

DOI: 10.11779/CJGE202105002

# 地下连续墙成槽整体稳定性的工程评价方法

黄茂松<sup>1, 2</sup>, 王鸿宇<sup>1, 2</sup>, 谭廷震<sup>1, 2</sup>, 李耀良<sup>3</sup>

(1. 同济大学土木工程学院地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092;  
3. 上海市基础工程集团有限公司, 上海 200002)

**摘要:** 当前分层地基中地下连续墙成槽整体稳定性验算多采用水平条分法。当槽段宽度与成槽深度比相对较小时, 三维水平条分法所给出的计算结果可能偏于不安全。此外, 验算时一般采用有效抗剪强度指标并按水土分算原则验算成槽稳定性。然而在当前我国大量的工程实践中, 地质勘察报告往往仅提供直剪固结快剪强度指标, 如何结合工程实践现状验算槽壁稳定性值得进一步的研究。首先介绍了水平条分法的理论框架, 并详细讨论了水平条分法与楔形体滑体模式的内在联系。随后结合某一现场试验展开案例分析, 指出了饱和黏土中三维楔形体模式存在的不足, 并提出一种基于三维等效楔形体的改进方法。最后结合 10 个工程案例的验算结果, 分析了二维与三维水平条分法在计算结果上的差异, 以及强度指标选取和水土压力计算原则对分析结果的影响, 为今后的工程实践提供参考。

**关键词:** 地下连续墙; 成槽稳定性; 水平条分法; 强度指标; 安全系数

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2021)05-0795-09

作者简介: 黄茂松(1965—), 男, 浙江玉环人, 博士, 教授, 博士生导师, 从事岩土工程方面的科研和教学工作。E-mail: mshuang@tongji.edu.cn。

## Engineering evaluation method for overall stability of slurry trenches

HUANG Mao-song<sup>1, 2</sup>, WANG Hong-yu<sup>1, 2</sup>, TAN Ting-zhen<sup>1, 2</sup>, LI Yao-liang<sup>3</sup>

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Shanghai Foundation Engineering Group Co., Ltd., Shanghai 200002, China)

**Abstract:** The horizontal slice method is commonly used for examining the trench stability in layered soils. Unsafe results may be given by the 3D horizontal slice method when the ratio of trench length to depth is relatively small. In addition, the effective soil strength parameters are recommended for trench stability analysis. However, the soil strength parameters in engineering reports are often obtained from the direct shear tests. Further investigation is needed to incorporate the trench stability analysis with the current practice. In this study, the theoretical framework of the horizontal slice method is introduced, and its connection with the sliding wedge method is discussed. The deficiency of the 3D sliding wedge method in undrained clay is shown by a field test, and the improvement by an equivalent 3D wedge method is proposed. A discussion on influences of the differences between 2D and 3D methods, selection of soil strength parameters and water pressure calculation on the calculated results is carried out through 10 collected case studies.

**Key words:** slurry wall; trench stability; horizontal slice method; strength parameter; safety factor

## 0 引言

在地下连续墙成槽阶段, 当泥浆支护压力不足时槽壁可能会发生失稳破坏。在成槽施工前, 有必要对槽壁稳定性进行验算。目前, 地下连续墙成槽稳定性验算方法主要是基于极限平衡法, 包含滑体模式、地基承载力模式以及土压力模式。

在滑体模式中, 最为经典的是 Nash 等<sup>[1]</sup>基于二维楔形体模型, 分别给出的干砂和饱和黏土中槽壁稳定性验算公式。地基承载力模式的代表是 Meyerhof<sup>[2]</sup>提

出的饱和黏土中槽壁稳定性验算方法。其通过引入地基承载力系数, 将地下连续墙成槽稳定性问题转化为地基承载力问题。在土压力模式中, Li 等<sup>[3]</sup>基于朗肯主动土压力理论验算槽壁稳定性, 其本质上是一种二维分析方法。

基于滑体模式, Morgenstern 等<sup>[4]</sup>提出了无黏性土

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51738010); 国家重点研发计划课题(2016YFC0800202)

收稿日期: 2020-07-02

中任意地下水位与泥浆液位下, 为维持槽壁稳定所需最小泥浆重度的计算公式。在此基础上, Filz 等<sup>[5]</sup>考虑了地表超载的影响, 给出了无黏性土中槽壁稳定性验算公式。Li 等<sup>[6]</sup>则进一步研究了倾斜地表下成槽稳定安全系数的计算方法。

尽管已可考虑地表倾斜角、地表超载、地下水位以及泥浆液位等因素对地下连续墙槽壁稳定性的影响, 上述验算方法往往仅适用于均质地基。考虑到在以往的工程实践中, 沟槽最大开挖深度一般不超过 20 m。由于土层参数往往差异不大, 因此可以近似视为均质地层进行验算。但是, 随着当前工程实践中成槽深度的不断加大, 均质地基模型与地质勘查报告中所提供的土层分布情况已明显不符。

针对分层地基中地下连续墙成槽稳定性验算问题, 夏元友等<sup>[7]</sup>将均质地基中滑体模式进行推广, 把土体水平条分为若干份土条再进行受力分析, 提出了分层地基中地下连续墙槽壁稳定性验算水平条分法。

随着成槽深度的增加, 槽段宽度与成槽深度之比也在不断减小。二维验算方法由于未能考虑端部土体的有利约束作用, 可能过于保守。因而近些年开展三维成槽稳定性分析工作也是研究的热点。

Fox<sup>[8]</sup>基于三维楔形体模式, 提出了可考虑张拉裂缝影响的槽壁稳定性验算方法, 并详细讨论了排水条件及强度指标选取对计算结果的影响。Li 等<sup>[9]</sup>进一步将三维楔形体模式推广至分层地基, 提出了可考虑侧面抗剪力作用的三维水平条分法。还有学者尝试改变破坏面的形状, 使其更加符合实际的破坏模式<sup>[10-11]</sup>。从各种方法的适用范围以及计算简便性来看, 三维水平条分法<sup>[9]</sup>是当前验算分层地基中地下连续墙成槽稳定性较为合适的方法。

需要指出的是, 目前地下连续墙成槽稳定性分析方法多采用有效抗剪强度指标  $c'$ ,  $\varphi'$ , 并按水土分算原则进行验算或是采用不排水强度指标  $c_u$ , 并按水土合算原则进行验算。但当前工程实践中地质勘察报告往往仅提供直剪固结快剪强度指标  $c_{cq}$ ,  $\varphi_{cq}$ , 而在一些相对重要的工程中有时会提供三轴固结不排水强度指标  $c_{cu}$ ,  $\varphi_{cu}$ 。如何结合工程实践现状进行成槽稳定性验算值得进一步的研究。

此外, 二维分析方法由于相对保守, 不宜用于验算成槽深度较大的地下连续墙工程。但三维分析方法的计算过程则较为复杂。同样需要展开进一步的讨论, 对比二维与三维方法验算结果的差异。同时, 三维水平条分法由于缺乏严格的理论基础, 还需要分析所得到的解是偏安全还是偏不安全。

针对以上问题, 本文首先介绍了水平条分法的基本理论框架及其与楔形体滑体模式的内在联系。通过

Vaterland 现场试验<sup>[2]</sup>的案例分析, 指出饱和黏土中三维楔形体模式存在的不足, 并提出一种基于三维等效楔形体的改进方法。随后, 采用二维和三维水平条分法, 对 10 个工程实例进行槽壁稳定性验算, 详细讨论了二维与三维方法验算结果的差异, 以及强度指标选取和水土压力计算对槽壁稳定性验算结果的影响, 为后续工程实践提供参考。

## 1 水平条分法

### 1.1 二维水平条分法

二维水平条分法<sup>[7]</sup>在验算水平分层地基中地下连续墙成槽稳定性时, 一般按土层分布情况将滑动土体划分为若干份土条再进行受力分析, 如图 1 所示。

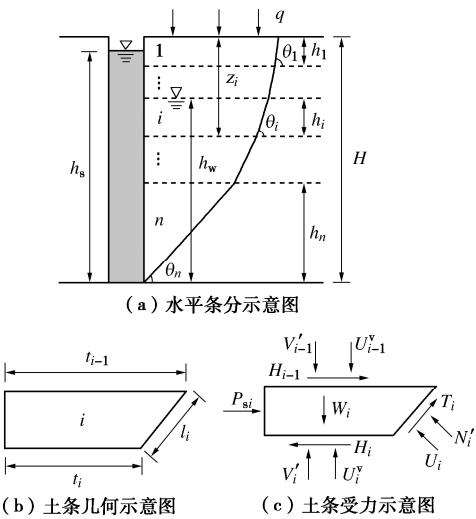


图 1 二维水平条分法示意图

Fig. 1 Schematic graph for 2D horizontal slice method

该方法认为滑动土体内每个土条的滑动面均同时达到极限状态, 并将成槽稳定安全系数  $F_s$  定义为滑动面所能提供的最大抗剪力与维持静力平衡所需最小抗剪力的比值:

$$F_s = \frac{c_i l_i + N'_i \tan \varphi_i}{T_i} \quad , \quad (1)$$

式中,  $c_i$ ,  $\varphi_i$  为第  $i$  个土条所处土层的黏聚力与内摩擦角,  $N'_i$ ,  $T_i$  为第  $i$  个土条滑动面上有效法向力与抗剪力,  $l_i$  为第  $i$  个土条滑动面的长度。

通过引入每个土条的竖向力平衡条件以及破坏土体整体水平方向上力的平衡条件, 求解该非线性方程组并对破坏区域内每个土条的破坏面倾角  $\theta_i$  进行优化搜索, 即可得到最小的槽壁稳定安全系数。

在均质地层中, 二维水平条分法可以退化为滑体破坏模式中的二维楔形体模型, 如图 2 所示。此时, 槽壁稳定安全系数的验算公式为

$$F_s = \frac{2cH + (k_1 \cos^2 \theta + k_2 \sin^2 \theta) \tan \varphi}{(k_1 - k_2) \cos \theta \sin \theta} \quad , \quad (2)$$

$$k_1 = \gamma H^2 - \gamma h_w^2 + \gamma' h_w^2 + 2qH \quad , \quad (3)$$

$$k_2 = \gamma_s h_s^2 - \gamma_w h_w^2 \quad , \quad (4)$$

式中,  $\gamma$  为土体天然重度,  $\gamma_{\text{sat}}$  为土体饱和重度,  $\gamma'$  为土体有效重度,  $\gamma_s$  为泥浆重度,  $\gamma_w$  为地下水重度,  $\varphi$  为土体内摩擦角,  $c$  为土体黏聚力,  $H$  为成槽深度,  $q$  为地表均布荷载,  $h_s$  为泥浆液位,  $h_w$  为地下水位。

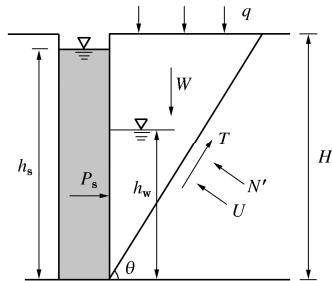


图 2 二维均质地基整体稳定性验算图示

Fig. 2 2D overall stability analysis in homogeneous soils

通过极值条件  $\partial F_s / \partial \theta = 0$  求出最优的滑动面倾角  $\theta_{\text{cr}}$ , 即可求得最小的安全系数:

$$\tan^2 \theta_{\text{cr}} = \frac{2cH + [2qH + \gamma(H^2 - h_w^2) + \gamma' h_w^2] \tan \varphi}{2cH + (\gamma_s h_s^2 - \gamma_w h_w^2) \tan \varphi} \quad . \quad (5)$$

对于砂性地基 ( $c=0$ ), 由极值条件  $\partial F_s / \partial \theta = 0$  可得最优滑动面倾角  $\theta_{\text{cr}}$  为

$$\tan^2 \theta_{\text{cr}} = \frac{2q + H[(1-m^2)\gamma + m^2\gamma']}{H(n^2\gamma_s - m^2\gamma_w)} \quad , \quad (6)$$

式中,  $n$ ,  $m$  为泥浆液位  $h_s$  及地下水位  $h_w$  与成槽深度  $H$  的比值。此时, 安全系数表达式可简化为

$$F_s = \frac{2 \tan \theta_{\text{cr}}}{\tan^2 \theta_{\text{cr}} - 1} \tan \varphi \quad , \quad (7)$$

这与 Filz 等<sup>[5]</sup>提出的验算公式是一致的。

对于饱和砂层 ( $m=1$ ), 假设泥浆液位与地表持平 ( $n=1$ ), 且不考虑地表超载作用 ( $q=0$ ), 此时  $\tan \theta_{\text{cr}} = \sqrt{\gamma' / \gamma_s}$ ,  $\gamma'$  为泥浆有效重度。安全系数表达式可进一步简化为

$$F_s = \frac{2\sqrt{\gamma' \gamma_s} \tan \varphi}{\gamma' - \gamma_s} \quad . \quad (8)$$

对于干砂层 ( $m=0$ ), 假设泥浆液位与地表持平 ( $n=1$ ), 且不考虑地表超载作用 ( $q=0$ ), 此时的  $\tan \theta_{\text{cr}} = \sqrt{\gamma / \gamma_s}$ , 安全系数表达式为

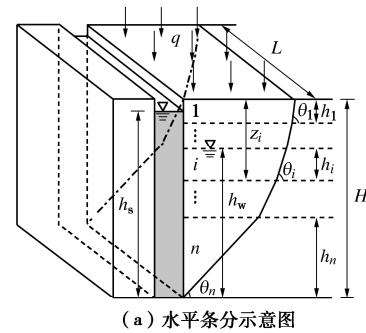
$$F_s = \frac{2\sqrt{\gamma_s} \tan \varphi}{\gamma - \gamma_s} \quad . \quad (9)$$

这就是 Nash 等<sup>[1]</sup>提出的经典干砂验算公式。

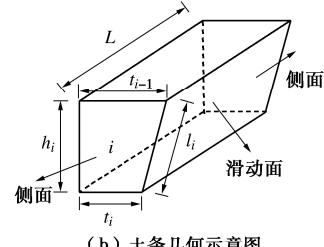
## 1.2 三维水平条分法

三维水平条分法由于考虑了槽段宽度对于槽壁稳定性的影响, 需计算滑动土体侧面上作用的抗剪力

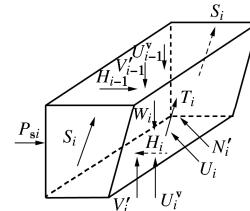
$S_i$ , 并将其引入平衡方程参与求解, 如图 3 所示。



(a) 水平条分示意图



(b) 土条几何示意图



(c) 土条受力示意图

图 3 三维水平条分法示意图

Fig. 3 Schematic graph for 3D horizontal slice method

同时, 该方法还假设滑动土体内每个土条的滑动面及侧面都同时达到极限状态, 并将成槽稳定安全系数定义为滑动面或侧面所能提供的最大抗剪力与维持静力平衡所需最小抗剪力的比值:

$$F_s = \frac{c_i l_i L + N'_i \tan \varphi_i}{T_i} \quad , \quad (10)$$

$$F_s = \frac{0.5c_i h_i(t_i + t_{i-1}) + N'_{ni} \tan \varphi_i}{S_i} \quad , \quad (11)$$

式中,  $L$  为槽段宽度,  $t_i$  为第  $i$  个土条下底面长度,  $N'_{ni}$  为第  $i$  个土条侧面上有效法向力。

对于均质地层, 三维水平条分法可以退化为三维楔形体模型滑体破坏模式, 如图 4 所示。此时, 槽壁稳定安全系数的验算公式为

$$F_s = \frac{2cH + (k_1 \cos^2 \theta + k_2 \sin^2 \theta) \tan \varphi + 4k_3 \cos \theta}{(k_1 - k_2) \cos \theta \sin \theta} \tan \varphi \quad , \quad (12)$$

$$k_3 = \frac{1}{2L} \left[ cH^2 + K_0 q H^2 \tan \varphi + \frac{K_0}{3} \gamma H^3 \tan \varphi + \frac{K_0}{3} (\gamma' - \gamma) h_w^3 \tan \varphi \right] \quad . \quad (13)$$

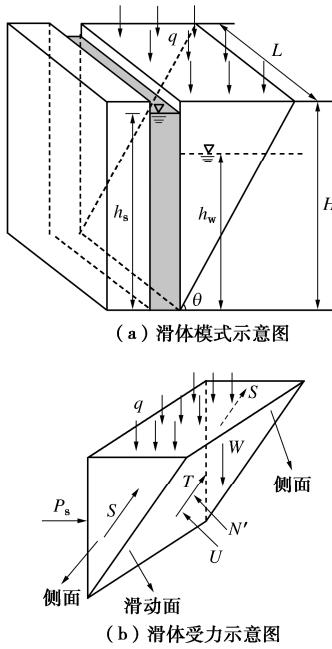


图4 三维均质地基整体稳定性验算图示

Fig. 4 3D overall stability analysis in homogeneous soils

由极值条件  $\partial F_s / \partial \theta = 0$ ，可知最优滑动面倾角  $\theta_{cr}$  需满足：

$$(k_2 \sin^2 \theta_{cr} - k_1 \cos^2 \theta_{cr}) \tan \varphi - 2cH(\cos^2 \theta_{cr} - \sin^2 \theta_{cr}) - 4k_3 \cos^3 \theta_{cr} = 0 \quad (14)$$

## 2 不排水饱和黏土地基分析

### 2.1 均质不排水饱和黏土地基的楔形体模式

对于均质饱和黏土层 ( $\varphi=0$ ,  $c=c_u$ ,  $m=1$ )，由极值条件  $\partial F_s / \partial \theta = 0$ ，可得二维楔形体滑体破坏模式中  $\theta_{cr}=45^\circ$ ，此时安全系数表达式可简化为

$$F_s = \frac{4c_u H}{\gamma_{sat} H^2 - \gamma_s h_s^2 + 2qH} \quad (15)$$

再假设泥浆液位与地表持平 ( $n=1$ )，且不考虑地表超载作用 ( $q=0$ )，上述公式可进一步简化为

$$F_s = \frac{4c_u}{(\gamma' - \gamma_s)H} \quad (16)$$

这就是 Nash 等<sup>[1]</sup>提出的经典饱和黏土验算公式。

对于均质饱和黏土层 ( $m=1$ ) 的三维楔形体滑体破坏模式，槽壁稳定安全系数表达式为

$$F_s = \frac{2c_u H (L + H \cos \theta_{cr})}{L (\gamma_{sat} H^2 - \gamma_s h_s^2 + 2qH) \cos \theta_{cr} \sin \theta_{cr}} \quad (17)$$

$$\frac{\sin^2 \theta_{cr} - \cos^2 \theta_{cr}}{\cos^3 \theta_{cr}} = \frac{H}{L} \quad (18)$$

再假设泥浆液位与地表持平 ( $n=1$ )，且不考虑地表超载作用 ( $q=0$ )，安全系数的表达式可简化为

$$F_s = \frac{2c_u (L + H \cos \theta_{cr})}{L H (\gamma' - \gamma_s) \cos \theta_{cr} \sin \theta_{cr}} \quad (19)$$

当槽段宽度趋于无限长时 ( $L=\infty$ )，最优倾角  $\theta_{cr}=45^\circ$ ，式 (19) 可以退化到式 (16)。

### 2.2 Vaterland 现场试验案例对比

下面通过在 Vaterland 进行的现场试验<sup>[2]</sup>对饱和黏土地基中，二维楔形体模式、土压力模式、地基承载力模式以及三维楔形体模式 4 种验算方法的差异进行分析。土压力模式采用 Li 等<sup>[3]</sup>建议的朗肯主动土压力理论分析方法，但是考虑到试验中采用油作为支护液体，其重度小于水的重度，因此采用 Xanthakos<sup>[12]</sup>提出的安全系数定义方式：

$$F_s = \frac{\gamma_s H^2}{(\gamma' H - 2c_u)(H - 2c_u/\gamma') + \gamma_w H^2} \quad (20)$$

地基承载力模式采用 Meyerhof<sup>[2]</sup>提出的饱和黏土地基中矩形槽槽壁稳定性验算公式：

$$F_s = \frac{N_c c_u}{(K_0 \gamma' - \gamma_s) H} \quad (21)$$

式中， $N_c$  为地基承载力系数，当  $H/B$  很小时  $N_c=4$ ，当  $H/B$  很大时  $N_c=4(1+B/L)$ ， $B$  为成槽厚度。

现场试验中，地下连续墙成槽深度为 20 m，厚度为 1 m，槽段宽度为 5 m，土体饱和重度为 18.5 kN/m<sup>3</sup>，土体不排水抗剪强度为 20 kPa，静止土压力系数为 0.5，试验时槽段内液体是重度为 8.5 kN/m<sup>3</sup> 的油。验算时同时考虑采用泥浆作为支护液体，泥浆重度取为 11 kN/m<sup>3</sup>，验算结果见表 1。

表 1 Vaterland 现场试验对比

Table 1 Comparison for Vaterland site test

验算方法	$F_s$ (油)	$F_s$ (泥浆)
二维楔形体模式	0.40	0.53
土压力模式	0.57	0.73
地基承载力模式	0.85	1.48
三维楔形体模式	1.38	1.84
三维等效楔形体模式	0.95	1.26
三维极限分析有限元 (上限/下限)	0.99/0.87	1.32/0.92

试验中当采用油作为支护液体时观察到失稳现象。从整体上看，二维楔形体模式与土压力模式作为二维验算方法得到的安全系数明显小于其它方法；地基承载力模式的安全系数为 0.85，略偏于保守；三维楔形体模式结果为 1.38，明显高估了槽壁稳定性。Li 等<sup>[13]</sup>采用三维极限分析有限元分析了饱和黏土中地下连续墙成槽稳定性问题。根据其给出的上限解和下限解，插值得到的安全系数见表 1。从上限解和下限解的平均值来看还是比较合理的，可见三维楔形体模式（水平条分法）还有不少的改进空间。

### 2.3 三维楔形体模式的改进

从 Li 等<sup>[13]</sup>的三维极限分析有限元结果云图可以看出，当  $L/H$  较小时成槽失稳范围将明显超过实际

槽段宽度  $L$  的范围, 这样将导致现有的楔形体模式计算结果不合理, 得到的安全系数偏高。因此需要将三维极限分析有限元得到的成槽失稳区域近似等效成楔形体模式用的槽段宽度  $L^*$ 。等效槽段宽度  $L^*$  应大于实际槽段宽度  $L$ , 即  $L^*/L \geq 1.0$ 。为简化起见, 可以假设当  $L/H=1$  时, 取  $L^*=L$ 。利用三维极限分析有限元计算结果, 并与楔形体模式的计算结果进行对比拟合, 可以得到等效槽段宽度  $L^*$  的计算公式为:

$$L^*/L = (L/H)^{-0.45} \quad (0 < L/H \leq 1) \quad (22)$$

采用等效槽段宽度  $L^*$  的楔形体模式计算结果如表 1 所示。当采用油作为支护液体时, 三维等效楔形体模式得到的安全系数为 0.95, 明显比原有三维楔形体模式更加合理。当然这种等效模式还缺乏清楚的理论解释, 需要进一步的深入探讨。

### 3 工程实例分析与讨论

#### 3.1 工程实例计算

本节基于水平条分法, 对收集的 10 个工程实例进行成槽稳定性验算, 详细讨论二维与三维验算方法在计算结果上的差异及强度指标选取和水土压力计算对验算结果的影响。所有工程实例中泥浆液位均与地表持平。水平条分法在计算侧面抗剪力时需提供静止土压力系数  $K_0$ , 当缺乏试验数据时, 可按上海市基坑工程技术标准<sup>[14]</sup>推荐的经验公式进行计算:

对砂性土

$$K_0 = 1 - \sin \varphi' \quad (23)$$

对黏性土

$$K_0 = 0.95 - \sin \varphi' \quad (24)$$

当地质勘察报告中缺乏有效抗剪强度指标  $\varphi'$  时, 按上海市基坑工程技术标准<sup>[14]</sup>推荐的经验公式计算:

$$\varphi' = 0.7(c_{cq} + \varphi_{cq}) \quad (25)$$

#### (1) 工程实例 1——广州鸿晖大厦

算例 1 中地下连续墙槽段宽度为 6 m, 成槽深度 18.1 m, 泥浆相对质量密度为 1.15~1.30, 取 1.30 进行验算, 平均地下水位为 1.55 m, 土层参数见表 2。

表 2 工程实例 1 土层参数

Table 2 Soil parameters for project 1

土层	埋深 /m	重度 /(kN·m <sup>-3</sup> )	$c_{cq}$ /kPa	$\varphi_{cq}$ /(°)
①素填土	0~1.55	18.0	10	8
①素填土	1.55~3.85	18.0	10	8
②-1 淤泥质土	3.85~6.40	16.3	8	5
②-2 细砂	6.40~10.70	17.5	1	25
②-3 粉质黏土	10.70~11.95	18.0	22	15
③-1 粉质黏土	11.95~15.20	18.5	25	18
③-2 粉质黏土	15.20~18.10	19.0	32	25

#### (2) 工程实例 2——广州君豪国际商业城

算例 2 中地下连续墙槽段宽度为 6 m, 成槽深度 21.8 m, 泥浆相对质量密度为 1.15~1.30, 取 1.30 进行验算, 平均地下水位为 1.8 m, 场地条件见表 3。

表 3 工程实例 2 土层参数

Table 3 Soil parameters for project 2

土层	埋深 /m	重度 /(kN·m <sup>-3</sup> )	$c_{cq}$ /kPa	$\varphi_{cq}$ /(°)
①-1 杂填土	0~1.80	17.5	10	8
①-1 杂填土	1.80~2.66	17.5	10	8
②-1 淤泥质粉质黏土	2.66~4.48	16.5	8	6
②-2 淤泥质土	4.48~6.47	16.5	6	5
②-3 粉质黏土	6.47~10.53	18.5	24	16
②-4 粉土	10.53~12.43	19.5	25	18
③-1 粉质黏土	12.43~14.90	19.5	28	19
④-1 全风化泥质粉砂岩	14.90~18.60	20.0	24	25
④-2 强风化泥质粉砂岩	18.60~21.80	21.0	60	30

#### (3) 工程实例 3——广州轨道交通三号线北延段

算例 3 中地下连续墙槽段宽度为 6 m, 成槽深度 19 m, 泥浆相对质量密度为 1.05~1.20, 取 1.20 进行验算, 平均地下水位为 3.17 m, 土层参数见表 4。

表 4 工程实例 3 土层参数

Table 4 Soil parameters for project 3

土层	埋深 /m	重度 /(kN·m <sup>-3</sup> )	$c_{cq}$ /kPa	$\varphi_{cq}$ /(°)
①-1 杂填土	0~3.17	18.1	10	10
①-1 杂填土	3.17~4.99	18.1	10	10
①-3 素填土	4.99~10.73	18.1	13	10
①-4 耕植土	10.73~11.73	18.1	10	10
②-1 粉质黏土	11.73~15.71	19.1	25	15
②-2 淤泥质黏土	15.71~18.35	16.8	6	4
②-3 黏土	18.35~19.00	19.2	28	16

#### (4) 工程实例 4——南京世茂

算例 4 中地下连续墙槽段宽度为 6 m, 成槽深度 62.3 m, 泥浆相对质量密度为 1.20~1.25, 取 1.25 进行验算, 平均地下水位为 3.17 m, 土层参数见表 5。

#### (5) 工程实例 5——上海东渡悦来城

算例 5 中地下连续墙槽段宽度为 6 m, 成槽深度 25 m, 泥浆相对质量密度为 1.10~1.20, 取 1.20 进行验算, 平均地下水位为 0.77 m, 土层参数见表 6。

#### (6) 工程实例 6——上海西岸传媒港

算例 6 中地下连续墙槽段宽度为 5 m, 成槽深度 32.9 m, 泥浆相对质量密度为 1.10~1.20, 取 1.20 进行验算, 平均地下水位为 1 m, 土层参数见表 7。

#### (7) 工程实例 7——上海城建大厦

算例 7 中地下连续墙槽段宽度为 6 m, 成槽深度 20.5 m, 泥浆相对质量密度为 1.20, 平均地下水位为 2.1 m, 土层参数见表 8。

(8) 工程实例 8——上海苏州河排水深隧工程  
算例 8 中地下连续墙槽段宽度为 6 m, 成槽深度 105 m, 成槽循环泥浆相对质量密度为 1.20, 平均地下水位为 2.28 m, 土层参数见表 9。

表 5 工程实例 4 土层参数

Table 5 Soil parameters for project 4

土层	$K_0$	埋深 /m	重度 /( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	$c_{\text{eq}}$ /kPa	$\varphi_{\text{eq}}$ /( $^{\circ}$ )
①-2 素填土	0.45	0~2.25	18.4	11.1	13.6
②-2 淤泥质粉质黏土	0.60	2.25~3.17	17.7	8.4	11.8
②-2 淤泥质粉质黏土	0.65	3.17~8.50	17.7	8.4	11.8
②-3A 粉土夹粉质黏土	0.55	8.50~11.05	18.0	9.8	18.9
②-3 粉质黏土夹粉土	0.58	11.05~18.15	17.8	10.4	16.4
②-4A 粉土夹粉砂	0.47	18.15~22.15	18.5	8.5	23.3
②-4 粉质黏土夹粉土	0.50	22.15~27.40	18.0	10.5	16.2
②-5 粉砂夹粉土	0.45	27.40~35.00	18.3	1.8	22.3
②-6 粉细砂	0.42	35.00~62.30	18.5	1.5	33.0

表 6 工程实例 5 土层参数

Table 6 Soil parameters for project 5

土层	埋深 /m	重度 /( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	$c_{\text{eq}}$ /kPa	$\varphi_{\text{eq}}$ /( $^{\circ}$ )
① 填土	0~0.77	18.0	5	10
① 填土	0.77~2.30	18.0	5	10
②-1 黏土	2.30~4.30	18.0	22	13
③ 黏土	4.30~5.60	17.5	16	11
⑥-1 黏土	5.60~8.98	19.3	48	17
⑥-1-2 粉质黏土	8.98~17.98	18.6	30	17
⑥-2 粉质黏土	17.98~25.00	18.6	24	16

表 9 工程实例 8 土层参数 (深隧项目)

Table 9 Soil parameters for project 8

土层	埋深 /m	重度 /( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	$c_{\text{eq}}$ /kPa	$\varphi_{\text{eq}}$ /( $^{\circ}$ )	$c'$ /kPa	$\varphi'$ /( $^{\circ}$ )	$c_{\text{cu}}$ /kPa	$\varphi_{\text{cu}}$ /( $^{\circ}$ )	$K_0$
②-1 粉质黏土	0~1.75	18.1	23	17.5	6	26.5	22	21.3	(0.50)
②-3 黏质粉土	1.75~2.28	18.2	7	30.5	(0)	(31.5)	—	—	0.40
②-3 黏质粉土	2.28~14.07	18.2	7	30.5	(0)	(31.5)	—	—	0.40
③ 淤泥质粉质黏土	14.07~19.70	17.1	12	14.0	2	29.6	10	18.0	0.50
④ 淤泥质黏土	19.70~26.53	16.6	14	12.0	3	27.9	13	16.6	0.53
⑤-1 黏土	26.53~33.60	17.2	17	16.0	4	30.5	18	19.6	0.51
⑤-3 粉质黏土夹粉砂	33.60~46.91	17.5	19	19.0	5	31.6	20	21.4	0.47
⑤-4 粉质黏土	46.91~49.57	19.1	47	16.0	16	32.4	48	24.3	0.47
⑦ 粉砂夹粉质黏土	49.57~55.06	19.0	7	31.5	(0)	(34.5)	—	—	0.37
⑧-1 粉质黏土	55.06~61.74	17.6	22	17.5	8	32.4	24	23.9	0.48
⑧-2 粉质黏土粉砂互层	61.74~77.97	18.3	30	20.5	8	33.1	24	26.4	0.47
⑨-1 粉砂夹粉质黏土	77.97~81.28	19.6	0	36.0	(0)	(25.2)	—	—	0.35
⑨ 夹粉质黏土夹粉砂	81.28~83.32	19.1	19	24.5	(0)	(30.5)	—	—	(0.45)
⑨-2-1 粉细砂夹中粗砂	83.32~91.85	20.4	0	36.0	(0)	(25.2)	—	—	0.33
⑨-2-2 中粗砂	91.85~103.39	20.4	0	36.0	(0)	(25.2)	—	—	0.34
⑩ 黏土	103.39~105.00	20.0	92	20.5	19	31.6	92	19.0	0.51

注: 土层②-3、⑦、⑨、⑨-1、⑨-2-1、⑨-2-2 有效抗剪强度指标按式 (25) 计算得到。

表 7 工程实例 6 土层参数

Table 7 Soil parameters for project 6

土层	埋深 /m	重度 /( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	$c_{\text{eq}}$ /kPa	$\varphi_{\text{eq}}$ /( $^{\circ}$ )	$c'$ /kPa	$\varphi'$ /( $^{\circ}$ )	$K_0$
① 素填土	0~1.00	18.5	22	19.5	7	27.4	0.45
① 素填土	1.00~1.56	18.5	22	19.5	7	27.4	0.45
②-3 黏质粉土	1.56~6.33	18.3	6	30.0	(0)	(25.2)	0.37
③ 淤泥质粉质黏土	6.33~11.59	17.4	11	18.5	0	30.1	0.45
④ 淤泥质黏土	11.59~18.44	16.5	9	11.5	3	21.2	0.57
⑤-1 黏土	18.44~21.76	17.3	14	13.5	6	21.9	0.52
⑤-2 砂质粉土	21.76~25.60	18.3	5	33.5	(0)	(26.9)	0.36
⑤-3 粉质黏土	25.60~32.90	18.0	14	19.5	4	29.8	0.47

注: 土层②-3 及⑤-2 有效抗剪强度指标按式 (25) 计算得到。

表 8 工程实例 7 土层参数

Table 8 Soil parameters for project 7

土层	埋深 /m	重度 /( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	$c_{\text{eq}}$ /kPa	$\varphi_{\text{eq}}$ /( $^{\circ}$ )
①-1 素填土	0~2.1	19.5	12	8
①-1 素填土	2.1~2.6	19.5	12	8
②-1 砂质黏土	2.6~4.8	19.5	20	13
②-2 细砂	4.8~6.5	19.7	0	20
②-3 中粗砂	6.5~8.8	19.5	0	25
②-4 黏土	8.8~10.4	18.7	20	8
②-5 淤泥质土	10.4~11.3	16.8	10	4
②-6 砾砂	11.3~12.6	20.8	0	30
③ 残积砾质黏性土	12.6~16.0	18.1	20	18
④-1 全风化花岗岩	16.0~18.3	18.6	22	22
④-2-1 强风化花岗岩上段	18.3~20.5	18.9	25	25

## (9) 工程实例 9——上海徐家汇中心虹桥路地块

算例 9 中地下连续墙槽段宽度为 6 m, 成槽深度 75 m, 泥浆相对质量密度为 1.10~1.15, 取 1.15 进行验算, 平均地下水位为 3 m, 土层参数见表 10。

表 10 工程实例 9 土层参数

Table 10 Soil parameters for project 9

土层	埋深 /m	重度 /(kN·m <sup>-3</sup> )	$c_{eq}$ /kPa	$\phi_{eq}$ /(°)
②粉质黏土	0~1.52	18.3	14	14.0
③淤泥质粉质黏土	1.52~3.00	17.5	8	17.5
③淤泥质粉质黏土	3.00~5.46	17.5	8	17.5
④淤泥质黏土	5.46~13.06	16.7	9	9.5
⑤1-1 黏土	13.06~18.94	17.5	12	11.0
⑤1-2 粉质黏土	18.94~25.33	18.0	12	14.0
⑤3-1 粉质黏土 夹黏质粉土	25.33~35.20	18.1	9	16.5
⑤3-2 粉质黏土	35.20~40.43	18.1	12	18.0
⑤4 粉质黏土	40.43~43.75	19.7	38	18.0
⑦1 砂质粉土	43.75~46.83	19.1	4	29.0
⑦2-1 粉砂	46.83~59.04	19.0	1	32.0
⑦2-2 夹粉质黏土 夹砂质粉土	59.04~61.72	18.9	7	26.5
⑦2-2 粉砂	61.72~68.82	18.9	1	32.0
⑨粉砂	68.82~75.00	19.0	1	31.0

## (10) 工程实例 10——上海轨道交通 9 号线暗埋工程

算例 10 中地下连续墙槽段宽度为 6 m, 成槽深度 24.5 m, 泥浆相对质量密度为 1.03~1.10, 取 1.10 进行验算, 平均地下水位为 1.54 m, 土层参数见表 11。

## (11) 工程实例验算结果汇总表

在验算槽壁稳定性时采用了 5 种验算方法, 分别

是: ①采用直剪固结快剪强度指标  $c_{eq}$ ,  $\phi_{eq}$  按水土分算原则验算; ②采用直剪固结快剪强度指标  $c_{eq}$ ,  $\phi_{eq}$  按水土合算原则验算; ③采用有效抗剪强度指标  $c'$ ,  $\phi'$  按水土分算原则验算; ④对砂性土采用有效抗剪强度指标  $c'$ ,  $\phi'$  按水土分算原则验算, 对黏性土采用三轴固结不排水强度指标  $c_{cu}$ ,  $\phi_{cu}$  按水土分算原则验算; ⑤对砂性土采用有效抗剪强度指标  $c'$ ,  $\phi'$  按水土分算原则验算, 对黏性土采用三轴固结不排水强度指标  $c_{cu}$ ,  $\phi_{cu}$  按水土合算原则验算, 验算结果见表 12。

表 11 工程实例 10 土层参数

Table 11 Soil parameters for project 10

土层	埋深 /m	重度 /(kN·m <sup>-3</sup> )	$c_{eq}$ /kPa	$\phi_{eq}$ /(°)
① 杂填土	0~1.40	18.0	10	15.0
② 粉质黏土	1.40~1.54	18.6	24	17.0
② 粉质黏土	1.54~3.00	18.6	24	17.0
③ 淤泥质粉质黏土	3.00~3.70	17.3	12	17.5
③ 夹砂质粉土 夹淤泥质粉质黏土	3.70~10.40	18.4	8	26.5
④ 淤泥质黏土	10.40~18.00	16.7	14	11.0
⑤ 1-1 黏土	18.00~23.10	17.1	16	12.0
⑤ 1-2 粉质黏土	23.10~24.50	17.7	17	15.0

## 3.2 二维和三维验算方法的讨论

考虑到 10 个工程案例中有 8 个案例仅提供直剪固结快剪强度指标  $c_{eq}$ ,  $\phi_{eq}$ , 故本节基于  $c_{eq}$ ,  $\phi_{eq}$  展开讨论, 分析计算维度对验算结果的影响, 如图 5 所示。

从图 5 中可以看出, 所有的数据点均在安全系数等值线之上。这是由于二维验算方法偏于保守, 会低估槽壁稳定性, 故二维方法得到的槽壁稳定安全系数不会大于三维验算方法的结果。不论是基于水土分算

表 12 验算结果汇总表

Table 12 Summary of safety factor

安全系数 3D/2D	方法 1 $c_{eq}$ , $\phi_{eq}$ 分算	方法 2 $c_{eq}$ , $\phi_{eq}$ 合算	方法 3 $c'$ , $\phi'$ 分算	方法 4		方法 5 砂性土 $c'$ , $\phi'$ 分算 黏性土 $c_{cu}$ , $\phi_{cu}$ 分算 砂性土 $c'$ , $\phi'$ 合算 黏性土 $c_{cu}$ , $\phi_{cu}$ 合算
				砂性土 $c'$ , $\phi'$ 分算 黏性土 $c_{cu}$ , $\phi_{cu}$ 分算	砂性土 $c'$ , $\phi'$ 合算 黏性土 $c_{cu}$ , $\phi_{cu}$ 合算	
算例 1——鸿晖大厦	2.64/1.48	2.94/1.79				
算例 2——君豪国际商业城	2.75/1.61	3.05/1.83				
算例 3——广州三号线	2.27/0.87	2.77/1.25				
算例 4——南京世茂	2.67/0.95	3.03/1.84				
算例 5——东渡悦来城	2.45/1.12	2.73/1.94				
算例 6——西岸传媒港	2.31/0.79	3.85/1.61	1.80/0.81			
算例 7——城建大厦	2.19/1.02	2.88/1.49				
算例 8——苏州河调蓄工程	2.53/0.75	4.26/1.71	2.41/0.84	2.43/0.78	2.76/1.51	
算例 9——徐家汇中心	2.11/0.63	2.74/1.25				
算例 10——9 号线	2.00/0.66	3.21/1.31				

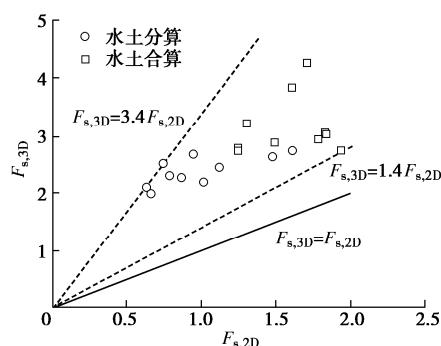


图 5 二维与三维验算方法差异

Fig. 5 Differences between 2D and 3D methods

原则的验算结果还是水土合算的验算结果, 三维安全系数均明显大于二维安全系数, 大约在 1.4~3.4 倍之间。Fox<sup>[8]</sup>和 Li 等<sup>[9]</sup>在研究中也指出, 对于一个成槽深度为 15 m 的算例, 当槽段宽度为 100 m 左右时, 三维结果才会退化为二维结果。考虑到在当前的工程实践中, 单元槽段宽度一般为 4~8 m, 且成槽深度一般超过 20 m, 故对当前的实际工程而言, 采用二维验算方法会过于保守。

此外, 从本文所选取算例的验算结果来看, 二维和三维方法验算结果的离散度较大, 很难给出二维与三维安全系数之间可靠的经验换算公式, 故在实际工程中宜直接采用三维水平条分法验算成槽稳定性。

### 3.3 强度指标的讨论

尽管从理论上来说, 根据有效应力原理, 采用有效抗剪强度指标  $c'$ ,  $\varphi'$ , 按水土分算原则验算是最合理的; 但在当前工程实践中, 仅有少数工程地质勘察报告能够提供可靠的有效抗剪强度指标。考虑到工程实例 6 和实例 8 中均提供了多套强度指标, 可以用于讨论强度指标选取对验算结果的影响, 本节基于这两个算例展开讨论。

首先, 算例 6 和算例 8 中均提供了直剪固结快剪强度指标及有效抗剪强度指标。以有效抗剪强度指标的验算结果为基准, 当采用直剪固结快剪强度指标  $c_{cq}$ ,  $\varphi_{cq}$  并按水土合算原则进行验算时, 验算结果明显偏大, 可能是有效抗剪强度验算结果的 2 倍; 而按水土分算原则验算时差别较小。因此在工程实践中, 当采用  $c_{cq}$ ,  $\varphi_{cq}$  并按水土合算原则验算槽壁稳定性时, 需显著提高容许安全系数取值。

算例 8 还提供了固结不排水剪强度指标  $c_{cu}$ ,  $\varphi_{cu}$ 。由于该指标与有效抗剪强度指标同样来自于室内三轴试验, 比直剪试验指标更为可靠, 宜优先选作验算指标。从计算结果来看, 对黏性土采用固结不排水剪强度指标时, 按水土分算原则进行验算结果与有效抗剪强度指标验算结果更加接近。而按照水土合算原则验

算时结果偏大, 但与基于有效抗剪强度的结果偏差并不是很大, 这可能是由于案例 8 中黏性土层较少, 因此水土合算带来的影响较小, 从而安全系数偏差不大。

对此, 上海市基坑工程技术标准<sup>[14]</sup>也指出: “土体作用在围护结构上的侧压力, 宜按水土分算的原则计算”, 同时还指出“从符合土力学基本原理出发”建议采用固结不排水剪强度指标。李广信<sup>[15]</sup>在讨论基坑工程水土压力计算时也指出对于固结不排水剪指标而言, 按照水土合算原则验算并不符合有效应力原理, 宜按水土分算原则验算。

整体上看, 当按照水土分算原则验算时, 尽管强度指标选取可能不同, 但安全系数计算结果差异不大。当按水土合算计算时, 结果显著增大, 特别是采用直剪固结快剪指标, 结果明显不合理。

## 4 结 论

本文首先分析了水平条分法与楔形体滑体模式之间的联系, 并结合某一现场试验案例进行了分析对比。然后, 通过对收集的 10 个工程案例进行成槽稳定性验算, 探讨了二维和三维验算方法, 以及强度指标的选取和水土压力的计算对地下连续墙槽壁稳定性验算结果的影响, 得到 3 点结论。

(1) 水平条分法与楔形体滑体破坏模式具有相同的理论基础, 在均质地基条件下可以退化为楔形体滑体模式, 是当前验算水平分层地基中槽壁稳定性较为适合的方法。但与三维极限分析有限元对比, 仍存在不少的改进空间。

(2) 二维验算方法由于忽略了滑体侧面抗剪力而偏于保守。验算结果表明三维方法计算结果约为二维方法计算结果的 1.4~3.4 倍, 二维方法可能会显著的低估槽壁稳定性。

(3) 应优先采用有效抗剪强度指标并按水土分算原则对成槽稳定性进行验算。当无条件获取有效抗剪强度指标时, 对黏性土也可采用固结不排水强度指标, 并宜按水土分算原则进行验算。当采用直剪固结快剪强度指标验算时, 宜按水土分算原则进行验算。

## 参 考 文 献:

- [1] NASH J, JONES G K. The support of trenches using fluid mud[C]// Proceedings Symposium: Grouts and Drilling Muds in Engineering Practice, 1963, London: 177~180.
- [2] MEYERHOF G G. Stability of slurry trench cuts in saturated clay[C]// Proceedings Speciality Conference on Performance of Earth and Earth Supported Structures, 1972, Lafayette: 1451~1466.

- [3] LI Y C, WEI L L, CLEALL P J, et al. Rankine theory-based approach for stability analysis of slurry trenches[J]. International Journal of Geomechanics, 2018, **18**(11): 06018029.
- [4] MORGESTERN N, AMIR-TAHMASSEB I. The stability of a slurry trench in cohesionless soils[J]. Géotechnique, 1965, **15**(4): 387 - 395.
- [5] FILZ G M, ADAMS T, DAVIDSON R R. Stability of long trenches in sand supported by bentonite-water slurry[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2004, **130**(9): 915 - 921.
- [6] LI Y C, PAN Q, CHEN Y M. Stability of slurry trenches with inclined ground surface[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2013, **139**(9): 1617 - 1619.
- [7] 夏元友, 裴尧尧, 王智德, 等. 地下连续墙泥浆槽壁稳定性评价的水平条分法[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(6): 1128 - 1133. (XIA Yuan-you, PEI Yao-yao, WANG Zhi-de, et al. Horizontal slice method for stability of slurry trench[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(6): 1128 - 1133. (in Chinese))
- [8] FOX P J. Analytical solutions for stability of slurry trench[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2004, **130**(7): 749 - 758.
- [9] LI Y C, PAN Q, CLEALL P J, et al. Stability analysis of slurry trenches in similar layered soils[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2013, **139**(9): 1617 - 1619.
- [10] 张厚美, 夏明耀. 地下连续墙泥浆槽稳定的三维分析[J]. 土木工程学报, 2000, **33**(1): 73 - 76. (ZHANG Hou-mei, XIA Ming-yao. 3-D stability of analysis of slurry trenches[J]. China Civil Engineering Journal, 2000, **33**(1): 73 - 76. (in Chinese))
- [11] TSAI J S, CHANG J S. Three-dimensional stability analysis for slurry-filled trench wall in cohesionless soil[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1996, **33**(5): 798 - 808.
- [12] XANTHAKOS P P. Slurry walls as structural systems[M]. New York: McGraw Hill, 1994.
- [13] LI A J, MERIFIELD R S, LIN H D, et al. Trench stability under bentonite pressure in purely cohesive clay[J]. International Journal of Geomechanics, 2014, **14**(1): 151 - 157.
- [14] 基坑工程技术标准(上海): DG/TJ08—61—2018 J11577—2018[S]. 2018. (Technical Code for Excavation Engineering: DG/TJ08—61—2018 J11577—2018[S]. 2018. (in Chinese))
- [15] 李广信. 对与基坑工程有关的一些规范的讨论(2)[J]. 工程勘察, 2013, **10**: 1 - 6. (LI Guang-xin. Discussion on some codes concerned with building foundation pit (part 2)[J]. Geotechnical Investigation and Surveying, 2013, **10**: 1 - 6. (in Chinese))

## 书评:《基础设计中的模型误差》

岩土工程的设计、施工和运维中存在大量的不确定性。为系统考虑上述不确定性的影响,推动岩土规范与基于可靠度理论的结构规范协调,北美、欧洲、日本以及中国均在研究基于可靠度理论的岩土工程设计方法。由于岩土问题的复杂性,大多数岩土模型只是对真实岩土系统的一个近似,模型误差不可避免。如何量化模型误差是建立基于可靠度理论的岩土工程设计方法的关键,也是这一领域的研究热点和难点问题。新加坡国立大学唐冲博士和方国光教授合著专著《基础设计中的模型误差》(Tang, C., and Phoon, K.K. 2021. *Model Uncertainties in Foundation Design*. Boca Raton: CRC Press),系统地介绍了基础设计模型误差标定方面的最新研究成果。全书共分为八章。第一章介绍了工业4.0时代对岩土工程设计的新要求。第二章中介绍了岩土工程不确定性识别的一般原则和方法。第三章介绍了基础工程的分析原理和方法。第四章介绍了浅基础设计公

式的模型误差标定成果。第五章介绍了多层土中自升式钻井平台桩靴基础承载力模型误差的标定结果。第六章介绍了预制桩及灌注桩设计公式的模型误差标定结果。第七章介绍了螺旋桩设计公式模型误差的标定结果。第八章对其他常见岩土构筑物设计公式的模型误差成果进行了总结,提出了基于均值和标准差的模型不确定性分类方法。其中,由第七章研究成果发表的论文获得了美国土木工程师学会2020年度诺曼奖;第八章中不确定性分类思想已被纳入加拿大公路桥梁设计规范(CSA S6:19),正在修订的欧盟岩土规范也在考虑采用类似的不确定性分类方法。尤为难得的是,专著中建立的各类数据库均可通过作者开源获取。专著为在基础设计中如何考虑模型误差这一难题提供了分析理论、标定数据库和标定结果,对推动基础工程由传统的容许应力设计法向基于可靠度理论的设计方法进行转变具有重要的意义。

(朱合华 供稿)