

doi: 10.11835/j.issn.2096-6717.2020.026

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



红层软岩变形特性及基床系数取值试验研究

周其健^{1,2}, 郑立宁², 邓荣贵¹, 陈继彬², 罗益斌²

(1. 西南交通大学 土木工程学院, 成都 610031; 2. 中国建筑西南勘察设计研究院有限公司, 成都 610052)

摘要: 岩体变形特性及基床系数与基础内力、最终变形量和变形的均匀性直接相关, 合理确定基床系数对高层特别是超高层建筑至关重要。以成都市某超高层建筑论证为依托, 针对建筑物持力层中风化泥质软岩, 在井下平洞内进行不同压板尺寸和形状的平板载荷试验, 并取得原位试样进行室内岩块单轴抗压强度、常规三轴压缩试验和直接剪切试验, 根据室内及原位试验资料分析了岩体单轴抗压强度、弹性模量、承压板尺寸与基床系数的关系。结果表明: 地基基床系数具有随地基岩石单轴抗压强度增加而增加的趋势; 较小承压板试验数据离散性较大, 较大压板试验数据离散性较小; 如果红层软岩基床系数按照规范建议的黏土或砂土经验公式进行修正, 会引起较大误差; 红层软岩(中等风化泥岩)地基的基床系数与载荷板尺寸间呈双曲线型经验关系, 据此建议对建筑物红层软岩地基基床系数进行修正; 对红层软岩采用 500 mm 方形承压板试验获取的基床系数离散性较小。

关键词: 红层软岩; 变形; 基床系数; 平板载荷试验; 地基

中图分类号: TU443 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2020)04-0060-07

Experimental study on deformation characteristics and coefficient of subgrade reaction of red mudstone

Zhou Qijian^{1,2}, Zheng Lining², Deng Ronggui¹, Chen Jibin², Luo Yibin²

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, P. R. China, 2. China Southwest Geotechnical Investigation & Design Institute Co., Ltd., Chengdu 610052, P. R. China)

Abstract: The deformation characteristics of rock mass and the coefficient of subgrade reaction are directly related to the internal force, final deformation and deformation uniformity of foundation. Determination of reasonable coefficient of subgrade reaction is important for high-rise buildings, especially super high-rise buildings. Taken a super-high-rise building in Chengdu as example, plate loading tests of red-bed soft rock foundation with different plate sizes and shapes were carried out. Besides, the uniaxial compressive strength test (UCS), conventional triaxial compression test and direct shear test of red-bed mudstone were carried out. Based on the results of laboratory and in-situ test, the relationship between UCS, elastic modulus, bearing plate size and coefficient of subgrade reaction were analyzed. The results show that the coefficient of subgrade reaction has a tendency to increase with UCS of rock, and the smaller the bearing plate size is, the more discrete test data will be obtained. The coefficient of subgrade reaction of red-bed

收稿日期: 2019-09-24

基金项目: 四川省科学技术厅资助项目(2019GFW176)

作者简介: 周其健(1979-), 男, 博士生, 高级工程师, 主要从事特殊岩土工程特性研究, E-mail: 280460270@qq.com。

Received: 2019-09-24

Foundation items: Science & Technology Foundation of Sichuan Province (No. 2019GFW176)

Author brief: Zhou Qijian (1979-), PhD candidate, senior engineer, main research interests: engineering characteristics of special rock and soil, E-mail: 280460270@qq.com.

mudstone obtained by 500 mm square bearing plate test is recommended. It is found that the coefficient of subgrade reaction of red-bed mudstone layer has a hyperbolic empirical relationship with the plate size. If the coefficient of subgrade reaction of red-bed mudstone layer is modified according to the empirical formula of clay or sand recommended by the code, it will cause a large error. Therefore, it is suggested that the coefficient of subgrade reaction is modified based on the hyperbolic empirical relationship.

Keywords: red mudstone; deformation; coefficient of subgrade; plate load test; foundation

地下空间的开发利用和建筑物荷载及基础埋深急剧增加,红层软岩作为地基的情况逐渐增多,其变形等工程特性日益受到关注^[1-3]。地基变形特性的基床系数 K 是变形控制设计必需的参数,其大小直接影响地基反力的大小和基础内力,因此,合理确定基床系数值至关重要。基床系数确定的方法主要有试验和理论分析两个方面,试验研究方面,主要有平板载荷试验^[4]、压缩模量和标贯击数的经验公式^[5]、固结试验及三轴试验^[6], K_{30} 平板载荷试验、旁压试验、标贯试验及室内固结试验、基于变形模量的等量关系^[7];理论及数值分析方面,基床系数根据“终点沉降法”推导^[8],广义 Vesic 解答^[9],等固结度控制^[10]等方法。然而,上述研究大多针对土层进行研究,对岩石地基的研究较少,王雨等^[9-10]系统总结了基床系数相关表达式,发现基床系数与地基土弹性模量、泊松比,梁、板的宽度和刚度、埋深系数等有关。基床系数的确定相当复杂^[11-12],现有规范也给出了基于基准基床系数的砂土和黏性土的基床系数计算表达式,但对岩石地基却没有提及。随着建设规模增加,以红层软岩为基础持力层的超高层建筑越来越多,筏板地基基床系数取值大多基于经验,基于现场试验研究的比较少,软质泥岩基床系数的修正,特别是按照筏板板尺寸、形状和埋深进行修正还未见报道。

笔者依托成都市某 500 m 级超高层建筑的勘察论证,开展了红层泥质软岩地基不同尺寸承压板载荷试验,同时根据载荷试验部位取得的试样,进行室内单轴及三轴抗压特性试验,就泥质软岩地基变形特征,基床系数的取值原则及其受承压板尺寸影响等问题进行探讨。

1 工程地质概况

拟建的某超高层项目位于成都市天府新区,规划为建筑高度 500 m 左右,地上 137 层地下 5 层,是一座集商业、办公、酒店、观光于一体的综合性超级摩天大楼。初步拟选筏板基础,以中等风化泥岩为

持力层,基础埋深 36~40 m。场地地貌单元属宽缓浅丘,为剥蚀型浅丘陵地貌。岩土体主要由第四系全新统人工填土(Q_4^{ml})、第四系中更新统冰水沉积层(Q_2^{gl})以及下伏侏罗系上统蓬莱镇组(J_3p)砂、泥岩组成,局部基岩直接出露。拟建建筑物基底地层为中等风化泥岩(如图 1 所示),呈棕红~紫红色,局部青灰色,风化裂隙发育~较发育,结构部分破坏,岩体内局部破碎,钻孔岩芯呈饼状、柱状、长柱状,岩芯用手不易折断,敲击声清脆,刻痕呈灰白色。局部夹薄层强风化和微风化泥岩。RQD 为 40%~90%。



图 1 研究区中等风化泥岩钻孔岩芯

Fig. 1 Boring-core of moderately weathered mudstone in the study area

2 试验方案设计

2.1 原位承压板载荷试验

为论证筏板的可行性,通过在场开挖试验竖井和平洞,在试验平洞开展原位承压板试验。试验深井选择在核心筒外围 8 m 左右,共布置 3 口深井(人工开挖+旋挖成孔),编号 SJ01~SJ03。竖井内径 1 400 mm,护壁厚度 30 cm、深度均为 36~40 m、平洞在深井底部后横向开挖,平洞长 8 m,断面尺寸 2 m×2 m。通过超前钻确保洞底为中等风化泥岩。试验点与筏板底关系见图 2。在平洞底部分别开展 φ (直径)=300、500、800 mm、 B (边长)=300 mm 承压板试验,每个深井分别进行一组试验,共 12 组(试验过程见图 3),试验列表见表 1。

参考《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011)试验操作规程进行试验,试验反力利用洞顶岩体,试验点位和试验装置见图 2、图 3。

表1 试验方案表

Table 1 List of test scheme

试验名称	编号	试验参数	组数
原位承压板试验	SJ01	$\varphi=300,500,800$ mm	各1组
		$B=300$ mm	1组
	SJ02	$\varphi=300,500,800$ mm	各1组
		$B=300$ mm	1组
	SJ03	$\varphi=300,500,800$ mm	各1组
		$B=300$ mm	1组
室内岩块压缩试验	单轴	围压 1 000、2 000、3 000、	12组
		4 000、5 000 kPa	各6组
	三轴	围压 300、600、900 kPa	各2组

表2 现场试验数据

Table 2 The result of field tests

深井 压板尺寸	试验深度/ m	比例界限对		基床系数 MPa/m	UCS/ MPa
		应荷载/kPa	应变形/mm		
SJ01	$\varphi=300$	27.6	8 400	0.39	21 538 11.12
	$B=300$	27.6	7 200	0.4	18 000 10.12
	$\varphi=500$	29.8	8 100	1.923	4 212 6.05
	$\varphi=800$	29.8	5 400	6.48	833 6.55
SJ02	$\varphi=300$	30	7 200	3.28	2 195 3.88
	$B=300$	30	7 200	3.063	2 351 3.98
	$\varphi=500$	35.9	10 800	2.627	4 111 5.72
	$\varphi=800$	35.9	6 300	3.78	1 667 4.86
SJ03	$\varphi=300$	38	8 400	0.948	8 861 8.14
	$B=300$	38	7 200	1.039	6 930 8.94
	$\varphi=500$	39.6	9 000	5.94	1 515 8.07
	$\varphi=800$	39.6	8 400	2.128	3 947 8.47

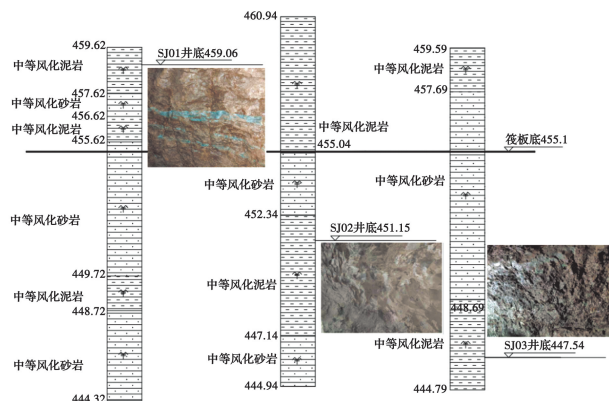


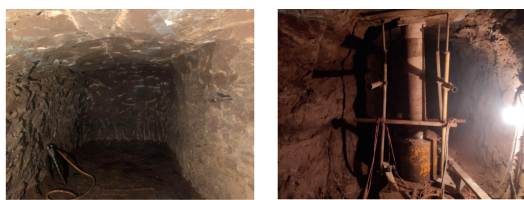
图2 钻孔柱状图及试验点位

Fig. 2 Borehole diagram and test location

3 不同围压三轴试验

为了揭示围压对岩体强度的影响,研究不同围压条件下岩体变形破坏特征。按不同围压(0、0.3、0.6、0.9、1.0、2.0、3.0、4.0、5.0 MPa)进行三轴试验。

图4给出了三轴压缩下红层软岩的宏观破坏模式。试样在不同围压作用下试样破坏特征有所不同,围压较低时,宏观破裂面主要为脆性破坏,局部出现劈裂破坏,对岩样宏观断口的分析表明,断口出现张拉、扭曲的痕迹,随着围压的增加,主控破裂面与最大主应力的夹角逐渐增大,破裂面也越来越平整,当围压增加至5 MPa时,部分岩块出现了破裂面呈一对共轭破裂面,岩样成鼓状破坏,断面倾角(即破裂面的法向与试验轴向的夹角 α)为 63.95° 。



(a) 试验平洞 (b) 试验过程照片

图3 试验平洞和试验装置

Fig. 3 Test tunnel and experiment equipment

2.2 天然抗压强度试验

在平洞内承压板试验点位置附近取样进行试验,分别开展室内岩块天然单轴压缩试验、室内岩块三轴压缩试验(正常围压和低围压),试验仪器分别为万能试验机、MTS-815型电液伺服刚性试验机。试验按照《工程岩体试验方法标准》(GB/T 50266—2013)。试验方案参见表1所示。岩块抗压强度试验结果见表2。由表2可知:岩块天然抗压强度试验值为 $3.88\sim 11.12$ MPa,平均值为7.16 MPa,标准值为5.92 MPa,属于极软岩。

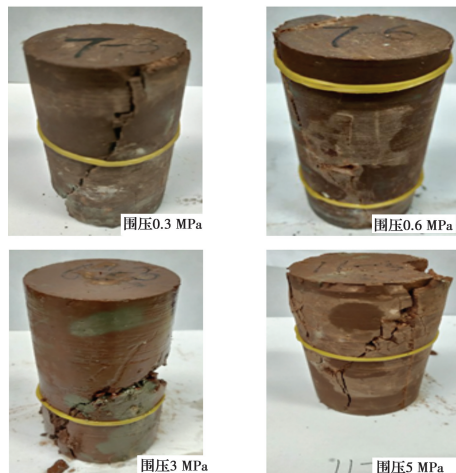


图4 试样抗压强度试验后照片

Fig. 4 Core sample Photos after compressive strength test

图 5 给出了试验红层泥岩常规三轴压缩的全过程应力-应变曲线。由图 5 可见,随着围压的增加,岩石的峰值强度和残余强度总体呈现逐渐增大的趋势。但是,个别岩块存在差异,围压从 3 MPa 增加至 5 MPa,岩样强度没有增加而有所降低,3 个同类型的岩样在围压 3 MPa 时,强度差异值可达到 15%。

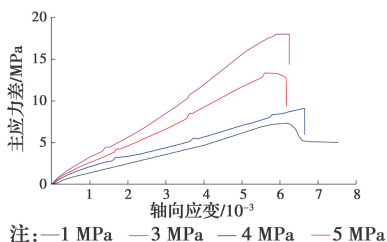


图 5 主应力差-轴向应变曲线

Fig. 5 Main stress difference-axial strain curve

4 原位剪切试验

对同一岩体进行现场大型剪切试验,试验结果如图 6 所示。由图 6 可知,不同应力条件下岩体的抗剪切强度差异较大,低应力时抗剪切强度差值 4 MPa 左右,高应力时抗剪切强度差值可达 10 MPa。根据最小二乘法得出岩体黏聚力为 0.8 MPa,内摩擦角为 37.9°。

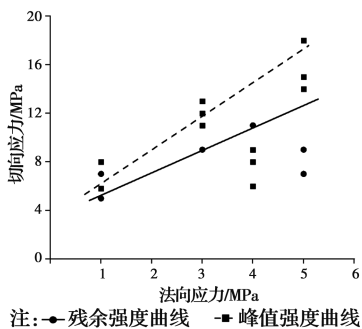


图 6 原位剪切试验切应力-压应力曲线

Fig. 6 Tangential stress-normal stress curve of in-situ Shear test

5 基床系数取值

5.1 原位承压板试验结果分析

基床系数的计算方法主要有静载试验法、基础平均沉降规范算法、经验值法等。对于超高层建筑而言,静载试验法是通用的确定方法。

根据现场载荷试验,统计各试验点位比例界限、比例界限对应变形、基床系数以及天然单轴抗压强度(Uniaxial Compressive Strength,简称 UCS)试验结果见表 2。荷载试验 P-S 曲线图 7 所示,曲线形态符合

层状岩体的变形特征,具有典型软弱泥岩特征。

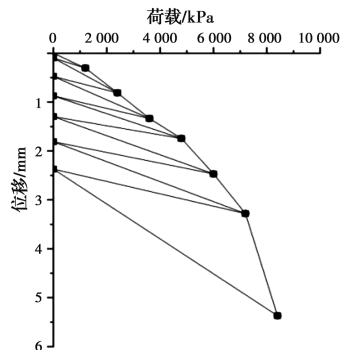


图 7 500 mm 压板平板载荷试验 P-S 曲线

Fig. 7 The p-s curve of 500 mm plate load test

由表 2 可知,测试所得基准基床系数具有较大偏差,差值可达 13 000 MPa/m,但随着试验压板的增大,基床系数的偏差逐渐减小,偏差缩小至 800 MPa/m 以内,偏差与压板尺寸呈负相关。由于红层泥岩地基成层特性和各层次裂隙发育的不同,其变形特性主要受控于岩块的变形和裂隙压缩变形,受裂隙分布影响较大。受裂隙发育尺度和位置的影响,基床系数与微裂隙及软弱夹层强相关,具有明显的尺寸效应特性。总体来看,红层软岩地基基床系数的修正与基础的大小、形状相关,随着基础尺寸增大呈减小趋势。

基床系数与天然单轴抗压强度关系如图 8 所示。由图 8 可知:基床系数与天然单轴抗压强度关联性不强,这是由于基床系数是岩体的综合反映,包含了岩石和裂隙,而天然单轴抗压强度只是岩块力学特征的反映。

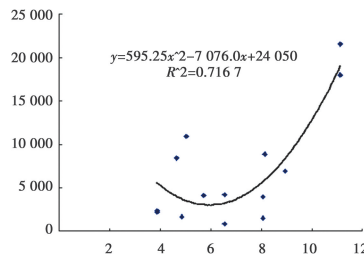


图 8 基床系数与天然单轴抗压强度散点图

Fig. 8 The relationship between UCS and coefficient of subgrade reaction

5.2 基床系数取值计算方法

基床系数最初基于温克尔模型发展起来,温克尔模型是把土体视为一系列侧面无摩擦的土柱和彼此独立的竖向弹簧,忽略了地基中的剪力,因而无法考虑地基中的应力扩散。为了弥补此缺陷,许多学者对其进行了改进,建立了许多双参数模型,如:费

罗年柯-鲍罗基楔模型、海腾尼模型、巴斯捷纳克模型、利夫金三参数模型。基床系数的计算方法主要有静载试验法、基础平均沉降反算法、经验值法等。

1) 静载试验法。静载试验法是现场的一种原位试验,通过此种方法可以得到荷载-沉降曲线(即 $P-S$ 曲线),根据得到的 $P-S$ 曲线, K 值的计算公式为: $K = (P_2 - P_1) / (S_2 - S_1)$; 其中, P_2 、 P_1 分别为基底接触压力和土自重压力, S_2 、 S_1 分别为相应于 P_2 、 P_1 的稳定沉降量。静载试验法计算出来的 K 值是不能直接用于基础设计的,必须经修正、折减后才能使用。

2) 按基础平均沉降 S_m 反算。用分层总和法按土的压缩性指标计算若干点沉降后取平均值 S_m , 得 $K = P / S_m$, 式中 P 为基底平均附加压力,用这种方法计算的 K 值不需要修正,JCAD 在“桩筏板有限元计算”中使用的就是这种方法。

3) 经验值法。根据经验取值。

表 3 统计了对基床系数的取值公式。对于超高层建筑,特别是筏板基础基床系数的取值,建筑设计单位更加倾向于试验,但是基于静载试验求得基床系数的修正方法一直困扰着工程师们。

表 3 典型基床系数取值表达式

Table 3 Typical expression of the coefficient of subgrade reaction

序号	表达式	备注
1	$k_{\infty} = 0.615 \frac{E}{C(1-\mu^2)b} \cdot \left[\frac{1}{C(1-\mu^2)} \frac{Eb^4}{E_b I_b} \right]^{0.11}$	Biott ^[13] (地基梁 + 弹性理论法)
2	$k_{\infty} = 0.65 \frac{E}{(1-\mu^2)B} \left(\frac{EB^4}{E_b I_b} \right)^{0.083}$	Vesic ^[14] (弹性地基梁)
3	$k_{\infty} = \frac{3.08}{\eta_h} \frac{E}{(1-\mu^2)B} \left(\frac{EB^4}{E_b I_b} \right)^{0.125}$	俞剑等 ^[15-16] (地理管线)
4	$K_{vl} = \frac{0.3}{b} K_v, K_s = K_{vl} \left(\frac{2l+b}{2l} \right)$ (1) $K_{vl} = \left(\frac{b+0.3}{b} \right)^2 K_v, K_s = K_{vl}$ (2)	规范 ^[17] 基于试验的修正, (1) 黏土 (2) 砂土

注:表中 E 为土体弹性模量; μ 泊松比; B 为梁的半宽; $E_b I_b$ 为梁截面的抗弯刚度; C 为接触面压力修正系数; η_h 为与管深度宽度的修正系数。

荷载试验是相当于半无限体表面作用竖向集中力,由 Boussinesq 解,得到半无限体表面任意点沉降 $u(z)$ 与集中力 P_0 关系为

$$u(z) = \iint_A p_0 \left\{ \frac{(1+\mu)}{2\pi E_s p R_{s\eta}} \left[2(1-\mu) + \frac{z^2}{R_{s\eta}^2} \right] \right\} ds d\eta$$

不难看出, Boussinesq 解未能考虑围压的影响,而本工程通过三轴试验,研究了红层泥岩不同围压下岩块的破坏模式,见图 9。由图 9 可以看出,随着围压的增加岩体的破坏角度增大,对于泥岩地基而言,也可以认为应力扩散角度增大,基床系数的取值不能按照 Boussinesq 解来确定,进而也可以推导出不能采用黏土、砂土的修正公式对泥岩基床系数进行修正。

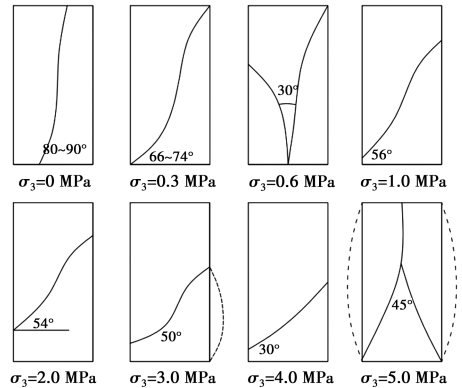
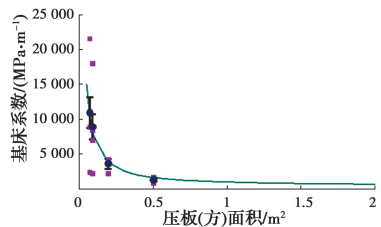


图 9 不同围压下岩样破坏模式

Fig. 9 Rock sample failure modes under different pressures

潘永坚等^[18-19]研究了尺寸效应、直径、高径比对基床系数的修正,由于红层软岩赋存环境和裂隙发育特性,作者也考虑相关因素,尝试根据表 2 将试验得到不同尺寸承压板的基床系数均值进行拟合,获得了基床系数和承压板关系曲线 $k = 200\pi(A^{-1.1} + 0.5)$ (见图 10),拟合相关系数为 0.80。由图 10 可知,曲线对于不同压板面积下基床系数的均值具有较好的拟合效果,基床系数随承压板尺寸增大呈递减趋势,但是随着基础面积的增大,逐渐趋于一个定值。



注: ■ 实测值 ● 均值 - 拟合 $y = 200\pi(x^{-1.1} + 0.5)$

图 10 基床系数与载荷板面积关系图

Fig. 10 Relationship between coefficient of subgrade and area of load plate

根据现场试验、室内试验分别获得了岩石变形模量和弹性模量,基于经验公式(4),将基床系数取值进行对比分析,见图 11。

$$k = \frac{E}{b \times k_{\text{con}}(1 - \mu^2)} \quad (4)$$

式中: k_{con} 为变形系数。

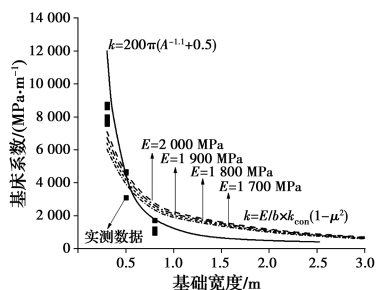


图 11 计算结果对比图

Fig. 11 Comparison of calculated results

由图 11 可见,试验拟合曲线、半理论半经验曲线计算得出的岩石基床系数随着基础宽度的增大均呈现出非线性减小的趋势,且基础宽度达到无限大时,计算数值趋近于某一定值。而半理论半经验公式的拟合效果在基础宽度小于 0.5 m 时,相对较好,随着基础宽度(即荷载影响范围)的增大,拟合效果与实际试验结果的偏差逐渐增大,其原因主要是半理论半经验公式的推导基于弹性地基理论得出,其假定岩体为均质弹性、各向同性的,并未考虑岩石的完整性程度、埋深、围压等的影响。

实际上,随着埋深、围压的增加,岩体应力扩散角的变化,按照单个弹簧的基床系数模型已经不再适用,因为弹簧之间的摩擦、剪切对基床系数的贡献度也会增加。对于红层软岩基床的系数的取值,由于其具有成层特性,同时变形特性受裂隙和围压影响,采用 300 mm 方板所得基准基床系数离散性较大。试验采用 500 mm 方板测值求平均值,按照式(4)进行修正,求得基床系数修正公式(5),再根据建筑基础实际尺寸进行修正。

$$k = 200\pi(A^{-1.1} + B) \quad (5)$$

6 结论

结合成都某超高层建筑建设项目,开展了软岩地基不同尺寸承压板荷载试验、室内岩块压缩试验、三轴试验、原位剪切试验,对岩体受荷变形特征、基床系数的取值原则、试验尺寸影响等问题进行分析,得到以下结论:

1) 红层软岩地基基床系数具有尺寸效应。由于其成层特性和各层次裂隙发育的不同,测试所得基准基床系数具有较大偏差,差值达 13 000 MPa/m,但随着试验压板尺寸的增大,基床系数的偏差逐渐减小,偏差缩小至 800 MPa/m 以内,偏差与压板尺

寸呈负相关。

2) 红层软岩破坏形式受围压影响较大,其变形特性不满足 Boussinesq 解的适用条件,基床系数的修正不能按照黏土或砂土的经验公式进行修正。

3) 基于现场承压板试验,采用 500 mm 方形承压板获取的基床系数具有较小的离散性,基床系数取值,可通过采用 500 mm 方板平板载荷得到基准基床系数测值求平均,再根据基础实际尺寸按 $k = 200\pi(A^{-1.1} + B)$ 修正。

参考文献:

- [1] ZHANG C L, JIANG G L, SU L J, et al. Dynamic behaviour of weathered red mudstone in Sichuan (China) under triaxial cyclic loading [J]. Journal of Mountain Science, 2018, 15(8): 1789-1806.
- [2] ZHANG S, ZHANG D S, ZHAO Q, et al. DEM investigation of the influence of minerals on crack patterns and mechanical properties of red mudstone [J]. Processes, 2019, 7(3): 162.
- [3] LIU Z, HE X F, FAN J, et al. Study on the softening mechanism and control of red-bed soft rock under seawater conditions [J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2019, 7(7): 235.
- [4] 张望喜, 陈宝, 肖龙杰, 等. 基于承载板试验的双参数地基基床系数的获取方法和试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2018, 45(9): 122-129.
ZHANG W X, CHEN B, XIAO L J, et al. Experimental study and evaluation methodology of foundation coefficients for two-parameter foundation model based on rigid plate loading tests [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2018, 45(9): 122-129. (in Chinese)
- [5] 牛真茹, 李飞飞, 庞炜. 合肥地区黏性土基床系数分布规律及相关性研究[J]. 铁道勘察, 2018, 44(4): 87-89.
NIU Z R, LI F F, PANG W. Study on distribution and correlation analysis of reaction coefficient of subgrade cohesive soil in Hefei area [J]. Railway Investigation and Surveying, 2018, 44(4): 87-89. (in Chinese)
- [6] 张俊杰, 郭桢, 张丽红. 基床系数室内测试方法研究[J]. 岩土工程技术, 2017, 31(6): 289-293.
ZHANG J J, GUO Z, ZHANG L H. The research on test method of laboratory subgrade coefficient [J]. Geotechnical Engineering Technique, 2017, 31(6): 289-293. (in Chinese)
- [7] 于永堂, 唐浩. 西安黄土基床系数变化规律及其测试方法的相关性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2017,

- 36(10): 2563-2571.
- YU Y T, TANG H. Reaction coefficient of subgrade on Xi'an loess and correlation analysis of methods of measurement [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36 (10): 2563-2571. (in Chinese)
- [8] 徐牧明, 陈定安. 一种新型的基准基床系数室内通用测试方法[J]. 长江科学院院报, 2017, 34(1): 109-113.
- XU M M, CHEN D A. A novel laboratory test method of basic subgrade reaction coefficient [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2017, 34(1): 109-113. (in Chinese)
- [9] 王雨, 陈文化. 地理梁与横观各向同性层状地基相互作用的广义 Vesic 解答[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(12): 2241-2248.
- WANG Y, CHEN W H. Generalized Vesic solutions for interaction of buried beams and transversely isotropic layered soils [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(12): 2241-2248. (in Chinese)
- [10] 王雨, 陈文化. 地层成层性对基床系数的影响分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(Sup2): 4304-4312.
- WANG Y, CHEN W H. Influence of soil stratification on coefficient of subgrade reaction [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(Sup2): 4304-4312. (in Chinese)
- [11] 艾智勇, 杨轲舒. 横观各向同性层状地基上弹性矩形板的参数研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(8): 1442-1446.
- AI Z Y, YANG K S. Parametric study on an elastic rectangle plate on transversely isotropic multi-layered soils [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(8): 1442-1446. (in Chinese)
- [12] 冯又全, 杨敏, 陈俊岭. 线性分布基床系数弹性地基梁有限单元法改进[J]. 岩土力学, 2014, 35(10): 3027-3034.
- FENG Y Q, YANG M, CHEN J L. Improvement of finite element method for beam on elastic foundation with linearly distributed coefficient of subgrade reaction [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(10): 3027-3034. (in Chinese)
- [13] BIOT M A. Bending of an infinite beam on an elastic foundation [J]. Journal of Applied Mechanics, ASME, 1937, 59: A1-A7.
- [14] VESIC A B. Bending of beams resting on isotropic elastic solid [J]. Journal of the Engineering Mechanics Division, 1961, 87(2): 35-53.
- [15] 俞剑, 张陈蓉, 黄茂松. 被动状态下埋地管线的地基模量[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(1): 123-132.
- YU J, ZHANG C R, HUANG M S. Subgrade modulus of underground pipelines subjected to soil movements [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(1): 123-132. (in Chinese).
- [16] YU J, ZHANG C R, HUANG M S. Soil-pipe interaction due to tunnelling: Assessment of Winkler modulus for underground pipelines [J]. Computers and Geotechnics, 2013, 50: 17-28.
- [17] 高层建筑岩土工程勘察标准: JGJ 72—2017 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
- Standard for geotechnical investigation of tall buildings: JGJ 72-2017 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017. (in Chinese)
- [18] 潘永坚, 李高山, 刘生财, 等. 水平基准基床系数试验方法与取值研究[J]. 地下空间与工程学报, 2018, 14(3): 712-718.
- PAN Y J, LI G S, LIU S C, et al. Study on the test method and value of the horizontal subgrade coefficient [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2018, 14(3): 712-718. (in Chinese)
- [19] 潘永坚, 李高山, 欧阳涛坚, 等. 宁波软土地区基准基床系数试验方法与取值标准研究[J]. 水文地质工程地质, 2016, 43(4): 103-107, 112.
- PAN Y J, LI G S, OUYANG T J, et al. A study of the test method and value standard of the modulus of reference subgrade reaction in the Ningbo soft soil area [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2016, 43(4): 103-107, 112. (in Chinese)