

DOI: 10.11779/CJGE202105017

成都地区中等风化泥岩地基承载力取值试验研究

郑立宁^{1, 2, 3}, 陈继彬^{*1}, 周其健^{1, 4}, 冯世清¹, 罗益斌¹, 沈攀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. 中建地下空间有限公司, 四川 成都 610073;
3. 中国人民解放军陆军工程大学, 江苏 南京 210007; 4. 西南交通大学, 四川 成都 611756)

摘要: 成都地区分布着俗称“川中红层”的中等风化泥岩, 规范 DB51T5026 建议此类泥岩地基承载力特征值 f_a 按岩石单轴抗压强度 f_{rk} 折减法确定, 建议取值 500~1000 kPa, 而实践证明计算方法合宜性差且建议值偏低, 但是更为合理的取值研究至今鲜有突破。通过对 24 个场地约 100 个原位平板载荷试验与同条件岩石单轴抗压强度试验工程案例进行对比分析, 讨论了成都地区中等风化泥岩 f_a 计算公式中 ψ 值取值及其与 f_a 的相关关系。然后, 依托成都高新区在建的某超高层建筑项目, 进一步联合原位平板载荷试验(9 组)和旁压试验(17 孔), 探讨了中等风化泥岩地基承载力取值影响因素及旁压实施的可行性。研究结果表明: 成都地区中等风化泥岩地基承载力特征值 f_a 普遍在 1500~2500 kPa 区间, 折减系数呈现出随单轴抗压强度增加而递减的趋势, 一般为 0.37~0.7; 对于相似性状的泥岩, 平板载荷试验、钻孔旁压试验确定的泥岩 f_a 可互为印证, 试验值受承压板直径影响不显著。研究成果建议了成都地区中等风化泥岩地基承载力取值, 同时提出了以单轴抗压强度或旁压试验结果作为设计依据的建议, 实践证明其具有较强的适用性, 对充分发挥红层软岩承载力具有一定的工程意义。

关键词: 中等风化泥岩; 承载力; 单轴抗压强度; 载荷试验; 旁压试验

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2021)05-0926-07

作者简介: 郑立宁(1985—), 男, 博士后, 高级工程师, 主要从事岩土工程等方面的研究工作。E-mail: 458245452@qq.com。

Experimental study on bearing capacity of moderately weathered mudstone in Chengdu area

ZHENG Li-ning^{1, 2, 3}, CHEN Ji-bin¹, ZHOU Qi-jian^{1, 4}, FENG Shi-qing¹, LOU Yi-bin¹, SHEN Pan¹

(1. China Southwest Geotechnical Investigation & Design Institute Co., Ltd., Chengdu 610052, China; 2. China Construction

Underground Space Co., Ltd., Chengdu 610073, China; 3. Army Engineering University of the People's Liberation Army of China,

Nanjing 210007, China; 4. Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China)

Abstract: The moderately weathered mudstones in Chengdu area are widely developed. The code DB51T5026 recommends that the characteristic value of bearing capacity is 500~1000 kPa, which is determined by the reduction method for uniaxial compressive strength of rock. However, the engineering practice proves that the proposed value is low, but there have been few breakthroughs in its researches. We discuss the value of reduction factor and its correlation with f_a for the moderately weathered mudstone in Chengdu area, based on the comparative analysis of 24 sites of in-situ load tests and uniaxial compressive strength tests. Furthermore, based on a super high-rise building project under construction in the High-tech Zone of Chengdu, the bearing capacity of the mudstone foundation f_a is determined by using the bearing plate tests and the pressuremeter tests. The results show that the values of f_a determined by the tests are 1500~2500 kPa. The reduction coefficient of uniaxial compressive strength from high to low can be 0.37~0.7. For the mudstones with the same character, the diameter of the bearing plate has no significant effect on f_a ; and the values of f_a determined by the bearing plate tests and the pressuremeter tests are very similar. The research results put forward the value of bearing capacity of moderately weathered Jurassic mudstone in Chengdu area, and a fast and economic estimation method to determine the characteristic value of bearing capacity of this kind of mudstone foundation. At the same time, the research results have a certain engineering value for giving full play to the bearing capacity of red bed soft rock.

Key words: moderately weathered mudstone; bearing capacity; uniaxial compressive strength; load test; pressuremeter test

基金项目: 中建西勘院课题—成都地区中等风化泥岩承载力专题研究
(2007714)

收稿日期: 2020-07-03

*通信作者 (E-mail: weizhishuiyu@163.com)

0 引言

成都市主城区均下伏中等风化泥岩, 埋深一般为-0.5~35m, 层厚十几米到几十米不等^[1-2], 工程性质差, 承载力估算困难。随着成渝地区双城经济圈建设的深度推进, 成都地区已开建或筹建的高层、超高层建筑的基础持力层均涉及中等风化泥岩, 研究该类岩体的承载能力具有一定的工程意义。

江苏^[3]、广东^[4]、重庆^[5]等地在实践中逐渐修正了规范^[6]对软岩地基承载力的取值建议, 提出了不同岩石单轴抗压强度分区所对应的折减系数及承载力; 长沙、兰州等地以岩基载荷试验为主, 辅以点荷载试验、旁压试验等, 提出了泥岩承载力的界定标准^[7-9]; 并通过不同类型试验结果的对比, 探讨了影响地基承载力取值的因素^[10-11], 指出确定地基承载力时应考虑岩体的物理力学性质、成因、年代、地下水及其变化情况、建筑物对沉降及差异沉降的要求等^[12]。成都地标 DB51/T5026—2001^[13]建议中等风化泥岩地基承载力特征值为 500~1000 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, 工程实践表明规范条文存在两点不足。一方面是建议的承载力取值偏低, 成都地区中风化泥岩极限承载力值试验值普遍分布在 2000~6000 kPa, 且主要集中在 4000~6000 kPa^[14], 按照安全系数 3 考虑, 其承载力特征值亦大于 1000 kPa; 另一方面, 折减法确定承载力合宜性差, 折减系数 ψ 的取值无既定条款可循, 往往带有过多的人为因素, 即使对同一类型、同一条件、同一环境的地基岩体, 不同的设计人员也会取不同的 ψ 值, 有时甚至出入较大, 在没有原位试验的情况下, 所提出的承载力缺乏依据, 带有一定的随意性, 对工程的安全性没有切实保障。在成都地区更为合理的取值研究至今鲜有突破, 受到不少诟病。

综上, 本文通过对 24 个场地约 100 余处原位平板载荷试验与同条件岩石单轴抗压强度试验工程案例进行对比分析, 讨论了成都地区中等风化泥岩计算公式中 ψ 值取值及其与承载力特征值的相关关系。进一步, 结合成都高新区在建的某超高层建筑项目, 采用原位平板载荷试验(9 组)联合钻孔旁压试验法(17 孔)针对性的探讨了该类岩体承载力特性, 并分析了承压板尺寸等因素对承载能力发挥程度的影响。以上研究旨在探寻单轴抗压强度或旁压试验结果作为承载力设计依据的可能。

1 成都中等风化泥岩特性

成都地区红层属于盆西小区^[15], 是最具代表性的近水平红层分布区。区内中等风化泥岩以 J_{3p} 侏罗系蓬莱镇组上统和 K_{2g} 白垩系中统灌口组为主(见图 1),

其中 J_{3p} 泥岩大范围的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, 其他区域均为 K_{2g} 泥岩, 从城区东南方至西北方埋深为 10~30 m, 深度逐渐加深。

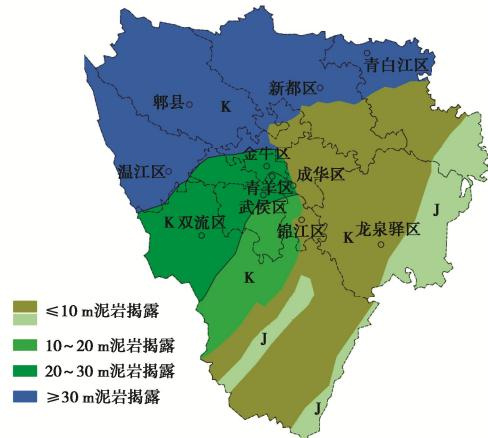


图 1 成都地区中等风化泥岩分布略图

Fig. 1 Distribution of moderately weathered mudstone in Chengdu

区内中等风化泥岩呈紫红色, 层理清晰, 风化裂隙较发育, 巨厚层构造, 整体结构。锤击易碎、声哑, 用镐难挖掘, 岩芯钻方可钻进。岩芯采取率达 90% 以上(图 2)。通过对岩芯的 X 衍射和矿物成份分析, 可知区内泥岩及其风化物含有超 50% 的 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 , 其不同的组合构成了以蒙脱石、伊利石为主的片状黏土矿物。表 1 为岩体物理力学参数统计表。



图 2 成都地区典型中等风化泥岩岩芯

Fig. 2 Typical moderately weathered mudstone core in Chengdu

表 1 中等风化泥岩物理力学性质统计表

Table 1 Physical and mechanical properties of rock

| 统计指标 | 天然密度 /(g·cm ⁻³) | 单轴抗压强度 /MPa | | 黏聚力 /MPa | | 内摩擦角 (°) | |
|------|--------------------------------|----------------|------|-------------|------|-------------|------|
| | | 天然状态 | 饱和状态 | 天然状态 | 饱和状态 | 天然状态 | 饱和状态 |
| 最大值 | 2.62 | 9.67 | 8.20 | 1.2 | 0.85 | 40.1 | 38.6 |
| 最小值 | 2.30 | 2.71 | 1.56 | 0.4 | 0.23 | 33.7 | 31.4 |
| 平均值 | 2.48 | 6.00 | 3.88 | 0.8 | 0.49 | 37.9 | 35.5 |
| 样本容量 | 141 | 51 | 39 | 28 | 17 | 28 | 17 |

2 原位平板载荷试验与岩石单轴抗压强度试验对比

目前成都地区确定岩石地基承载力特征值主要为

岩石单轴抗压强度折减法和原位平板岩基载荷试验法: ①第一种方法简便但计算结果与实际地基承载力有较大出入; ②第二种计算方法得到的结果普遍被认为是真实的, 但费时费力。

笔者整理了 24 个工程实例中约 100 个中等风化泥岩的原位平板载荷试验点的相关测试数据, 开展了 2 种方法确定地基承载力的对比分析, 结果见表 2, 试验点覆盖了成都主城区, 具有较好的代表性。需要说明的是, 文中所示意的原位平板载荷试验点绝大多数未达到明显的极限荷载, 因此岩基的承载力特征值确定标准: ①极限荷载 $f_u/3$ 与比例界限荷载的较小值; ②未达到极限状态取比例界限荷载。

表 2 岩基载荷试验与单轴抗压强度试验对比

Table 2 Comparison between load tests and uniaxial compressive strength tests

| 工程名称 | 工程地点 | f_{tk} /MPa | f_a /kPa | ψ | 停载位移/mm | 点数 |
|-----------|------|---------------|------------|--------|---------|----|
| 隆鑫 | 成华区 | 4.00 | 2044 | 0.51 | 5.420 | 3 |
| 润都科技 | 成华区 | 4.00 | 1981 | 0.49 | 6.760 | 3 |
| | | | 1841 | 0.60 | 3.990 | |
| 蓉华·上林 | 成华区 | 3.05 | 1773 | 0.58 | 9.730 | 8 |
| | | | 1861 | 0.61 | 8.680 | |
| 科创中心 | 成华区 | 5.00 | 2263 | 0.45 | 18.370 | 8 |
| 东方荟 | 锦江区 | 5.00 | 2157 | 0.43 | 3.640 | 4 |
| 东大街项目 | 锦江区 | 3.07 | 1900 | 0.62 | 3.520 | 3 |
| 仁恒置地广场 | 锦江区 | 3.43 | 1990 | 0.58 | — | 2 |
| 航天科技大厦 | 锦江区 | 6.00 | 2880 | 0.48 | — | 3 |
| 西部国金融御大楼 | 锦江区 | 1.48 | 843 | 0.57 | 10.410 | 3 |
| 海桐三期 | 锦江区 | 7.30 | 3010 | 0.41 | 0.562 | 3 |
| 滨江 30 号地块 | 高新区 | 7.90 | 2959 | 0.37 | 8.300 | 4 |
| 半岛城邦 | 高新区 | 6.80 | 2740 | 0.40 | 10.700 | 3 |
| 龙湖世纪城 | 高新区 | 4.50 | 2021 | 0.45 | 6.600 | 9 |
| 川大科技园 | 双流区 | 2.79 | 1800 | 0.65 | 33.190 | 8 |
| 水电·云立方 | 双流区 | 3.92 | 1894 | 0.48 | 5.290 | 3 |
| 视高天府公园 | 龙泉驿 | 5.98 | 2400 | 0.40 | 5.500 | 3 |
| 学府城 | 天府新区 | 6.48 | 2400 | 0.37 | 7.320 | 3 |
| 仁中风华一期 | 天府新区 | 4.99 | 2290 | 0.46 | 1.420 | 4 |
| 驿都水岸丽园 | 天府新区 | 5.64 | 2266 | 0.45 | 2.720 | 2 |
| 东方希望天祥 | 天府新区 | 5.58 | 2524 | 0.45 | 17.500 | 1 |
| 海洋乐园 | 天府新区 | 5.00 | 2162 | 0.43 | 18.630 | 2 |
| 中邮金融中心 | 武侯区 | 4.39 | 2000 | 0.50 | 1.160 | 3 |
| 田园晶品 | 武侯区 | 6.55 | 2500 | 0.38 | 4.260 | 6 |
| | 新都区 | 5.74 | 2400 | 0.42 | 2.200 | 3 |
| | | 3.1 | 1697 | 0.55 | 3.720 | 6 |

注: f_{tk} 为岩石天然单轴抗压强度标准值; f_a 为承载力特征值; ψ 为折减系数。

表 2 中, 成都主城区中等风化泥岩地基承载力特征值试验值 70% 以上集中在 1500~2500 kPa, 较规范 DB51T5026 建议最大值普遍大 1.5 倍以上, 统计原

位平板载荷试验与同条件岩石单轴抗压强度试验结果得出折减系数分布在 0.37~0.70, 总体值大于 0.5 (表 3); 综合可见, 折减系数呈现出随单轴抗压强度增加而递减的趋势。

表 3 所列的统计结果对于岩石单轴抗压强度小于 2 MPa 和大于 8 MPa 的岩体, 由于没有试验样本, 可分别取统计数据中折减系数最高区段和最低区段的 ψ 值, 即取 0.7, 0.37, 承载力特征值最小值按现行规范^[12] 最小值 500 kPa 考虑。同时, 上述统计结果多数是在未加载到岩基破坏的试验条件下得到的, 实际的折减系数比该统计值还要大。但是, 仍要注意的是, 表 3 中岩石单轴抗压强度为天然状态, 若当基岩浸水软化时, 需要适当考虑折减系数减小。

表 3 折减系数和承载力特征值建议值

Table 3 Recommended values of reduction coefficient and characteristic value of bearing capacity

| f_{tk} /MPa | ψ | f_a /kPa | 说明 |
|---------------|----------|------------|---------------|
| <2 | 0.7 | 500~1400 | |
| 2~4 | 0.5~0.7 | 1400~2000 | 符号意义同表 2, 岩石单 |
| 4~6 | 0.4~0.5 | 2000~2400 | 轴抗压强度 |
| 6~8 | 0.37~0.4 | 2400~3000 | 为天然状态 |
| >8 | 0.37 | >3000 | |

3 承载力的影响因素分析

进一步依托成都高新区在建的某超高层建筑项目, 探讨不同承压板直径对研究区中等风化泥岩地基承载力取值的影响。

3.1 场地条件

该超高层建筑位于成都市南部天府新区秦皇寺中央商务区。场地地貌单元属宽缓浅丘, 为剥蚀型浅丘陵地貌, 建筑基础底板持力层为侏罗系蓬莱镇组 (J_{3p}) 中等风化泥岩。泥岩天然密度 2.48 g/cm³、自然状态下单轴抗压强度平均值 6.00 MPa、饱和状态单轴抗压强度平均值 3.88 MPa。三轴天然抗剪强度参数平均值内摩擦角为 37.9°, 黏聚力为 0.8 MPa。同时, 根据钻孔波速测得岩体波速为 2200~3200 m/s; 室内岩块波速平均值为 2370 m/s。

3.2 试验方案

承压板载荷试验在场地开挖的 3 口深井平硐中进行 (编号分别为 SJ01, SJ02, SJ03)。试验点位见图 3 所示。

图 3 中, SJ01 深 30 m (高程 459.06 m)、SJ02 深 36 m (高程 451.15 m)、SJ03 深 39 m (高程 447.57 m), 井底平硐长×宽×高为 2 m×2 m×8 m。每一平硐内分别开展承压板直径 R 为 300, 500, 800 mm 的载荷试验各 1 组, 共 9 组。载荷试验操作过程严格参考规范^[16], 开挖至目标层后对试验点进行粗砂找平, 放置

承压板、千斤顶、百分表等试验设备。检查无误后采用慢速维持加载法加载, 加载分8~12级, 每级加载后连续三次读数之差均不大于0.01 mm可施加下一级荷载; 当某级荷载下24 h变形速率不能达到相对稳定标准或本级荷载的变形量大于前级荷载变形量的5倍或承压板周边的岩土出现明显隆起或径向裂缝持续发展等现象终止加载。试验现场照片见图4。



图3 试验点位示意图

Fig. 3 Schematic diagram of test sites



图4 岩基平板载荷试验过程照片

Fig. 4 Photos of bearing plate tests

试验数据绘制 $p-s$ 曲线, 曲线起始直线段终点的前一级荷载为比例界限荷载; 终载前一级荷载为极限荷载。将极限荷载除以3的安全系数, 所得值与对应于比例界限的荷载相比较, 取小值定为承载力特征值。

3.3 试验结果分析

典型 $p-s$ 曲线见图5所示。

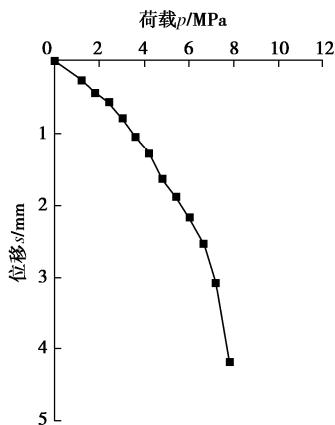


图5 $p-s$ 曲线(以02深井300 mm承压板为例)

Fig. 5 $p-s$ curves (deep well No. 2, plate diameter 300 mm)

(1)曲线整体上表现出变形随着荷载的增大而逐渐增大。

(2)以SJ02中直径300 mm载荷试验结果为例, 试验荷载分12级加载, 试验结束荷载为7800 kPa。加载结束时, 位移持续增加且不能稳定, 累计变形量为4.182 mm。从曲线上均可直接读出比例界限荷载和极限荷载。曲线第一个拐点(2400 kPa)对应的前一级荷载(2100 kPa)为比例界限荷载; 极限荷载为曲线第二个拐点(7800 kPa)对应的前一级荷载(6300 kPa)。极限荷载的1/3与比例界限荷载对比取小值为承载力特征值, 即为2100 kPa。

承载板直径与承载力特征值之间的关系见图6所示。其他试验点试验结果统计见表4所示。

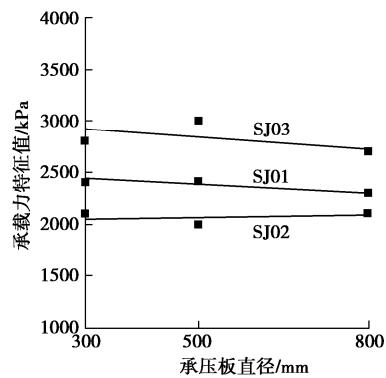


图6 承载板直径与承载力特征值的关系

Fig. 6 Plate diameter vs. bearing capacity

对于同一平硐, 中等风化泥岩地基承载力特征值差异小于10%。具体来说, SJ01深井泥岩承载力特征值为2300~2400 kPa; SJ02深井泥岩承载力特征值为2000~2100 kPa; SJ03深井泥岩承载力特征值为2700~3000 kPa。说明, 相似性状的泥岩, 载荷板尺寸对于其地基承载力性能影响程度不大(见图7所示), 可推测基础宽度对于同一性状的中等风化泥岩地基承载力的影响不明显。



图7 旁压试验过程照片

Fig. 7 Photos of pressuremeter tests

不同平硐内试验结果略有差异, 与岩体个体差异尤其是岩体完整性和矿物组分不无关系, 试验表明: 三口平硐内泥岩岩体完整性指数分别为0.43~0.46, 0.39, 0.43~0.50; 黏土矿物含量分别为29%~30%,

表 4 研究区中等风化泥岩承载力特征值试验值统计表 (承压板载荷试验)

Table 4 In-suit test values of bearing capacity of moderately weathered mudstone in study area

| 试验点号 竖井编号 | 承压板直 径 D/mm | 原位试验 | | | 极限值/3 对应荷载 f_a/kPa | 岩体完 整性指 数 K_v | |
|--------------------|----------------|---------------|------------------|---------------------|----------------------------|-----------------------|------|
| | | 最大加 载量/kPa | 比例界限对应 荷载/kPa | 终止条件 | 裂缝情况 | | |
| SJ01 (459.06 m) | 300 | 9000 | 3000 | 趋近试验装置系统极限 | 无 | 2400 | 0.46 |
| | 500 | 9600 | 2400 | 位移持续增大, 不能稳定 | 无 | 2400 | 0.46 |
| | 800 | 6300 | 2700 | 沉降增大, 大于前一级沉降量的 5 倍 | 有 | 2300 | 0.43 |
| SJ02 (451.15 m) | 300 | 7800 | 2400 | 变形不能保持稳定 | 有 | 2100 | 0.39 |
| | 500 | 10800 | 2400 | 变形不能保持稳定 | 无 | 2000 | 0.39 |
| | 800 | 11700 | 2700 | 沉降增大, 大于前一级沉降量的 2 倍 | 有 | 2100 | 0.39 |
| SJ03 (447.54 m) | 300 | 11800 | 3600 | 趋近试验装置系统极限 | 有 | 2800 | 0.49 |
| | 500 | 9600 | 3000 | 趋近试验装置系统极限 | 有 | 3000 | 0.50 |
| | 800 | 10800 | 3600 | 支洞上壁无法提供足够反力 | 无 | 2700 | 0.43 |

36%~47%, 17%~25%。上述差异导致不同平硐内中等风化泥岩地基承载性能出现差异。另外, 岩石地基承载性能差异亦是试验环境条件、操作人为误差等因素综合影响所造成, 需进一步详细甄别和探讨。

4 承载力确定方法讨论

4.1 承载力特征值修正折减法

上述超高层建筑项目中, 3 口深井平硐中进行承压板载荷试验同时亦在 300 mm 压板试验点位附近各取 3 个试样进行了室内单轴抗压强度试验(试验参照规范^[16]), 对修正折减系数法进行验证验证。根据 (DB51/T5026—2001)^[13] 和 (GB50007—2011)^[6] 中确定承载力特征值 f_a 公式为

$$f_a = \psi f_{rk}, \quad (1)$$

式中, f_a 为岩石地基承载力特征值 (kPa), f_{rk} 为岩石饱和单轴抗压强度标准值 (kPa), 软岩取为天然单轴抗压强度标准值), ψ 为折减系数, 由当地经验确定。

结合前述研究, 对式 (1) 参数进行修正, 得

$$f_a = \psi' f_{rk}, \quad (2)$$

式中, f_a 为岩石地基承载力特征值 (kPa), f_{rk} 为岩石饱和单轴抗压强度标准值 (kPa, 软岩取为天然单轴抗压强度标准值), ψ' 为修正折减系数(按表 3 选取)。

试验及验证结果见表 5 所示。

从表 5 中计算结果可见, 本文所提出的折减系数修正法所估算的岩基承载力特征值与原位载荷试验结果相近, 差异在 5% 以内, 效果较好, 可以作为承载力计算的依据。根据单轴抗压强度分区不同其修正系数可按表 3 选取, 取值区间可采用线性内插来确定。

4.2 旁压试验适宜性探讨

旁压试验其实质是横向载荷试验。软岩中旁压临塑荷载既与岩石单轴抗压强度有关又与岩体的裂隙发

表 5 修正折减系数法验证结果

Table 5 Test results of modified reduction coefficient method

| 竖井 编 号 | f_a /kPa | f_{rk} /MPa | 平均 f_{rk}/MPa | ψ | 计算 值 | 差 异 /% |
|--------------|---------------|------------------|--------------------|--------|---------|--------------|
| SJ01 | 1 | 4.9 | | | | |
| | 2 | 2400 | 5.8 | 5.96 | 0.40 | 2384 |
| | 3 | 7.19 | | | | |
| SJ02 | 1 | 3.47 | | | | |
| | 2 | 2100 | 3.78 | 4 | 0.50 | 2000 |
| | 3 | 4.39 | | | | |
| SJ03 | 1 | 6.89 | | | | |
| | 2 | 2800 | 8.31 | 7.1 | 0.39 | 2769 |
| | 3 | 8.41 | | | | |

育程度有关, 利用旁压试验能更好地反映工程岩体的实际强度^[10-11]。近年来, 在长沙等地得到广泛应用, 然而其在成都地区中等风化泥岩中的适宜性仍需进一步探讨。在上述项目场地中 14 口勘察钻孔+3 口对比钻孔中旁压试验(见图 5), 测试深度 15~30 m 不等。其中, 3 口对比钻孔 TL05, JK14, JK12 紧邻 SJ01, SJ02, SJ03 使试验结果具有可对比性。

采用 PM-2B 型预钻式旁压仪进行试验(见图 7), 主机尺寸 23 cm×36 cm×90 cm, 最大压力 6 MPa, 试验操作严格参考规范^[17, 18], 根据试验结果绘制 $P-V$ 曲线, 进一步确定初始压力 P_0 和临塑压力 P_f 。两个压力差值为承载力特征值 f_{ak} 。

旁压试验结果见表 6 所示。

从表 6 中可见, 中等风化泥岩地基承载力特征值测试结果最小值为 983.7 kPa, 最大值为 4092.3 kPa, 范围较大, 这与每一测试孔测试时周围环境、成孔质量、岩体质量、测试深度等有一定关系。因测试时环境和成孔质量属于随机无量化指标的影响因素。进一步对比表 4, 6 中深井及其对比钻孔试验结果, 以探究旁压试验适宜性。以深井平硐内的承压板试验结果为基准。对比结果见图 8 所示。

表6 旁压试验结果统计表

Table 6 Results of pressuremeter tests

| 钻孔编号 | 测试深度/m | P_f/kPa | P_0/kPa | f_a/kPa | 钻孔波速/(m·s ⁻¹) | 岩体完整性指数 K_v |
|------|--------|-----------|-----------|-----------|---------------------------|---------------|
| JK04 | 28.5 | 3002.4 | 625.2 | 2377.2 | 2465 | 0.380 |
| JK03 | 21.0 | 1399.5 | 350.0 | 1049.5 | 1873 | 0.231 |
| JK10 | 20.0 | 1294.2 | 310.5 | 983.7 | 2023 | 0.256 |
| JK12 | 13.0 | 1495.5 | 311.2 | 1184.3 | 2160 | 0.292 |
| JK12 | 20.0 | 2670.0 | 698.5 | 1971.5 | 2204 | 0.304 |
| JK14 | 28.0 | 3753.0 | 850.6 | 2902.4 | 2912 | 0.507 |
| TL01 | 26.5 | 3790.2 | 849.6 | 2940.6 | 2445 | 0.414 |
| TL03 | 18.5 | 4085.1 | 1120.3 | 2964.8 | 2754 | 0.530 |
| TL05 | 28.0 | 2828.4 | 475.6 | 2352.8 | 2542 | 0.447 |
| TL11 | 20.5 | 3715.9 | 850.6 | 2865.3 | 3013 | 0.469 |
| TL13 | 16.5 | 3342.3 | 942.3 | 2400.0 | 2555 | 0.452 |
| TL13 | 23.0 | 2209.1 | 487.2 | 1721.9 | 2241 | 0.348 |
| TL14 | 17.5 | 2300.5 | 422.1 | 1878.4 | 2613 | 0.473 |
| TL16 | 14.5 | 2489.0 | 475.6 | 2013.4 | 2178 | 0.296 |
| TL16 | 20.5 | 2737.9 | 475.6 | 2262.3 | 2824 | 0.498 |
| TL18 | 23.0 | 2590.6 | 432.2 | 2158.4 | 2523 | 0.441 |
| TL22 | 23.0 | 2856.7 | 511.2 | 2345.5 | 2930 | 0.415 |
| TL25 | 24.5 | 2707.0 | 530.1 | 2176.9 | 2347 | 0.381 |
| TL25 | 26.0 | 4773.5 | 681.2 | 4092.3 | 3094 | 0.663 |
| TL35 | 23.0 | 3032.5 | 625.2 | 2407.3 | 2659 | 0.490 |
| TL37 | 18.0 | 2494.4 | 550.0 | 1944.4 | 2690 | 0.501 |

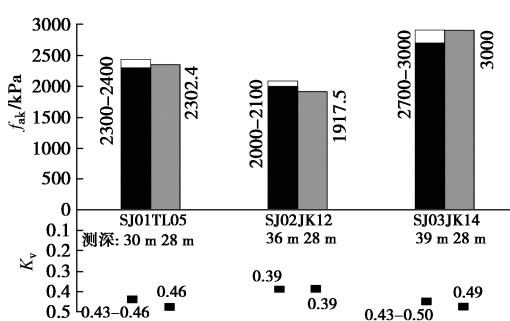


图8 试验结果对比图

Fig. 8 Comparison between test results

对比结果显示, 各测点的泥岩均为中等风化泥岩, 测试深度、岩体完整性均相似, 两种方法测试结果极为相近。尤其是深井 SJ01 和钻孔 TL05, 测试深度分别为 30 m 和 28 m, 岩体完整性指数均为 0.46 左右, 得到的地基承载力特征值 2300 kPa 范围, 可以认为采用承压板载荷试验、钻孔旁压试验确定的泥岩地基承载力特征值 f_a 可互为印证。

5 结 论

本文通过对 24 个场地约 100 个原位平板载荷试验与同条件岩石单轴抗压强度试验工程案例进行对比分析, 讨论了成都地区中等风化泥岩计算公式中折减系数取值。进一步, 依托成都高新区在建的某超高层建筑项目, 探讨了修正折减系数法和旁压试验结果作为设计依据的建议。

(1) 成都主城区中等风化泥岩地基承载力特征值主要集中在 1500~2500 kPa。

(2) 统计原位平板载荷试验与同条件岩石单轴抗

压强度试验结果得出折减系数分布在 0.37~0.70, 总体值大于 0.5。

(3) 本文所提出的折减系数修正法所估算的岩基承载力特征值在实际工程中实用性较强, 其估算结果与原位载荷试验结果差异在 5% 以内, 效果较好, 可以作为承载力计算的依据。

(4) 对于相似性状的泥岩, 泥岩地基承载力受承压板直径影响不显著; 且承压板载荷试验、钻孔旁压试验确定的地基承载力特征值可互为印证;

(5) 上述成果, 可用于该地区同类岩石地基参考, 但是岩土体物理力学参数间的相关性取决于样本容量, 对上述相关内容的细化有待更多的试验对比和检验及完善。

参 考 文 献:

- [1] 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 Jing-wen, TIAN Qiang, YAN Guang-hui, 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))
- [2] 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(6): 67~71. (GUO Yong-chun, XIE Qiang, WEN Jiang-quan. Red beds distribution and engineering geological problem in China[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2007(6): 67~71. (in Chinese))
- [3] 南京地区建筑地基基础设计规范: DGJ32 J 12—2005[S].

2005. (Code for Design of Building Foundation in Nanjing Area: DGJ32 J 12—2005[S]. 2005. (in Chinese))
- [4] 广东省建筑地基基础设计规范: DBJ15—31—2003[S]. 2003. (Code for Design of Building Foundation in Guangdong Province: DBJ15—31—2003[S]. 2003. (in Chinese))
- [5] 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 Cheng-fang, CHEN Kui, XIONG Qi-dong, et al. Experiment study on bearing capacity of soft rock foundation in Chongqing area[J]. Building Structure. 2017, 47(9): 90–93. (in Chinese))
- [6] 建筑地基基础设计规范: GB50007—2011[S]. 2011. (Code for Design of Building Foundation: GB50007—2011[S]. 2011. (in Chinese))
- [7] 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))
- [8] 高文华, 朱建群, 张志敏, 等. 软质岩石地基承载力试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(5): 953–959. (GAO Wen-hua, ZHU Jian-qun, ZHANG Zhi-min, et al. Experiment study on bearing capacity of soft rock foundation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(5): 953–959. (in Chinese))
- [9] 彭柏兴, 金 飞, 王星华. 长沙国际金融中心软岩载荷试验及其成果分析[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(增刊 1): 156–160. (PENG Bai-xing, JIN Fei, WANG Xing-hua. Experimental study on bearing capacity of soft rock of Changsha International Finance Centre[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(S1): 156–160. (in Chinese))
- [10] 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): 451–455. (PENG Bai-xing, WANG Xing-hua. Comparative study on PMT and uniaxial compressive test in soft rock[J]. Rock and Soil Mechanics. 2006, 27(3): 451–455. (in Chinese))
- [11] 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, 28(增刊): 914–918. (PENG Bai-xing, LIU Yin-jiong, WANG Xing-hua. Application of the combined sound wave velocity-pressuremeter test method to soft rock in Red Layers[J]. Rock and Soil Mechanics. 2006, 28(S0): 914–918. (in Chinese))
- [12] 凌 潔. 基于改进岩基载荷试验及位移反分析的泥岩承载力研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2016. (LING Xiao. Research on Bearing Capacity of Mudstone Foundation Based on the Improved Rock Loading Test and Displacements Back Analysis[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2016. (in Chinese))
- [13] 成都地区建筑地基基础设计规范: DB51T5026—2001[S]. 2001. (Code for Design of Building Foundation in Chengdu: DB51T5026—2001 [S]. 2001. (in Chinese))
- [14] 中国建筑西南勘察设计研究院有限公司. 成都地区泥质软岩工程特性研究及利用[R]. 成都: 中国建筑西南勘察设计研究院有限公司, 2013. (China Southwest Geotechnical Investigation & Design Institute CO.LTD. Research and utilization of engineering characteristics of argillaceous soft rock in Chengdu Area[R]. Chengdu: China Southwest Geotechnical Investigation & Design Institute CO.LTD, 2013. (in Chinese))
- [15] 郑立宁, 康景文. 成都地区泥质软岩力学特性试验初探 [C]// 2013 年中国建筑学会年会, 2013, 北京. (ZHENG Li-Ning, KANG Jing-Wen. Experimental study on mechanical properties of argillaceous soft rock in Chengdu area[C]// 2013 Annual Meeting of Chinese Architectural Society, 2013, Beijing. (in Chinese))
- [16] 工程岩体试验方法标准: GB/T 50266—2013[S]. 2013. (Standard for Test Method of Engineering Rock Mass: GB/T 50266—2013[S]. 2013. (in Chinese))
- [17] 地基旁压试验技术标准: JGJ/T69—2019[S]. 2019. (Technical Standard for Foundation Pressuremeter Test: JGJ/T69—2019[S]. 2019. (in Chinese))
- [18] 高层建筑岩土工程勘察规程: JGJ72—2004[S]. 2004. (Code for Geotechnical Investigation of High Rise Buildings: JGJ72—2004[S]. 2004. (in Chinese))