态时桩

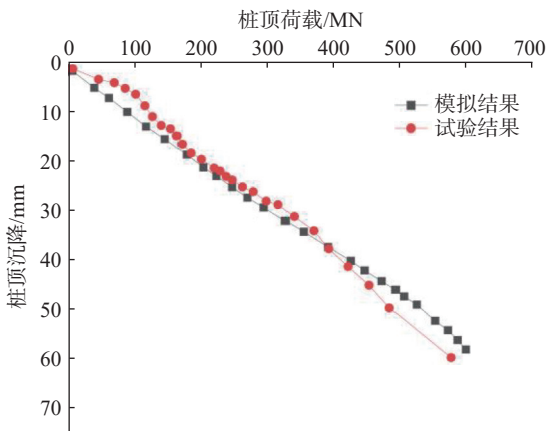
顶沉降量 59 mm。数值模拟的极限承载力比离心模型试验的结果高 22 MN, 考虑到岩土参数的误差与离心试验的误差, 数值模拟结果与离心模型试验的结果较为吻合, 可验证此数值模拟方法的科学性, 因此可使用此模型确定破碎基岩嵌岩桩单桩极限承载力。

3.3.2 单桩竖向承载力数值分析

分别对 2.4、2.8、3.0 m 直径桩建模进行数值模拟, 模型长宽均为 50 m, 桩长 11.5 m, 取桩端以下一倍桩长减少边界效应, 保持各桩嵌岩深径比为 1, 模拟中使用的各地层物理参数如表 9 所示。共设置十级荷载, 每级荷载 20 MN。模型网格划分如图 4 所示, 有限元计算结果如图 5 和表 11 所示。



(a) 极限状态主位移云图



(b) 桩顶荷载位移曲线

图 3 离心试验回溯计算结果
Fig. 3 Backtracking results of centrifugal test

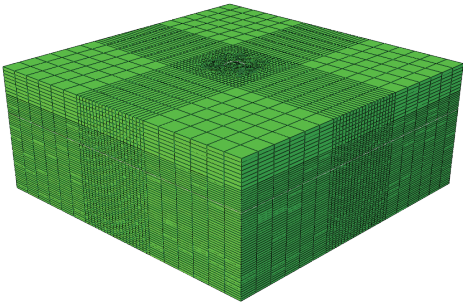


图 4 模型网格划分
Fig. 4 Model grid generation

由图 5(a)可知, 3 m 直径桩桩身压缩量约占桩顶总沉降量的 88%, 桩端岩石压缩量仅为 3.5 mm, 说明桩端岩石的荷载分担比例并不高, 桩侧岩石提供了比较可观的侧阻力, 体现了其端承摩擦桩的承载性状。图 5(c)中不同直径的桩顶荷载-沉降曲线变化规律大致相同, 均未出现明显的位移突增现象, 但从图 5(b)中可以发现桩端与桩侧的岩石均已进入塑性, 且塑性区已贯通, 可以认为其达到了极限状态, 以此时对应的桩顶荷载作为嵌岩桩单桩竖向极限承载力。对比表 11 与表 7, 数值模拟结果与式(10)计算结果基本一致, 证实采用式(10)进行破碎基岩桩基承载力计算的科学性。

3.4 持力层对嵌岩桩群桩影响

采用 Plaxis 3D 软件按照图 1 的桩基布置图分

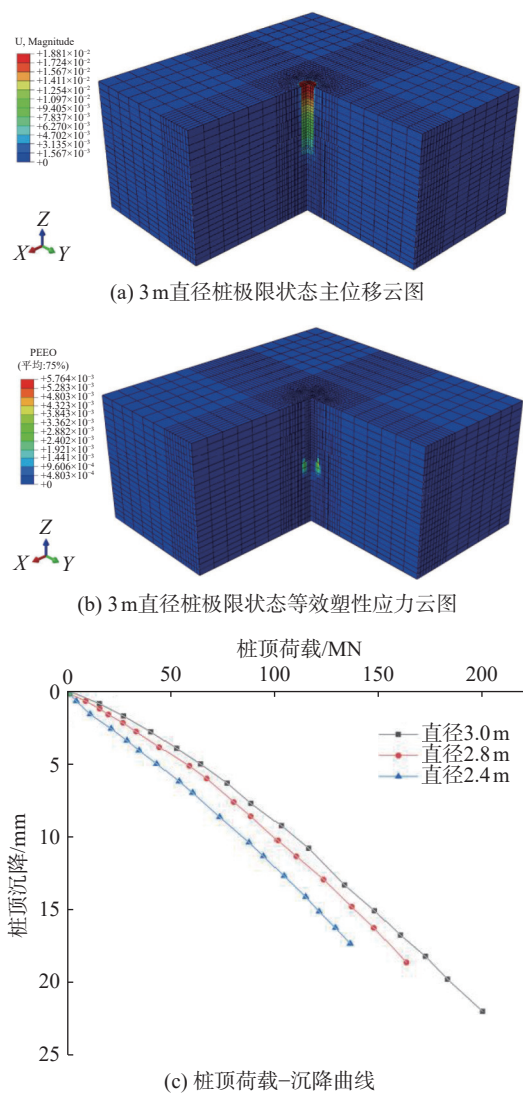


图 5 有限元计算结果
Fig. 5 Result of finite element calculation

表 11 数值模拟计算结果

Tab. 11 Numerical simulation results

桩径/m	极限状态桩顶荷载/MN	极限状态桩顶沉降/mm	承载力特征值/MN
2.4	132	17.48	66
2.8	160	18.85	80
3.0	174	18.81	87

别建立以较破碎岩体和较完整岩体为持力层的桩筏基础有限元模型,持力层基岩采用修正 H-K 准则等效的 MC 准则抗剪强度参数,其余地层、桩身和筏板均使用 MC 模型,岩土参数按表 9 取值。Embedded 桩单元是 Plaxis 3D 特有的一种考虑桩与岩土体间相互作用的线性实体单元,尤其适合对群桩进行模拟。使用 10 m 长的 Embedded 桩单元与 1 m 厚的板单元模拟桩筏基础,为简化模型,外框架桩直径均为 3.0 m,内部核心筒桩直径均为 2.4 m。考虑边界效应的

影响,模型长宽均为 100 m,高为 50 m,有限元模型如图 6 所示。

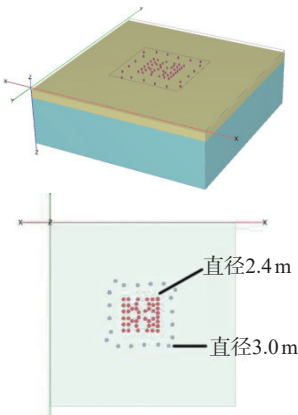


图 6 有限元模型
Fig. 6 Finite element model

采用荷载增量法,对筏板上表面施加合力为 4000 MN 的均布荷载,模拟主体结构传递给桩筏基础的竖向荷载。

背景项目施工中对较破碎基岩进行了注浆加固,可以认为实际工程是以较完整基岩作为持力层的。结合实际工程进度与现场监测数据得到桩筏基础的荷载沉降曲线,并与较完整持力层的数值模拟结果进行对比,如图 7 所示。由于实际施工中的环境影响,现场监测得到的沉降值在不同时期有一定的波动,而有限元模拟中未考虑环境因素的影响,且基础荷载未达到极限状态,因此两条曲线存在一定的差异,但其趋势与终值基本一致,可证明有限元模型的科学性。

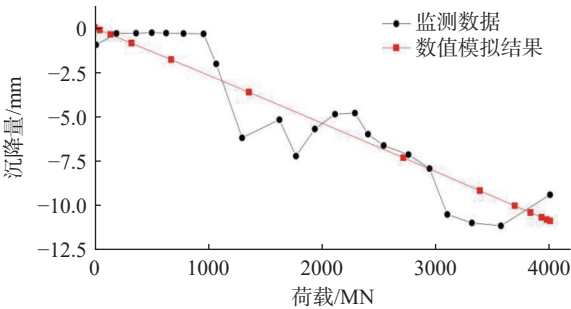


图 7 数值模拟结果与监测结果
Fig. 7 Numerical simulation results and monitoring results

图 8 为使用不同持力层的桩筏基础模型有限元计算结果,较破碎基岩持力层的最大基础沉降为 14.2 mm,与较完整基岩持力层相比,基础沉降增加了 2.3 mm,但仍满足设计要求。两种持力层的荷载沉降曲线都近似为一条直线,未出现明显的拐点,表明整体地基在实际竖向荷载作用下处于弹性状态,所受荷载大小远未达到极限状态,较破碎基岩与较完整基岩都具有良好的承载能力。

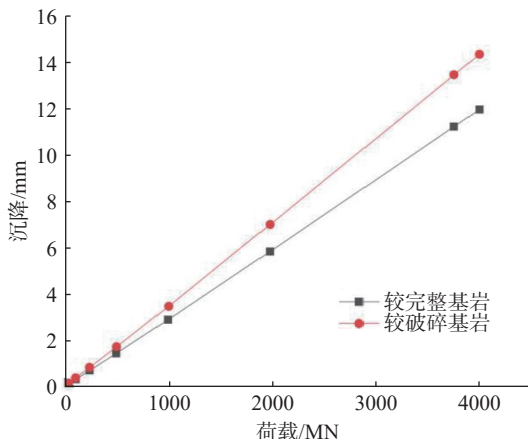


图8 不同持力层群桩荷载沉降曲线

Fig. 8 Settlement curves for group pile loads at different bearing levels

图9为群桩状态下不同持力层的单桩轴力沿深度的分布情况,两种持力层的嵌岩桩单桩竖向荷载是一致的,但其桩身轴力分布存在一定的差异。在0~7 m深度范围内较完整基岩桩身轴力小于较破碎基岩,7~10 m深度范围内较完整基岩桩身轴力大于较破碎基岩,且2.4 m直径桩与3.0 m直径桩都表现出此现象,表明持力层岩体的完整程度对嵌岩桩的承载性状有一定的影响。较破碎基岩嵌岩桩的孔壁更加粗糙,嵌岩段桩身混凝土与桩周岩体结合更为紧密,桩身侧阻分担比例更大,表现出更明显的端承摩擦桩承载性状。尽管较破碎基岩的岩体质量差于较完整基岩,但正常使用的荷载条件下不会到达其极限状态,其更高的侧摩阻力为嵌岩桩的总承载能力提供了保障,可用作嵌岩桩持力层。

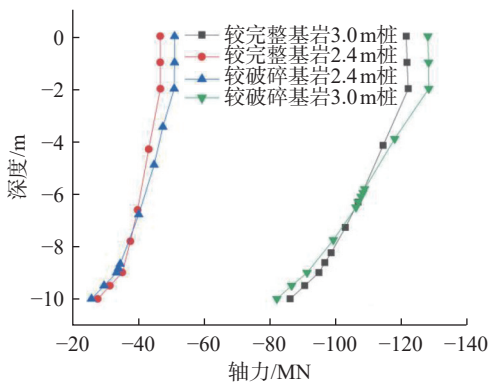


图9 桩身轴力沿深度的分布

Fig. 9 Distribution of pile shaft forces along depth

4 结论与讨论

4.1 结论

(1)根据《公路桥涵地基与基础设计规范》计入岩石完整程度的桩基端阻、侧阻发挥系数的思路,确定了破碎基岩对应的承载力折减比例,对《建筑桩基

技术规范》的嵌岩桩计算系数进行了修正,获得适于建筑桩基的破碎基岩嵌岩桩承载力计算方法。

(2)采用 H-B 准则等效的 MC 模型抗剪强度指标用以体现岩体完整程度的影响,对破碎基岩嵌岩桩极限承载力进行数值模拟,结果表明以较破碎基岩为持力层的嵌岩桩仍有可观的承载能力。

(3)根据背景项目的桩筏基础设计方案建立有限元模型,研究了群桩状态下持力层基岩完整程度对群桩沉降和单桩承载性状的影响,验证了以较破碎基岩作为嵌岩桩持力层的可行性。

4.2 讨论

(1)本文岩体修正方法在极破碎基岩中的适用性还有待验证,后续应结合实际工程开展不同破碎程度基岩作为桩端持力层的研究和探讨。

(2)破碎基岩是“岩”,通常情况下比土具有更优的承载能力。良好土质地基均可以作为桩基持力层,通过类比可知整体稳定的破碎基岩亦可作为良好的桩基持力层。希望通过研究和工程实践更新观念,突破基岩地区桩端岩体完整程度的限制,以服务桩基工程高质量发展。

参考文献

- [1] LIU X Y, BAI X Y, ZHANG M Y, et al. Load-bearing characteristics of large-diameter rock-socketed piles based on ultimate load tests[J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2020, 2020: 6075607.
- [2] ELHAKIM A F. Capacity of axially loaded bored cast-in-place piles socketed in Dubai limestone[J]. *Innovative Infrastructure Solutions*, 2022, 7(4): 257.
- [3] GANDHI S R. Observations on pile design and construction practices in India[J]. *Indian Geotechnical Journal*, 2016, 46(1): 1-15.
- [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑桩基技术规范: JGJ 94—2008[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008. (Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical code for building pile foundations: JGJ 94—2008[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008. (in Chinese))
- [5] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑地基基础设计规范: GB 50007—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012. (Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of building foundation: GB 50007—2011[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012. (in Chinese))

- [6] SERRANO A, OLALLA C, GALINDO R A. Ultimate bearing capacity at the tip of a pile in rock based on the modified Hoek-Brown criterion[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2014, 71: 83-90.
- [7] SERRANO A, OLALLA C. Shaft resistance of a pile embedded in rock[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2004, 41(1): 21-35.
- [8] SERRANO A, OLALLA C. Ultimate bearing capacity at the tip of a pile in rock—part 1: theory[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2002, 39(7): 833-846.
- [9] 叶观宝, 孟明辉, 邢皓枫, 等. 耦合结构面剪胀的嵌岩桩侧摩阻力分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(5): 909-916. (YE G B, MENG M H, XING H F, et al. Side friction analysis of rock-socketed pile considering dilatancy of structural plane[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, 32(5): 909-916. (in Chinese))
- [10] 孟明辉, 邢皓枫, 刘之葵, 等. 基于桩侧阻力强化效应的嵌岩桩承载力计算 [J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(S1): 2925-2933. (MENG M H, XING H F, LIU Z K, et al. Calculation of bearing capacity of rock-socketed pile based on enhanced effect of skin friction[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, 32(S1): 2925-2933. (in Chinese))
- [11] 赵明华, 雷 勇, 刘晓明. 基于桩-岩结构面特性的嵌岩桩荷载传递分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(1): 103-110. (ZHAO M H, LEI Y, LIU X M. Analysis of load transfer of rock-socketed piles based on characteristics of pile-rock structural plane[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(1): 103-110. (in Chinese))
- [12] 王田龙, 黄质宏, 帅海乐, 等. 嵌岩桩及较破碎岩石地基灌注桩承载性状探讨 [J]. 贵州大学学报 (自然科学版), 2019, 36(5): 106-110. (WANG T L, HUANG Z H, SHUAI H L, et al. The study of the bearing capacity of the rock-socketed pile and cast-in-situ pile in less-fragmentized rock pile foundation[J]. *Journal of Guizhou University (Natural Sciences)*, 2019, 36(5): 106-110. (in Chinese))
- [13] HOEK E, BROWN E T. The Hoek-Brown failure criterion and GSI-2018 edition[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2019, 11(3): 445-463.
- [14] XU J, DAI G L, GONG W M. Elastoplastic analysis of normal stiffness of bore wall of the rock-socketed pile based on Hoek-Brown failure criterion and cavity expansion theory[J]. *Japanese Geotechnical Society Special Publication*, 2020, 8(7): 239-244.
- [15] JAFARI M, GHARSALLAOUI H, VICTOR K H, et al. End bearing response of open-ended pipe piles embedded in rock[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2019, 119: 46-57.
- [16] 戴国亮, 龚维明, 陈 隆. 基于 Hoek-Brown 准则嵌岩段桩-岩侧阻力修正计算方法 [J]. 岩土工程学报, 2012, 34(9): 1746-1752. (DAI G L, GONG W M, CHEN L. Modified method for shaft resistance of rock-socketed piles based on Hoek-Brown criterion[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, 34(9): 1746-1752. (in Chinese))
- [17] DAI G L, SALGADO R, ASCE F, et al. The effect of sidewall roughness on the shaft resistance of rock-socketed piles[J]. *Acta Geotechnica*, 2017, 12(2): 429-440.
- [18] ALNUAIM A M, HAMID W M, ALSHENAWY A O. Investigation of the factors affecting the ultimate bearing capacity of bridge piles in limestone with a calibrated 3D FEM[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2021, 14(5): 372.
- [19] 邢皓枫, 孟明辉, 罗 勇, 等. 软岩嵌岩桩荷载传递机理及其破坏特征 [J]. 岩土工程学报, 2011, 33(S2): 355-361. (XING H F, MENG M H, LUO Y, et al. Load transfer mechanism and failure characteristics of piles embedded in soft rock[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, 33(S2): 355-361. (in Chinese))
- [20] 董 平, 秦 然, 陈 乾, 等. 大直径人工挖孔嵌岩桩的承载性状 [J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(12): 2099-2103. (DONG P, QIN R, CHEN Q, et al. Bearing behavior of large-diameter rock-socket piles[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(12): 2099-2103. (in Chinese))
- [21] 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(S2): 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(S2): 289-295. (in Chinese))
- [22] 中华人民共和国交通运输部. 公路桥涵地基与基础设计规范: JTG 3363—2019[S]. 北京: 人民交通出版社, 2019. (The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. Specifications for design of foundation of highway bridges and culverts: JTG 3363—2019[S]. Beijing: Publishing House of People's Transportation, 2019. (in Chinese))
- [23] 夏开宗, 陈从新, 刘秀敏, 等. 基于岩体波速的 Hoek-Brown 准则预测岩体力学参数方法及工程应用 [J]. 岩

- 石力学与工程学报, 2013, 32(7): 1458-1466. (XIA K Z, CHEN C X, LIU X M, et al. Estimation of rock mass mechanical parameters based on ultrasonic velocity of rock mass and Hoek-Brown criterion and its application to engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(7): 1458-1466. (in Chinese))
- [24] 吴顺川, 张 敏, 张诗淮, 等. 修正 Hoek-Brown 准则的等效 Mohr-Coulomb 强度参数确定方法研究 [J]. 岩土力学, 2019, 40(11): 4165-4177. (WU S C, ZHANG M, ZHANG S H, et al. Study on determination method of equivalent Mohr-Coulomb strength parameters of a modified Hoek-Brown failure criterion[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(11): 4165-4177. (in Chinese))
- [25] HOEK E, DIEDERICHS M S. Empirical estimation of rock mass modulus[J]. [International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences](#), 2006, 43(2): 203-215.
- [26] 徐 薇. 深圳平安大厦超大直径扩底嵌岩桩竖向承载力机理研究 [D]. 北京: 中国矿业大学 (北京), 2015. (XU W. Research of vertical bearing capacity of rock socketed mega diameter drilled shaft with belled bottom of Shenzhen Ping An center[D]. Beijing: China University of Mining & Technology (Beijing), 2015. (in Chinese))
- [27] 史曼曼, 王 成, 郑颖人, 等. 嵌岩桩破坏模式有限元极限分析 [J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(2): 340-346. (SHI M M, WANG C, ZHENG Y R, et al. FEM limit analysis for failure mode of rock-socketed pile[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014, 10(2): 340-346. (in Chinese))

收稿日期: 2025-06-04