

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2022.06.012

非对称开挖局部构件失效对支护体系的影响

魏焕卫,武 韬

(山东建筑大学土木工程学院,山东 济南 250101)

摘要: 针对非对称开挖基坑长度方向由局部破坏引发的基坑连续性倒塌问题,利用三维有限元软件 PLAXIS 3D,采用构件拆除法对非对称开挖基坑局部构件失效情况下整体支护体系的响应进行了分析。结果表明:支撑失效后,位于失效区的桩产生卸荷效应,土压力降低,而邻近失效区反之,最近的未失效支撑处桩身弯矩增加较大;在支护桩失效后,失效桩同侧的未失效桩桩后土压力和弯矩显著上升,异侧减小;深侧桩通过支撑对浅侧桩产生向基坑外的推挤作用,深侧桩失效后,浅侧桩出现反推挤现象;土体最大沉降量浅侧较深侧小,沉降量随失效桩数增加愈来愈大而沉降范围基本不变;挖深差愈大土压力变化系数及弯矩传递系数愈大;挖深分界线改变对土压力及桩身弯矩影响均很小。提出了考虑连续性破坏时对支护桩配筋弯矩放大以提高支护结构冗余度的设计方法。

关键词: 基坑;支护体系;非对称开挖;局部失效;冗余度

中图分类号: TU473 文献标志码: A 文章编号: 1000-1980(2022)06-0092-09

Influence of local component failure on retaining system under asymmetric excavation

WEI Huanwei, WU Tao

(School of Civil Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China)

Abstract: Asymmetric excavation has become increasingly common with the development of construction and the progressive collapse caused by the local component failure has attracted many attentions. Aiming at this problem, the three-dimensional finite element software PLAXIS 3D is adopted to analyze the response of the whole retaining system to the asymmetric excavation after local component failure through the method of removing component. The results show that when the braces fail, the earth pressure of piles decreases in the failed area because of the unloading effect but is opposite in the adjacent area. Meanwhile, the moments of piles near intact braces increase greatly. The earth pressure and moment of piles on the same side of the failed piles increase greatly, while on the opposite side they decrease as piles get failed. Piles on the deep side push piles on the shallow side through braces, but the displacement reverses when piles on the deep side failed. The value of soil settlement on the shallow side is less than that on the deep side and increases with the increasing number of failed piles, but the range of settlement almost keeps unchanged. Earth pressure variation coefficient and moment transfer coefficient get surge when the depth difference increases. In addition, the change of depth boundary line has little effect on the earth pressure and pile moment. Finally, a design method is proposed to improve the redundancy of supporting structure through enlarging the reinforcement moment of piles.

Key words: foundation pit; retaining system; asymmetry; local failure; redundancy

近年来,随着基坑工程的发展,建筑基坑的种类不断增加,两侧挖深不同的非对称开挖基坑越来越常见。基坑支护结构出现初始的局部构件破坏后,支护体系改变原有的传力路径,最终达到新的平衡状态,该过程会有更多的构件被不断地破坏,称为连续性破坏。在土木工程领域,冗余度被认为是结构抵抗连续性破坏的能力^[1],拥有充足冗余度的结构即使出现构件的初始破坏也不会发展为大范围、后果严重的连续性破坏。国内外已有多个基坑连续性破坏的案例^[2-5],造成了巨大的经济损失,因此基坑的抗连续性破坏问题已引起很多关注。

胡强等^[6]建立了深基坑支撑杆件的功能函数,运用几何法进行了基坑支撑杆件的可靠度分析。薛秀丽

基金项目: 山东省自然科学基金(ZR2012EEM016);国家自然科学基金(41272281)

作者简介: 魏焕卫(1974—),男,教授,博士,主要从事基坑工程变形控制及地基基础加固研究。E-mail:13181718169@163.com

引用本文: 魏焕卫,武韬. 非对称开挖局部构件失效对支护体系的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(6):92-100.

WEI Huanwei, WU Tao. Influence of local component failure on retaining system under asymmetric excavation[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2022,50(6):92-100.

等^[7]指出,基坑开挖前降水造成的围护结构侧移量在最大允许侧移量中占比较大,并研究了开挖前降水条件下基坑围挡结构-地层相互作用机制。程雪松等^[8]采用显示有限差分法、离散元法及模型试验对局部支护结构失效下土压力和支护结构受力情况进行了分析。郑刚等^[9-10]对钢支撑排桩基坑、存在空间效应的悬臂桩基坑进行了模拟及试验研究,指出其在局部破坏下的连续性破坏机理。雷亚伟^[11]对内撑式和桩锚式排桩支护基坑的连续性破坏机理及控制进行了研究,提出阻断单元法及其在悬臂、内撑式及桩锚式排桩支护基坑中的具体设计原则,并采用有限差分法进行了应用模拟与验证。郑刚等^[12]、徐长节等^[13]分别对非对称基坑分布降水开挖引起的围护结构变形及非对称开挖基坑变形进行了数值模拟分析,指出非对称开挖基坑的变形性状特点。卢灏^[14]对非对称基坑支护结构受力性能进行了分析,提出了非极限状态下土压力计算优化的建议。由相关研究成果可见,目前对非对称开挖基坑的连续性破坏分析较少。

本文利用三维有限元软件 PLAXIS3D,采用构件拆除法对非对称开挖基坑在不同条件下局部构件失效进行了模拟,并对整体支护体系的响应进行了分析,提出了考虑连续性破坏时对支护桩配筋弯矩放大以提高支护结构冗余度的设计方法。

1 计算模型

1.1 数值模拟模型的建立

为研究非对称开挖基坑长度方向由局部构件失效引发的连续性破坏机理,利用三维有限元软件 PLAXIS 3D 建立基坑模型进行分析。基坑模型的平面尺寸为 60 m×15 m,浅侧挖深初步取为 8 m,基坑开挖影响范围通常为 3~4 倍基坑挖深,模型土体深度为 60 m,最终确定该模型的尺寸如图 1 所示。模型采用单一且均质的土层。为更好地考虑土体在初始加载和卸载-重加载过程中刚度的不同,选取土体硬化模型为本构模型。土体容重为 17 kN/m³,黏聚力 $c=25$ kPa,内摩擦角 $\varphi=17^\circ$,三轴固结排水试验割线模量 $E_{s0}=8\,000$ kPa,切线模量 $E_{oed}=8\,000$ kPa,卸载再加载模量 $E_{ur}=40\,000$ kPa。采用排桩内支撑支护结构,排桩桩径 1 000 mm,桩间距 1 000 mm,桩长 22 m,根据等刚度原则,将支护桩等效替换为板桩墙,计算可得板桩墙厚度为 665 mm。基坑模型为对称结构,对称面为 xOz 面,故仅取模型一半进行分析。将支护桩及支撑从基坑对称面沿 y 坐标值增大方向依次命名桩 1~15 号和支撑 1~6 号。将板桩墙沿基坑长度方向等分为 15 段,每一小段代表一根支护桩,取每一小段中点处 y 坐标值,用来提取桩后土压力及桩身弯矩。在地面标高 0 m 处设冠梁及一道钢筋混凝土支撑,支撑间距 5 m,弹性模量 $E=36$ GPa。冠梁的截面尺寸为高 800 mm,宽 1 200 mm;内支撑截面尺寸为高 800 mm,宽 1 000 mm。基坑模型如图 1 所示,不考虑地下水的影响。综合考虑计算速度与精度,对基坑进行局部网格加密。

1.2 模拟方法

实际工程中,支护结构的局部构件可能会由于设计缺陷、施工质量问题或偶然荷载等情况遭到破坏,失去原有的支护作用,导致整体结构受力发生变化,进而引发连续性的整体破坏。本文利用构件拆除法模拟初始支护构件失效来研究非对称开挖基坑不同工况下深、浅侧支护结构受到的影响及其变化规律。

- a. 初始工况:浅侧开挖 8 m,在距浅侧 5 m 处为挖深分界线,挖深差 2 m,分界处采用 1:1 放坡。
- b. 算例 1:分别拆除对称面处 1、2、3 根支撑。
- c. 算例 2:分别拆除开挖较深侧的 2、4、6 根桩。
- d. 算例 3:分别拆除开挖较浅侧的 2、4、6 根桩。
- e. 算例 4:在挖深差分别为 2 m、4 m、6 m 的情况下拆除深侧 2 根桩(图 2(a))。
- f. 算例 5:在距浅侧 5 m、7 m、9 m 为挖深分界线的情况下拆除深侧 2 根桩(图 2(b))。

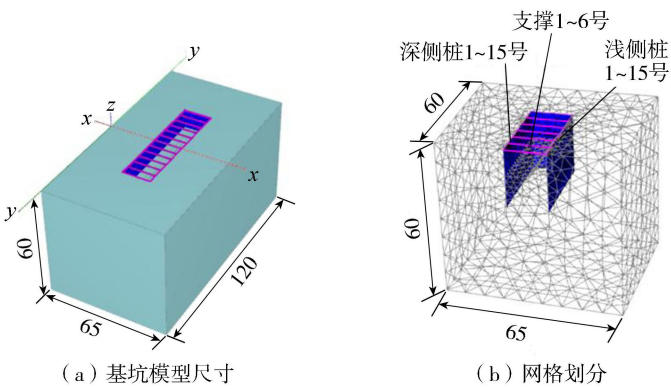


图1 基坑有限元模型及分析网格(单位:m)
Fig.1 Finite element model of excavation and meshes(unit:m)

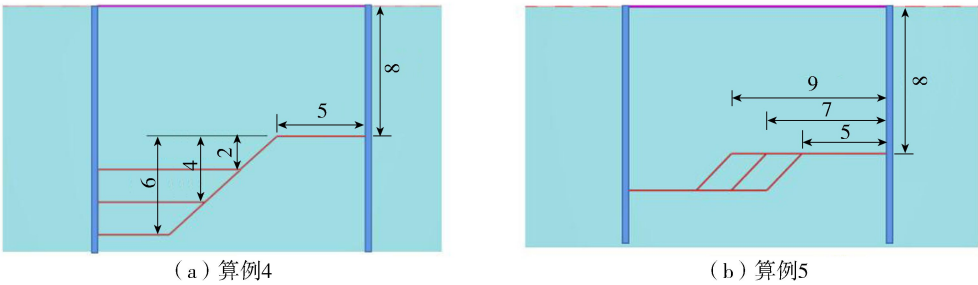


图 2 算例 4、5 中基坑分析模型 (单位 : m)
Fig. 2 Excavation analysis model in example 4 and example 5 (unit : m)

2 连续性破坏传递机理分析

2.1 支撑失效情况

2.1.1 桩后土压力

图 3 为算例 1 中不同数量支撑失效情况下深、浅两侧桩后深度 3 m 处土压力变化系数(相应构件失效情况下土压力大小与失效前土压力大小的比值,本文土压力深度均为桩后-3 m 处)。由图 3 可知,在局部支撑失效时,邻近失效支撑区的深、浅侧桩桩后土压力都受到不同程度的影响,且影响程度随着失效支撑数量的增多而增大。在距离失效支撑较近区域的支护桩,无论深侧还是浅侧,都出现了土压力减小的现象,而较远区域的桩后土压力则出现增大的现象,且增减程度随着失效支撑数量的增多而增大。在 1、2、3 根支撑失效时,邻近区域桩后土压力最小值分别减小为原来的 0.85、0.58 和 0.3,较远区域桩后土压力最大值分别增加至原来的 1.02 倍、1.13 倍和 1.25 倍。桩后土压力所受影响范围也随着失效支撑的增多而增大,影响范围在 1、2、3 根支撑失效时分别约为 11 m、16 m 和 18 m。

分析其原因为:支撑失效后,支护桩侧移刚度降低,邻近失效支撑区域的支护桩发生向坑内的位移,位移通过冠梁的协调作用传向远处的桩,使得排桩整体向坑内偏移,桩后土体出现失稳滑动趋势,支撑失效数量越多,滑动范围越大,滑动趋势越明显。失稳滑动土体外侧水平面上主应力方向发生偏转,最大主应力方向平行于失稳滑动土边缘,形成土拱效应^[8],使得失效支撑远处的桩后土压力增大,且离失效支撑越近,土拱效应越明显。但在失效支撑附近区域的支护桩侧移刚度由于支撑失去作用而大幅度减小,产生较大的位移,桩后土体沉降明显,导致作用在桩后的土压力有所降低,即产生卸荷效应。深侧桩由于挖深较深,从而侧移刚度较浅侧小,较大的侧移量产生较强的卸载效应使得桩后土压力减少量大于浅侧而增加量小于浅侧。

2.1.2 桩身最大弯矩

定义基坑局部构件失效引起桩身最大弯矩与失效前桩身最大弯矩比值为弯矩传递系数 $I^{[8]}$ 。图 4 为算例 1 深、浅两侧桩身弯矩传递系数。受土压力变化的影响,桩身弯矩的变化趋势与土压力变化趋势大致相同——失效支撑区桩身最大弯矩减小,邻近失效支撑区最大弯矩增大,且随着距离变远,桩身最大弯矩增大程度减小。这是因为在 1 号支撑失效时,失效支撑区支护桩的作用力会通过冠梁传至邻近的支撑,导致 2 号支撑轴力增加,称为支撑失效荷载传递的就近现象^[7],造

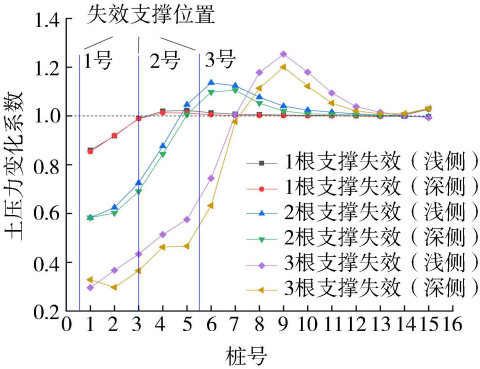


图 3 算例 1 深、浅两侧支护桩后土压力变化系数

Fig. 3 Curves of earth pressure change coefficient in example 1

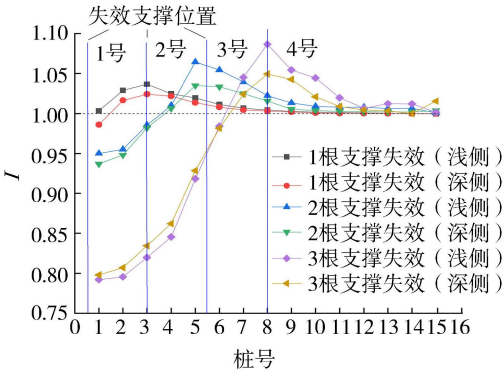


图 4 算例 1 深、浅两侧支护桩及桩身弯矩传递系数曲线

Fig. 4 Curves of moment transfer coefficient in example 1

成 2 号支撑邻近区域桩身弯矩增大,且增大效果的影响超过了桩身侧移引起的卸荷效果的影响,使得该区域桩身最大弯矩增大。同理可观察到当 2 号、3 号支撑相继失效时,在 3 号、4 号邻近区域的桩身最大弯矩增大,且随着失效支撑数量的增多,通过冠梁传递的荷载也就越多。在 1、2、3 根支撑分别失效时桩身最大弯矩增量分别达到 4%、7% 和 9%。浅侧桩较大的侧移刚度使得弯矩传递系数略高于深侧桩。

由上述分析可知,支撑失效情况下,在失效支撑区的支护桩不易发生受弯破坏;而邻近失效支撑区的支护桩和相邻失效支撑区则需要充分的冗余度来抵抗连续性破坏的发生,且支撑失效更易引起浅侧桩的受弯破坏。

2.2 支护桩失效情况

2.2.1 冠梁水平位移

根据 GB 50497—2019《建筑基坑工程检测技术标准》,不论基坑安全等级为几级,均应对围护墙顶部水平位移进行监测,以判定基坑支护结构的稳定性。对于非对称开挖基坑,由于深、浅两侧支护结构的受力差异,因此顶部冠梁位移与对称基坑也不相同。

冠梁初始位移及算例 2 冠梁的位移增量(以向基坑内为正)曲线如图 5 所示。在初始工况下,深侧冠梁位移量为正值,向基坑内移动,在坑角处位移出现负值,向坑外移动。浅侧冠梁受深侧传来的推挤作用,发生向坑外的位移,邻近坑角处则出现向坑内的位移。

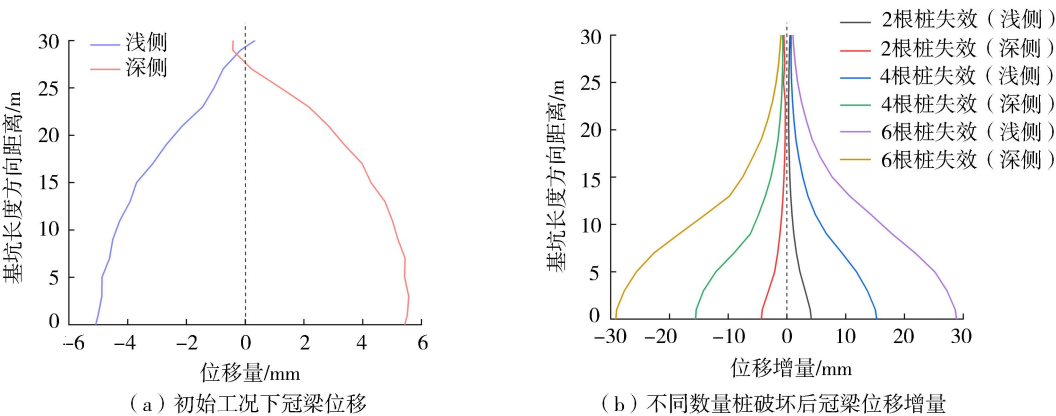


图 5 冠梁初始位移及算例 2 冠梁位移增量

Fig. 5 Initial displacement of top-beam and displacement increment in example 2

深侧桩失效的情况下,来自支护桩的作用力降低,浅侧桩出现反推挤现象,使得深侧冠梁整体发生向坑外的位移而浅侧冠梁发生向坑内的位移。失效桩越多,反推挤现象越明显。深、浅两侧冠梁的最大位移增量均约为 29 mm。对于一级基坑,支护结构墙顶位移限值为 30 mm,侧向支护体系存在位移超限的风险。当基坑宽度减小而内支撑截面尺寸不变时,内支撑长度减小,抗弯刚度增大,来自浅侧桩的反推作用在水平方向产生了相对于较宽基坑更大的位移分量,从而对深侧桩的反推挤效果更明显。

2.2.2 支护桩后土压力

实际工程中,深侧桩最大桩身弯矩大于浅侧桩,且基坑中部支护桩的弯矩较大,在设计强度不足或施工质量存在问题的情况下易先破坏(假设支护桩破坏为受弯破坏)。浅侧桩桩后土压力引起的桩身弯矩小于深侧,但仍可能由于设计缺陷等原因引起连续性破坏造成损失,因此对浅侧桩失效后的连续性破坏传递亦需重视。

图 6 为算例 2、3 不同数量深侧桩失效情况下桩后土压力变化系数曲线。从图 6 可见,在深侧 2、4、6 根支护桩失效时,作用在深侧未失效支护桩的土压力显著上升,最大上升量分别达 50%、60% 和 110%。随着未失效支护桩距离的增加,土压力增量显著下降。这是因为支护桩失效后失效区的土体产生较大的位移和变形,引发周围未失效区土体形成显著的土拱效应,使得未失效支护桩的桩后土压力大幅上涨,而距离坑角较近的支护桩由于空间效应^[10],土体以及支护桩的变形在局部构件失效情况下所受的影响都较小,从而土压力变化较小。位于浅侧的支护桩桩后土压力均出现减小现象,且与失效桩桩号相同的浅侧区域减小较为明显,在 6 根支护桩失效时桩后土压力最大减小量为 50%。在非对称开挖的基坑中,内支撑对深、浅侧支护

桩的受力及变形进行协调,深侧支护桩由于挖深大、变形大,通过内支撑对浅侧桩产生了向基坑外的推挤作用;深侧桩在失效的情况下,作用在冠梁的力减小,由支撑对浅侧桩产生的推挤作用降低,使得浅侧桩产生向基坑内的位移增量,并通过冠梁协调转向更远处,浅侧桩整体出现卸荷效应,桩后土压力降低。在浅侧桩失效情况下,靠近失效支护桩的同侧桩桩后土压力显著上升,增量沿着长度方向递减,异侧桩桩后土压力则减小,且土压力变化系数也与深侧桩失效后基本一致。

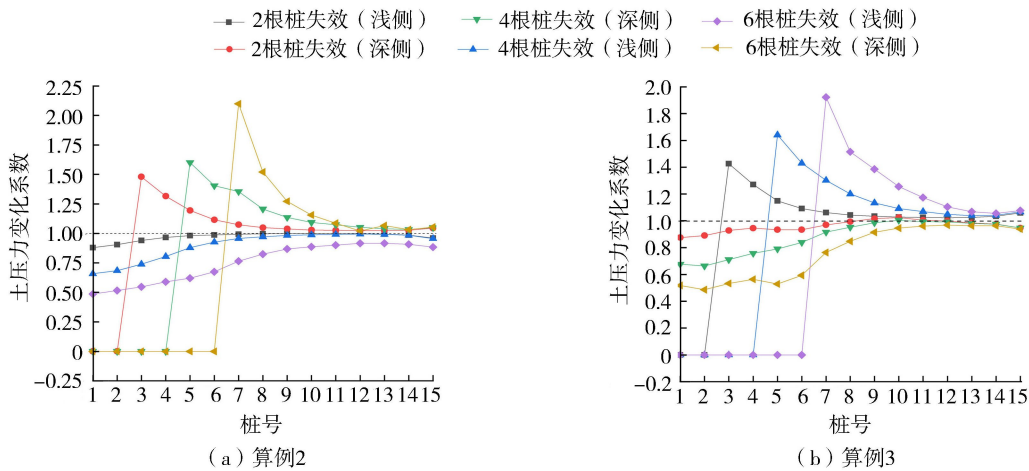


图6 算例2、3下两侧支护桩桩后土压力变化系数曲线
Fig. 6 Curves of earth pressure change coefficient in example 2 and 3

2.2.3 桩身最大弯矩

图7为算例2、3不同数量支护桩失效情况下深、浅两侧支护桩桩身弯矩传递系数。由图7可见,支护桩失效情况下弯矩传递系数变化曲线与土压力变化系数曲线趋势高度一致。深侧桩失效情况下土拱效应造成土压力显著上升,引起邻近未失效支护桩桩身最大弯矩激增,增幅分别为33%、47%、59%。浅侧桩向坑内位移发生卸荷效应,造成桩后土压力降低,从而引起桩身弯矩降低。相比于深侧桩,浅侧桩在失效后同侧及对侧的最大桩身弯矩变化呈相同的变化趋势,且弯矩传递系数大小十分接近,在4根、6根支护桩失效情况下差别仅约0.1。可见非对称开挖基坑深、浅两侧支护结构都必须具有足够的冗余度来抵抗连续性破坏的发生。

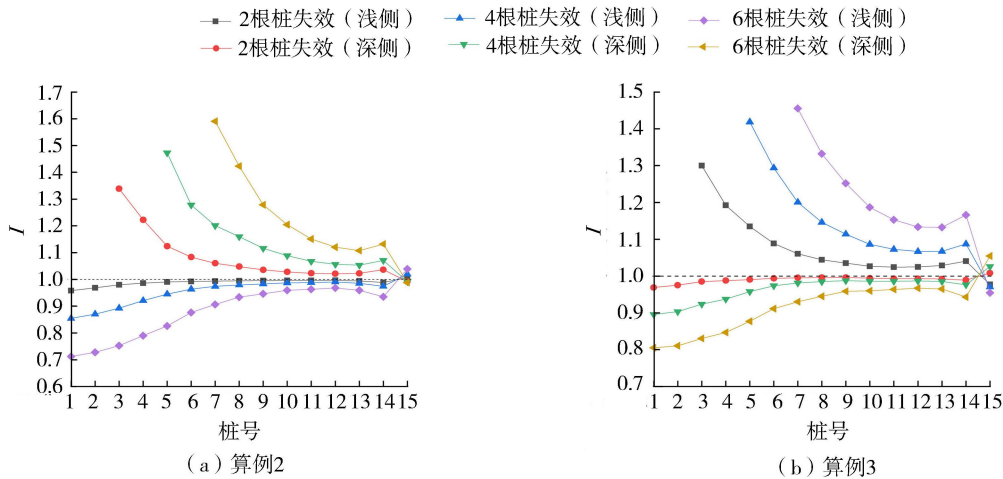


图7 算例2、3深、浅两侧支护桩桩身弯矩传递系数变化曲线
Fig. 7 Curves of moment transfer coefficient in example 2 and 3

由分析得知,在支护桩局部失效的情况下会引起同侧的未失效桩破坏风险增大,而位于异侧的支护桩反而在受弯破坏方面更为安全。在沿基坑长度方向发生的连续性破坏问题中,距离局部破坏位置越近的支护桩,其所受影响越严重。为了较好地推断连续性破坏发生的可能性,令支护桩受拉钢筋达到抗拉极限强度时桩身最大弯矩与支护桩的设计弯矩比值为桩身安全系数 $K^{[8]}$,并与 I 进行对比,当 $I < K$ 时,局部破坏引起

的邻近未失效支护桩的弯矩增大而未达到桩身所能承受的极限弯矩,则连续性破坏不会发生。由于浅侧桩整体呈现最大弯矩减小的现象,所以不做研究。根据 GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》,对于二级基坑,支护桩设计所取基本组合的荷载综合分项系数 γ_F 不小于 1.25(取 1.25),结构重要性系数 $\gamma_0=1.0$,采用 HRB400 钢筋,钢筋极限抗拉强度与抗拉强度设计值比值为 1.5,则 $K=1.875$ 。由图 7 可知,当 2、4、6 根支护桩失效情况下, I 分别为 1.34、1.47、1.59,均不会发生连续性破坏。

2.2.4 土体竖向位移

如图 8 所示,支护桩失效后基坑深、浅两侧土体均发生较大范围的沉降,深、浅两侧坑边土体随着失效桩数的增加沉降量愈来愈大,最大沉降增量依次约为 45 mm、75 mm。由于浅侧桩嵌固深度大,对土体向坑内的位移约束较强,导致浅侧 6 根支护桩失效后最大沉降量为 91 mm,小于深侧桩失效后的 160 mm。土体的沉降区域大小随着失效支护桩数的增多变化并不明显。

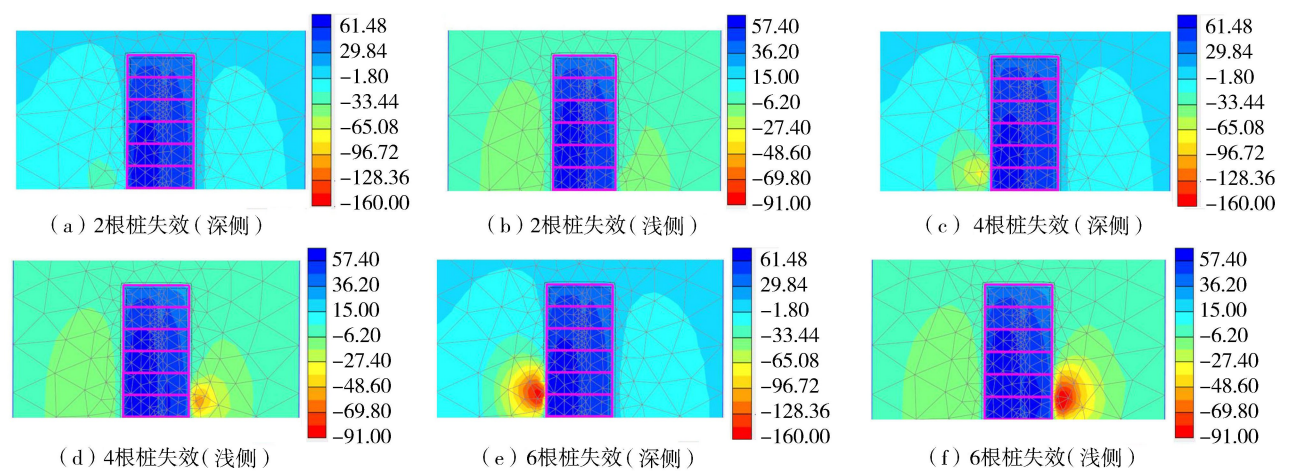


图 8 算例 2、3 土体竖向位移(单位:mm)

Fig.8 Vertical displacement of soil in example 2 and 3(unit:mm)

2.3 不同挖深差情况

实际工程中,由于建筑结构的不同往往需要非对称开挖基坑具有不同大小的挖深差,而挖深差的改变也将对局部破坏情况下支护体系的响应和连续性破坏的发生产生不同程度的影响。

如图 9 所示,对于算例 4,当挖深差增大时,深侧桩嵌固深度减小,作用在深侧桩的主动区土压力增大,在 2 根支护桩失效的情况下,土拱效应更加显著,邻近支护桩后的土压力变化系数更大,在挖深差 2 m、4 m、6 m 时分别为 1.48、1.89 和 2.28。浅侧桩在挖深差为 2 m 时桩后土压力整体减小,但在 4 m 和 6 m 时出现整体桩后土压力增大的现象,究其原因当挖深差较大时,作用于深侧桩的主动区土压力增大,通过支撑对浅

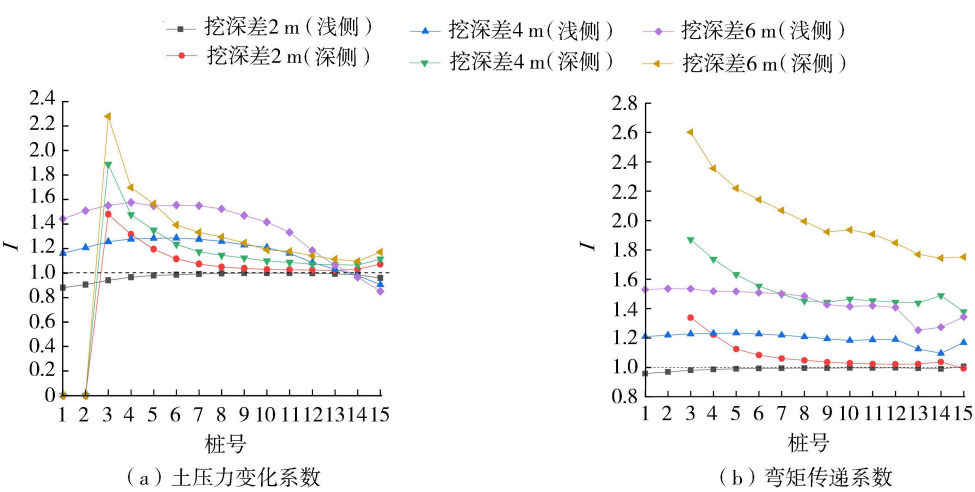


图 9 算例 4 两侧支护桩桩后土压力变化系数及弯矩传递系数曲线

Fig.9 Curves of earth pressure change coefficient and moment transfer coefficient in example 4

侧冠梁推挤作用加强,浅侧冠梁出现向坑外的位移(算例4中浅侧冠梁最大位移(以向基坑内为正)初始工况为-5.10 mm,挖深差为2 m、4 m、6 m时位移分别为-3.45 mm、-8.22 mm和-13.99 mm),从而使得桩后土压力增大。

不论深侧、浅侧,在挖深差增大的情况下弯矩传递系数都有显著增大。同图7,挖深差2 m的情况下浅侧桩由于卸荷效应引起桩身最大弯矩减小,在4 m、6 m挖深差下2根支护桩失效后邻近的未失效桩最大弯矩分别增加了23%、53%,深侧桩则增量更大,分别达到33.8%、87%、160%。且每增加2 m的挖深差,深侧桩的最大弯矩增量更大,从2 m增加到4 m再到6 m,弯矩传递系数增加了0.53、0.73,远大于浅侧的0.25和0.32。

对于浅侧桩,在挖深差为4 m和6 m时,即挖深差较大的情况下,深侧桩承担的主动土压力较大,支撑轴力增大,同时对浅侧桩的推挤作用加强,因而在挖深差较大的情况下,局部支护桩失效引起的深、浅两侧支护桩弯矩传递系数均较大。

开挖深度超过10 m时,基坑为一级基坑, $\gamma_0=1.1, K=2.063$ 。从图9可知,挖深差6 m时,2根支护桩失效引起邻近未失效支护桩弯矩传递系数在3号桩处为2.6,到7号桩处的2.068,均超过桩身安全系数,会发生严重的连续性破坏。

2.4 不同开挖分界线情况

从图10可直观看到,在深侧2根桩失效的情况下,开挖分界线不同对弯矩传递系数的影响十分微小,开挖分界线每向深侧移动2 m,弯矩传递系数最大增量在1%左右。随着开挖分界线向深侧移动,深、浅两侧桩的最大桩身弯矩均小幅增大。这是因为在开挖分界线不断靠近深侧的过程中,基坑内土体不断增多,同一深度自重应力增大,被动区的土抗力增大,对桩身最大弯矩处施加力矩,造成深、浅两侧桩桩身最大弯矩增大。

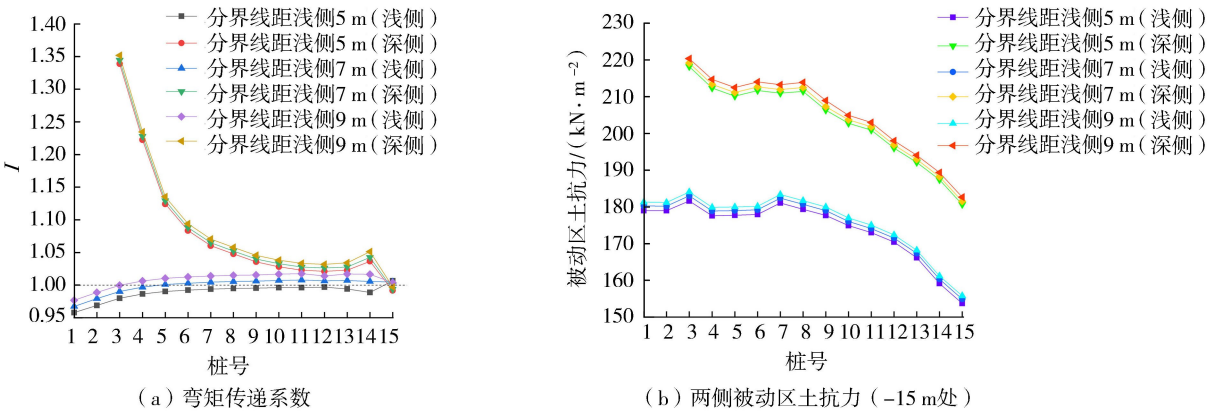


图 10 算例 5 弯矩传递系数曲线及被动区土抗力
Fig. 10 Moment transfer coefficient curves and passive earth pressure in example 5

3 基于冗余度的支护桩设计方法

由分析可知,对于挖深差较大的非对称开挖基坑,在初始支护桩破坏失效后更容易引起连续性破坏,造成严重的工程损失。局部构件失效情况下,弯矩传递系数从基坑中部失效桩处沿长度方向递减,当弯矩传递系数超过桩身安全系数时引起临近桩的破坏。进行支护桩设计时若考虑连续性破坏,可将超出桩身安全系数的弯矩传递系数部分作为设计时的放大系数,将放大系数与支护桩弯矩设计值之积作为最终配筋弯矩对基坑中部若干支护桩进行抗弯承载力计算,使桩身具有一定的承载力储备。

对于沿周边均匀配置纵向钢筋的圆形截面钢筋混凝土支护桩,其正截面受弯承载力应符合下列规定:

$$M \leq \frac{2}{3} f_c A_r \frac{\sin^3 \pi \alpha}{\pi} + f_y A_s r_s \frac{\sin \pi \alpha + \sin \pi \alpha_1}{\pi} \tag{1}$$

式中各项参数见 JGJ 120—2012《建筑基坑支护技术规程》。

考虑连续性破坏后正截面受弯承载力应满足(仅在 $I > K$ 时):

$$(1 + I - K) M \leq \frac{2}{3} f_c A_r \frac{\sin^3 \pi \alpha}{\pi} + f_y A_s r_s \frac{\sin \pi \alpha + \sin \pi \alpha_1}{\pi} \tag{2}$$

在以往相关的研究中,基于不同标准,学者们提出了冗余度表达方式^[15],其中冗余储备因子 R 为结构极限承载力与设计荷载的比值,定义为

$$R = \frac{L_{\text{intact}}}{L_{\text{design}}} \tag{3}$$

式中: L_{intact} 为结构极限承载力; L_{design} 为设计荷载。

假设对算例 4 中基坑中部 1 号、2 号、3 号桩进行加强设计,放大系数均取 2 根桩失效下的 1.532,则此时的 K 为 3.16,远超 2.6。同时对应式(3) L_{intact} 增加而 L_{design} 不变,基坑具备了更大的冗余储备因子,抵抗了连续性破坏的发生。

基于式(2)设计,得到了支护桩极限承载能力的提升,且基坑中部最危险支护桩初始破坏的概率降低,保证了支护结构初始的安全性,同时有足够的冗余度抵抗连续性破坏。

4 结 论

a. 支撑失效后,失效支撑远处的支护桩桩后土由于失稳发生应力偏转,形成土拱效应,从而土压力增大,但失效支撑附近区域桩身位移大,桩后土体沉降明显,桩后土压力降低。深侧桩较大的侧移量产生较强的卸荷效应,使得桩后土压力减少量大于浅侧而增加量小于浅侧。支撑失效下在失效区的支护桩不易发生受弯破坏,而邻近失效区的支护桩和相邻支撑则需要充分的冗余度来抵抗连续性破坏的发生,且支撑失效更易引起浅侧桩的受弯破坏。

b. 支护桩失效时,作用在失效桩同侧的未失效桩桩后土压力显著上升,位于异侧的支护桩桩后土压力均出现减小现象,且与失效桩桩号相同的异侧区域减小较为明显。在非对称开挖的基坑中,深侧桩对浅侧桩产生向基坑外的推挤作用。在深侧桩失效的情况下,浅侧桩向基坑内的位移增量出现卸荷效应,桩后土压力降低。当浅侧桩失效时,深侧桩进一步向浅侧方向推挤,从而产生卸荷效应,使得桩后土压力降低。

c. 深侧桩失效情况下,浅侧桩出现反推挤现象,深侧冠梁整体发生向坑外的位移,而浅侧冠梁发生向坑内的位移。失效桩越多,反推挤现象越明显。基坑宽度减小而内支撑截面尺寸不变时,内支撑长度减小,抗弯刚度增大,浅侧桩的反推作用将在水平方向产生相对于较宽基坑更大的位移分量,从而对深侧桩的反推挤效果更明显。

d. 支护桩失效后基坑两侧土体均发生较大范围的沉降,随着失效桩数的增加,沉降量愈来愈大,最大沉降量浅侧小于深侧。土体的沉降区域大小随失效桩数增多变化并不明显。

e. 挖深差增大时,深侧桩嵌固深度减小,作用在深侧桩的主动区土压力增大,通过支撑对浅侧桩的推挤作用加强。挖深差增大时局部桩失效引起的深、浅两侧桩弯矩传递系数均增大。

f. 深侧桩失效情况下开挖分界线不同对弯矩传递系数影响十分微小。随着开挖分界线向深侧移动,被动区的土抗力增大,对桩身最大弯矩处施加力矩,深、浅两侧桩的最大桩身弯矩均小幅增大。

g. 考虑连续性破坏进行支护桩设计,可将超出桩身安全系数的弯矩传递系数部分作为设计时的放大系数,将放大系数与支护桩弯矩设计值之积作为最终配筋弯矩对基坑中部若干桩进行抗弯承载力计算,使桩身具有足够冗余储备以抵抗连续性破坏的发生。

参考文献:

[1] 肖聪. 深基坑环梁支护结构的内力分析[D]. 武汉:武汉理工大学,2013.

[2] 张旷成,李继民. 杭州地铁湘湖站“08. 11. 15”基坑坍塌事故分析[J]. 岩土工程学报,2010,32(增刊 1):338-342. (ZHANG Kuangcheng, LI Jimin. Accident analysis for ‘08. 11. 15’ foundation pit collapse of Xianghu Station of Hangzhou metro[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(Sup1): 338-342. (in Chinese))

[3] 肖晓春,袁金荣,朱雁飞. 新加坡地铁环线 C824 标段失事原因分析(一):工程总体情况及事故发生过程[J]. 现代隧道技术,2009,46(5):66-72. (XIAO Xiaochun, YUAN Jinrong, ZHU Yanfei. Causation analysis of the collapse on Singapore MRT circle line lot C824 (Part I) -Project background and process of collapse[J]. Modern Tunneling Technology, 2009, 46(5): 66-72. (in Chinese))

[4] 肖晓春,袁金荣,朱雁飞. 新加坡地铁环线 C824 标段失事原因分析(二):围护体系设计中的错误[J]. 现代隧道技术, 2009, 46(6): 28-34. (XIAO Xiaochun, YUAN Jinrong, ZHU Yanfei. Causation analysis of the collapse on Singapore MRT circle

line lot C824 (Part II)-Critical design errors in temporary retaining system[J]. Modern Tunneling Technology,2009,46(6):28-34. (in Chinese))

[5] 肖晓春,袁金荣,朱雁飞. 新加坡地铁环线 C824 标段失事原因分析(三):反分析的瑕疵与施工监测不力[J]. 现代隧道技术,2010,47(1):22-28. (XIAO Xiaochun, YUAN Jinrong, ZHU Yanfei. Causation analysis of Singapore MRT circle line C824 (Part III)-Technically breaching back analysis and insufficient instrumentation[J]. Modern Tunneling Technology,2010,47(1):22-28. ((in Chinese)))

[6] 胡强,郭志川,刘宁,等. 深基坑支撑体系可靠度计算研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2003,31(6):674-677. (HU Qiang, GUO Zhichuan, LIU Ning, et al. Reliability calculation for deep foundation pit support system[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2003,31(6):674-677. (in Chinese))

[7] 薛秀丽,李森坤,曾超峰. 开挖前降水作用下基坑围挡结构-地层相互作用机制[J]. 河海大学学报(自然科学版),2019,47(5):440-446. (XUE Xiuli, LI Miaokun, ZENG Chaofeng. Interaction mechanism between retaining wall and soil under pre-excavation dewatering[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2019,47(5):440-446. (in Chinese))

[8] 程雪松,郑刚,邓楚涵,等. 基坑悬臂排桩支护局部失效引发连续破坏机理研究[J]. 岩土工程学报,2015,37(7):1249-1263. (CHENG Xuesong, ZHENG Gang, DENG Chuhan, et al. Study of the mechanism of progressive collapse induced by partial failure of cantilever contiguous retaining piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2015,37(7):1249-1263. (in Chinese))

[9] 郑刚,雷亚伟,程雪松,等. 局部破坏对钢支撑排桩基坑支护体系影响的试验研究[J]. 岩土工程学报,2019,41(8):1390-1399. (ZHENG Gang, LEI Yawei, CHENG Xuesong, et al. Experimental study on influences of local failure on steel-strutted pile retaining system of deep excavations[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2019,41(8):1390-1399. (in Chinese))

[10] 郑刚,邓楚涵,程雪松,等. 空间效应对悬臂桩支护基坑连续破坏的影响研究[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版),2016,49(10):1016-1026. (ZHENG Gang, DENG Chuhan, CHENG Xuesong, et al. Influence of spatial effect on continuous failure of cantilever pile supported foundation pit[J]. Journal of Tianjin University(Natural Science and Engineering Technology Edition),2016,49(10):1016-1026. (in Chinese))

[11] 雷亚伟. 内撑式和桩锚式排桩支护基坑的连续破坏机理及控制研究[D]. 天津:天津大学,2020

[12] 郑刚,宗超,曾超峰,等. 非对称基坑分步降水开挖引起的围护结构变形性状[J]. 岩土工程学报,2013,35(增刊2):550-554. (ZHENG Gang, ZONG Chao, ZENG Chaofeng, et al. Deformation behavior of retaining structure caused by step dewatering excavation of asymmetric foundation pit[J]. Journal of Geotechnical Engineering,2013,35(Sup2):550-554(in Chinese))

[13] 徐长节,成守泽,蔡袁强,等. 非对称开挖条件下基坑变形性状分析[J]. 岩土力学,2014,35(7):1929-1934. (XU Changjie, CHENG Shouze, CAI Yuanqiang, et al. Analysis of deformation behavior of foundation pit under asymmetric excavation[J]. Geotechnical Mechanics,2014,35(7):1929-1934. (in Chinese))

[14] 卢灏. 非对称基坑支护结构受力性能分析[D]. 南昌:南昌大学,2019.

[15] FRANGOPOL D M, CURLEY J P. Effects of damage and redundancy on structural reliability [J]. Journal of Structural Engineering,1987,113(7):1533-1549.

(收稿日期:2021-12-02 编辑:胡新宇)