

侏罗系中等风化泥岩地基承载力试验研究

陈继彬, 李雪梅, 罗益斌, 冯世清, 王媛媛

A study of bearing capacity of the Jurassic moderately-weathered mudstone foundation

CHEN Jibin, LI Xuemei, LUO Yibin, FENG Shiqing, and WANG Yuanyuan

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202207002>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

鄂尔多斯高原湖泊蒸发原位试验研究

Research on in-situ test of lake evaporation in the Ordos Plateau

许文豪, 王晓勇, 张俊, 尹立河, 贾伍慧, 朱立峰, 董佳秋, 孙芳强 水文地质工程地质. 2019, 46(5): 16-23

自反力双剪面大型剪切仪研发及应用研究

Application and research on large in-situ self-reacting direct shear apparatus owning two shear interfaces

龚辉, 郭娜娜, 葛邦云 水文地质工程地质. 2021, 48(5): 168-175

斜坡浅埋水平条形锚板抗拔承载力的极限分析

A limit analysis of the ultimate pullout capacity of a shallow horizontal strip anchor plate embedded in slope

黄明华, 李盾, 李嘉成 水文地质工程地质. 2019, 46(1): 116-116

红层泥岩三轴膨胀力的试验研究

An experimental study of the triaxial expansion force of red-bed mudstone

郭永春, 赵峰先, 闫圣龙, 刘家志 水文地质工程地质. 2022, 49(3): 87-93

玄武岩纤维加筋黄土承载比试验研究

An experimental study of the California bearing ratio of basalt fiber reinforced loess

李沛达, 骆亚生, 陈箐芮, 汪国刚 水文地质工程地质. 2021, 48(1): 131-137

基于接力排水的强夯法在滨海回填区地基处理中的试验研究

An experimental study of the dynamic compaction method based on relay drainage in foundation treatment of the coastal backfill area

张军舰, 李鹏, 殷坤宇, 罗玉磊, 郭幔 水文地质工程地质. 2022, 49(1): 117-125



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202207002

陈继彬, 李雪梅, 罗益斌, 等. 侏罗系中等风化泥岩地基承载力试验研究 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(2): 103-111.
CHEN Jibin, LI Xuemei, LUO Yibin, *et al.* A study of bearing capacity of the Jurassic moderately-weathered mudstone foundation[J].
Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(2): 103-111.

侏罗系中等风化泥岩地基承载力试验研究

陈继彬¹, 李雪梅², 罗益斌¹, 冯世清¹, 王媛媛¹

(1. 中国建筑西南勘察设计研究院有限公司, 四川 成都 610052;
2. 四川建筑职业技术学院土木工程系, 四川 德阳 618000)

摘要: 成都地区侏罗系中等风化泥岩为典型的红层软岩, 工程实践表明该类岩体地基承载力的规范建议值偏低, 导致该区域内高层、超高层建筑基础选型偏于保守, 使得工程成本投入大、目标工期长, 如何最大程度的发挥侏罗系中等风化泥岩地基承载能力还没有值得借鉴的方法。以成都地区某超高层建筑地基基础工程为例, 针对侏罗系中等风化泥岩地基分别开展了 9 组深井平硐岩基载荷试验、17 孔岩基旁压试验, 利用两类试验协同分析泥岩地基承载能力及适宜的承载力特征值取值, 并建立了地基承载力特征值与超声波测井试验获得的岩体特征参数的相关方程。研究表明: 侏罗系中等风化泥岩地区, 岩基平板载荷试验、旁压试验所得的地基承载力特征值相近且均较《成都地区建筑地基基础设计规范》(DB51/T 5026—2001) 建议最大值大 2.0~2.5 倍; 平板载荷试验的承压板直径、旁压试验的测试深度对中等风化泥岩地基承载力影响不显著; 通过参数综合分析, 进一步得出地基承载力特征值与岩体波速和岩体完整性指数分别呈幂函数、指数函数递增关系。研究成果对侏罗系中等风化泥岩地基承载力的取值具有重要的参考价值。

关键词: 侏罗系; 中等风化泥岩; 地基承载力; 原位试验; 岩体特征参数

中图分类号: TU459

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2023)02-0103-09

A study of bearing capacity of the Jurassic moderately-weathered mudstone foundation

CHEN Jibin¹, LI Xuemei², LUO Yibin¹, FENG Shiqing¹, WANG Yuanyuan¹

(1. *China Southwest Geotechnical Investigation & Design Institute Co. Ltd., Chengdu, Sichuan 610052, China;*
2. *Department of Civil Engineering, Sichuan Vocational and Technical College of Architecture, Deyang, Sichuan 618000, China*)

Abstract: The Jurassic moderately-weathered mudstone in the Chengdu area is a typical red bed soft rock. Engineering practice shows that the standard recommended value of bearing capacity of the Jurassic moderately-weathered mudstone foundation in the Chengdu area is low, which leads to conservative foundation selection of high-rise and super high-rise buildings in this area, resulting in large project cost and long target construction period. However, there is no method to maximize the bearing capacity of the Jurassic moderately-weathered mudstone foundation. In this study, the foundation project of a super high-rise building in Chengdu is taken as an example, and 9 groups of deep well adit rock foundation load tests and 17 hole rock foundation side pressure tests

收稿日期: 2022-07-01; 修订日期: 2022-08-24

投稿网址: www.swdzgcdz.com

基金项目: 中国建筑股份科技研发课题青年基金项目(CSCEC-2021-Q-64); 中建西勘院课题(2007714)

第一作者: 陈继彬(1987-), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事岩土工程、城市特殊岩土方面的研究工作。Email: weizhishuiyu@163.com

通讯作者: 李雪梅(1989-), 女, 硕士, 讲师, 主要从事水利水电工程方面的研究工作。Email: 766420017@qq.com

are carried out, respectively, for the Jurassic moderately-weathered mudstone foundation to analyze the bearing capacity of the mudstone foundation and the appropriate value of bearing capacity characteristic. The correlation equation between the characteristic value of foundation bearing capacity and the characteristic parameters of rock mass obtained by ultrasonic logging test is established. The research results show that in the Jurassic moderately-weathered mudstone area, the characteristic value of the foundation bearing capacity obtained from the plate load test and the side pressure test of the rock foundation are similar and are 2–2.5 times larger than the maximum value recommended by the regional code DB51/T 5026—2001. The diameter of the bearing plate of the plate load test and the test depth of the side pressure test have no significant impact on the bearing capacity of the moderately-weathered mudstone foundation. Comprehensive analyses of parameters indicate that the characteristic value of the foundation bearing capacity has power and exponential increasing relationship with wave velocity of rock mass and integrity index of rock mass, respectively. The research results are of important reference value for the bearing capacity of the Jurassic moderately-weathered mudstone foundation.

Keywords: Jurassic; moderately weathered mudstone; foundation bearing capacity; in-situ test; characteristic parameters of rock

成渝地区红层软岩分布较为广泛,约占全国总面积的 3%,是我国软岩分布比例最多的地区^[1-2]。成都地区上侏罗统蓬莱镇组(J_{3p})泥岩主要分布在成都天府新区高楼山—秦皇寺中央商务区—倒石桥一带,该区域在建、拟建的高层—超高层建筑达数十座,约 70% 以上建筑的基础持力层为 J_{3p} 泥岩。研究该类红层软岩地基的承载能力,对区域建筑地基基础设计施工具有重要的指导意义。

红层泥岩的工程性质较差,严重影响工程建设^[3-4]。对于此类岩体,工程中地基承载力特征值一般依据《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011)^[5]和《工程岩体试验方法标准》(GB/T 50266—2013)^[6]建议的室内岩石单轴抗压强度试验折减法进行取值,但其折减系数范围大且来源模糊,无法反应岩体所处的实际地应力环境和岩体工程特性,得到的建议值偏低。江苏^[7]、广东^[8]等省在实践中逐渐修正了《工程岩体试验方法标准》(GB/T 50266—2013)中对软岩地基承载力的取值建议,提出了岩石单轴抗压强度分区所对应的折减系数范围及承载力;长沙、兰州等地通过岩基载荷试验、点荷载试验探讨了影响地基承载力取值的因素^[9-11],指出确定地基承载力时应考虑岩体的物理力学性质^[12-14]、成因^[15]、地下水^[16-17]、沉积特征^[18]等因素。很多学者对长期荷载作用下泥岩蠕变特性^[19-20]、超常荷载作用下泥岩损伤特性^[21]、泥岩地基桩基础受荷破坏特性^[22]等开展剪切蠕变试验和静载荷试验,揭示了泥岩地基的蠕变特性及其承载破坏机理,将由承载力不足导致的岩基破坏模式划分为剪切破坏和冲

切破坏^[23-24],并提出岩石地基在剪切破坏模式下的 Hoek-Brown 岩基承载力修正公式^[25]和软岩地基承载力的深宽修正公式^[26-27]。《成都地区建筑地基基础设计规范》(DB51/T 5026—2001)^[28]建议中等风化泥岩地基承载力标准值为 500~1 000 kPa,也可根据室内天然单轴抗压强度折减法确定地基承载力。工程实践表明现有的规范条文存在两方面不足:一方面,建议的承载力取值偏低;另一方面,折减法确定承载力合宜性差,折减系数的取值无既定条款可循。在成都地区,更为合理的承载力取值研究至今鲜有突破。

为此,以成都地区某超高层建筑地基基础工程为例,在场内地开展载荷试验和旁压试验,探究侏罗系中等风化泥岩地基承载能力;然后通过参数综合分析,建立承载力特征值与超声波测井试验获得的岩体特征参数的相关方程,探寻一种快速、经济估算承载力的方法,以为侏罗系中等风化泥岩地基承载力的取值提供参考。

1 研究区泥岩基本特征

拟建项目周边地貌平坦,建筑场地地表高程为 487.40~488.45 m,建筑项目超塔结构高度约 460 m,地上 95 层,基础设计埋深约为-30.0 m(高程 456.65 m),基础底板持力层为 J_{3p} 中等风化泥岩。

研究区 J_{3p} 中等风化泥岩(图 1)岩体较完整,质量等级为 IV~V 级。节理产状主要分为两大组:第一组平均节理走向 53°、倾角 84°;第二组平均节理走向 332°、倾角 81°,结构面结合差一极差。岩体中石英的

质量分数偏高, 在 29% ~ 46% 之间; 斜长石质量分数在 9% ~ 15% 之间; 方解石质量分数在 11% ~ 21% 之间; 钾长石质量分数在 1% ~ 4% 之间; 白云石质量分数在 3% ~ 5% 之间; 黏土质量分数在 17% ~ 47% 之间。岩体物理力学参数列于表 1。



图 1 研究区中等风化泥岩岩样

Fig. 1 Borer sample of moderately-weathered mudstone

表 1 岩体物理力学参数 (天然状态)

Table 1 Physical and mechanical properties of rock

参数	统计样本数/个	最大值	最小值	平均值
天然密度/(g·cm ⁻³)	141	2.62	2.30	2.48
单轴抗压强度/MPa	51	9.67	2.71	6.00
黏聚力/MPa	28	1.2	0.4	0.8
内摩擦角/(°)	28	40.1	33.7	37.9

2 试验方案

在场地开挖 3 口试验深井和预钻 17 孔试验钻孔, 分别开展 9 组深井平硐内岩基载荷试验、17 孔钻孔内软岩旁压试验, 试验位置如图 2 所示。

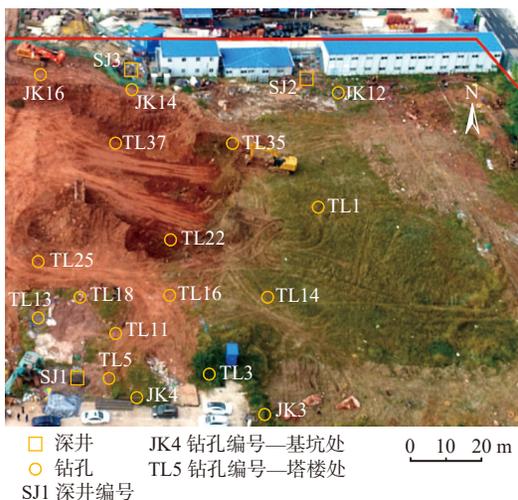


图 2 试验场地深井、钻孔位置图

Fig. 2 Location map of deep shaft and borehole at the test site

2.1 承压板载荷试验

3 口深井编号依次为 SJ1、SJ2、SJ3, 深井底即为

目标试验层——侏罗系中等风化泥岩, 高程为 447.57 ~ 459.06 m, 井深 29 ~ 30 m。在井底一侧开挖 2 m(长)×2 m(宽)×8 m(深)的平硐, 如图 3(a)所示。每个平硐内分别开展 3 组共 9 个岩基平板载荷试验, 载荷板直径分别为 300, 500, 800 mm, 试验所需仪器、设备的选取参考《工程岩体试验方法标准》(GB/T 50266—2013)^[6] 建议。试验加载方法为慢速维持加载法, 加载等级按照预估地基承载力极限值分为 8 ~ 12 级加载, 当达到标准所规定的停载标准(或 24 h 连续变形不稳定或前后级变化倍数超 5 倍或试验点失稳破坏)时即停止试验, 试验过程通过承压板四周的 4 支百分表量测位移, 见图 3(b)。试验结束后绘制荷载-位移(lgp-s)曲线, 地基承载力特征值(f_{ak})按《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011)^[5] 建议方法确定。



(a) 试验平硐



(b) 位移百分表布置示意图

图 3 岩基平板载荷试验

Fig. 3 Photos of bearing plate tests

2.2 旁压试验

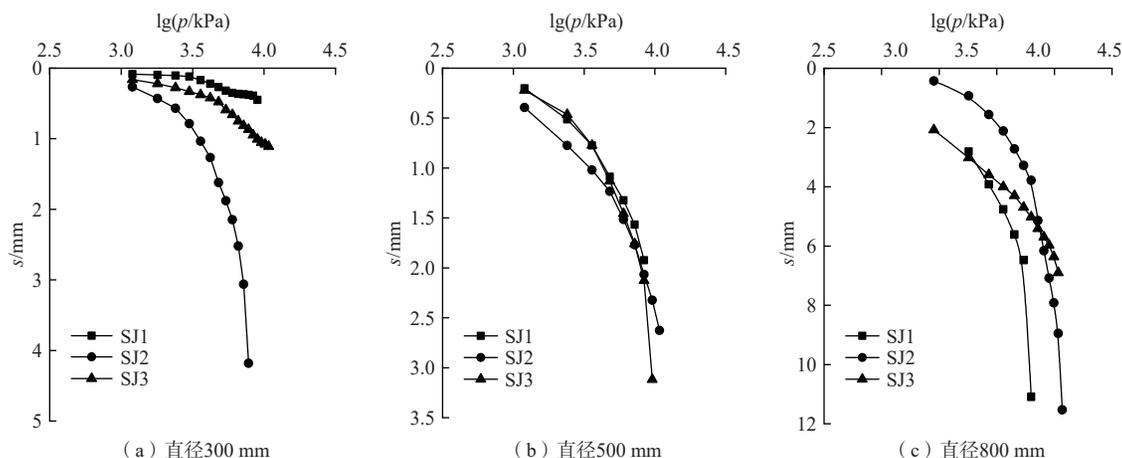
旁压试验设备为超高压旁压仪(图 4), 仪器结构为单腔式, 测量腔长度为 400 mm, 公称直径 90 mm, 工作压力可达到 20 MPa, 试验操作流程参照《地基旁压试验技术标准》(JGJ/T 69—2019)^[29] 和《高层建筑岩土工程勘察标准》(JGJ/T 72—2017)^[30], 并根据岩体特性略有调整, 设定加载等级为每级 300 kPa, 加压等级一般为 8 ~ 10 级, 每级稳压 1 min 后, 继续加载, 如遇下列情况之一时停止试验: 1) 泵出体积达到极限体积 (1 000 mL) 或达到旁压设备极限压力 (20 MPa); 2) 体

积变化明显加快,不能稳压;3)前后两级荷载变形量差值差异为 5 倍。试验结束后绘制旁压荷载(P)-体积变形量(V)曲线, f_{ak} 按《地基旁压试验技术标准》(JGJ/T 69—2019)^[29]确定。



图 4 旁压试验过程照片

Fig. 4 Photos of pressuremeter tests



(a) 直径300 mm

(b) 直径500 mm

(c) 直径800 mm

图 5 岩地基荷载-位移曲线

Fig. 5 $lgp-s$ curves

(1)荷载越大,岩基变形越大,两者为双曲线递增关系;

(2)以 SJ2 深井平洞内荷载板直径 300 mm 试验结果为例进行分析,该试验加载至 7 800 kPa 时百分表读数持续增加且 24 h 内不能稳定,累计变形量为 4.182 mm,见图 5(a)。加载过程中同步记录试验点岩体裂缝发生扩展情况,发现:荷载板外发育数条裂缝,与荷载板环向近似垂直,延伸长度约 2.0~3.5 cm,张开 0.2~0.5 mm。试验结束后,移除承压板观察试验岩面,发现岩体挤压破碎严重,破碎形态呈不规则多边形,具有沿着岩体原生裂缝破坏的特征。试验过程及破碎岩体现场照片见图 6。

表 2 载荷试验结果对比
Table 2 Comparison of load test results

深井编号 (高程)	承压板直径 /mm	原位试验			f_{ak} /kPa	岩体完整性 指数	
		最大加载量/kPa	比例界限(极限荷载/3) 荷载/kPa	裂缝情况 /kPa			
SJ1 (459.06 m)	300	9 000	3 000	2 400	无	2 400	0.46
	500	9 600	2 400	2 400	无	2 400	0.46
	800	6 300	2 700	2 300	有	2 300	0.43
SJ2 (451.15 m)	300	7 800	2 400	2 100	有	2 100	0.39
	500	10 800	2 400	2 000	无	2 000	0.39
	800	11 700	2 700	2 100	有	2 100	0.39
SJ3 (447.54 m)	300	11 800	3 600	2 800	有	2 800	0.49
	500	9 600	3 000	3 000	有	3 000	0.50
	800	10 800	3 600	2 700	无	2 700	0.43

3 试验结果

3.1 岩基平板载荷试验

载荷试验结果如表 2 所示,根据试验绘制的 $lgp-s$ 曲线如图 5 所示。从图 5 中可见:

(3) SJ2 深井平洞内直径 300 mm 载荷试验结果显示,比例界限荷载(f_{cr})为 2 400 kPa,极限荷载(f_{cu})为 6 300 Pa。 $f_{ak}=\min(f_{cr}, f_{cu}/3)=2 100$ kPa。其他点位试验结果见表 2。

3.2 旁压试验

在场地 17 口钻孔内进行了旁压试验,其中,钻孔 TL5、JK12、JK14 紧邻 SJ1、SJ2、SJ3,作为对比钻孔。旁压试验典型成果图见图 7(以 TL5 钻孔为例),并采用式(1)计算 f_{ak} ,即:

$$f_{ak} = P_f - P_0 \quad (1)$$

式中: P_f ——临塑压力/kPa;

P_0 ——初始水平压力/kPa。

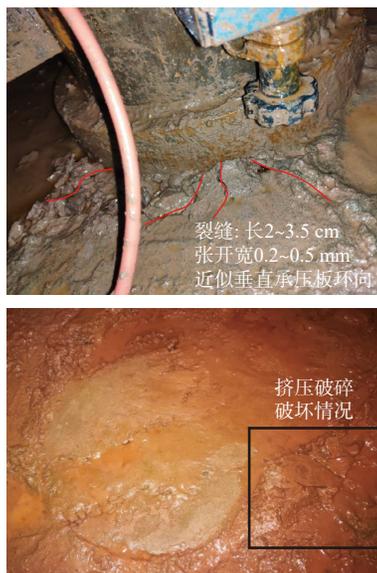
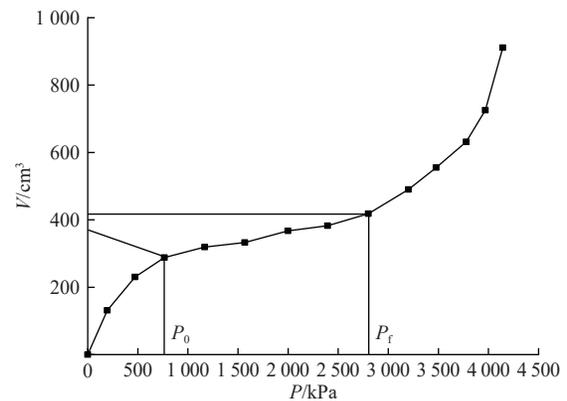


图 6 试验岩体裂缝照片

Fig. 6 Photo of crack deformation

图 7 P - V 曲线 (TL5, 测深 28 m)Fig. 7 P - V curve (TL5, Depth 28 m)

从图 7 中可以看出, 该测孔的 P_f 和 P_0 分别为 2 828.4 kPa 和 475.6 kPa, 因此 f_{ak} 为 2 352.8 kPa。其他测孔的旁压结果见表 3。

表 3 旁压试验结果统计

Table 3 Results of pressuremeter tests

钻孔编号	测试深度/m	P_f /kPa	P_0 /kPa	f_{ak} /kPa	钻孔波速/($m \cdot s^{-1}$)	岩体完整性指数
JK4	28.5	3 002.4	625.2	2 377.2	2 465.0	0.380
JK3	21.0	1 399.5	350.0	1 049.5	1 873.0	0.231
JK10	20.0	1 294.2	310.5	983.7	2 023.0	0.256
JK12	13.0	1 495.5	311.2	1 184.3	2 160.0	0.292
JK12	20.0	2 670.0	698.5	1 971.5	2 204.0	0.304
JK14	28.0	3 753.0	850.6	2 902.4	2 912.0	0.507
TL1	26.5	3 790.2	849.6	2 940.6	2 445.0	0.414
TL3	18.5	4 085.1	1 120.3	2 964.8	2 754.0	0.530
TL5	28.0	2 828.4	475.6	2 352.8	2 542.0	0.447
TL11	20.5	3 715.9	850.6	2 865.3	3 013.0	0.469
TL13	16.5	3 342.3	942.3	2 400.0	2 555.0	0.452
TL13	23.0	2 209.1	487.2	1 721.9	2 241.0	0.348
TL14	17.5	2 300.5	422.1	1 878.4	2 613.0	0.473
TL16	14.5	2 489.0	475.6	2 013.4	2 178.0	0.296
TL16	20.5	2 737.9	475.6	2 262.3	2 824.0	0.498
TL18	23.0	2 590.6	432.2	2 158.4	2 523.0	0.441
TL22	23.0	2 856.7	511.2	2 345.5	2 930.0	0.415
TL25	24.5	2 707.0	530.1	2 176.9	2 347.0	0.381
TL25	26.0	4 773.5	681.2	4 092.3	3 094.0	0.663
TL35	23.0	3 032.5	625.2	2 407.3	2 659.0	0.490
TL37	18.0	2 494.4	550.0	1 944.4	2 690.0	0.501

表 3 中数据显示, 旁压试验测试所得的地基承载力范围较大, 从 983.7 kPa 到 4 092.3 kPa。

4 分析与讨论

4.1 载荷试验结果分析

根据表 2 中数据, 进一步整理载荷试验承载力及其

受控因素, 将结果整理成图 8。从图 8 中可见: 基于岩基载荷试验确定的泥岩 f_{ak} 均大于 2 000 kPa (岩体完整性指数 0.39 ~ 0.50), 较地区规范 DB51/T 5026—2001^[16] 建议值最大值 (1 000 kPa) 大 2.0 ~ 2.5 倍。

如表 2、图 8 所示, 同一平硐内试验结果差异率在 10% 以内, 而不同平硐内试验结果差异达 1 000 kPa。

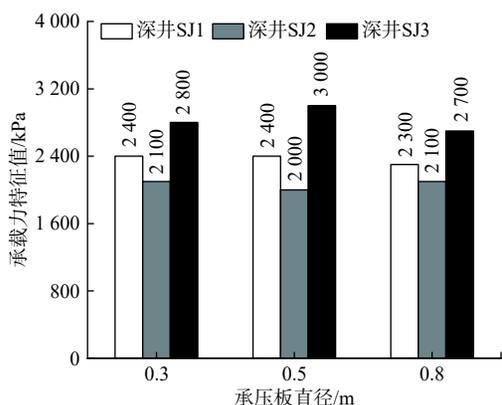


图 8 泥岩承载力-承压板尺寸关系图
Fig. 8 Relationship between bearing capacity and foundation size

说明基础宽度对于性状相似的中等风化泥岩地基承载力的影响小,而岩体完整性特性影响大。另外,环境条件、人为因素亦有影响。

4.2 旁压试验结果分析

进一步通过钻孔超声波测井结果来初步探察岩体本身的完整性指数(K)及测孔深度对 f_{ak} 的影响,三者相关关系见图9。

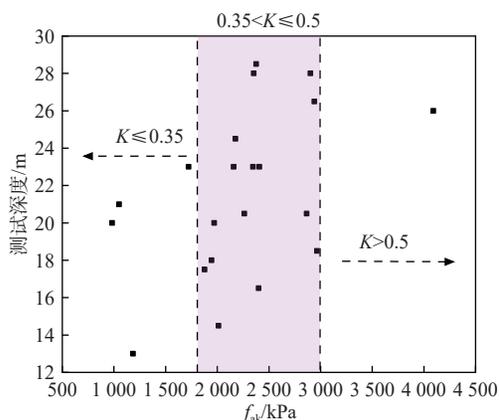


图 9 旁压承载力特征值与测试深度关系图
Fig. 9 Relationship between f_{ak} and depth

如图9所示,本次旁压试验测试深度为12~30 m,测得的 f_{ak} 与旁压测试深度关系相对离散,两者并无特定的关联性。但分析发现,不同K对应的 f_{ak} 范围有一定的规律可循,根据K可将 f_{ak} 分为3个大区,其统计关系如式(2)所示:

$$\begin{cases} K \leq 0.35, & f_{ak} \in [0, 1700) \\ 0.35 < K \leq 0.5, & f_{ak} \in [1700, 3000) \\ K > 0.5, & f_{ak} \in [3000, +\infty) \end{cases} \quad (2)$$

需要说明的是,K采用声波测孔波速和室内岩块单轴抗压强度波速,根据国家标准《工程岩体分级标

准》(GB/T 50218—2014)^[31]计算, f_{ak} 与K对应时有部分离散项,确定两者关系时将此离散项做略去处理。

4.3 两种手段测试结果比对分析

以深井平硐内的承压板试验结果为基准,对比钻孔中旁压试验结果,两者的异同如图10所示。

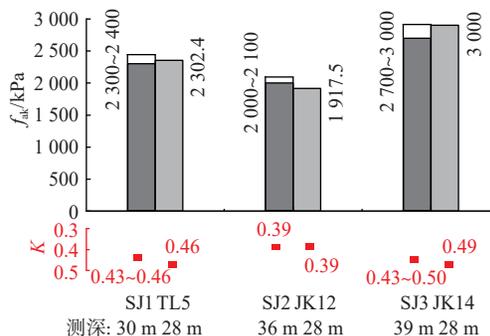


图 10 承压板试验与旁压试验结果对比
Fig. 10 Comparison between the results of plate load test and side pressure test

对比结果显示,对于性状相似的岩体,不同测试方法结果相近,可互为印证,K在0.35~0.50之间的中等风化泥岩 f_{ak} 均大于2000 kPa,较地区规范DB51/T 5026—2001建议最大值大2.0~2.5倍。

4.4 参数相关性分析

为探寻一种快速、经济估算承载力的方法,进一步分析了表3中 f_{ak} 与钻孔波速(V_p)、K的相关关系,关系曲线见图11。

由图11可知, f_{ak} 范围为980~4000 kPa, V_p 范围为1800~3100 m/s,K范围为0.23~0.66,相关方程见式(3)(4),相关系数分别为0.84,0.87。对于本研究区泥岩而言, f_{ak} 与 V_p 、K等参数相关性显著。利用式(3)(4),可通过波速测试间接获取 J_{3p} 中等风化泥岩的 f_{ak} 。

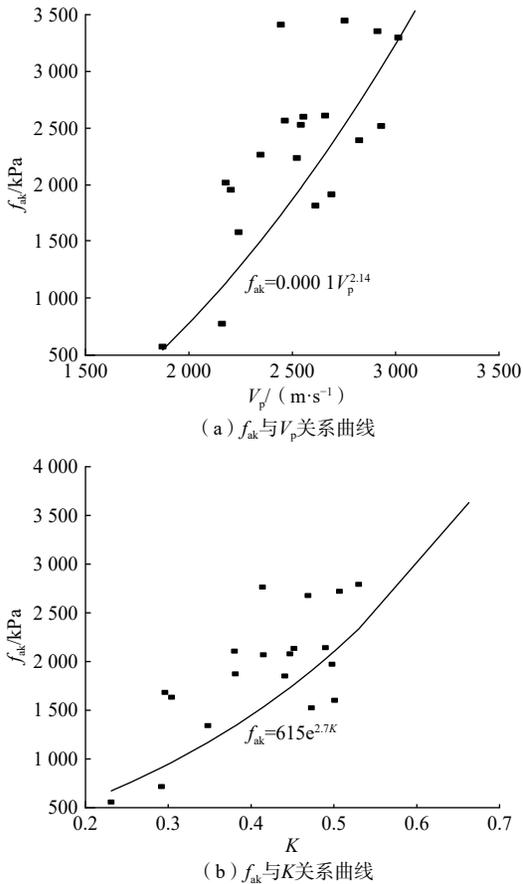
$$f_{ak} = 0.0001 V_p^{2.14} \quad (3)$$

$$f_{ak} = 615e^{2.7K} \quad (4)$$

5 结论

(1)研究区侏罗系中等风化泥岩地基承载力特征值均较《成都地区建筑地基基础设计规范》(DB51/T 5026—2001)大2.0~2.5倍,岩体完整性指数在0.35~0.50之间的泥岩地基承载力特征值取值可达2000 kPa。

(2)岩基平板载荷试验、软岩旁压试验测得的地基承载力特征值相近,原位载荷试验的承压板直径、旁压试验的测试深度对中等风化泥岩承载力影响不显著。

图 11 承载力特征值与 V_p 、 K 关系曲线Fig. 11 Relationship between f_{ak} and V_p 、 K

(3) 泥岩地基承载力特征值(f_{ak})与岩体弹性纵波速度(V_p)、岩体完整性指数(K)相关性显著。 f_{ak} 与 V_p 和 K 分别呈幂函数、指数递增关系。

参考文献 (References) :

- [1] 郭永春, 谢强, 文江泉. 我国红层分布特征及主要工程地质问题[J]. 水文地质工程地质, 2007, 34(6): 67 - 71. [GUO Yongchun, XIE Qiang, WEN Jiangquan. Red beds distribution and engineering geological problem in China[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2007, 34(6): 67 - 71. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 程强, 寇小兵, 黄绍槟, 等. 中国红层的分布及地质环境特征[J]. 工程地质学报, 2004, 12(1): 34 - 40. [CHENG Qiang, KOU Xiaobing, HUANG Shaobin, et al. The distributes and geologic environment characteristics of red beds in China[J]. Journal of Engineering Geology, 2004, 12(1): 34 - 40. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 钟志彬, 李安洪, 邓荣贵, 等. 川中红层泥岩时效膨胀变形特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019,

38(1): 76 - 86. [ZHONG Zhibin, LI Anhong, DENG Ronggui, et al. Experimental study on the time-dependent swelling characteristics of red-bed mudstone in Central Sichuan[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(1): 76 - 86. (in Chinese with English abstract)]

- [4] 康景文, 田强, 颜光辉, 等. 成都地区泥质软岩地基主要工程特性及利用研究[J]. 工程勘察, 2015, 43(7): 1 - 10. [KANG Jingwen, TIAN Qiang, YAN Guanghui, et al. Study on engineering characteristics and utilization of soft rock ground in Chengdu area[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2015, 43(7): 1 - 10. (in Chinese with English abstract)]
- [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, 2011. [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 Construction Industry Press, 2011. (in Chinese)]
- [6] 中国电力企业联合会. 工程岩体试验方法标准: GB/T 50266—2013[S]. 北京: 中国计划出版社, 2013. [China Electricity Council. Standard for test methods of engineering rock mass: GB/T 50266—2013[S]. Beijing: China Planning Press, 2013. (in Chinese)]
- [7] 江苏省建设厅. 南京地区建筑地基基础设计规范: DGJ32/J12—2005[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005. [Jiangsu Provincial Department of Construction. Code for design of building foundation in Nanjing area: DGJ32/J12—2005[S]. Beijing: China Construction & Industry Press, 2005. (in Chinese)]
- [8] 广东省城乡和住房建设厅. 广东省建筑地基基础设计规范: DBJ15-31—2003[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003. [Department of urban rural and housing construction of Guangdong Province. Code for design of building foundation of Guangdong Province: DBJ15-31—2003[S]. Beijing: China Construction & Industry Press, 2003. (in Chinese)]
- [9] 彭柏兴, 王星华. 软岩旁压试验与单轴抗压试验对比研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(3): 451 - 454. [PENG Baixing, WANG Xinghua. Comparative study on PMT and uniaxial compressive test on soft rock[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(3): 451 - 454. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 彭柏兴, 刘颖炯, 王星华. 波速-旁压联合测试法在红层软岩中的应用研究[J]. 岩土力学, 2006(增刊 1):

- 914 - 918. [PENG Baixing, LIU Yinjong, WANG Xinghua. Application of the combined sound wave velocity-pressure test method to soft rock in red layers[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006(Sup 1): 914 - 918. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 陈嘉祺, 魏作安. 不同试验方式岩石点荷载强度与单轴抗压强度对比分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2018, 29(5): 72 - 77. [CHEN Jiaqi, WEI Zuohan. Comparison of rock strength from different point load tests and the uniaxial compressive strength[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2018, 29(5): 72 - 77. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 郑立宁, 陈继彬, 周其健, 等. 成都地区中等风化泥岩地基承载力取值试验研究[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(5): 926 - 932. [ZHENG Lining, CHEN Jibin, ZHOU Qijian, et al. Experimental study on bearing capacity of moderately weathered mudstone in Chengdu area[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(5): 926 - 932. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 郭永春, 赵峰先, 闫圣龙, 等. 红层泥岩三轴膨胀力的试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(3): 87 - 93. [GUO Yongchun, ZHAO Fengxian, YAN Shenglong, et al. An experimental study of the triaxial expansion force of red-bed mudstone[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(3): 87 - 93. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 刘超, 袁伟, 路军富, 等. 某铁路隧道底鼓段粉砂质泥岩微宏观物理力学特性研究[J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(5): 108 - 115. [LIU Chao, YUAN Wei, LU Junfu, et al. A study of the micro-macro-physical and mechanical properties of silty mudstone in the bottom drum section of a railway tunnel[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(5): 108 - 115. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 张唐瑜, 马丽娜, 张戎令, 等. 压实作用对泥岩膨胀性及水分迁移影响[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2019, 30(4): 98 - 103. [ZHANG Tangyu, MA Li'na, ZHANG Rongling, et al. Effect of compaction on swelling and water migration of expansive mudstone[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2019, 30(4): 98 - 103. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 李安润, 邓辉, 王红娟, 等. 水-岩作用下粉砂质泥岩含水损伤本构模型[J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(2): 106 - 113. [LI Anrun, DENG Hui, WANG Hongjuan, et al. Constitutive model of water-damaged silty mudstone under water-rock interactions[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(2): 106 - 113. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 徐建鑫, 杨华本, 段明新, 等. 漠河盆地西段洛古河泥岩地质特征及时代[J/OL]. 地质通报. (2021-11-16) [2022-11-01]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4648.p.20211112.2043.002.html>. [XU Jianxin, YANG Huaben, DUAN Mingxin, et al. Geological characteristics and age of the Luoguhe Mudstone in the western section of Mohe basin[J/OL]. Geological Bulletin of China. (2021-11-16) [2022-11-01]. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 张茜, 肖渊甫, 王晓飞, 等. 四川盆地西南缘龙马溪组泥岩地球化学特征及物源区和构造背景分析[J]. 地质论评, 2020, 66(5): 1393 - 1411. [ZHANG Qian, XIAO Yuanfu, WANG Xiaofei, et al. Geochemistry of the Longmaxi Formation mudstones of the southwest Sichuan Basin: Implications for provenance and source weathering[J]. Geological Review, 2020, 66(5): 1393 - 1411. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 吴礼舟, 李部, 孙萍. 甘肃甘谷裂隙泥岩剪切蠕变行为及其修正模型研究[J]. 地质力学学报, 2017, 23(6): 923 - 934. [WU Lizhou, LI Bu, SUN Ping. Study on shear creep behavior of mudstone and its correction model of Gan'gu fissure in Gansu[J]. Journal of Geomechanics, 2017, 23(6): 923 - 934. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 郭长宝, 王磊, 李任杰, 等. 西藏贡觉粉砂质泥岩工程地质特性与蠕变强度研究[J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(5): 54 - 64. [GUO Changbao, WANG Lei, LI Renjie, et al. Engineering geology properties and creeping strength characteristics of the silty mudstone in Gongjue County in Tibet of China[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(5): 54 - 64. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 张向东, 曲直, 李军. 考虑不同加载条件的粉砂质泥岩损伤特征[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2018, 29(3): 120 - 126. [ZHANG Xiangdong, QU Zhi, LI Jun. Damage characteristic of silty mudstone under various loading condition[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2018, 29(3): 120 - 126. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 程晔, 龚维明, 戴国亮, 等. 软岩桩基承载性能试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(1): 165 - 172. [CHENG Ye, GONG Weiming, DAI Guoliang, et al. Research on bearing performance of socketed pile in soft rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and

- Engineering, 2009, 28(1): 165 – 172. (in Chinese with English abstract)]
- [23] BELL F G. Engineering in Rock Masses [M]. New York: Butterworth-Heinemann, 1994.
- [24] 宋建波, 于远忠. 剪切破坏模式下均质岩基极限承载力的Bell解[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(3): 410 – 412. [SONG Jianbo, YU Yuanzhong. Bell solution determining ultimate bearing capacity of homogeneous rock foundation under shear failure model[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(3): 410 – 412. (in Chinese with English abstract)]
- [25] 李培勇, 杨庆, 栾茂田. Hoek-Brown岩石破坏经验判据确定岩石地基承载力的修正[J]. 岩土力学, 2005, 26(4): 664 – 666. [LI Peiyong, YANG Qing, LUAN Maotian. Modification of formula estimating ultimate bearing capacity of rock foundation based on Hoek-Brown strength criterion[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(4): 664 – 666. (in Chinese with English abstract)]
- [26] 李成芳, 陈奎, 熊启东, 等. 重庆地区软质岩地基承载力试验研究[J]. 建筑结构, 2017, 47(9): 90 – 93. [LI Chengfang, CHEN Kui, XIONG Qidong, et al. Experiment study on bearing capacity of soft rock foundation in Chongqing area[J]. Building Structure, 2017, 47(9): 90 – 93. (in Chinese with English abstract)]
- [27] 沈莉. 软岩工程特性及其承载力修正规律的研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2017. [SHEN Li. Study on engineering characteristics and correction rules of bearing capacity of soft rock[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2017. (in Chinese with English abstract)]
- [28] 成都市建筑设计研究院. 成都地区建筑地基基础设计规范: DB51/T 5026—2001[S]. 成都: [出版者不详], 2001. [Chengdu Architectural Design and Research Institute. Code for design of building foundation in Chengdu: DB51/T 5026—2001[S]. Chengdu: [s.n.], 2001. (in Chinese)]
- [29] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 地基旁压试验技术标准: JGJ/T 69—2019[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019. [Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People’s Republic of China. Technical standard for foundation pressuremeter test: JGJ/T 69—2019 [S]. Beijing: China Construction & Industry Press, 2019. (in Chinese)]
- [30] 中华人民共和国建设部. 高层建筑岩土工程勘察标准: JGJ/T 72—2017[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017. [Ministry of Construction of the People’s Republic of China. Specification for geotechnical investigation of tall buildings: JGJ/T 72—2017[S]. Beijing: China Construction & Industry Press, 2017. (in Chinese)]
- [31] 中华人民共和国水利部. 工程岩体分级标准: GB/T 50218—2014[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014. [Ministry of Water Resources of the Peoples’s republic. Standard for engineering classification of rockmass: GB/T 50218—2014[S]. Beijing: China Planning Press, 2014. (in Chinese)]

编辑: 刘真真