

管道沟槽等窄条形基坑隆起稳定性计算方法

沈铨杰

[上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092]

摘要: 坑底抗隆起稳定常作为软土地区围护结构嵌固深度的控制条件。现行行业规范并未考虑基坑宽度对隆起稳定性的影响,导致深厚软弱土地区窄条形基坑工程设计中挡土构件过大的插入深度,造成浪费。实际基坑工程有显著的空间效应。通过分析基坑宽度效应对坑底抗隆起稳定性的影响,得出了基于宽度的基坑分类标准,提出了窄条形基坑坑底抗隆起稳定计算方法,表明窄条形基坑有更好的抗隆起稳定性,并通过工程案例进行了分析验证。最后对窄条形基坑坑底抗隆起稳定性影响因素进行参数敏感性分析。研究成果对规范公式进行了补充改进,为软土地区窄条形基坑设计提供了依据。

关键词: 窄条形基坑;空间效应;坑底抗隆起;理论公式;参数分析

中图分类号: TU93

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2021)07-0321-04

0 引言

对于软土地区板式支护和水泥土重力式围护基坑,坑底抗隆起稳定是决定围护结构嵌固深度的主要条件之一。坑底抗隆起稳定性分析方法主要有极限平衡法、极限分析法、非线性有限元法和可靠度分析法^[1]。其中,基于土压力理论的极限平衡法在目前基坑设计中被广泛采用。现行基坑工程行业规范和各地方标准大多采用了这一方法。其不足之处是忽略了基坑的空间效应。

不同于民用建筑,市政工程基坑,如管道、地下综合管廊、地下道路、箱涵、地铁车站等,往往呈现狭长形态。工程实践表明,狭长型基坑比宽大基坑有更好的抗隆起稳定性。由于目前规范公式并未考虑基坑宽度的影响,因此深厚软弱土环境下围护结构插入深度过大,造成浪费。

本文针对行业规范坑底抗隆起计算模式,考虑窄条形基坑对侧围护结构的约束作用,建立了新的理论公式。该公式在原规范公式基础上仅引入基坑宽度 B ,概念明确,参数清晰,适用于工程应用。

1 对规范稳定性验算的理解

行业标准《建筑基坑支护技术规程》(JGJ 120—2012)采用以最下层支点为轴心的圆弧滑动稳定性验算方法^[2]。

收稿日期: 2021-01-11

作者简介: 沈铨杰(1987—),男,硕士,工程师,主要从事地下结构设计工作。

$$\frac{\sum [C_j l_j + (q_j b_j + \Delta G_j) \cos \theta_j \tan \varphi_j]}{\sum (q_j b_j + \Delta G_j) \cos \theta_j} \geq K, \quad (1)$$

式(1)是基于库伦理论和朗肯理论进行稳定性分析的一种改进的极限平衡法。假定破坏面为通过桩、墙底的圆弧形,以力矩平衡条件进行分析。假定力矩平衡转动点位于最下道支撑或锚拉点处。

实际上,行业标准采用的这种圆弧滑动模式取自上海地标,普遍应用于软土地区,也积累了大量经验。当坑底位于非软土区时,这种验算模式并无必要。例如,北京等地区往往不进行这种坑底抗隆起验算。

分析式(1),其忽略了多项抗隆起有利因素:(1)未考虑土体侧向应力影响;(2)未考虑围护结构容许应力影响;(3)未考虑竖向滑面阻力影响;(4)窄条形基坑时未考虑对侧围护结构约束作用;(5)未考虑基坑形状影响。

工程实践表明,采用式(1)验算窄条形基坑坑底抗隆起稳定性是偏于保守的,而且不少情况下不合理。

2 考虑基坑宽度的坑底抗隆起计算新方法

本文基于现有理论研究成果,结合工程实践经验,试图着重对有明显空间效应的窄条形基坑坑底抗隆起验算模式进行探讨。

查阅国内外相关研究文献,在基坑宽度对稳定性存在影响这一点上普遍达到共识^[3-7],但合理的、与工程实践相吻合的、概念清晰且便于工程应用的很少。其中,王洪新^[8]采用基坑宽度 L 与插入深度 D 之比对基坑宽度进行了分类,认为 $L/D \geq \tan(\pi/4 + \varphi/2)$ 时基

坑宽度不再对倾覆稳定性产生影响; $\tan \varphi < L/D < \tan(\pi/4 + \varphi/2)$ 时基坑宽度会对倾覆稳定性产生影响。

本文在行业规范验算模式的基本框架下,考虑基坑宽度的影响,采用图 1 所示坑底抗隆起破坏模型,定义 $D \geq B$ 的窄条形基坑坑底抗隆起安全系数。与规范相比,提出的公式考虑了对侧围护结构对滑裂面形状的影响,未引入新的假设,仅额外引入两个计算参数:基坑宽度 B 、围护结构与坑内土体摩擦系数 μ 。

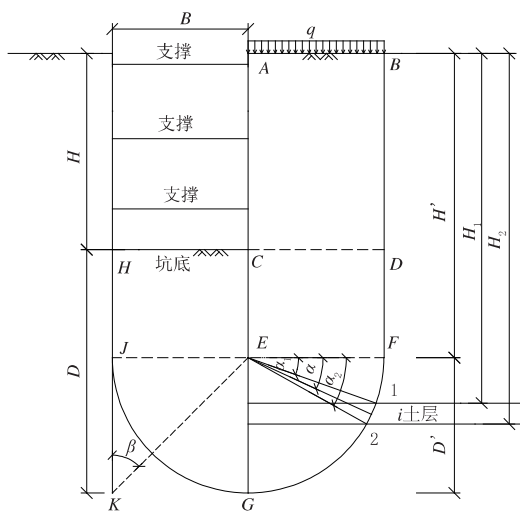


图 1 坑底抗隆起破坏模型

2.1 基本假定

(1)假设隆起破坏只发生在坑底以下土体,坑底以上土体不发生破坏,滑裂面为 $DFGJH, BD$ 面上强度没有发挥。

(2)滑弧圆心 E 位置:自对侧墙底作与围护墙呈 β 角的直线 KE , KE 与滑动侧墙体交点即圆心。假定 β 为 45° , 则当基坑宽度与围护结构插入深度相等时,圆心位于开挖面处。

(3)滑动面上抗剪强度 $\tau = \sigma \tan \varphi + c$ 。滑动面 JG 上的法向应力由两部分组成, 即土体自重 in 滑动面的法向分力与该处水平侧压力在滑动面的法向分力之和, 水平侧压力应介于静止土压力与被动土压力之间, 近似取 $\gamma z \tan^2(\pi/4 + \varphi/2)$; 滑动面 GF 上的法向应力也由两部分组成, 即土体自重 in 滑动面的法向分力与该处水平侧压力在滑动面的法向分力之和, 水平侧压力应介于静止土压力与主动土压力之间, 近似取 $\gamma z \tan^2(\pi/4 - \varphi/2)$ 。

2.2 公式推导

定义板式支护体系按圆弧滑动模式的坑底抗隆起稳定性安全系数:

$$K = \frac{M_R}{M_S} \quad (2)$$

其中,

$$\mathbf{M}_R = \mathbf{M}_{HI} + \mathbf{M}_{IG} + \mathbf{M}_{GF} + \mathbf{M}_{FD} \quad (3)$$

$$M_S = M_q + M_{ABCD} \quad (4)$$

式中: M_R 为抗隆起力矩标准值, $\text{kN} \cdot \text{m/m}$; M_S 为隆起力矩标准值, $\text{kN} \cdot \text{m/m}$; M_{HJ} 为坑内开挖面以下至圆心各土层抗隆起力矩标准值之和, $\text{kN} \cdot \text{m/m}$; M_{JC} 为坑内圆心以下各土层抗隆起力矩标准值之和, $\text{kN} \cdot \text{m/m}$; M_{CF} 为坑外圆心以下各土层抗隆起力矩标准值之和, $\text{kN} \cdot \text{m/m}$; M_{FD} 为坑外开挖面以下至圆心各土层抗隆起力矩标准值之和, $\text{kN} \cdot \text{m/m}$; M_q 为坑外地面超载产生的隆起力矩标准值, $\text{kN} \cdot \text{m/m}$; M_{ABCD} 为坑外坑底以上各土层产生的隆起力矩标准值之和, $\text{kN} \cdot \text{m/m}$ 。

$(1)M_{HI}$

$$\tau = \sigma_h \mu + c = K_p (\gamma z + q_1 - \gamma H_1) \mu + c \quad (5)$$

则某层土的抗隆起力矩为

$$\int_{H_1}^{H_2} \tau B dz = \int_{H_1}^{H_2} (K_p B \mu \gamma z + K_p B \mu q_1 - K_p B \mu \gamma H_1 + c B) dz \quad (6)$$

$$M_{HJ} = \Sigma \int_{H_1}^{H_2} (K_p B \mu \gamma z + K_p B \mu q_1 - K_p B \mu \gamma H_1 + c B) dz \quad (7)$$

$$K_n = \tan^2(\pi/4 + \varphi/2) \quad (8)$$

式中: B 为基坑宽度, m ; τ 为滑动面上抗剪强度, kPa ; σ_n 为滑动面上法向应力, kPa ; γ 为对应土体天然重度, kN/m^3 ; c 为对应土体黏聚力标准值, kPa ; φ 为对应土层的内摩擦角 (弧度); μ 为墙土摩擦系数; z 为对应土体距离地面深度, m ; q_1 为坑内对应土层上覆土压力标准值, kPa ; H_1, H_2 为对应土层顶面、底面埋深, m 。

$(2)M_{IG}$

$$\tau = [(q_1 + \gamma B \sin \alpha + \gamma H' - \gamma H_1) \sin^2 \alpha + K_p (q_1 + \gamma B \sin \alpha + \gamma H' - \gamma H_1) \cos^2 \alpha] \tan \varphi + c \quad (9)$$

$$M_{JC} = \sum \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} [(q_1 + \gamma B \sin \alpha + \gamma H' - \gamma H_1) \sin^2 \alpha \tan \varphi + \quad (10)$$

$$K_p(q_1 + \gamma B \sin \alpha + \gamma H' - \gamma H_1) \cos^2 \alpha \tan \varphi + c] D'^2 da$$

$$\alpha_1 = \arcsin \frac{H_1 - H'}{D'}, \alpha_2 = \arcsin \frac{H_2 - H'}{D'} \quad (11)$$

式中: H' 为圆心埋置深度, m; D' 为围护墙在圆心以下深度, m; α_1, α_2 为对应土层层顶及层底与圆心连线的水平夹角(弧度)。

$$(3)M_{GF}$$

$$\tau = [(q + q_2 + \gamma B \sin \alpha + \gamma H' - \gamma H_1) \sin^2 \alpha + K_a (q + q_1 + \gamma B \sin \alpha + \gamma H' - \gamma H_1) \cos^2 \alpha] \tan \varphi + c \quad (12)$$

$$M_{GF} = \sum \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} [(q+q_2+\gamma B \sin \alpha + \gamma H' - \gamma H_1) \sin^2 \alpha \tan \varphi +$$

(13)

$$K_a(q+q_2+\gamma B \sin \alpha + \gamma H' - \gamma H_1) \cos^2 \alpha \tan \varphi + c] D'^2 d\alpha$$

$$K_a = \tan^2(\pi/4 + \varphi/2)$$

(14)

式中:q 为地面超载,kPa;q₂ 为坑外对应土层上覆土压力标准值,kPa。

(4) M_{FD}

$$\tau = \sigma \tan \varphi + c$$

(15)

则某层土的抗隆起力矩为

$$\int_{H_1}^{H_2} \tau B dz = \int_{H_1}^{H_2} (\sigma \tan \varphi + c) D' dz$$

(16)

$$M_{FD} = \sum \int_{H_1}^{H_2} (\sigma \tan \varphi + c) D' dz$$

(17)

(5) M_q

$$M_q = \frac{1}{2} q D'^2$$

(18)

(6) M_{ABCD}

$$M_{ABCD} = \sum \frac{1}{2} \gamma D'^2 (H_2 - H_1)$$

(19)

3 工程案例验证

3.1 工程概况

某新建排水管道工程雨污水管道均采用开槽埋管施工。管槽深度不超过 6.1 m,管槽宽度不超过 2.5 m,基坑安全等级三级。

场地位于海积平原,地形平坦开阔,现状地面高程一般为 2.60~5.57 m。场地内河道为桐山溪、高洋河,河流岸坡为土质自然岸坡;场地内零星分布水塘、鱼塘,水深多为 1.0 m 左右,面积大小不一,建设红线内的水塘将会回填。根据地勘报告表述,管槽基坑深度范围内场地土层自上而下分布和赋存条件分述如下:①₀ 层素填土,全场局部分布,人工堆填,厚度变化大,均匀性差,工程性质差异性大;① 层黏土,可塑,下部渐变为软塑,物理力学性质一般,可作为轻型建筑物的天然基础持力层;②₁ 层淤泥,流塑。各土层物理力学参数见表 1。

表 1 土体力学参数

岩土名称	$\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	c/kPa	$\varphi(^{\circ})$
① ₀ 层素填土	18	10	8
① 层黏土	18.2	28.6	13.6
② ₁ 层淤泥	16.2	12.6	7.9

3.2 支护设计

管槽支护方案如图 2 所示。

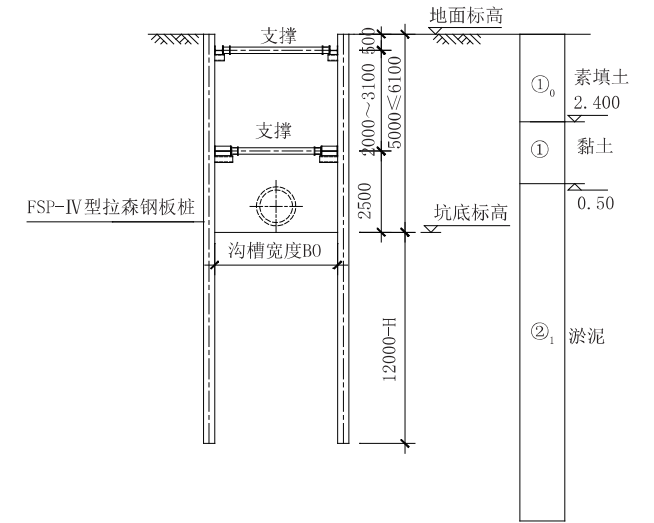


图 2 管槽支护方案(单位:mm)

按《建筑基坑支护技术规程》(JGJ 120—2012)方法计算,坑底抗隆起稳定性系数为 1.11,达不到规范要求的 1.7。采用本文方法计算,稳定性系数为 1.92,满足要求。方案经过专家论证并已实施完成,基坑稳定性和变形均满足要求。

类似的,管槽基坑位于深厚软弱土区域或围护桩底土层内摩擦角较小时,采用国标坑底抗隆起验算模式,稳定性通常不满足要求。但大量工程实践表明,这些窄条形基坑在合适插入比条件下都能满足稳定性要求,而侧向变形显著。

4 坑底抗隆起稳定参数敏感性分析

影响坑底抗隆起稳定的因素较多^[9-10],以下采用本文提出的公式,选取基坑宽度、围护结构插入比、土体特性等因素分析其对窄条形基坑坑底抗隆起的敏感度。

某基坑工程位于软土地区,地层主要为淤泥质黏土。围护设计参数见表 2。

表 2 土体力学参数

$\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	c/kPa	$\varphi(^{\circ})$	B/m	H/m	D/m	μ	q/kPa
16.7	13	10	3	6	9	0.3	20

4.1 基坑宽度影响

控制其余参数不变,改变基坑宽度 B,坑底抗隆起稳定系数变化如图 3 所示。采用本文算法时,随着基坑宽度变大,坑底抗隆起稳定系数减小,但当宽度增大至一定程度时减小速率变缓。当基坑宽度从 2 m 增大到 10 m 时,安全系数从 3.09 降低到 1.44,即基坑宽度增大 400%时,安全系数降低 53%。采用行业规范时,随着基坑宽度变大,安全系数保持不变。

由于围护桩插入深度为 9 m,当基坑宽度在 9~

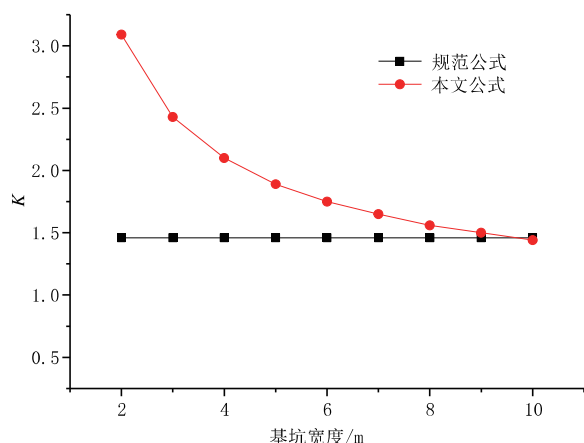


图3 坑底抗隆起安全系数-基坑宽度关系图

10 m时,规范公式与本文公式结果一致,说明当围护结构插入深度与基坑宽度基本相等时,正是“宽基坑”与“窄基坑”的分界线。这说明,在基坑宽度小于围护结构插入深度时,基坑宽度越窄,坑底抗隆起稳定性越好,规范计算的坑底抗隆起安全系数有较大富余量。这与实际的工程经验是相吻合的。

4.2 围护结构插入比影响

控制其余参数不变,改变围护结构插入比,坑底抗隆起稳定系数变化如图4所示。随着插入比增加,抗隆起安全系数基本呈线性增加。当插入比从0.5增加到2.0时,抗隆起安全系数从1.1增加到3.1,即插入比增大300%时,安全系数增加182%。这说明围护结构插入比对基坑坑底隆起稳定性影响显著。

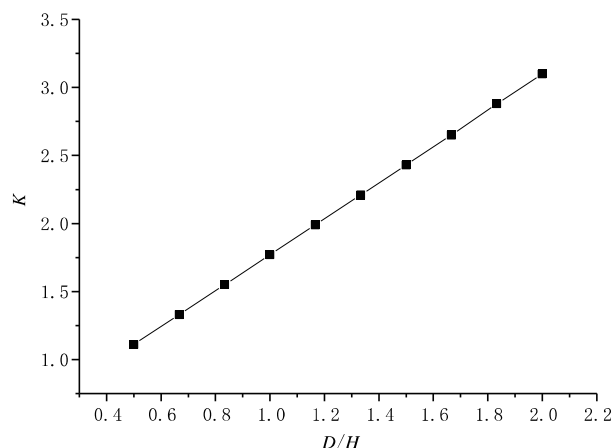


图4 坑底抗隆起安全系数-D/H关系图

4.3 土体黏聚力和内摩擦角影响

控制其余参数不变,改变土体黏聚力或内摩擦角,坑底抗隆起稳定系数变化如图5所示。随着黏聚力或内摩擦角增加,抗隆起安全系数基本呈线性增加。当黏聚力从5 kPa增加到14 kPa时,抗隆起安全系数从1.48增加到2.55,即黏聚力增大180%时,安全系数增加72%。当内摩擦角从5°增加到14°时,

抗隆起安全系数从1.99增加到2.8,即内摩擦角增大180%时,安全系数增加41%。这说明土体黏聚力和内摩擦角均对基坑坑底隆起稳定性影响显著。

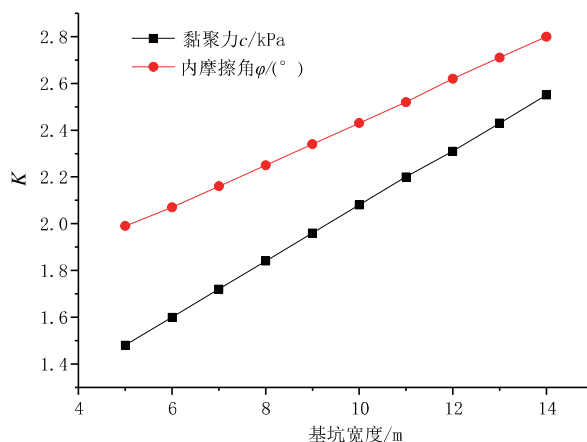


图5 坑底抗隆起安全系数-土体抗剪强度关系图

5 结论

针对软土地区基坑工程,提出了考虑基坑宽度的坑底抗隆起稳定计算方法,主要得出以下结论:

(1)行业规范未考虑基坑宽度对坑底抗隆起计算的影响,同时忽略了多个有利因素,导致安全系数偏大。采用规范公式验算窄条形基坑导致过大的围护结构插入比,造成浪费。

(2)推导了考虑基坑宽度的坑底抗隆起稳定计算方法。相比规范方法,仅额外引入两个计算参数:基坑宽度 B 、围护结构与坑内土体摩擦系数 μ 。

(3)本文公式计算表明,基坑宽度近似等于围护结构插入深度是“宽基坑”与“窄基坑”的分界。在基坑宽度小于围护结构插入深度时,基坑宽度越窄,坑底抗隆起稳定性越好。因此,窄基坑可适当减小围护结构插入深度,对降低工程造价有重大意义。

(4)应用本文公式计算表明,随着围护结构插入比、土体黏聚力、内摩擦角增加,坑底抗隆起安全系数基本呈线性增加,影响显著。

参考文献:

- [1] 黄亚宁. 深厚淤泥区基坑支护抗隆起稳定性验算问题研究 [D]. 广州: 广州大学, 2018.
- [2] JGJ 120—2012, 建筑基坑支护技术规程[S].
- [3] TERZAGHI K. Theoretical soil mechanics [M]. New York: Wiley, 1943.
- [4] BJERRUM L, EIDE O. Stability of strutted excavations in clay [J]. Geotechnique, 1956, 6(1): 32-47.
- [5] SKEMPTON A W. The bearing capacity of clays [C]// Proceedings of Building Research Congress. London: [s.n.], 1951: 180-189.
- [6] 汪炳鉴, 夏明耀. 地下连续墙的墙体内力及入土深度问题[J]. 岩土工程学报, 1983, 5(3): 103-114.

4 基坑设计关键技术分析

4.1 A、B 坑交界处处理

A 坑与 B 坑交界处基坑底标高相差 4.3 m, 根据设计要求, 该处实施完成后底板为一整体板。A 坑底板浇筑前需拔除 B 坑西侧 SMW 工法桩内型钢, 并凿除水泥搅拌桩, 但拔除过早会因两侧土体高差过大导致土压力过大而影响基坑安全。经计算, 交界处型钢应在 B 坑底板浇筑完成, 素砼回填后, A 坑开挖至接近坑底时(挖深离设计坑底小于 1 m)拔除, 见图 6。

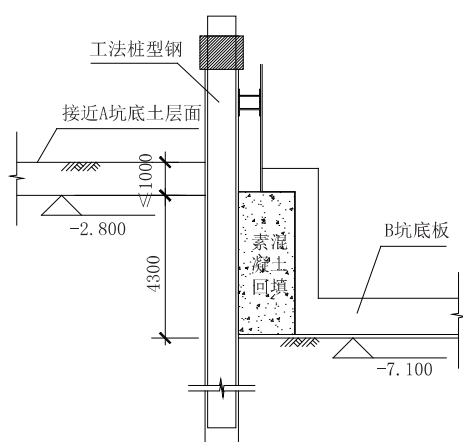


图 6 A 坑与 B 坑交界处处理措施(单位:mm)

4.2 超大型基坑换撑技术

本工程为地下一层结构, 层高 9 m, 局部层高为 10 m, 无可利用楼板换撑的条件, 且厂房顶板高出地面, 顶板需在第一道支撑拆除后才能浇筑。基坑回筑阶段换撑时一方面利用已浇筑永久隔墙采用短直钢支撑或传力板换撑, 另一方面采用钢管斜抛撑换撑。

4.3 分块开挖

本工程基坑开挖面积巨大, 若一次性大面积开挖对控制基坑围护变形不利, 设计要求 A 坑每次土方开挖重力式挡墙暴露的水平长度不大于 40 m, 待结构底板浇筑完成并达到设计强度 85% 后方可开挖相邻土体; B 坑在第二道支撑浇筑完成并达到设计强度的 85% 后, 剩余土方分块开挖, 开挖要求与 A 坑相同。

5 结 语

本文通过对上海市某集约化半地下式污水处理厂超大基坑设计的详细介绍和分析, 得出以下结论:

(1) 归纳总结了集约化地下式污水处理厂的一般特点, 如基坑开挖面积超大, 基坑开挖深度与坑底高差均较大, 基坑支撑换撑困难, 周边环境相对较为简单, 但不绝对。

(2) 对于集约化地下式污水处理厂基坑往往需要采取多种基坑支护型式, 本工程综合运用了放坡开挖、三轴搅拌桩重力式挡墙和钻孔灌注桩结合内支撑的支护型式。

(3) 通过对本污水处理厂超大基坑设计方案的详细介绍, 对关键技术进行分析, 为类似工程基坑设计提供参考。

参考文献:

- [1] 李国金, 李霞, 郭淑琴, 等. 地下式污水处理厂发展历程及工程设计注意要点[J]. 城市道桥与防洪, 2018(8):161-165.
- [2] 万玉生, 叶雅丽, 王长祥, 等. 某全地下式污水处理厂结构设计的关键技术及相关问题[J]. 特种结构, 2014, 31(2):34-37.
- [3] DG/TJ 08-61—2018, 基坑工程技术标准[S].

(上接第 324 页)

- [7] 张天宝. 长条形基坑抗隆起稳定及整体稳定性分析方法[D]. 天津: 天津大学, 2016.
- [8] 王洪新. 基坑宽度对围护结构稳定性的影响 [J]. 土木工程学报, 2011, 44(6):120-126.

- [9] 李亚杰, 王成华. 基于大比尺基坑模型试验的基坑隆起稳定性参数分析[R]. 天津: 天津大学, 2017.
- [10] 秦会来, 陈祖煜, 刘立鹏. 基于上限理论的软土基坑抗隆起稳定分析方法[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(9):1611-1619.