

基于冗余度理论的土岩基坑无岩肩吊脚墙 体系可靠度分析*

雷文革¹, 周小涵², 王林枫², 王自强²

(1. 中铁大桥勘测设计院集团有限公司, 湖北 武汉 430050; 2. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045)

[摘要] 以广州地铁12号线岭南广场站为工程背景, 提出考虑杆件极限承载力的冗余度表达公式。建立土岩复合地层无岩肩吊脚墙支护体系下的基坑开挖三维数值模型, 探讨不同土岩交界面深度、下卧岩层强度下无岩肩吊脚墙支护体系的可靠度。研究表明, 强度冗余度和刚度冗余度计算结果较集中, 且刚度冗余度评价结果最保守, 考虑杆件极限承载力的冗余度计算结果更分散, 且随工况不同更敏感。

[关键词] 地铁车站; 基坑; 冗余度; 可靠度; 数值模拟

[中图分类号] TU753

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)11-0040-07

Reliability Analysis of Supporting System of Suspended Diaphragm Wall Without Rock Shoulder in Soil-rock Foundation Excavation Based on Redundancy Theory

LEI Wenge¹, ZHOU Xiaohan², WANG Linfeng², WANG Ziqiang²

(1. China Railway Major Bridge Reconnaissance & Design Institute Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430050, China;
2. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: Based on the engineering background of Lingnan Square Station of Guangzhou Subway Line 12, a redundancy expression formula considering the ultimate bearing capacity of members is proposed. A three-dimensional numerical model of foundation pit excavation under the supporting system of a suspended diaphragm wall without rock shoulder in soil-rock composite strata was established, and the reliability of the supporting system of a suspended diaphragm wall without rock shoulder under different soil-rock interface depths and underlying rock stratum strengths was discussed. The results indicate that the calculation results of strength redundancy and stiffness redundancy are more concentrated, and the evaluation results of stiffness redundancy are the most conservative. The calculation results of redundancy considering the ultimate bearing capacity of members are more dispersed and more sensitive to different working conditions.

Keywords: subway station; foundation excavation; redundancy; reliability; simulation

0 引言

深大基坑的不断涌现产生了许多上部为土体、下部为岩体的土岩复合地层, 被称为土岩组合基坑, 吊脚墙作为土岩组合基坑的常见支护形式, 其设计理论、变形特征、破坏形式等受到学者们的广泛关注^[1-2]。土岩组合基坑工程实践中, 吊脚墙底

通常需预留岩肩进行嵌固, 并采用锁脚锚索进行锁脚, 具有基坑挖方量大、施工占地面积大、基岩开挖困难、锁脚锚索影响后期地下结构施工等问题。为克服上述问题, 已有学者提出取消预留岩肩与锁脚锚索, 通过调整水平支撑位置, 实现在基坑开挖阶段采用最下道支撑锁脚保持稳定的效果, 并将其称为无岩肩吊脚墙支护体系, 已在广州地铁12号线岭南广场站得到应用, 其设计方法、变形特征、力学响应规律等已在前期科研工作中进行了一定探讨^[3-5], 但对该体系可靠度计算与分析评价方面的

* 国家自然科学基金青年基金(52104076)

[作者简介] 雷文革, 高级工程师, E-mail: Lei_wenge@126.com

[通信作者] 周小涵, 博士, 副研究员, E-mail: cqzhouxhan@126.com

[收稿日期] 2025-01-05

研究较少。

冗余度是结构体系抵抗连续破坏能力的体现,即结构在发生初始破坏后改变原有传力路径,并达到新的稳定平衡状态能力体现,最初被广泛应用于大型复杂桁架、桥梁等结构中^[6-7]。将冗余度理论引入基坑工程,一方面可得到基坑支护体系关键构件位置,进而有针对性地进行加强;另一方面可定量评价各构件乃至整个支护体系的可靠度与安全储备,为基坑整体稳定性评价与控制提供参考^[8-12]。现阶段基坑支护结构冗余度计算方法较少考虑每根杆件承载力,在杆件形状、尺寸存在差异的情况下,易高估结构整体可靠度,为此,本文提出了考虑杆件极限承载力的冗余度表达公式,在标定基坑所在上覆粉质黏土物理力学参数的基础上,建立了土岩组合基坑无岩肩吊脚墙支护结构数值计算模型,探讨不同土岩交界面深度、下卧岩层强度下无岩肩吊脚墙支护体系可靠度。

1 考虑杆件极限承载力的冗余度表达公式

已有学者^[13-15]定义了基于强度、刚度和稳定性的冗余度 SRF_N, SRF_S, SRF_F 分别为:

$$SRF_N = \frac{N_u}{N_r - N_u} \tag{1}$$

$$SRF_S = \frac{S_u}{S_r - S_u} \tag{2}$$

$$SRF_F = \frac{F_u}{F_r - F_u} \tag{3}$$

式中: N_u 为原始结构最大内力; N_r 为构件失效后的结构最大内力; S_u 为原始结构最大变形; S_r 为构件失效后的结构最大变形; F_u 为原始结构安全系数; F_r 为构件失效后的结构安全系数。

对于深大基坑工程,不同深度或断面处水平支撑几何形状与尺寸可能不同,本文引入支撑杆件极限承载力设计值,以支撑杆件自身承载力的冗余量 $N_d - N_u$ 作为分子,以支撑杆件内力变化量 $N_r - N_u$ 作为分母,计算杆件失效后其余杆件的对应值,取最小的计算结果作为结构构件损坏后的整体强度冗余度 $SRF_{N'}$, 计算如下:

$$SRF_{N'} = \frac{N_d - N_u}{N_r - N_u} \tag{4}$$

式中: N_d 为某杆件极限承载力设计值。

式(4)反映了支护体系杆件破坏后,其余杆件承载力冗余量相对于内力变化量的大小,当内力变化小于承载力冗余量时,计算结果 >1 , 结构安全;当内力变化量超过承载力冗余量时,计算结果 <1 , 结构失稳。

2 工程概况

2.1 项目概况

岭南广场站是广州地铁 12 号线自北向南的第 18 个车站,前接二沙岛站、后连赤岗站。岭南广场站位于艺洲路与阅江西路交汇处,沿艺洲路呈东西向布置。站位所在艺洲路道路红线宽 55m,现状道路宽 30m,双向 6 车道。车站全长 276.2m,为地下 4 层岛式车站,采用明挖法施工,标准段宽 47.1m,深 32.981~33.634m。

2.2 工程与水文地质条件

车站场地地貌属于海陆交互相冲积平原地貌,地形平坦开阔,河网密集,表层分布较多软土,土岩交界面深约 8.5m。岭南广场站北侧为赤岗涌,与下部地层存在一定的水力联系。场地内地下水位总体埋藏深度相对较浅,水位埋深 2.2~3.1m,水位年变化幅度 1.5~2.5m。

3 基坑支护方案

车站主体基坑采用明挖法施工,由于岭南广场站位于市中心,用地红线紧张,施工工期要求高,考虑到采用预留岩肩进行锁脚会增加基坑宽度与挖方量,同时增大岩肩处施工难度等问题,首次提出取消预留岩肩,通过调整水平支撑间距、增大最下道支撑尺寸代替岩肩嵌固。采用吊脚墙+4 道内支撑作为围护结构,吊脚墙厚 1 000mm,深 24.6m,采用 C35 混凝土,4 道内支撑均采用混凝土支撑,水平间距为 9m,深度分别为 0.5,6.5,13.8,21.0m,其中上部 3 道支撑尺寸为 800mm×1 000mm,最下道支撑尺寸为 1 000mm×1 300mm,采用 C30 混凝土。采用格构柱承受支撑荷载,同时设置连系梁加强支撑体系整体性,基底采用 $\phi 800, \phi 1 000$ 钢筋混凝土桩,基坑采用分 4 层分段开挖方式,安全等级为一级。基坑及支护结构横断面如图 1 所示。根据岭南广场站地质勘察揭露地层情况,选取粉质黏土作为典型土层,微风化砂岩作为典型岩层,地层力学参数如表 1 所示。

4 数值模拟

4.1 计算工况

采用数值模拟探讨不同土岩交界面深度与下卧岩层强度下无岩肩吊脚墙支护体系可靠度。采用 H'/H_0 反映土岩交界面相对深度,其中 H' 为土岩交界面深度, H_0 为吊脚墙底部深度,对下卧岩层强度及刚度参数进行同步折减,并采用指标 c_r/c_s 进行描述,其中 c_r 为下卧岩层黏聚力, c_s 为上覆土层黏聚力。数值计算工况设置如表 2 所示,其中,工况 3,6 条件相同,为便于分析,仍表述为不同工况。

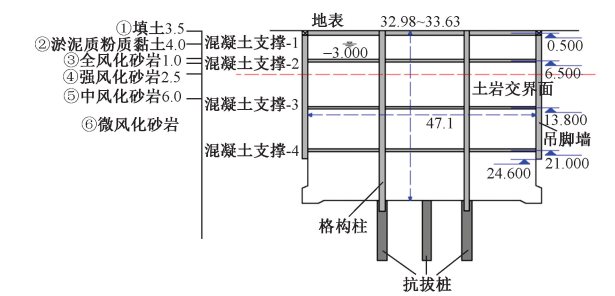


图 1 基坑及支护结构横断面(单位:m)

Fig. 1 Cross section of foundation excavation and supporting structure(unit :m)

表 1 典型地层物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of typical strata		
参数指标	粉质黏土	微风化砂岩
重度/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	18.00	25.60
抗压强度/kPa	85.20	37 000.00
弹性模量/MPa	3.73	4 850.00
泊松比	0.38	0.30
黏聚力/kPa	22.25	16 890.00
内摩擦角/($^{\circ}$)	26.57	43.00

表 2 数值计算工况

Table 2 Numerical calculation working condition		
工况	H'/H_0	c_r/c_s
1	0.2	760
2	0.4	
3	0.6	
4	0.8	
5	1.0	
6	0.6	760
7		380
8		190
9		95
10		48

4.2 计算模型

采用 MIDAS 有限元软件建立基坑二维平面应变数值计算模型,将节点和单元信息导入 FLAC 3D 软件中进行后续基坑开挖-支护全过程数值计算。采用实体单元模拟吊脚墙和支撑结构,反映支护结

构塑性破坏,格构柱、立柱桩和抗拔桩等采用桩单元进行模拟。

考虑模型边界效应,模型左右边界距离基坑边缘均为 101m,模型尺寸为 249m×1m×60m(长×宽×高),如图 2 所示(以工况 3 为例)。模型上表面为自由边界,模型四周仅约束法向变形,模型底部约束 3 个方向的变形。

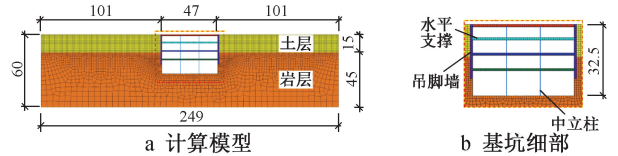


图 2 数值计算模型(单位:m)

Fig. 2 Numerical calculation model(unit :m)

4.3 计算参数

采用莫尔-库仑本构模型反映地层本构关系,各岩土体物理力学参数取值如表 1 所示,地层参数如表 3 所示。

吊脚墙和支撑采用莫尔-库仑本构模型,格构柱、立柱桩和抗拔桩采用弹性本构模型。参考王涛^[16]研究成果,支护结构参数如表 4 所示。

土体与吊脚墙之间需建立接触面反映土体和支护结构之间的相互作用,FLAC 3D 用户使用手册建议法向刚度和切向刚度取周围最硬相邻区域等效刚度的 10 倍,接触面的黏聚力和内摩擦角取相邻地层的 0.5~0.8 倍。

土体与吊脚墙之间接触面参数取值设置:吊脚墙侧面和底面法向刚度和切向刚度均为 8GPa/m,黏聚力均为 2 000kPa,内摩擦角均为 25 $^{\circ}$ 。

4.4 数值模拟步骤(见表 5)

5 无岩肩吊脚墙可靠度分析

5.1 基坑总位移场分布规律

土岩交界面较浅($H'/H_0=0.2$)时,拆除不同水平支撑下基坑总位移场分布规律如图 3 所示。由于土岩交界面较浅,不拆除支撑下基坑变形以基底隆起为主,但隆起量仅 3.3mm;拆除第 1 道支撑后,土

表 3 计算模型中的地层参数

Table 3 Formation parameters in the calculation model						
土层	重度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	体积模量/ MPa	剪切模量/ MPa	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ ($^{\circ}$)	抗拉强度/ MPa
粉质黏土层	18.10	5.18	1.35	22.25	26.57	0
岩层($c_r/c_s=760$)	25.60	4 041.70	1 865.40	16 890.00	43.00	3.70
岩层($c_r/c_s=380$)	25.60	2 020.85	932.70	8 446.00	21.50	1.85
岩层($c_r/c_s=190$)	25.60	1 010.43	466.35	4 223.00	10.75	0.93
岩层($c_r/c_s=95$)	25.60	505.22	233.18	2 111.50	5.38	0.46
岩层($c_r/c_s=48$)	25.60	252.61	116.59	1 055.75	2.69	0.23

表 4 支护结构参数
Table 4 Supporting structure parameters

支护结构	尺寸/ mm	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量/ GPa	泊松比	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ ($^{\circ}$)	抗拉强度/ MPa
吊脚墙	1 000	2 500	30	0.2	4 070	43.87	3.5
混凝土支撑	800×1 000 1 000×1 300	2 500	30	0.2	4 070	43.87	3.5
钢格构柱	800×800	7 800	200	0.3	—	—	—
立柱桩	φ1 500	2 500	30	0.2	—	—	—
抗拔桩	φ1 000	2 500	30	0.2	—	—	—

表 5 数值计算步骤
Table 5 Numerical calculation steps

模拟步骤	模拟内容
1	初始地应力平衡
2	位移清零,施工地下连续墙、立柱桩、抗拔桩与格构柱
3	开挖土体至第 1 道混凝土支撑底,浇筑第 1 道混凝土支撑
4	开挖土体至-7.000m,浇筑第 2 道混凝土支撑
5	开挖土体至-14.000m,浇筑第 3 道混凝土支撑
6	开挖土体至-21.000m,浇筑第 4 道混凝土支撑
7	开挖至基底
8	分别拆除第 1~4 道支撑,并计算至收敛

层深度范围内有向基坑内部变形的趋势,但变形量小于基底隆起;拆除第 2~4 道支撑后,基坑总体位移场变化不大。

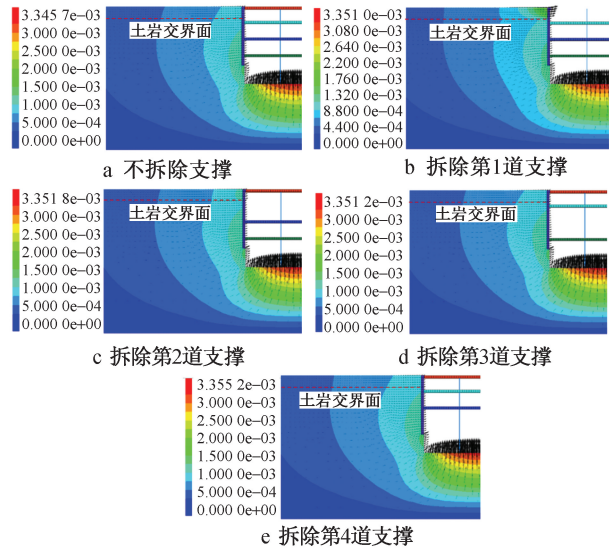


图 3 $H'/H_0=0.2$ 时基坑总位移场分布规律(单位:m)
Fig. 3 Distribution law of total displacement field of foundation excavation when $H'/H_0=0.2$ (unit:m)

土岩交界面较深($H'/H_0=1.0$)时,拆除不同水平支撑下基坑总位移场分布规律如图 4 所示,与土岩交界面较浅时相比,土岩基坑总位移场分布规律差异较大,主要发生土层段向基坑内部滑动变形,吊脚墙下半段变形显著。不拆除支撑下,基坑最大变形达 50mm 左右;拆除 4 道支撑后,基坑总体变形趋势相同,但最大变形逐渐增大;拆除第 4 道支撑

后,基坑最大变形达 65mm 左右,且变形区域更集中。对于交界面较深的土岩基坑,随拆除支撑的下移,无岩肩吊脚墙支护结构支护能力逐渐减弱。

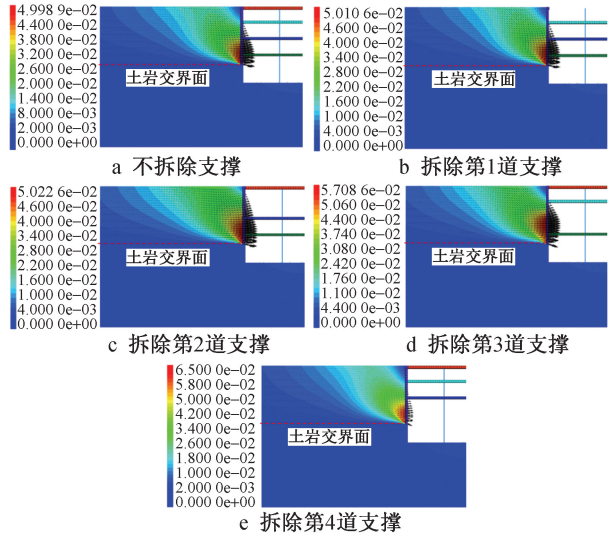


图 4 $H'/H_0=1.0$ 时基坑总位移场分布规律(单位:m)
Fig. 4 Distribution law of total displacement field of foundation excavation when $H'/H_0=1.0$ (unit:m)

下卧岩层强度较高($c_t/c_s=760$)时,拆除不同水平支撑下基坑总位移场分布规律如图 5 所示。下卧岩层强度较高时,基坑变形主要位于土层段,且沿吊脚墙深度呈涨肚形增大。拆除不同支撑,基坑变形表现出不同的规律,拆除第 1 道支撑后,沿吊脚墙深基坑变形逐渐减小;拆除第 2 道支撑后,吊脚墙第 2 道支撑位置处变形最大;拆除第 3,4 道支撑后,由于吊脚墙下半部分约束减弱,导致下半部分变形较大。结合土层厚度可知,拆除挡土段主要支撑(第 2,3 道支撑)后,基坑变形增大显著。

下卧岩层强度较低($c_t/c_s=48$)时,拆除不同水平支撑下基坑总位移场分布规律如图 6 所示,此时基坑变形主要表现为坑底隆起,变形量达 47.5mm 左右,不同位置支撑拆除后,基坑变形始终以坑底隆起为主,但在拆除支撑位置处基坑变形仍受到一定影响。拆除第 4 道支撑时,由于第 4 道支撑主要

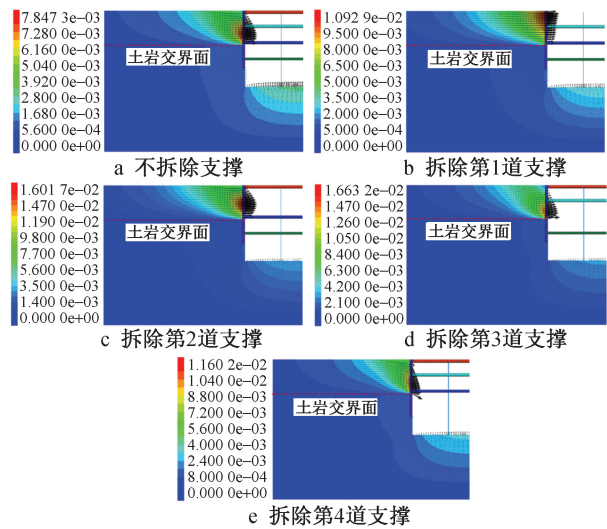


图 5 $c_r/c_s=760$ 时基坑总位移场分布规律(单位:m)

Fig. 5 Distribution law of total displacement field of foundation excavation when $c_r/c_s=760$ (unit:m)

支挡坑外岩体,而此时岩体强度较低,拆除支撑后发生较大回弹变形,导致吊脚墙挡岩段、下方岩壁段及坑底岩体变形均有不同程度的增大。

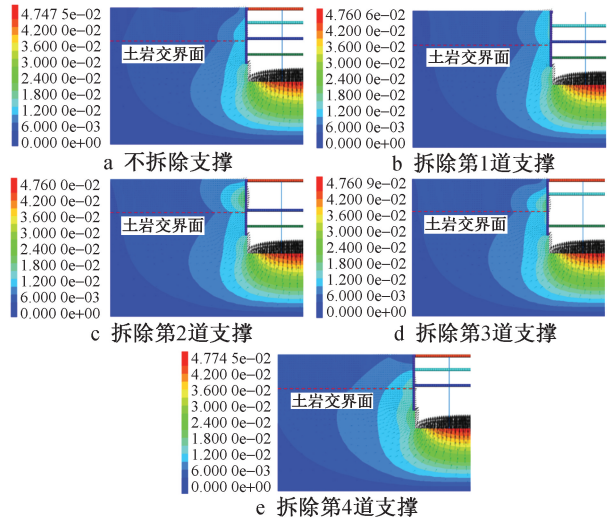


图 6 $c_r/c_s=48$ 时不同拆除支撑下基坑总位移场分布规律(单位:m)

Fig. 6 Distribution law of total displacement field of foundation excavation when $c_r/c_s=48$ (unit:m)

5.2 水平支撑轴力变化规律

不同土岩界面深度下,拆除不同水平支撑后支撑最大轴力变化曲线如图 7 所示。通过模拟计算出的水平支撑轴力需乘以 9(支撑水平间距)以反映真实支撑轴力。

随着土岩界面深度增大,拆除各道支撑后,支撑最大轴力增大,拆除第 3 道支撑时,支撑最大轴力随土岩界面深度变化显著,拆除第 1 道支撑变

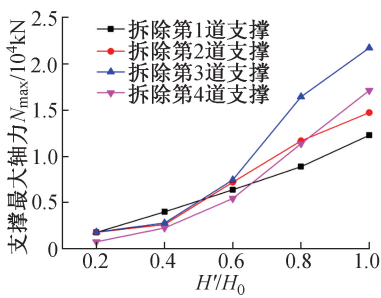


图 7 不同土岩界面深度下拆除支撑后支撑最大轴力变化曲线

Fig. 7 Variation curve of maximum axial force of supports under different soil-rock interface depths

化最小,说明对于不同界面深度下的土岩基坑,支护体系下半部分水平支撑更关键。此外,对于界面深度较大的土岩基坑,拆除支撑后轴力较大,需关注可能存在的由于局部支撑失效导致的支护体系整体垮塌失稳破坏。

不同下卧岩层强度下,拆除不同水平支撑后支撑最大轴力变化曲线如图 8 所示,同样将模拟结果乘以 9 以反映真实支撑轴力。

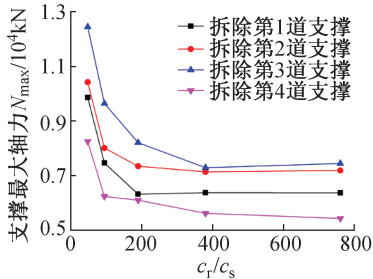


图 8 不同下卧岩层强度下拆除支撑后支撑最大轴力变化曲线

Fig. 8 Variation curve of maximum axial force of supports under different strength of underlying strata

随着下卧岩层强度的提高,拆除各道支撑后,支撑最大轴力均呈减小趋势,且减小程度逐渐放缓,当 $c_r/c_s>200$ 时,拆除支撑后支撑最大轴力随下卧岩层强度变化不再显著,且总体轴力水平较低,不易发生由局部支撑失效导致的支护体系整体破坏。不同下卧岩层强度下,拆除第 3 道支撑后,支撑最大轴力均为最大,拆除第 2 道支撑次之,拆除第 1 道支撑再次,拆除第 4 道支撑后最大轴力最小,结合界面深度因素可知,尽管下卧岩层强度降低,土层范围内的水平支撑仍为主要支护构件,这意味着对于无岩肩吊脚墙支护体系,需关注土层范围内的水平支撑可靠度。

5.3 不同冗余度表达方式计算结果

采用式(4)计算考虑杆件极限承载力的冗余

度,同时采用式(1)、式(2)计算结果作对比,其中,强度冗余度计算中以水平支撑轴力为指标,刚度冗余度计算中以吊脚墙侧向位移为指标,支撑轴力极限承载力设计值可根据项目设计文件确定。

不同交界面深度下土岩基坑无岩肩吊脚墙支护结构冗余度计算结果如图 9 所示,图中未出现的数据点说明该工况下体系冗余度为负,表示拆除杆件后体系最大受力或变形反而减小。从关键支撑位置上看,采用强度冗余度指标评价时,多数情况下均为第 3 道支撑冗余度最小,表明其在体系中最关键,第 1、4 道支撑最不关键。采用刚度冗余度指标评价时,随着交界面深度增大,关键支撑位置逐渐下移,交界面附近的水平支撑对吊脚墙侧移的影响最关键,远离处支撑最不关键。采用本文提出的考虑杆件极限承载力的冗余度指标评价时,随着交界面深度增大,支护体系冗余度逐渐减小,第 3 道支撑为关键支撑,第 4 道支撑最不关键。从冗余度大小上看,强度冗余度和刚度冗余度计算结果在 1~10 分布较密集,而本文提出的冗余度分散于各区间,说明考虑各杆件极限承载力后,不同支撑冗余度得到区分,且总体上有本文冗余度>强度冗余度>刚度冗余度的趋势。

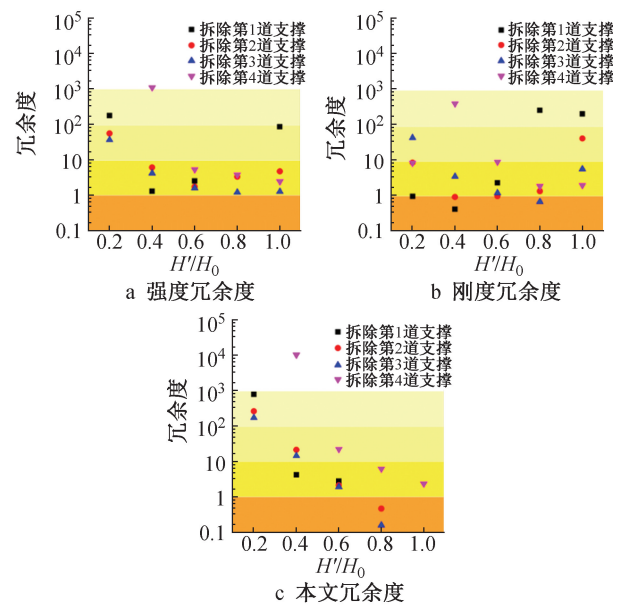


图 9 不同交界面深度下无岩肩吊脚墙支护结构冗余度计算结果

Fig.9 Calculation results of the redundancy of suspended diaphragm wall excavation without rock shoulder at different interface depths

不同下卧岩层强度下,土岩基坑无岩肩吊脚墙支护结构冗余度计算结果如图 10 所示,与图 9 反映的不同交界面深度下的冗余度计算结果存在差异。

从关键支撑位置上看,不同下卧岩层强度下关键支撑位置更明确,强度冗余度和本文冗余度计算结果均得到第 3 道支撑最小,刚度冗余度为第 2 道支撑最小,同时,第 2 道支撑强度冗余度和本文冗余度、第 3 道支撑刚度冗余度同样处于较低水平,说明当 $H'/H_0=0.6$ 时,不同下卧岩层强度下,对于无岩肩吊脚墙支护体系而言,第 2、3 道支撑为关键支护构件,即土层范围内主要支撑为关键支护构件。从冗余度大小上看,不同下卧岩层强度下冗余度计算结果集中在 1~10,同样地,本文提出冗余度计算结果较强度冗余度和刚度冗余度更分散,且随下卧岩层强度变化更敏感。本文冗余度≈强度冗余度>刚度冗余度。

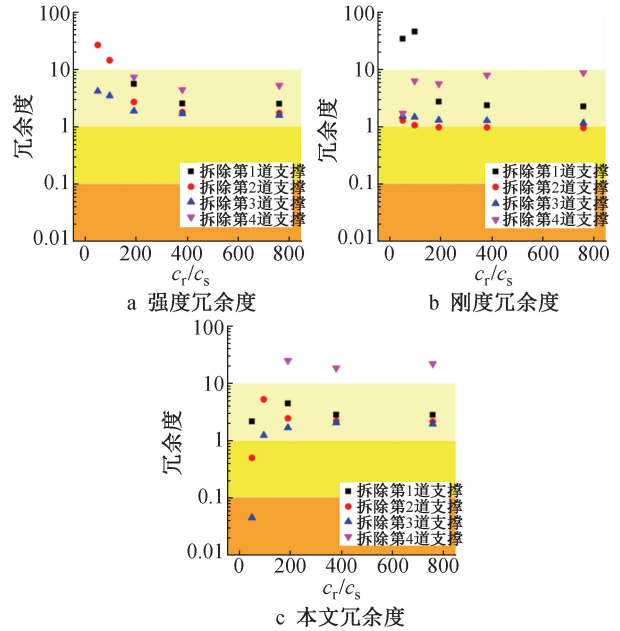


图 10 不同下卧岩层强度下无岩肩吊脚墙支护结构冗余度计算结果

Fig.10 Calculation results of the redundancy of suspended diaphragm wall excavation without rock shoulder at different underlying rock strength

综上所述,用刚度冗余度评价无岩肩吊脚墙支护结构安全性最保守,但未考虑支撑承载力。采用本文考虑支撑极限承载力下的冗余度,无岩肩吊脚墙支护体系冗余度更分散,且对土岩交界面与下卧岩层强度变化更敏感。

6 结语

1) 土岩交界面较浅时,不拆除支撑下基坑变形以基底隆起为主,拆除支撑后基坑整体变形较小;土岩交界面较深时,不拆除支撑下基坑变形主要为土层段向坑内滑动变形,最大变形达 50mm,拆除支撑后基坑变形均沿深度逐渐增大;下卧岩层强度较

高时,基坑变形主要发生在土层段,且拆除不同支撑下基坑变形表现出不同规律;下卧岩层强度较低时,基底隆起较大。

2)随着土岩交界面深度增大,拆除支撑后支撑最大轴力均增大,增大程度依次为拆除第3道支撑、拆除第4道支撑、拆除第2道支撑、拆除第1道支撑;随着下卧岩层强度提高,拆除各道支撑后支撑最大轴力均减小,且减小程度放缓,减小程度依次为拆除第3道支撑、拆除第2道支撑、拆除第1道支撑、拆除第4道支撑。

3)随着交界面深度增大,第3道支撑强度冗余度和本文提出的冗余度均最小,刚度冗余度最小支撑位置逐渐下移,随着下卧岩层强度减弱,3种评价结果均为拆除第2、3道支撑冗余度最小;强度冗余度和刚度冗余度计算结果均较集中,且刚度冗余度评价结果最保守,本文提出冗余度计算结果更分散,且随工况不同更敏感。

参考文献:

- [1] 田仕文,周长海,赵鹏.滨海浅滩地区土岩组合地层深大基坑支护技术[J].施工技术,2013,42(8):79-81,85.
TIAN S W, ZHOU C H, ZHAO P. Support technology for deep and large foundation excavation in the soil and rock strata of coastal shallows area[J]. Construction technology, 2013, 42(8): 79-81, 85.
- [2] 沈圆顺.土岩组合地铁深基坑变形特性与控制指标研究[M].镇江:江苏大学出版社,2018.
SHEN Y S. Study on deformation characteristics and control index of deep foundation excavation of soil-rock combined subway[M]. Zhenjiang: Jiangsu University Press, 2018.
- [3] 李隆平,周小涵,王林枫.新型吊脚墙支护二元基坑变形特征与地层适应性研究[J].施工技术(中英文),2023,52(19):31-39.
LI L P, ZHOU X H, WANG L F. Research on deformation characteristics and stratum adaptability of new type end-suspended wall supported soil-rock mixed stratum foundation excavation[J]. Construction technology, 2023, 52(19): 31-39.
- [4] 赵顺磊,徐武,王自强,等.土岩基坑无岩肩吊脚墙支护变形与力学响应特征研究[J].施工技术(中英文),2023,52(7):106-114.
ZHAO S L, XU W, WANG Z Q, et al. Supporting deformation and mechanical response characteristics of diaphragm wall without rock shoulder in soil-rock foundation excavation[J]. Construction technology, 2023, 52(7): 106-114.
- [5] LI L P, WANG L F, ZHOU X H, et al. Study on deformation characteristics and instability failure mode of new suspended diaphragm wall deep excavation in soil-rock strata[J]. Advances in transdisciplinary engineering, 2022, 31: 727-738.
- [6] 江晓峰,陈以一.建筑结构连续性倒塌及其控制设计的研究

现状[J].土木工程学报,2008,41(6):1-8.

JIANG X F, CHEN Y Y. A review on the progressive collapse and control design of building structures[J]. China civil engineering journal, 2008, 41(6): 1-8.

- [7] 高峰,杨大彬,靳卫恒. K6型单层网壳极限承载力对杆件失效的灵敏度分析[J].工程设计与设计,2009(8):16-19.
GAO F, YANG D B, JIN W H. Sensitivity analysis on load carrying capacity of K6 single-layer reticulated shells to member failure[J]. Construction & design for project, 2009(8): 16-19.
- [8] CHOOSRITHONG K, SCHWEIGER H F. Numerical investigation of sequential strut failure on performance of deep excavations in soft soil[J]. International journal of geomechanics, 2020, 20(6): 04020063.
- [9] CHENG X S, ZHENG G, DIAO Y, et al. Experimental study of the progressive collapse mechanism of excavations retained by cantilever piles[J]. Canadian geotechnical journal, 2017, 54(4): 574-587.
- [10] CHENG X S, ZHENG G, DIAO Y, et al. Study of the progressive collapse mechanism of excavations retained by cantilever contiguous piles[J]. Engineering failure analysis, 2017, 71: 72-89.
- [11] 郑刚,程雪松,周海祚,等.岩土与地下工程结构韧性评价与控制[J].土木工程学报,2022,55(7):1-38.
ZHENG G, CHENG X S, ZHOU H Z, et al. Resilient evaluation and control in geotechnical and underground engineering[J]. China civil engineering journal, 2022, 55(7): 1-38.
- [12] 袁小峰.深基坑内撑式排桩支护结构局部失效及冗余度研究[D].重庆:重庆大学,2019.
YUAN X F. Study on partial failure and redundancy of retaining piles structure with interior bracing in the deep foundation excavation[D]. Chongqing: Chongqing University, 2019.
- [13] FRANGOPOL D M, CURLEY J P. Effects of damage and redundancy on structural reliability[J]. Journal of structural engineering, 1987, 113(7): 1533-1549.
- [14] 江杰,肖萌,龙团元,等.基于冗余度理论的深基坑环梁支撑优化分析[J].广西大学学报(自然科学版),2017,42(6):2339-2346.
JIANG J, XIAO M, LONG T Y, et al. Redundancy of ring-beam supporting structures of deep excavations[J]. Journal of Guangxi University (natural science edition), 2017, 42(6): 2339-2346.
- [15] 江杰,顾倩燕,胡何,等.双排钢板桩围堰的冗余度分析[J].岩土力学,2015,36(S1):518-522.
JIANG J, GU Q Y, HU H, et al. Study of redundancy of double-row steel sheet piles cofferdam[J]. Rock and soil mechanics, 2015, 36(S1): 518-522.
- [16] 王涛.侧压力作用下混凝土的剪切试验研究及应用[D].湘潭:湖南科技大学,2019.
WANG T. Shear test research of concrete under lateral pressure and application[D]. Xiangtan: Hunan University of Science and Technology, 2019.