

近接基坑工程有限土体失稳模式研究

张振波^{1,2}, 李秉欣³, 杨 茜³, 刘志春³, 刘 义⁴

(1. 石家庄铁道大学 河北省大型结构健康诊断与控制重点实验室, 河北 石家庄 050043; 2. 石家庄铁道大学 安全工程与应急管理学院, 河北 石家庄 050043; 3. 石家庄铁道大学 土木工程学院, 河北 石家庄 050043; 4. 江苏科技大学 土木工程与建筑学院, 江苏 镇江 212100)

摘 要: 随着城市地铁建设不断发展, 基坑紧邻既有地下结构的情况日益增多, 然而仍然缺乏对近接基坑工程土体失稳模式的系统研究。针对既有地铁车站近接增建基坑工程, 采用数值分析方法研究近接基坑工程对称/非对称有限土体失稳模式, 提出不同失稳模式下适用条件, 分析内支撑数量、基坑深度、基坑与既有地铁车站空间位置关系等对土体稳定性及滑移面性状的影响规律。研究表明: (1) 近接基坑工程非对称和对称有限土体失稳模式分别有 3 种和 6 种情况; (2) 随着内支撑数量的增加, 滑移体范围不断扩大, 且起始位置沿围护结构不断下移, 有限土体稳定性安全系数逐渐增加; (3) 随着基坑深度的增加, 滑移体的范围先增大后减小, 有限土体稳定性安全系数逐渐减小; (4) 针对近接基坑工程非对称滑移面分析, 随着既有地铁车站覆土厚度的增加, 滑移面在既有地铁车站侧的近接范围逐渐减少且起始位置外移。以上研究可以为既有地铁车站近接增建基坑工程的有限土体土压力的计算、基坑围护结构的设计以及既有地铁车站安全控制措施的选取提供理论依据。

关 键 词: 基坑工程; 近接增建; 有限土体; 滑移面; 安全系数; 失稳模式

中图分类号: TU 470

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2025) 01-0266-12

Instability mode of limited soil in adjacent foundation pit engineering

ZHANG Zhen-bo^{1,2}, LI Bing-xin³, YANG Qian³, LIU Zhi-chun³, LIU Yi⁴

(1. Key Laboratory of Structural Health Monitoring and Control, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang, Hebei 050043, China;

2. School of Safety Engineering and Emergency Management, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang, Hebei 050043, China;

3. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang, Hebei 050043, China;

4. School of Architecture and Civil Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang, Jiangsu 212100, China)

Abstract: The ongoing urban subway construction has led to an increase in foundation pits near existing underground structures. However, there remains a lack of systematic research on the soil instability modes in adjacent foundation pit engineering. This study employs numerical analysis to investigate the instability modes of asymmetric / symmetric limited soil in the adjacent foundation pit project near an existing subway station. It proposes applicable conditions under various instability modes and analyzes the impact of internal support quantity, foundation pit depth, and spatial relationship between the foundation pit and the existing subway station on soil stability and slip surface properties. The research shows that: 1) Adjacent foundation pit engineering exhibits three to six cases of symmetric or asymmetric limited soil instability modes. 2) As the number of internal supports increases, the slip body's range expands, the starting position shifts downward in the retaining structure and the safety factor of limited soil stability gradually rises. 3) The increase of depth in the foundation pit influences with the sliding body range, initially increasing and then decreasing, leading to a gradual decrease in the safety factor of finite soil stability. 4) Analysis of the asymmetric slip surface in adjacent foundation pit projects indicates that as the overburden soil thickness of the existing subway station increases, the approaching range of the slip surface near the station decreases gradually, and the starting position shifts outward. This research provides a theoretical foundation for calculating limited soil earth pressure, designing foundation pit retaining structures, and selecting safety control measures for existing subway stations.

Keywords: foundation pit engineering; adjacent additional construction; limited soil; slip plane; factor of safety; failure mode

收稿日期: 2024-03-18

录用日期: 2024-08-05

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (No.2023YFC3806701); 河北省自然科学基金资助项目 (No.E2024210050)。

This work was supported by the National Key Research and Development Program of China (2023YFC3806701) and the Natural Science Foundation of Hebei Province (E2024210050).

第一作者简介: 张振波, 男, 1990 年生, 博士, 讲师, 硕士生导师, 主要从事地下工程等方面的教学和科研。E-mail: zhangzb@stdu.edu.cn

通讯作者: 杨茜, 女, 1973 年生, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事地下结构等方面的教学和科研工作。E-mail: yangq@stdu.edu.cn

1 引言

当前,很多城市浅层地下空间日趋饱和,未来会有大量的土建工程所涉及的基坑工程与既有结构近接的情况。基坑与既有结构间的有限土体不满足传统经典土压力理论的半无限土体基本假设,学者们^[1-2]针对有限土体的土压力开展了研究。无论是无限土体的土压力理论还是有限土体的土压力理论,土体的滑移面性状是土压力理论推导的基础,同时也是土体失稳模式研究的基础。

挡墙的移动模式对有限土体的滑移面性状有很大影响。常见的挡墙移动模式包括平动(translation movement,简称T)模式、挡墙绕墙底转动(rotating around the base,简称RB)模式以及绕墙顶转动(rotating around the top,简称RT)模式。针对T模式,一些学者采用数值模拟方法研究有限土体滑移面。Yang等^[3]采用离散单元法(discrete element method,简称DEM)方法得到了不同宽高比下滑移面倾角与朗肯理论一致的情况。Chen等^[4]利用有限元极限分析(finite element limit analysis,简称FELA)方法得出了土体滑移面呈现多道折线,且折线数量随宽高比的减小而增加的结论。Chen等^[5]对倒T型挡土墙后有限土体产生的滑裂面开展了有益的探索。还有一些学者采用模型试验方法开展有限土体滑移面的研究。Yang等^[6]研究表明,不同宽度土体的滑移面均呈对数螺旋形。Xu等^[7]试验结果表明,有限土体宽度的减小导致滑裂面的倾斜角增大,且当宽度足够小时,会出现反射滑裂面。邓波等^[8-9]针对非饱和砂土材料开展了模型试验。

针对RB模式,张恒志等^[10]采用离散元方法分析了不同墙后填土宽度对滑移面的影响规律,研究结果表明不同宽高比下滑移面倾角与库仑解接近。Lai等^[11]采用Optum G2软件,分析了宽高比、土黏聚力、内摩擦角和界面摩擦等参数对有限土体滑移面的影响,RB模式下有限土体滑裂面近似直线。王崇宇等^[12-13]针对主动和被动土压力的问题,发现不论挡墙靠近或是远离土体,滑移面均为曲面。Chen等^[14]对无黏性土的界面摩擦角和土的黏聚力等参数展开了讨论。

针对RT模式。Yang等^[15]利用Optum G2软件对宽高比、土黏聚力、内摩擦角和界面摩擦系数进行分析对比,研究表明RT模式下土体滑移面呈现对数螺旋形,并在土墙界面不会发生反射。

杨明辉^[16]、方焘^[17]等分别针对无黏性土体和浸水无黏性土体展开了滑移面研究,得到的滑移面都是通过墙踵的连续曲面。Lin等^[18]分析了天然边坡倾角、宽高比、土的黏聚力和墙土摩擦角对滑移面的影响规律。

对于近接基坑工程,不少学者也进行了研究,张明远等^[19]采用有限元法,通过与实测数据进行对比后发现,基坑施工将诱导邻近地铁隧道主要产生水平位移。夏祥忠^[20]以长沙市某项目深基坑工程为研究对象,研究了基坑开挖过程中土体变形特征。肖同刚^[21]和冯龙飞等^[22]通过对隧道及基坑的长期监测,分别阐述了控制隧道和基坑的变形措施。曾远等^[23]分析了新旧两车站间距、源头变形、土体弹性模量因素对邻近地铁车站变形的影响。朱正锋等^[24]分析了基坑开挖过程中对隧道变形影响的规律。唐长东等^[25]采用有限元法认为地铁车站结构的遮拦作用在岩层地区依然适用。谢秀栋等^[26]利用FLAC^{2D}软件发现了基坑距离车站越近,土体上升趋势越大的现象。卞荣等^[27]利用有限元模拟的方法,划定了基坑邻近隧道的安全距离。陈保国等^[28]通过数值模拟及现场监测,得出了近接建筑荷载作用下阳角型深基坑最佳支撑位置。

现阶段,有关有限土体失稳破坏模式的研究更多聚焦具体工程,采用数值分析或模型试验的方法,给出对应的滑移面性状,进而得出土体失稳模式。但国内外学者对有限土体的滑移面性状研究具有多样性,导致土体失稳呈现多种模式。基于此,本文采用数值仿真方法,针对临近既有地铁车站新建基坑工程,建立基坑左右两侧对称布置既有地铁车站(以下简称“对称”)和仅在基坑右侧布置既有地铁车站(以下简称“非对称”)两种基本模型,研究近接基坑工程对称、近接基坑工程非对称滑移面特性,给出基坑与既有地铁车站空间位置关系、基坑深度、基坑内支撑数量等参数对有限土体滑移面的影响规律,提出近接基坑工程有限土体失稳模式。通过以上研究,可以揭示基坑与既有地铁车站空间位置关系对有限土体滑移面性状影响规律,为有限土体土压力计算方法中的滑移面选取提供理论依据。

2 工程概况

新建基坑工程邻近北京地铁2号线与4号线换乘车站宣武门站,基坑平面图见图1。

地层从上至下主要为杂填土、粉质黏土、粉细砂以及圆砾卵石,其中地表以下1~2 m范围内为

杂填土, 2~8 m 范围内主要粉质黏土及粉土, 8~15 m 范围内主要为粉细砂层, 15~19 m 范围内主要为粉质黏土及粉土层, 往下主要为圆砾卵石层。

宣武门车站范围内地下水为层间水, 水位埋深为 20.50~24.30 m, 含水层为卵石圆砾层, 中粗砂充填。

新建基坑工程中采用内撑式围护结构型式, 内支撑为钢管内支撑, 直径为 609 mm, 壁厚为 16 mm; 围护结构为围护桩, 桩径为 1 200 mm, A 型桩长为 14.3 m, B 型桩长为 10.0 m。

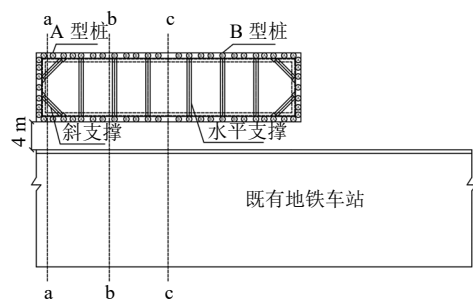


图 1 新建基坑工程平面图

Fig.1 New foundation pit engineering plan

由于空间效应, c-c 为最不利断面。因此, 本文针对本工程的最不利断面开展土体失稳破坏模式的研究。同时, 断面 c-c 符合平面应变假设, 因此本文采用二维分析方法开展研究。

3 破坏模式假设

近接基坑工程由于地下空间受限, 多为有限土体, 且受到基坑深度、土体参数及既有地下结构几何尺寸等因素影响, 滑移面形状会呈现出多种形状。根据近接基坑土体滑移面的不同形状, 对近接基坑工程对称模型提出 6 种土体破坏模式, 仅展示一侧滑移面形状, 对近接基坑工程非对称模型提出 3 种土体破坏模式, 见图 2 和图 3。国内外学者对滑移面形状的结论有所不同, 或是直线^[11]或是曲线^[12-13], 故在图 2 和图 3 中暂用虚线表示。

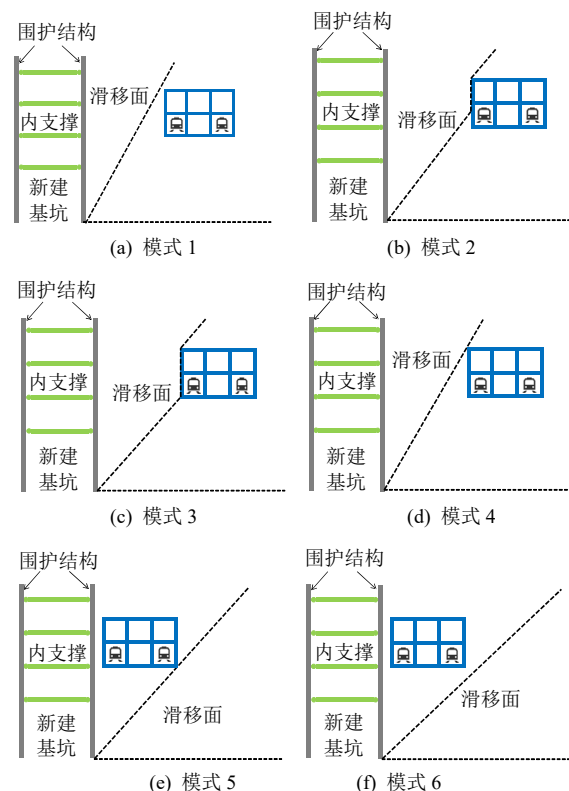


图 2 近接基坑工程对称破坏模式假设图

Fig.2 Symmetrical failure mode hypothesis diagrams of adjacent foundation pit engineering

在既有地铁车站空间位置不断变化过程中, 基坑开挖引起的滑移面可能会与车站的不同位置相交, 故对于近接基坑工程对称土体破坏模式提出 6 种假设。模式 1 为既有地铁车站在基坑开挖影响区外侧, 滑移面从基坑与既有地铁车站中间穿过。模式 2 为基坑开挖引起的滑移面与既有地铁车站外墙相交后, 沿外墙向上延伸直至发展至地表。模式 3 为滑移面与既有地铁车站相交于车站外墙底部, 而后沿外墙向上发展至地表。滑移面与既有地铁车站靠基坑侧外墙顶部相交后继续延伸至地表为模式 4。滑移面与既有地铁车站右侧外墙底部相交后延伸至地表为模式 5。模式 6 为基坑开挖过程中引起的滑移面将既有地铁车站完全包络住的情况。

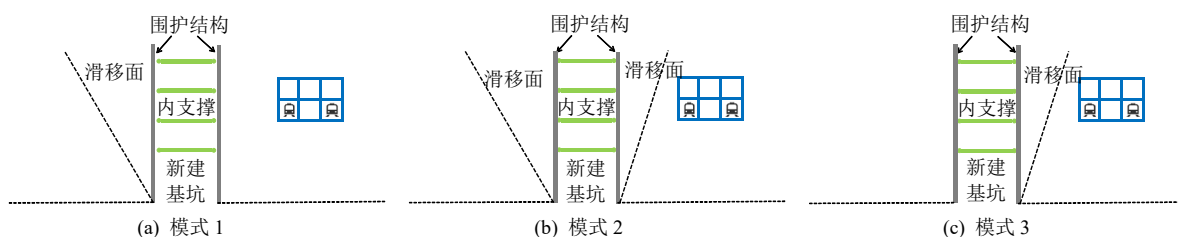


图 3 近接基坑工程非对称破坏模式假设图

Fig.3 Asymmetric failure mode hypothesis diagrams of adjacent foundation pit engineering

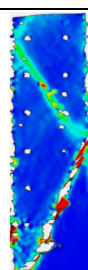
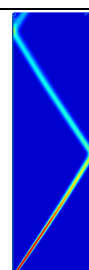
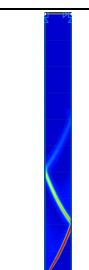
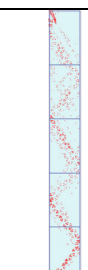
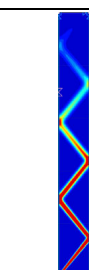
由于既有地铁车站空间位置的不断改变，造成基坑左右两侧土体的安全系数也在变化，安全系数小的土体会首先发生破坏，故滑移面将会出现在安全系数相对较小一侧土体。因此对于近接基坑工程非对称土体破坏模式提出 3 种假设，模式 1 为滑移面仅出现在无既有地铁车站侧。模式 2 为滑移面在基坑两侧均出现。模式 3 为滑移面仅在既有地铁车站侧出现。

4 研究手段合理性证明

本文拟采用数值分析方法开展研究，使用有限元分析软件 Optum G2 开展数值模拟。通过与案例的对比分析，说明本文使用软件的准确性。选取了 3 篇代表性文献[12, 29-30]，分别采用模型试验、Optum G2 和 PLAXIS^{2D} 得到了有限土体滑移面性状。随后，本文根据文献[12, 29-30]中的相关参数，计算得到了相应工况下的有限土体滑移面，并给出了对比情况，具体参见表 1。

表 1 运算结果对比情况

Table 1 Comparison of calculation results

文献[12]案例		文献[29]案例		文献[30]案例	
文献[12]计算结果	本文计算结果	文献[29]计算结果	本文计算结果	文献[30]计算结果	本文计算结果
					

由表 1 可知，本文采用数值分析方法得到的计算结果与已有文献研究结果一致。由此，说明下文使用软件得到结果的正确性。

5 对称破坏模式研究

5.1 数值模型建立

新建基坑与既有地铁车站空间位置关系如图 4 所示。图中， H 为基坑深度，取 25 m， D 为挡墙嵌固深度，取 10 m。 b_0 和 h_0 分别为地铁车站的宽度和高度，取 17、12 m。 h_j 为既有地铁车站覆土深度，取 5 m； b_j 为近接距离，取 7 m。基坑宽度取 20 m。以既有地铁车站的左上端点 O 为基准点，既有地铁车站对称布置在基坑左右两侧。

本文依托北京地铁宣武门换乘车站改拓建工程，基于实际工程的地层分布情况，对土体参数进

行了加权平均，获取了土体参数，见表 2。墙-土界面摩擦系数 $\tan\delta\tan\varphi$ (δ 为墙-土界面摩擦角， φ 为内摩擦角) 为 0.308 1。土体采用摩尔-库仑本构模型。

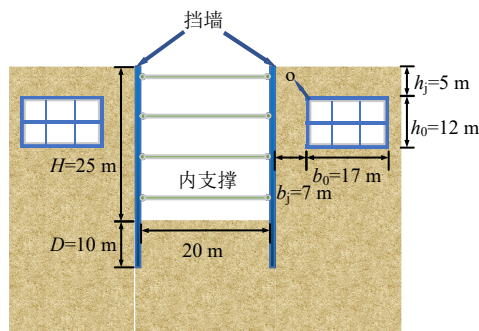


图 4 模型示意图

Fig.4 Model diagram

表 2 土体参数

Table 2 Soil parameters

填土重度 $\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	内摩擦 角 $\varphi/(\text{°})$	杨氏模量 E_0/MPa	泊松 比 ν	侧向静止土压 力系数 K_0	墙-土界面摩 擦角 $\delta/(\text{°})$
18	28	35	0.43	0.754 4	9.3

在进行有限元分析的过程当中，采用软件内嵌的强度折减法计算滑移面形状及土体稳定性安全系数。

近接工程既有结构侧与无既有结构侧土体稳定性一般不一致，在采用强度折减法计算基坑两侧土体稳定性时，土体稳定性低的一侧先出现滑移面。为了消除以上影响，在对于近接基坑工程对称土体失稳模式研究中，由于数值模型对称，为简化计算，对基坑一侧进行计算。

根据数值模型几何特征与参数，采用自适应网格划分技术，单元类型选择 6——高斯节点，自适应迭代 3 次，有限元数值模型具有 10 000 个网格单元，如图 5 所示。

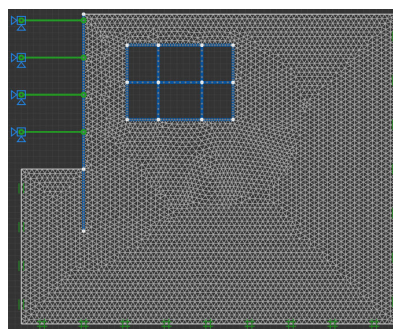
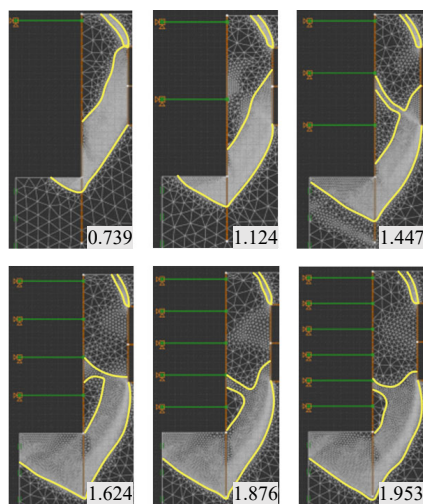


图 5 近接基坑工程对称结构数值模型图

Fig.5 Numerical model diagram of symmetrical structure near foundation pit engineering

5.2 内支撑设置对土体失稳模式影响规律

使用近接基坑工程对称模型,在 $h_j=5\text{ m}$, $b_j=7\text{ m}$ 的标准工况条件下,分别设置 1~6 根内支撑共 6 种工况分析内支撑的数量对滑移面的影响规律,计算结果见图 6。



注: 右下角数字为土体稳定性安全系数

图 6 内支撑数量对有限土体滑移面影响

Fig.6 Influences of the number of internal supports on slip surface of finite soil mass

由图 6 可知,多个模型的有限土体滑移面均是先到既有地铁车站左下角位置,随后沿着既有地铁车站侧墙向上延伸至既有地铁车站左上角,最后反向延伸至地面。随着内支撑数量的增加,滑移体的范围逐渐扩大,且滑移面的起始位置沿围护结构向下延伸。当内支撑数量超过 2 道时,滑移面到达既有地铁车站左下角位置后,分成两部分,一部分反向延伸至围护结构上,另一部分同之前。随着内支撑数量的增加,整体结构的稳定性也逐渐增加,所以有限土体的安全系数逐渐增加。

5.3 基坑深度对土体失稳模式影响规律

使用近接基坑工程对称模型,将基坑深度 H 改为 20 m 和 30 m,嵌固深度 D 分别改为 8 m 和 12 m 后,在 $h_j=5\text{ m}$ 、 $b_j=7\text{ m}$ 的工况条件下探究基坑深度 H 对滑移面的影响,计算结果见图 7。

由图 7 可知,在 3 种不同基坑深度的条件下,滑移面均是先延伸至既有地铁车站的左下角,然后反射至基坑侧挡墙上,随后向上延伸一段后反射至既有地铁车站的左上角,最后反向延伸至地面。随着基坑深度的增加,滑移体的范围先增大后减小,由于随着基坑深度的增加,挡土墙上所受到的土压力也随之增大,内支撑上的轴力也逐渐增大,整体结构的稳定性降低,故土体安全系数逐渐减小,由 2.104 降至 1.566。

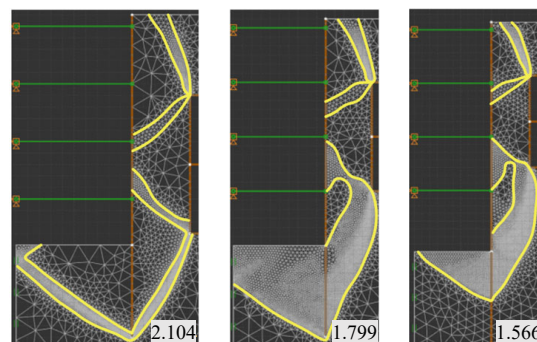


图 7 基坑深度对有限土体滑移面影响

Fig.7 Influences of foundation pit depth on slip surface of finite soil mass

5.4 空间位置关系对土体失稳模式影响规律

在使用近接基坑工程对称模型的情况下,通过改变近接距离和覆土深度的参数,进而分析基坑与既有地铁车站空间位置关系(即 h_j 与 b_j)对有限土体滑移面性状的影响。

工况设置情况为设定覆土深度 $1 \leq h_j \leq 25\text{ m}$,近接距离 $1 \leq b_j \leq 23\text{ m}$,共计 575 种工况。具体工况设置见表 3。

表 3 $H=25\text{ m}$ 时工况设置表

Table 3 Working condition setting table when $H = 25\text{ m}$

覆土深度 h_j/m	工况序号				
	$b_j=1\text{ m}$	$b_j=2\text{ m}$	...	$b_j=22\text{ m}$	$b_j=23\text{ m}$
1	工况 1	工况 2	...	工况 22	工况 23
2	工况 24	工况 25	...	工况 45	工况 46
...	...	...	...	...	...
24	工况 530	工况 531	...	工况 551	工况 552
25	工况 553	工况 554	...	工况 574	工况 575

通过计算得出滑移面形状存在 6 种情况,详情见图 8。由图可知,滑移面将会出现 6 种情况:①滑移面直接从既有地铁车站下侧穿过(如图 8(a)所示);②滑移面打在既有地铁车站靠近基坑一侧的底端(如图 8(b)所示);③滑移面打在既有地铁车站靠近基坑一侧的外墙上(如图 8(c)所示);④滑移面打在既有地铁车站靠近基坑一侧的顶端(如图 8(d)所示);⑤滑移面打在既有地铁车站远离基坑一侧的底端(如图 8(e)所示);⑥滑移面从既有地铁车站和基坑中间直接穿过(如图 8(f)所示)。

以上 6 种情况,有一些情况既有结构的存在对土体滑移性状影响,有一些情况既有结构的存在对土体滑移性状无影响。因此,根据既有结构对土体滑移面有无影响,可以将土体的滑移情况分为两大类,分别是有限土体滑移与无限土体滑移。由图 8 可知,图 8(b)、8(c)、8(d)属于有限土体滑移,图 8(a)、

8(e)、8(f)属于无限土体滑移。

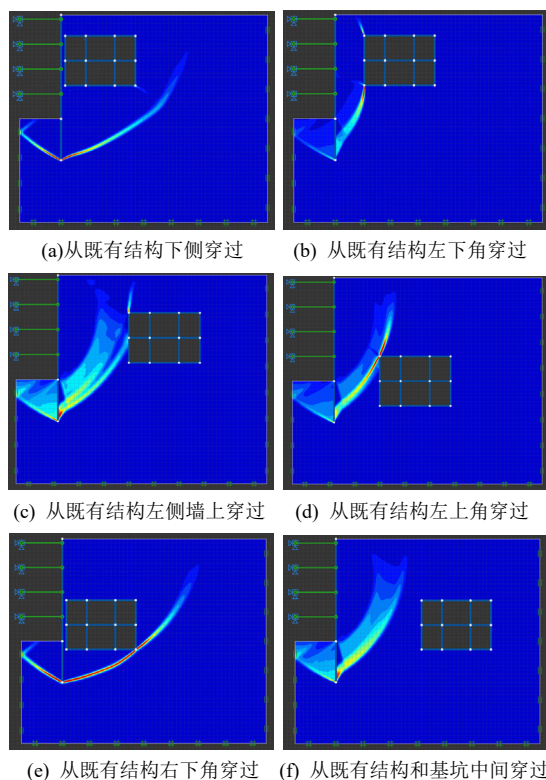


图 8 近接基坑工程对称滑移面示意图

Fig.8 Symmetrical slip surface diagrams of adjacent foundation pit engineering

根据计算结果发现部分工况滑移面在通过既有地铁车站左上角后向左弯曲，存在滑裂面反翘的情况，随后提取了近接距离 $b_j=11$ m 的所有计算结果，发现在覆土深度较小时，滑移面出现了反翘现象，但随着覆土深度的增加，滑移面会逐渐向既有地铁车站上方移动，反翘现象逐渐减弱，见图 9。

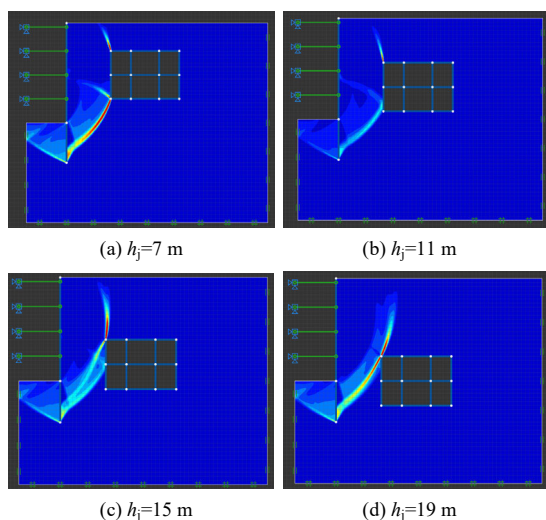


图 9 反翘现象示意图

Fig.9 Schematic diagrams of reverse warping phenomenon

既有地铁车站的存在，使得既有地铁车站与土体二者的等效刚度大于土体刚度，且随着既有车站结构覆土厚度的增加，等效刚度逐渐趋于土体刚度（即等效刚度与土体刚度的差值越来越小）。土体滑移面存在“避硬趋软”效应，当等效刚度远大于土体刚度时，滑移面向土体侧滑移，即出现了反翘现象。随着既有地铁车站覆土厚度的增加，等效刚度逐渐接近土体刚度，反翘现象减弱。

随后，依据计算结果，得到了既有地铁车站在不同的空间位置的滑移面形状，揭示了近接基坑工程对称滑移面的一般规律，见图 10。根据《城市轨道交通工程监测技术规范》(GB 50911—2013)^[31]， $0.7H$ 内是基坑工程主要影响区的分界线，见图 10 中红色虚线。

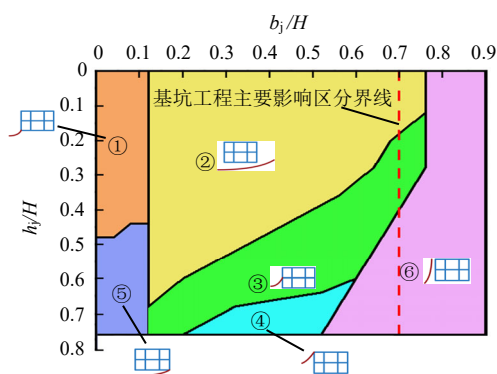


图 10 $H=25$ m 时近接基坑工程对称滑移面规律示意图

Fig.10 When $H=25$ m, the symmetrical slip surface law of the foundation pit engineering close to foundation pit engineering.

由图 10 可知，在覆土深度较浅时，随着近接距离的增大，滑移面从既有地铁车站底部直接穿过到打在既有地铁车站靠近基坑一侧的底部，再到从既有地铁车站和基坑中间直接穿过变化。随着覆土深度的增加，滑移面不再只是打在既有地铁车站靠近基坑的底端上，同时也会打在既有地铁车站的外墙上。覆土深度接着加大之后，滑移面会打在既有地铁车站远离基坑一侧的底端和靠近基坑一侧的顶端，将不再会打在既有地铁车站靠近基坑的底端上。此外，只要既有地铁车站不对滑移面产生影响，即近接距离在大于 19 m 时，滑移面均从既有地铁车站和基坑中间直接穿过。

采用同样的方法，对基坑深度 H 为 20 m 和 30 m 两种情况分别设计了 460 种和 690 种工况，具体工况设置见表 4、5。

计算得到了基坑深度 H 为 20 m 和 30 m 的滑移面情况，如图 11 所示。

由图 11 可知,在主要影响区中,滑移面的情况是较为复杂的。通过对比分析图 10 和图 11,发现 6 种滑移面形状在图中所占的范围都有所改变。

表 4 $H=20$ m 时工况设置表

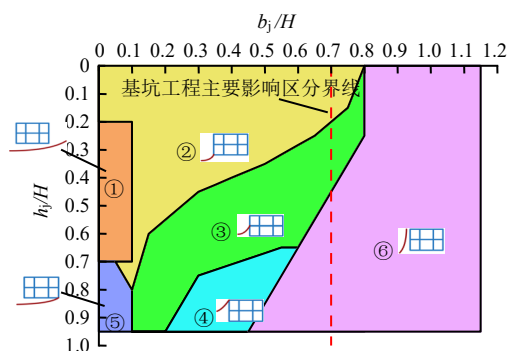
Table 4 Working condition setting when $H = 20$ m

覆土深度 h_j/m	工况序号				
	$b_j=1$ m	$b_j=2$ m	...	$b_j=22$ m	$b_j=23$ m
1	工况 1	工况 2	...	工况 22	工况 23
2	工况 24	工况 25	...	工况 45	工况 46
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
19	工况 415	工况 416	...	工况 436	工况 437
20	工况 438	工况 439	...	工况 459	工况 460

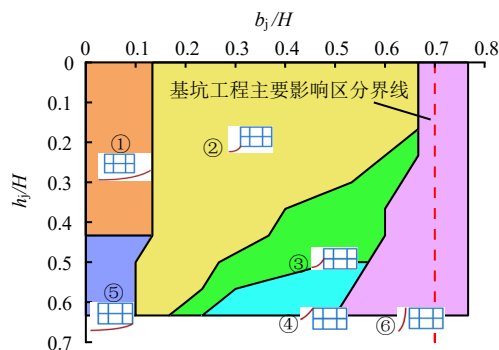
表 5 $H=30$ m 时工况设置表

Table 5 Working condition setting table when $H = 30$ m

覆土深度 h_j/m	工况序号				
	$b_j=1$ m	$b_j=2$ m	...	$b_j=22$ m	$b_j=23$ m
1	工况 1	工况 2	...	工况 22	工况 23
2	工况 24	工况 25	...	工况 45	工况 46
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
29	工况 645	工况 646	...	工况 666	工况 667
30	工况 668	工况 669	...	工况 689	工况 690



(a) $H=20$ m



(b) $H=30$ m

图 11 近接基坑工程对称滑移面规律示意图

Fig.11 Schematic diagrams of symmetrical slip surface law of adjacent foundation pit engineering

由于既有结构相较于土体的刚度更大,在土体

发生破坏后,滑移面由于既有结构的存在,会发生回缩或外扩的现象。随着基坑深度的增加,滑移面影响范围逐渐增大,第①、②、⑤种情况所占面积逐渐增大,第③、④、⑥种情况所占面积逐渐减少。

5.5 近接基坑工程对称土体失稳模式及适用条件

根据 5.4 节中计算结果可将近接基坑工程对称土体失稳模式总结为以下 6 种,如图 12 所示。

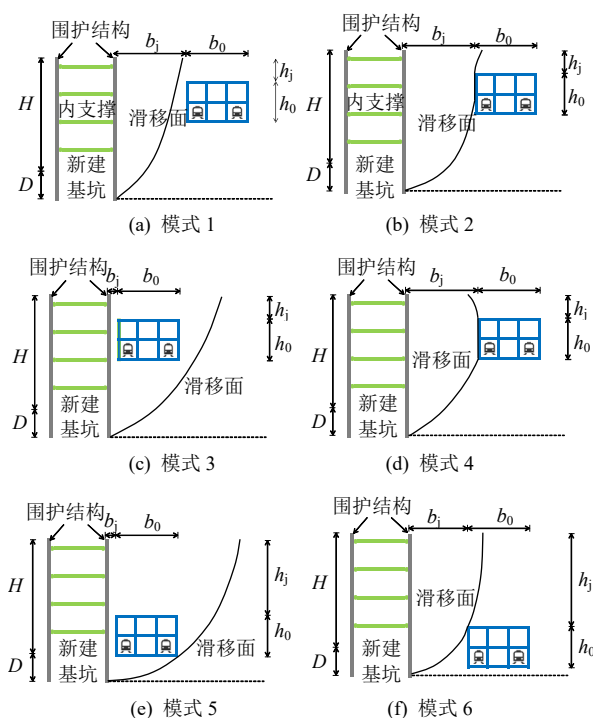


图 12 近接基坑工程对称滑移面土体失稳模式示意图

Fig.12 Schematic diagrams of soil instability modes of symmetrical slip surface adjacent to foundation pit engineering

以上 6 种模式分别为①滑移面从既有结构左侧穿过,不与既有结构发生接触(如图 12(a)所示);②滑移面打在既有结构左墙上,沿左墙向上延伸,而后继续向右发展直至地表(如图 12(b)所示);③滑移面直接从既有结构右侧穿过,不与既有结构发生接触(如图 12(c)所示);④滑移面打在既有结构左墙底端,沿着滑移面向上延伸,而后向左发展直至地表(如图 12(d)所示);⑤滑移面打在既有结构右墙底端后,继续向上发展直至地表(如图 12(e)所示);⑥滑移面打在既有结构左墙顶端后,继续向上发展直至地表(如图 12(f)所示)。

根据上述不同基坑深度滑移面规律示意图,将基坑深度 H 分别为 20、25、30 m 的计算结果进行拟合,得到近接基坑工程对称滑移面规律如图 13 所示。

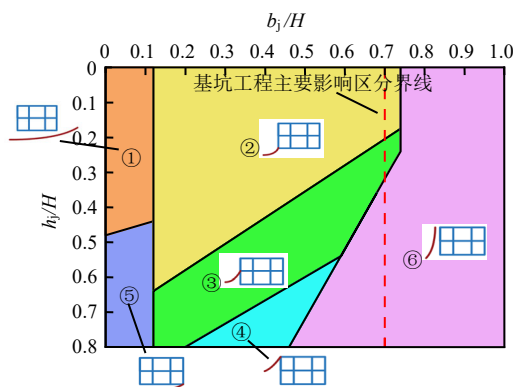


图13 近接基坑工程对称失稳模式拟合图

Fig.13 Fitting diagram of symmetrical instability mode of adjacent foundation pit engineering

根据图13建立以 b_j/H 为 x 轴, 向右为正向, h_j/H 为 y 轴, 向上为正向的坐标系, 将图13中各区域分界线进行函数拟合后, 得到6种不同土体失稳模式的适用条件:

- (1) $0.33b_j/H - 0.48 < h_j/H < 0$ ($0 < b_j/H < 0.12$);
- (2) $0.75b_j/H - 0.73 < h_j/H < 0$ ($0.12 < b_j/H < 0.74$);
- (3) $-0.80 < h_j/H < 0.75b_j/H - 0.73$ ($0.12 < b_j/H < 0.20$);
- $0.67b_j/H - 0.93 < h_j/H < 0.75b_j/H - 0.73$ ($0.20 < b_j/H < 0.59$);
- $2b_j/H - 1.72 < h_j/H < 0.75b_j/H - 0.73$ ($0.59 < b_j/H < 0.74$);

- (4) $-0.80 < h_j/H < 0.67b_j/H - 0.93$ ($0.20 < b_j/H < 0.46$);
- $2b_j/H - 1.72 < h_j/H < 0.67b_j/H - 0.93$ ($0.46 < b_j/H < 0.59$);
- (5) $-0.80 < h_j/H < 0.67b_j/H - 0.93$ ($0 < b_j/H < 0.12$);
- (6) $-0.80 < h_j/H < 2b_j/H - 1.72$ ($0.46 < b_j/H < 0.74$);
- $-0.80 < h_j/H < 0$ ($0.46 < b_j/H < 1$);

6 非对称破坏模式研究

近接基坑工程非对称土体失稳模式分析是基于近接基坑工程对称模型开展, 即在基坑左右两侧中, 一侧布置既有地铁车站、另一侧为无既有地铁车站模型进行研究。根据数值模型几何特征与参数, 采用自适应网格划分技术, 有限元数值模型中有10 000个网格单元, 单元类型选择6——高斯节点。随后, 调整覆土深度和近接距离的参数, 分析既有地铁车站与基坑空间位置关系(即 h_j 与 b_j) 对有限土体滑移面性状的影响规律。非对称破坏模型无既有结构侧保持不变, 每调整一次既有结构侧的覆土深度或近接距离为1种工况, 调整情况同表3, 共设计575种工况。

通过计算, 单侧紧邻既有地铁车站的土体滑移面呈现3种情况(见图14)。

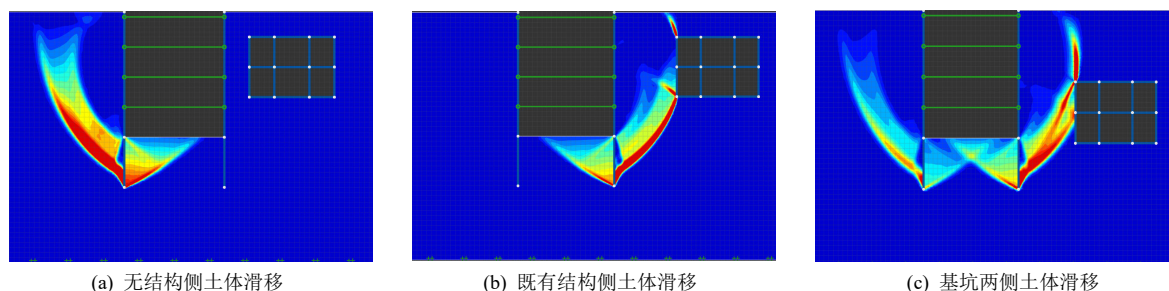


图14 近接基坑工程非对称滑移面示意图

Fig.14 Asymmetric slip surface schematic diagrams of adjacent foundation pit engineering

由图14可知, 近接基坑工程非对称土体滑移面包括以下3种情况: ①滑移面在无既有地铁车站结构侧; ②滑移面在既有地铁车站结构侧; ③双侧均有滑移面。随后, 根据计算结果, 得到了不同既有地铁车站覆土厚度、近接距离下的滑移面情况, 见图15。

由图15可知, 当既有地铁车站基准点 O 位于图15中绿色区域中, 滑移面在无既有结构侧; 当基准点 O 位于图15中紫色区域中, 滑移面在既有结构侧; 基准点 O 位于图15中橙色区域中, 滑移面在基坑两侧。滑移面之所以会出现不同的现象, 是因为随着既有地铁车站的位置移动, 既有结构侧土体安全系数在发生变化。当既有结构侧土体安全系数小于无既有结构侧, 滑移面出现在既有结构

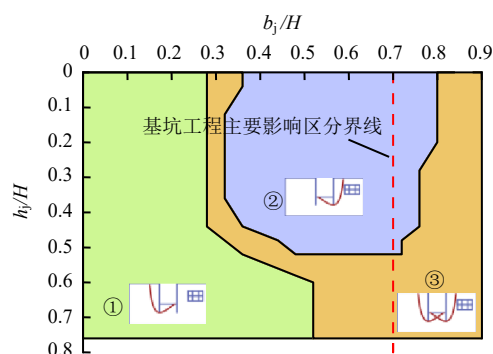


图15 近接工程非对称滑移面规律示意图

Fig.15 Schematic diagram of asymmetric slip surface law of adjacent engineering

侧; 当既有结构侧土体安全系数等于无既有结构侧, 滑移面出现在两侧。出现这种情况的原因可能

与基坑左右两侧的土体稳定性安全系数有关。

根据上述计算结果可将近接基坑工程非对称有限土体失稳模式归纳为以下 3 种, 见图 16。

由图 16 可知, 3 种模式分别如下: ①滑移面仅在无既有地铁车站侧出现, 从基坑围护结构底部弯曲向上延伸至地表 (如图 16(a)所示); ②滑移面基坑左右两侧均出现。在无既有地铁车站侧, 滑移面从基坑围护结构底部向上弯曲延伸至地表; 在既有

地铁车站侧, 滑移面从基坑围护结构底部向上弯曲发展至车站外墙底部后沿外墙竖直向上直至外墙顶部, 最后向上弯曲发展至地表 (如图 16(b)所示); ③滑移面仅在既有地铁车站侧出现, 且与模式 2 中既有地铁车站侧现象一致 (如图 16(c)所示)。

根据计算结果及近接工程非对称滑移面规律示意图拟合得到近接基坑工程双滑移面规律如图 17 所示。

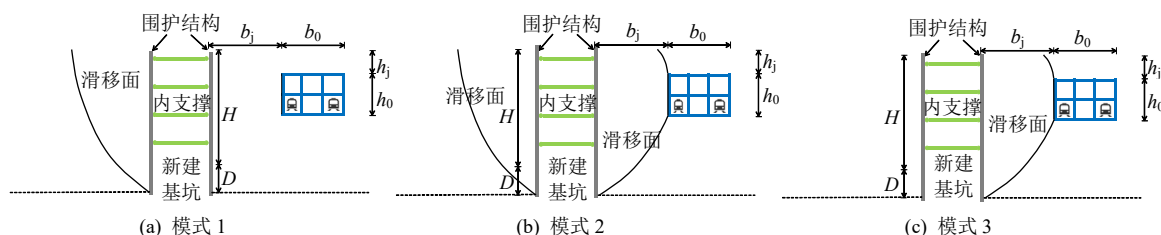


图 16 近接基坑工程非对称滑移面土体失稳模式示意图

Fig.16 Schematic diagrams of soil instability modes of asymmetric slip surface near foundation pit engineering

由图 17 建立以 b_j/H 为 x 轴, 向右为正向, h_j/H 为 y 轴, 向上为正向的坐标系, 将图 17 中各区域分界线进行函数拟合后, 得到 3 种不同土体失稳模式的适用条件:

(1) $-0.76 < h_j/H < 0$ ($0 < b_j/H < 0.28$); $-0.76 < h_j/H < -0.67b_j/H - 0.25$ ($0.28 < b_j/H < 0.52$).

(2) $-b_j/H - 0.04 < h_j/H < 3b_j/H - 1.08$ ($0.32 < b_j/H < 0.36$); $-b_j/H - 0.04 < h_j/H < 0$ ($0.36 < b_j/H < 0.48$); $-0.52 < h_j/H < 0$ ($0.48 < b_j/H < 0.72$); $4b_j/H - 3.4 < h_j/H < 0$ ($0.72 < b_j/H < 0.80$).

(3) $-0.67b_j/H - 0.25 < h_j/H < 0$ ($0.28 < b_j/H < 0.32$); $3b_j/H - 1.08 < h_j/H < 0$ ($0.32 < b_j/H < 0.36$); $-0.67b_j/H - 0.25 < h_j/H < -b_j/H - 0.04$ ($0.32 < b_j/H < 0.48$); $-0.67b_j/H - 0.25 < h_j/H < -0.52$ ($0.48 < b_j/H < 0.52$); $-0.76 < h_j/H < -0.52$ ($0.52 < b_j/H < 0.72$); $-0.76 < h_j/H < 4b_j/H - 3.4$ ($0.72 < b_j/H < 0.80$); $-0.76 < h_j/H < 0$ ($0.80 < b_j/H < 0.92$).

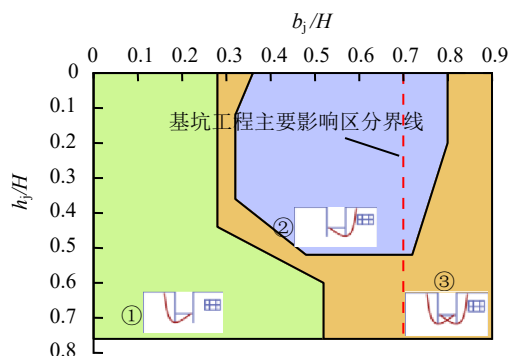


图 17 近接基坑工程非对称失稳模式拟合图

Fig.17 Fitting diagram of asymmetric instability mode of adjacent foundation pit engineering

随后, 提取了近接基坑工程非对称模型中计算结果, 给出了覆土深度 h_j 分别为 5、11、13、17 m, 近接距离 b_j 在 1~23 m 范围内的既有结构侧稳定性安全系数, 见图 18。无既有结构侧的土体稳定性安全系数为 1.636。

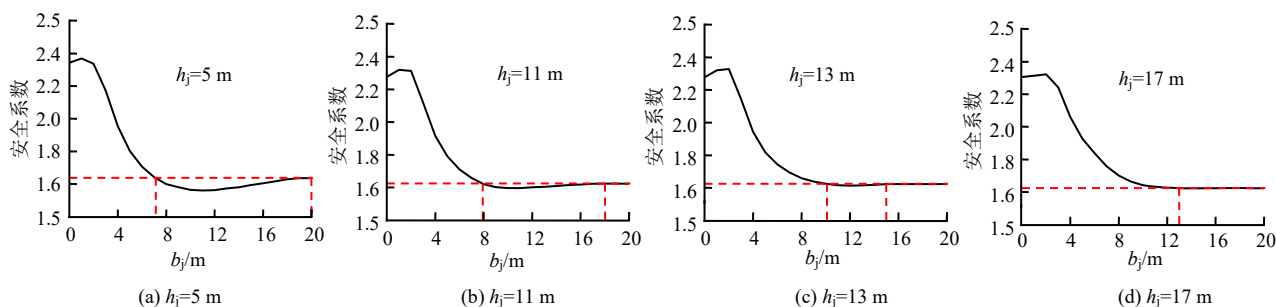


图 18 安全系数变化图

Fig.18 Safety factor change diagrams

由图 18 可知, 在基坑深度 H 和挡墙嵌固深度 D 分别为 25 m 和 10 m 的条件下, 既有地铁车站覆土

厚度 5、11、13 m 时, 滑移面在既有地铁车站侧的近接范围分别为 7.14~20.00、7.91~18.00、10.10~

15.00 m。既有地铁车站覆土厚度达到 17 m 时, 滑移面将不在既有地铁车站侧。根据以上范围可知, 随着既有地铁车站覆土厚度的增加, 滑移面在既有地铁车站侧的近接范围逐渐减少且起始位置外移。

7 结 论

针对既有地铁车站近接增建基坑工程的有限土体失稳模式问题, 本文采用数值方法分析了近接基坑工程对称/非对称土体滑移面情况, 总结了近接基坑工程对称/非对称土体失稳模式, 探究了基坑内支撑数量、基坑与既有地铁车站空间位置关系、基坑深度对滑移面的影响规律。通过以上研究, 得到以下主要结论:

(1) 针对近接基坑工程对称失稳模式, 不同的基坑与既有地铁车站的空间位置, 出现了 6 种滑移面形状, 在这 6 种情况当中, 分为两大类, 一类属于有限土体情况, 包括: 与既有地铁车站靠近基坑一侧底端相交、与既有地铁车站靠近基坑一侧的侧墙相交、与既有地铁车站靠近基坑一侧的顶端相交; 另一类属于无限土体情况, 包括分别从既有地铁车站下侧穿过、与既有地铁车站远离基坑一侧的底端相交、从既有地铁车站和基坑中间穿过。近接基坑工程对称失稳模式可总结为 6 种。

(2) 针对近接基坑工程对称滑移面情况, 随着内支撑数量的增加, 滑移体范围不断扩大, 且起始位置在围护结构中不断下移, 滑移面也从一道变为了两道, 有限土体稳定性安全系数逐渐增加。随着基坑深度的增加, 滑移体的范围先增大后减小, 有限土体稳定性安全系数逐渐减小。

(3) 针对近接基坑工程非对称失稳模式, 不同的基坑与既有地铁车站的空间位置, 出现了 3 种滑移面形状, 分别是在无既有地铁车站侧、在既有地铁车站侧、同时出现在基坑两侧。近接基坑工程非对称失稳模式可总结为 3 种。

(4) 针对近接基坑工程非对称滑移面情况, 当既有地铁车站覆土厚度较小时, 随着近接距离的增加, 既有地铁车站侧土体稳定性先减小后增加, 最终趋于稳定; 当既有地铁车站覆土厚度较大时, 随着近接距离的增加, 既有地铁车站侧土体稳定性逐渐减小, 最终趋于稳定; 随着既有地铁车站覆土厚度的增加, 滑移面在既有地铁车站侧的近接范围逐渐减少且起始位置外移。

(5) 针对相似工程, 可根据既有地铁车站与基坑空间位置关系及破坏模式适用条件找出潜在滑移面, 为地层的加固范围提供理论基础。

(6) 针对北京地铁宣武门换乘车站改扩建工程, 应重点关注地铁车站靠基坑侧及上方土体变形, 必要时可采取加固措施, 对靠近基坑底部围护结构以及第 3、4 道内支撑加强监控量测。

参 考 文 献

- [1] 张振波, 周佳迪, 孙明磊, 等. 近接增建基坑有限土体土压力计算方法探究[J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20(6): 2091-2101.
ZHANG Zhen-bo, ZHOU Jia-di, SUN Ming-lei, et al. Finite soil pressure calculation method of excavation closing to existing underground structure[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2023, 20(6): 2091-2101.
- [2] ZHANG Z B, ZHOU J D, XU F, et al. Calculation method of the finite soil pressure for a new foundation pit adjacent to an existing subway station[J]. *Applied Sciences*, 2023, 13(3): 1-19.
- [3] YANG M H, DENG B. Simplified method for calculating the active earth pressure on retaining walls of narrow backfill width based on DEM analysis[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2019, 1507825.
- [4] CHEN F Q, LIN Y J, LI D Y. Solution to active earth pressure of narrow cohesionless backfill against rigid retaining walls under translation mode[J]. *Soils and Foundations*, 2019, 59(1): 135268245.
- [5] CHEN F Q, CHEN H B, XU L, et al. Seismic pseudo-static active earth pressure of narrow granular backfill against an inverted T-type retaining wall under translational mode[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2022, 152: 107018.
- [6] YANG M H, TANG X C, WU Z Y. Slip surface and active earth pressure of cohesionless narrow backfill behind rigid retaining walls under translation movement mode[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2020, 20(8): 219501208.
- [7] XU L W, LIN Y E J. Experimental study on the active earth pressure of narrow cohesionless backfills against rigid retaining wall under the translation mode[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2020, 8889749.
- [8] 邓波, 杨明辉, 赵明华. 主动平移模式下墙后非饱和砂土破坏模式及侧向土压力分布试验研究[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(1): 94-102.

- DENG Bo, YANG Ming-hui, ZHAO Ming-hua. Experimental study on failure mode and lateral earth pressure distribution of unsaturated sand behind retaining walls under active translation mode[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2023, 45(1): 94-102.
- [9] 邓波, 杨明辉, 王东星, 等. 刚性挡墙后非饱和土破坏模式及主动土压力计算[J]. 岩土力学, 2022, 43(9): 2371-2382.
- DENG Bo, YANG Ming-hui, WANG Dong-xing, et al. Failure mode and active earth pressure calculation of unsaturated soil behind rigid retaining wall[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2022, 43 (9): 2371-2382.
- [10] 张恒志, 徐长节, 梁禄钜, 等. RB 模式下刚性挡墙有限土体主动土压力的离散元模拟与理论研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(10): 2895-2907.
- ZHANG Heng-zhi, XU Chang-jie, LIANG Lu-ju, et al. Discrete element simulation and theoretical study of active earth pressure against rigid retaining walls under RB mode for finite soils[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2021, 42(10): 2895-2907.
- [11] LAI F W, YANG D Y, LIU S Y, et al. Towards an improved analytical framework to estimate active earth pressure in narrow $c-\phi$ soils behind rotating walls about the base[J]. **Computers and Geotechnics**, 2022, 141: 104544.
- [12] 王崇宇, 刘晓平, 曹周红, 等. 刚性墙后有限宽度土体主动滑裂面特征试验研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(11): 2943-2952.
- WANG Chong-yu, LIU Xiao-ping, CAO Zhou-hong, et al. Experimental study on characteristics of active slip surface of limited width soil behind rigid wall[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2021, 42(11): 2943-2952.
- [13] 王崇宇, 刘晓平, 张家强, 等. 刚性墙后有限宽度土体被动滑裂面特征试验研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(7): 1839-1849.
- WANG Chong-yu, LIU Xiao-ping, ZHANG Jia-qiang, et al. Experimental study on passive slip surface of limited width soil behind a rigid wall[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2021, 42(7): 1839-1849.
- [14] CHEN F Q, LIN Y J, YANG J T, et al. Passive earth pressure of narrow cohesionless backfill against rigid retaining walls rotating about the base[J]. **International Journal of Geomechanics**, 2020, 60(5): 1226-1240.
- [15] YANG D Y, LAI F W, LIU S Y. Earth pressure in narrow cohesive-fictional soils behind retaining walls rotated about the top: an analytical approach[J]. **Computers and Geotechnics**, 2022, 149: 104849.
- [16] 杨明辉, 戴夏斌, 赵明华, 等. 墙后有限宽度无黏性土主动土压力试验研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(1): 131-137.
- YANG Ming-hui, DAI Xia-bin, ZHAO Ming-hua, et al. Experimental study on active earth pressure of cohesionless soil with limited width behind retaining wall[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2016, 38(1): 131-137.
- [17] 方焘, 杨思敏, 徐长节, 等. 浸水条件下有限土体土压力试验研究与数值分析[J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15(6): 1699-1708.
- FANG Dao, YANG Si-min, XU Chang-jie, et al. Experimental research and numerical analysis on active soil pressure of limited soil under water immersion[J]. **Chinese Journal of Underground Space and Engineering**, 2019, 15(6): 1699-1708.
- [18] LIN Y J, CHEN F Q, LV Y P. Analytical solutions for the earth pressure of narrow cohesive backfill with retaining walls rotating about the top[J]. **Acta Geotechnica**, 2021, 16: 2975-2995.
- [19] 张明远, 杨小平, 刘庭金. 临近地铁隧道的基坑施工方案对比分析[J]. 地下空间与工程学报, 2011, 7(6): 1203-1208.
- ZHANG Ming-yuan, YANG Xiao-ping, LIU Ting-jin. Comparative analysis of construction schemes for foundation pit excavation adjacent to subway tunnel[J]. **Chinese Journal of Underground Space and Engineering**, 2011, 7(6): 1203-1208.
- [20] 夏祥忠. 深基坑开挖对临近既有刚性支挡结构的影响分析及研究[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2017.
- XIA Xiang-zhong. Analysis and study on the influence of deep foundation pit excavation on existing rigid support structure[D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2017.
- [21] 肖同刚. 基坑开挖施工监控对临近地铁隧道影响分析[J]. 地下空间与工程学报, 2011, 7(5): 1013-1017.
- XIAO Tong-gang. Analysis on effect of deep-pit excavation and monitoring on neighboring metro tunnel in soft ground[J]. **Chinese Journal of Underground Space and Engineering**, 2011, 7(5): 1013-1017.

- [22] 冯龙飞, 杨小平, 刘庭金. 紧邻地铁侧方深基坑支护设计及变形控制[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(6): 1581-1587.
- FENG Long-fei, YANG Xiao-ping, LIU Ting-jin. Supporting design and deformation control of deep excavation adjacent to the metro side[J]. **Chinese Journal of Underground Space and Engineering**, 2015, 11(6): 1581-1587.
- [23] 曾远, 李志高, 王毅斌. 基坑开挖对邻近地铁车站影响因素研究[J]. 地下空间与工程学报, 2005, 1(4): 642-645.
- ZENG Yuan, LI Zhi-gao, WANG Yi-bin. Research on influencing factors of deep excavation adjacent to subway station[J]. **Chinese Journal of Underground Space and Engineering**, 2005, (4): 642-645.
- [24] 朱正锋, 陶学梅, 谢弘帅. 基坑施工对运营地铁隧道变形影响及控制研究[J]. 地下空间与工程学报, 2006, 2(1): 128-131.
- ZHU Zheng-feng, TAO Xue-mei, XIE Hong-shuai. The influence and control of dip excavation on deformation of operating metro tunnel[J]. **Chinese Journal of Underground Space and Engineering**, 2006, 2(1): 128-131.
- [25] 唐长东, 杨小平, 刘庭金. 紧贴地铁车站单侧深基坑的施工方案对比研究[J]. 地下空间与工程学报, 2013, 9(5): 1121-1126.
- TANG Chang-dong, YANG Xiao-ping, LIU Ting-jin. Study on construction scheme of one-side foundation pit engineering adjacent to metro station[J]. **Chinese Journal of Underground Space and Engineering**, 2013, 9(5): 1121-1126.
- [26] 谢秀栋, 刘国彬, 李志高, 等. 邻近运营地铁车站基坑开挖土层位移特性分析[J]. 地下空间与工程学报, 2007, 3(4): 742-744.
- XIE Xiu-dong, LIU Guo-bin, LI Zhi-gao, et al. Analysis of soil layers displacement characteristics in foundation pit adjacent to subway station[J]. **Chinese Journal of Underground Space and Engineering**, 2007, 3(4): 742-744.
- [27] 卞荣, 贺雷, 严远忠, 等. 基坑围护结构变形对邻近既有隧道的影响及其安全保护距离研究[J]. 建筑结构, 2021, 51(增刊 2): 1532-1537.
- BIAN Rong, HE Lei, YAN Yuan-zhong, et al. Study on the influence of the deformation of the foundation pit supporting structure on the adjacent existing tunnel and the safety protection distance[J]. **Building Structure**, 2021, 51(Suppl.2): 1532-1537.
- [28] 陈保国, 贾曾潘. 近接建筑荷载作用下阳角型深基坑最佳支撑位置[J]. 岩土力学, 2023, 44 (8): 2400-2408.
- CHEN Bao-guo, JIA Zeng-pan. Optimal strut position of deep foundation pit with convex corner under surcharge of adjacent building[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2023, 44 (8): 2400-2408.
- [29] 赖丰文, 刘松玉, 杨大禹, 等. 有限宽度填土挡墙主动土压力的普适解法[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(3): 483-491.
- LAI Feng-wen, LIU Song-yu, YANG Da-yu, et al. Generalized solution to active earth pressure exerted onto retaining wall with narrow backfills[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2022, 44(3): 483-491.
- [30] SRIKAR G, MITTAL S. Analysis of retaining wall built near rock face for different wall movements[J]. **Indian Geotechnical Journal**, 2021, 51(6): 1374-1383.
- [31] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50911—2013 城市轨道交通工程监测技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. GB 50911—2013 Code for monitoring measurement of urban rail transit engineering[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014.