小应变硬化土模型的软土地基狭窄基坑的抗隆起稳定性

胡科[1]，阎波[1]，太俊[1]，徐伟[1]，王家驹[2*]，崔德山[2]，冯晓腊[2]

1. 中国市政工程中南设计研究总院有限公司，武汉 430010；
2. 中国地质大学（武汉）工程学院，武汉 430074

第一作者，E-mail：huke@citic.com

* 通信作者，E-mail：cugwangjiaju@cug.edu.cn

2025-07-01 收稿；2025-11-10 修回；2025-11-18 接受

基金项目：中国市政工程中南设计研究总院有限公司 2023 年度科技研发项目（KY-N-K-2023-001）

中图分类号：TU433　　文章编号：2096-8523(2026)01-0121-14　　doi: 10.19509/j.cnki.dzkq.tb20250307

摘　要：随着城市化和综合管廊的发展，狭窄型基坑工况日益增多。其支护形式、抗隆起计算方法及破坏模式与宽大基坑差异显著，在软土地层中坑底隆起尤为明显。为了进一步探究软土地基狭窄基坑支护结构的受力变形规律，抗隆起稳定性及其影响因素之间的敏感性关系，以武汉友谊大道快速化改造工程为实例，基于有限元计算和现场监测，采用小应变硬化土(HSS)土体本构模型和强度折减法研究基坑宽度、支护结构插入比、周边荷载和支护结构刚度等对狭窄基坑抗隆起稳定性的影响。结果表明：在支护结构刚度大、支撑间距小的情况下，狭窄基坑在支撑处和两道支撑中点处的受力变形差异不明显。狭窄基坑的变形土体可以分为地表至地表以下一定深度的基坑外侧土体和基坑底部土体，分别引起坑底隆起和坑外地表沉降；狭窄基坑土体塑性区会在坑底和结构底部处形成，随着塑性区发展，逐渐形成交叉的塑性区，并向两侧土体发展直至整个塑性区贯通，狭窄基坑最终破坏。敏感性分析表明，支护结构插入比和支护结构刚度对狭窄基坑抗隆起稳定性有显著的正面影响，基坑宽度和周边荷载则为负相关，且支护结构插入比的相关性最强。研究成果为软土地基狭窄基坑的支护结构设计和稳定性分析提供科学依据。

关键词：狭窄基坑；抗隆起稳定性；软土地基；小应变硬化土模型；有限元法

随着城市化进程和综合管廊的快速发展，地下工程被大量修复和重建，这就需要开挖大量的狭窄型基坑。狭窄型基坑是指作业场地较小，基坑深度与基坑宽度的比值大于 1，且支护结构和坑内土体之间的摩阻力对坑内土体的应力和变形状态、抗隆起稳定性影响占主导地位。因为尺寸效应，狭窄型基坑的抗隆起稳定性计算与宽大型基坑的截然不同。因此，开展狭窄型基坑抗隆起稳定性研究具有重要意义。

基坑的抗隆起稳定性受到很多因素影响，其中基坑形状、尺寸和支护结构对其都有直接影响。姜晨光等[1]对基坑形状与基坑抗隆起稳定性的关系进行了研究，发现相同条件下，类圆形平面结构基坑稳定性优于矩形平面结构基坑稳定性，且矩形平面结构基坑稳定性随着长宽比增大而减小；洪春欣[2]也进行了相似研究，认为相同条件下椭圆形基坑的稳定性要优于圆形基坑；梁艳等[3]对基坑开挖尺寸与基坑抗隆起稳定性的关系进行了研究，得出了相同条件下，开挖尺寸越小，其抗隆起安全系数越大，影响也越显著的结论；王洪新[4]则研究基坑宽度对围

著录信息：胡科，阎波，太俊，等. 小应变硬化土模型的软土地基狭窄基坑的抗隆起稳定性［J］. 地质科技通报，2026，45(1)：121-134.
HU Ke, YAN Bo, TAI Jun, et al. Basal-heave stability of narrow foundation pit in soft soil foundation based on hardening soil with small-strain stiffness (HSS) model［J］. Bulletin of Geological Science and Technology, 2026, 45(1): 121-134.

© Editorial Office of Bulletin of Geological Science and Technology. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.　https://dzkjtb.cug.edu.cn

护结构稳定性的影响，认为基坑越深，基坑宽度越小，越要考虑基坑宽度对稳定性的影响；HUANG 等[5] 通过研究开挖宽度对上海软黏土开挖变形的影响和机理，发现随着开挖宽度的增加，支护结构水平位移及其周边土体沉降都会增加，但增加速率会逐渐减小；庄海洋等[6] 通过对深软场地狭长深基坑开挖过程中的一系列数据分析，发现狭窄基坑发生变形的空间效应明显异于常规基坑；胡敏云等[7] 通过有限元分析基坑宽度对坑底隆起模式的影响，发现当宽深比大于 2 时，基坑宽度的影响不明显；FAHEEM 等[8] 通过有限元分析研究，给出了其他部分影响因素对基坑稳定性的影响；潘静杰等[9] 考虑到外基坑和坑中坑对坑底滑裂面的影响，推导了宽基坑和窄基坑坑中坑的被动土压力理论计算公式。由此可见，狭窄基坑作为一种特殊开挖尺寸的基坑，开挖过程中的受力变形规律与宽大基坑不同，这种尺寸效应对于工程施工安全性是至关重要的。

不同时期和地区对基坑的抗隆起稳定性验算方法有一定差别。KARL[10]、BJERRUM 等[11] 和 PRANDTL[12] 各自提出了经典的地基承载力模式的抗隆起稳定分析方法，但是狭窄基坑均不满足适用条件，因此很多学者对狭窄基坑的抗隆起稳定性计算方法开展了研究与改进。BOSE 等[13] 考虑岩土体的各向异性，推导出了基于对应的异向本构方程的不排水抗剪强度，将不排水抗剪强度作为抗隆起稳定性分析的影响因素；ZHENG 等[14] 提出土体强度随深度增加的影响不容忽视。施光焕[15] 通过对基坑整体稳定性分析的探讨，提出对于基坑边长小于 1.13 倍围护桩长，按照常规圆弧滑动计算模型进行稳定性验算结果偏于保守的结论，施琦[16]、卢瀚[17]、应宏伟等[18] 也得到了类似的结论；阳吉宝等[19] 提出针对狭窄基坑隆起滑动面是呈抛物线型分布，给出了据此推导出的抗隆起稳定性系数计算解；俞建霖等[20] 通过比较各类基坑抗隆起计算方法及其影响因素的影响权重，得出修正狭窄基坑抗隆起稳定性计算公式的关键是改变圆弧滑动法圆心位置的结论；宋二祥等[21] 通过对地基承载力模式计算方法的分析改进，给出饱和黏性土地层中深基坑坑底抗隆起稳定安全系数的计算方法；JIN 等[22] 通过极限分析法的上限法结合有限元数值软件来分析抗隆起稳定性并给出了相应的算法；HE 等[23] 通过有限元软件来分析狭窄基坑隆起破坏机制，并给出一种基坑分类方法。但是这些计算方法大致都可分为基于圆弧滑动的分析方法和地基承载力模式的抗隆起稳定分析方法，并没有考虑土体本身的性质带来的影响，导致不同地区的基坑受力变形规律即支护结构的稳定性也不尽相同。

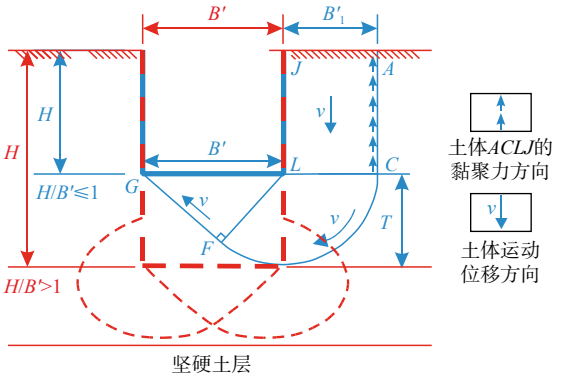
因此，有限元数值模拟分析具备相当重要的佐证作用[24]。在有限元模拟过程中，土体本构模型选用直接影响着模拟结果是否符合实际。KUNG 等[25] 通过对台北国家企业中心基坑的实测数据进行分析，认为准确预测基坑开挖引起影响，应考虑土体在小应变时的非线性和硬化行为；CAO 等[26] 通过实验对郑州典型地层的小应变硬化土（hardening soil with small-strain stiffness，简称 HSS）模型参数进行了验证，并利用现场数据验证了模型参数的准确性和适用性，提出 HSS 模型比硬化土（hardening soil，简称 HS）模型或莫尔−库仑（Mohr-Coulomb，简称 MC）模型更能准确分析开挖变形；居尚威等[27]、何亮等[28]、吴小斌等[29]、林德周[30]、温科伟等[31] 也得出了类似的结论；MU 等[32] 考虑土体小应变行为，提出了一种简化的方法来计算开挖引起的土体运动的三维分布，并能得到可靠的结果。因此，在现有数值模拟软件中，相较于其他模型，HSS 模型能更好地体现土体小应变行为特性，数值模拟结果更加符合实际，适用于狭窄型基坑开挖项目。

本研究改进了评估狭窄基坑抗隆起稳定性的现有方法。通过在数值模拟中结合强度折减法和 HSS 模型，以武汉友谊大道快速改造项目为例进行了研究。利用有限元方法，详细分析了支撑结构的受力−变形行为，系统探讨了基坑宽度、支护结构插入比、周边荷载和支护结构刚度等多因素对狭窄基坑抗隆起稳定性的影响，并评估了各参数的敏感性。通过研究支撑结构的受力−变形特性，识别影响狭窄基坑抗隆起稳定性的关键因素，本研究弥补了现有方法在狭窄基坑抗隆起稳定性分析中的不足。研究结果为优化狭窄型基坑支撑结构设计的思路提供了新的见解，确保安全的同时提高结构利用效率，对于狭窄基坑项目抗隆起稳定性分析与计算具有重要的实际意义。

1　传统基坑抗隆起方法及其不足

1.1　刚体极限平衡法

KARL[10] 通过研究地基承载力模型，给出了基坑的抗隆起稳定性计算方法：假设黏土的内摩擦角 φ=0，且滑动面由圆筒面和平面组成（图 1），提出了一种抗隆起稳定性计算公式：



A, *C*, *F*, *G*, *L*, *J*. 土体端点代号; *v*. 土体运动时的位移速度; *H*. 基坑开挖深度; *B′*. 基坑开挖宽度; B'_1. 基坑侧壁影响宽度; *T*. 基坑开挖影响区深度; 蓝色实线. KARL[10] 提出的破坏模式的基坑开挖面、基坑底面及破坏面; 红色虚线. BJERRUM 等[11] 提出的破坏模式的基坑开挖面、基坑底面及破坏面; 下同

图 1　基底隆起示意图

Fig. 1　Schematic diagram of basal heave

$$\frac{\gamma H}{S_u}=5.7+\frac{H}{B'_1}, \tag{1}$$

式中: $\gamma H/S_u$ 为稳定性系数; γ 为土体重度; H 为基坑开挖深度; S_u 为土体不排水强度; B'_1 为基坑侧壁影响宽度。

当基坑开挖影响区深度 $T \geqslant B'/\sqrt{2}$ 时，$B'_1=B'/\sqrt{2}$，B'为基坑开挖宽度; 当 $T<B'/\sqrt{2}$ 时，$B'_1=T$。考虑基底完全粗糙时的地基承载力系数 N_c 为 5.7。

一般认为, KARL[10] 的抗隆起分析模型适用于浅基坑或宽基坑的情况, 即 $H/B'\leqslant 1$ 的情况, 且考虑为土体不排水的情况, 并不适用于狭窄基坑的情况。

BJERRUM 等[11] 采用深基础破坏模式来分析基坑的抗隆起稳定性, 并给出了深基坑破坏模式下的抗隆起稳定性分析方法。该种抗隆起稳定性分析模式适用于狭窄基坑 $H/B'>1$ 的情况, 狭窄基坑开挖深度较浅, 且当坚硬土层埋置深度较浅时, 可能不会形成图 1 中所示破坏模式, 因此需要对地基承载力系数 N_c 进行修正, 该方法也不适用于狭窄基坑的情况。

1.2　有限元强度折减法

在狭窄基坑的应力–应变有限元法中, 一般以位移为未知量求解方程, 根据求得的位移再进一步计算应变和应力。有限元法需要利用岩土材料的本构关系以构造刚度矩阵, 从而进行应力计算。对于基坑边坡稳定性分析的有限元法, 一种方法是根据得到的应力场计算潜在滑动面上的安全系数; 另一种方法是将土的强度指标进行折减(强度折减法), 当有限元迭代计算不收敛或符合某一判据时认为边坡破坏, 对应的折减系数为最小稳定安全系数。

ZIENKIEWICZ 等[33] 于 1975 年将强度折减法应用于边坡稳定性分析的有限元分析中, 此后随着计算技术的发展, 强度折减法逐渐流行起来, 成为基坑边坡稳定性分析重要的手段之一。强度折减法的基本原理是将强度指标分别按式(2)进行折减, 采用折减后的强度指标进行弹塑性有限元计算。式(2)中抗隆起稳定性系数(F_s)从一个较小的值逐渐增大, 边坡处于临界破坏状态时对应的 F_s 值为边坡最小稳定安全系数。

$$c_r=\frac{c}{F_s},\ \varphi_r=\arctan\frac{\tan\varphi}{F_s}, \tag{2}$$

式中: c, φ 分别为黏聚力和内摩擦角, 即土的原始抗剪强度参数; c_r, φ_r 分别为折减后黏聚力和折减后内摩擦角, 即折减后土的抗剪强度参数。

当岩土体破坏状态时岩土体结构失稳, 此时有限元计算失效。因此, 可将有限元计算迭代不收敛作为边坡失稳判断标准; 也可将塑性区贯通或者某一计算点位移突变作为边坡失稳判断标准。

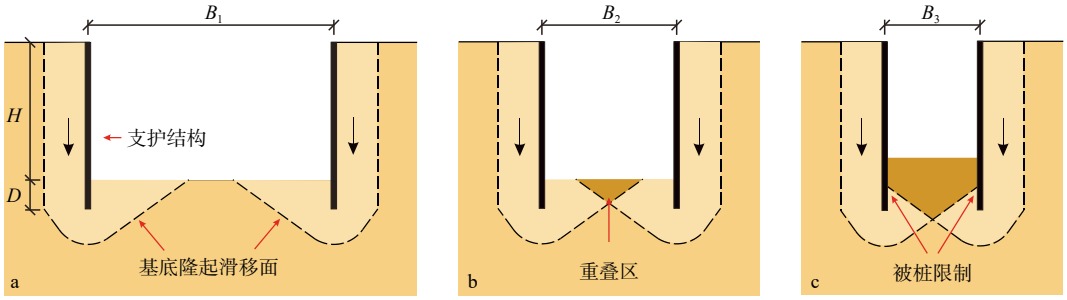
强度折减法常用的模型是理想弹塑性模型, 一般以莫尔–库仑(MC)强度准则作为屈服准则, 并作为塑性势函数。但是对于狭窄型基坑, 其适用性较差, 因此本研究采用 HSS 模型。强度折减法的优点是可以利用有限元直接求出稳定安全系数和相应的临界滑动面, 无须假定滑动面的形状和位置, 能够直观地显现边坡的破坏方式。但它的缺点是失稳判据包含人为因素, 主观性较强; 当潜在滑动面切割性质不同的介质时, 采用相同的折减系数是否合理值得进一步商榷。

为了研究狭窄基坑的抗隆起稳定性, 本研究将采用强度折减法[34] 进行基坑开挖过程的有限元计算。

2　狭窄基坑的抗隆起破坏模式及计算方法

2.1　狭窄基坑的抗隆起破坏模式

由于狭窄基坑特殊的开挖尺寸, 狭窄基坑的隆起破坏模式与常规基坑不同。如图 2 所示, 图中虚线为传统理论的基坑隆起破坏面。当基坑宽度较大时, 基坑两侧的隆起破坏面没有重叠区域, 此时按照传统理论计算基坑抗隆起稳定性是合理的, 如图 2a 所示; 随着基坑宽度减小, 隆起破坏面开始发生重叠, 由于重叠区的存在, 基坑的稳定性有所提高, 此时传统计算方法不再适用, 如图 2b 所示; 随着基坑宽度的进一步减小, 可能还会出现一侧的隆起破坏面被对侧支护结构约束的情况, 由于支护结构的约束, 基



虚线. 传统理论的基坑隆起破坏面; 黑色箭头. 土体运动位移方向; D. 支护体系嵌固深度; B_1, B_2, B_3. 不同的基坑宽度; 下同

图 2　基坑宽度对基坑隆起破坏模式的影响

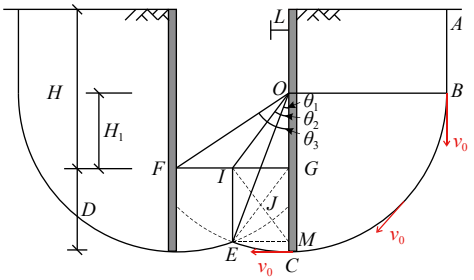
Fig. 2　Influence of excavation width on basal-heave failure mode of foundation pit

坑的稳定性会进一步提高, 如图 2c 所示。

因此, 对于狭窄基坑, 传统的抗隆起稳定性计算方法不再适用, 且传统的计算结果较为保守, 不能反映真实的情况。

2.2　改进的狭窄基坑抗隆起稳定性计算公式

为了真实反映狭窄基坑抗隆起稳定性, 简化狭窄基坑的受力示意如图 3 所示。



B, E, I, M, O. 土体端点代号; H_1. 假定滑动面圆心 O 到基坑开挖底面 FG 的高度; θ_1, θ_2, θ_3. 土体之间夹角, 分别为∠GOE; ∠GOI, ∠GOF; v_0. 假定土体的位移速度, 下同

图 3　基坑隆起破坏滑移面示意图

Fig. 3　Schematic diagram of slip surface of basal-heave failure in foundation pit

抗隆起稳定性系数 F_s 为抗滑力做功功率与滑动力做功功率之比。滑动力为使土体阻抗的力, 主要为土体的自重; 抗滑力为阻抗土体下滑的力, 由土体自重、滑裂面两侧土体之间的黏聚力等组成。考虑到基底隆起滑裂面相互交叉的情况, 甚至滑裂面被对侧支护限制的情况, 狭窄基坑截面示意图比宽基坑复杂, 滑裂面形态复杂。因此, 在推导狭窄基坑抗隆起稳定性计算公式中, 抗滑力做功功率应比滑动力做功功率更复杂。

在推导狭窄基坑抗隆起稳定性计算公式中, 滑动力为多边形 $ABCL$ 的重力, 滑动力做功功率(P_{Ma})可以表示为:

$$P_{Ma}=\gamma\cdot AB\cdot OB\cdot\frac{v_0}{2}+\frac{\gamma\cdot OB^2\cdot v_0}{2}, \tag{3}$$

式中: A, B, O, B 均为土体端点代号; AB, OB 均为土体端点之间距离; v_0 为假定土体的位移速度。

抗滑力由土体自重、滑裂面两侧土体之间的黏聚力等组成, 抗滑力做功功率 (P_{Mp}) 可以表示为:

$$P_{Mp}=P_{Gp}+P_c, \tag{4}$$

式中: P_{Gp} 为多边形 $GIEC$ 重力做功功率; P_c 为滑裂面 $ABCEI$ 的黏聚力做功功率。

$$\begin{aligned}P_{Gp}=&\gamma\cdot(IG\cdot IE)\cdot v_0\cdot\frac{OJ}{OE}\cdot\sin\theta_3+\frac{OC^2}{2}\cdot\gamma\cdot(1-\cos\theta_3)\cdot v_0\\&-\gamma\cdot\frac{OM\cdot EM}{2}\cdot v_0\cdot\frac{\sqrt{\left(\frac{EM}{3}\right)^2+\left(\frac{2OM}{3}\right)^2}}{OE}\cdot\sin\left(\arctan\frac{EM}{2OM}\right)\end{aligned}, \tag{5}$$

$$\begin{aligned}P_c=&v_0\cdot\gamma\cdot\tan^2\left(45^\circ-\frac{\varphi}{2}\right)\cdot\frac{(H-H_1)^2}{2}\\&+v_0\cdot c\cdot(H-H_1)+v_0\cdot OC\cdot\left[\frac{\pi}{2}\cdot c+q_i\cdot(1+K_a)\cdot\tan\varphi+\gamma\cdot OC\cdot\left(\frac{\pi\cdot K_a}{4}+\frac{1}{2}\right)\cdot\tan\varphi\right]\\&+\frac{1}{2}OC^2\cdot\gamma\cdot\tan\varphi\cdot\sin^2\theta_1-OC\cdot\frac{\gamma\cdot B'+2c}{2f}\cdot\tan\varphi\cdot\left(\sin\theta_1-\int_0^{\theta_1}e^{\frac{2K\cdot f\cdot OC\cdot\cos\theta}{B}}\cos\theta d\theta\right)+OC\cdot c\cdot\theta_1\\&+\frac{(\gamma\cdot B'+2c)\cdot v_0\cdot\sin\theta_1}{2K\cdot f}\left(\frac{B'}{2K\cdot f}\left(e^{\frac{2K\cdot f\cdot IE}{B'}}-1\right)-IE\right)\end{aligned}, \tag{6}$$

式中: I, G, E, J, C, M 均为土体端点代号; IG, IE, OJ, OE, OC, OM, EM 均为土体端点之间距离; f 为板土间摩擦角; K_a 为主动土压力系数; K 为土压力系数, 可取被动土压力系数; q_i 为荷载; θ_1, θ_2, θ_3. 土体之间夹角, 分别为 $\angle GOE$, $\angle GOI$, $\angle GOF$。

则抗隆起稳定性系数 F_s 可以表示为:

$$F_s = \frac{P_{Mp}}{P_{Ma}}。 \tag{7}$$

3 工程案例分析

3.1 工程概况

本基坑工程为雨水管道与污水管道改造工程, 位于湖北省武汉市, 如图 4a 所示。本工程按照城市主干路进行设计全长 5 000 m, 建设区域宽 50 ~ 75 m, 埋设管道直径为 800 ~ 1 500 mm, 埋设深度不超过 5 m。本基坑长度远大于基坑宽度, 且开挖深度大于开挖宽度, 为狭窄型基坑。

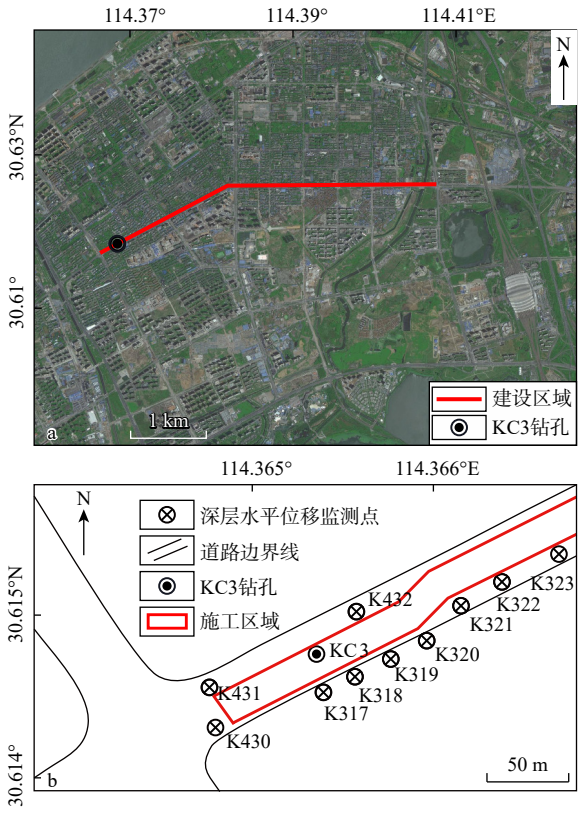
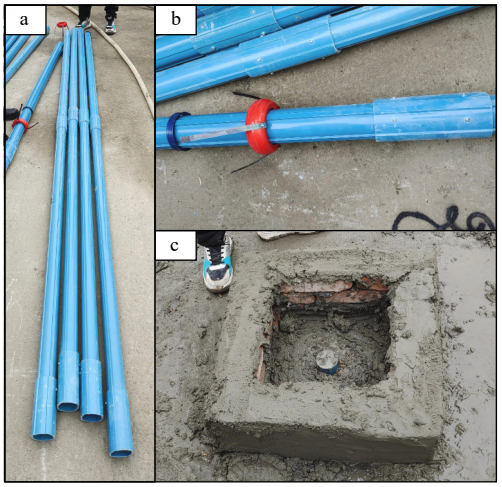


图 4 研究基坑位置 (a) 和监测点布置 (b)

Fig. 4 Location of studied foundation pit (a) and layout of monitoring points (b)

本基坑采用拉森钢板桩和钢管支撑的支护形式。由于基坑开挖时间较短且开挖深度较浅, 因此仅对基坑进行了深层水平位移监测, 监测布置如图 4b 所示。其中, KC3 钻孔为之后数值模拟提供原始土体参数, K317 ~ K323、K430 ~ K432 为附近的监测点。

图 5 展示的是现场监测照片。其中图 5a 为测斜管, 图 5b 为测斜管上的监测环, 图 5c 为监测点。通过深层水平位移监测, 可以分析基坑周边土体在基坑开挖过程中的位移变化行为。



a.测斜管; b. 测斜管监测环; c. 监测点

图 5 现场监测照片

Fig. 5 Field monitoring photographs

武汉市的软土地层对基坑开挖时的稳定性具有很大的影响[35-36]。根据《建筑基坑支护技术规程》(JGJ120−2012)[37] 规定的方法, 该案例中按照经典圆弧滑动或地基承载力模式计算, 稳定性系数为 1.3 ~ 1.8; 若采用数值模拟计算, 该基坑稳定性系数为 2.75 ~ 5.1, 稳定性系数增加了 112%。这种差异表明, 传统方法评估狭窄基坑时, 往往产生过于保守的稳定性系数, 导致支撑成本过高。相比之下, 使用数值模拟进行稳定性评估, 可以更有效地利用结构强度, 减少材料浪费, 并保持足够的安全裕度。

但是基坑开挖宽度、支护结构插入比、周边荷载和支护结构刚度等因素如何影响狭窄基坑的稳定性系数尚不明确。因此需要研究不同因素对狭窄基坑稳定性的影响, 并对影响因素进行敏感性分析。

3.2 单元体模型

由于该基坑属于狭窄型基坑, 因此可以采用单元体模型来进行坑底隆起的数值模拟。因为本研究主要针对市政工程的管道, 所以基坑的深度设为 5 m。对于软土地层, 将会采用“拉森钢板桩＋钢管内支撑”进行支护, 其中拉森钢板桩采用 FSP-Ⅳ型钢板桩, 单条宽 400 mm, 高 170 mm, 腹板厚 15.5 mm。钢管内支撑采用直径 325 mm, 壁厚 12 mm 的钢管, 安装在地表以下 1 m 的位置, 且两道钢管支撑间距为 3 m。

土体参数来源为该工程勘察报告中 KC3 钻孔的勘测数据。

3.3　HSS 模型简介

HSS 模型是 BENZ 等[38] 在 HS 模型的基础上，综合考虑了土体在小应变区域内的刚度随应变的非线性变化特性改进得来的。HSS 模型可以考虑软黏土的硬化特性，区分加载和卸载，且刚度依赖于应力历史和应力路径。同时，考虑了土体在小应变区域内的刚度随应变的非线性变化特性，对于基坑开挖工程具有优越性。

除了 HS 模型所需参数外，HSS 模型还需要确定的小应变特性参数为参考初始剪切模量（G_0^{ref}）和阈值剪应变（$\gamma_{0.7}$），两者均需由室内共振柱试验确定。在缺少试验数据的情况下，可以用经验公式[39] 进行估算：

$$G_0^{\mathrm{ref}} = 33\frac{(2.97-\mathrm{e})^2}{1+\mathrm{e}}, \tag{8}$$

$$\gamma_{0.7} = \frac{1}{9G_0}\left[2c'(1+\cos 2\varphi') - \sigma_1'(1+K_0)\sin 2\varphi'\right], \tag{9}$$

式中：G_0 为初始剪切模量；c'为有效黏聚力；φ'为有效内摩擦角；σ_1' 为有效最大主应力；K_0 为静止土压力系数。

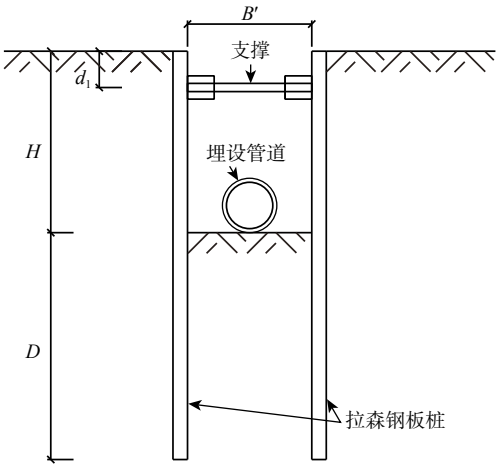
3.4　数值模拟建模过程

GOH 等[40] 成功应用 PLAXIS 3D 软件进行数值模拟研究，验证了 PLAXIS 3D 软件模拟基坑的受力变形情况及稳定性分析的有效性。因此，本研究采用 PLAXIS 3D 软件来模拟狭窄基坑抗隆起稳定性。狭窄型基坑通常长宽比在 10 以上，因此可以采用单元体模型来进行坑底隆起的数值模拟。

数值模拟时，单元体模拟长度 3 m，模拟宽度为 52 ~ 55 m，模拟深度为 25 m，减小了边界效应对模拟结果的影响。土体模型采用小应变硬化土模型。拉森钢板桩采用板单元进行模拟，钢管支撑采用梁单元进行模拟，均采用线弹性模型。在单元体两侧距地面深 1 m 处设置钢管支撑，狭窄基坑剖面图如图 6 所示。

网格划分采用非均匀划分的方式，距离一定范围以内加密网格，加密范围根据基坑开挖深度确定。土体采用 10 节点四面体单元，拉森钢板桩采用板单元的 6 节点板单元，钢管支撑采用梁的 3 节点线单元。通过界面单元考虑土体和支护结构之间的接触，结构间接触均设置为刚接。除模型顶面代表地面外，其余侧面均采用水平和垂直方向约束。

因为基坑较浅，所以不考虑地下水的影响，将水头固定在地下 20 m 处。



d_1. 支撑埋设深度

图 6　狭窄基坑剖面图

Fig. 6　Cross-sectional profile of narrow foundation pit

分阶段施工时，首先激活拉森钢板桩，然后开挖基坑，开挖至支撑设计埋深时激活钢管支撑，接着开挖至设计坑底高度，最后进行安全性计算。为保证计算结果准确性，设置安全性计算步骤为 800 步。

采用 PLAXIS 3D 软件来模拟狭窄基坑抗隆起稳定性，具体步骤如下：①建立几何模型并定义土体材料参数，将水头定义在地下 20 m 处，详见表 1；②建立结构模型并定义结构材料参数，详见表 2；③将基坑底部土体和支护结构周围土体局部加密，划分网格；④设置塑性开挖计算步骤和安全性计算步骤，开始计算。

表 1　土体物理力学参数

Table 1　Physical and mechanical parameters of soil

土层	杂填土	素填土	互层土	粉砂	粉细砂
z/m	1.5	2.8	11.7	20	51.8
γ/(kN·m^{-3})	18.5	18.2	18.2	18.6	18.8
γ_{sat}/(kN·m^{-3})	19	18.7	18.7	19.1	19.3
E_{50}^{ref}/MPa	6.346	5.389	7.5	18.0	28.0
$E_{\mathrm{oed}}^{\mathrm{ref}}$/MPa	6.346	5.389	7.5	18.0	28.0
$E_{\mathrm{ur}}^{\mathrm{ref}}$/MPa	19.04	16.17	22.5	54.0	84.0
G_0^{ref}/MPa	7.933	6.737	62.4	70.94	70.94
$\gamma_{0.7}$	7.51×10^{-4}	1.07×10^{-3}	1.80×10^{-4}	4.20×10^{-4}	1.00×10^{-3}
c/kPa	10	12	5	0	0
φ/(°)	18	10	15	33	31
ψ/(°)	0	0	0	3	1

注：z. 土层底面埋深；γ. 天然重度；γ_{sat}. 饱和重度；E_{50}^{ref}. 参考割线刚度；$E_{\mathrm{oed}}^{\mathrm{ref}}$. 参考压缩模量；$E_{\mathrm{ur}}^{\mathrm{ref}}$. 参考卸载-再加载模量；$G_0^{\mathrm{ref}}$. 参考初始剪切模量；$\gamma_{0.7}$. 阈值剪应变；$c$. 黏聚力；$\varphi$. 内摩擦角；$\psi$. 剪胀角

表 2　支护结构物理力学参数

Table 2　Physical and mechanical parameters of support structure

支护结构	型号	等效厚度/m	直径/m	壁厚/m	弹性模量/GPa
钢管	–	–	0.325	0.012	30
拉森钢板桩	400×160	0.18	–	–	200
	400×170	0.19	–	–	200
	500×200	0.25	–	–	200

3.5　数值模拟结果与验证

以基坑宽度为 3 m, 开挖深度为 5 m, 插入比为 125%, 板等效厚度为 0.19 m, 荷载为 0 kPa 的模型为例, 根据不同的计算方法得到基坑稳定性系数如表 3 所示。

表 3　基于不同计算方法的稳定性系数计算结果

Table 3　Stability coefficient calculation results by different methods

计算方法	规范法		本研究改进公式法	数值模拟法
	整体稳定性	坑底抗隆起稳定性		
稳定性系数	1.596	1.600	1.772	4.926

由此可以看出, 规范法计算得到的稳定性系数和坑底抗隆起稳定性系数均低于改进的狭窄基坑抗隆起稳定性系数, 远低于数值模拟计算结果。这个结果与 2.1 节所提出的狭窄基坑基底隆起破坏模式一致, 即由于重叠区的存在, 基坑的稳定性有所提高, 规范法开始不再适用。

因此需要将基坑的监测数据与模型的受力变形进行比较分析。由于单根测斜管能布置的监测环位置较少, 因此选取了 KC3 钻孔附近的几个监测点的数据对改进的方法进行验证。将数值模拟结果与已有监测数据比较, 验证数值模拟方法的可行性与准确性, 并通过数值模拟进行分析。其中, 插入比定义为支护结构插入基坑底部长度与基坑开挖深度之比。

如图 7a 所示, 数值模拟结果与监测结果表现出一致的规律性: 随着深度的增加, 位移值逐渐增大并在地表以下约 4.5 m 达到最大值, 之后随着深度增加位移值逐渐变小。其中, 监测结果的最大位移值为 5.3 mm, 数值模拟结果中钢板桩边缘最大位移值为 6.06 mm, 中部最大位移值为 6.13 mm。由此可见数值模拟结果与监测结果接近, 误差在 16% 以内。产生误差的原因可能是在本工程案例中, 施工现场是一条经过地基处理的道路, 地表附近的土壤经过处理后具有更好的完整性、更高的固结度和强度, 因此在相同条件下位移值较小。数值模拟结果表明, 在不同深度下, 钢板桩在边缘和中部的位移量接近, 中部位移值仅比边缘位移值至多大 1.16%, 说明在支护结构刚度大, 支撑间距小的情况下, 钢板桩的变形差异小。综上所述, 数值模拟结果与监测结果的整体变形规律基本一致, 两者具备较好的一致性, 本次数值模拟结果能较好地反应本案例狭窄基坑的受力变形规律。

如图 7b 所示, 钢板桩边缘最大弯矩值为 120.61 kN·m, 中部最大弯矩值为 118.70 kN·m, 最大弯矩值都集中在地表以下约 4 m, 中部弯矩值仅比边缘弯矩值至多小 1.58%。说明支护结构刚度大, 支撑间距小的情况下, 钢板桩的受力差异小。在地面至地下 1 m 以内, 钢板桩在边缘和中部的受力有较明显差异, 地下 1 m 至钢板底部范围内较为接近, 说明钢板桩在被动支撑时在支撑位置附近受力较大, 且对最上道支撑以上的钢板桩受力有所影响。

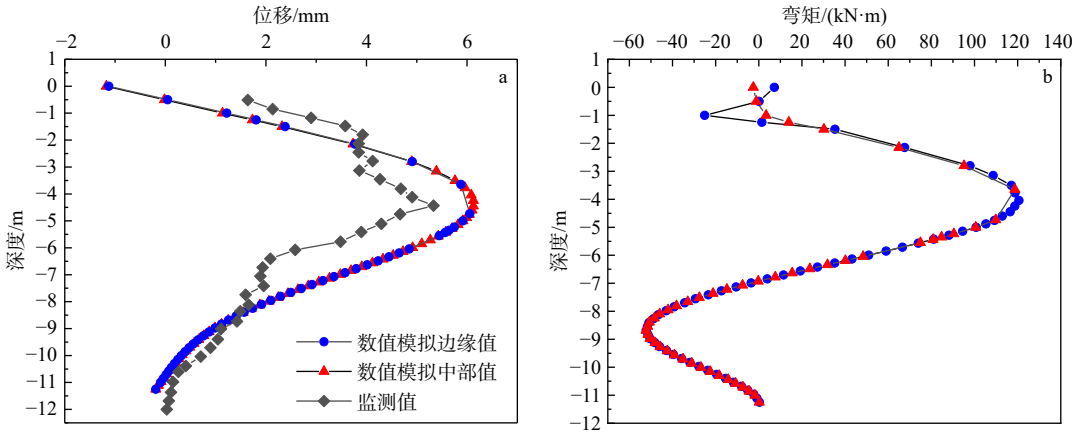


图 7　钢板桩的受力变形

Fig. 7　Stress and deformation of steel sheet piles

选取基坑位移量和受力较大的单元体中部作截面分析。如图 8a 所示，基坑横向位移最大值为 6.295 mm，位于基坑底部。如图 8b 所示，基坑坑底发生隆起变形，位移最大值为 22.94 mm，位于基坑底部中点；基坑两侧发生地表沉降，沉降最大值为 3.154 mm，位于基坑侧壁 1 ~ 5 m 的范围内。由此可以看出基坑土体位移变形主要由两部分组成：一是地表至地表以下 1.75 倍开挖深度的基坑外侧土体向坑内滑动变形，二是基坑底部土体因为坑壁外侧土体的挤压作用而向上隆起变形。由于钢板桩嵌入土体深度很深，导致两部分变形土体无法在桩底部联结贯通，且桩底土体承载能力较好，不受基坑开挖的影响而产生隆起变形，使得土体变形区域仅集中在基坑底面与坑底上下 3 m 内的基坑侧壁。

PLAXIS 3D 软件中用“偏应变增量”和“增量位移”选项查看土体发生塑性破坏时的滑动面和塑性发展趋势。图 9a, b 分别为折减前后的偏应变增量云图。由图 9a 可知，基坑土体的偏应变增量最大值为 8.397×10^{-4}，位于支护结构与基坑底部交界处，并且在基坑桩底的深部土体中未发现塑性变形区域，没有产生塑性变形的趋势。图 9b 反映了基坑土体强度参数折减后土体中的潜在塑性滑动面和塑性变形趋势，可以以此判断基坑失稳形态和计算稳定性系数。此时基坑土体的偏应变增量最大值为 2.191×10^{-4}，位于支护结构与基坑底部交界处。可见极限状态下塑性区沿支护结构向深处发展并与结构底部土体出现的塑性区进行了贯通，滑动面交叉并初步向桩底外侧扩展。

应指出，PLAXIS 3D 软件中应变增量云图的数值没有实际意义，但相对大小具有参考意义。图 10a, b 分别为折减前后增量位移云图，图 10c, d 分别为折减前后增量位移矢量图。如图 10a, c 所示，可见桩壁外侧坑底以上土体虽然存在向坑底滑动变形的趋势，但增量位移较小，尚未形成明显的滑动面；坑底

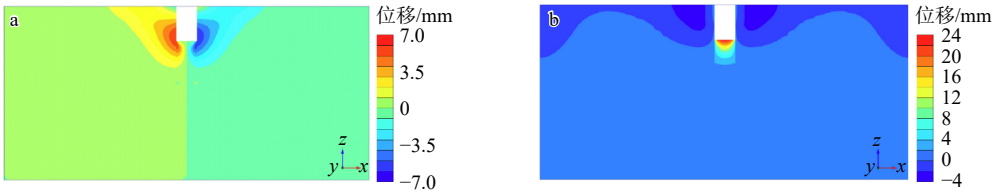


图 8　基坑变形位移云图（a. 基坑横向位移；b. 基坑纵向位移）

Fig. 8　Cloud diagrams of excavation-induced displacements

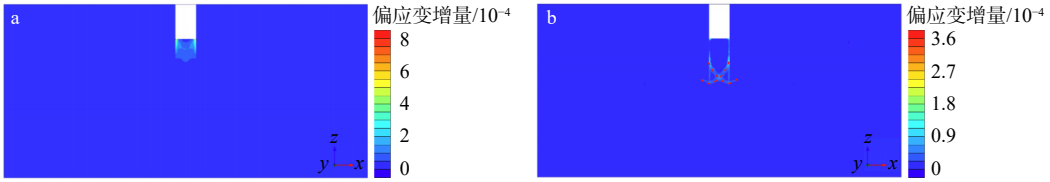
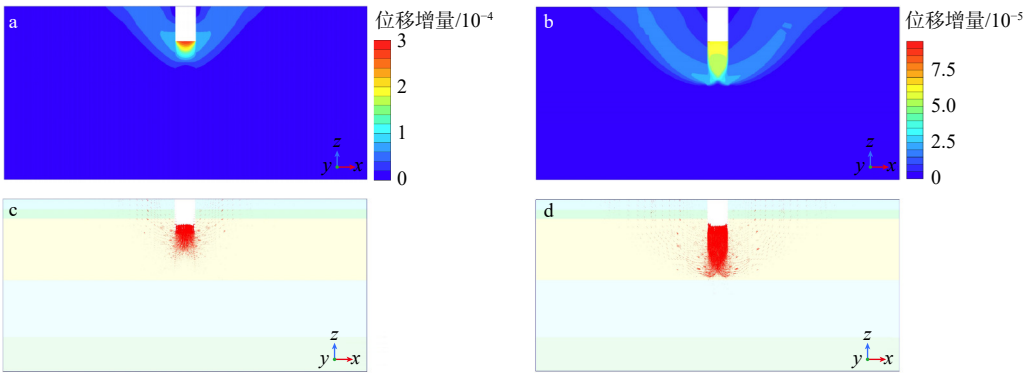


图 9　基坑土体强度参数折减前后的偏应变增量云图（a. 折减前；b. 折减后）

Fig. 9　Cloud diagrams of deviatoric strain increment before and after reduction of soil strength parameters in foundation pit



a, b. 分别为折减前、后增量位移云图；c, d. 分别为折减前、后增量位移矢量图

图 10　基坑土体强度参数折减前后增量位移图

Fig. 10　Diagrams of incremental displacement before and after reduction of soil strength parameters in foundation pit

以下土体向上隆起变形趋势明显，结合图 9a 未发现塑性区域，没有发生塑性变形趋势。如图 10b，d 所示，基坑两侧土体出现了明显的向坑底滑动变形的趋势，结合图 9b 发现塑性贯通区，推测若折减系数继续增大可能发生隆起破坏。

如图 11 所示，图中红色虚线区域为相对剪应力增大区域，主要呈蝴蝶形分布于地表以下 1 ~ 10 m 桩壁外侧土体与桩底土体中。该区域土体受剪切力作用较大，将产生剪切滑动变形。蓝色虚线框区域为相对剪应力减小区域，主要呈矩形和椭球形分布于地表以下 8 ~ 12 m 坑内土体中。该区域土体受剪力较小，受挤压力较大，以挤压变形为主。

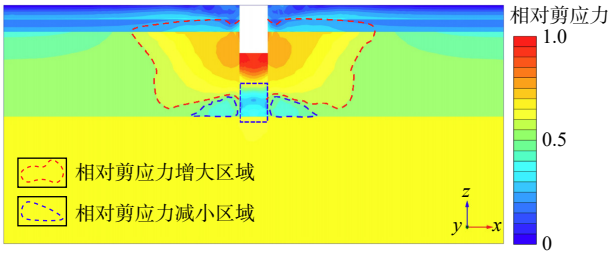


图 11　相对剪应力云图

Fig. 11　Cloud diagram of relative shear stress

4　讨　论

为了进一步研究狭窄基坑抗隆起稳定性的影响因素对抗隆起稳定性的影响，通过控制变量法进行研究。

自变量方面，基坑抗隆起稳定性的影响因素很多，可以分为两大类：第一类是反映土体自身的影响因素，例如土体强度、变形模量等；第二类是反映基坑的影响因素，例如开挖宽度、深度，支护结构刚度等。根据前文改进的狭窄基坑抗隆起稳定性计算公式，选取了反映基坑的影响因素作为主要的自变量，包括基坑宽度、支护结构插入比、周边荷载和支护结构刚度。

因变量方面，选取基坑抗隆起稳定性作为因变量。基坑抗隆起稳定性不同于监测数据中的受力值或位移值可以通过监测装置进行量化。而监测数据与基坑的稳定性没有直接的相关性，因此用监测数据的位移值去判定基坑的稳定性是不可靠的。同时考虑到自变量是不同的支护形式组合，在实际工程案例中，无法保证相似的地层中能够采取多种组合的支护形式，且有违经济性原则。因此采用数值模拟结果中的基坑稳定性作为狭窄基坑抗隆起稳定性。

4.1　基坑宽度对狭窄基坑抗隆起稳定性的影响

通过改变模型基坑宽度 B'的大小分析基坑宽度对基坑抗隆起稳定性的影响。由于本工程为雨污管道改建，基坑开挖宽度不会很宽，因此基坑宽度变化范围不会很大，基坑宽度 B'分别为 2，3，4，5 m。根据模型的计算结果得到抗隆起稳定性系数随基坑宽度的变化曲线，如图 12a 所示，可以看出抗隆起稳定性系数随着基坑宽度的增大而减小，且减小幅度越来越缓。由此可以看出，基坑宽度较小时对基坑抗隆起稳定性系数影响较大，随着基坑宽度增加，稳定性系数逐渐减小，基坑宽度对稳定性系数的影响也越来越小。

4.2　支护结构插入比对狭窄基坑抗隆起稳定性的影响

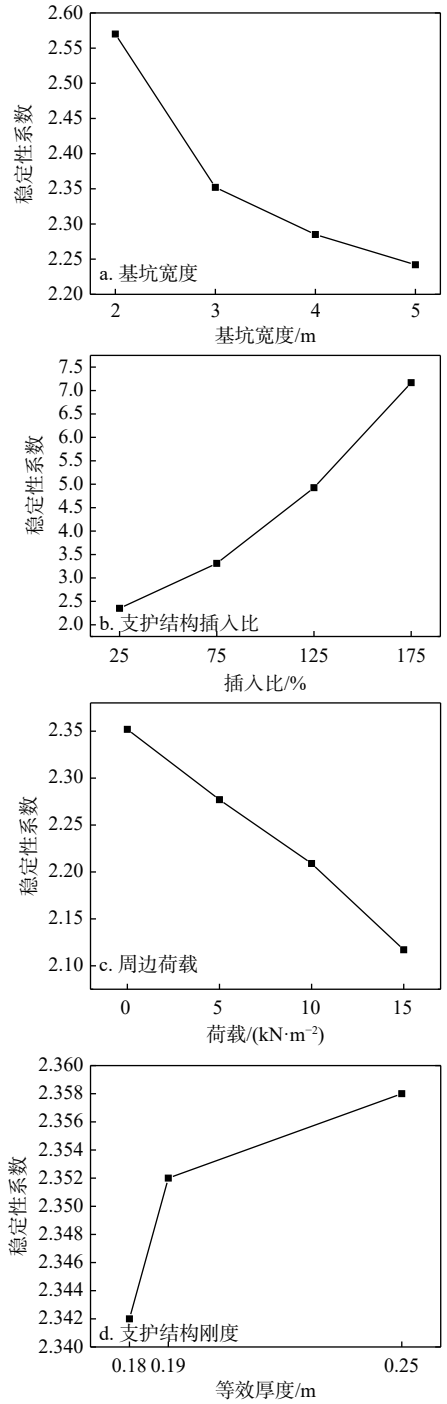
通过更改模型插入土体深度的大小分析支护结构插入比对基坑抗隆起稳定性的影响。根据已有的工程经验，插入比范围在 20% ~ 150% 不等。为了研究插入比对抗隆起稳定性系数的影响，插入比分别为 25%，75%，125%，175%。根据模型计算结果得到抗隆起稳定性系数随插入比的变化曲线，如图 12b 所示，可以看出抗隆起稳定性系数随着插入比的增大而增大，且增大幅度越来越陡。由此可以看出，插入比对基坑抗隆起稳定性系数影响较大，随着插入比增加，稳定性系数逐渐增大，提高插入比能显著提高基坑的稳定性。

4.3　周边荷载对狭窄基坑抗隆起稳定性的影响

通过更改模型基坑两侧荷载大小分析基坑周边荷载对基坑抗隆起稳定性的影响。根据已有的行业规范，施工场地表面堆载不应超过 15 kPa。为了研究荷载对抗隆起稳定性系数的影响，荷载分别为 0，5，10，15 kPa，分布范围为距离基坑临空面 5 m 内。根据模型计算结果得到抗隆起稳定性系数随荷载的变化曲线，如图 12c 所示，可以看出抗隆起稳定性系数随着荷载的增大而减小，且基本呈线性关系。由此可以看出，荷载对基坑抗隆起稳定性系数具有一定的影响，随着荷载增加，稳定性系数逐渐减小，且由于荷载导致稳定性系数的降低是比较容易预测的。

4.4　支护结构刚度对基坑抗隆起稳定性的影响

通过更改模型板单元的等效厚度来实现改变钢板桩的型号，从而改变支护结构的刚度分析支护结构刚度对基坑抗隆起稳定性的影响。根据现行的行业规范，选择了常用的 3 种型号的拉森钢板桩。经过“等效抗弯截面模量法”[41] 计算，等效厚度分别为 0.18，0.19，0.25 m。根据模型计算结果得到抗隆起稳定性系数随等效厚度的变化曲线，如图 12d 所示，可



通过调整模拟钢板桩的板单元的等效厚度，来反映不同型号钢板桩的规格变化，进而改变支护结构刚度，即等效厚度等效替代支护结构刚度

图 12　基坑宽度 (a)、支护结构插入比 (b)、周边荷载 (c) 和支护结构刚度 (d) 对狭窄基坑抗隆起稳定性的影响

Fig. 12　Effect of excavation width(a), embedment ratio of the support structure(b), surcharge loads(c) and stiffness of the support structure(d) on basal-heave stability of narrow foundation pit

以看出抗隆起稳定性系数随着等效厚度的增大而增大，且增大幅度越来越缓。由此可以看出，支护结构刚度较小时对基坑抗隆起稳定性系数影响较大，随着支护结构刚度增加，稳定性系数逐渐增大，支护结构刚度对稳定性系数的影响也越来越小。

4.5　敏感性分析

早期的分析方法[42] 经常考察不同输入参数对结构整体稳定性的影响，以开发创新的设计方案。因此，为了得出基坑宽度、支护结构插入比、周边荷载和支护结构刚度与基坑稳定性之间暗含的统计相关性，对以上模型进行了敏感性分析，用皮尔逊相关系数[43] 计算如下：

$$P_{X,Y}=\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})(y_i-\bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2\sum_{i=1}^{n}(y_i-\bar{y})^2}},\tag{10}$$

式中：$P_{X,Y}$ 为皮尔逊相关系数；n 为样本容量，即配对观测值 (x_i, y_i) 的总对数；i 为样本索引，表示第 i 对观测值，范围为 1 ~ n；x_i, y_i 分别为第 i 对观测值变量 X 和变量 Y 的具体取值；$\bar{x}$，$\bar{y}$ 分别为变量 X, Y 的样本均值。

$P_{X,Y}\in[-1,1]$；当 $P_{X,Y}>0$ 时为正相关，当 $P_{X,Y}<0$ 时为负相关；$|P_{X,Y}|=0$ 时表明相关性弱，$|P_{X,Y}|=1$ 时表明相关性强。相关性系数图如图 13 所示。

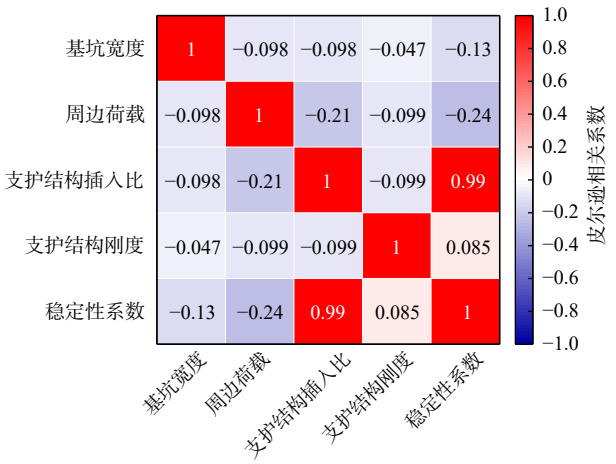


图 13　影响因素的皮尔逊相关系数分析

Fig. 13　Analysis of Pearson correlation coefficients of influencing factors

由图 13 可知，基坑宽度与稳定性系数的皮尔逊相关系数为−0.13，周边荷载与稳定性系数的皮尔逊相关系数为−0.24，支护结构插入比与稳定性系数的皮尔逊相关系数为 0.99，支护结构刚度与稳定性系数的皮尔逊相关系数为 0.085。影响因素从大到小排列如表 4 所示。

由此可知支护结构插入比的相关性最强，其次是周边荷载、基坑宽度，相关性最小的是支护结构刚度。4 个参数中支护结构插入比、支护结构刚度与基

表 4　影响因素的重要程度及其排序

Table 4　Importance and ranking of influencing factors

影响因素	皮尔逊相关系数	
	重要程度	排列顺序
基坑宽度	−0.13	3
周边荷载	−0.24	2
支护结构插入比	0.99	1
支护结构刚度	0.085	4

坑稳定性呈正相关，周边荷载、基坑宽度与基坑稳定性为负相关。这与梁艳等[3]、SUN 等[44]研究得出的关于抗隆起稳定性系数与影响因素的关系基本一致。

从中可以看出，支护结构插入比的重要程度明显高于其他影响因素。原因是本研究设定的插入比变化范围为常规基坑所常用的插入比范围，并不一定适用于狭窄基坑。在相同插入比的条件下，由于滑裂面重叠区的存在，狭窄基坑的稳定性就高于常规宽基坑，且随着插入比增加，重叠区变大，甚至出现滑裂面受到对侧支护结构约束的情况，稳定性进一步提高。因此，在强度折减法的计算下，狭窄基坑的稳定性系数会出现在给出的范围内快速提高的现象，这与数值模拟结果是相符的。在插入比明显的影响下，其他影响因素显得不那么重要，因此通过调整插入比的范围，可以进一步精确分析其他影响因素的重要程度。

因此，若需提高某个基坑的稳定性，提高支护结构插入比可以得到明显的效果，其次减小基坑周边堆积荷载、更换刚度更好的支护体系也可以进一步提高基坑稳定性，但由于基坑一般不会随意更改规模，因此减小基坑宽度一般不作为提高基坑稳定性的建议。相应地，若狭窄基坑稳定性系数偏高，可合理调整支护结构的插入比（即减小支护结构嵌入土体的深度）来优化设计，该方法在保证安全储备的同时，充分发挥结构作用，降低基坑支护成本。

以上敏感性分析是在理论分析和数值模拟结果上进行的，主要原因是考虑到狭窄基坑工程具有施工时间短、施工速度快、开挖深度浅、开挖后及时回填等特点，且本工程案例缺少完备的监测体系，用深层水平位移监测数据来量化分析狭窄基坑的稳定性不够全面。若再有此类狭窄基坑工程，建议完善监测方案，从侧壁水平位移监测、桩顶竖向位移监测、桩后地表位移监测、深层水平位移监测、支撑内力监测、坑底隆起监测、钢板内力监测等进行全面监测，然后用现场监测的数据结果结合理论分析和数值模拟进行敏感性分析，得到的结论会更加具有工程指导意义。

5　结　论

（1）模拟分析表明，狭窄基坑稳定性系数远高于传统计算方法或现有标准的建议值。在设计这类基坑的支撑系统时，一个常见问题是稳定性系数被低估，导致不必要的大量支护费用。因此，提出了一种改进的狭窄基坑抗隆起稳定性计算公式，从能量法的角度进行基坑抗隆起稳定性的计算，并利用数值模拟评估狭窄基坑的稳定性，提供了一种既实用又经济的解决方案。

（2）通过数值模拟结果与监测结果的对比，两者整体变形规律基本一致，具备较好的一致性。数值模拟结果能较好地反应案例中狭窄基坑的受力变形规律：基坑开挖会引起支护结构的变形和挤压受力，对于狭窄基坑，支护结构刚度大，支撑间距小的情况下，支撑处和位于两道支撑中点处的变形差别小，受力在最上道支撑以上部分差别较为明显，在支撑以下部分没有明显差别，符合力学规律。

（3）狭窄基坑土体变形可以由两部分组成：地表至地表以下一定深度的基坑外侧土体和基坑底部土体，两者分别向坑内滑动变形和向上隆起变形。共同作用下造成了基坑坑底隆起、基坑两侧地表沉降的现象，符合工程实际。

（4）狭窄基坑底部塑性区会现在坑底土体和支护结构处形成，随着塑性区发展，逐渐形成交叉贯通的塑性区，当坑底塑性区与两侧土体塑性区贯通时，完整滑动面形成，基坑发生隆起破坏。

（5）分析了基坑宽度、支护结构插入比、周边荷载和支护结构刚度对狭窄基坑稳定性的影响，狭窄基坑的抗隆起稳定性系数与支护结构插入比和支护结构刚度呈正相关，与基坑宽度和周边荷载呈负相关；相关性由强到弱依次为：支护结构插入比、周边荷载、基坑宽度和支护结构刚度。针对狭窄基坑存在稳定性过于富余的情况，可以通过合理调整支护结构的插入比来有效地控制基坑稳定性，以充分发挥结构作用，降低基坑支护成本。

所有作者声明不存在利益冲突。

The authors declare that no competing interests exist.

参考文献：

[1]　姜晨光，贺勇，朱烨昕. 基坑形状与基坑稳定性关系的实测与分

析 [J]. 岩土工程技术, 2007, 21(5): 246-249.
JIANG C G, HE Y, ZHU Y X. Relationship between the plane shape of foundation pit and its stability[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2007, 21(5): 246-249. (in Chinese with English abstract)

[2] 洪春欣. 基坑形状与基坑稳定性关系实测研究 [J]. 居舍, 2022(8): 175-177.
HONG C X. Empirical research on the relationship between foundation pit shape and stability[J]. Dwelling House, 2022(8): 175-177. (in Chinese with English abstract)

[3] 梁艳, 刘新根, 邓朝辉, 等. 开挖尺寸效应对基坑稳定性的影响分析 [J]. 铁道建筑技术, 2022(2): 57-61.
LIANG Y, LIU X G, DENG Z H, et al. Analysis on the influence of excavation size effects on foundation pit stability[J]. Railway Construction Technology, 2022(2): 57-61. (in Chinese with English abstract)

[4] 王洪新. 考虑二维和三维尺寸效应的基坑抗隆起稳定安全系数 [J]. 岩土工程学报, 2013, 35(11): 2144-2152.
WANG H X. Safety factor of heave-resistant stability considering two- and three-dimensional size effects of foundation pits[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(11): 2144-2152. (in Chinese with English abstract)

[5] HUANG P, DANG K X, SHI H L, et al. Influence and mechanism of the excavation width on excavation deformations in Shanghai soft clay[J]. Buildings, 2024, 14(5): 1450.

[6] 庄海洋, 张艳书, 薛栩超, 等. 深软场地地铁狭长深基坑变形特征实测与已有统计结果的对比分析 [J]. 岩土力学, 2016, 37(增刊2): 561-570.
ZHUANG H Y, ZHANG Y S, XUE X C, et al. Deformation characteristics of narrow-long deep foundation pit for a subway station in soft ground and compared with existing statistical results[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(S2): 561-570. (in Chinese with English abstract)

[7] 胡敏云, 苟长飞, 严昱翔, 等. 基坑宽度效应对基坑稳定性影响的有限元分析 [J]. 地基处理, 2020, 2(1): 1-8.
HU M Y, GOU C F, YAN Y X, et al. Finite element analysis of the effect of foundation pit width on its stability[J]. Chinese Journal of Ground Improvement, 2020, 2(1): 1-8. (in Chinese with English abstract)

[8] FAHEEM H, CAI F, UGAI K. Three-dimensional base stability of rectangular excavations in soft soils using FEM[J]. Computers and Geotechnics, 2004, 31(2): 67-74.

[9] 潘静杰, 朱春柏, 刘伟, 等. 外基坑宽度对坑中坑条件下被动土压力的影响 [J]. 地质科技通报, 2023, 42(1): 62-69.
PAN J J, ZHU C B, LIU W, et al. Influence of external pit width on passive earth pressure under pit-in-pit condition[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2023, 42(1): 62-69. (in Chinese with English abstract)

[10] KARL T. Theoretical soil mechanics[M]. Hoboken: Wiley, 1943.

[11] BJERRUM L, EIDE O. Stability of strutted excavations in clay[J]. Géotechnique, 1956, 6(1): 32-47.

[12] PRANDTL L. Theory of lifting surfaces. Part 2[J]. Technical Report Archive & Image Library, 1920: 1-10.

[13] BOSE S K, SOM N N. Parametric study of a braced cut by finite element method[J]. Computers and Geotechnics, 1998, 22(2): 91-107.

[14] ZHENG G, ZHEN J, CHENG X S, et al. Basal heave stability analysis of excavations considering the soil strength increasing with depth[J]. Computers and Geotechnics, 2024, 166: 106026.

[15] 施广焕. 关于基坑整体稳定性分析的探讨 [C]//全国建筑工程勘察科技情报网, 内蒙古自治区勘察设计协会岩土分会, 全国建筑工程勘察科技情报网华北情报站, 等. 2014全国工程勘察学术大会论文集. [出版地不详]: [出版者不详], 2014: 322-325.
SHI G H. Discussion on the overall stability analysis of the excavations[C]//National Engineering Survey Technology Information Network, Inner Mongolia Autonomous Region Survey and Design Association Geotechnical Engineering Branch, National Engineering Survey Technology Information North China Information Station, et al. Proceedings of the 2014 National Engineering Survey Academic Conference. [S. l.]: [s. n.], 2014: 322-325. (in Chinese)

[16] 施琦. 考虑空间效应的狭长型沟槽基坑稳定性计算方法研究 [J]. 城市道桥与防洪, 2021(8): 283-285.
SHI Q. Research on stability calculation method of long-narrow groove foundation pit considering spatial effect[J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2021(8): 283-285. (in Chinese with English abstract)

[17] 卢瀚. 淤泥区狭长基坑抗隆起稳定性分析 [J]. 城市道桥与防洪, 2022(12): 248-251.
LU H. Study on anti-heave stability of narrow-long foundation pit in silt area[J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2022(12): 248-251. (in Chinese with English abstract)

[18] 应宏伟, 王小刚, 张金红. 考虑基坑宽度影响的基坑抗隆起稳定分析 [J]. 工程力学, 2018, 35(5): 118-124.
YING H W, WANG X G, ZHANG J H. Analysis on heave-resistant stability considering the effect of excavation width[J]. Engineering Mechanics, 2018, 35(5): 118-124. (in Chinese with English abstract)

[19] 阳吉宝, 黄星. 窄基坑隆起破坏模式及抗隆起稳定性验算研究 [J]. 建筑结构, 2021, 51(增刊2): 1495-1503.
YANG J B, HUANG X. Research on uplift failure mode and anti-uplift stability checking calculation of narrow excavation[J]. Building Structure, 2021, 51(S2): 1495-1503. (in Chinese with English abstract)

[20] 俞建霖, 龙岩, 夏霄, 等. 狭长型基坑工程坑底抗隆起稳定性分析 [J]. 浙江大学学报(工学版), 2017, 51(11): 2165-2174.
YU J L, LONG Y, XIA X, et al. Basal stability for narrow foundation pit[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2017, 51(11): 2165-2174. (in Chinese with English abstract)

[21] 宋二祥, 付浩, 李贤杰, 等. 饱和黏性地层中基坑坑底抗隆起稳定验算方法 [J]. 土木工程学报, 2021, 54(10): 97-105.
SONG E X, FU H, LI X J, et al. Checking method for basal heave stability of deep excavation in saturated cohesive soil[J]. China Civil Engineering Journal, 2021, 54(10): 97-105. (in Chinese with English abstract)

[22] JIN Z X, ZHANG C P, LI W, et al. Stability analysis for excava-

tion in frictional soils based on upper bound method[J]. Computers and Geotechnics, 2024, 165: 105916.

[23] HE C H, LU Y, YANG Y L. Effect of size on the stability of narrow foundation pits[J]. Advances in Civil Engineering, 2022, 2022(1): 7391622.

[24] KE W H, WANG X, YAN C Z, et al. Numerical study of rock damage mechanism induced by blasting excavation using finite discrete element method[J]. Applied Sciences, 2022, 12(15): 7517.

[25] KUNG G T, OU C Y, JUANG C H. Modeling small-strain behavior of Taipei clays for finite element analysis of braced excavations[J]. Computers and Geotechnics, 2009, 36(1/2): 304-319.

[26] CAO M M, ZHANG Z, DU Z B, et al. Experimental study of hardening small strain model parameters for strata typical of Zhengzhou and their application in foundation pit engineering[J]. Buildings, 2023, 13(11): 2784.

[27] 居尚威, 李雄威, 刘正明, 等. 基于 HSS 模型预测基坑开挖影响下的管线安全性分析 [J]. 常州工学院学报, 2017, 30(1): 7-12.
JU S W, LI X W, LIU Z M, et al. Safety analysis for excavation-induced impact on surrounding pipelines based on an HSS model[J]. Journal of Changzhou Institute of Technology, 2017, 30(1): 7-12. (in Chinese with English abstract)

[28] 何亮, 刘涛, 郭严伟. HSS 模型在常州轨道交通基坑工程中的应用研究 [J]. 江苏建筑, 2022(6): 117-121.
HE L, LIU T, GUO Y W. Application research of HSS model in Changzhou rail transit foundation pit engineering[J]. Jiangsu Construction, 2022(6): 117-121. (in Chinese with English abstract)

[29] 吴小斌, 罗元喜, 何亮, 等. 土体小应变硬化模型的深基坑变形特性数值分析 [J]. 科技创新导报, 2019, 16(3): 53-55.
WU X B, LUO Y X, HE L, et al. Numerical analysis of deformation characteristics of deep foundation pit with small strain hardening model of soil[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2019, 16(3): 53-55. (in Chinese with English abstract)

[30] 林德周. 小应变土体硬化模型参数试验研究及工程应用: 以杭州某基坑工程为例 [D]. 杭州: 浙江大学, 2022.
LIN D Z. Experimental study on parameters of small strain soil hardening model and its engineering application: A case study of a foundation pit project in Hangzhou[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2022. (in Chinese with English abstract)

[31] 温科伟, 刘树亚, 杨红坡. 基于小应变硬化土模型的基坑开挖对下穿地铁隧道影响的三维数值模拟分析 [J]. 工程力学, 2018, 35(增刊 1): 80-87.
WEN K W, LIU S Y, YANG H P. Three-dimensional numerical simulation analysis of the influence of pit excavation based on hardening soil-small strain model for metro tunnel[J]. Engineering Mechanics, 2018, 35(S1): 80-87. (in Chinese with English abstract)

[32] MU L L, HUANG M S. Small strain based method for predicting three-dimensional soil displacements induced by braced excavation[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2016, 52: 12-22.

[33] ZIENKIEWICZ O C, HUMPHESON C, LEWIS R W. Associated and non-associated visco-plasticity and plasticity in soil mechanics[J]. Géotechnique, 1975, 25(4): 671-689.

[34] MILLÁN M A, MENCÍAS-CARRIZOSA D, CALLE A. Sustainability of discontinuously supported slopes in temporary shallow excavations for building construction: A stability analysis procedure[J]. Sustainability, 2024, 16(23): 10393.

[35] 程昊, 陈辉, 张抒, 等. 基于响应面试验设计的深基坑降水开挖地表沉降特性 [J]. 地质科技通报, 2024, 43(5): 181-196.
CHENG H, CHEN H, ZHANG S, et al. Investigations into ground surface settlement characteristics of excavation under dewatering and excavating conditions using the response surface experimental design method[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2024, 43(5): 181-196. (in Chinese with English abstract)

[36] 高旭, 晏鄂川, 尹晓萌, 等. 武汉地区某基坑二元结构地层渗透系数反演 [J]. 地质科技情报, 2017, 36(3): 218-224.
GAO X, YAN E C, YIN X M, et al. Permeability inversion of dual structure formation of a foundation pit in Wuhan[J]. Geological Science and Technology Information, 2017, 36(3): 218-224. (in Chinese with English abstract)

[37] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑基坑支护技术规程: JGJ120−2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical specification for retaining and protection of building foundation excavations: JGJ120−2012[S]. Beijing: China Architecture & Building Industry Press, 2012. (in Chinese)

[38] BENZ T, VERMEER P A, SCHWAB R. A small-strain overlay model[J]. International Journal for Numerical & Analytical Methods in Geomechanics, 2010, 33(1): 25-44.

[39] 寇海磊, 周超, 闫正余, 等. 基于小应变硬化土模型的黏性土本构参数研究及其工程应用 [J]. 海洋湖沼通报, 2023, 45(4): 16-22.
KOU H L, ZHOU C, YAN Z Y, et al. Research and engineering application of constitutive parameters of cohesive soil based on small strain hardening soil model[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2023, 45(4): 16-22. (in Chinese with English abstract)

[40] GOH A T C, ZHANG F, ZHANG W G, et al. A simple estimation model for 3D braced excavation wall deflection[J]. Computers and Geotechnics, 2017, 83: 106-113.

[41] 李广. 拉森钢板桩在深大基坑支护中的应用以及土压力分布规律研究 [D]. 江西抚州: 东华理工大学, 2022.
LI G. Application and study on earth pressure distribution law of larsen steel sheet pile in deep and large foundation pit support[D]. Fuzhou Jiangxi: East China Institute of Technology, 2022. (in Chinese with English abstract)

[42] ZHANG X, WANG L B, MA M S, et al. Stability analysis of the foundation pit and the twin shield tunnels during adjacent construction[J]. Buildings, 2023, 13(4): 1000.

[43] WANG J C, CUI D S, CHEN Q, et al. Morphological damage and strength deterioration of red sandstone under freeze-thaw cycles[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2025, 17(2): 671-687.

[44] SUN Y Y, ZHOU S H, LUO Z. Basal-heave analysis of pit-in-pit braced excavations in soft clays[J]. Computers and Geotechnics, 2017, 81: 294-306.

Summary for “小应变硬化土模型的软土地基狭窄基坑的抗隆起稳定性”

Basal-heave stability of narrow foundation pit in soft soil foundation based on hardening soil with small-strain stiffness (HSS) model

HU Ke[1]，YAN Bo[1]，TAI Jun[1]，XU Wei[1]，WANG Jiaju[2*]，CUI Deshan[2]，FENG Xiaola[2]

1. Central & Southern China Municipal Engineering Design and Research Institute Co., Ltd., Wuhan 430010, China；
2. Faculty of Engineering, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China

First author，E-mail：huke@citic.com

* Corresponding author， E-mail：cugwangjiaju@cug.edu.cn

Abstract：[**Objective**] As urbanization accelerates and utility tunnel projects develop, narrow foundation pits are becoming increasingly prevalent. However, the supporting systems, basal-heave calculation methods, and failure modes of narrow foundation pits differ substantially from those of wider ones, and basal heave is more pronounced in soft soil strata. [**Methods**] To further investigate the force-deformation behavior, basal-heave stability, and the sensitivity relationships among influencing factors of support structures for narrow foundation pits in soft soil foundations, finite element analysis and field monitoring were conducted using the Wuhan Youyi Avenue rapid reconstruction project as a case study. The hardening soil with small-strain stiffness (HSS) soil constitutive model, and the strength reduction method were employed to study the effects of excavation width, support structure embedment ratio, surcharge loads, and support structure stiffness on the basal-heave stability of narrow foundation pits. [**Results**] The results indicated that with higher support stiffness and smaller support spacing, the differences in stress and deformation between the supports and the midpoint between two adjacent supports were minimal. Soil deformation in narrow foundation pits was divided into the soil outside the pit from the ground surface to a certain depth below the surface and the soil at the pit bottom, which induced basal heave and ground surface subsidence outside the pit, respectively. In narrow foundation pits, plastic zones developed at the pit bottom and the base of the structure, with further development, intersecting plastic zones gradually formed and extended into the soil on both sides until the plastic zones coalesced throughout, ultimately leading to failure of the narrow foundation pit. Sensitivity analysis revealed that the embedment ratio and stiffness of the support structure had a significant positive effect on the basal-heave stability of narrow foundation pits, whereas excavation width and surcharge loads exhibited a negative correlation, with the embedment ratio displaying the strongest correlation. [**Conclusion**] These findings provide a scientific basis for the design of support systems and stability assessment of narrow foundation pits in soft soil foundations.

Key words: narrow foundation pit；basal-heave stability；soft soil foundation；hardening soil with small-strain stiffness (HSS) model；finite element method

Received：2025-07-01；Revised：2025-11-10；Accepted：2025-11-18

doi：10.19509/j.cnki.dzkq.tb20250307