

土岩地层吊脚桩异形基坑开挖变形与冗余度研究

刘新荣¹, 王自强¹, 李隆平², 周小涵¹, 王林枫¹

(1. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045; 2. 中铁大桥勘测设计院集团有限公司, 武汉 430056)

摘要: 基于实际工程, 构建三维仿真模型, 研究了土岩地层吊脚桩异形基坑开挖变形与受力特征, 并基于拆除杆件法, 提出基于支撑极限承载力的强度冗余度表达方式, 并建立了关联杆件与关联系数两种杆件重要程度评价指标。结果表明: (1) 异形土岩地层吊脚桩基坑变形主要集中于上部土层段、阳角点与基坑长边中段, 最大值为 17.02 mm, 且与支护体系自身几何构成、刚度分布相关, 土岩地层基坑阳角位置支护结构上部变形更大, 影响范围约为阴角处的 2 倍; (2) 基于极限承载力的强度冗余度指标可以全面与量化地评价基坑冗余度, 关联杆件能明确构件受损后影响最大支撑杆件, 关联系数可以一定程度反映支护结构关键杆件; (3) 基于极限承载力的支撑杆件冗余度大小与自身承担荷载、相邻支撑杆件布置存在关系, 最小为 4.18, 关联杆件主要集中在相邻杆件, 关联系数设计中应优化设计降低杆件关联系数, 提高支护结构整体可靠度。

关键词: 冗余度; 土岩地层; 异形基坑; 吊脚桩; 变形响应

中图分类号: U231.3

文献标识码: A

文章编号: 1673-0836(2026)02-0696-10

Study on Deformation and Redundancy of Special-shaped Soil-rock Foundation Pit with Suspended Piles

Liu Xinrong¹, Wang Ziqiang¹, Li Longping², Zhou Xiaohan¹, Wang Linfeng¹

(1. College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China;

2. China Railway Major Bridge Reconnaissance and Design Institute Co., Ltd., Wuhan 430056, P. R. China)

Abstract: Based on the actual project, a three-dimensional simulation model is constructed to study the deformation and stress characteristics of the special-shaped soil-rock foundation pit excavation of the suspended pile. By adopting bar demolition method, a strength redundancy expression method based on the ultimate bearing capacity of the inner support is proposed, and two inner support importance evaluation indexes of the associated bar and the correlation coefficient are proposed. The findings indicate: (1) Deformation of special-shaped soil-rock foundation pit with the suspended pile mainly concentrates in the upper soil layers, the position of the positive angle and the middle of the longest side of the foundation pit., achieving a peak value of 17.02 mm. This deformation is linked to the geometric composition and stiffness distribution of the support system itself. Notably, the upper deformation of the supporting structure at the positive corner of the foundation pit is larger, and the influence range is about 2 times that at the negative corner; (2) The strength redundancy based on ultimate bearing capacity can comprehensively and quantitatively evaluate the redundancy of deep foundation pits, where the associated bar can pinpoint which component would be most affected after damage occurs, while the correlation coefficient can, to some extent, reflect critical components within support structures; (3) The redundancy of the inner support based on the

收稿日期: 2025-06-15(修改稿)

作者简介: 刘新荣(1969—), 男, 浙江开化人, 博士, 教授, 主要从事岩土工程、地下工程领域教学与研究工作。

E-mail: liuxrong@126.com

通讯作者: 周小涵(1988—), 男, 重庆人, 博士, 副研究员, 主要从事岩土工程、地下工程领域研究工作。

E-mail: cqzhouxhan@126.com

基金项目: 国家自然科学基金(41972266); 重庆市研究生科研创新项目(CYS22047)

ultimate bearing capacity is related to its own load and the arrangement of adjacent support bars. The minimum is 4.18. The associated bar are mainly concentrated in the adjacent bars. In the design of the correlation coefficient, should be optimized to decrease the correlation coefficient of the bar and improve the overall reliability of the support structure.

Keywords: redundancy; soil rock stratum; special-shaped foundation pit; suspended pile; deformation response

0 引言

吊脚支护结构是针对土岩地层基坑的一种特殊支护结构,由于支护结构底部未嵌固至坑底,其安全储备较传统支护结构较低,变形与受力存在一定差异,其设计理论、变形受力特性等受到了学者们关注^[1-3]。

作者团队前期科研工作通过现场施工与数值模拟探讨了吊脚支护结构的设计方法、变形特性以及力学响应规律,阐明了无岩肩吊脚支护结构设计要点,并提出吊脚支护结构与其他支护方式的差别为变形主要集中于上部土层段,地表沉降影响范围相对较小,且吊脚支护结构底部岩壁段变形与下卧岩层的强度、完整性密切相关^[4-7]。但是基坑开挖变形受力特性除受支护结构形式影响外,同时也受基坑形状尺寸的影响。沈启炜^[8]结合滨海残积土遇水软化崩解特性,采用三维数值模拟模型研究了高水位条件下花岗岩残积土地层中地铁异形基坑最为合理的施工方法。王德洪等^[9]研究则表明基坑存在明显坑角效应,基坑阳角处位移显著大于阴角处。但目前缺乏针对异形吊脚支护结构基坑变形特性的研究。

冗余度是结构体系抵抗连续破坏能力的一种体现及衡量标准,拥有充足冗余度的结构可以承担局部构件破坏释放的荷载而不发生连续破坏。国内外学者将冗余度理论引入基坑工程,一方面确定支护结构关键构件,另一方面避免基坑连续破坏,提高结构韧性^[10-14]。但现有冗余度表达方式均存在一定的局限性,缺乏一种复杂支护条件下基坑冗余度的表达方式,体现支护体系自身几何构成与刚度分布等特性^[15]。总之,目前尚无成熟的基坑支护结构冗余度评价方法,对关键构件识别与设计尚需深入研究。

本文建立土岩地层吊脚桩异形基坑数值计算模型,总结异形吊脚桩基坑开挖变形与受力特性,提出基于杆件极限承载能力的冗余度理论,通过拆除构件法,研究土岩异形基坑不同冗余度表达模式下支护体系的重要构件,提出关联杆件与关联系数的概念,探讨关键构件确定的方法,为土岩基坑吊脚墙支护结构冗余度评价提供支撑。

1 考虑杆件极限承载力的冗余度表达方式

国内外针对结构设计强度、极限强度、残余强度、超静定次数和失效概率等提出了较多冗余度表达方式,本文不一一赘述,目前冗余度的表达方式主要基于拆除杆件法。《建筑基坑支护技术规程》提出应考虑支护结构个别构件的提前失效而导致土压力作用位置的转移,并宜设置必要的赘余支撑,可采用拆除杆件法,通过结构整体承载力、围护结构变形与结构杆件内力的变化情况评估基坑赘余支撑的合理性与冗余度。

1.1 基于结构整体承载力变化的冗余度表达方式

Frangopol 等^[10]认为结构整体承载能力与构件性能是影响结构冗余特性的两个重要因素,结构在局部失效后极限承载力会有所降低,需综合考虑局部结构受损前后承载能力,据此提出了结构构件冗余度,定义为:

$$R_1 = \frac{L_{\text{intact}}}{L_{\text{intact}} - L_{\text{damage}}} \quad (1)$$

式中: R_1 为结构构件冗余度; L_{intact} 为原始结构极限承载力; L_{damage} 为构件受损后结构极限承载力。

程雪松^[11]在式(1)基础上进行了改进,在不会变化冗余度相对大小的情况下,将设计极限承载力引入,并且反映了结构体系承载能力冗余量相对于承载力损失量的大小,称为综合冗余度:

$$R_2 = \frac{L_{\text{intact}} - L_{\text{design}}}{L_{\text{intact}} - L_{\text{damage}}} \quad (2)$$

式中: R_2 为综合冗余度; L_{design} 为原始结构设计极限承载力。

基于结构整体承载力变化的冗余度表达方式能很好体现结构承载力的变化,同时式(2)能定量地体现结构抵抗连续破坏能力。但基坑支护结构复杂,荷载分布不均,极限承载能力也无法确定,难以在实际工程中运用。

1.2 基于结构变形变化的冗余度表达方式

针对上述问题,江杰等^[12-13]对式(1)进行改写,提出在支护系统中构件失效对整个支护系统刚度的影响程度可通过该构件失效时结构体系最大变形变化与原始结构最大变形之比来量化分析。

定义了基于刚度的冗余度表达方式:

$$SRF_s = \frac{S_u}{S_r - S_u} \quad (3)$$

式中: SRF_s 为刚度冗余度; S_u 为原始结构最大变形值; S_r 为构件失效后结构最大变形值。

1.3 基于杆件极限承载力的冗余度表达方式

江杰等^[12-13]还提出,可用原始结构支撑杆件内力与构件失效时结构体系的最大内力变化之比量化分析构件失效对整个支护系统强度的影响。定义了强度冗余度表达方式:

$$SRF_{N1} = \frac{N_{umax}}{N_{rmax} - N_{umax}} \quad (4)$$

式中: SRF_{N1} 为江杰提出的强度冗余度表达方式计算结果; N_{umax} 为原始结构支撑杆件内力最大值; N_{rmax} 为构件失效后内支撑杆件内力最大值。

该表达方式能较好地反映出构件失效对支护结构中内力最大支撑构件影响,但未考虑基坑形状不规则,内支撑布置不同,基坑内可能存在受力变形关联性不强的几个分区,无法全面展示构件失效对基坑影响。宋利文等^[14]也针对式(1)进行改写,提出了强度冗余度计算方法。计算原始结构该杆件内力值与当构件损坏后每一根支撑杆件内力变化之比。计算结果绝对值越小,支撑杆件受影响程度越大。取最小冗余度绝对值作为结构构件损坏后结构整体的强度冗余度:

$$SRF_{N2} = \min_i \left| \frac{N_{iu}}{N_{ir} - N_{iu}} \right| \quad (5)$$

式中: SRF_{N2} 为宋利文提出强度冗余度表达方式计算结果; N_{iu} 为原始结构第*i*根支撑杆件内力值; N_{ir} 为指定构件失效后第*i*根内支撑杆件内力值。

宋利文提出的强度冗余度表达方式可反映出构件失效对支护结构中每根支撑构件影响,但该计算方法中分子为原始结构某支撑杆件原始内力,未考虑支撑杆件承载力冗余量差异,若杆件原始内力较小,相邻杆件破坏会导致构件冗余度计算结果偏小。且两种冗余度表达方式计算结果均无法判断结构是否具有抵抗连续破坏的能力。

本文参考式(2)思路,引入支撑杆件极限承载力设计值,以支撑杆件自身承载力冗余量 $N_d - N_u$ 对应结构极限承载力冗余量 $L_{intact} - L_{design}$,以支撑杆件内力变化量 $N_r - N_u$ 对应构件受损前后结构极限承载力变化量 $L_{intact} - L_{damage}$ 。按式(6)计算杆件失效后其余杆件的结果,取最小计算结果作为结构构件损坏后结构整体强度冗余度,本文称之为基于杆件极限承载力的冗余度表达方式:

$$SRF_{N3} = \frac{N_d - N_u}{N_r - N_u} \quad (6)$$

式中: SRF_{N3} 为本文提出的基于支撑极限承载力的强度冗余度表达方式计算结果; N_u 为原始结构某支撑杆件内力值; N_r 为构件失效后同根内支撑杆件内力值; N_d 为某支撑杆件极限承载力设计值。

式(6)反映了支护体系构件损坏,其余支撑杆件承载力冗余量相对于内力变化量大小。当内力变化小于承载力冗余量时,计算结果大于1,说明结构仍然安全,当其他支撑杆件内力变化量过大,超过了承载力冗余量,则计算结果小于1,结构发生连续破坏。该式考虑了构件失效对支护结构每根支撑杆件的影响;引入了支护体系中杆件极限承载力设计值,考虑了支撑杆件尺寸、长度的影响;存在定量指标要求,即支撑杆件基于支撑极限承载力强度冗余度应大于1,保证构件受损后支护结构不会发生连续破坏。

2 工程概况与数值模型建立

2.1 工程概况与数值模拟参数

署东区间竖井位于广州均益路旁公共绿地内,北侧临近庙前西街,南侧临近东华东路,西侧临近内环路,东侧临近均益路,采用明暗挖结合法施工。竖井呈南北方向布置,为地下6层结构,主体结构长为27.4 m,宽为17.2 m,埋深为39.5 m。地层力学参数如表1所示。由于强风化泥质砂岩物理力学性质较差,将强风化与中风化砂岩交界面视为土岩交界面。

表1 署东区间竖井地层物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameter of shaft stratum in Sudong interval

岩土名称	密度 /(g·cm ⁻³)	黏聚力 /kPa	内摩擦角 /(°)	单轴抗压 强度/MPa
人工填土	1.71	21.00	8.50	—
淤泥质土	1.73	3.50	2.50	—
粉质黏土	1.96	20.00	15.50	—
强风化砂岩	1.95	32.00	24.00	3.16
中风化砂岩	2.40	300.00	30.00	6.80
微风化砂岩	2.55	500.00	34.00	13.01

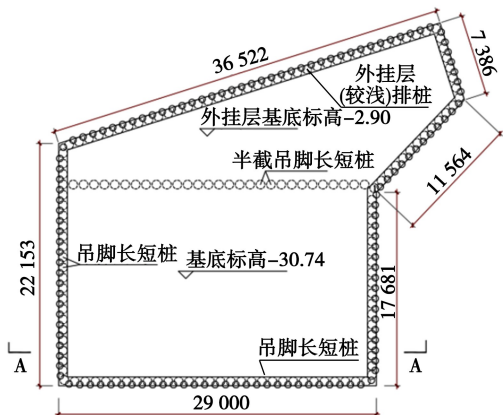
围护结构中,上部土层采用 $\phi 800$ mm@950 mm围护桩+内支撑支护体系,下部岩层采用喷锚支护。围护桩由26.5 m长桩与22.0 m短桩间隔组成,底部均未采用岩肩与预应力锚索锁脚,设4道钢筋混凝土内支撑。支护结构尺寸参数与

结构布置详见表 2 与图 2。表 3 为根据各道支撑尺寸、混凝土强度等计算得到的极限承载力设计值。

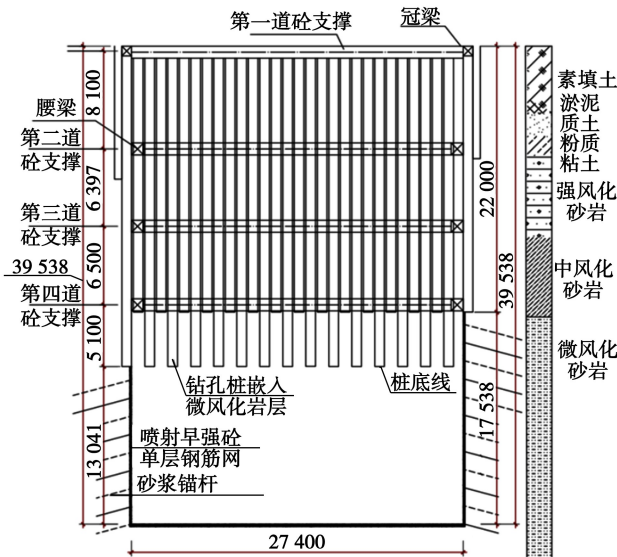
表 2 署东区间竖井支护结构尺寸

Table 2 Size of shaft support structure in Sudong interval

桩型 编号	混凝土 等级	直径/mm	桩长度/m	间距 /m
长桩	C35	800	26.50	0.95
短桩	C35	800	22.00	0.95
桩型 编号	混凝土 等级	高度/mm	宽度/mm	间距 /m
对撑	C30	1 000	1 000	
第一道斜撑	C30	1 000	700	3.5~4.5
其余斜撑	C30	1 000	800	3.5~4.5
梁	C30	1 000	1 000	



(a) 竖井围护结构平面图



(b) A-A剖面图

图 2 竖井支护结构布置图(单位:mm)

Fig. 2 Layout of shaft support structure (unit: mm)

表 3 各支撑极限承载力

Table 3 The ultimate bearing capacity of each support

支撑 类型	第一道 对称	第一道 斜撑	其余 对称	其余 斜撑
极限承载 力设计值/kN	9 046	6 818	9 805	9 177

2.2 既有数值模型的修改

为研究无岩肩无锁脚锚索长短吊脚桩异形基坑变形受力特性,本文修改前期已验证数值模拟计算模型^[4],改变基坑外挂段设计,将外挂层基底标高降低至主基坑相同深度,并将外挂层(较浅)排桩修改为吊脚长短桩,同时第三道与第四道内支撑采用与第二道内支撑相同尺寸与布置方式。模型中桩、内支撑系统(内支撑、冠梁与腰梁)分别使用 FLAC^{3D} 中提供的桩单元、梁单元进行模拟,岩土体采用实体单元进行模拟,基坑围护结构的本构模型选用完全线弹性模型,岩土体的本构模型采用摩尔-库伦弹性模型(Mohr-Coulomb)。最终建立的数值计算模型如图 3 所示,每层内支撑布置与编号示意图如图 4。模型开挖顺序与实际施工一致,根据围护结构特点及支撑所在位置,分步进行施工。

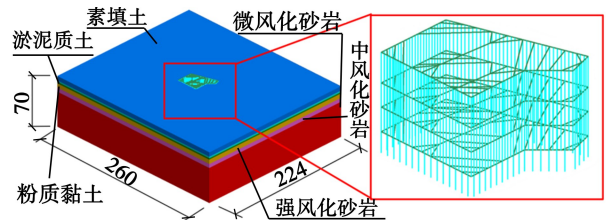


图 3 数值计算模型(单位:m)

Fig. 3 Numerical calculation model (unit: mm)

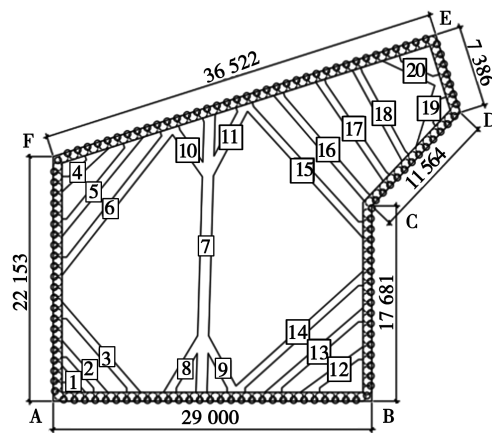


图 4 内支撑布置与编号示意图(单位:mm)

Fig. 4 Inner support arrangement and numbering diagram (unit: mm)

3 异形土岩基坑开挖围护结构变形受力特征

3.1 围护结构侧向变形规律

图5为开挖至基底后吊脚桩侧向变形空间分布特征,围护结构水平位移主要集中在围护结构上方。由于冠梁、腰梁与内支撑体系水平刚度较大,吊脚长桩与短桩共同变形,不存在明显差异。围护结构主要变形发生在AB、FE长边中部G点、H点以及阳角C点附近。H点与B点均位于基坑长边两端角撑支撑刚度较小一侧。最大位移出现在H点,最大值为17.02 mm。F点位置处基坑围护结构水平变形较大,这是由于支撑结构F点为钝角阴角,采用角撑控制基坑变形的效果不佳。对比同样为钝角阴角D点,由于D点处基坑尺寸较小,空间效应明显,且CD段设置对称有效控制CD段位移。阳角C点处,围护结构最大位移有14.98 mm,但C点处变形较为集中,这可能是由于CD段支撑间距较小,基坑刚度较大,有效控制了围护结构的变形。

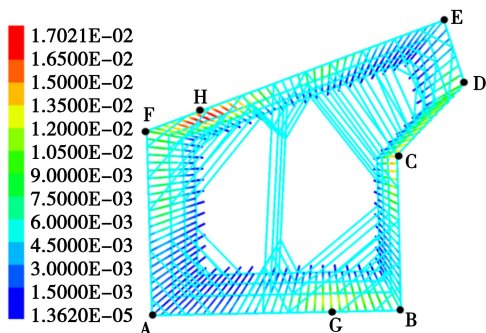


图5 吊脚桩侧向变形空间分布特征(单位:m)
Fig. 5 Spatial distribution characteristics of lateral deformation of supporting structure (unit:m)

进一步研究不规则无岩肩长短吊脚桩水平变形特征,选取吊脚桩发生较大水平位移位置G点、H点与C点作为基坑变形的特征点,比较各位置长短吊脚桩的侧移分布规律,如图6所示。总体上各点位长短吊脚桩的变形模式相同,其侧移均呈现中间大,两端小的“涨肚”型变形模式。支撑结构变形主要发生在基坑土层段,土岩交界面以下支撑结构变形较小,同一测点吊脚长短桩侧移值无明显差别。对比各点吊脚墙水平位移图,G点与H点处吊脚桩侧移值规律基本相同,但H点钝角角撑支撑刚度较小,侧移值较大。C点处变形规律与G、H点存在明显差异,C点处桩顶位移较大,最大侧移位置上移。这说明,基坑阳角部位桩顶部冠梁-支撑体系刚度较小,吊脚桩土层段变形更加

显著,在施工设计时,应当考虑增强基坑阳角位置土层段支护结构。

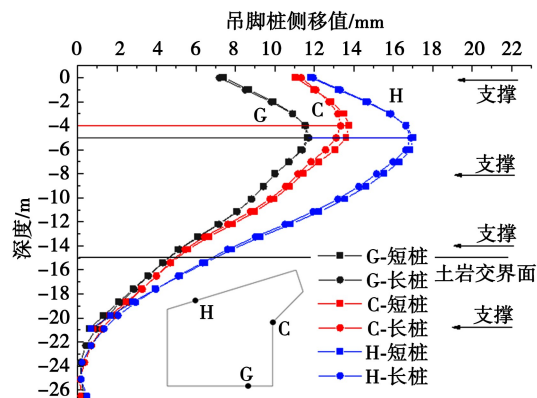


图6 特征点长短吊脚桩支护侧移曲线

Fig. 6 Lateral displacement curve of long and short suspended pile at characteristic points

3.2 坑外地表沉降变化规律

图7为坑外地表沉降空间分布特征,坑外地表沉降随着与基坑距离增大先增大后减小,最大地表沉降值达21.6 mm。由于基坑存在空间效应,在基坑阴角位置处,如E点、A点、B点坑外地表沉降影响范围缩小。而基坑阳角位置处,坑外地表沉降影响范围增大。坑外地表沉降在G点、C点与H点较大,对应了围护结构较大变形位置。

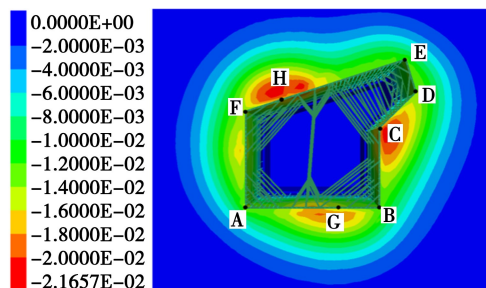


图7 坑外地表沉降空间分布特征(单位:m)

Fig. 7 Spatial distribution characteristics of surface subsidence outside the pit (unit: m)

选取基坑地表沉降较大的G点、C点、H点,对比不同位置坑外地表沉降变化规律,绘制如图8。各点地表沉降均呈典型“凹槽型”沉降曲线,H点与C点最大沉降值基本相等,均达到21.6 mm左右。与吊脚桩侧移类似,G点与H点的地表沉降曲线规律基本相同,H点地表沉降值略大,坑外地表沉降影响范围均为19 m左右,而C点地表沉降影响范围较大,约为24 m。这表明,基坑阳角会导致坑外地表沉降范围扩大。

3.3 内支撑轴力变化规律

图9为各道内支撑轴力分布。根据本基坑支撑杆件类型以及空间分布的特点,将支撑杆件分为

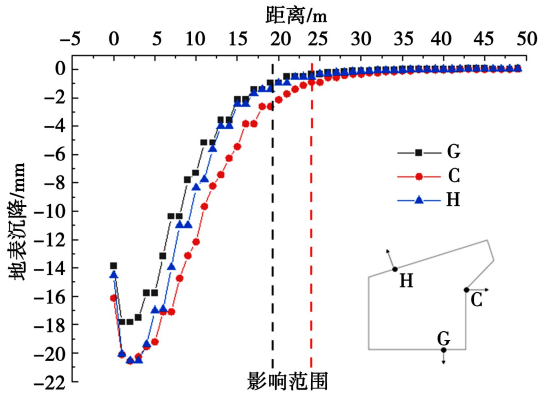


图 8 特征点坑外地表沉降变化规律

Fig. 8 Surface subsidence curve outside the pit at characteristic points

A 点角撑、F 点角撑、中部对撑、B 点角撑、C 点对撑以及 DE 角撑 6 个分区,其中 A 点与 B 点角撑同为直角阴角角撑,F 点处为钝角角撑。各道支撑最大轴力均出现在基坑 A 角处 3 号角撑,支撑轴力最大支撑为 2-3(2-3 表示第二道支撑的 3 号支撑,每根支撑的编号见图 4),为 3 025 kN,与现场监测数据中最大支撑轴力出现位置相同。对比各道支撑轴力,基本上为相同位置支撑均呈现第二道支撑内力最大,第三道支撑次之,约为第二道支撑相同位置的 40%~70%,最大值为 1 705 kN,第一道支撑较小,约为第二道支撑的 10%~50%,最大值仅 1 121 kN,第四道支撑由于吊脚桩底部岩土层为中风化岩层段,支撑轴力最小,不到第二道支撑轴力的 20%。支撑轴力沿深度分布基本与前文中吊脚桩变形规律分布相同。

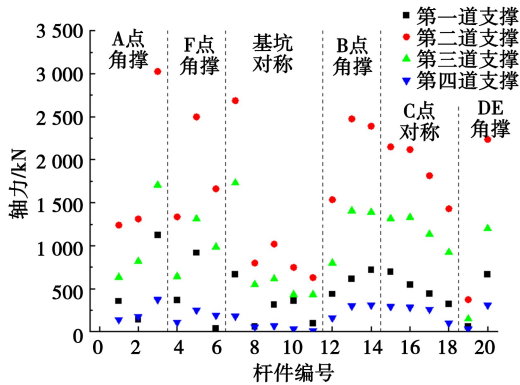


图 9 各道内支撑轴力分布

Fig. 9 Distribution of supporting axial force in each heights

由于各道支撑内力分布规律基本相同,选取第二道支撑轴力进行分析,以研究不规则无岩肩吊脚桩基坑的支撑内力分布,如图 10 所示。第二道支撑中,3 号、5 号、7 号、13 号、14 号、15 号、16 号、20 号支撑的对应轴力偏大,均匀分布于基坑各位置。其中 7 号、15 号、16 号为对撑,7 号为基坑内长度

最长的一根对撑,15 号与 16 号为阳角位置处的支撑,在阳角位置采用对称有效的控制了基坑阳角位置处的位移。19 号支撑的轴力较小同样说明了采用钝角角撑的支撑方式不合理。

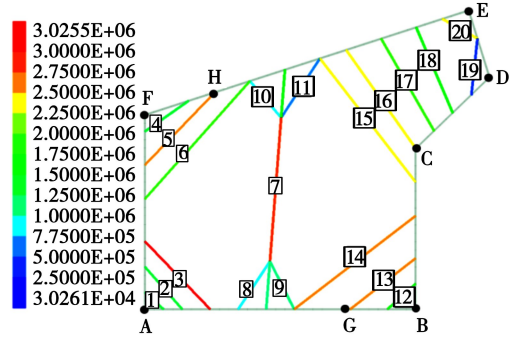


图 10 第二道支撑轴力分布规律

Fig. 10 The distribution law of the second support axial force

4 吊脚桩支护结构冗余度研究

4.1 不同冗余度表达方式计算结果

为更好地研究基坑工程中各种冗余度表达方式的差异性与适用性,别拆除各支撑杆件,以支护结构中吊脚桩最大变形以及各支撑杆件轴力为指标,根据式(3)、(4)、(5)、(6)计算支撑杆件的冗余度,计算结果如图 11 所示。为便于展示数值的分布,采用不均匀的纵坐标轴,其中江杰等^[12]提出的强度冗余度计算结果中 1-3、2-5 杆件的计算结果为负值,未展示于图中。将失效杆件按前文分为 6 个分区,以研究土岩吊脚墙异形基坑不同空间位置与类型的内支撑杆件冗余度的差异性。

总体上,4 种冗余度计算结果类似但存在一定差异,刚度冗余度^[12]较小的杆件编号为 1-3、2-5,位于 A 点与 F 点角撑。江杰提出的强度冗余度较小的杆件编号为 2-2、2-3、2-6、2-7、2-9、2-15 杆件,这些杆件的均相邻于轴力最大的支撑杆件 2-3,可视为各分区内对轴力最大杆件影响最大的杆件,说明江杰提出的强度冗余度主要表明轴力最大杆件相邻杆件的可靠度。宋利文等^[14]提出的强度冗余度较小的杆件为 1-3、1-5、1-7、1-9、3-15,这是由于式(5)中分子为杆件自身轴力,第二道支撑轴力较大,计算结果相对较大,表明该表达方式不适用于轴力差距过大的支撑体系。基于支撑极限承载力的强度冗余度最小的杆件编号为 2-3,最小值仅 4.18。各分区内均存在冗余度相对较小的杆件,这说明该基坑的整体性较弱,但计算结果均大于 1,说明该基坑内支撑布置合理,基坑具有一定的抗连续破坏能力。

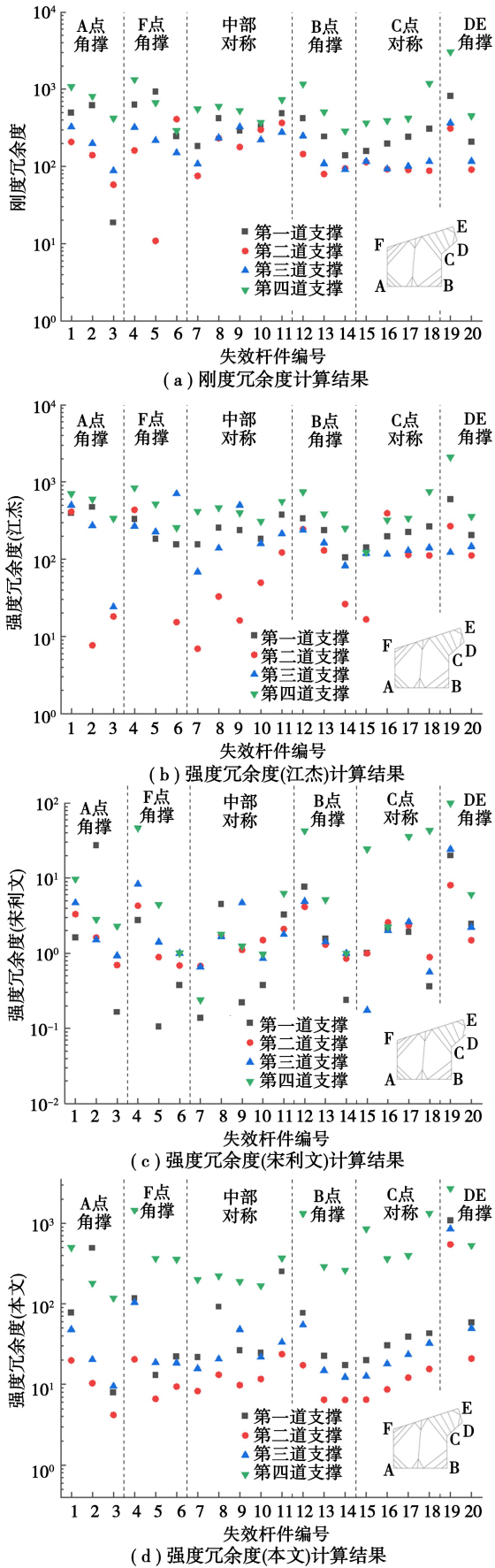


图 11 不同表达方式下冗余度计算结果

Fig. 11 Redundancy calculation results under different expressions

将不同冗余度表达方式计算结果按支撑位置整理均值、中位值以及极值,如图 12,以研究不同冗余度表达方式差异性以及冗余度在竖向空间分布。根据支撑冗余度计算结果可以看出,4 种冗余度均值、中位值、最小值的大小关系均为刚度冗余度>强度冗余度(江杰)>强度冗余度(本文)>强度冗余度(宋利文),这是因为各个冗余度表达方式含义不同,但计算结果最大值与最小值相差倍数则相反,这说明了宋利文提出的强度冗余度与基于支撑极限承载力的强度冗余度计算方法下,不同杆件计算结果差异性更加明显。

对比不同位置支撑冗余度数值可以发现,冗余度均呈现第二道支撑冗余度最小,第一、第三道支撑冗余度次之,第四道支撑冗余度最大。这与前文中支护结构变形、内支撑轴力分布规律对应,支护结构变形越大位置、内支撑轴力越大的杆件其冗余度越小。土岩基坑由于特殊的地质条件,即使采用吊脚桩这种缺乏底部嵌固的特殊支护结构,支撑杆件体系内最下道支撑的冗余度依然较大,支护结构上方土层部分支护杆件冗余度更低。

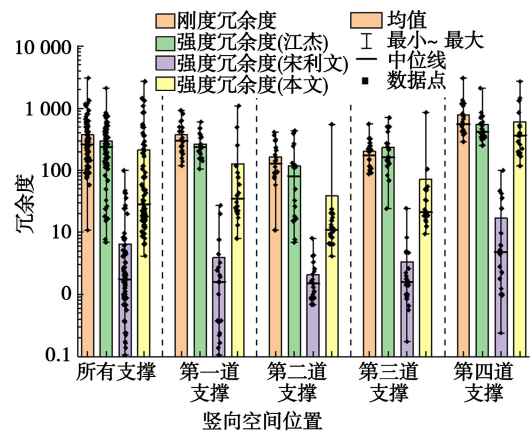


图 12 冗余度计算结果整理

Fig. 12 Statistics of redundancy calculation results

支撑杆件轴力越大,其作为应力路径传递荷载的重要性自然更重要,同时,前文中大多数冗余较小的杆件都分布于轴力较大的杆件附近。这表明杆件的冗余度大小可能与自身轴力存在一定联系,图 13 为冗余度与杆件轴力的关系。4 种冗余度表达方式计算结果与杆件轴力的关系不相同。刚度冗余度与轴力总体呈反比例函数关系,失效杆件本身轴力越大,冗余度越小,但存在若干差异点,分别为偏大的 1-5、2-6 与偏小的 2-5,这些杆件均为基坑最大变形位置相邻杆件,这表明这些杆件的失效导致基坑最大变形位置附近荷载传递路径变化最为显著,计算结果主要针对最大变形位置相邻杆件。江杰提出的强度冗余度由于仅考虑轴力最大的支撑杆件,其冗余度值与失效杆件本身的轴力无

明显关联性。宋利文提出的强度冗余度分布在一上一下两条包络线中,这是由于计算结果直接与杆件本身轴力正相关,轴力越大,冗余度越大,导致了轴力较大的杆件强度冗余度反而偏大。本文提出的基于支撑极限承载力的强度冗余度分布在一条上包络线下方,这体现出轴力较大的杆件其基于支撑极限承载力的强度冗余度较小,但轴力较小的杆件同样可能存在冗余度较小的情况。

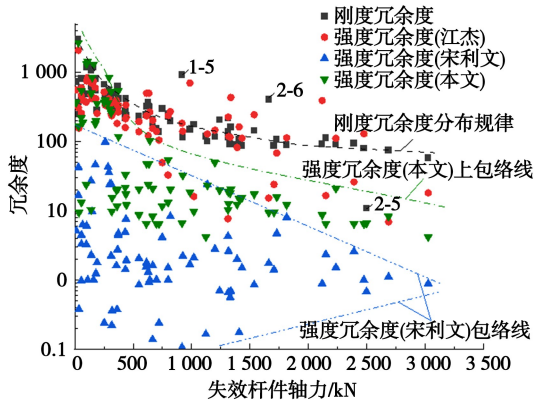


图 13 不同冗余度与杆件轴力的关系

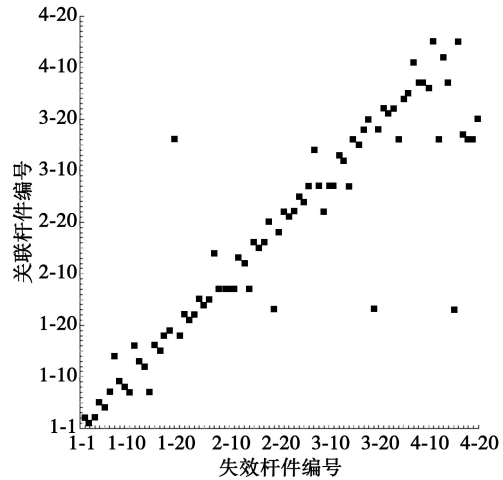
Fig. 13 The relationship between different redundancy indices and the axial force

总之,既有的冗余度表达方式在评价杆件冗余度时都存在一定的局限性,采用基于支撑极限承载力的强度冗余度对体系冗余度进行评价时,能更加全面地去评判不同位置、轴力的杆件。

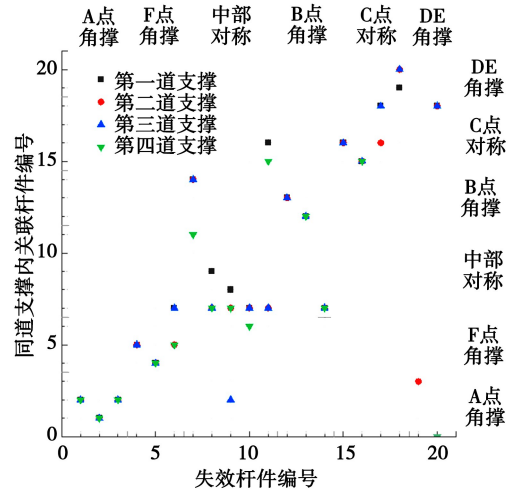
4.2 关联杆件与关联系数

在对基坑支撑构件基于支撑极限承载力的计算强度冗余度时,需选择其余杆件计算结果中最小值,可认为对应的杆件为构件损伤影响最大的构件,本文定义其为关联杆件。图 14 为基于支撑极限承载力的强度冗余度关联杆件,图 14(a)为所有失效杆件对应关联杆件,图 14(b)为各道支撑内失效杆件对应的关联杆件。失效杆件的关联杆件主要位于同道支撑内的相邻杆件,这是由于支护体系水平面上的刚度较大,构件损坏后的多余荷载主要在本平面内传递。各道支撑内 19 号支撑关联杆件不存在显著分布规律,即 DE 角撑中钝角角撑,这同样说明,当采用钝角角撑时,其传递荷载能力较弱,整体性较弱,不适合作为主要的支护方式。同时第四道支撑的关联杆件也存在部分关联杆件位于第三道支撑,这可能是由于最下道支撑轴力较小,承载力冗余度较大,其余杆件破坏对承载力冗余度的影响较小。观察图 14(b)可以发现各道撑内关联杆件规律相似,关联杆件主要位于失效杆件同一分区,或相邻杆件。通过关联杆件,可以明确支撑杆件受损后影响最大的其余构件,当基坑发生

支撑损坏时,可以针对性对关联杆件进行校核、保护与加强。



(a) 所有失效杆件对应关联杆件



(b) 各道支撑内失效杆件对应关联杆件

图 14 基于支撑极限承载力的强度冗余度关联杆件

Fig. 14 Strength redundancy associated members based on ultimate bearing capacity of braces

定义 α 为某杆件作为其余杆件关联杆件次数,称之为构件关联系数。该系数表明了其他杆件破坏后荷载将此杆件作为新的主要传力路径次数。 α 越大,表明该杆件防止基坑发生连续破坏的作用越大,其在支护结构中作为安全储备的地位越重要。整理依托工程中关联系数,如图 15 所示。观察可以发现,大多数构件关联系数都为 1,这说明,大多数构件仅作为单一构件关联杆件,而 2-7、3-7、3-16 杆件均作为 5 根即以上杆件关联杆件,说明这几根杆件为支护体系内重要杆件。该系数有助于明确支护结构体系中重要性较高构件。在基坑支护结构设计过程中,应加强关联系数较大构件;优化关联系数较低杆件;优化支撑布置,降低基坑中较大关联系数,提高基坑承载力冗余度。在施工过程中,可明确需重点保护支撑,针对性设置监测点

与监测项目。

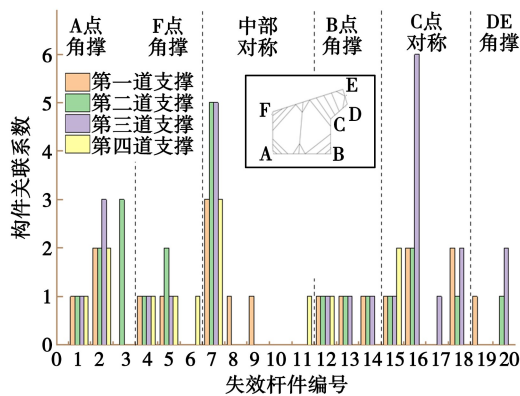


图15 各支撑杆件关联系数

Fig. 15 Correlation coefficient of each support

5 结论

(1) 异形土岩地层吊脚桩基坑变形主要集中于上部土层段、阳角角点与基坑长边的中段,最大值为 17.02 mm; 阳角位置处的吊脚桩顶部水平变形较大,最大侧移位置上移,地表沉降影响范围更大,最大地表沉降位置距基坑更远,阴角与之相反,阳角处地表沉降影响范围约为阴角处 2 倍。

(2) 基于支撑极限承载力的强度冗余度指标能更加全面与量化地评价支护体系内不同位置、不同轴力的支撑杆件冗余度,更好地反映支撑杆件承载力冗余量的变化;关联杆件能明确构件受损后影响最大的支撑杆件;关联系数有助于优化支护结构的传力路径,提高支护结构整体的冗余度。

(3) 上部土层段支撑杆件冗余度较小,最小值位于第二道支撑,仅 4.18,支护结构底部虽然无嵌固,但最下道支撑的冗余度较大,最大值超过 100;支撑杆件自身轴力、相邻位置支护结构变形与杆件冗余度呈负相关。

(4) 吊脚桩支护结构支撑杆件对应关联杆件主要集中在相邻杆件;大多数支撑杆件的关联系数为 1,2-7,3-7,3-16 杆件的关联系数较大;对撑的关联系数大于角撑关联系数。

参考文献 (References)

[1] 陈诚, 杨红林. 土岩“二元基坑”吊脚桩支护体系锁脚锚杆预加轴力计算方法研究[J]. 隧道建设(中英文), 2020, 40(10): 1441-1447. (Chen Chen, Yang Honglin. Study on calculation method of preloaded axial force of foot-lock anchor in support system of soil and rock dualistic foundation pit end-suspended pile [J]. Tunnel Construction, 2020, 40(10): 1441. (in Chinese))

[2] 李栋, 王虎, 秦建新. 二元岩土基坑支护中强度折

减法的研究及应用[J]. 建筑科学, 2020, 36(增1): 8-13. (Li Dong, Wang Hu, Qin Jianxin. Research and application of finite element strength reduction method in the support of dualistic foundation pit [J]. Building Science, 2020, 36(Supp. 1): 8-13. (in Chinese))

- [3] 刁志刚, 夏文韬. 二元地层超深基坑桩锚撑组合支护轴力报警与变形协调分析[J]. 现代隧道技术, 2020, 57(增1): 864-876. (Diao Zhigang, Xia Wentao. Axial force alarm and deformation coordination analysis of pile-anchor-brace combined support for ultra-deep foundation pit in binary stratum [J]. Modern Tunnelling Technology, 2020, 57(Supp. 1): 864-876. (in Chinese))
- [4] 李隆平, 王林枫, 王自强, 等. 二元基坑新型吊脚墙(桩)技术工程实践[J]. 地下空间与工程学报, 2023, 19(3): 962-972, 980. (Li Longping, Wang Linfeng, Wang Ziqiang, et al. Engineering application of new suspended diaphragm wall (pile) technology of soil and rock dualistic foundation pit [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2023, 19(3): 962-972, 980. (in Chinese))
- [5] 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 Sunlei, Xu Wu, Wang Ziqiang, 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. (in Chinese))
- [6] 徐武, 赵顺磊, 王自强, 等. 土岩地层无岩肩吊脚墙基坑开挖受力及变形规律分析[J]. 建筑技术, 2023, 54(9): 1092-1097. (Xu Wu, Zhao Sunlei, Wang Ziqiang, et al. Force and deformation law for excavation of foundation pit without rock shoulder hanging footwall in soil and rock strata [J]. Architecture Technology, 2023, 54(9): 1092-1097. (in Chinese))
- [7] 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.
- [8] 沈启炜. 滨海残积土基本特性试验及异形基坑开挖方案优选[J]. 地下空间与工程学报, 2017, 13(4): 1073-1079, 1105. (Shen Qiwei. Characteristic test of coastal residual soil and selection of excavation plan for the irregular foundation pit [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2017, 13(4): 1073-1079, 1105. (in Chinese))
- [9] 王洪德, 秦玉宾, 马云东, 等. 带阳角土岩基坑变形

- 特征仿真与实测对比分析[J]. 安全与环境学报, 2013, 13(4): 173-178. (Wang Dehong, Qin Yubin, Ma Dongyun, et al. Comparative simulation and measurement of the deformation features of the soil-rock deep foundation pit with apposite corner [J]. Journal of Safety and Environment, 2013, 13(4): 173-178. (in Chinese))
- [10] Frangopol D M, Curley J P. Effects of damage and redundancy on structural reliability [J]. Journal of Structural Engineering, 1987, 113(7): 1533-1549.
- [11] 程雪松. 地下工程中若干失稳破坏问题的机理和冗余度研究[D]. 天津: 天津大学, 2014. (Chen Xuesong. Mechanism and redundancy study of some collapse problems in underground engineering [D]. Tianjin: Tianjin University, 2014. (in Chinese))
- [12] 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 Jie, Xiao Meng, Long Tuanyuan, et al. Redundancy of ring-beam supporting structures of deep excavations [J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2017, 42(6): 2339-2346. (in Chinese))
- [13] 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(增1): 518-522. (Jiang Jie, Gu Qianyan, Hu He, et al. Study of redundancy of double-row steel sheet piles cofferdam [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(Supp. 1): 518-522. (in Chinese))
- [14] 宋利文, 谭燕秋. 基于施工工况下冗余度的深基坑支护体系研究[J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15(增1): 321-326. (Song Liwen, Tan Yanqiu. Research on deep foundation pit support system based on redundancy under construction condition [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019, 15(Supp. 1): 321-326. (in Chinese))
- [15] 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 Gang, Chen Xuesong, Zhou Haizuo, et al. Resilient evaluation and control in geotechnical and underground engineering [J]. China Civil Engineering Journal, 2022, 55(7): 1-38. (in Chinese))
-
- (上接第 672 页)
- [16] 郜新军, 李铭远, 张景伟, 等. 富水粉质黏土中地铁联络通道冻结法试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(6): 1267-1276. (Gao Xinjun, Li Mingyuan, Zhang Jingwei, et al. Field research on artificial freezing of subway cross passages in water-rich silty clay layers [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(6): 1267-1276. (in Chinese))
- [17] 王建林. 联络通道冻结-开挖过程冻结帷幕发展特性研究[D]. 福州: 福建工程学院, 2023. (Wang Jianling. Study on the development law of temperature stress field of the freezing curtain in the freezing-excavation process of connecting passage [D]. Fuzhou: Fujian University of Technology, 2023. (in Chinese))
- [18] 徐亚峰, 童俊, 陈玮, 等. 超长倾斜联络通道冻结施工全过程有限元分析[J]. 地下空间与工程学报, 2024, 20(4): 1317-1326. (Xu Yafeng, Tong Jun, Chen Wei, et al. Fem analysis of the whole construction process of super-long inclined connecting passage by freezing method [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2024, 20(4): 1317-1326. (in Chinese))
- [19] 向亮, 王飞, 靳宝成, 等. 红砂岩地层联络通道冻结法施工温度场分布研究[J]. 土木工程学报, 2020, 53(增1): 306-311. (Xiang Liang, Wang Fei, Jin Baocheng, et al. The distribution of temperature field with the construction of connecting passage in red sandstone formation by freezing method [J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(Supp. 1): 306-311. (in Chinese))
- [20] 黄建华, 严耿明, 杨鹿鸣. 水泥改良土地层联络通道冻结温度场分析[J]. 土木工程学报, 2021, 54(5): 108-116. (Huang Jianhua, Yan Gengming, Yang Luming. Analysis of freezing temperature field in connecting passage of cement improved soil layer [J]. China Civil Engineering Journal, 2021, 54(5): 108-116. (in Chinese))
- [21] 梅源, 赵良杰, 周东波, 等. 冻结法在富水砂层暗挖施工中的应用[J]. 中国铁道科学, 2020, 41(4): 1-10. (Mei Yuan, Zhao Liangjie, Zhou Dongbo, et al. Application of freezing method in the concealed excavation construction of water-rich sand layer [J]. China Railway Science, 2020, 41(4): 1-10. (in Chinese))
- [22] Liu P, Hu J, Dong Q X, et al. Studying the freezing law of reinforcement by using the artificial ground freezing method in Shallow Buried Tunnels. Applied Sciences, 2024, 14(16): 7106.
- [23] Cui Z D, Zhang L J, Xu C. Numerical simulation of freezing temperature field and frost heave deformation for deep foundation pit by AGF. Cold Regions Science and Technology, 2023, 213: 103908.
- [24] Yan Q X, Wu W, Zhong H J, et al. Temporal and spatial variation of temperature and displacement fields throughout cross-passage artificial ground freezing. Cold Regions Science and Technology, 2023, 209: 103817.