

# 矩形地连墙槽壁整体稳定分析方法的对比研究

王 轩, 雷国辉, 施建勇

(河海大学 岩土工程研究所, 南京 210098)

**摘 要:** 在地下连续墙施工阶段采用泥浆护壁技术开挖槽壁的稳定性一直备受关注。通过假定不同的滑动面或滑动体形状, 并根据滑动土体的受力平衡分析或单元土体的应力极限状态分析, 已经建立了一些槽壁整体稳定性的分析方法。为辨识这些方法的适用性, 从理论基础、计算参数的敏感性以及实际应用效果等方面对其进行对比研究。结果表明, 在半圆柱形和三棱柱形滑动体假设基础上建立的槽壁稳定分析方法, 能较为合理地评价槽壁的稳定性。

**关 键 词:** 地下连续墙; 槽壁; 整体稳定性; 泥浆护壁开挖; 稳定分析方法

中图分类号: TU 43

文献标识码: A

## Comparative study of global stability analysis methods of rectangular diaphragm wall panel trenches

WANG Xuan, LEI Guo-hui, SHI Jian-yong

(Research Institute of Geotechnical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** The stability of the slurry-supported trench excavations during the construction of a diaphragm wall panel has always been a matter of considerable concern. Some methods of the global stability analysis have been derived from either the force equilibrium analysis or the stress limit state analysis based on various types of slipping surfaces or sliding wedges assumed. In order to discriminate the applicability of these methods, a comparative study of their theoretical bases, parametric sensitivity and practical application effectiveness is carried out. It has been found that the trench stability analysis methods established based on the prismatic and apsidal sliding wedge assumption can estimate reasonably the stability of the trench.

**Key words:** diaphragm wall; panel trench; global stability; slurry-supported excavation; stability analysis method

## 1 引 言

针对地下连续墙施工过程中泥浆护壁开挖槽段的稳定性问题, 不少学者开展了研究工作, 通过各种手段, 包括现场试验<sup>[1-4]</sup>、室内模型试验<sup>[5, 6]</sup>、离心模型试验<sup>[7, 8]</sup>和较保守的塑性上限理论分析<sup>[9-11]</sup>, 即采用稳定数  $N = \gamma d / c_u$  的概念 ( $\gamma$  和  $c_u$  分别为土的重度和不排水剪强度;  $d$  为开挖深度) 以及数值分析方法<sup>[8, 12-14]</sup>, 探索了槽壁稳定性的影响因素及失稳机理<sup>[15]</sup>。相应地, 也提出了一些相对简单且便于工程人员理解和实际应用的解析方法, 用于分析槽壁的局部稳定性<sup>[16-18]</sup>和整体稳定性。

对于一个长为  $l$ , 宽为  $w$ , 深为  $d$  的槽段, 其开挖断面如图 1 所示。与槽壁的整体稳定性相关的因素有: 槽段几何尺寸、地下水位以上的地基土的天

然重度  $\gamma$ 、地下水位以下的浮重度  $\gamma'$ , 凝聚力  $c'$  和内摩擦角  $\varphi'$ 、地下水深度  $h_w$ 、泥浆的重度  $\gamma_s$  和泥浆液面的深度  $h_s$  以及地面超载  $q$ 。通常, 槽壁整体稳定性的安全系数有以下三种定义:

$$F_s = (p_s - p_w) / p \quad (1)$$

$$F_s = \tau_f / \tau \quad (2)$$

$$F_s = (P_s - P_w) / P \quad (3)$$

式中  $F_s$  为槽壁的整体稳定安全系数, 一般设计要求超过 1.1 或 1.2<sup>[2, 5]</sup>;  $p_s$ ,  $p$  和  $p_w$  分别为某一深度  $z$  处 (图 1) 槽壁上单元土体受到的泥浆压力、水平向土压力和水压力;  $\tau_f$  为土的抗剪强度;  $\tau$  为平衡滑动体需要动用的滑动边界上的剪应力;  $P_s$ ,  $P$  和

$P_w$  分别为槽深范围内作用在槽壁两侧总的泥浆压力、水平向土压力和水压力。在已知  $\gamma_s$  的情况下, 可以根据上式计算  $F_s$ , 或者根据预定的  $F_s$  按上式反求所需的泥浆重度  $\gamma_s^r$ 。

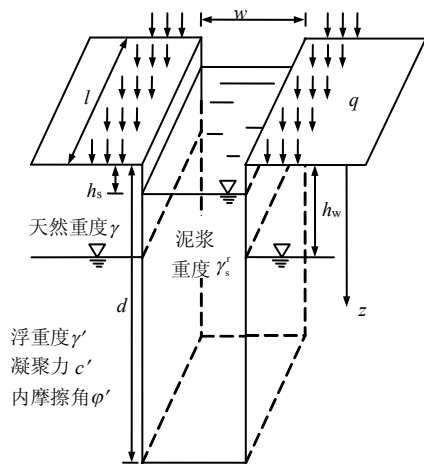


图 1 地下连续墙开挖槽段示意图

Fig.1 Schematic diagram of a diaphragm wall panel trench

槽壁的整体稳定性分析方法有二维或三维的, 见表 1。它们都是在假定不同的滑动面或滑动体形状的基础上, 根据滑动体的受力平衡分析或单元土体的应力极限状态分析得到的。各种分析方法的不同之处主要体现在对于水平向土压力  $p$  或  $P$  的计算方面。为辨识这些分析方法的适用性, 本文从方法提出的理论基础、计算参数的敏感性以及实际应用效果方面对它们进行了对比研究。

表 1 槽段开挖整体稳定性的分析方法

Table 1 Summary of the global stability analysis methods of trench excavations

| 分析方法<br>及编号             | 假定滑<br>动面滑<br>动体    | 作者及<br>参考文献                                                                  | 适用土体     |         | 考虑因素                |     |     | 计算结果        |       |     |
|-------------------------|---------------------|------------------------------------------------------------------------------|----------|---------|---------------------|-----|-----|-------------|-------|-----|
|                         |                     |                                                                              | 无黏<br>性土 | 黏性<br>土 | $\alpha$ 或 $\theta$ | $l$ | $q$ | $\gamma'_s$ | $F_s$ | $p$ |
| 二维应<br>力分析              | 1                   | 姜朋明等 <sup>[19]</sup> 、<br>刘国彬等 <sup>[20]</sup>                               | 是        | 是       |                     |     | 是   |             | 是     |     |
| 土压平<br>衡分析              | 2                   | Schneebeli <sup>[2, 21]</sup>                                                | 是        | 是       |                     |     | 是   | 是           | 是     | 是   |
|                         | 3                   | Wong <sup>[2]</sup> ,<br>Huder <sup>[11]</sup> 和<br>Hajnal 等 <sup>[21]</sup> | 是        | 是       |                     |     | 是   | 是           | 是     | 是   |
| 平面应<br>变力平<br>衡分析       | 4 图 2(a)            | Morgenstern 和<br>Amir-Tahmasseb <sup>[22]</sup>                              | 是        |         | 是                   |     |     | 是           |       |     |
|                         | 5 图 2(a)            | Elson <sup>[5]</sup>                                                         | 是        |         | 是                   |     | 是   | 是           | 是     | 是   |
| 三维滑<br>动体受<br>力平衡<br>分析 | 6 图 2(b)            | Aas <sup>[1]</sup>                                                           |          | 是       | 是                   | 是   |     |             | 是     |     |
|                         | 7 图 2(c)            | Washbourne <sup>[23]</sup>                                                   | 是        | 是       |                     | 是   |     |             | 是     |     |
|                         | 8 图 2(d)<br>~2(f)   | 杨嵘昌等 <sup>[24-26]</sup> 、<br>李禄荣 <sup>[27]</sup>                             | 是        | 是       | 是                   | 是   | 是   | 是           |       |     |
|                         | 9 图 2(g)            | Tsai 和 Chang <sup>[28]</sup>                                                 | 是        |         | 是                   | 是   | 是   | 是           |       | 是   |
|                         | 10 图 2(h)           | 季冲平和余绍锋 <sup>[29]</sup>                                                      | 是        | 是       | 是                   | 是   | 是   | 是           | 是     |     |
|                         | 11 图 2(i)           | 张厚美和夏明耀 <sup>[30]</sup>                                                      | 是        | 是       | 是                   | 是   | 是   | 是           | 是     | 是   |
| 12 图 2(i)               | Fox <sup>[31]</sup> | 是                                                                            | 是        | 是       | 是                   | 是   |     |             |       |     |

注: 表中条件指假定的滑动面或滑动体。

## 2 二维分析方法

将槽壁的稳定性分析这一三维问题作为平面应变问题来处理, 实际上忽略了水平面上的土拱效应, 由此会低估槽壁的稳定性, 使得分析结果运用于设计时偏保守。

### 2.1 单元土体应力极限状态分析

这类方法, 即表 1 中的方法 1, 是根据槽壁上单元土体的应力摩尔圆半径与相应极限状态下与抗剪强度包线相切摩尔圆半径的相对比值来评价槽壁的稳定性, 其实质是槽壁两侧有效泥浆压力( $p_s - p_w$ )与主动极限  $K_a$  状态下土压力的比较(式 1), 与槽段的横截面尺寸无关。姜朋明等<sup>[19]</sup>利用这类方法探讨了槽壁的稳定性受时间效应的影响, 即开挖卸载引起的负孔压有助于提高槽壁的瞬时稳定性, 而负孔压随时间的消散则会降低槽壁的长期稳定性。刘国彬等<sup>[20]</sup>则进一步探讨了有超载作用时槽壁上单元土体的应力状态及对槽壁稳定性的影响。

### 2.2 槽壁两侧土压平衡分析

这类方法通过比较槽壁两侧有效泥浆压力与考虑竖直面土拱效应( $K_a < K < K_0$ )得到的土压力, 即用式(1)来评估槽壁的稳定性, 与槽段的宽度  $w$  无关。Schneebeli 首先提出了方法 2<sup>[2, 21]</sup>, 尝试了采用沿槽深方向的 Caquot 土拱理论来计算槽壁上单元土体的水平向土压力  $p$ 。Huder 则提出了方法 3, 根据 Terzaghi 土拱理论得到了  $p$  的计算式<sup>[11]</sup>, 随后 Wong<sup>[2]</sup>和 Hajnal 等<sup>[21]</sup>分别在他们的基础上进一步提出了用于有超载  $q$  情况下  $p$  的计算公式。方法 3 计算的  $p$  值要比用方法 2 计算值大<sup>[2]</sup>。

### 2.3 滑动体受力平衡分析

这类方法根据假定的滑动面, 通过土的抗剪强度与滑动体边界滑动面上平衡滑动体所需要动用的剪应力之间的比值, 即用式(2)来评价槽壁的稳定性, 目前所提出的方法都与槽段的横截面尺寸无关。Morgenstern 和 Amir-Tahmasseeb 假定如图 2(a)所示的斜面滑动面(滑动面与水平面的夹角为  $\alpha = 45^\circ + \varphi'/2$ ), 提出了方法 4 用于无黏性土地基中槽壁的稳定性分析<sup>[22]</sup>。Elson 则在此基础上提出方法 5, 进一步在分析中考虑了诸多因素对槽壁稳定性的影响<sup>[5]</sup>, 如超载、泥浆的被动阻力以及地基土体因泥浆入渗引起的强度增长等。由于计算参数复杂且难确定, 本文对该方法不作对比研究。文[9]的塑性上限理论分析表明, 在平面应变和不排水条件下的黏性土地基中, 图 2(a)所示的斜面滑动模式比类似图 2(b)所示的竖直面与斜面相结合的滑动模式更接近于槽壁失稳破坏时滑动体的运动机理。

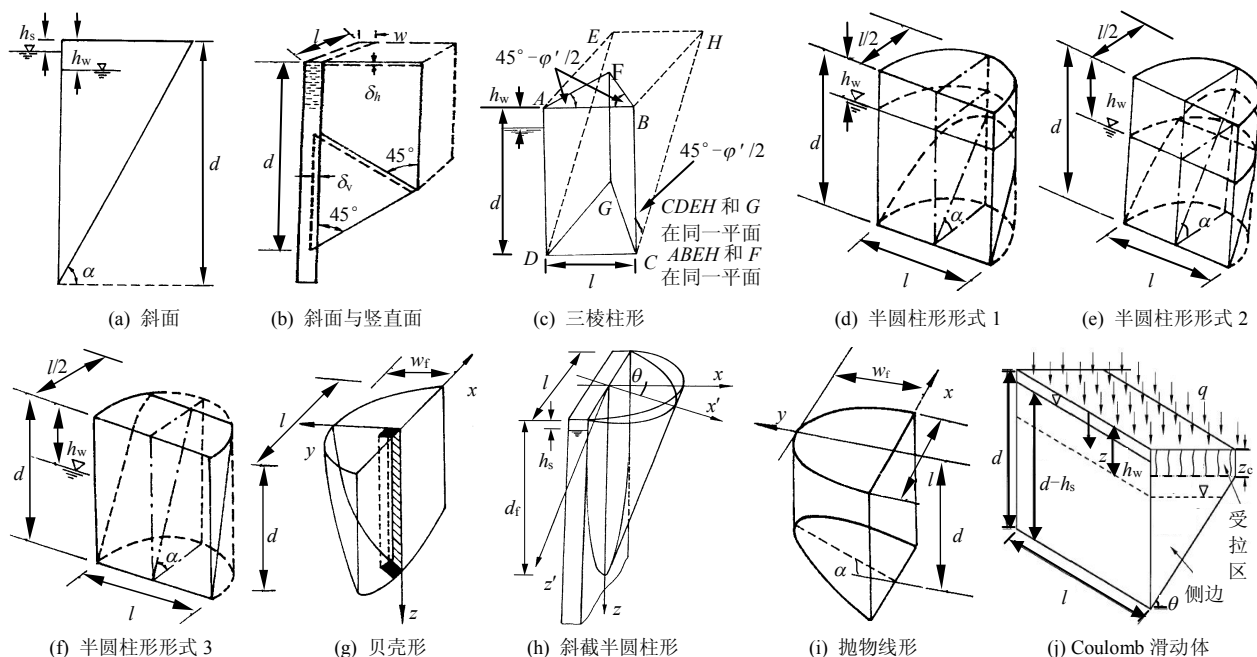


图2 二维和三维分析方法中假定的滑动面和滑动体

Fig. 2 Slipping surface and sliding wedge assumed in 2D and 3D analysis methods

### 3 三维滑动体受力平衡分析方法

这类方法主要是为考虑槽壁周围地基土体水平面上的土拱效应而提出的, 根据假定的三维滑动体, 通过槽壁上作用的有效泥浆压力与平衡滑动体所需要的压力的比较(式(3))或者通过土的抗剪强度与滑动体边界滑动面上平衡滑动体自重所动用剪应力的比较(式(2)), 来评价槽壁的稳定性的, 目前所提出的方法都与槽段的宽度  $w$  无关。Aas 假定图 2(b)所示的竖直面与斜面结合沿整个槽长  $l$  展布的滑动面, 提出了用于不排水条件下黏性土地基中槽壁的稳定性的分析<sup>[1]</sup> (方法 6), 该方法需要用到地基土的现场十字板和室内三轴不排水强度, 因此在本文不作对比研究。Washbourne 则假定图 2(c)所示的三棱柱滑动体, 提出了用于黏性土和无黏性土地基中槽壁的稳定性的分析<sup>[23]</sup> (方法 7)。杨嵘昌假定滑动体为半圆柱形提出了方法 8, 分别针对滑动体斜截面低于地下水面(图 2(d), 深层失稳)<sup>[24]</sup>、介于地下水面与地表之间(图 2(e))<sup>[25]</sup>以及贯穿地表(图 2(f), 浅层失稳)<sup>[26]</sup>三种情况, 分析了最危险斜截面倾角和相应平衡滑动体所需的泥浆重度  $\gamma_s^r$ 。对于前两种情况, 李禄荣也给出了相同的滑动体受力平衡方程<sup>[27]</sup>, 用于推求平衡滑动体所需的泥浆重度  $\gamma_s^r$ 。不过, 图 2(e)和图 2(f)的解答复杂, 需要迭代求解, 因此本文只对该方法中图 2(d)所示的滑动体作对比研究。Tsai 和 Chang 针对无黏性土地基提出

了方法 9, 假定图 2(g)所示的贝壳形滑动体<sup>[28]</sup>, 滑动体的边界面根据描述土拱的悬链线方程结合土体的 Mohr-Coulomb 强度准则来确定, 将滑动体划分为土柱进行受力平衡分析并整合得到滑动体的平衡方程, 通过迭代求解同时满足式(2)和式(3)所定义的槽壁稳定安全系数。不过, 计算过程相当复杂, 本文不对该方法作对比研究。季冲平和余绍锋假定图 2(h)所示的斜截半圆柱形滑动体提出了方法 10<sup>[29]</sup>, 给出了滑动体的受力平衡方程, 用于确定最危险斜截面轴线与垂直线倾角  $\theta$  和相应平衡滑动体所需的泥浆重度  $\gamma_s^r$ 。张厚美和夏明耀假定图 2(i)所示具有倾斜滑动面的抛物线柱形滑动体提出了方法 11<sup>[30]</sup>, 给出了滑动体的受力平衡方程, 用于确定最危险斜截面倾角  $\alpha$  和相应平衡滑动体所需的泥浆重度  $\gamma_s^r$  或安全系数  $F_s$ 。Fox 则假定图 2(j)所示的 Coulomb 滑动体, 提出了方法 12<sup>[31]</sup>, 根据地下水位分别在受拉区以内或以外两种情况, 给出了确定最危险滑动面倾角  $\theta$  和安全系数  $F_s$  的总应力和有效应力分析解答。

### 4 分析方法的参数敏感性

为实现对上述各种方法的对比分析, 本文统一按照图 1 所示的计算模型和参数, 遵从各种方法的基本假定和理论基础, 重新对各种方法进行了理论推导和验证, 得到了表 2 所示的计算公式(其中方法 12 因表达式太冗长而未列出)。同时, 采用一套基

本计算参数:  $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$ ,  $\gamma' = 9 \text{ kN/m}^3$ ,  $\gamma_w = 9.8 \text{ kN/m}^3$ ,  $\gamma_s = 11 \text{ kN/m}^3$ ,  $q = 0 \text{ kPa}$ ,  $c' = 0 \text{ kPa}$ ,  $\varphi' = 20^\circ$ ,  $l = 5 \text{ m}$ ,  $d = 20 \text{ m}$ ,  $h_s = 0 \text{ m}$ ,  $h_w = 2 \text{ m}$ , 每次改变某个单一参数, 用于分析各种方法自身的参数敏感性及其相互之间的差异性。

表 2 分析方法的计算公式

Table 2 Calculation formulae of the analysis methods

| 方法 | 计算公式 ( $d \geq h_w$ )                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|----|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1  | $F_s = \frac{[\gamma h_w + (\gamma' - \gamma_w)(d - h_w) + \gamma_s(d - h_s) + q] \sin \varphi' + 2c' \cos \varphi'}{[\gamma h_w + (\gamma' + \gamma_w)(d - h_w) - \gamma_s(d - h_s) + q]}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| 2  | $z \leq h_w \text{ 时, } p = K_s \left[ \frac{\gamma l}{\sin 2\varphi'} \left( 1 - e^{\frac{-2}{l} \sin 2\varphi'} \right) + q e^{\frac{-2}{l} \sin 2\varphi'} \right] - 2c' \tan \left( 45^\circ - \frac{\varphi'}{2} \right), \quad K_s = \frac{1 - \sin \varphi'}{1 + \sin \varphi'};$<br>$z > h_w \text{ 时, } p = K_s \left[ \frac{\gamma' l}{\sin 2\varphi'} + \frac{(\gamma - \gamma')l}{\sin 2\varphi'} e^{\frac{h_w - z}{l} \sin 2\varphi'} - \frac{\gamma l}{\sin 2\varphi'} e^{\frac{-z}{l} \sin 2\varphi'} + q e^{\frac{-z}{l} \sin 2\varphi'} \right] - 2c' \tan \left( 45^\circ - \frac{\varphi'}{2} \right)$ |
| 3  | $z \leq h_w \text{ 时, } p = \frac{\gamma l - 2c'}{2 \tan \varphi'} \left( 1 - e^{\frac{-2}{l} K \tan \varphi'} \right) + K q e^{\frac{-2}{l} K \tan \varphi'};$<br>$z > h_w \text{ 时, } p = \frac{\gamma' l - 2c'}{2 \tan \varphi'} + \frac{(\gamma - \gamma')l}{2 \tan \varphi'} e^{\frac{-2(h_w - z)}{l} K \tan \varphi'} - \frac{\gamma l - 2c'}{2 \tan \varphi'} e^{\frac{-2z}{l} K \tan \varphi'} + K q e^{\frac{-2z}{l} K \tan \varphi'}$                                                                                                                                                                           |
| 4  | $\gamma_s' = \left( \frac{d}{d - h_s} \right)^2 \left[ \frac{1 - \sin \varphi'}{1 + \sin \varphi'} \gamma + \left( \frac{d - h_w}{d} \right)^2 \frac{2 \sin \varphi'}{1 + \sin \varphi'} \gamma_w \right]$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| 7  | $P = \frac{l^2}{4} \left[ (\gamma - \gamma') h_w + \gamma' \left( d - \frac{l}{6} \right) \right] \tan^2 \left( 45^\circ - \frac{\varphi'}{2} \right) - \frac{c' l^2}{2} \tan \left( 45^\circ - \frac{\varphi'}{2} \right)$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| 8  | $P = \frac{l \tan(\alpha - \varphi')}{8} \left\{ \gamma' l \left( \pi d - \frac{2}{3} l \tan \alpha \right) + \pi l \gamma_w h_w + \pi l q - 4c' \left( \pi d - l \tan \alpha \right) - \pi c' l \left[ \tan \alpha + \frac{1}{\tan(\alpha - \varphi')} \right] \right\}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| 10 | $P_s - P_w = \frac{\gamma_s l}{3d} (d^2 - h_s^2)^{3/2} - \frac{\gamma_w l}{3d} (d^2 - h_w^2)^{3/2};$<br>$\beta = \arcsin \frac{h_w}{d}; \quad \theta = \arcsin \frac{l}{2d};$<br>$P = \frac{l^2 \cot(\theta + \varphi')}{48 \cos \theta} \left\{ 3\pi \gamma_w + 6\pi q - 24c' \left[ \cot \theta + \frac{1}{\cot(\theta + \varphi')} \right] + (\pi - \sin 2\beta - 2\beta)(3\gamma h_w + 2\gamma' d - 2\gamma' h_w) \right\}$                                                                                                                                                                                           |
| 11 | $P = \frac{2w_t l \left[ \gamma_w h_w + q + (\gamma - \gamma_w) \left( d - \frac{2}{5} w_t \tan \varphi' \right) \right] (\sin \alpha - \cos \alpha \tan \varphi')}{3(\cos \alpha + \sin \alpha \tan \varphi')} - \frac{w_t c' \left( \frac{2l}{\cos \alpha} + 6d - 3w_t \tan \alpha \right)}{3(\cos \alpha + \sin \alpha \tan \varphi')}$                                                                                                                                                                                                                                                                                |

注: 方法 3 中, 文[11], 文[21]分别建议  $K = \frac{K_s + K_w}{2} \approx \frac{2 - \sin \varphi' - \sin^2 \varphi'}{2(1 + \sin \varphi')}$

和  $K = \frac{1 + \sin^2 \varphi'}{\cos^2 \varphi' + 4 \tan^2 \varphi'}$ ; 方法 7, 8, 11 中:  $P_s - P_w = \frac{l}{2} [(d - h_s)^2 \gamma_s - (d - h_w)^2 \gamma_w]$ 。

通过考察泥浆高度与地下水位之差( $h_w - h_s$ )、凝聚力  $c'$ 、内摩擦角  $\varphi'$  以及开挖槽段长度  $l$  等单因素

对计算结果的影响发现<sup>[32]</sup>, 大部分方法能够满足理论上的合理性要求, 即随着( $h_w - h_s$ ),  $c'$  或  $\varphi'$  的增加, 或随着  $l$  的减小, 计算的安全系数相应增加或所需泥浆重度相应减小。不过也有一些计算方法会得到不合理的结果。

图 3(a) 所示是采用基本参数计算得到的不同开挖深度下的安全系数。由图可知, 方法 1, 3 计算的安全系数基本小于 1, 相对于方法 2, 12 而言, 方法 1, 3 都比较保守。图 3(b) 所示是方法 10 在不同的泥浆高度与地下水位 ( $h_w - h_s$ ) 情况下的计算结果, 遗憾的是, 计算得到的所需泥浆重度却随着 ( $h_w - h_s$ ) 的增加反而增加, 显然不合理。

另外, 从表 2 可以看出, 当  $h_s = h_w = 0$  时, 方法 4 计算的所需泥浆重度与槽段开挖的深度无关, 不合理; 方法 11 应用于无黏性土, 即  $c' = 0$  时,  $P$  和 ( $P_s - P_w$ ) 都与  $l$  的一次方相关, 此时计算的稳定安全系数或所需泥浆重度与开挖槽段的长度无关, 也不合理。图 3(c) 假定  $c' = 0$ ,  $h_s = h_w = 0$ , 其它参数采用上述基本参数情况下计算的所需泥浆重度, 采用这些参数经过简单运算还可以得到相对保守的平面应变条件下 Rankine 主动土压力和水压力之和即所需泥浆重度为  $14.21 \text{ kN/m}^3$ , 因此从图 3(c) 可知, 方法 4 计算的结果为  $13.82 \text{ kN/m}^3$ , 与该值接近, 方法 11 的结果甚至超过该值, 说明方法 4 和方法 11 都比较保守。不仅如此, 方法 11 应用于软黏土时也偏于保守<sup>[30]</sup>, 这是因为方法 11 认为滑动体范围  $w_t$  随着槽段开挖深度  $d$  (图 2(i)) 的增加而增加 (而其它方法一般假定  $w_t$  与槽段长度  $l$  有关而与  $d$  无关), 从而夸大了滑动体的形状, 使得计算所需泥浆重度偏大, 偏于保守。

## 5 分析方法的应用效果对比

文[4, 14]分别采用现场试验方法和有限元方法研究了槽段开挖的稳定性, 并提供了较为详细的可用于计算分析的参数, 见表 3, 表中的数据对应的是槽壁刚刚失稳即安全系数为 1.0 时的参数。本文利用这些参数, 采用表 2 中的计算公式, 可以得到各种方法的计算结果, 见表 4。表 4 中针对不同的方法, 分别通过安全系数  $F_s$  或所需泥浆重度与失稳时泥浆重度的比值  $\gamma_s^r / \gamma_s$  与 1.0 比较来评价计算方法的保守性, 如果计算值  $F_s < 1.0$  或  $\gamma_s^r / \gamma_s > 1.0$ , 则说明计算方法偏于保守。

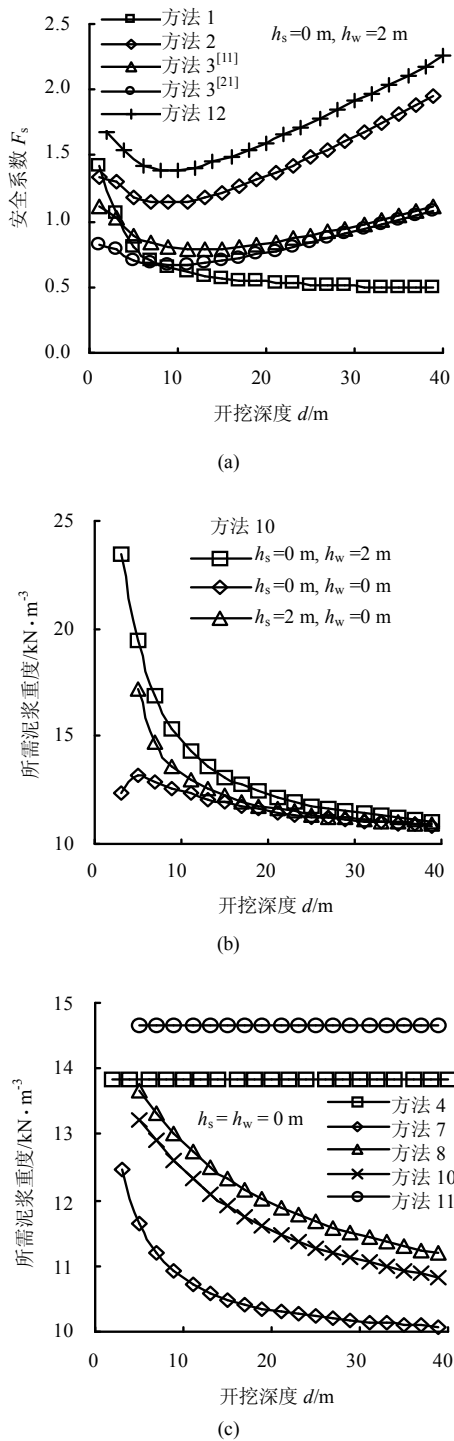


图 3 分析方法的参数敏感性  
Fig. 3 Parametric sensitivity of analysis methods

从表 4 可以看出，方法 1 和方法 3 计算的安全系数偏小，较为保守，这与前面的分析结果是一致的，其中方法 3 中采用文[11]推荐的系数  $K$  值（表 2）进行计算得到的结果比采用文[21]推荐的  $K$  值计算的结果要大。方法 2 计算结果很不稳定。方法 4 的计算结果与有限元结果基本相同，但只适合于槽段长度为无穷大即平面应变情况的槽壁稳定分析。方法 8 及方法 10~12 的计算值  $\gamma_s^r/\gamma_s$  都超过了 1.0，

说明偏于保守。相对而言，方法 7 和方法 8 的计算结果与有限元结果和现场实测结果均比较接近，其中方法 7 计算的所需泥浆重度与期望值相差在 10 % 以内，说明半圆柱形和三棱柱形的滑动体与实际滑动体形状基本接近，由此建立的槽壁稳定分析方法可以较为合理地评价槽壁的稳定性。

表 3 计算参数

| 参数                         | 工况   |          |       |       |       |
|----------------------------|------|----------|-------|-------|-------|
|                            | C1   | C2       | C3    | C4    | C5    |
| $\gamma/kN \cdot m^{-3}$   | 17.5 | 18.42    | 18.42 | 18.42 | 18.42 |
| $\gamma'/kN \cdot m^{-3}$  | 10.0 | 8.62     | 8.62  | 8.62  | 8.62  |
| $\gamma_s/kN \cdot m^{-3}$ | 10.5 | 10.3     | 10.3  | 10.3  | 10.3  |
| $\phi'/(^\circ)$           | 34   | 39       | 39    | 39    | 39    |
| $h_s/m$                    | 2    | 0        | 0     | 0     | 0     |
| $h_w/m$                    | 3    | 1.530    | 0.863 | 0.410 | 0.185 |
| $l/m$                      | 8    | $\infty$ | 12    | 6     | 3     |

注： $c'=0$  kPa， $q=0$  kPa， $d=15$  m。

表 4 计算结果

| 方法                | 参数                    | 工况   |      |      |      |      |
|-------------------|-----------------------|------|------|------|------|------|
|                   |                       | C1   | C2   | C3   | C4   | C5   |
| 1                 | $F_s$                 |      | 0.86 |      |      |      |
| 2                 | $F_s$                 | 0.88 |      | 0.91 | 1.04 | 1.56 |
| 3 <sup>[11]</sup> | $F_s$                 | 0.48 |      | 0.52 | 0.51 | 0.64 |
| 3 <sup>[21]</sup> | $F_s$                 | 0.40 |      | 0.41 | 0.43 | 0.60 |
| 4                 | $\gamma_s^r/\gamma_s$ |      | 1.00 |      |      |      |
| 7                 | $\gamma_s^r/\gamma_s$ | 0.90 |      | 0.92 | 0.94 | 0.95 |
| 8                 | $\gamma_s^r/\gamma_s$ | 1.15 |      | 1.03 | 1.04 | 1.02 |
| 10                | $\gamma_s^r/\gamma_s$ | 1.29 |      | 1.14 | 1.08 | 1.02 |
| 11                | $\gamma_s^r/\gamma_s$ | 1.21 |      | 1.08 | 1.13 | 1.15 |
| 12                | $F_s$                 | 1.03 | 1.00 | 1.12 | 1.22 | 1.66 |

## 6 结 论

本文从现有地下连续墙槽壁整体稳定性分析方法的对比研究可以得到以下结论：(1) 二维稳定分析方法或者过于保守，或者计算结果不稳定；(2) 三维稳定分析方法中如果将滑动体在平面上的范围与槽段深度建立关系也会使得计算结果偏于保守；(3) 建立在半圆柱形和三棱柱形滑动体假设基础上的槽壁稳定分析方法可以较为合理地评价砂性土层中槽壁的稳定性；(4) 现有的槽壁整体稳定分析方法都与槽段的宽度无关，因此槽段宽度或长宽比对槽壁稳定性的影响还有待进一步的研究。

## 参 考 文 献

- [1] Aas G. Stability of slurry trench excavations in soft clay [A]. Proceedings of the 6th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering[C]. Vienna: International Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1976. 103—110.

- [2] Wong G C Y. Stability analysis of slurry trenches[J]. **Journal of Geotechnical Engineering, American Society of Civil Engineers**, 1984, 110(11): 1 577—1 590.
- [3] Tamano T, Fukui S, Suzuki H, Ueshita K. Stability of slurry trench excavation in soft clay[J]. **Soils and Foundations**, 1996, 36(2): 101—110.
- [4] Tsai J S, Jou L D, Hsieh H S. A full-scale stability experiment on a diaphragm wall trench[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2000, 37(2): 379—392.
- [5] Elson W K. An experimental investigation of the stability of slurry trenches[J]. **Géotechnique**, 1968, 18(3): 37—49.
- [6] 李会民, 王士川. 地下连续墙槽壁稳定模型试验及极限平衡状态的研究[J]. **陕西建筑**, 1992, (3): 27—31.  
LI Hui-min, WANG Shi-chuan. Model testing and limit equilibrium state study of the stability of diaphragm wall panel trenches[J]. **Shanxi Construction**, 1992, (3): 27—31.
- [7] Katagiri M, Saitoh K, Masuda T, Aizawa F, Ugai K. Shape effect on deformation behaviour and stability of slurry trench walls constructed in sandy ground[A]. **Deformation and Progressive Failure in Geomechanics** [C]. Oxford: Pergamon, 1997. 665—670.
- [8] Oblozinsky P, Ugai K, Katagiri M, Saitoh K, Ishii T, Masuda T, Kuwabara K. A design method for slurry trench wall stability in sandy ground based on the elasto-plastic FEM[J]. **Computers and Geotechnics**, 2001, 28(2): 145—159.
- [9] Britto A M, Kusakabe O. On the stability of supported excavations[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1984, 21(2): 338—348.
- [10] Nash K L. Stability of trenches filled with fluids[J]. **Journal of the Construction Division, American Society of Civil Engineers**, 1974, 100(CO4): 533—542.
- [11] Huder J. Stability of bentonite slurry trenches with some experiences in Swiss practice[A]. **Proceedings of the 5th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering**[C]. Spain: Madrid, 1972, IV(9): 517—522.
- [12] Tamano T, Nguyen H Q, Kanaoka M, Fukui S. Deformation and failure of slurry trench in reclaimed soft clay: numerical analysis[A]. **Proceedings of the 12th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering**[C]. Singapore: World Scientific Publishing, 2003, (1): 825—828.
- [13] Oblozinsky P, Ugai K, Katagiri M, Saitoh K, Ishii T, Tomita S, Kuwabara K. 3D FE analysis on slurry trench stability and active earth pressure[A]. **Computer Methods and Advances in Geomechanics**[C]. Rotterdam: Balkema, 2001. 1 527—1 530.
- [14] Ishii T, Katagiri M, Saitoh K, Tomita S, Kuwabara K, Ugai K. Modeling of sandy ground for the stability analysis of slurry trench[A]. **Computer Methods and Advances in Geomechanics**[C]. Rotterdam: Balkema, 2001. 1 579—1 582.
- [15] 雷国辉, 王轩, 雷国刚. 泥浆护壁开挖稳定性的影响因素及失稳机理综述[J]. **水利水电科技进展**, 2006, 26(1): 82—86.  
LEI Guo-hui, WANG Xuan, LEI Guo-gang. Stability influence factors and instability mechanisms of slurry-supported excavations[J]. **Advances in Science and Technology of Water Resources**, 2006, 26(1): 82—86.
- [16] Filz G M, Boyer R D, Davidson R R. Bentonite-water slurry rheology and cutoff wall trench stability[A]. **In Situ Remediation of the Geoenvironment**[C]. USA: American Society of Civil Engineers, 1997. 139—153.
- [17] Tsai J S. Stability of weak sublayers in a slurry supported trench[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1997, 34(2): 189—196.
- [18] Tsai J S, Chang C C, Jou L D. Lateral extrusion analysis of sandwiched weak soil in slurry trench[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, American Society of Civil Engineers**, 1998, 124(11): 1 082—1 090.
- [19] 姜朋明, 胡中雄, 刘建航. 地下连续墙槽壁稳定性的时空效应分析[J]. **岩土工程学报**, 1999, 21(3): 338—342.  
JIANG Peng-ming, HU Zhong-xiong, LIU Jian-hang. Analysis of space-time effect on the stability for slurry-trench of diaphragm wall[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1999, 21(3): 338—342.
- [20] 刘国彬, 黄院雄, 刘建航. 超载时地下连续墙的槽壁稳定分析与实践[J]. **同济大学学报**, 2000, 28(3): 267—271.  
LIU Guo-bin, HUANG Yuan-xiong, LIU Jian-hang. Analysis of the stability of slurry trench with a surcharge and engineering application[J]. **Journal of Tongji University**, 2000, 28(3): 267—271.
- [21] Hajnal I, Márton J, Regele Z. Construction of Diaphragm walls[M]. Translated by Simon A B. New York: John Wiley & Sons, 1984.
- [22] Morgenstern N, Amir-Tahmassebi I. The stability of a slurry trench in cohesionless soils[J]. **Géotechnique**, 1965, 15(4): 387—395; 1966, 16(2): 175—178; 16(3): 263—264.
- [23] Washbourne J. The three-dimensional stability analysis of diaphragm wall excavations[J]. **Ground Engineering, the Magazine of the British Geotechnical Association**, 1984, 17(4): 24—26, 28—29.

- [24] 杨嵘昌. 地下墙护壁泥浆临界相对密度的显式解——  
坍塌底面未及地下水面[J]. 南京建筑工程学院学报,  
1995, 32(1): 22—28.  
YANG Rong-chang. The clear solution of the critical  
specific gravity of slurry propping the trench of  
diaphragm wall—the bottom of slump mass does not cross  
the groundwater level[J]. **Journal of Nanjing  
Architectural and Civil Engineering Institute**, 1995,  
32(1): 22—28.
- [25] 杨嵘昌. 地下墙护壁泥浆临界相对密度的迭代解——  
坍塌涉及地下水面而未及地表面[J]. 南京建筑工程学  
院学报, 1995, 34(3): 42—49.  
YANG Rong-chang. Iteration methods calculating the  
critical specific gravity of slurry propping the trench of  
diaphragm wall—in case that the bottom of slump mass  
crosses ground water surface and does not ground  
surface[J]. **Journal of Nanjing Architectural and Civil  
Engineering Institute**, 1995, 34(3): 42—49.
- [26] 杨嵘昌, 刘世同. 地下墙浅表泥浆槽壁的稳定分析——  
坍塌底面涉及地表时的泥浆临界相对密度[J]. 南京建  
筑工程学院学报, 1997, 41(2): 28—34.  
YANG Rong-chang, LIU Shi-tong. Stability analysis of  
slurry trench side of diaphragm wall near ground surface  
—slurry critical specific gravity in case that the bottom of  
slump mass crosses ground surface[J]. **Journal of  
Nanjing Architectural and Civil Engineering Institute**,  
1997, 41(2): 28—34.
- [27] 李禄荣. 关于地连墙槽壁稳定三维分析计算公式的辨  
正[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(3): 374—375.  
LI Lu-rong. Formula discrimination of 3-D analysis of  
trenches stability[J]. **Chinese Journal of Geotechnical  
Engineering**, 2001, 23(3): 374—375.
- [28] Tsai J S, Chang J C. Three-dimensional stability analysis  
for slurry-filled trench wall in cohesionless soil[J].  
**Canadian Geotechnical Journal**, 1996, 33(5): 798—808.
- [29] 季冲平, 余绍锋. 地下连续墙泥浆槽稳定性分析的一  
种方法[J]. 华东交通大学学报, 1998, 15(3): 13—17.  
JI Chong-ping, YU Shao-feng. The stability of slurry  
trench diaphragm wall[J]. **Journal of East China  
Jiaotong University**, 1998, 15(3): 13—17.
- [30] 张厚美, 夏明耀. 地下连续墙泥浆槽壁稳定的三维分  
析[J]. 土木工程学报, 2000, 33(1): 73—76.  
ZHANG Hou-mei, XIA Ming-yao. 3-D stability analysis  
of slurry trenches[J]. **China Civil Engineering Journal**,  
2000, 33(1): 73—76.
- [31] Fox P J. Analytical solutions for stability of slurry trench  
[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental  
Engineering, American Society of Civil Engineers**,  
2004, 130(7): 749—758.
- [32] 王轩. 矩形地下连续墙槽壁失稳机理及其分析方法研  
究[硕士学位论文 D]. 南京: 河海大学, 2005.