

DOI: 10.11779/CJGE201505001

软黏土中某内支撑式深基坑稳定性安全系数分析

李忠超¹, 陈仁朋¹, 陈云敏¹, 饶猛²

(1. 浙江大学软弱土与环境土工教育部重点实验室, 浙江 杭州 310027; 2. 华东建设工程有限公司, 浙江 杭州 310030)

摘要: 软黏土中深基坑稳定性安全系数是基坑设计的重要指标, 目前基坑稳定性安全系数评估方法主要有传统经验公式法和有限元强度折减法。针对深厚软黏土中某倒塌内支撑式深基坑, 采用传统经验公式法和有限元强度折减法对该基坑稳定性安全系数 F_S 进行了计算分析, 比较了不同土体强度指标计算结果的差异, 结合其它学者的研究, 对各计算方法及其所采用土体强度指标的合理性进行了评价。研究结果表明: 无论是应用经验公式法还是有限元强度折减法, 采用不排水抗剪强度指标 s_u 计算得到的基坑 F_S 均比较接近 1.0, 而采用土体 c , φ 强度指标得到基坑 F_S 均远大于 1.0。应用有限元强度折减法时, 数值计算不收敛准则相对交点法得到基坑 F_S 偏大。采用交点法与 Terzaghi 法得到基坑 F_S 最接近 1.0, 与基坑处于极限平衡状态事实相符。

关键词: 软黏土; 深基坑开挖; 稳定性安全系数; 有限元法; 强度折减法

中图分类号: TU47 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2015)05-0769-07

作者简介: 李忠超(1987-), 男, 博士研究生, 主要从事软土地区深基坑及盾构隧道工程对周围环境影响的研究。E-mail: 10912014@zju.edu.cn。

Factor of safety of a braced deep excavation in soft clay

LI Zhong-chao¹, CHEN Ren-peng¹, CHEN Yun-min¹, RAO Meng²

(1. Key Laboratory of Soft Soils and Geoenvironmental Engineering of Ministry of Education, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 2. East China Construction Engineering Corporation of Zhejiang, Hangzhou 310030, China)

Abstract: The factor of safety (F_S) is a very important design index for deep excavation in soft clay. The existing methods for F_S mainly include the conventional methods and finite element method (FEM) based on the reduced shear strength technique. In this study, the conventional methods and reduced shear strength FEM are used for F_S evaluation of a failed deep excavation in soft clay. By comparing the values of F_S of the excavation using different soil strength parameters and methods, the applicability of the analysis methods and soil strength parameters is evaluated. The research results indicate that the values of F_S of the excavation calculated by the conventional methods and the reduced shear strength FEM using the total stress indexes, i.e., s_u , $\varphi=0$, are very close to 1.0 and those from Terzaghi's method, while the values of F_S of the excavation are much greater than 1.0 using the soil strength parameters c and φ from triaxial tests. When the reduced shear strength FEM is applied for F_S evaluation, the values of F_S obtained from the convergence criterion method are much greater than those from the intersection method. The values of F_S of the excavations using the intersection method and Terzaghi's method are both very close to 1.0, which is consistent with the limited equilibrium state of the excavations at failure.

Key words: soft clay; deep excavation; factor of safety; finite element method; reduced shear strength technique

0 引言

近年来, 随着中国沿海地区大中型城市轨道交通建设迅速发展, 深基坑工程在地铁车站建设中得到广泛应用。沿海地区通常广泛分布强度低、变形性能差以及渗透性低的深厚软黏土, 此类地层中深基坑工程往往面临巨大挑战, 且开挖失稳事故时有发生。2004年4月20日, 新加坡 Nicoll Highway 地铁车站基坑^[1]在开挖至地下 34.2 m 深时地连墙折断发生倒塌; 2008 年上海地铁 9 号线上城路站基坑 (开挖深度 18 m)^[2]

地连墙变形超限, 内支撑失效, 最终引致基坑破坏。因此, 深厚软黏土中深基坑开挖的安全稳定性始终是工程师和学者关注和研究的首要问题。

基坑安全稳定性计算方法主要有传统经验公式法和数值分析法。传统经验公式法包括基于土体承载能力极限平衡理论和整体滑动破坏理论的两类分析方

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51225804, U1234204)

收稿日期: 2014-04-22

法。国内 (GB50007—2011)《建筑地基基础设计规范》^[3]和 (JGJ120—2012)《建筑基坑支护技术规程》^[4]中的基坑稳定安全系数计算方法主要是基于土体承载力破坏理论提出的。国际上广泛应用的基坑抗隆起稳定性安全系数计算方法 Terzaghi 法^[5]和 Bjerrum & Eide 法^[6]同样是基于承载力破坏理论提出, 圆弧滑动法^[7]则是基于圆弧滑动破坏理论提出的。

目前基坑安全稳定性数值分析方法主要是基于强度折减法应用数值分析软件计算分析基坑稳定性安全系数。强度折减法最初由 Zienkiewicz 等^[8]提出并应用于土坡稳定性分析。采用强度折减法进行土坡稳定性分析时, 原则上将土体强度按一定强度折减系数(strength reduction ratio, SRR)逐步折减, 直至数值计算不收敛, 而土坡稳定性安全系数(factor of safety, FOS)即为真实土体强度与数值计算不收敛时土体强度的比值^[9-13]。此后, Cai 等^[14]、Fehem 等^[15]将有限元强度折减法应用于研究软黏土中基坑围护结构插入深度、基坑底至硬土层厚度对圆形和矩形基坑抗隆起稳定性安全系数的影响。陈福全等^[16]用强度折减法有限元方法(SRRFEM)研究了不排水条件下软黏土不排水抗剪强度、支护结构条件、基坑尺寸对基坑抗隆起稳定性的影响。然而, 上述学者并没有提出明确的判据和方法来确定基坑安全稳定性系数。相比传统经验公式法, 数值分析法可考虑围护结构与土体之间的相互作用, 并且能明确得到基坑破坏所形成的滑动破坏面。但目前该方法还较少被应用于实际基坑开挖工程的安全稳定性分析, 其主要原因为: ①如何根据有限元计算结果来判别基坑处于极限破坏状态, 确定基坑的稳定性安全系数方法还不够成熟; ②较传统经验公式法复杂, 需进行大量的数值计算分析, 本构参数确定和模型建立依赖于分析人员的应用经验和水平; ③该方法在国内基坑稳定性分析应用经验不多, 其适用性还有待研究。

综上所述, 目前软黏土中基坑安全稳定性评价的主要问题在于: ①经验分析方法较多, 且基于不同的理论基础提出, 采用的土体强度指标不一; ②应用有限元强度折减法时基坑安全稳定性系数确定依据不明确。针对以上两个问题, 本文以深厚软黏土中某典型失稳深基坑工程为研究案例^[17-19], 采用传统经验公式法和有限元强度折减法对其稳定性安全系数进行了计算分析, 并对各种分析方法计算结果进行了对比分析, 对各方法适用性进行了评价。本文研究有助于在软黏土深基坑工程设计中正确地选择基坑稳定性分析所采用分析方法和土体强度指标, 从而获得较准确的基坑稳定性安全系数。

1 工程概况

本文中研究基坑采用顺作法施工, 呈南北向展布, 平面上基本呈矩形, 总长约 107.8 m, 宽约 21.2 m, 开挖深度 H_e 为 15.7~16.2 m。基坑围护结构采用 33 m 深 0.8 m 厚地连墙和四道外径为 609 mm 钢管内支撑, 其第一道支撑 S1 钢管厚 12 mm, 其余 3 道支撑(S2~S4)钢管厚度均为 16 mm。支撑水平间距为 2.8~3.0 m, 竖向间距为 3.5~4.2 m。地连墙所用混凝土为 C30, 弹性模量为 30 GPa, 钢管支撑弹性模量为 210 GPa。围护结构、土层开挖方案及内支撑设计如图 1 所示。

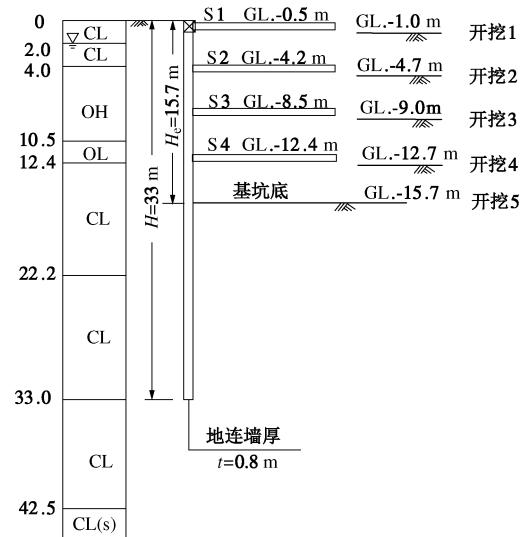


图 1 基坑围护结构典型剖面及地层分布图

Fig. 1 Typical cross section and construction state of excavation

基坑由北向南开挖施工, 在基坑中段开挖至基底时基坑发生倒塌。基坑倒塌前, 其北端至开挖段均已开挖至基坑底部, 且 4 道支撑均已安装完成, 正在开挖的基坑中段已完成 3 道支撑安装, 但第 4 道支撑 S4 刚开始安装, 形成了长 26 m 的超挖段。基坑失稳导致基坑主体损毁, 周边地基沉陷约 7 m, 形成长约 75 m 宽约 32 m 的塌陷区。基坑西侧地连墙折断并向基坑内最大位移约 7 m, 东侧地连墙向基坑内倾斜最大位移约 3.9 m, 大量土体侵入基坑, 基坑深度仅余 8 m。

基坑场地内第四系土层直接覆盖于侏罗系泥灰岩上, 其第四系主要土层为厚达 40 余米的海相和湖沼相淤泥质粉质黏土和粉质黏土, 主要分布在地表下 4 m (GL -4.0 m) 至 48.5 m (GL -48.5 m) 内。该类软土具有含水率高, 压缩性高, 有机质含量高, 强度低, 具有一定的结构性, 易受施工扰动的特点。场地内地基土体分布及土体含水率 w_n 、液塑限 (w_L , w_P)、孔隙比 e_0 和不排水十字板抗剪强度 s_u 沿深度分布如图 2 所示^[20], 各层土体三轴固结不排水试验强度指标如表 1 所示^[21]。

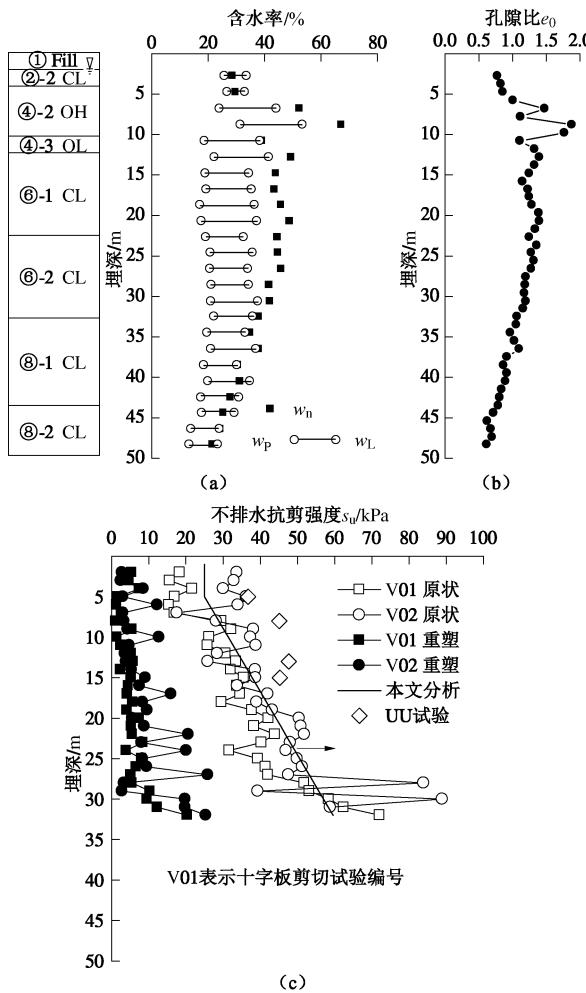


图2 基坑场地地层分布及土体基本物理力学特性

Fig. 2 Soil profile and geotechnical parameters obtained at excavation site

表1 土体分层及三轴固结不排水CU试验强度指标

Table 1 Soil profile and strength parameters from CU testing

土层 编号	土层 名称	埋深 /m	三轴试验强度指标			
			c_{cu} /kPa	φ_{cu} (°)	c' /kPa	φ' (°)
①	填土	0~2	—	—	—	—
②-2	砂质粉土	2~4	—	—	—	—
④-2	淤泥质黏土	4~10.5	20	12.4	5.7	28.4
④-3	淤泥质黏土	10.5~12.2	23.6	11.1	9.5	24.6
⑥-1	淤泥质黏土	12.2~22.2	25.4	9.6	3.6	25.4
⑥-2	淤泥质粉质黏土	22.2~33.0	20.9	12.4	1.0	30.9
⑧-1	淤泥质粉质黏土	33.0~42.5	11.1	21.2	1.0	33.1
⑧-2	粉质黏土	42.5~48.5	39.7	33.6	0	39.4

2 基坑稳定性分析

2.1 国际通用经典稳定性安全系数法

Terzaghi 法、Bjerrum & Eide 法以及圆弧滑动法是国际上通用的用于评价软黏土中基坑抗隆起稳定性安全系数的重要方法。尽管这 3 种方法对计算模型进行

了假定和简化, 不考虑围护结构插入深度、围护结构刚度和内支撑体系刚度, 然而, 这 3 种方法在国际上应用广泛, 有非常丰富的应用经验和准确的安全系数建议值标准。

Terzaghi 法、Bjerrum & Eide 法以及圆弧滑动法计算原理和计算方法分别如图 3 (a)、(b)、(c) 所示。通过计算分析得到本文研究基坑采用 Terzaghi 法、Bjerrum & Eide 法以及圆弧滑动法所得到的抗隆起稳定性安全系数 F_s 分别为 1.05, 0.74 和 0.89, 均要小于这 3 种方法相应的安全系数建议值 1.5^[22], 1.5^[23], 1.2^[24]。

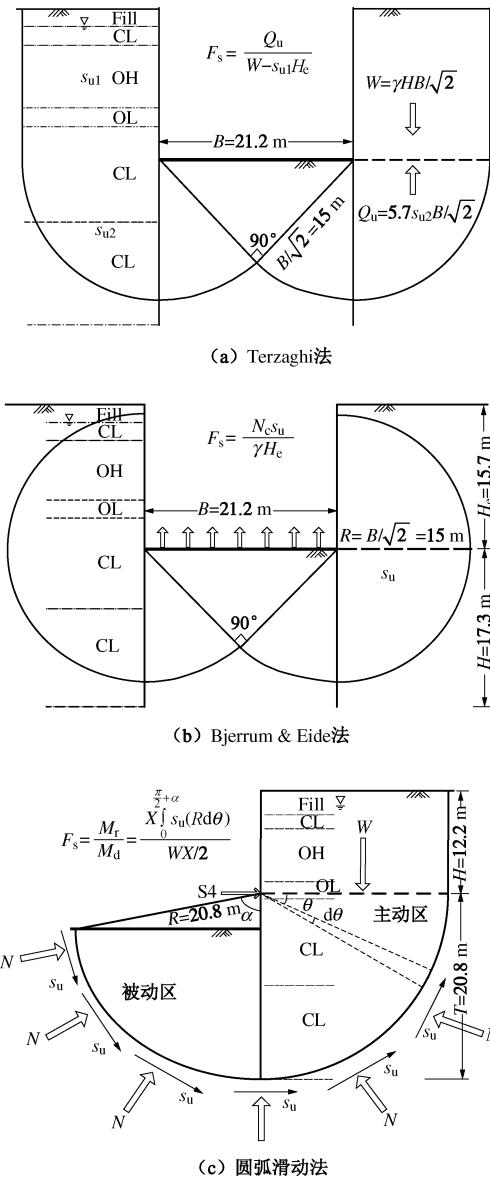


图3 基坑稳定性安全系数分析方法 Terzaghi 法、Bjerrum & Eide 法以及圆弧滑动法

Fig. 3 Conventional methods for evaluation of factor of safety against basal heave of excavation (a) Terzaghi's method, (b) Bjerrum & Eide's method, and (c) slip circle method

2.2 国内标准规范法

(GB50007—2011)《建筑地基基础设计规范》附录 V 及 (JGJ 120—2012)《建筑基坑支护技术规程》中均提出了用于计算基坑底部抗隆起稳定性安全系数的计算方法。这两本规范标准中所提出的基坑安全稳定性系数计算方法均是基于极限平衡下地基承载力理论提出的。《建筑地基基础设计规范》中计算方法采用土体强度指标为土体的不排水抗剪强度指标,《建筑基坑支护技术规程》中采用的计算指标为三轴 CU 试验强度指标 c_{cu} , φ_{cu} 或固结快剪试验强度指标 c_{cq} , φ_{cq} 。

根据(GB50007—2011)《建筑地基基础设计规范》抗隆起稳定性验算公式 a:

$$K_D = \frac{N_c \tau_0 + \gamma t}{\gamma(h+t) + q} , \quad (1)$$

对于一级基坑, $K_D \geq 1.6$, 式(1)中 $N_c=5.14$, τ_0 为支护结构底部土层不排水抗剪强度, h 为基坑开挖深度, t 为支护结构入土深度, q 为地表超载, γ 为土体重度。

根据(GB50007—2011)《建筑地基基础设计规范》抗隆起稳定性验算公式 b:

$$K_D = \frac{M_p + \int_0^\pi \tau_0 t d\theta}{(q + \gamma h)t^2/2} , \quad (2)$$

对于一级基坑, $K_D \geq 1.4$, $M_p=[\sigma]W_z=[\sigma]bh^2/6$ 。

JGJ120—2012《建筑基坑支护技术规程》中基坑抗隆起稳定性安全系数计算方法如下:

$$K_b = \frac{\gamma_{m2} l_d N_q + c N_c}{\gamma_{m1}(h + l_d) + q} , \quad (3)$$

式中, $N_q = \tan^2(45^\circ + \varphi/2)e^{\pi \tan \varphi}$, $N_c = (N_q - 1)/\tan \varphi$, 对于一级基坑, $K_b \geq 1.8$ 。对于地下水位下的正常固结软黏土, 规范建议式(3)中 c , φ 值采用三轴 CU 试验强度指标 c_{cu} , φ_{cu} 或固结快剪试验强度指标 c_{cq} , φ_{cq} 。

由以上国内标准规范方法计算得到本文研究基坑稳定性安全系数如表 2 所示。

表 2 国内规范安全稳定性计算结果

Table 2 Values of F_s of excavations from design code in China

计算式	参数指标	建议 F_s (一级基坑)	计算 结果
式 (1)	十字板不排水抗剪强度 s_u	$K_D \geq 1.6$	1.13
式 (2)	十字板不排水抗剪强度 s_u	$K_D \geq 1.4$	1.32
式 (3)	三轴不排水剪切试验 c_{cu} , φ_{cu}	$K_b \geq 1.8$	3.97
式 (3)	固结快剪试验 c_{cq} , φ_{cq}	$K_b \geq 1.8$	1.42

由表 2 可知, 采用式(1)计算得到安全系数接近于 1.0, 远小于建议值; 采用式(2)计算得到安全系数大于 1.0, 且非常接近于建议值 1.4。采用三轴不排水剪切试验得到的强度参数 c_{cu} 和 φ_{cu} 的计算方法得到的安全稳定性系数远大于建议值, 采用固结快剪指标 c_{cq} , φ_{cq} 计算得到安全系数大于 1.0 且接近于建议值。

2.3 有限元强度折减法

基坑安全稳定性系数的有限元强度折减法分析需要基于两个基本假设进行: ①土体强度参数黏聚力 c 和内摩擦角 φ 的折减并不影响其他土体特性参数, 包括土体的弹性模量 E 和泊松比 ν ; ②黏聚力 c 和内摩擦角 φ 对土体抗剪强度同等重要。如此, 在 PLAXIS 中建立基坑工程开挖分析模型, 将不同折减系数 SRR 的土体强度参数及刚度参数输入模型并进行计算分析, 即可得到不同折减系数 SRR 下基坑开挖引起的土体变形及围护结构变形。强度折减法计算得到的典型节点位移 - 折减系数 SRR 关系曲线如图 4 所示。当强度折减系数较小时, 有限单元节点位移缓慢发展, 而当强度折减系数较大时, 有限单元节点位移急剧增加, 这两部分曲线交于一点, 也即当强度折减系数超过这个值时, 节点的位移将开始急剧增加, 当折减系数增加到某一较大值时, 数值计算将出现不收敛。

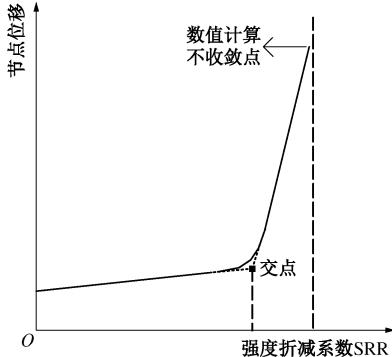


图 4 有限元计算分析结果: 节点位移 - 强度折减系数 SRR 关系曲线

Fig. 4 FE analysis results: nodal displacement vs SRR curve

在边坡稳定性分析中, 数值计算出现不收敛时所对应的强度折减系数 SRR 被认为是该边坡的稳定性安全系数 F_s 。但不同于边坡工程, 基坑工程围护结构刚度较大, 若围护结构变形过大, 围护结构发生破坏并释放积蓄的能量, 将破坏整个基坑支护体系, 而本文基坑失稳事故则是典型的例子。因此, 该判据在基坑的安全稳定性系数分析中高估了基坑的稳定性安全系数, 是偏危险的。Do 等^[25]认为采用交点法得到的基坑稳定性安全系数更加合理: 在超过交点后, SRR 进一步的微小增量都将引起基坑土体或围护结构变形的急剧增加, 基坑体系在该强度折减系数 SRR 下达到了一个极限平衡点, 因此交点法认为节点位移 - 折减

系数 SRR 关系曲线两段曲线的交点所对应的 SRR 值即为基坑的稳定性安全系数 F_S 。

本文研究利用有限元软件 PLAXIS 2D 建立分析模型模拟了整个基坑开挖过程, 数值分析模型如图 5 所示。数值计算中土体本构模型均采用莫尔-库仑 (MC) 模型, 并采用了 3 种不同类型强度指标对基坑稳定性安全系数进行了计算分析, 这 3 类强度指标所采用的材料类型、土体强度参数类型以及刚度参数类型如表 3 所示。

表 3 有限元分析输入参数类型

Table 3 Input parameters for finite element analysis

分析 类型	Plaxis 材料 类型	输入土体参数	
		强度参数	刚度参数
A	不排水	c' , φ'	E' , v'
B	不排水	c_{cu} , φ_{cu}	E' , v'
C	无孔介质	s_u , $\varphi=0$	E_u , v_u

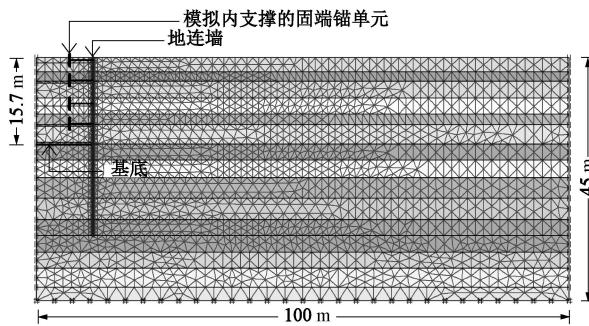
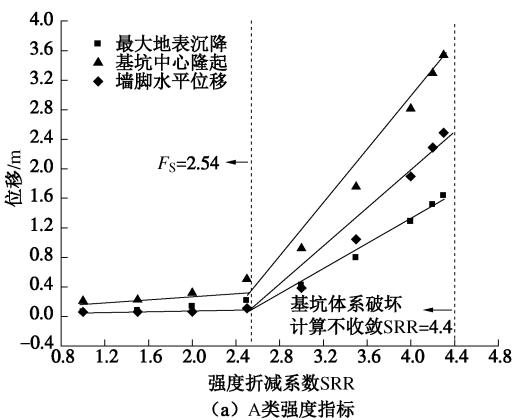


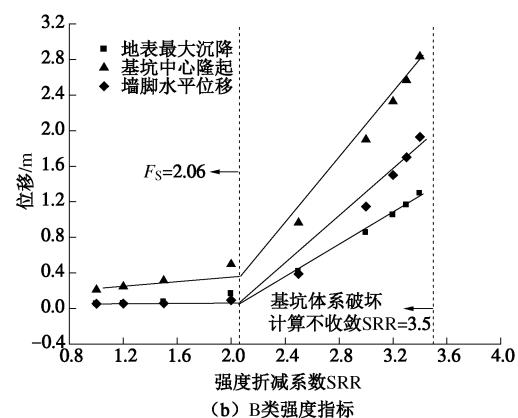
图 5 倒塌基坑有限元分析模型及网格划分

Fig. 5 Finite element mesh of collapsed excavation

由 3 种参数类型 A、B、C 得到的强度折减系数 - 位移变化曲线如图 6(a)、(b)、(c) 所示。图 6(a)、(b)、(c) 表明采用 A、B、C 三种类型土体强度指标得到的基坑开挖数值计算不收敛所对应的强度折减系数 SRR 分别为 3.50, 4.40 和 1.22, 也即根据数值计算不收敛准则, 该基坑的稳定性安全系数 F_S 分别为 3.50, 4.40 和 1.22。根据交点法确定基坑稳定性安全系数 F_S 方法, 采用 A、B、C 三类强度指标计算得到基坑 F_S 分别为 2.54, 2.06 和 1.02。



(a) A类强度指标



(b) B类强度指标

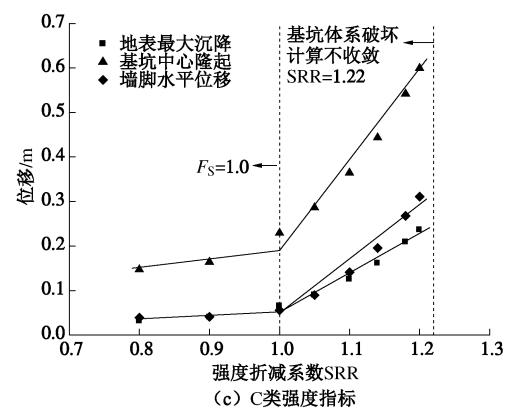


图 6 采用 A、B、C 三类强度指标得到强度折减系数 - 节点位移关系曲线

Fig. 6 Nodal displacement vs SRR curves using soil strength parameters A, B and C

为研究超挖对本文研究基坑稳定性安全系数 F_S 的影响, 本文研究还采用有限元强度折减法对三道支撑段基坑稳定性安全系数 F_S 进行了计算分析, 采用 C 类强度指标计算得到如图 7 所示强度折减系数 SRR - 节点位移关系曲线, 由数值不收敛准则和交点法分别得到超挖段基坑 F_S 为 1.12 和 0.96, 均小于正常开挖段基坑 F_S , 且采用交点法得到基坑 F_S 小于 1.00。

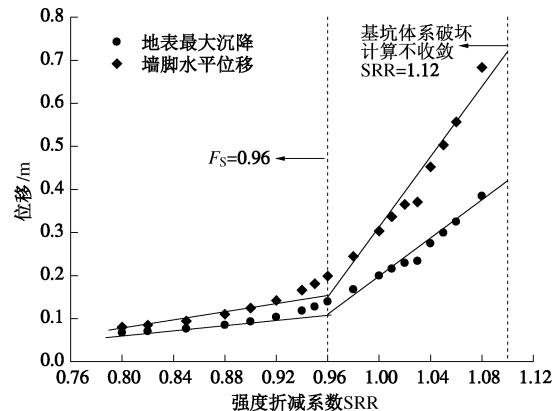


图 7 3 道支撑段基坑采用 C 类强度指标得到强度折减系数 - 节点位移关系曲线

Fig. 7 Nodal displacement vs SRR curves using soil strength parameter C of over-excavated section with three levels of struts

2.4 基坑稳定性安全系数计算结果讨论

对于软黏土中深基坑工程, 随着基坑逐步开挖, 地基土体逐渐达到极限状态, 基坑最终发生整体失稳, 基坑稳定性安全系数 F_S 应非常接近于 1.0。表 4 对比了国内外整体失稳基坑和本文研究基坑分别采用 Terzaghi 法、Bjerrum & Eide 法以及圆弧滑动法所得到的抗隆起稳定性安全系数 F_S 。通过对比发现, 对于整体失稳基坑, 采用 Terzaghi 法计算得到的 F_S 均为 1.00 左右, 这与基坑处于极限平衡状态并失稳的事实相吻合。Bjerrum & Eide 法和圆弧滑动法计算得到的结果相对 Terzaghi 法小, 且基本小于 1.00。

表 4 软黏土中典型失稳基坑与本文基坑 F_S 对比

Table 4 Comparison of F_S of typical failed excavations and present excavation

失稳基坑	Terzaghi 法	Bjerrum & Eide 法	圆弧滑动法	失稳模式
芝加哥地铁 ^[6]	1.11	1.00	—	整体失稳
德拉门污水池 ^[6]	1.02	0.93	—	整体失稳
台北Rebar百脑汇 ^[25]	1.09	0.95	0.81	整体失稳
台北Shi-pai ^[25]	0.90	0.79	0.73	整体失稳
本文研究基坑	1.05	0.74	0.89	整体失稳

对比分析表 2 中本文研究基坑采用国内标准各计算方法得到的安全系数与表 4 中各典型基坑安全系数可以发现: ①采用三轴 CU 试验强度指标或固结快剪指标得到的 F_S 偏大, 计算结果偏不安全, 不宜用于计算分析软黏土中基坑稳定性安全系数; ②地基基础设计规范中公式 a 得到的基坑稳定性安全系数与 Terzaghi 法计算结果最接近, 该计算方法相对国内规范中其他分析方法更合理。

表 5 总结了采用有限元强度折减法得到的基坑稳定性安全系数, 计算分析结果表明: ①不论是采用数值计算不收敛准则还是交点法, 采用 A 类和 B 类强度指标得到的基坑稳定性安全系数均要远大于 1.0, 这与基坑倒塌的事实不相符。这进一步表明采用三轴 CU 试验得到的强度参数 c_{cu} , φ_{cu} 或 c' , φ' 来计算软黏土中基坑稳定性安全系数偏大, 在实际工程中不宜采用。采用数值计算不收敛准则和交点法得到 C 类强度指标对应的 F_S 分别为 1.22 和 1.02, 均比较接近于 1.0。这表明采用不排水抗剪强度 s_u 的计算结果符合实际情况, 相对可靠。②采用数值计算不收敛准则得到的 F_S 相对交点法得到的 F_S 更大, 采用交点法分析得到的计算结果与 Terzaghi 法计算结果非常接近, 且接近于基坑的实际稳定性安全系数 1.0。③超挖段基坑稳定性安全系数 F_S 要小于正常开挖段且小于 1.0, 这表明超挖使基坑处于更加危险的状况。

表 5 有限元强度折减法计算得到基坑 F_S

Table 5 Values of F_S of excavations from FE analyses results

分析类型	Plaxis 材料类型	土体强度参数	F_S	
			不收敛准则	交点法
A	不排水	c' , φ'	4.40	2.54
B	不排水	c_{cu} , φ_{cu}	3.50	2.06
C	无孔介质	s_u , $\varphi=0$	1.22	1.02
C(超挖)	无孔介质	s_u , $\varphi=0$	1.12	0.96

3 结 论

本文针对某倒塌内支撑式深基坑开挖工程, 采用国际通用稳定性安全系数评价方法及国内各标准规范计算方法对其稳定性安全系数进行了计算分析, 并与国内外其他整体失稳基坑 F_S 进行了对比。同时, 应用 PLAXIS 软件基于强度折减法采用了 3 种类型强度指标 (A 有效应力指标 c' , φ' , B 总应力强度指标 c_{cu} , φ_{cu} , C 总应力不排水抗剪强度指标 s_u , $\varphi=0$) 对基坑稳定性安全系数进行了分析。研究结果表明: ①发生整体失稳的基坑的 Terzaghi 稳定性安全系数均为 1.00 左右, 与基坑处于极限平衡状态事实相符; ②无论是传统经验公式法还是有限元强度折减法, 采用土体的 c , φ 强度指标 (不排水抗剪强度指标 c_{cu} , φ_{cu} ; 固结快剪指标 c_{cq} , φ_{cq} ; 有效应力指标 c' , φ') 得到的 F_S 均远大于 1.00, 不适宜用于基坑稳定性安全系数评估; ③采用不排水抗剪强度的传统经验公式和有限元强度折减法计算得到的 F_S 均比较接近于 1.00; ④采用有限元强度折减法时, 数值计算不收敛准则相对交点法得到的基坑 F_S 偏大, 交点法得到的结果与 Terzaghi 法计算结果非常接近; ⑤超挖将导致基坑 F_S 降低, 使基坑处于更加危险的状况, 必须避免发生。

综上研究成果, 在进行深厚软黏土深基坑稳定性安全系数评估时, 应采用不排水抗剪强度 s_u 作为土体强度指标, 分析方法建议采用 Terzaghi 法、地基基础设计规范 a 法以及有限元强度折减法综合计算分析。

参 考 文 献:

- [1] MAGNUS R, TEH C I, LAU J M. Report of the committee of inquiry into the incident at the MRT circle line worksite that led to the collapse of Nicoll Highway on 20 April 2004[R]. Singapore: Subordinate Courts, 2004.
- [2] TANG Y, WEI B. Performance of an over excavated metro station and facilities nearby[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2012, 26(3): 241 - 254.
- [3] GB50007—2011 建筑地基基础设计规范 [S]. 2011. (GB50007—2011 Code for design of building foundation[S].

2011. (in Chinese))
- [4] JGJ 120—2012 建筑基坑支护技术规程[S]. 2012. (JGJ 120—2012 Technical specification for retaining and protection of building foundation excavations[S]. 2012. (in Chinese))
- [5] TERZAGHI K. Theoretical soil mechanics[M]. New York: John Wiley & Sons, 1943.
- [6] BJERRUM L, EIDE O. Stability of strutted excavations in clay[J]. Géotechnique, 1956, 6(1): 32 - 47.
- [7] BISHOP A W. The use of the slip circle in the stability of slopes[J]. Géotechnique, 1955, 5(1): 7 - 17.
- [8] ZIENKIEWICZ O C, HUMPHESON C, LEWIS R W. Associated and non-associated visco-plasticity and plasticity in soil mechanics[J]. Géotechnique, 1975, 25(4): 671 - 689.
- [9] GRIFFITHS D V, LANE P A. Slope stability analysis by finite elements[J]. Géotechnique, 1999, 49(3): 387 - 403.
- [10] DAWSON E M, ROTH W H, DRESCHER A. Slope stability analysis by strength reduction[J]. Géotechnique, 1999, 49(6): 835 - 840.
- [11] 赵尚毅, 郑颖人, 时卫民. 用有限元强度折减法求边坡稳定安全系数[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(3): 343 - 346. (ZHAO Shang-yi, ZHENG Ying-ren, SHI Wei-ming. Slope safety factor analysis by strength reduction FEM[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(3): 343 - 346. (in Chinese))
- [12] 赵尚毅, 郑颖人, 张玉芳. 极限分析有限元法讲座——II 有限元强度折减法中边坡失稳的判据探讨[J]. 岩土力学, 2005, 26(2): 332 - 336. (ZHAO Shang-yi, ZHENG Ying-ren, ZHANG Yu-fang. Study on slope failure criterion in strength reduction finite element method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(2): 332 - 336. (in Chinese))
- [13] BRINKGREVE R, KHOURY R A, BAKKER K J, et al. Plaxis 2D version 8 manual[M]. Rotterdam: Balkema A A, 2002.
- [14] CAI F, UGAI K, TOSHIYUKI H. Base stability of circular excavations in soft clay[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2002, 128(8): 702 - 706.
- [15] FEHEEM H, CAI F, UGAI K. Three-dimensional base stability of rectangular excavations in soft soils using FEM[J]. Computers and Geotechnics, 2004, 31(1): 67 - 74.
- [16] 陈福全, 吕艳平, 刘毓氚. 内撑式支护的软土基坑开挖抗隆起稳定性分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(2): 365 - 369. (CHEN Fu-quan, LU Yan-ping, LIU Yu-chuan. Base stability of braced excavations in soft clays using FEM[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(2): 365 - 369. (in Chinese))
- [17] 张矿成, 李继民. 杭州地铁湘湖站“08.11.15”基坑坍塌事故分析[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(增刊 1): 338 - 342. (ZHANG Kuang-cheng, LI Ji-min. Accident analysis for “08.11.15” foundation pit collapse of Xianghu Station of Hangzhou metro[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(S1): 338 - 342. (in Chinese))
- [18] CHEN R P, LI Z C, CHEN Y M, et al. Failure investigation at a collapsed deep excavation in very sensitive organic soft clay[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2013, ASCE, (Accepted, [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0000557](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000557)).
- [19] GONG X N, ZHANG X C. Excavation collapse of Hangzhou subway station in soft clay and numerical investigation based on orthogonal experiment method[J]. Journal of Zhejiang University (Science A), 2012, 13(10): 760 - 767.
- [20] 浙江华东建设工程有限公司. 杭州地铁1号线湘湖站北二段基坑恢复方案岩土工程勘察专题报告[R]. 杭州: 浙江华东建设工程有限公司, 2008. (East China Construction Engineering Corporation of Zhejiang. Geotechnical engineering investigation report of the reconstruction of Xianghu subway station of Hangzhou Metro Line 1[R]. Hangzhou: East China Construction Engineering Corporation of Zhejiang, 2008. (in Chinese))
- [21] 浙江大学土木工程测试中心. 杭州地铁1号线湘湖站土体检测报告[R]. 杭州: 浙江大学土木工程测试中心, 2008. (Civil Engineering Test Center of Zhejiang University. Testing report on the soils at the Xianghu subway station of Hangzhou Metro Line 1[R]. Hangzhou: Civil Engineering Test Center of Zhejiang University, 2008. (in Chinese))
- [22] MANA A I, CLOUGH G W. Prediction of movements for braced cut in clay[J]. Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1981, 107(6): 759 - 777.
- [23] Department of the Navy, Naval Facilities Engineering Command, (NAVFAC). Foundation and earth structure, design manual 7.2[M]. Washington: US Department of Navy, 1982.
- [24] OU C Y. Deep excavation: theory and practice[M]. London: Taylor and Francis, 2006.
- [25] DO T N, OU C Y, LIM A. Evaluation of factors of safety against basal heave for deep excavations in soft clay using the finite element method[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2013, 139(12): 2125 - 2135.