

上海地区基坑底部粉质黏土回弹变形参数分析

楼晓明^{1,2}, 李德宁^{1,2}, 杨敏^{1,2}

(1. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092)

摘要: 根据压缩试验的回弹—再压缩曲线, 得到了根据回弹指数及孔隙比计算回弹模量的理论公式. 通过对大量上海地区相关土层勘察资料的统计分析, 得到了上海地区⑤层、⑥层、⑧层粉质黏土回弹指数、压缩指数与塑性指数和比贯入阻力之间的线性关系. 由于塑性指数和比贯入阻力不受取样扰动影响, 可利用这些统计公式估算回弹指数, 并结合上述理论公式进一步求得回弹模量. 经多个实例验证, 此方法精度可满足工程实践需要, 且方便可行. 研究结果可用于缺少回弹变形试验参数工程的回弹变形量验算.

关键词: 回弹模量; 回弹指数; 压缩指数; 塑性指数; 比贯入阻力

中图分类号: TU447

文献标识码: A

Statistical Analysis for Rebound Deformation Parameters of Silty Clay at Bottom of Deep Excavation in Shanghai

LOU Xiaoming^{1,2}, LI Dening^{1,2}, YANG Min^{1,2}

(1. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: According to the rebound and recompression curve of compression test, the theoretical formulation to compute rebound modulus through rebound index and void ratio is given. The linear correlations of rebound index, compression index with plasticity index and specific penetration resistance for the silty clay of the fifth, sixth and eighth layer in Shanghai are observed according to a large number of survey data. Plasticity index and specific penetration resistance are not affected by sampling. Therefore, the rebound index can be obtained by means of the previous statistical formulation. Then the rebound modulus can be obtained through the theoretical formula. This method is proved to be precise and convenient for engineering practice by several instances. The results can be used for checking the rebound deformation in

conditions of lacking rebound deformation parameters from tests.

Key words: rebound modulus; rebound index; compression index; plasticity index; specific penetration resistance

随着近几年城市建设的快速发展, 深大基坑不断涌现, 对于这种大规模卸荷情况, 如何能准确预测坑底回弹变形量, 一直是岩土工程界研究的热点问题. 基坑开挖卸荷, 自重应力释放, 势必引起基坑底部土体的回弹隆起变形, 回弹量大小是判断基坑稳定性的重要指标.

现阶段坑底回弹量计算方法很多, 有规范方法^[1]、残余应力法^[2]、解析法^[3-6]和经验公式^[7-10]等, 但各种方法最终都涉及对回弹模量或回弹指数的取值, 回弹模量或回弹指数的取值不当, 将直接影响到坑底回弹量预测结果的准确性. 现有计算方法所得结果与实际情况有较大差异, 如果根据实测结果反算, 土体的回弹模量值远大于一般计算取值^[11], 说明回弹模量与回弹指数的取值方法值得进一步研究.

笔者收集了上海地区 44 个工程勘察报告, 统计分析了深基坑开挖主要影响土层的回弹变形参数与土层主要物理力学参数相互关系, 并最终可通过回弹指数推求相应土层的回弹模量. 值得注意的是, 这些勘察报告中的回弹模量均通过 1 维压缩回弹试验得到.

1 压缩指数与回弹模量关系

1.1 回弹指数与压缩指数的关系

图 1 为土的回弹—再压缩($e-\lg p$)曲线, 从图 1 可以看到, 当压力较大时, 压缩和回弹的 $e-\lg p$

均接近直线,直线段的斜率以压缩指数 C_c 和回弹指数 C_e 表示,压缩指数与回弹指数稳定性较好,一定阶段时不随压力变化而变化,因此研究压缩指数与回弹指数规律具有明显的工程实践意义。

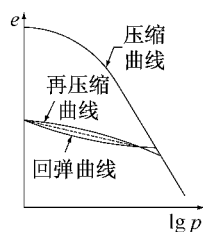


图1 土的回弹—再压缩曲线

Fig.1 Curve of rebound and recompression

一般黏性土的 $C_e \approx (0.1 \sim 0.2) C_c$ [12], 虽然此式未能给出确定的两指数相互关系,但一定程度上反映压缩指数与回弹指数之间存在一定的比例关系,表明回弹指数明显小于压缩指数,对于工程实践有重要指导意义。

1.2 回弹模量与回弹指数关系

回弹模量与回弹指数之间存在一定的关系,推导过程如下:

根据回弹模量定义

$$E_r = \Delta p / \Delta \epsilon = \frac{\Delta p}{\Delta H / H_1} \quad (1)$$

式中: E_r 为回弹模量; Δp 为竖向应力变化量; $\Delta \epsilon$ 为对应应变变化量。

根据压缩试验规律

$$\frac{\Delta H}{H_1} = \frac{e_1 - e_2}{1 + e_2} \quad (2)$$

式中: e_1 为卸荷到一定荷载 p_1 后对应孔隙比; e_2 为卸荷前荷载 p_2 对应的初始孔隙比。

根据回弹指数定义

$$C_e = \frac{e_1 - e_2}{\lg(p_2 / p_1)} \quad (3)$$

综合式(1)、(2)和(3)可得回弹模量

$$E_r = \frac{(p_2 - p_1)(1 + e_2)}{C_e \lg(p_2 / p_1)} \quad (4)$$

通常勘察资料中,可以给出回弹模量的工程比较少,一般只提供压缩模量和压缩指数等基本参数,利用式(4),只要通过相应经验公式求得回弹指数,即可得到相应土层的回弹模量。

回弹模量与土层卸荷比存在密切关系,通过式(4)计算上海世博 500 kV 地下变电站⑤层粉质黏土回弹模量与卸荷比 R 关系曲线,与潘林有 [13] 试验所得温州地区原状粉质黏土的 E_r-R 曲线进行比较,

如图2所示。其中,卸荷比 $R = (p_{\max} - p_i) / p_{\max}$; p_{\max} 为最大预压荷载, p_i 为卸荷后上覆荷载。

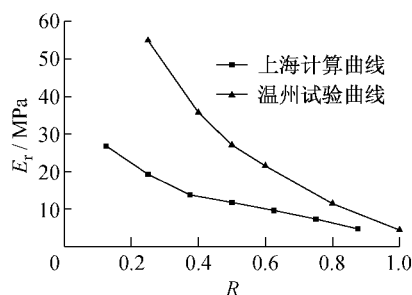


图2 回弹模量与卸荷比关系

Fig.2 Curve of $E_r - R$

由图2可以看出,式(4)得到的 E_r-R 曲线与潘林有试验所得到的 E_r-R 曲线虽由于土性不同在数值上有所差别,但曲线沿卸荷比变化规律基本相似,随着卸荷比的增加,回弹模量不断减小,由此可证明式(4)能够正确反映回弹模量 E_r 与卸荷比之间的关系,至于精度将在下文予以检验。

2 上海地区⑧层粉质黏土回弹变形参数统计分析

上海⑧层粉质黏土层顶埋深在 40 m 以下,中压缩性,土性较好,是上海地区超深基坑开挖主要影响土层。笔者收集到的上海地区勘察资料中以此层的压缩指数、回弹指数和各物理力学性质参数最为丰富,故以此层粉质黏土为主要统计分析对象。

2.1 回弹指数与压缩指数的关系

笔者收集选取了 35 组上海地区勘察资料,进行统计分析,得出回弹指数与压缩指数关系如图3所示。从图中统计数据情况可以看出,虽两者关系有一定的离散性,但仍可发现回弹指数与压缩指数相关性良好,两者存在明显的线性比例关系。

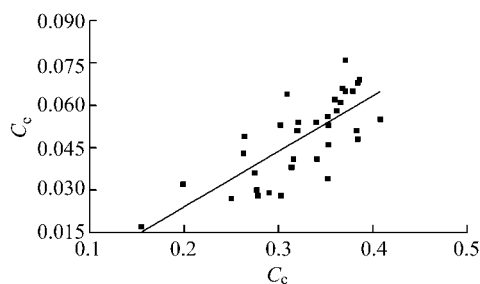


图3 回弹指数与压缩指数关系

Fig.3 Correlation between rebound index and compression index

根据图3, C_e 与 C_c 有良好的线性增长关系, 对其进行线性回归分析, 得 C_e 与 C_c 关系式为

$$C_e = 0.196C_c - 0.015 \quad (5)$$

由以上关系可知, 随着压缩指数增加, 回弹指数也线性增大, 两者成正比关系, 0.196 接近经验系数 0.1~0.2 的上限值。

2.2 压缩指数、回弹指数与塑性指数关系

塑性是表征黏性土物理性能的重要特征, 一般以塑性指数 I_p 表示。塑性指数是由重塑土测定的, 它不受土体取样扰动、试验条件等各种因素的影响, 也与土样的应力条件和应力历史无关, 可反映黏性土的颗粒大小、形状、矿物成分及其所占份额多少、孔隙水与黏土矿物的化学作用等因素的综合影响, 它定义为试样由半固态到液态的含水量的变化范围。黏性土的塑性可用水膜理论来解释, 并认为它是一种与黏土颗粒表面活性有关的现象, 黏粒含量愈高、亲水矿物愈多, 水膜厚度愈大, 则土样塑性指数愈大, 不同的塑性指数大小的土类将具有明显不同的力学性状。

研究表明, 黏性土的许多力学特性和变形参数均与塑性指数有密切的关系。Skempton 在 1957 年就曾建立了一个由塑性指数 I_p 推求天然黏土层不排水抗剪强度 C_u 的经验公式

$$C_u/p'_0 = 0.11 + 0.0035I_p \quad (6)$$

式中: C_u 为不排水抗剪强度; p'_0 为黏土层上覆固结压力。

Alpan^[14]曾提出了一个利用塑性指数 I_p 来估算静止侧压力系数 K_0 的方法。Nakase^[15]对人工配制和天然海相黏土 2 个系列共 12 种试样的饱和黏性土进行了大量三轴及侧限压缩试验, 表明压缩指数 C_c 和回弹指数 C_e 与塑性指数 I_p 之间存在较好的线性相关性, 且随 I_p 的增大而增大。另外 Schofield 等^[16]也曾提出了一个压缩指数 C_c 与塑性指数 I_p 的关系式

$$C_c = 0.0135I_p \quad (7)$$

国内白冰等^[17]结合试验研究分析了饱和软黏土的塑性指数对压缩指数、回弹指数、次固结系数、初始再固结体积压缩系数等变形参数影响的定量关系, 发现相关性较好。所以建立压缩指数和回弹指数与塑性指数之间的定量关系, 有很大的学术意义和应用价值。

在本文中笔者共收集了上海地区 17 例有⑧层粉质黏土压缩指数 C_c 、回弹指数 C_e 和塑性指数 I_p 的工程勘察资料, 对原始数据进行统计分析, 如图 4

和图 5 所示。

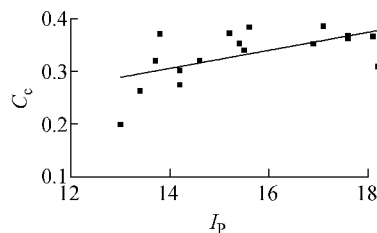


图4 压缩指数与塑性指数的关系

Fig.4 Correlation between compression index and plasticity index

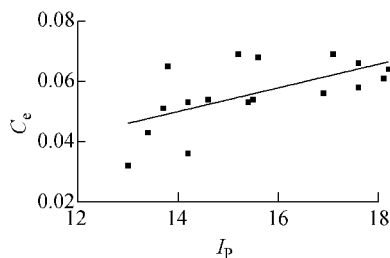


图5 回弹指数与塑性指数的关系

Fig.5 Correlation between rebound index and plasticity index

从图 4 和图 5 统计结果可以看出, C_c 、 C_e 与 I_p 之间虽存在一定的离散性, C_c 、 C_e 随 I_p 增加而线性增长的趋势十分明显。

根据图 4 和图 5 所示统计数据, 通过线性回归, 可得公式

$$C_c = 0.017I_p + 0.067 \quad (8)$$

$$C_e = 0.003I_p - 0.005 \quad (9)$$

从统计结果来看, C_c 和 C_e 随 I_p 有良好的线性增长关系。从以上分析可以看出, 随着 I_p 增加, C_c 与 C_e 增大, 可压缩性和可回弹性相应增大。

2.3 压缩指数、回弹指数与比贯入阻力关系

由于静力触探比贯入阻力 P_s 是原位测试指标, 不受取样扰动和应力状态改变的影响, 深受工程界的欢迎。国内岩土工程界很早就对静力触探比贯入阻力 P_s 与地基承载力、压缩模量和不排水抗剪强度之间的关系进行了大量的统计分析研究, 发现比贯入阻力 P_s 与土的主要物理力学参数存在良好的相关性, 但未见有比贯入阻力 P_s 与回弹指数相互关系的相关报道。本文共搜集到了 20 例上海地区同时具有压缩指数、回弹指数和比贯入阻力 P_s 的勘察资料, 对其进行了整理统计分析, 如图 6 和图 7 所示。

可以看出, 由于场地不同及试验条件的差异, 压缩指数 C_c 和回弹指数 C_e 与比贯入阻力 P_s 存在一定的离散性, 但仍可见, C_c 、 C_e 与 P_s 呈比较明显的线性变化关系, 故可以一元线性回归分析来构建 C_c 。

与 P_s 和 C_e 与 P_s 关系,可得公式

$$C_e = -0.028P_s + 0.405 \quad (10)$$

$$C_e = -0.007P_s + 0.067 \quad (11)$$

式中 P_s 单位为 MPa。由以上分析可以得出,随着 P_s 增大, C_e 和 C_c 减小,土层可压缩性与可回弹性减小。

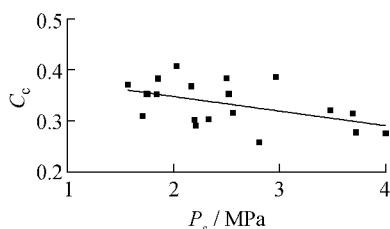


图6 压缩指数与比贯入阻力关系

Fig.6 Correlation between compression index and specific penetration resistance

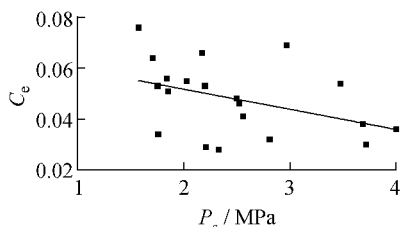


图7 回弹指数与比贯入阻力关系

Fig.7 Correlation between rebound index and specific penetration resistance

3 上海地区⑤层⑥层粉质黏土压缩指数与回弹指数的关系

3.1 上海地区⑤层粉质黏土压缩指数与回弹指数的关系

上海⑤层粉质黏土呈流塑至软塑状态,层顶埋深一般约在 15 m 左右,是上海基坑开挖回弹影响的主要土层之一。本文共搜集到 31 例相关上海勘察资料,整理统计压缩指数与回弹指数的关系如图 8 所示。

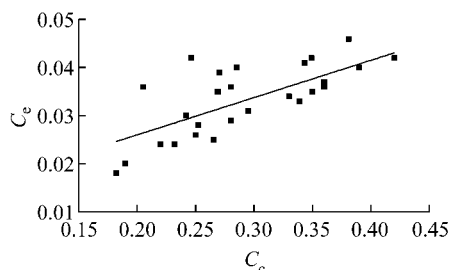


图8 上海地区⑤层土回弹指数与压缩指数关系

Fig.8 Correlation between rebound index and compression index of the 5th layer soil in Shanghai

由图 8 可以得出,上海地区 55 层粉质黏土的 C_e 与 C_c 虽有一定的离散性,但总体来看两者线性相关性良好。通过一元线性回归分析,得两者关系式

$$C_e = 0.077C_c + 0.01 \quad (12)$$

由式(12)可以看出,上海地区⑤层粉质黏土的回弹指数 C_e 随压缩指数 C_c 变大而线性增加,0.077 低于经验系数 0.1~0.2 的下限。

3.2 上海地区⑥层粉质黏土压缩指数与回弹指数的关系

上海地区⑥层粉质黏土,层顶埋深 20 m 左右,硬可塑,土性较好。整理分析相关带⑥层粉质黏土参数的 14 例勘察数据,得散点图如图 9 所示。

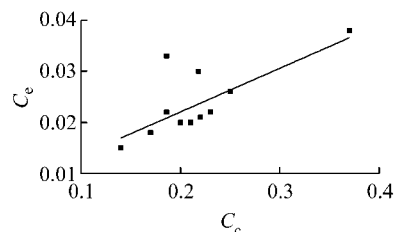


图9 上海地区⑥层粉质黏土压缩指数与回弹指数关系

Fig.9 Correlation between rebound index and compression index of the 6th layer in Shanghai

对相关数据进行拟合,可得压缩指数与回弹指数关系公式

$$C_e = 0.085C_c + 0.004 \quad (13)$$

0.085 低于经验系数 0.1~0.2 的下限。对于上海地区其他土层,如⑦层粉土也是深基坑开挖回弹变形主要影响土层之一,但因搜集到的有效数据有限,不足以准确反映土层各物理力学性质参数之间的相互关系,故暂不做统计分析。

4 工程实例及应用

上文主要统计分析了上海地区⑤层、⑥层和⑧层粉质黏土压缩指数、回弹指数和其他土的主要物理力学性质参数的关系,但实际应用过程中,回弹模量的工程实践意义更为明显,故本文尝试以统计得到的经验公式推求回弹指数和回弹模量。

利用本文统计分析得出的经验公式对统计点外的工程实例进行计算,并与实测值进行对比,计算公式估算值误差情况。

4.1 上海地区⑧层粉质黏土统计公式验证

利用式(5),(8)~(11)在分别已知压缩指数 C_c 、塑性指数 I_p 或比贯入阻力 P_s 情况下,对相应土层变形参数进行估算,并计算其误差,详细情况见表

1—3所示。

表1 上海地区⑧层土压缩指数与回弹指数公式验证

Tab.1 Verification of C_e - C_e equation for the 8th layer soil in Shanghai

工程名称	实测 C_e	实测 C_e	估算 C_e	误差/%
万象国际广场	0.340	0.054	0.052	3.7
长城广场	0.383	0.051	0.060	17.6
普陀区某工程	0.353	0.053	0.054	1.9

由表1—3可以看出,针对上海地区⑧层粉质黏

土,利用本文得到的统计公式,在已知 I_p 或 P_s 情况下,可对压缩指数 C_e 和回弹指数 C_e 做出估算,也可以式(5)在已知压缩指数 C_e 情况下,对回弹指数 C_e 进行预估,且预估值精度可以保证工程实践的应用。

4.2 上海地区⑤层粉质黏土统计公式验证

利用式(12)在已知压缩指数 C_e 情况下估算相应回弹指数 C_e ,并计算误差,如表4所示,最大误差为5.3%。

表2 上海地区⑧层土回弹指数、压缩指数与塑性指数实例验证

Tab.2 Verification of C_e - I_p and C_e - I_p equations for the 8th layer soil in Shanghai

工程名称	实测 C_e	实测 C_e	I_p	估算 C_e	估算 C_e	C_e 误差/%	C_e 误差/%
静安区某工程	0.321	0.054	16.8	0.353	0.045	9.9	15.9
普陀区某工程	0.353	0.053	16.3	0.344	0.044	2.5	17.0
凯旋路某工程	0.386	0.069	17.1	0.358	0.046	7.3	7.3

表3 上海地区⑧层土回弹指数、压缩指数与比贯入阻力实例验证

Tab.3 Verification of C_e - P_s and C_e - P_s equations for the 8th layer soil in Shanghai

工程名称	实测 C_e	实测 C_e	P_s /MPa	估算 C_e	估算 C_e	C_e 误差/%	C_e 误差/%
静安区某工程	0.321	0.054	2.11	0.346	0.052	7.8	3.7
虹口商场	0.352	0.056	1.84	0.353	0.054	0.3	3.6
普陀区某工程	0.353	0.053	1.75	0.356	0.055	0.8	3.6

表4 上海地区⑤层土压缩指数与回弹指数公式验证

Tab.4 Verification of C_e - C_e equation for the 5th layer soil in Shanghai

实例	C_e	C_e	估算 C_e	C_e 误差/%
西门子上海中心	0.252	0.028	0.029	3.6
某轨道交通工程	0.360	0.036	0.038	5.3
杨浦区某工程	0.242	0.030	0.029	3.3

4.3 上海地区⑥层粉质黏土统计公式验证

根据式(13)在已知压缩指数 C_e 情况下预测相应土层回弹指数 C_e ,并计算预估值误差,详见表5所示,最大误差为10%。

4.4 推求回弹模量实例应用

勘察资料中,可以给出回弹模量的工程通常比

较少,一般只提供压缩模量和压缩指数等参数。先利用本文统计公式,由压缩指数 C_e 、塑性指数 I_p 或比贯入阻力 P_s 推求回弹指数 C_e ,结合式(4)即可求出回弹模量。

表5 上海地区⑥层土压缩指数与回弹指数公式验证

Tab.5 Verification of C_e - C_e equation for the 6th layer soil in Shanghai

实例	C_e	C_e	估算 C_e	误差/%
上海某高架工程	0.23	0.022	0.024	9
上海某轨交工程	0.21	0.020	0.022	10
上海某住宅小区工程	0.20	0.020	0.021	5

已知上海闸北区不夜城406地块⑤层和⑥层土物理力学性质参数如表6所示。

表6 上海闸北区不夜城406地块回弹模量预测

Tab.6 Prediction of resilient modulus from No.406 Project (everbright city, Zhabei District, Shanghai)

土层编号	土层名称	实测 C_e	实测 $E_{r0.3 \sim 0.025}$ /MPa	e_0	预测 C_e	预测 $E_{r0.3 \sim 0.025}$ /MPa	$E_{r0.3 \sim 0.025}$ 误差/%
⑤	粉质黏土	0.324	17.67	1.043	0.035	14.87	15.8
⑥	粉质黏土	0.190	26.79	0.689	0.020	21.52	19.7

根据本文公式由压缩指数推算回弹指数,然后再根据可考虑应力水平及初始孔隙比的公式(4),预测闸北区不夜城406地块⑤层、⑥层粉质黏土的回弹模量,计算误差在20%之内,可以满足一般工程实践的需要。

5 结语

(1) 根据现阶段统计资料,上海地区⑤层、⑥

层、⑧层粉质黏土回弹指数 C_e 与压缩指数 C_e 之间存在良好的线性相关性,得到各土层回弹指数 C_e 与压缩指数 C_e 关系公式:⑤层土 $C_e = 0.077C_e + 0.01$;⑥层土 $C_e = 0.085C_e + 0.004$;⑧层土 $C_e = 0.196C_e - 0.015$;经工程实例验证,预测公式可满足现阶段一般工程实践的需要,与经验公式 $C_e \approx (0.1 - 0.2)C_e$ 略有不同。

(2) 上海地区⑧层粉质黏土的压缩指数 C_e 和回

弹指数 C_e 与塑性指数 I_p 有经验公式, $C_e = 0.017I_p + 0.067$, $C_e = 0.003I_p - 0.005$, 并经实例验证其可用于工程实践计算。

(3) 上海地区⑧层粉质黏土的压缩指数 C_c 和回弹指数 C_e 与比贯入阻力 P_s 之间存在一定的线性相关性, $C_c = -0.028P_s + 0.405$, $C_e = -0.007P_s + 0.067$, 经验证经验公式可用于工程计算。

(4) 利用上海地区⑤层、⑥层和⑧层 C_e — C 、 E_r — C_e 关系, 可以推算出相应土层的回弹模量, 且计算精度可满足工程计算的需要。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国建设部. GB 50007—2002 建筑地基基础设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
The Propessional standards coonption ansup of peoplels republic of China GB50007-2002 Code for design of building foundation [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2002.
- [2] 刘国彬, 侯学渊. 软土基坑隆起变形的残余应力法[J]. 地下工程与隧道, 1996(2): 2.
LIU Guobin, HOU Xueyuan. Residual stress method on rebound deformation of excavation in soft ground[J]. Underground Engineering and Tunnels, 1996(2): 2.
- [3] 宰金珉. 开挖回弹量预测的简化方法[J]. 南京建筑工程学院学报, 1997(2): 23.
ZAI Jinmin. The Simplified method of prediction for the foundation ditch rebound of excavation [J]. Journal of Nanjing Architectural and Civil Engineering, 1997(2): 23.
- [4] 张云军, 宰金珉, 梅国雄. 基坑开挖的若干简化计算方法[J]. 苏州科技学院学报: 工程技术版, 2005, 18(4): 46.
ZHANG Yunjun, ZAI Jinmin, MEI Guoxiong. Simplified calculation methods of pit excavation [J]. Journal of University of Science and Technology of Suzhou: Engineering and Technology, 2005, 18(4): 46.
- [5] 郑列威, 胡蒙达. 长条形深基坑开挖引起基坑底土体的回弹解析理论计算[J]. 建筑施工, 2004, 26(3): 196.
ZHENG Liewei, HU Mengda. Analytic calculation of bottom soil resilience caused during excavation of a long strip foundation pit [J]. Building Construction, 2004, 26(3): 196.
- [6] 黄院雄. 软土基坑工程的土压力与回弹研究[D]. 上海: 同济大学土木工程学院, 2000.
HUANG Yuanxiong. The earth pressure&rebound of excavation in soft clay [D]. Shanghai: Tongji University College of Civil Engineering, 2000.
- [7] 赵树德. 土力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001.
ZHAO Shude. Soil mechanics [M]. Beijing: Higher Education Press, 2001.
- [8] 戴标兵, 范庆国, 赵锡宏. 深基坑工程逆作法的实测研究[J]. 工业建筑, 2005, 35(9): 54.
DAI Biaobing, FAN Qingguo, ZHAO Xihong. A study on monitoring of up-down construction for deep excavation engineering[J]. Industrial Construction, 2005, 35(9): 54.
- [9] 张国霞, 张乃瑞, 张凤林. 病房楼工程基坑回弹和地基沉降的观测分析[J]. 土木工程学报, 1980(1): 23.
ZHANG Guoxia, ZHANG Nairui, ZHANG Fenglin. Observation and analysis of excavation rebound and foundation settlement of a hospital building in Beijing [J]. China Civil Engineering Journal, 1980(1): 23.
- [10] 陈永福, 曹名葆. 上海地区软黏土的卸荷—再加荷变形特性[J]. 岩土工程学报, 1990, 12(2): 9.
CHEN Yongfu, CAO Mingbao. The deformation characteristics of soft clay under unloading and reloading in Shanghai [J]. Chinese journal of Geotechnical Engineering, 1990, 12(2): 9.
- [11] 刘国彬, 侯学渊. 软土的卸荷模量[J]. 岩土工程学报, 1996, 18(6): 18.
LIU Guobin, HOU Xueyuan. Unloading modulus of the Shanghai soft clay [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 18(6): 18.
- [12] 高大钊. 土力学与基础工程[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999.
GAO Dazao. Soil mechanics and foundation engineering [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1999.
- [13] 潘林有, 胡中雄. 深基坑卸荷回弹问题的研究[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(1): 101.
PAN Linyou, HU Zhongxiong. Experimental study on the resilience of pit under unloading [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(1): 101.
- [14] Alpan I. The empirical of the coefficient K_0 and K_{0r} [J]. Soils and Foundations, 1967, 7(1): 31.
- [15] Nakase A, Kamei T, Kusakabe O. Constitutive parameters estimated by plasticity index [J]. Journal of Geotech Eng: ASCE, 1998, 114(7): 884.
- [16] Schofield A N, Worth C P. Critical state soil mechanics [M]. London: McGraw Hill Book Co, 1968.
- [17] 白冰, 周健, 章光. 饱和软黏土的塑性指数对其压缩变形参数的影响[J]. 水利学报, 2001(11): 51.
BAI Bing, ZHOU Jian, ZHANG Guang. Effect of plasticity index of saturated soft clay on its deformation parameters [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001(11): 51.