

富水砂卵石地层地连墙槽壁稳定规律研究

杨晓利

中国电建集团铁路建设有限公司, 北京 100048

[摘要] 针对福州地铁5号线2标段凤山路站项目地质条件, 该土层中含有较厚的砂卵石层, 不利于槽壁的局部稳定性, 本研究基于地连墙槽壁可能发生失稳的情形, 在考虑泥皮对稳定性的影响作用下, 从槽壁整体稳定和局部稳定两个方面建立失稳模型, 推导了出泥浆重度与安全系数的理论公式, 论证了槽壁整体稳定性安全系数与土体不同粘聚力、土体不同内摩擦角呈线性关系的论点, 并对随着施工场地地面荷载的增加, 槽壁整体稳定安全系数显著减小进行了研究。

[关键词] 富水砂卵石地层; 地连墙; 槽壁稳定规律

DOI: 10.33142/aem.v1i4.1006

中图分类号: U231.3

文献标识码: A

Study on Stability Law of Trench Wall of Underground Continuous Wall in Water-Rich Sand-Pebble Layer

YANG Xiaoli

PowerChina Railway Construction Co., Ltd., Beijing, 100048, China

Abstract: According to the geological conditions of Fengshan road station in section 2 of Fuzhou metro line 5, the soil layer contains a thick layer of sand-pebble layer, which is not conducive to the local stability of the trench wall. Based on the possible instability of trench wall of underground continuous wall and considering the influence of mudcake on the stability, this study establishes the instability model from the two aspects of overall stability and local stability of trench wall, deduces the theoretical formula of mud weight and safety factor, and demonstrates the linear relationship between the overall stability safety factor of trench wall and different cohesion of soil and different internal friction angle of soil, which at the same time, studies that with the increase of the ground load on the construction site, the safety factor of the overall stability of the trench wall is significantly reduced.

Keywords: water-rich sand-pebble layer; underground continuous wall; stability law of trench wall

引言

在富水砂卵石层地下连续墙成槽施工中, 槽壁主要的失稳方式有整体失稳和局部失稳。整体失稳主要与地面荷载、土体粘聚力、砂卵石层的埋深及地下水位与泥浆液面高差有关, 根据现行的技术规范和设计采用三轴搅拌桩槽壁加固, 加固深度15~18m的工艺能有效提高成槽质量, 避免出现整体失稳的情况; 局部失稳主要发生在砂卵石层等不良地层中, 地下水位和泥浆液面高差、土体粘聚力对槽壁局部稳定影响较大, 目前采用优化泥浆配比参数的经验控制方法, 仍未最终解决这一关键技术问题。虽然工程界在实践中逐渐摸索出一些地连墙槽壁稳定控制的方法, 但在槽壁失稳的诱发机制方面, 仍存在一些模糊的认识, 槽壁坍塌仍是威胁地连墙成槽质量的常见问题。研究槽壁稳定性演化规律, 厘清一些认识上的误区, 对提升槽壁稳定控制技术十分必要。

本研究基于地连墙槽壁可能发生失稳的情形, 在考虑泥皮对稳定性的影响作用下, 从槽壁整体稳定和局部稳定两个方面建立失稳模型, 推导了出泥浆重度与安全系数的理论公式, 论证了槽壁整体稳定性安全系数与土体不同粘聚力、土体不同内摩擦角呈线性关系的论点, 并对随着施工场地地面荷载的增加, 槽壁整体稳定安全系数显著减小进行了研究。

1 槽壁失稳类型分析

地连墙的槽壁失稳因素多变且相互影响, 通过大量相关施工案例和实践以及众多的理论模型, 实验研究和相关的数值模拟分析, 学者们发现槽壁稳定性的失稳类型可大致分为两大类: 整体失稳和局部失稳。

(1) 整体稳定性

整体失稳是在槽段开挖过程中一种主要发生在地表表层或浅层处的槽壁失稳破坏形式。通过大量工程实例中槽壁失稳调查记录、研究学者模型模拟和现场所做的试验研究表明: 槽孔的开挖深度一般是槽壁宽度的5倍以上, 但槽壁的失稳深度往往发生在整个槽壁的浅表层(5~15m)土体中; 三维数值模拟分析也显示位于地表浅层处的土体的稳定性最差, 圆形的槽孔稳定性要比方形的槽孔稳定性好; 地下水压力与泥浆压力的差值对槽壁的整体稳定性有很大的影响, 两者压力差值越大, 有助于成槽施工; 对于开挖过程中的槽壁整体稳定性, 浅层槽壁失稳概率要远远大于槽底失

稳概率。

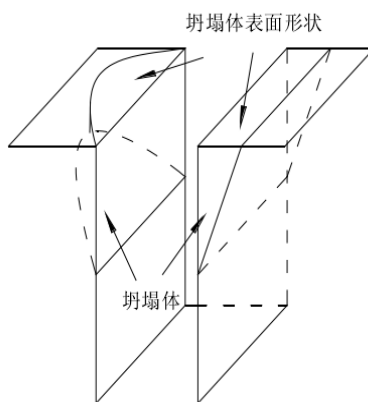


图1 整体失稳模拟图

(2) 局部稳定性

局部失稳现象常常发生在含有软弱夹层的地质条件中。局部失稳会导致工程的施工难度加大,失稳发生后,软弱夹层土进入泥浆中,泥浆重度变大,性能发生变化,槽壁的垂直性变差,混凝土浇灌量变大,同时增加施工作业量。

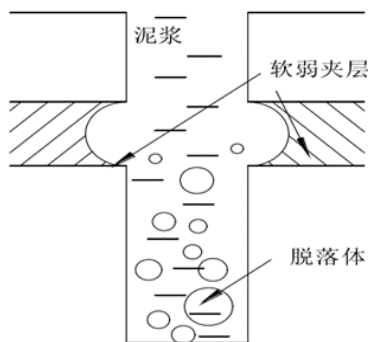


图2 局部失稳模拟图

根据张厚美,夏明耀^[1],王轩[2]的受力平衡分析结果可知:槽壁的抗局部失稳坍塌安全系数等于泥浆的入渗渗透压力作用在槽壁面上所产生的土体摩擦力与土颗粒的有效重度之比,即:

$$F_s = \frac{\gamma_w i_0 \tan \phi_f}{\gamma_f - \gamma_s} \quad (1-1)$$

式中: ϕ_f ——泥浆渗入后土体内摩擦角;

γ_f ——泥浆渗入后土体容重, kN/m³;

i_0 ——泥浆渗入到土体中的滞留临界水力梯度。

2 局部稳定性安全系数计算

对于富水砂卵石地层,发生局部失稳的概率远大于整体失稳,罗爱忠,邵生俊[3]等人将局部稳定性系数 K_L 定义为地连墙槽壁所在的土体中渗透力所产生的土颗粒间摩擦力与土体有效重度的比值,其公式为:

$$K_L = \frac{i_0 \gamma_w \tan \phi_s}{\gamma_1 - \gamma_2} \quad (1-2)$$

$$i_0 = \frac{h_s \left(\frac{\gamma_2}{\gamma_w} \right) - h_w}{L_s}$$

式中: i_0 ——泥浆粘滞梯度;

L_s ——计算点处泥浆渗入土体中的水平距离, m;

ϕ_s ——有泥浆渗入后槽壁土体的内摩擦角；

γ_1 ——有泥浆渗入后槽壁土体的重度，kN/m³；

γ_2 ——泥浆重度，kN/m³。

式(1-2)是目前考虑泥浆向土体渗透条件下，槽壁局部稳定性安全系数计算的唯一量化计算公式，其中泥浆黏度梯度 i_0 需要通过现场或室内试验测出，当给定泥浆重度时，可通过式(1-2)进行槽壁局部稳定性安全系数计算，或给定某一保证局部稳定性安全系数，可得出满足条件的泥浆重度。

根据槽壁整体稳定和局部稳定泥浆重度计算公式可知，在富水砂卵石层地下连续墙成槽施工中，槽壁主要的失稳方式有整体失稳和局部失稳。整体失稳主要与地面荷载 Q 、土体粘聚力 c 、砂卵石层的埋深 h_c 及地下水位与泥浆液面高差有关；局部失稳主要发生在砂卵石地层中，地下水位和泥浆液面高差、土体粘聚力 c 对槽壁局部稳定影响较大，在实际工程中应密切关注泥浆重度以及泥浆与地下水位高度差的变化，根据现场实际情况调整泥浆重度和液面高度来保证地连墙槽壁施工的质量与安全。

3 凤山路站槽壁稳定分析计算

根据上述模型受力计算与稳定性理论分析，本文对福州地铁 5 号线二标段凤山路站地下连续墙槽壁稳定性进行分析计算。

3.1 土层计算参数

根据地质勘测资料，选用福州地铁 5 号线二标段凤山路站 MEZ3-S10-16 号断面，其水文勘测资料中显示：勘察时测得钻孔中初始水位测量为 1.00~3.60m，初始水位标高为 2.69~5.90m，其地质情况和土层详细参数如表 3-1：

表 3-1 凤山路站土层参数取值表

土层名称	土层深度 (m)	土层厚度 (m)	容重 (kN/m ³)	粘聚力 (kPa)	内摩擦角 (°)	渗透系数 (m/d)
杂填土	+6.75~+4.35	2.4	18.0	6	18	0.5~10.0
淤泥	+4.35~-6.75	11.1	15.7	11.4	7.4	0.003
中细砂	-6.75~-13.05	6.3	18.0	4.0	23.0	20.0
粉质黏土	-13.05~-16.25	3.2	19.5	32.2	16.0	0.02~0.05
中粗砂	-16.25~-34.25	18	19.0	3.0	32.0	35.0
粉质黏土	-34.25~-34.95	0.7	19.3	33.2	15.1	0.003
卵石	-34.95~-52.75	17.8	21.0	3.0	35.0	40.0
强风化岩	-52.75~-56.59	3.84	20.0	28.0	30.0	0.80
强风化岩	-56.59	—	21.0	35.0	40.0	0.80

3.2 稳定性计算结果分析

根据地质勘测资料和水文勘测资料，计算式中的各物理量取值如下表 3-2 所示。

表 3-2 凤山路站计算参数取值表

泥浆高度 h_s (m)	地下水位 h_w (m)	槽段长 L (m)	地层深度 h_t (m)	粘聚力 c (kPa)	内摩擦角 ϕ (°)	容重 (kN/m ³)			
						γ_w	γ	γ'	γ_a
0	5	6	13.5	4	23	9.8	18	19.2	15

槽壁整体稳定性和局部稳定性所需的泥浆最小重度值分别为：

$$\gamma_{s1} = \frac{12.352H^2 - 22.56H - 376.94}{H^2} \quad (1-3)$$

$$\gamma_{s2} = \frac{13.85H - 11.55a - 34.73}{H} \quad (1-4)$$

根据福州地铁 5 号线 2 标段凤山路站地质条件可知,槽壁整体失稳最容易发生在砂卵石地层,地层位于 15 米以下,故可认为 H 为 15 米,取滑动单元体的边长无限趋于 0,故可通过 (1-3) 求出满足整体稳定时,所需的最小值为 $\gamma_{s1} = 9.87\text{kN/m}^3$,通过 (1-4) 则可求出满足局部稳定时,所需最小值为 $\gamma_{s2} = 11.53\text{kN/m}^3$ 。由此可见,富水砂卵石层地基土中局部失稳的可能性大于整体失稳,在福州地铁工程地连墙槽段开挖施工过程中,应重点关注容易发生局部失稳的地层。

根据公式 (1-3) 与 (1-4),可以分别画出福州地铁 5 号线 2 标段凤山路站站地下连续墙满足整体稳定性和局部稳定性状态下泥浆重度与砂卵石层埋置深度 H 之间的关系图。

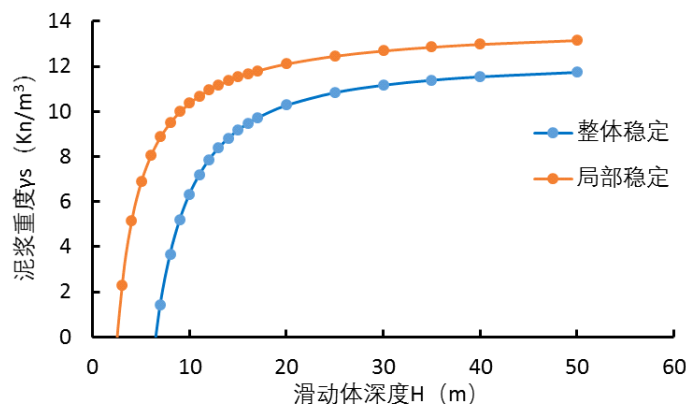


图 3 泥浆重度与砂卵石层深度 H 关系图

根据图 3 中的整体和局部稳定状态下曲线走势,我们可以发现,在含有砂卵石层的地质条件中,在相同滑动体深度的情况下,局部稳定对泥浆重度的要求更高,这说明在含有砂卵石层的地下连续墙成槽过程中,更容易产生局部失稳破坏;根据图中曲线变化趋势可知:当护壁泥浆的 γ_s 越大,可保证土层深度的范围越大,即滑动体发生失稳时所处位置的深度越大。

3.3 槽壁稳定影响因素规律研究

对福州地铁 5 号线 2 标段凤山路站站整体稳定进行影响因素对比分析,该工程地质情况及土层参数取值见表 3-1 及表 3-2,计算不同泥浆重度条件下的槽壁整体稳定性安全系数,其计算结果见表 3-3。

表 3-3 不同泥浆重度下的槽壁整体稳定性安全系数

泥浆重度 γ (kN/m ³)	9.80	10.00	10.20	10.40
安全系数 K_s	2.272	2.355	2.421	2.478

将表 3-3 中的安全系数值绘制成变化曲线图,其结果如图 3-13 所示。

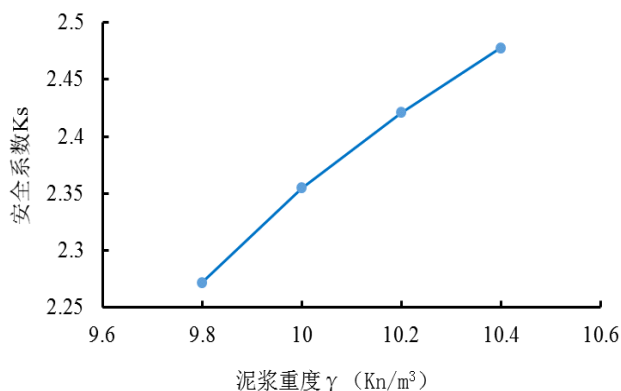


图 4 不同泥浆重度条件下的槽壁整体稳定性安全系数变化图

由表 3-3 及图 4 可知, 槽壁整体稳定性安全系数与泥浆重度呈线性关系, 泥浆重度越大, 槽壁的整体稳定性安全系数越大, 槽壁的整体稳定性越好, 所以可通过加大护壁泥浆重度来提高槽壁整体稳定性。

保证其他参数一致, 仅单独改变土体粘聚力, 研究不同大小粘聚力对槽壁整体稳定性的影响。不同粘聚力下槽壁整体稳定安全系数计算值如表 3-4 所示。

表 3-4 不同粘聚力下的槽壁整体稳定安全系数

粘聚力 c (kPa)	10.00	14.00	18.00	22.00	26.00
安全系数 K_s	1.895	2.121	2.308	2.492	2.639

将表 3-4 中的安全系数值绘制成变化曲线图, 其结果如图 3-14 所示。

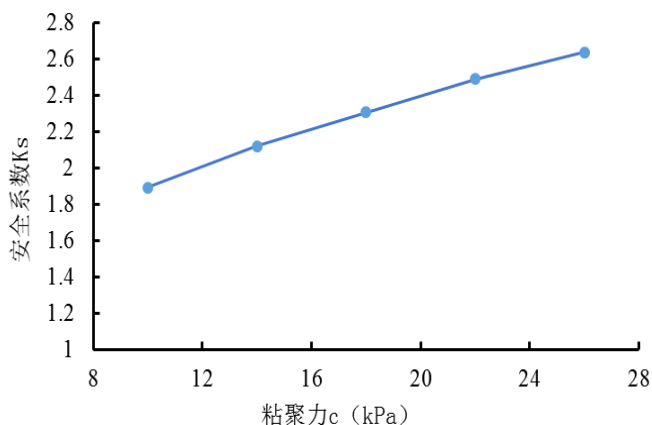


图 5 不同粘聚力下的槽壁整体稳定性安全系数变化图

由表 3-4 及图 5 可知, 槽壁整体稳定性安全系数与土体粘聚力基本呈线性关系, 土体粘聚力越大, 地连墙的安全系数越大, 有助于提高槽壁的整体稳定性。

保证其他参数一致, 仅单独改变土体内摩擦角, 分析不同内摩擦角对槽壁整体稳定性的影响。不同土体内摩擦角下槽壁整体稳定安全系数计算值如表 3-5 所示。

表 3-5 不同内摩擦角下的槽壁整体稳定安全系数

内摩擦角 ϕ ($^{\circ}$)	8.00	12.00	16.00	20.00	24.00
安全系数 K_s	1.272	1.801	2.309	2.823	3.320

将表 3-5 中的安全系数值绘制成变化曲线图, 变化曲线图如图 3-15 所示。

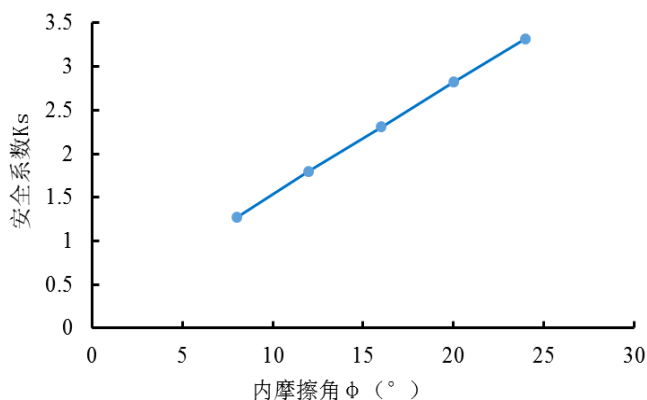


图 6 不同内摩擦角下的槽壁整体稳定性安全系数变化图

由表 3-5 及图 6 可知, 槽壁整体稳定性安全系数与土体内摩擦角呈线性关系, 土体内摩擦角越大, 槽壁的整体稳定性安全系数越大, 槽壁的整体稳定性越好, 这也与工程实际情况相符合。

在成槽过程中, 槽壁附近的施工机械及建筑器材会引起槽壁变形从而影响槽壁的稳定性, 在保证其他影响因素不变的条件下, 仅改变地面荷载, 分析不同地面荷载情况下, 槽壁整体稳定安全系数, 计算值如表 3-6 所示。

表 3-6 不同地面荷载下的槽壁整体稳定安全系数

地面荷载 (kPa)	0.00	20.00	40.00	60.00	80.00
安全系数 K_s	2.361	2.228	1.869	1.393	1.102

由表 3-6 可知, 随着地面荷载的增加, 槽壁整体稳定安全系数显著减小, 由此可见, 地面荷载是影响槽壁稳定的不利因素, 故可通过减少施工期间地面荷载和施工荷载, 来提高槽壁稳定性及施工安全性。

4 结论

(1) 在富水砂卵石层地下连续墙成槽施工中, 槽壁主要的失稳方式有整体失稳和局部失稳。

整体失稳主要与地面荷载 Q 、土体粘聚力 c 、砂卵石层的埋深 h_c 及地下水位与泥浆液面高差有关;

局部失稳主要发生在砂卵石层等不良地层中, 地下水位和泥浆液面高差、土体粘聚力 c 对槽壁局部稳定影响较大。

(2) 通过福州地铁-凤山路站地连墙槽壁稳定和计算, 分析整体稳定和局部稳定两种情况下, 不同影响因素对最小泥浆重度和安全系数的影响规律。

槽壁整体稳定性安全系数与泥浆重度呈线性关系, 泥浆重度越大, 槽壁的整体稳定性安全系数越大, 槽壁的整体稳定性越好;

槽壁整体稳定性安全系数与土体粘聚力基本呈线性关系, 土质条件越好, 土体粘聚力越大, 槽壁的整体稳定性安全系数越大, 槽壁的整体稳定性越好;

槽壁整体稳定性安全系数与土体内摩擦角呈线性关系, 土体内摩擦角越大, 槽壁的整体稳定性安全系数越大, 槽壁的整体稳定性越好;

随着地面荷载的增加, 槽壁整体稳定安全系数显著减小。

[参考文献]

[1]王轩. 矩形地下连续墙槽壁失稳机理及其分析方法研究[D]. 江苏: 河海大学, 2005.

[2]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.

[3]罗爱忠, 邵生俊, 马林. 深厚覆盖层防渗墙成槽稳定性的三维数值分析[J]. 土木工程学报, 2011, 44(2): 216-219.

作者简介: 杨晓利, 男, (1975-), 汉族, 陕西安康人, 本科, 工程师, 研究方向: 市政工程技术和管理; 城市轨道交通工程技术和项目管理。