

DOI: 10.11779/CJGE202009004

软土地铁深基坑倒塌分析

王立忠^{1, 2}, 刘亚竟^{1, 2}, 龙凡³, 洪义^{*1, 2}

(1. 浙江大学建筑工程学院, 浙江 杭州 310058; 2. 浙江大学浙江省海洋岩土工程与材料重点实验室, 浙江 杭州 310058;
3. 武汉市政工程设计研究院有限责任公司, 湖北 武汉 430023)

摘要: 随着地下轨道交通的建设, 沿海城市建筑密集区出现了大量狭长型软土深基坑, 基坑开挖导致的灾变情况时有发生, 最为著名的如新加坡地铁环线 Nicoll highway (2004) 基坑倒塌与杭州湘湖地铁基坑倒塌 (2008), 造成重大人员伤亡。传统的极限平衡法设计方法将抗隆起安全度 (FOS) 与支护侧移分别独立考虑, 且不能考虑基坑开挖宽度的影响, 而有限元强度折减法则存在计算稳定性判断准则、本构关系选择及参数确定等难题。笔者于 2014 年修改了剑桥大学 Bolton 课题组提出的强度发挥度设计法 (MSD) 中的余弦曲线, 提出了基于偏态高斯曲线机动场的 MMSD 上限分析法, 成功用于软土宽基坑稳定的分析; 随后于 2018 年采用 MMSD 方法成功分析软土狭长型基坑支护土体的变形。进一步采用 MMSD 方法对新加坡 Nicoll highway 基坑和杭州湘湖基坑两个狭长型基坑倒塌案例进行分析, 并与实测值、极限平衡法 (包括规范法、Hsieh 等的方法、Su 等的方法) 和有限元法预测结果进行了比较。结果表明 MMSD 法基于狭长深窄基坑相适应的机动场, 采用实测土体应力应变关系且能考虑土体不排水强度各向异性, 可以更准确地预测倒塌发生机制。

关键词: MMSD 法; 软土; 窄基坑; 倒塌; 变形

中图分类号: TU434 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2020)09-1603-09

作者简介: 王立忠(1969—), 男, 教授, 长江学者特聘教授。主要研究方向为软黏土力学、海洋岩土工程。E-mail: wanglz@zju.edu.cn。

Collapse of deep excavations for metro lines in soft clay

WANG Li-zhong^{1, 2}, LIU Ya-jing^{1, 2}, LONG Fan³, HONG Yi^{1, 2}

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2. Key Laboratory of Offshore Geotechnics and Material of Zhejiang Province, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 3. Wuhan Municipal Engineering Design and Research Institute Co., Ltd., Wuhan 430023, China)

Abstract: In recent decades, numerous deep excavation projects for metro lines and transportation tunnels have been executed in soft clay in urban areas of coastal cities. Collapses of these deep excavations in soft clay are reported from time to time, including the infamous collapses of Nicoll highway excavation for metro circle line in Singapore (2004) and Xianghu excavation for a subway station in Hangzhou (2008). In routine practice, the stability or deformation of an excavation is calculated using the separated approaches, i.e., the limit equilibrium method and the finite element method (FEM), respectively. It is well recognized that the former usually does not consider the effect of excavation width, while the latter usually involves very sophisticated soil models and additional challenges posed by determination of model parameters. These limitations have led to the development of an upper bound method entitled mobilizable strength design (MSD) method by Prof. Bolton in Cambridge University, for predicting stability and deformation of excavations in soft clay in a unified yet simple manner. The authors (Wang & Long, 2014) have recently proposed an improved MSD method (i.e., MMSD method), where a more realistic plastic deformation mechanism is implemented for analyzing the stability of excavations in soft clay. The capability of MMSD for predicting deformation of excavations in soft clay is later verified against the field data of eight case histories (Wang et al., 2018). This study aims to examine the capability of MMSD to predict the collapse of Nicoll highway excavation and Xianghu excavation. It is shown that the MMSD method offers more accurately the prediction for the occurrence of the collapses of the two case histories than the existing limit equilibrium methods (standard method, Hsieh et al's. method and Su et al's. method) and finite element methods, as it accounts for a more realistic deformation mechanism for narrow deep excavations and the strength anisotropy of soft clay.

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFC0800200); 国家自然科学基金项目 (51939010, 51779221)

收稿日期: 2019-12-06

*通信作者 (E-mail: yi-hong@zju.edu.cn)

Key words: MMSD method; soft clay; narrow excavation; collapse; deformation

0 引言

深基坑工程常见于城市地铁车站和高层建筑等基础设施的建设当中。随着目前城市规模急剧扩大，大型地铁车站或城市公路隧道屡见不鲜，在各大城市中出现了大量狭长型深基坑，且基坑支护失效的情况仍时有发生。

针对地铁基坑坑底隆起倒塌事故，大量国内外学者利用极限平衡法^[1-4]或有限元法^[5-8]对 Nicoll highway 基坑和湘湖基坑倒塌原因进行了分析，但往往将抗隆起安全度（FOS）与支护侧移分别独立考虑。预测基坑稳定性安全度 FOS 的静力平衡法、圆弧滑动法等极限平衡法假定的失效模式往往不能考虑基坑宽度的影响^[9]，并不适用于如地铁车站的狭长型软土深基坑，在倒塌工况计算出的安全度 FOS 值与临界值（理论值为 1.0）差别较大。有限元强度折减法预测基坑稳定性在国内外得到了广泛应用，但事实上该方法存在着计算稳定性判断准则、本构关系选择与参数确定等难题^[10]，Nicoll highway 基坑倒塌的主要原因之一正是基坑设计时误用有限元法导致的（基于有效应力分析、采用理想弹塑性模型加莫尔库仑破坏准则，进而高估土体强度^[4-5]）。在基坑倒塌事后分析的文献中，Nicoll highway 基坑和湘湖地铁基坑倒塌过程中的支护侧移普遍利用有限元法进行分析，使用的土体本构模型包括基于 Mohr–Coulomb 破坏准则的理想弹塑性模型^[5]和 MIT E3 模型等^[6]。但有限元法在预测开挖各步的支护侧移最大值上效果并不好，最大误差可达 25% 以上。另外，有限元法在模型建立和参数选取上较复杂，工程上推广应用上有一定难度。

曾国熙先生^[11]通过案例验算表明基于固结不排水强度的分析法在预测土坡稳定性、地基承载力和单桩承载力等方面都具有很高的可靠性。中国的建筑地基基础设计规范^[12]强调了饱和黏性土基坑设计时应采用在土的有效自重应力下预固结的不固结不排水三轴试验确定强度指标，并宜采用薄壁取土器取样。这里有两点应该指出，一是自重应力下的土体是 K_0 固结状态，二是土体的固结不排水强度有应力路径依赖性；针对以上两点问题，Wang 等^[13]根据 S-clay 模型提出了软土各向异性不排水公式，为软土基坑考虑不排水土体强度各向异性的稳定分析奠定了参数取值基础。

Osman 等提出的强度发挥设计法^[14]（MSD 法）是一种固结不排水强度分析法，并可考虑基坑不同区域土体不排水强度的各向异性。它只需土体不排水强度参数、实测土体单剪应力应变曲线和基坑几何参数便可同时预测开挖各阶段的安全度和支护侧移。笔者

在 MSD 法中引入更符合实际的基坑变形曲线提出了改进强度发挥法（MMSD）法^[15-17]，并针对软土地区狭长型深基坑 ($B < 2\sqrt{2}(l-h)$, B 为开挖宽度, l 为变形波长（影响机动场变形范围的参数）， h 为底层支撑下的开挖深度，构造了相应的坑内变形机动场。Wang 等^[16]曾利用 MMSD 法预测 3 处典型宽基坑失稳案例中安全度的演化，得到的基坑倒塌深度相比传统极限平衡法更符合实际。Wang 等^[17]利用此法对国内上海、杭州地区 8 处软土狭长型深基坑的支护侧移进行了预测，预测结果相比 MSD 法也更接近实测值。

本文首先介绍 MMSD 法基本理论及其在预测狭长型基坑安全度和支护侧移方面的优势，然后总结了前人对新加坡 Nicoll highway 基坑和杭州湘湖地铁基坑两典型狭长型基坑倒塌原因的分析，并指出分析方法上的不足。最后利用 MMSD 法预测两个基坑安全度与支护侧移，并与实测值^[18]、极限平衡法（规范法^[12]、Hsieh 等的方法^[19]、Su 等的方法^[20]）和有限元法（Corral 等^[6]、Chen 等^[8]）预测结果进行比较。

1 MMSD 方法基本理论

强度发挥设计法（MSD 法）是由 Osman 等^[14]提出的用以预测多内撑软土基坑变形和安全度的上限解析法。它只需要典型土体单元的发挥强度 ($\beta = s_{u_mob} / s_u$, s_{u_mob} 为土体强度发挥值, s_u 为土体不排水强度) 与剪应变 (γ) 曲线、不排水强度值和基坑尺寸参数便可同时计算基坑开挖各步的安全度和支护侧移。它可以考虑特定的施工工况和土体非线性特征，其主要原理是在假定的塑性机动场中利用功能守衡原理得到土体平均强度发挥度，结合典型土单元的实测应力应变关系，得到机动场内平均剪应变，再由机动场平均剪应变计算出开挖各阶段的变形增量，累加后即可得到总变形量。Lam 等^[21]、王浩然等^[22]在 MSD 方法上考虑了支护弹性形变势能的作用，提出扩展的 MSD 法。龙凡^[15]和 Wang 等^[16]在 MSD 法基础上引入了更加符合实际的偏态高斯曲线机动场模式（式(1)，图 1），并考虑基坑宽度影响，提出了更符合狭长型深基坑机动场特征的 MMSD 分析方法。图 2 (b) 和图 3 是 MMSD 法中提出的基坑变形机动场和坑内被动区位移场增量图^[15-17]。

$$\Delta\delta_h = \Delta\delta_{h\text{-max}} \frac{4y}{l} \exp\left(\frac{1}{2} - \frac{8y^2}{l^2}\right) , \quad (1)$$

式中， $\Delta\delta_h$ 为开挖各步基坑变形增量， $\Delta\delta_{h\text{-max}}$ 为开挖各步基坑变形增量最大值， y 为距基坑变形曲线原点的距离， l 为变形波长（影响机动场变形范围的参数）。

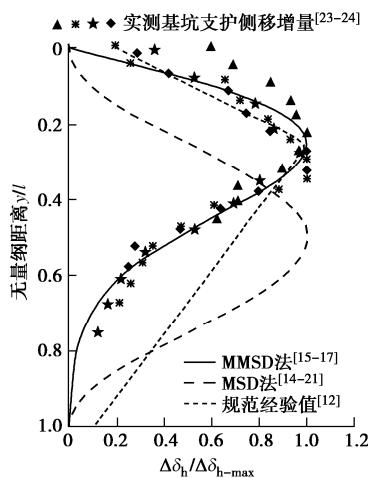


图 1 MMSD 法和 MSD 法变形曲线与实测数据比较

Fig. 1 Comparison of deformation profile between measured data and theoretical curves by MMSD and MSD

MSD 法机动场变形曲线型式以最下层支撑以下支护侧移增量拟合得到, 但实际基坑机动场变形波长一般大于最下层支撑以下支护的高度。尤其在软土地区, 支护底部无法嵌入良好土层时, 变形曲线的型式应由支护及其下方土体的侧移共同决定。图 1 总结了基坑离心机试验中测得的支护与土体侧移增量^[23]和上海地区软土地区基坑现场实测支护侧移增量^[24], 并与 MMSD 法^[15-17]、MSD 法^[14-21]机动场变形曲线和规范法中经验曲线^[12]进行了比较。结果表明 MMSD 法提出的偏态高斯曲线不论在峰值点位置还是整体形态方面都较另两条曲线更符合实测值。图 2 (a) 是离心机试验中多支撑狭长型软土基坑变形位移场及其边界位移包络图, 其地表沉降与支护侧移的峰值点位置 (0.24l) 和整体形态与图 2 (b) 中 MMSD 法针对狭长型基坑提出的机动场十分接近 (0.22l)。而与图 2

(c) 中 MSD 法峰值点位置 (0.42l) 差别较大。

根据能量守衡原理, 土体由于竖向位移产生的势能损失与其所发挥的剪切应变耗散能相等, 土体强度发挥程度 β 可由下式得到^[14]

$$\beta = \frac{\int_v \gamma_{\text{sat}} \Delta \delta_v dv}{\int_v s_u \delta \gamma dv}, \quad (2)$$

式中, γ_{sat} 、 s_u 、 v 分别表示土体饱和重度、不排水抗剪强度和变形区域的总体积。表 1^[15]与表 2^[15]分别为基坑变形区域内各点的剪应变增量 ($\delta \gamma$) 与竖向位移增量 ($\Delta \delta_v$)。根据 β 值以及变形区域典型土体单元的实测强度发挥曲线, 可得到整个变形区域内土体的平均发挥剪应变增量 ($\delta \gamma_{\text{mob}}$)。将 $\delta \gamma_{\text{mob}}$ 与表 1 中的 $\delta \gamma$ 代入式 (3) 中, 即可得到机动场变形增量曲线最大值 $\Delta \delta_{h-\text{max}}$, 进而由式 (1) 可知基坑整体变形 $\Delta \delta_h$ 。

$$\delta \gamma_{\text{mob}}(\beta) = \frac{\int_v \delta \gamma (\Delta \delta_{h-\text{max}}) dv}{\int_v dv}. \quad (3)$$

表 1 MMSD 法各变形区域工程剪应变增量^[15]

Table 1 Engineering shear strain increments of a narrow excavation calculated by MMSD method^[15]

区域	MMSD 法各变形区域工程剪应变增量 ($\delta \gamma$)
ABDC	$\delta \gamma = \left \Delta \delta_{h-\text{max}} \frac{4}{l} \left(1 - \frac{16}{l^2} x^2 \right) \exp \left(\frac{1}{2} - \frac{8x^2}{l^2} \right) \right $ $x = \text{计算点与支护的距离}$
CDE	$\delta \gamma = \left \Delta \delta_{h-\text{max}} \frac{64}{l^3} r^2 \exp \left(\frac{1}{2} - \frac{8r^2}{l^2} \right) \right $ $r = \text{计算点与圆心 } D \text{ 的距离}$
FIEH	$\delta \gamma = \left \Delta \delta_{h-\text{max}} \left\{ \left(\frac{4}{l^3} \left(1 - \frac{16y^2}{l^2} \right) - \frac{\pi^2 l}{4B^2} \right) \exp \left(\frac{1}{2} - \frac{8y^2}{l^2} \right) + \frac{\pi^2 l e^{-7.5}}{4B^2} \right\} \cos \left(\frac{\pi x}{B} \right) \right $ $x = \text{计算点与支护的距离}; y = \text{计算点与最下层支撑与墙交点 } F \text{ 的距离}$

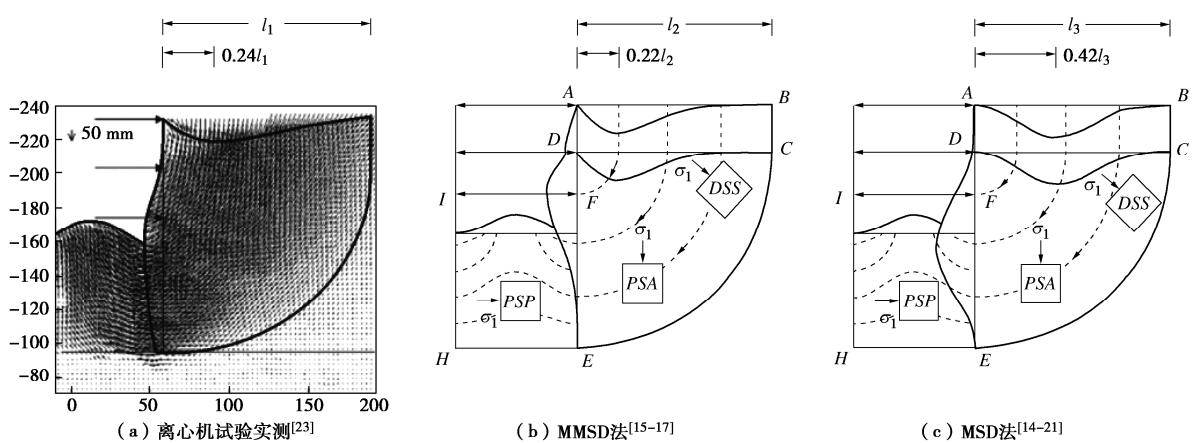


图 2 狹长型基坑土体位移场比较

Fig. 2 Comparison of ground deformation mechanism for narrow excavations

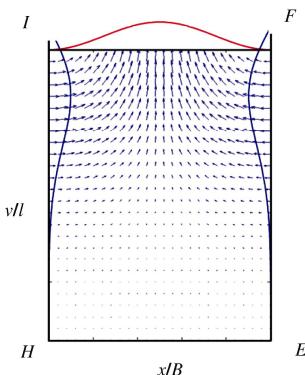
图 3 MMSD 法基坑被动区 (IHEF) 土体位移增量^[15]

Fig. 3 Displacement increments of soil assumed by MMSD

method in passive area of excavations (IHEF)^[15]表 2 MMSD 法各变形区域竖向位移增量^[15]Table 2 Vertical displacement increments of a narrow excavation calculated by MMSD method^[15]

区域	MMSD 法各变形区域竖向位移增量 ($\Delta\delta_v$)
ABDC	$\Delta\delta_v = \Delta\delta_{h-\max} \frac{4x}{l} \exp\left(\frac{1}{2} - \frac{8x^2}{l^2}\right)$ x=计算点与支护的距离
CDE	$\Delta\delta_v = \Delta\delta_{h-\max} \frac{4r \cos w}{l} \exp\left(\frac{1}{2} - \frac{8r^2}{l^2}\right)$ r=计算点与圆心 D 的距离
IHEF	$\Delta\delta_v = -\frac{\pi l \Delta\delta_{h-\max}}{4B} \left[\exp\left(\frac{1}{2} - \frac{8y^2}{l^2}\right) - e^{-7.5} \right] \sin\left(\frac{\pi x}{B}\right)$ x=计算点与支护的距离; y=计算点与最下层支撑与墙交点 F 的距离

2 杭州湘湖地铁基坑倒塌与前人分析

图 4 是湘湖地铁基坑事故现场^[15], 其倒塌段总长 107.8 m, 宽 21.2 m, 最大开挖深度 15.7~16.3 m。基坑长轴方向西侧为风情大道, 车流量大。基坑采用地下连续墙与四道钢管内支撑支护, 地下连续墙厚度 0.8 m, 嵌固深度 17.3 m, 但仍悬于淤泥质粉质黏土之中。图 5 是基坑支护设计截面图。工程场地 0~-1.5 m 为填土层, -1.5~-7.1 m 深度处为软一中等粉质黏土层 (2-2 层)。2-2 层以下是 12 m 厚的非常软弱的淤泥质黏土 (4-2 层), 其下同样是 15.7 m 厚非常软弱的淤泥质黏土 (6-1 层)。6-1 层以下至地下 49.9 m 处为粉质黏土^[1, 15]。通过事故前后的现场勘测数据可知, 该基坑场地主要土层具有高含水率、高孔隙比、高压缩性和低抗剪强度的特点, 如图 6 所示^[8]。场地软黏土层渗透系数均很低^[1], 在基坑开挖与建设过程中可视为不排水工况。

湘湖地铁基坑倒塌的最主要原因是坑底超挖^[1, 8, 15]。设计规定基坑开挖至支撑设计标高以下 0.5 m 时, 必须及时设置支撑, 不得超挖。图 7 是实际开挖时 N2

段基坑工序图^[15], 可看出在长约 26 m 的施工段上未设置最下一道支撑即挖至基坑底, 导致该施工段范围内第三道支撑轴力急剧增大, 而第三道支撑的单根钢管承载力却由于施工原因大幅降低, 因此该施工段内支撑体系首先失效。施工时未按设计要求对坑底被动区土体进行搅拌桩加固也是湘湖基坑倒塌的诱因, 如图 8 所示^[15]。

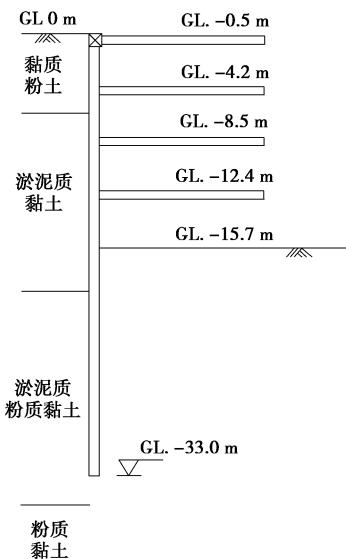
图 4 湘湖基坑倒塌现场^[15]Fig. 4 Xianghu excavation after collapse^[15]图 5 湘湖基坑围护结构设计图^[15]Fig. 5 Soil profile and retaining structures along a typical section of Xianghu excavation^[15]

表 3 总结了张矿成等^[1], Chen 等^[8]分别通过极限平衡法和有限元强度折减法计算的湘湖地铁基坑安全度。虽然两者计算结果都表明在超挖情况下基坑会发生倒塌 ($FOS < 1.0$), 但极限平衡法所得 FOS 远小于临界值 1.0, 过于保守, 并且不同极限平衡分析法所对应的破坏临界值均不相同且大于 1.0^[1], 缺乏理论依据。Chen 等^[8]利用有限元强度折减法计算了超挖段与未超挖段 FOS 值, 分别为 0.94 与 0.97 (均小于 1.0), 表明不超挖基坑也要倒塌, 与实际有所出入。Chen

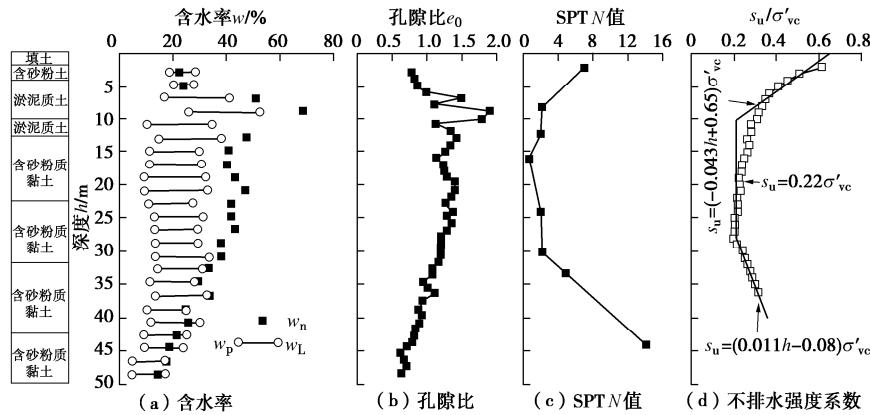
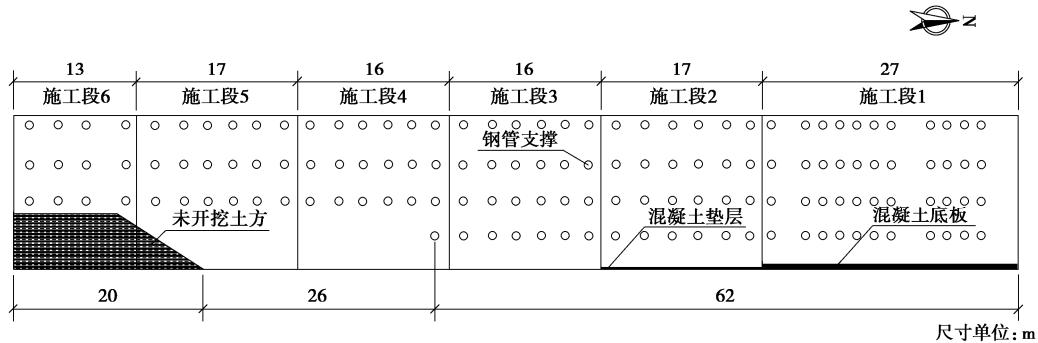
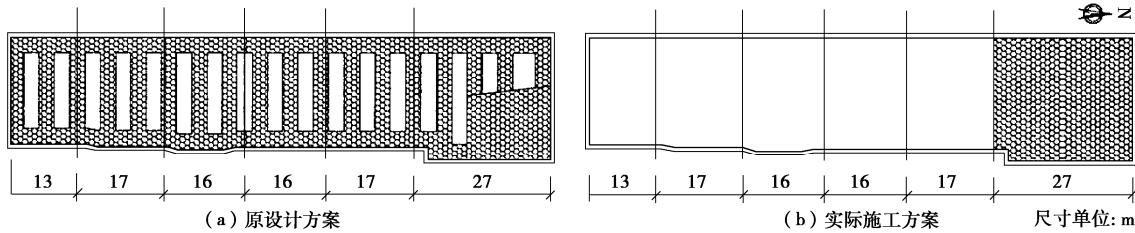
图 6 湘湖地铁基坑土体性质实测值^[8]Fig. 6 Measured values of Xianghu subway excavation^[8]图 7 湘湖基坑开挖工序图^[15]Fig. 7 Construction sequence of Xianghu excavation^[15]图 8 被动区加固方案^[15]Fig. 8 Regions for ground improvement in passive area^[15]

表 3 两典型基坑失效案例安全度预测

Table 3 Predicted FOS of two classical case histories

所用方法	Nicoll highway 基坑 FOS	临界值	所用方法	湘湖基坑 FOS	临界值
有限元法	1.12 ^[5]	1.3	有限元法	0.94 ^[8]	1.0
极限平衡法	1.26 ^[4]	1.0	极限平衡法	0.77 ^[1]	1.6
极限平衡法	2.16 ^[4]	1.0	极限平衡法	0.65 ^[1]	1.4

等^[8]利用有限元法计算了基坑超挖与未超挖段支护侧移, 结果超挖段支护侧移较非超挖段高约 140%, 这会使得内支撑承受远超预期的轴向压力。

3 湘湖基坑安全度与支护侧移 MMSD 法分析

3.1 计算参数选取

图 6 (d) 和图 9 分别为杭州湘湖基坑土体沿深度

的不排水强度值^[8]和应力应变关系^[17]。值得注意的是图 6 (d) 中的不排水强度是由现场十字板剪切试验得到, 即 s_{u_vc} 。根据 Bjerrum^[26], 对于湘湖基坑中 I_p 为 13~21 的软土可得 $s_{uc}=s_{u_vc}$ 。MMSD 法与 MSD 法可考虑土体强度各向异性的影响, 需在土体不同剪切区域(见图 2 (b))用三轴压缩 (s_{uc})、拉伸 (s_{ue}) 或直剪试验 (s_{ud}) 结果。 s_{uc} 即按图 6 (d) 中取值, s_{ue} 按 s_{uc} 值乘以土体各向异性系数得到, s_{ud} 取压缩区与拉伸

区土体强度平均值^[14]。其它考虑土体强度各向异性的极限平衡法（即规范法^[12]，Hsieh 等^[19]的方法和 Su 等^[20]的方法）中， s_{ue} 与 s_{uc} 均按上述方法取值。

表 4, 5 分别列出了 MMSD 法^[15-17]、MSD 法^[14, 21]、规范法^[12]、Hsieh 等^[19]的方法和 Su 等^[20]的方法使用的基坑几何参数和土体性质参数^[4-6, 8, 15]。杭州湘湖基坑所处土层主要为含砂粉质黏土，其性质沿深度的差异性较小，如图 6 所示。因此为简化分析，土体力学性质参数，如各向异性系数 (s_{ue}/s_{uc})，土体浮重度 (γ') 和有效内摩擦角 (φ') 等为主要土层参数的厚度加权平均值。由于湘湖和 Nicoll highway 基坑紧邻行车道，因此考虑较大地面超载，取 20 kPa。

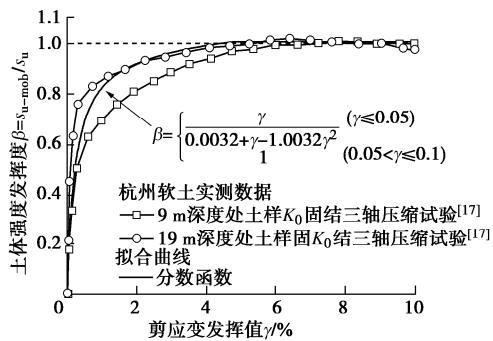


图 9 杭州软土应力应变关系^[17]

Fig. 9 Stress-strain relationship of Hangzhou soft clay^[17]

表 4 各基坑计算几何参数

Table 4 Geometrical properties of two classical case histories

名称	支护厚度/mm	支护高度/m	开挖深度/m	基坑宽度/m	平面长度/m
Nicoll highway	800	42.5	33.3	20.0	85.5
湘湖站	800	33.6	16.3	21.2	107.8

表 5 各安全度计算方法参数

Table 5 Parameters of various methods for predicting FOS

名称	各向异性系数 s_{ue}/s_{uc}	土体浮重度 $(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	有效内摩擦角/ $(^\circ)$	地面超载/kPa
Nicoll highway	0.8	6.7	24.1	20.0
湘湖站	0.7	8.0	22.0	20.0

3.2 预测结果

图 10 对比了 MMSD 法与传统极限平衡法预测的基坑抗隆起安全度。随着基坑开挖深度不断增大，所有方法预测的安全度均不断减小。但在倒塌深度时，MMSD 法预测的安全度值最接近 1.0。这主要由于 MMSD 法具有与狭长型深基坑相适应的土体变形机制，并可以通过在土体拉伸区、压缩区和直剪区采用不同的土体不排水强度来考虑土体强度各向异性的影响。MSD 法相较于 MMSD 法由于假设的变形曲线与实际差异较大，因而计算结果不理想。其它极限平衡法假定的破坏区未考虑基坑宽度的影响以及滑动区

内部土体变形造成的重力势能损失和土体强度发挥，因而不能很好预测基坑开挖过程中的真实安全度。Hsieh 等^[19]的方法，Su 等^[20]的方法相比规范法^[12]由于考虑了滑动面上土体强度的各向异性，其预测结果相对较好。

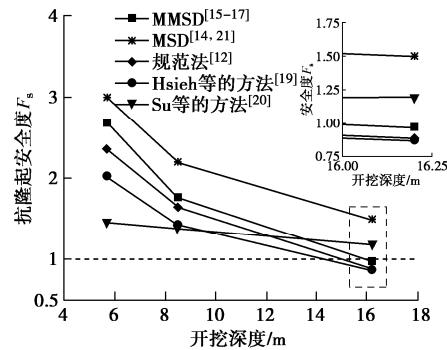


图 10 湘湖基坑抗隆起安全度不同方法预测结果比较

Fig. 10 Comparison of predicted FOS against basal heave of Xianghu excavation between MMSD and other methods

图 11 为 MMSD 法预测的基坑在超挖和非超挖工况下支护变形结果，并与 Chen 等^[8]利用有限元法预测的结果进行了对比。结果显示基坑在超挖近 4 m 后，由于墙前被动土压力急剧减小，支护侧移显著增大。MMSD 法结果显示超挖段最大支护侧移相比非超挖段最大支护侧移增加约 67%，而有限元法则预测增加 140%。MMSD 法预测最大支护侧移所在深度均在 1.25 倍基坑最大开挖深度处，而有限元法结果均为支护底端。由于没有实测数据进行对比，因而无法说明何种方法所得结果更加接近实际。虽然 MMSD 法与有限元法都可以反映超挖对支护变形的影响，但 MMSD 法只需要一条典型土体应力应变曲线，土体沿深度的不排水强度及基坑几何信息即可简便、高效的进行预测，更有利于在工程中广泛应用。

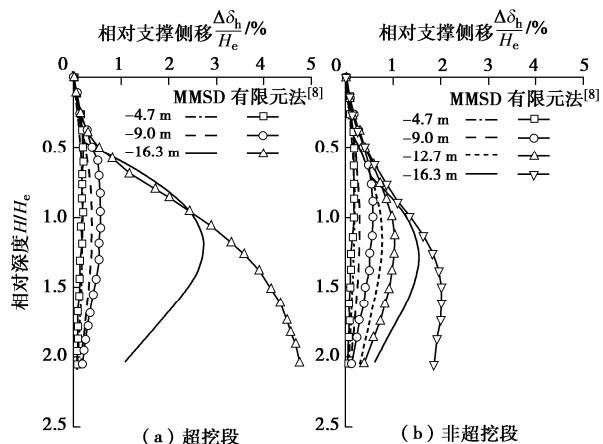


图 11 湘湖基坑超挖段与非超挖段支护侧移预测对比

Fig. 11 Comparison between MMSD and FEM for predicting wall deflections

4 Nicoll highway 基坑倒塌与前人分析

新加坡 Nicoll highway 基坑最大开挖深度约 33.5 m, 宽度约 20 m, 倒塌段长度约 85 m。支护由 0.8 m 厚、40~45 m 高地下连续墙, 10 道钢支撑及两层坑底水泥搅拌桩加固区组成, 地下连续墙底部嵌入硬土层的深度约 1~3 m。图 12 为 Nicoll highway 基坑所处土层围与护结构设计图^[4], 其中上层水泥搅拌桩加固区在开挖过程中会被移除, 基坑倒塌即发生在移除此加固区后, 架设最底层钢支撑之前。图 13 是 Nicoll highway 基坑倒塌现场^[4]。

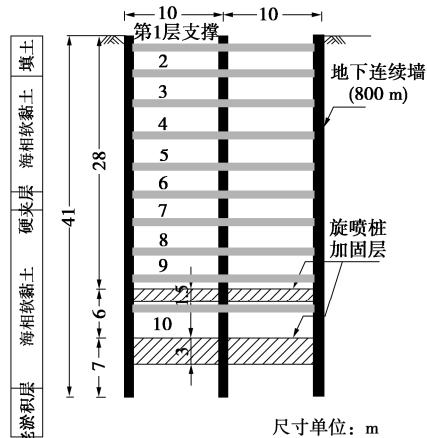


图 12 Nicoll highway 基坑所处土层围与护结构设计图^[4]

Fig. 12 Soil profile and retaining structures along a typical section of Nicoll highway excavation^[4]



图 13 Nicoll highway 基坑倒塌现场^[4]

Fig. 13 Nicoll highway excavation after collapse^[4]

Puzrin 等^[4]、Whittle 等^[5]、Corral 等^[6]和肖晓春等^[7]认为事故发生的主要原因是基坑场地广泛分布有海洋沉积软黏土层, 工程性质差, 渗透系数较低 (10^{-9} m/s^[5]), 在基坑开挖过程中可视为不排水。但在支护设计阶段, 设计者错误地在 Mohr-Coulomb 理想弹塑模型中使用了排水强度参数, 即有效强度参数, 导致土体强度被高估 (图 14), 主动土压力被低估, 支护

体系设计薄弱引起事故^[5-7]。Whittle 等^[5]、Corral 等^[6]和肖晓春等^[7]利用有限元法分别采用有效应力参数和总应力参数计算支护侧移, 发现利用有效应力参数会明显低估支护最大侧移, 从而使计算的围护体系内力较实际情况偏低, 偏于不安全。有限元法在预测开挖过程中的支护侧移最大值上效果并不好, 最大误差可达 25%以上^[6-7]。另外, 建模与参数取值的复杂性不利于该法在工程上推广应用。

对于 Nicoll highway 基坑安全度演化, 表 3 为前人利用有限元法和极限平衡法所得结果。Whittle 等^[5]利用有限元强度折减法进行了预测, 发现不管使用有效应力参数还是总应力参数, FOS 值都小于临界值。利用此法预测 FOS 的缺点是它只能根据支护体系变形大小判断基坑是否失效, 给出的 FOS 值并不是基坑倒塌时的真实值, 因而会造成高估^[8]。Puzrin 等^[4]根据支撑内力和主动土压力比值计算出挖至坑底时基坑长期与短期 FOS 值, 结果两 FOS>1.0, 与实际不符。Puzrin 等^[4]利用此法又分析了基坑开挖各阶段支撑内力演化, 发现第六层支撑会率先发生屈曲, 引发最终倒塌。Ishihara 等^[25]认为事故原因是倒塌段支护未嵌入老淤积层土, 造成支护底部向坑内侧移过大, 诱发第 9 层支撑屈曲进而引起连锁破坏。但分析中并未根据基坑抗隆起稳定性或嵌固稳定性理论进行验证。

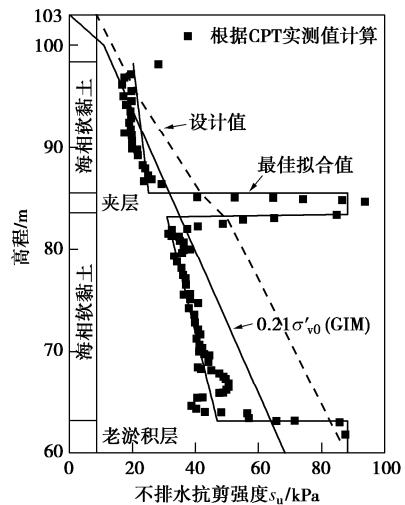


图 14 Nicoll highway 基坑海相黏土不排水抗剪强度分布值^[5]

Fig. 14 Undrained strength ratios of marine clay at Nicoll highway excavation^[5]

5 Nicoll highway 基坑安全度与支护侧移 MMSD 法分析

5.1 计算参数选取

图 14 和图 15 分别为新加坡 Nicoll highway 基坑土体沿深度的不排水强度值^[5]和无量纲化的应力应变关系实测值^[6]与拟合值。 s_{uc} 与 s_{ue} 取值按 3.1 节方法。

表 4 和表 5 分别列出了 MMSD 法^[15-17]、MSD 法^[21]、规范法^[12]、Hsieh 等^[19]的方法和 Su 等^[20]的方法使用的基坑几何计算参数和其它土体性质参数。

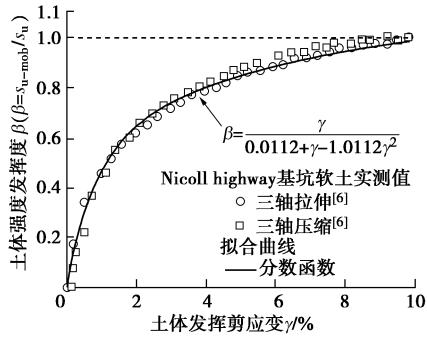


图 15 新加坡 Nicoll highway 基坑软土三轴压缩和拉伸应力应变关系

Fig. 15 Stress-strain responses for triaxial compression and extension tests on soft clay at Nicoll highway excavation in Singapore

5.2 预测结果

图 16 对比了各方法预测的 Nicoll highway 基坑抗隆起安全度。与湘湖基坑安全度预测结果类似，所有方法预测的安全度均不断减小。但在倒塌深度时，MMSD 法预测的安全度值最接近 1.0。其它方法则会高估基坑破坏时的深度。如果利用图 14 中高估的土体强度设计值进行安全度预测会高估开挖各个阶段基坑安全度，进而造成设计支护插入深度不够或坑底加固措施不当等问题。

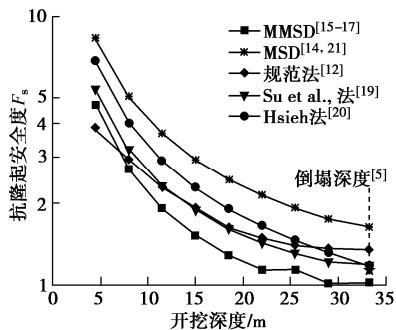


图 16 Nicoll highway 基坑抗隆起安全度预测结果比较
Fig. 16 Comparison of predicted FOS against basal heave of Nicoll highway excavation between MMSD and other methods

图 17 为 MMSD 法预测的基坑开挖最后 4 个阶段支护最大侧移，并与实测值^[18]、设计时采用的有限元值^[18]（下文简称设计值）和有限元结果^[6]进行比较。结果表明对倒塌时最终支护侧移，MMSD 法与有限元法都预测较准确。但在倒塌前阶段，有限元法预测误差达 3.0%~25.1%，而 MMSD 法预测误差均在 2.5% 以内，效果更好。支护侧移设计值显著低于实际值正是由于在理想弹塑性模型中采用了有效强度指标，高估了土体强度造成的^[5]。

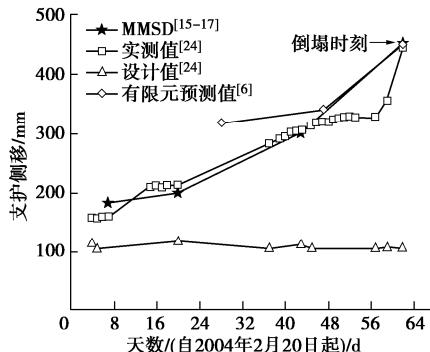


图 17 Nicoll highway 基坑支护侧移预测对比

Fig. 17 Comparison of predicted wall deflections for Nicoll highway excavation using different methods

6 结 论

本文总结了前人对杭州湘湖地铁基坑和新加坡 Nicoll highway 基坑倒塌案例的分析，说明极限平衡法与有限元法在预测基坑 FOS 与支护侧移方面的不足。然后利用笔者提出的可同时计算基坑稳定安全度 FOS 和支护侧移的 MMSD 法对两典型地铁深基坑案例进行了分析，将 FOS 预测结果与传统极限平衡法进行了比较，将支护侧移预测结果与有限元法进行了比较。

分析结果表明对于两典型狭长型深基坑失效案例，有限元法和极限平衡法可以通过计算变形和 FOS 给出最终倒塌的结论，但无法同时考虑两者，并且计算结果与实际仍有较大误差。MMSD 法采用了更符合狭长型深基坑的机动场，可以考虑土体强度各向异性和平动区内部土体重力势能损失和土体强度发挥，因而对地铁软土地区狭长型深基坑 FOS 的预测结果相比传统极限平衡法更符合实际。MMSD 法是一种上限解析法，输入参数易获取，对支护侧移的预测与有限元法相比在具备精确性的前提下更加高效。MMSD 法可同时准确且高效的预测安全度和支护侧移，在工程中具有广阔的应用前景。

参 考 文 献：

- [1] 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 - 341. (in Chinese))
- [2] 张雪婵. 软土地基狭长型深基坑性状分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2012. (ZHANG Xue-chan. Behavior of Narrow Deep Excavation in Soft Clay[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012. (in Chinese))
- [3] 李广信, 李学梅. 软黏土地基中基坑稳定分析中的强度指标[J]. 工程勘察, 2009(1): 1 - 4. (LI Guang-xin, LI Xue-mei.

- The shear strength in stability analysis of subway pit in soft clay[J]. Geotechnical Investigation and Surveying, 2009(1): 1 - 4. (in Chinese))
- [4] PUZRIN A M, ALONSO E E, PINYOL N M. Geomechanics of Failures, Chapter 6-Braced Excavation Collapse: Nicoll Highway, Singapore[M]. Dordrecht, the Netherlands: Springer, 2010.
- [5] WHITTLE A J, DAVIES R V. Nicoll highway collapse: evaluation of geotechnical factors affecting design of excavation support system[C]// International Conference on Deep Excavations, 2006, Singapore.
- [6] CORRAL G, WHITTLE A J. Re-analysis of deep excavation collapse using a generalized effective stress soil model[C]// Earth Retention Conference, 2010, Bellevue: 720 - 732.
- [7] 肖晓春, 袁金荣, 朱雁飞. 新加坡地铁环线 C824 标段失事原因分析(二)——围护体系设计中的错误[J]. 现代隧道技术, 2009, 46(5): 66 - 72. (XIAO Xiao-chun, YUAN Jin-rong, ZHU Yan-fei. Causation analysis of the collapse on Singapore MRT Circle Line Lot C824 (Part2): Critical Design Errors in Temporary Retaining System[J]. Modern Tunnelling Technology, 2009, 46(6): 29 - 34. (in Chinese))
- [8] CHEN R P, LI Z C, CHEN Y M, et al. Failure investigation at a collapsed deep excavation in a very sensitive organic soft clay[J]. J Perform Constr Facil, 2015, 29(3): 04014078.
- [9] 张飞, 李镜培, 孙长安, 等. 软土狭长深基坑抗隆起破坏模式试验研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(10): 2825 - 2832. (ZHANG Fei, LI Jing-pei, SUN Chang-an, et al. Experimental study of basal heave failure mode of narrow-deep foundation pit in soft clay[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(10): 2825 - 2832. (in Chinese))
- [10] GRIFFITHS DV, LANE PA. Slope stability analysis by finite elements[J]. Géotechnique, 1999, 49(3): 387 - 403.
- [11] 曾国熙. $\phi_u=0$ 分析法——一种对于饱和黏性土值得推广应用的方法[J]. 地基处理, 2001, 12(3): 3 - 18. (ZENG Guo-xi. On the application of $\phi_u=0$ analysis for saturated cohesive soils[J]. Ground Improvement, 2001, 12(3): 3 - 18. (in Chinese))
- [12] 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))
- [13] WANG L Z, SHEN K L, YE S H. Undrained shear strength of K_0 consolidated soft soils[J]. Int J Geomech, 2008, 8(2): 105 - 113.
- [14] OSMAN A S, BOLTON M D. Ground movement predictions for braced excavations in undrained clay[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2006, 132(4): 1865 - 1876.
- [15] 龙凡. 上限法分析深厚软土中基坑坑底抗隆起稳定性[D]. 杭州: 浙江大学, 2014. (LONG Fan. Upper Bound Limit Analysis for Base Stability of Deep Excavation in Soft Clay[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014. (in Chinese))
- [16] WANG L Z, LONG F. Base stability analysis of braced deep excavation in undrained anisotropic clay with upper bound theory[J]. Science China Technological Sciences, 2014, 57(9): 1865 - 1876.
- [17] WANG L Z, LIU Y J, HONG Y, et al. Predicting deformation of multipropelled excavations in soft clay with a modified mobilizable strength design (MMSD) method[J]. Computers and Geotechnics, 2018, 104: 54 - 68.
- [18] COI Report of the Committee of Inquiry Into the Incident at the MRT Circle Line Worksite that Led to Collapse of Nicoll Highway on 20 April 2004[R]. Singapore: Ministry of Manpower, 2005.
- [19] HSIEH P G, OU C Y, LIU H T. Basal heave analysis of excavations with consideration of anisotropic undrained strength of clay[J]. Can Geotech J, 2008, 45: 788 - 799.
- [20] SU S F, LIAO H J, LIN Y H. Base stability of deep excavation in anisotropic soft clay[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1998, 124(9): 809 - 819.
- [21] LAM S Y, BOLTON M D. Energy conservation as a principle underlying mobilizable strength design for deep excavations[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2011, 137(11): 1062 - 1074.
- [22] 王浩然, 王卫东, 黄茂松, 等. 基坑变形预测的改进 MSD 法[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(增刊 1): 3245 - 3251. (WANG Hao-ran, WANG Wei-dong, HUANG Mao-song, et al. Modified mobilizable strength design (MSD) method on deformation predictions of foundation pit[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(S1): 3245 - 3251. (in Chinese))
- [23] LAM S. Ground Movements Due to Excavation in Clay: Physical and Analytical Models[D]. Cambridge: University of Cambridge, 2010.
- [24] WANG Z W, NG C W W, LIU G B. Characteristics of wall deflections and ground surface settlements in Shanghai[J]. Can Geotech J, 2005, 42(5): 1243 - 1254.
- [25] ISHIHARA K, LEE W F. Forensic Diagnosis for Site Specific Ground Conditions in Deep Excavations of Subway Constructions[M]// COUTINHO R Q, MAYNE P W, eds. Geotechnical and Geophysical Site Characterization. Taylor & Francis, FL 2008, Boca Raton: 31 - 59.
- [26] BJERRUM L. Problems of soil mechanics and construction on soft clays and structurally unstable soils (collapsible expansive and others)[C]// Proceedings of 8th International Conference for Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1973, Moscow: 111 - 159.