

DOI: 10.11779/CJGE202101011

基坑支挡结构设计若干问题探讨

盛志强^{1, 2, 3, 4}, 滕延京^{3, 4}, 李平^{3, 4}

(1. 建筑安全与环境国家重点实验室, 北京 100013; 2. 国家建筑工程技术研究中心, 北京 100013; 3. 中国建筑科学研究院有限公司地基基础研究所, 北京 100013; 4. 建研地基基础工程有限责任公司, 北京 100013)

摘要: 根据基坑开挖应力路径的室内试验和现场实测数据, 从土工试验方法、土体强度指标、地基土水平反力系数等方面分析了现在基坑工程支挡结构设计存在的一些问题。研究成果如下: 支挡结构设计参数的获取应考虑主动区及被动区地基土的应力路径, 并恢复地基土的固结状态。基坑开挖后主动区和浅部被动区土体抵抗剪切破坏的能力大于以常规 CU 强度指标的计算结果, 这有利于工程安全; 深部被动区土体抵抗剪切破坏的能力小于以常规 CU 强度指标的计算结果, 对于地基土被动抗力发挥较大的工程, 需验算嵌固深度, 确保被动抗力小于极限被动土压力。定义了被动区基坑开挖“强影响区”, 并给出了该区域深度的计算方法。以相应应力路径下的土体割线模量值作为地基土水平反力系数, 讨论推导了作用于支挡结构上的分布土反力与支挡结构水平位移的计算公式, 其计算结果更接近工程实际。本次研究对以变形控制为主的基坑设计具有较好的指导意义。

关键词: 应力路径; 固结状态; 应力应变关系; 归一化; 水平反力系数

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2021)01-0094-08

作者简介: 盛志强(1987—), 男, 博士, 工程师, 主要从事地基基础工程技术方面的研究工作。E-mail: sheng123zq@163.com。

Discussion on several problems in design of retaining structures of deep excavation

SHENG Zhi-qiang^{1, 2, 3, 4}, TENG Yan-jing^{3, 4}, LI Ping^{3, 4}

(1. State Key Laboratory of Building Safety and Built Environment, Beijing 100013, China; 2. National Engineering Research Center of Building Technology, Beijing 100013, China; 3. Institute of Foundation Engineering, China Academy of Building Research, Beijing 100013, China; 4. CABR Foundation Engineering Co., Ltd., Beijing 100013, China)

Abstract: Based on the laboratory tests on excavation stress paths and field test data, some problems in the design of the supporting structures of foundation pits are analyzed. The idea is proposed that the consolidation state of the foundation soil should be recovered and the stress paths corresponding to the active and passive areas of foundation soils should also be considered. It is found that the capability of soil resistance to shear failure in active and shallow passive areas is greater than the calculated results using the conventional CU strength index, and it is beneficial to engineering safety. However, the capability of the soils in the deep passive zone to resist shear failure is less than the calculated results using the conventional CU strength index. For the projects requiring a large degree of resistance capability of the passive foundation soils, the embedment depth of the supporting structures needs to be checked to ensure that the passive resistance is less than the limit passive earth pressure. The ‘strong impact zone’ of excavations in the passive zone is proposed, and the method for calculating its depth is developed. The value of secant modulus of soils under the corresponding stress paths is employed as the horizontal reaction coefficient of the foundation soils, and the formula for calculating the reaction force of distributed soils acting on the supporting structures and the horizontal displacement of the supporting structures is deduced. It can reflect the characteristics of load deformation of foundation soils under the action of the excavation stress path, and the calculated results are closer to those of engineering reality. This study has a good guiding significance for the design of foundation pits mainly dominated by deformation control.

Key words: stress path; consolidation state; stress-strain relationship; normalization; horizontal reaction coefficient

0 引言

目前, 针对基坑工程, 土压力理论还不够完善, 实际设计计算往往采用经验取值, 或按照郎肯土压力、

基金项目: 中国建筑科学研究院有限公司青年基金项目
(20181602331030009)

收稿日期: 2020-03-25

库仑土压力理论及弹性地基梁板计算, 然后再根据经验进行修正。此种设计计算理念的不妥之处主要有: ①基坑开挖引起土体卸荷, 其应力路径较复杂, 目前计算参数的获取是采用常规加载的剪切试验, 土样所处应力状态与实际工况差别较大; ②现在基坑工程设计以控制变形为主, 应考虑相应工况下地基土的荷载变形特征, 仅以强度指标计算极限土压力是不合理的; ③以弹性地基梁板法计算作用于支挡结构上的土反力及水平位移, 假定土反力与水平位移呈线性比例关系, 这也是基坑规范推荐的方法, 且认为地基土水平反力系数沿深度按线性分布, 而地基土为非线性材料, 其水平反力系数与应力状态相关, 并非常数, 也不能简单地认为沿深度线性分布。

近代土力学研究表明, 地基土的荷载变形特征不仅取决于土体最初和最终的应力状态, 而且与其应力历史和应力路径有关。基坑开挖是主动区土体侧向卸荷、被动区土体竖向卸荷又受支挡结构挤压再侧向加载过程, 加、卸荷状态下土体的力学参数差异较大。基坑工程设计时应考虑周围土体的应力历史及施工过程对其造成的应力状态的变化, 确定适用于工程实际情况的土体工程特性。

本文基于基坑开挖卸荷应力路径的室内试验和现场实测数据, 从土工试验方法、土体强度指标、地基土水平反力系数等方面分析现在基坑工程支挡结构设计存在的问题, 探讨符合基坑工程实际工况的参数获取手段和设计计算方法。

1 土工试验方法

基坑工程多在城市建筑密集区, 不允许基坑开挖时周边地基土发生破坏或产生较大变形, 因此, 绝大多数情况下, 地基土处于静止土压力状态和极限破坏状态之间, 单以强度指标不能准确地评价基坑支护设计的安全性和经济合理性, 应更多地考虑基坑工程施工过程中地基土的荷载及变形特性。现阶段, 基坑工程设计仍采用加载条件下得到的强度指标, 工程勘察取回试样直接在指定的应力状态下进行固结快剪或固结不排水剪, 并将剪切围压等同于固结围压。实际上, 剪切围压对应的是基坑开挖卸荷后主动区地基土的侧压力和被动区地基土的上覆压力; 而固结围压对应的是初始固结应力, 不因基坑开挖短期卸荷而改变。因此, 上述试验方法并未考虑应力历史及开挖卸荷应力路径对土体力学性质的影响, 其确定的设计参数难免与工程实际存在差异。

通常情况下基坑开挖较快, 地基土卸荷并发生剪切变形时来不及排水或排水不充分, 因此, 土工试验

的正确做法应是先通过密度试验、高压固结试验、 K_0 试验确定地基土前期固结压力, 并在前期固结应力状态下预固结稳定, 然后在基坑开挖卸荷路径下进行不排水剪切, 以此得到应力应变关系曲线及强度指标。

基坑开挖过程中土体的应力状态有显著的时空效应, 之前大多数学者的研究^[1-2]将应力路径简化为: 主动区上覆压力不变、侧向压力减小; 被动区上覆压力减小、侧向压力不变。上述应力路径的简化分析, 对主动区基本无异议; 而被动区的应力路径比较适合于地基土受支挡结构挤压作用较小、侧压力增加较小的情况, 即符合被动区深部地基土的受力情况, 该区域地基土一般不会破坏, 而对易受支挡结构挤压的浅部地基土适用性较差, 尤其是该区域地基土被动抗力达到极限的情况。本文考虑上述情况, 将应力路径分为以下3种, 图1为土体应力路径分布图。

应力路径 a: 上覆压力不变, 侧向压力减小, 即 K_0 状态固结之后, 不排水情况下 σ_1 不变, σ_3 减小, 以模拟基坑开挖主动区土体应力状态;

应力路径 b: 上覆压力减小, 侧向压力增大, 土体最大主应力方向发生变化, 由原来垂直向变为水平向, 即平均主应力状态固结后, 不排水情况下平均主应力减小至不同应力值, 然后 σ_1 增大, σ_3 不变(小于初始平均主应力), 以模拟基坑开挖浅部被动区支挡结构附近土体应力状态;

应力路径 c: 上覆压力减小, 侧向压力不变, 即 K_0 状态固结后, 不排水情况下 σ_3 不变, σ_1 减小, 以模拟基坑被动区较深位置处土体应力状态。

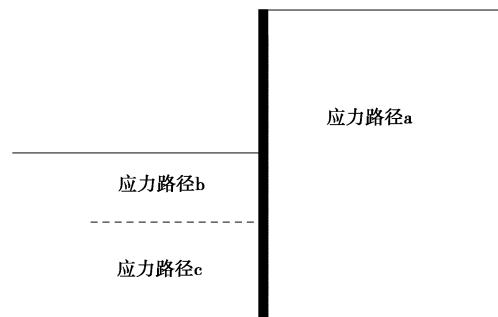


图1 应力路径分布区域

Fig. 1 Distribution area of stress path

研究表明^[3-4], 以上3种应力路径作用下的土体应力应变关系与常规加载状态不同, 且有较好的归一化特性, 应力应变关系归一化曲线如图2, 其中, $-\varepsilon$ 为拉伸应变, ε 为压缩应变。应力路径b作用下的地基土, 在剪切围压小于初始平均固结应力时, 因初始平均固结应力预固结处理, 土体破坏强度、相同应力下的土体模量均大于常规CU强度试验所得结果, 即说明该路径下地基土的实际极限被动土压力大于以常规

CU 强度试验所得参数的计算结果, 该区域被动区土体受支挡结构等挤压产生的实际变形小于以加荷状态所得参数的理论计算结果。

综上所述, 研究基坑开挖地基土荷载-变形特征及其强度指标, 应恢复地基土固结状态, 并进行相应应力路径作用下的剪切试验。

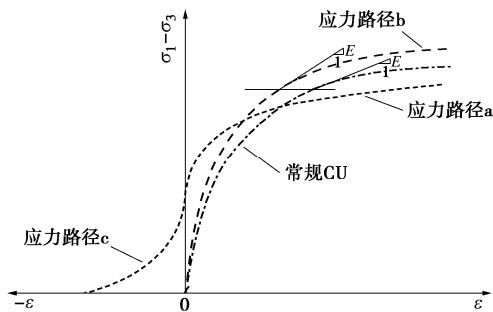


图 2 基坑开挖应力路径作用下应力应变关系

Fig. 2 Stress-strain relationship under excavation stress path

2 土体卸荷强度指标及土压力

已有研究表明^[5-8], 加、卸荷状态下土体的抗剪强度指标不同。图 3 给出了加、卸荷状态下土体的应力莫尔圆及强度包线, 其中, γh 为初始上覆压力, K_0 为静止侧压力系数, σ_c 为初始平均固结应力, σ_a 、 σ_p 分别为以常规 CU 强度指标所得主动土压力和被动土压力, $\gamma h_{卸荷}$ 为开挖卸荷后上覆压力, $\sigma_{a卸荷}$ 、 $\sigma_{p卸荷}$ 为以 σ_c 预固结后 UU 强度指标所得主动土压力和被动土压力。通常认为常规 CU 剪切试验得到的强度包线是一条直线, 固结围压即为剪切围压, 得到的强度指标记为 c_{CU} , φ_{CU} ; 而对于初始平均固结压力预固结之后的 UU 剪切试验, 其强度包线以初始平均固结应力为界分为两段直线, 在剪切围压大于初始平均固结应力时, 强度指标记为 c_{CUU+} , φ_{CUU+} , 在剪切围压小于初始平均固结应力时, 强度指标记为 c_{CUU-} , φ_{CUU-} 。研究发现: $c_{CU} < c_{CUU-} < c_{CUU+}$, $\varphi_{CU} > \varphi_{CUU-} > \varphi_{CUU+}$ 。

对于主动区, 基坑开挖后上覆压力 γh 不变, 侧压力逐渐减小至极限主动土压力, 此时地基土的强度指标记为 c_{CUU-} , φ_{CUU-} 。对于被动区, 则分两种情况, 一是浅部土层, 土方开挖引起的卸荷附加应力较大, 上覆压力减小至 $\gamma h_{卸荷}$ 且小于初始平均固结应力 σ_c , 侧压力受支挡结构挤压逐渐增加至极限被动土压力, 此时地基土的强度指标与主动区地基土的强度指标相等, 为便于比较, 同样记为 c_{CUU-} , φ_{CUU-} ; 二是深度土层, 土方开挖引起的卸荷附加应力较小, 上覆压力减小至 $\gamma h_{卸荷}$ 且不小于初始平均固结应力 σ_c , 侧压力受支挡结构挤压逐渐增加至极限被动土压力, 此时地基土的强度指标记为 c_{CUU+} , φ_{CUU+} 。由此可见, 相对

于常规 CU 剪切试验得到的强度指标, 以考虑地基土固结状态及应力路径的预固结 UU 剪切试验确定的强度指标计算得到的极限主动土压力 $\sigma_{a卸荷}$ 较小, 浅部地基土的极限被动土压力 $\sigma_{p卸荷}$ 较大, 深度地基土的极限被动土压力 $\sigma_{p卸荷}$ 较小。这说明基坑开挖后主动区和浅部被动区土体抵抗剪切破坏的能力大于以常规 CU 强度指标的计算结果, 这对基坑工程的安全性是有利的; 深部被动区土体抵抗剪切破坏的能力小于以常规 CU 强度指标的计算结果, 这对以变形控制为主的基坑设计影响不明显, 但对地基土被动抗力发挥较大的工程, 应重视这一点, 需验算嵌固深度, 确保被动抗力小于极限被动土压力。

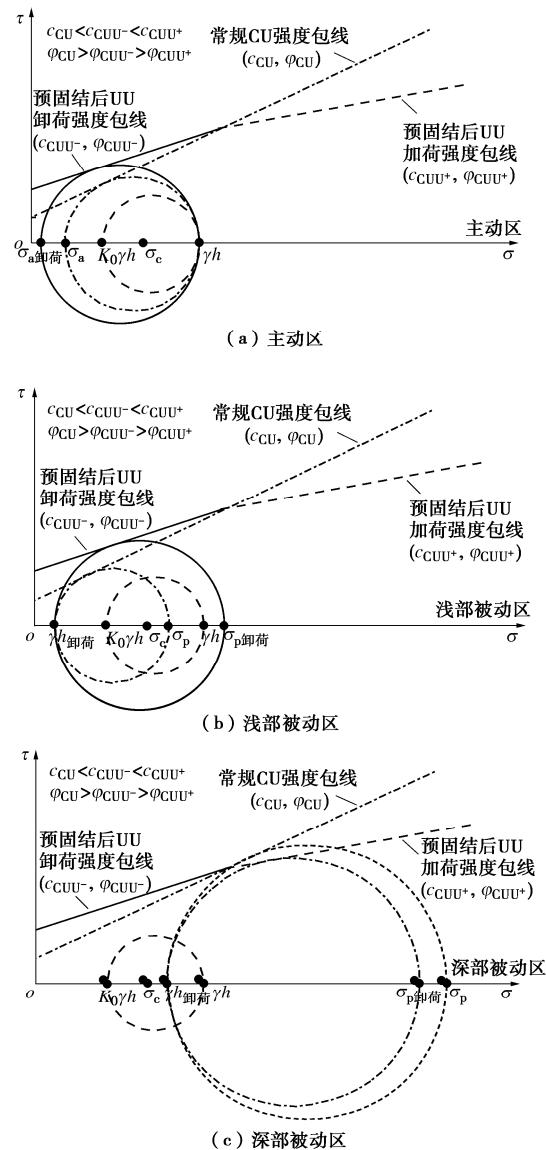


图 3 加、卸荷土体的应力莫尔圆及强度包线

Fig. 3 Mohr circles of stress and strength envelopes of soils under loading and unloading conditions

3 基坑开挖“强影响区”

将被动区地基土易受支挡结构挤压产生水平位

移的区域定义为基坑开挖“强影响区”，分析这一区域深度可为被动区地基土加固深度的确定提供依据。对于现在以变形控制为主的基坑设计，被动区地基土比较接近应力路径c的状态，因此，以该路径下地基土的荷载变形特征对“强影响区”进行分析。

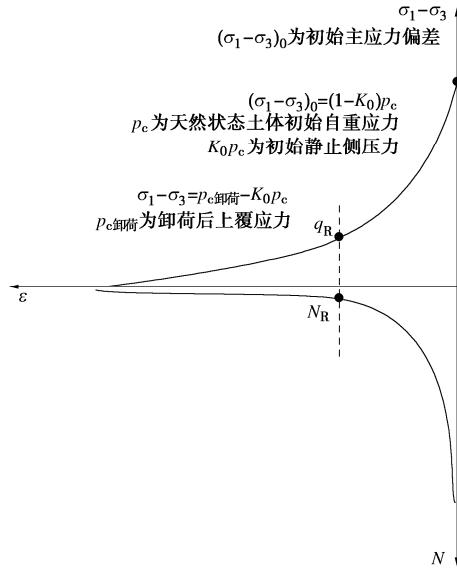


图4 N 与土体应力应变的关系曲线

Fig. 4 Relation curve between N and stress-strain of soils

应力路径c作用下地基土应力应变关系存在归一化特征，其归一化公式为

$$\frac{(\sigma_1 - \sigma_3) - (\sigma_1 - \sigma_3)_0}{\sigma_m} = \frac{\varepsilon}{a + b\varepsilon} \quad (1)$$

式中 $\sigma_1 - \sigma_3$ 为主应力偏差， $(\sigma_1 - \sigma_3)_0$ 为初始主应力偏差， $(\sigma_1 - \sigma_3) - (\sigma_1 - \sigma_3)_0$ 为基坑开挖后不同深度卸荷量，等于被动区地基土附加应力 $p_{0,d}$ ； σ_m 为初始平均主应力， $\sigma_m = \frac{\sigma_{1c} + 2\sigma_{3c}}{3}$ ，其中， σ_{1c} 为初始上覆压力，即后面提到的 p_c ， σ_{3c} 则为初始侧压力，等于 $K_0 p_c$ ； ε 为土体应变，应力应变关系曲线中规定为负值； a ， b 为系数。

式(1) 可变换为

$$N = \frac{p_c}{p_{0,d}} = \frac{ap_c}{\sigma_m \varepsilon} + \frac{bp_c}{\sigma_m} \quad (2)$$

式中， N 为初始上覆压力与附加应力的比值，负值表示卸荷，其绝对值表示初始上覆压力对开挖卸荷量的倍数。图4给出 N 与土体应变的关系曲线，为双曲线类型，曲线可分为两段，将前、后两段转折点处（曲率 K 最大）的主应力偏差记为 N_R ，当附加应力增大至 N 值小于 N_R 时，土体应变开始明显增加，以 N_R 对应的深度记为 d_R ，则 d_R 以上至坑底范围内的地基土易受支挡结构挤压发生变形。 d_R 从坑底起算，即为“强影响区”深度。

基坑开挖后附加应力及上覆压力可由如下公式计

算得到：

① 基坑开挖后，可认为坑底土体附加应力 p_0 ：

$$p_0 = -\sum \gamma_i h_i \quad (3)$$

② 坑底往下至不同深度的附加应力 $p_{0,d}$ ：

$$p_{0,d} = \alpha_d p_0 = -\alpha_d \sum \gamma_i h_i \quad (4)$$

式中 γ_i ， h_i 分别为基坑顶面至底面范围内 i 层土的重度和厚度，如有地下水，取浮重度； $\sum h_i = H$ ， H 为基坑开挖深度； α_d 为基坑底面以下基坑中心计算点的附加应力系数，参考《建筑地基基础设计规范：GB 50007—2011》^[9]有关附加应力系数的规定进行取值，从坑底起算深度 d 。

③ 坑底往下至不同深度的上覆压力 $p_{c,卸荷}$ ：

$$p_{c,卸荷} = \sum \gamma_j h_j + p_{0,d} = \sum \gamma_j h_j - \alpha_d \sum \gamma_i h_i \quad (5)$$

式中， γ_j ， h_j 分别为基坑顶面至计算深度范围内 j 层土的重度和厚度，即 $\sum \gamma_j h_j$ 为基坑开挖之前自然状态下地基土自重应力 p_c ， $\sum h_j = H + d$ 。

4 地基土水平反力系数

4.1 现行规范法

目前，基坑开挖支挡结构设计，采用经典土力学理论和基于经验参数的弹性地基梁板设计计算，计算参数采用加载条件下得到的抗剪强度指标及地基变形刚度。

以现行规范^[10]为例，同样以弹性地基梁板计算理论建立作用支挡结构的土反力与其变形的关系，而对于地基土水平反力系数，则采用“m”法。

作用于支挡结构的分布土反力 p_s ：

$$p_s = k_s v + p_{s0} \quad (6)$$

式中 p_{s0} 为初始土反力强度，通过主动土压力强度标准值公式计算，但须采用支挡结构内侧计算点的土中竖向应力标准值和水压力值，且不考虑地基土黏聚力的影响； k_s 为土的水平反力系数； v 为支挡结构在分布土反力计算点的水平位移值。

基坑内侧土的水平反力系数为

$$k_s = m(z - H) \quad (7)$$

式中 m 为土的水平反力系数的比例系数； z 为计算点距地面的深度， $z = \sum h_j = H + d$ 。

土的水平反力系数的比例系数为

$$m = \frac{0.2\varphi^2 - \varphi + c}{v_b} \quad (8)$$

式中， v_b 为支挡结构在坑底处的水平位移量， c ， φ 为土的黏聚力、内摩擦力，通过三轴固结不排水剪试验或固结快剪试验获得。

4.2 考虑应力路径影响的计算方法

(1) 初始土反力

基坑开挖瞬时, 被动区地基土仍处于侧限状态, 初始土反力强度应为侧限状态的侧向应力, 并非采用强度指标计算得到的极限强度。上覆应力减小, 地基土处于一定的超固结状态, 可近似以其侧压力系数 $K_{0(\text{OC})}$ 计算:

$$K_{0(\text{OC})} = K_{0(\text{NC})} \text{OCR}^a, \quad (9)$$

超固结比:

$$\text{OCR} = \frac{p_c}{p_{c\text{卸荷}}} = \frac{\sum \gamma_j h_j}{\sum \gamma_j h_j - \alpha_d \sum \gamma_i h_i}, \quad (10)$$

初始土反力为

$$p_{s0} = K_{0(\text{OC})} p_{c\text{卸荷}} \\ = K_{0(\text{NC})} \left(\frac{\sum \gamma_j h_j}{\sum \gamma_j h_j - \alpha_d \sum \gamma_i h_i} \right)^a \left(\sum \gamma_j h_j - \alpha_d \sum \gamma_i h_i \right). \quad (11)$$

式中 $K_{0(\text{OC})}$ 为基坑开挖后被动区土体侧压力系数; $K_{0(\text{NC})}$ 为基坑开挖前天然状态被动区土体侧压力系数; OCR 为超固结比; a 为经验系数, 建议取 0.5^[11]。

(2) 地基土水平反力系数

水平反力系数与土体模量密切相关。本次考虑应力路径, 为反映地基土不同应力状态的荷载-变形特征, 以应力路径 c 作用下的地基土的割线模量 G 作为地基土水平反力系数, 见图 4, 即

$$k_s = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3) - (\sigma_1 - \sigma_3)_0}{\varepsilon}. \quad (12)$$

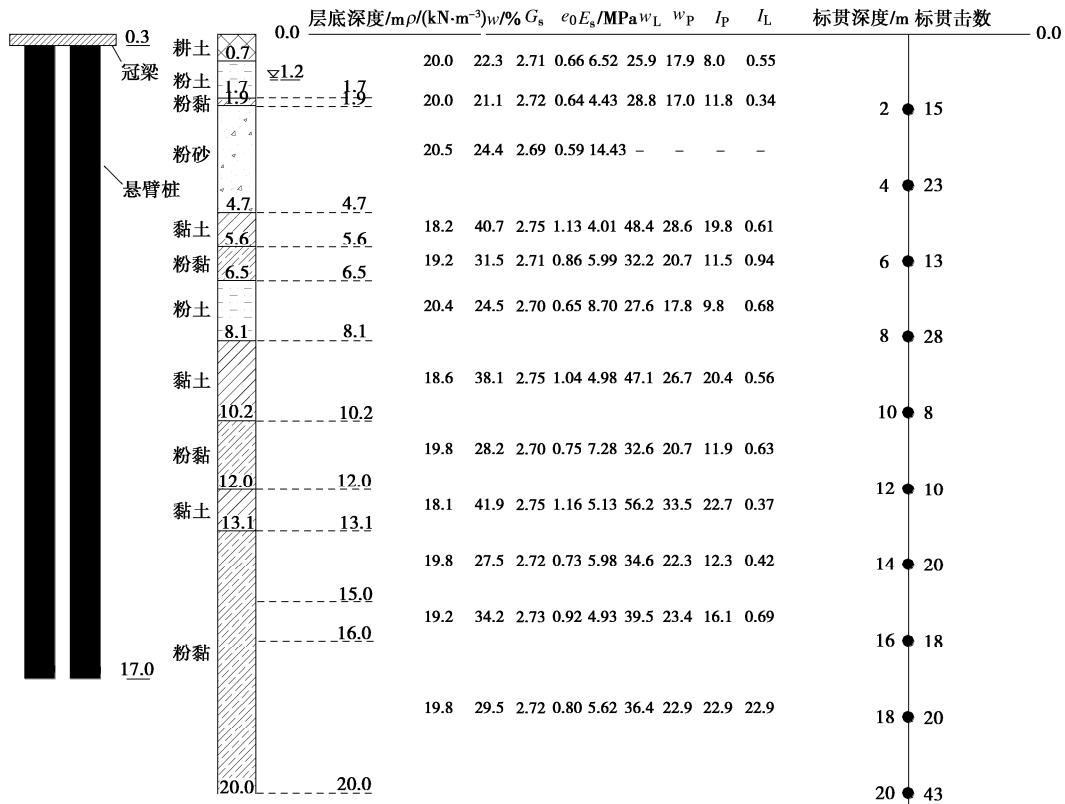


图 5 土层分布及悬臂式排桩埋深情况

Fig. 5 Soil layer distribution and buried depth of cantilever row piles

(3) 作用于支挡结构的分布土反力 p_s

综合上述考虑地基土应力状态及其相应的荷载-变形特征, 依据弹性地基梁板理论, 作用于支挡结构的分布土反力 p_s 为

$$p_s = k_s v + p_{s0} = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3) - (\sigma_1 - \sigma_3)_0}{\varepsilon} v + \\ K_{0(\text{NC})} \left(\frac{\sum \gamma_j h_j}{\sum \gamma_j h_j - \alpha_d \sum \gamma_i h_i} \right)^a \left(\sum \gamma_j h_j - \alpha_d \sum \gamma_i h_i \right). \quad (13)$$

5 实例分析

实例为一个基坑现场足尺试验。试验场地为耕地, 之前并无大范围大深度的开挖回填, 为自然状态下沉积而成的原状土。勘察结果表明, 场地土质水平向分布较为均匀, 垂直向成层明显; 通过密度试验及高压固结试验, 确定该场地土体为正常固结土, 地下水位埋深 1.2 m。

基坑长度为 10 m, 宽度为 6 m。基坑三面边坡按 1:0.5 自然放坡, 一面采用悬臂式排桩支护结构形式, 土体参数选用常规三轴 CU 剪切试验所得结果, 见表 1。排桩 8 根, 桩径为 800 mm, 桩长为 17 m, 桩间距为 1.2 m, 采用泥浆护壁反循环成孔工艺; 冠梁宽 1.0 m, 高 300 mm。土层分布及悬臂桩桩周土情况见图 5。计算方法采用弹性地基梁板法, m 值由式 (8) 计算得到。

表1 土体参数

Table 1 Soil parameters

土层	层底埋深/m	土层名称	$\gamma/(kN \cdot m^{-3})$	K_0	c_{CU}/kPa	$\phi_{CU}/(^{\circ})$
#1	1.7	粉土	20.0	0.33	15.3	32.1
#2	1.9	粉黏	20.0	0.37	23.5	10.2
#3	4.7	粉砂	20.5	0.33	8.3	33.2
#4	5.6	黏土	18.2	0.43	21.6	12.5
#5	6.5	粉黏	19.2	0.37	20.7	20.1
#6	8.1	粉土	20.4	0.34	20.3	29.1
#7	10.2	黏土	18.6	0.43	31.5	14.3
#8	12.0	粉黏	19.8	0.36	30.8	29.4
#9	13.1	黏土	18.1	0.42	29.6	19.1
#10	15.0	粉黏	19.8	0.38	23.8	21.7
#11	16.0	粉黏	19.2	0.40	35.6	20.7
#12	20.0	粉黏	19.8	0.38	23.8	21.7

为便于数据采集及分析, 在中间两根支护埋置测斜管, 且沿深度每隔 2 m 埋设土中土压力盒。其中, 土中土压力盒的埋设是预先固定于钢筋笼, 待钢筋笼下放到位后, 通过弹簧钢带将土压力盒应力感应面挤压贴近孔壁, 浇筑混凝土, 成桩后土压力盒应力感应面两侧分别贴紧支护桩和土; 测斜管及土压力盒埋设方法详见参考文献[3], 本文不做详细叙述, 图 6 为土压力盒及测斜管埋置示意图。降水后地下水位埋深 12 m, 认为降水时间较短, 未引起地基土再次固结, 且不考虑降水后部分地基土处于非饱和状态。

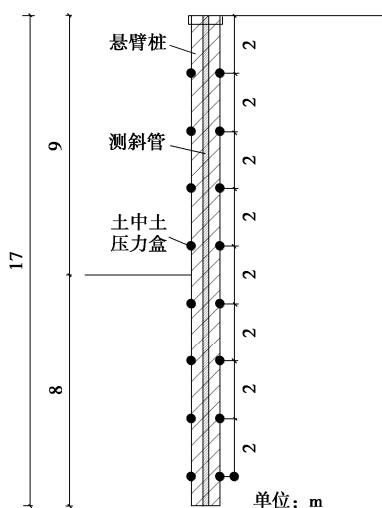


图6 测试设备埋置示意图

Fig. 6 Schematic diagram of embedment of test equipments

共分了五步开挖, 开挖深度分别为 1.5, 3.5, 5.5, 7.5, 9.0 m, 开挖至第四步时, 主动区地表开始出现裂缝, 开挖至第五步后, 裂缝发展, 排桩变形加大, 地基土处于极限状态或部分处于极限状态, 此时桩顶水平位移实测值为 41.0 mm, 仅为桩顶水平位移计算值 (85.4 mm) 的 48%; 常规设计计算结果中开挖第四步的桩顶水平位移已超过开挖第五步实测值。可见, 常规支挡结构设计方法所得结果与实际相差较大, 其

计算结果不足以准确指导基坑工程设计与施工。每步开挖工况下悬臂桩水平位移设计计算值与实测值见图 7, 开挖第一步悬臂桩变形较小, 限于测试精度, 未给出该工况数据。

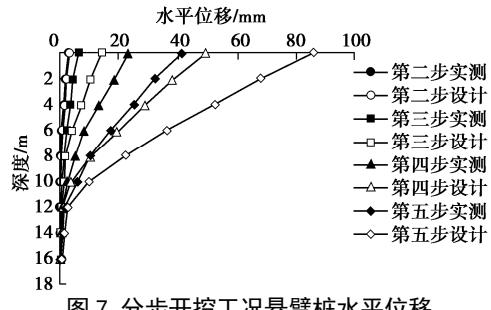


图7 分步开挖工况悬臂桩水平位移
Fig. 7 Horizontal displacements of cantilever piles in stepwise excavation

按应力路径 c 进行剪切试验, 得到相应的应力应变关系, 图 8 为土压力盒埋设处的土体应力应变关系。依据 N_R 的计算结果, 得到每一步基坑开挖“强影响区”深度, 见表 2。随着基坑开挖深度的增加, “强影响区”深度也在增加, 基坑设计时应重点分析该区域地基土的力学及变形性质。

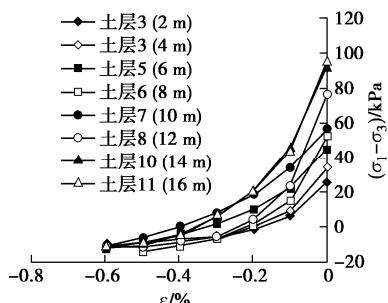


图8 应力路径 c 作用下各土层地基土应力应变关系

Fig. 8 Stress-strain relationship under stress path c

表2 基坑开挖“强影响区”深度

Table 2 Depths of "strong impact zone" for excavation

工况	第一步 (开挖深度) (1.5 m)	第二步 (3.5 m)	第三步 (5.5 m)	第四步 (7.5 m)	第五步 (9.0 m)
d_R/m	0.5	1.1	1.9	2.2	2.5

注: d_R 为“强影响区”深度, 从坑底算起。

根据式(7)计算地基土水平反力系数, 记为“现行规范法”; 根据式(12)及应力应变关系曲线确定地基土水平反力系数, 记为“应力路径法”; 根据实测数据及式(13)反推地基土水平反力系数, 记为“实测验证法”, 嵌固段悬臂桩水平位移见表 3。将 3 种方法得到的地基土水平反力系数进行比较, 见表 4, 采用“应力路径法”和“实测验证法”计算得到的地基土水平反力系数大于“现行规范法”的计算值, 特别是在“强影响区”, 是“现行规范法”计算得到的 k_s 值的 1.5~3.0 倍, 这是支挡结构水平位移实测值较

小的原因之一。同时,相较于“现行规范法”,考虑应力路径作用下土体荷载-变形特征的计算方法更加接近工程实际。

表 3 嵌固段悬臂桩水平位移

Table 3 Horizontal displacements of embedded section of cantilever piles

埋深 /m	嵌固段悬臂桩水平位移/mm				
	第一步	第二步	第三步	第四步	第五步
2	—				
4	—	1.10			
6	—	0.80	2.40		
8	—	0.50	1.60	5.30	
10	—	0.35	1.20	2.50	6.0
12	—	0.15	0.30	0.60	1.3
14	—	0.10	0.20	0.35	0.6
16	—	0.06	0.13	0.25	0.4

注:开挖第一步悬臂桩变形较小,限于测试精度,未给出该工况数据。

表 4 地基土水平反力系数 k_s

Table 4 Horizontal reaction coefficients of foundation soils

工况	土层 埋深/m	现行 规范法	应力路 径法	增加 比例/%	实测验 证法	增加比 例/%	(MN/m ³)
第一步	2	9.9	12.0	21.5	—	—	
	4	49.4	52.0	5.3	—	—	
	6	36.6	50.0	36.5	—	—	
	8	104.4	127.3	21.9	—	—	
	10	49.4	55.0	11.4	—	—	
	12	183.0	200.0	9.3	—	—	
	14	120.3	120.6	0.2	—	—	
	16	145.9	147.7	1.3	—	—	
第二步	4	9.9	14.2	43.8	17.3	75.0	
	6	20.4	27.8	36.7	25.3	24.2	
	8	72.3	94.5	30.9	77.1	6.7	
	10	37.8	45.2	19.6	50.8	34.6	
	12	148.1	163.6	10.5	267.0	80.2	
	14	101.1	109.8	8.6	114.0	12.8	
	16	125.7	132.4	5.3	176.2	40.1	
	6	4.1	9.2	124.4	13.2	223.4	
第三步	8	40.1	45.5	13.2	41.2	2.7	
	10	26.1	31.9	22.1	27.4	5.0	
	12	113.3	137.3	21.2	117.5	3.7	
	14	81.8	96.0	17.3	104.1	27.2	
	16	105.6	122.1	15.6	156.5	48.2	
	8	8.0	13.0	62.5	14.0	74.6	
第四步	10	14.5	21.4	47.4	20.7	42.6	
	12	78.4	91.2	16.3	94.0	19.9	
	14	62.6	82.5	31.8	97.1	55.1	
	16	85.5	97.1	13.6	122.7	43.5	
	10	5.8	11.1	90.4	14.0	140.6	
第五步	12	52.3	58.1	11.2	67.6	29.4	
	14	48.1	52.8	9.7	72.4	50.4	
	16	70.4	74.9	6.3	89.0	26.4	

注:开挖第一步悬臂桩变形较小,限于测试精度,未给出该工况数据。

将“应力路径法”确定的 k_s 和 p_{s0} 与实测的嵌固段支挡结构水平位移 v 代入式(13),计算得到作用于支挡结构的分布土反力 p_s ,并与被动土压力实测值进行比较,见图 9,图例中数字表示开挖步数。两者得到的土压力相对接近,且在支挡结构水平位移较小时,被动土压力变化幅度较小,尤其是深部地基土,当支

挡结构水平位移较大时,被动土压力增加,尤其是浅部地基土,这两种工况也说明了应力路径 b、应力路径 c 的合理性和适用性;另外,随着开挖深度及悬臂桩水平位移的增加,尤其是开挖第五步,“应力路径法”计算所得被动土压力小于土压力实测值。

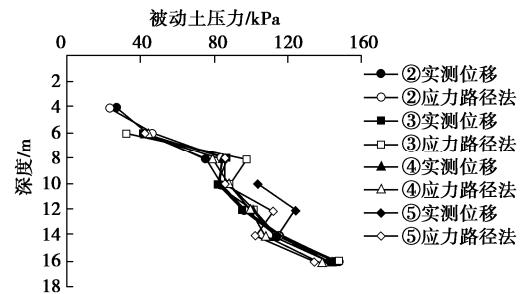


图 9 分步开挖工况被动土压力

Fig. 9 Passive earth pressures under stepwise excavation

同样,将“应力路径法”确定的 k_s 和 p_{s0} 与实测的被动土压力 p_s 代入式(13),计算得到嵌固段支挡结构水平位移 v ,并与实测值进行比较,见图 10,图例中数字表示开挖步数。两者相近,“应力路径法”计算结果略大,但随着开挖深度及变形的发展,“应力路径法”计算所得嵌固段支挡结构水平位移较实测值明显增大。

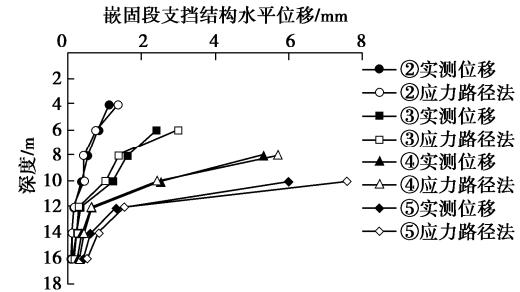


图 10 分步开挖工况嵌固段支挡结构水平位移

Fig. 10 Horizontal displacement of the embedded section of the cantilever pile under step by step excavation condition

本文所述“应力路径法”基于基坑开挖应力路径下地基土的荷载变形特征,计算得到的地基土水平反力系数和被动土压力比较接近实测数据,对以变形控制进行设计的基坑工程有较好的适应性。

6 结 论

本文从土工试验方法、土体强度指标、地基土水平反力系数等方面分析现在基坑工程支挡结构设计存在的问题,得到以下 4 点结论。

- (1) 获取设计参数的土工试验方法应考虑土体的应力状态,通过简化分析,得到了 3 种基坑开挖土体应力路径及其应力应变关系和归一化特征。
- (2) 分析比较了常规 CU 剪切试验和考虑基坑开

挖应力状态的预加固 UU 剪切试验确定的强度指标, 后者得到的极限主动土压力较小, 浅部地基土的极限被动土压力较大, 深度地基土的极限被动土压力较小。这说明基坑开挖后主动区和被动区浅部土体抵抗剪切破坏的能力大于以常规 CU 强度指标的计算结果, 这对基坑工程的安全性是有利的; 被动区深部土体抵抗剪切破坏的能力小于以常规 CU 强度指标的计算结果, 对地基土被动抗力发挥较大的工程, 应重视这一点, 需验算嵌固深度, 确保被动抗力小于极限被动土压力。

(3) 将被动区地基土易受支挡结构挤压产生水平位移的区域定义为基坑开挖“强影响区”, 依据土体应力应变关系曲线, 利用归一化方程式, 给出了该区域深度的计算方法。

(4) 考虑基坑开挖应力路径作用下地基土荷载变形特征, 分析推导了作用于支挡结构上的分布土反力与支挡结构水平位移的计算公式; 相较于现行规范方法, 以被动区应力路径作用下的土体割线模量作为水平反力系数, 其计算结果更接近工程实际。

参考文献:

- [1] 何世秀, 韩高升, 庄心善, 等. 基坑开挖卸荷土体变形的试验研究[J]. 岩土力学, 2003, 24(1): 17–20. (HE Shi-xiu, HAN Gao-sheng, ZHUANG Xin-shan, et al. Experimental researches on unloading deformation of clay in excavation of foundation pit[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(1): 17–20. (in Chinese))
- [2] 袁静, 龚晓南. 基坑开挖过程中软土性状若干问题的分析[J]. 浙江大学学报(工学版), 2001, 35(5): 465–470. (YUAN Jing, GONG Xiao-nan. Analysis of soft clay during excavation[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2001, 35(5): 465–470. (in Chinese))
- [3] 盛志强. 与基坑开挖过程有关的土体工程特性试验研究[D]. 北京: 中国建筑科学研究院, 2016. (SHENG Zhi-qiang. Experimental Study on Engineering Properties of Foundation Soil Related to Excavation Process[D]. Beijing: China Academy of Building Research, 2016. (in Chinese))
- [4] 盛志强, 崔挺. 基坑开挖卸荷应力路径地基土工程特性[J]. 建筑科学, 2018, 34(7): 1–11. (SHENG Zhi-qiang, CUI Ting. The engineering characteristics of foundation soil under the action of unloading stress path of foundation pit excavation[J]. Building Science, 2018, 34(7): 1–11. (in Chinese))
- [5] 滕延京, 盛志强, 王曙光. 饱和黏性土抗剪强度的试验方法[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(3): 426–431. (TENG Yan-jing, SHENG Zhi-qiang, WANG Shu-guang. Test method for shear strength of saturated cohesive soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(3): 426–431. (in Chinese))
- [6] 盛志强, 滕延京. 考虑应力历史的饱和土抗剪强度测试方法探讨[J]. 岩土力学, 2014, 35(增刊2): 107–113. (SHENG Zhi-qiang, TENG Yan-jing. The study on the test methods of saturated soil shear strength considering effects of stress history[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(S2): 107–113. (in Chinese))
- [7] 滕延京. 基于建造过程地基土工程特性基础设计理论和方法[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018. (TENG Yan-jing. Foundation Design Theory and Method Based on Engineering Characteristics of Foundation Soil During Construction[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2018. (in Chinese))
- [8] 潘林有, 程玉梅, 胡中雄. 卸荷状态下黏性土强度特性试验研究[J]. 岩土力学, 2001, 22(4): 490–493. (PAN Lin-you, CHENG Yu-mei, HU Zhong-xiong. Experimental study on the shear strength of clay under the unloading state[J]. Rock and Soil Mechanics, 2001, 22(4): 490–493. (in Chinese))
- [9] 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. (Code of Design of Building Foundation: GB 50007—2011[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011. (in Chinese))
- [10] 建筑基坑支护设计规程: JGJ 120—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012. (Technical Specification for Retaining and Protection of Building Foundation Excavations: JGJ 120—2012[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012. (in Chinese))
- [11] 胡中雄. 土力学与环境土工学[M]. 上海: 同济大学出版社, 1997. (HU Zhong-xiong. Soil Mechanics and Environmental Geotechnical[M]. Shanghai: Tongji University Press, 1997. (in Chinese))