

文章编号:1672-3961(2024)03-0070-11 DOI:10.6040/j.issn.1672-3961.0.2023.024

基于岩体稳定的土岩二元基坑破坏模式

李连祥^{1,2}, 韩志霄^{1,2}, 张潇潇³, 陈家财⁴

(1.山东大学基坑与深基础工程技术研究中心,山东 济南 250061; 2.山东大学土建与水利学院,山东 济南 250061; 3.青岛市市政公用工程质量安全监督站,山东 青岛 266011; 4.中铁一局集团第五工程有限公司,陕西 宝鸡 721000)

摘要:为了探究土岩二元基坑的破坏模式及判定标准,依托具体案例,采用 PLAXIS 3D 有限元数值模拟软件,利用强度折减法,得到下卧岩体稳定时不同上覆土层厚度的4种基坑破坏模式演变规律和不同下卧岩体的基坑破坏模式判定标准。利用条分法推导出圆弧、圆弧-平面、切面和滑切破坏模式整体稳定性统一解析解,针对切面和滑切破坏模式,得到不同下卧岩体发生破坏时的临界上覆土层厚度,推导出保持岩体切角稳定的最小支护作用力计算公式。结合多个基坑工程案例进行验证,结果表明:土岩二元基坑的破坏模式有别于土体基坑,应充分考虑岩体的强度和稳定性。下卧岩体稳定时,随上覆土层厚度增大,土岩二元基坑的破坏模式逐渐从圆弧破坏向圆弧-平面、切面和滑切破坏过渡转变,破坏模式判定标准及稳定性解析解具有合理性研究结果,可以为土岩二元基坑合理支护提供支持和参考。

关键词:土岩二元基坑;直立开挖;破坏模式;稳定性分析;解析解**中图分类号:**TU443 **文献标志码:**A**引用格式:**李连祥,韩志霄,张潇潇,等.基于岩体稳定的土岩二元基坑破坏模式[J].山东大学学报(工学版),2024,54(3):70-80.

LI Lianxiang, HAN Zhixiao, ZHANG Xiaoxiao, et al. Failure mode of soil-rock dual foundation pit based on rock mass stability[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2024, 54(3):70-80.

Failure mode of soil-rock dual foundation pit based on rock mass stability

LI Lianxiang^{1,2}, HAN Zhixiao^{1,2}, ZHANG Xiaoxiao³, CHEN Jiakai⁴

(1. Foundation Pit and Deep Foundation Engineering Research Center, Shandong University, Jinan 250061, Shandong, China; 2. School of Civil Engineering and Hydraulic Engineering, Shandong University, Jinan 250061, Shandong, China; 3. Qingdao Municipal Public Engineering Quality and Safety Supervision Station, Qingdao 266011, Shandong, China; 4. The Fifth Engineering Co. Ltd., China Railway First Inning Group, Baoji 721000, Shaanxi, China)

Abstract: In order to explore the failure mode and judgment criteria of soil-rock dual foundation pit, this paper relied on specific cases, adopted PLAXIS 3D finite element numerical simulation software and strength reduction method to obtain the evolution rules of four types of foundation pit failure modes for different overlying soil thickness and the criteria for determining foundation pit failure modes for different underlying rock mass when the rock mass was stable. A unified analytical solution for the overall stability of arc, arc-plane, tangent plane and slip shear failure modes was derived by using the strip division method. According to the failure modes of sectional-plane and slip-shear, calculated the critical overlying soil thickness of different underlying rock mass, and derived the calculation formula of minimum supporting force to keep the rock mass incisal angle stable. The results showed that the failure mode of soil-rock dual foundation pit was different from that of soil foundation pit, and the strength and stability of rock mass should be fully considered. When the underlying rock mass was stable, with the increase of the thickness of the overlying soil layer, the failure mode of the soil-rock dual foundation pit gradually changed from circular failure to circular plane failure, tangent failure and sliding shear failure. The criterion of failure mode and the analytical solution of stability were reasonable. The research results could provide support and reference for the rational support of soil-rock dual foundation pit.

Keywords: soil rock dual foundation pit; vertical excavation; failure mode; stability analysis; analytical solution

收稿日期:2023-02-07

第一作者简介:李连祥(1966—),男,河北滦县人,教授,博士生导师,博士,主要研究方向为基坑与深基础教学。E-mail:jk_doctor@163.com

0 引言

基坑破坏模式是指开挖卸荷后边坡的潜在滑移面,它揭示基坑的失稳形态、破坏机制和影响范围^[1],决定支护结构合理选型,为整体稳定性验算与分析提供依据。土岩二元基坑是指支护体系影响深度范围内上部是土体、下部为岩体的基坑^[2]。目前,岩土工程勘察缺少土岩二元基坑破坏模式的判定和建议,国内标准缺乏土岩二元基坑设计的指导^[3-5],工程师常常将土岩基坑按照纯土体基坑圆弧滑动法进行设计和计算^[3],一定程度上忽视了下卧稳定岩体对基坑整体的有利影响^[5],使得支护设计偏于保守。

近年来,学者们利用工程监测^[6-7]、力学推导^[8-11]、数值模拟^[12-13]等采用强度折减法、滑移线场法和安全系数解析法进行了研究。鲍树峰等^[14]指出土岩基坑的破坏模式和稳定性主要受上覆土层厚度和下卧岩体风化程度的影响。严薇等^[15]研究表明,应当考虑土岩界面以上土体的稳定。张楠^[16]以稳定的中风化岩体作为土岩界面,发现岩面上升基坑整体变形量都相对减小,岩面以下岩体侧向变形较小;在进行支护结构和开挖设计时,当土岩基坑坡率小于1:0.8时,发生圆弧-平面破坏^[17-18];坡率大于1:0.5或强风化岩厚度占比超过1/2时发生圆弧-平面-切角破坏,大坡率条件下还存在圆弧-斜平面破坏,并推导出圆弧、圆弧-平面破坏模式下的安全系数解析解^[19-20]。

上述研究表明,土岩基坑整体破坏模式不一,采用完全土体的圆弧滑动存在明显误区,应充分考虑下卧岩体强度、自稳能力对基坑整体变形与稳定的约束和支持作用。对于下卧岩体稳定的土岩二元基坑,其破坏模式和稳定性受到上覆土层厚度的影响,但破坏模式的具体类型及其演变规律尚未明确,实际工程中难以判断破坏模式,不能为支护结构的设计提供有效指导。

本研究针对具体案例,采用雷达探测判定下部岩体稳定,优化了岩体破坏主导的整体平面滑动设计方案。采用数值模拟方法探究了不同上覆土层厚度的基坑破坏模式及其演变规律,针对济南、青岛地区土岩二元基坑常见岩体类型,得到不同岩体和不同土层厚度对应的整体破坏模式的判定标准,并推导整体稳定性统一解析解,为土岩二元基坑支护设计、判定整体破坏模式提供参考。

1 土岩二元基坑破坏模式

1.1 工程背景

青岛市地铁工程某段区间中部设置盾构始发井兼轨排井,井口尺寸长、宽分别为35、29 m,开挖深度约34 m。始发井位于城市主干道路中央,周围环境复杂、施工空间狭窄,采用直立开挖方式。基坑周边均布荷载100 kPa,水位埋深约4.7 m。场地主要地层及相关参数见表1, c 为粘聚力, φ 为内摩擦角, ν 为泊松比, E 为弹性模量, f_a 为地基承载力特征值。

表1 岩土层物理参数
Table 1 Parameters of rock mass

地层名称	c / kPa	φ / ($^{\circ}$)	ν	E / MPa	层厚/ m	f_a / kPa
素填土	5	10	0.40	8	0.8	
粉质黏土	18	19	0.35	13	4.1	150
强风化凝灰岩	30	15	0.25	80	0.3	800
中风化凝灰岩	100	25	0.22	12 000	2.1	2 000
微风化凝灰岩	150	40	0.20	23 000	39.3	6 000

该项目勘察报告建议竖井岩体结构面倾角按 $55^{\circ} \sim 65^{\circ}$ 取值,破坏模式为整体平面滑动。为控制 60° 滑移体,原设计方案采取钢管桩-17排锚杆相结合的支护形式,见图1。设置构造钢管桩采用 $\Phi 299 \text{ mm} @ 1 \text{ m}$ (管桩直径和钢筋均匀分布间距),长度约19 m,桩内插工20b型钢,钢管桩间距1 m。基坑内壁挂钢筋网,并喷射厚100 mm混凝土。

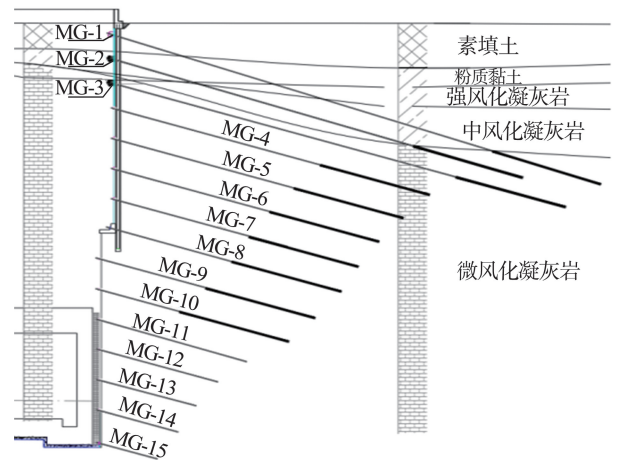


图1 原支护结构单元剖面

Fig.1 Section of original supporting structure unit

下卧岩体硬度较大,施工困难、支护工期太长,因此,对岩体部分的稳定性和支护结构设计开展优化分析。通过地质雷达探测发现,岩体未见明显的高倾角贯通结构面,结合岩体完整程度、类型等,判定微风化凝灰岩为I类岩体,高30 m边坡长期稳定,偶有掉块^[4]。

由于上部钢管桩和土层三排锚索已经施工,因此,对下部锚索代之以侧壁浅层构造锚杆,避免坡面岩块掉落。优化后的支护结构单元剖面见图2,锚索参数见表2。构造锚杆采用预应力锚杆,锚杆长3.5 m,水平和竖向间距均为2 m。冠梁、腰梁采用C30混凝土,截面分别为500 mm×600 mm、300 mm×400 mm。

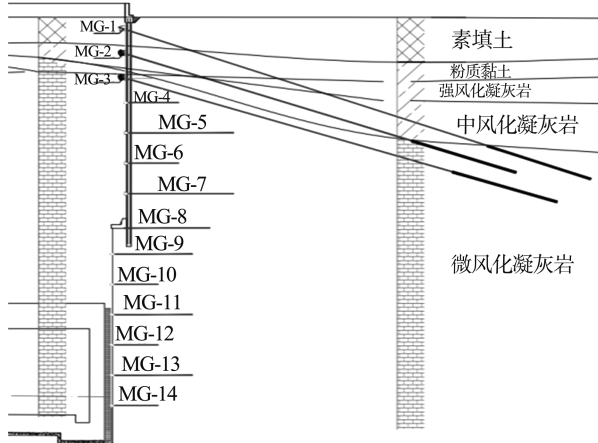


图2 优化后支护结构单元剖面

Fig.2 Optimized supporting structure unit profile

表2 锚杆参数

Table 2 Anchor parameters

锚杆 标号	倾角/ (°)	自由段 长度/m	锚固段 长度/m	设计承载力/ kN
MG-1	20	14	6	615
MG-2	19	13	4	615
MG-3	18	12	6	615

优化后方案已安全施工,节约工期60 d、减少投资1 200万元,该案例证明辨识岩体结构稳定,对土岩基坑破坏模式判定和支护结构设计具有重要影响。以优化后方案建立数值模型,分析下部岩体稳定条件下,土岩双元基坑不同上覆土层厚度的破坏模式及其演变规律。

1.2 数值模型

采用PLAXIS 3D数值模拟软件,取基坑一侧支护单元,建立有限元模型及网格划分见图3。

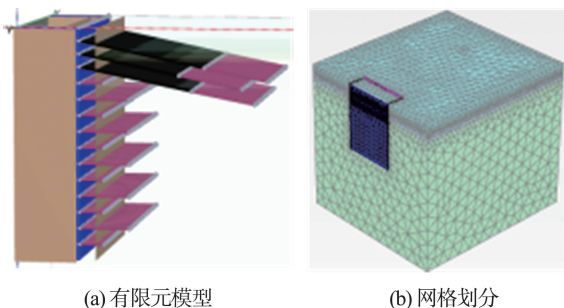


图3 有限元模型及网格划分

Fig.3 FEM and its mesh generation

钢管桩按等效惯性矩原则使用折减厚度的弹性板模拟^[21],利用界面单元模拟土、岩与弹性板的接触,冠梁、腰梁、锚固段采用Embedded桩单模拟,锚索采用点对点锚索单元模拟。

利用界面单元模拟板单元和土体单元之间的相互作用,调整界面强度折减因子 R_{inter} ,可把界面阻力和土体强度相联系。Embedded桩由嵌入界面元素的桩单元组成,用于描述桩表面和桩底与土体的相互作用。Embedded桩的材料参数分为桩的参数和表面阻力、桩端阻力的参数,并通过界面元素与土、岩体相互作用。其涉及表面侧阻力和端部阻力,由土、岩体和桩单元之间的相对位移决定。土体采用小应变硬化土模型,岩体采用摩尔-库伦模型。结合既有工程经验^[22],土层参数见表3, c' 为有效粘聚力; φ' 为有效内摩擦角, K_0 为静止侧压力系数, $\gamma_{0.7}$ 为初始剪切模量70%时对应剪应变, E_s^{1-2} 为压缩模量, E_{oed}^{ref} 为参考切线模量, E_{ur}^{ref} 为加卸载模量, G_0^{ref} 为动剪切初始模量, ν_{ur} 为加卸载泊松比, p_{ref} 为参考应力, R_f 为破坏比, E_{50}^{ref} 为参考割线模量。岩体参数表1,基坑围护结构参数见表4,有限元模拟施工工序见表5。

表3 粉质黏土的土层参数

Table 3 The soil parameters of silty clay

c'/kPa	$\varphi'/(^\circ)$	K_0	$\gamma_{0.7}$	E_s^{1-2}/MPa	E_{oed}^{ref}/MPa
18	19	0.67	6.13×10^{-7}	8.10	8.5
E_{ur}^{ref}/MPa	G_0^{ref}/MPa	ν_{ur}	p_{ref}/MPa	R_f	E_{50}^{ref}/MPa
85	127.5	0.20	100	0.95	22

表4 围护结构参数

Table 4 Envelope structure parameters

结构名称	抗拉刚度/($MN \cdot m^{-1}$)	直径/m
围护墙	1 500	0.35
锚杆	140	
冠梁	100	
腰梁	8	

表5 有限元模拟施工工序

Table 5 Finite element simulation of the construction process

工序	施工内容
1	激活界面
2	施工支护
3	向下开挖2 m
4	施工锚索
5	继续向下开挖2 m
6	施工锚索
7	继续向下开挖2 m
8	施工锚索
9~33	依次开挖、施工构造锚杆至底
34	安全性验算

选取监测数据和有限元模拟结果进行对比。工序8和工序33的支护桩桩体水平位移模拟结果

与监测数据对比见图4,地表沉降数值模拟结果与监测数据见图5。两者相差不大,证明数值模型参数与单元选择具有科学性,后续研究结果具有合理性。

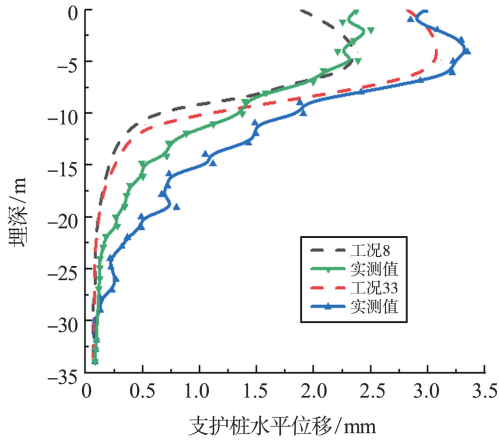


图4 支护桩桩体水平位移对比

Fig.4 Comparison of horizontal displacement value of retaining pile

土岩二元基坑的破坏模式受上覆土层厚度的影响^[14]。因此,分析基坑开挖深度 H 、上覆土层厚度 H_s 相应变化的 55 个工况的计算结果,探究不同开挖深度和土岩厚度占比影响的基坑破坏模式及其演变规律。根据 5 种基坑开挖深度,按照现行标准,采取桩锚支护型式,工况中上覆土层厚度较大,支护桩采用灌注桩,稳定性安全系数 $K=1.5$ 时,得不同基坑开挖深度时的支护结构方案,锚杆按竖向间距 3~4 m、水平间距 2 m 布置,有限元模拟施工

工序见表6,支护结构方案见表7,其中 d 为桩径, m ; n 为锚杆排数; L 为锚杆长度, m 。安全性验算利用强度折减法,选取安全系数控制法作为强度折减的终止条件。

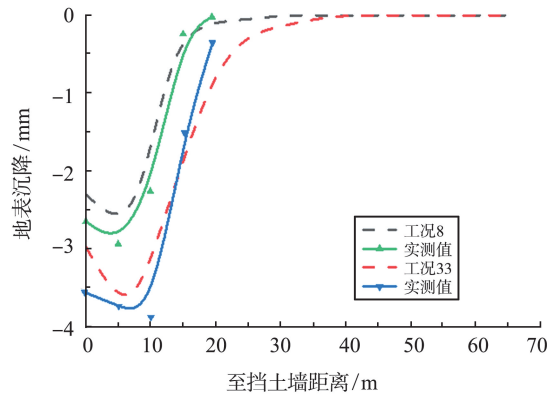


图5 支护桩后地表沉降值对比

Fig.5 Comparison of surface settlement value after retaining pile

表6 有限元模拟施工工序

Table 6 Finite element simulation construction process	
工序	施工内容
1	激活界面
2	施工围护结构
3	依次施工锚索(杆),并开挖至下一排锚索(杆)所处深度
4	开挖至底
5	安全性验算

表7 各工况支护方案

Table 7 Support schemes under different working conditions

单位:m

H_s	$H=18$	$H=22$	$H=26$	$H=30$	$H=34$
4,6	$d=0.6, n=2, L=12, 12$	$d=0.6, n=2, L=12, 12$	$d=0.6, n=2, L=14, 14$	$d=0.6, n=2, L=14, 14$	$d=0.6, n=2, L=14, 14$
8,10	$d=0.6, n=2, L=13, 13$	$d=0.6, n=2, L=13, 13$	$d=0.6, n=2, L=15, 15$	$d=0.6, n=2, L=15, 15$	$d=0.6, n=2, L=15, 15$
12,14	$d=0.6, n=3, L=14, 12, 14$	$d=0.6, n=3, L=15, 13, 15$	$d=0.6, n=3, L=16, 14, 16$	$d=0.6, n=3, L=17, 15, 17$	$d=0.6, n=3, L=18, 16, 18$
16,18	$d=0.6, n=4, L=16, 14, 13, 12$	$d=0.6, n=4, L=18, 16, 15, 14$	$d=0.8, n=4, L=20, 18, 17, 16$	$d=0.8, n=4, L=22, 20, 19, 18$	$d=0.8, n=4, L=24, 22, 21, 20$
20,22	—	$d=0.8, n=5, L=22, 20, 18, 15, 15$	$d=0.8, n=5, L=24, 22, 20, 18, 18$	$d=0.8, n=5, L=24, 22, 20, 18, 18$	$d=0.8, n=5, L=24, 24, 22, 20, 20$
24,26	—	—	$d=1.0, n=6, L=26, 26, 22, 22, 20, 20$	$d=1.0, n=6, L=28, 28, 24, 24, 20, 20$	$d=1.0, n=6, L=28, 28, 26, 26, 22, 22$
28,30	—	—	—	$d=1.2, n=7, L=32, 32, 28, 28, 24, 24, 20$	$d=1.2, n=7, L=32, 32, 28, 28, 24, 24, 20$
32	—	—	—	—	$d=1.2, n=8, L=34, 32, 28, 26, 24, 24, 20, 20$

注:“—”表示无需表示该参数。

1.3 数值模型结果

土岩二元基坑存在四种破坏模式:圆弧破坏、圆弧-平面破坏、切面破坏和滑切破坏,见图6。

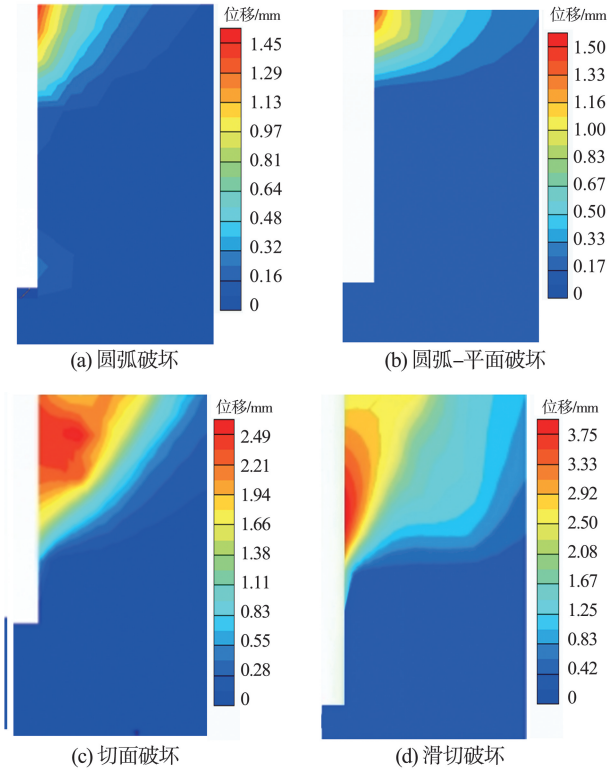


图6 土体增量位移云图

Fig.6 Incremental displacement cloud image

上覆土层厚度为4~8 m时,基坑边坡发生圆弧破坏;上覆土层厚度为8~10 m时,基坑边坡发生圆弧-平面破坏;上覆土层厚度为10~14 m时,基坑边坡发生切面破坏;上覆土层厚度为16 m以上时,基坑边坡发生滑切破坏。对于不同基坑开挖深度,下卧岩体稳定时,当上覆土层厚度相同,基坑破坏模式类型大致相同。相同基坑开挖深度,上覆土层厚度增大,破坏模式发生变化,其演变规律见图7。

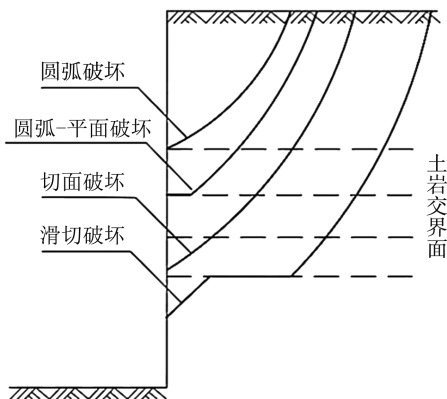


图7 基坑破坏模式随上覆土层厚度增大的演变规律
Fig.7 Evolution law of foundation pit failure mode with the increase of overlying soil thickness

1.4 土岩二元基坑破坏模式分析

根据破坏滑移线的形状,将破坏模式划分为两类:一类是破坏滑移线为圆弧状,此类仅有圆弧破坏;另一类是破坏滑移线为非圆弧状,此类包括圆弧-平面、切面和滑切破坏。将破坏滑移线中非圆弧段水平投影长度用 L_{na}/m 表示,发生圆弧破坏时 $L_{na}=0 m$,第二类破坏模式下非圆弧段水平长度 L_{na} 示意图见图8。选取 H_s/H 作为自变量, L_{na}/H 作为因变量来表达破坏模式。

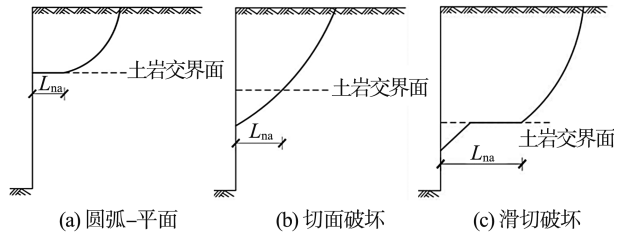


图8 非圆弧段水平投影长度 L_{na} 示意图

Fig.8 Schematic diagram of horizontal projection length L_{na} of non-circular arc segment

各工况的破坏模式规律曲线见图9。由图9可知,当 $L_{na}=0$ 时,基坑发生圆弧破坏;当 $L_{na}=0\sim 0.03 H$ 时,基坑发生圆弧-平面破坏;当 $L_{na}=0.03\sim 0.2 H$ 时,基坑发生切面破坏;当 L_{na} 大于 $0.2 H$ 时,基坑发生滑切破坏。

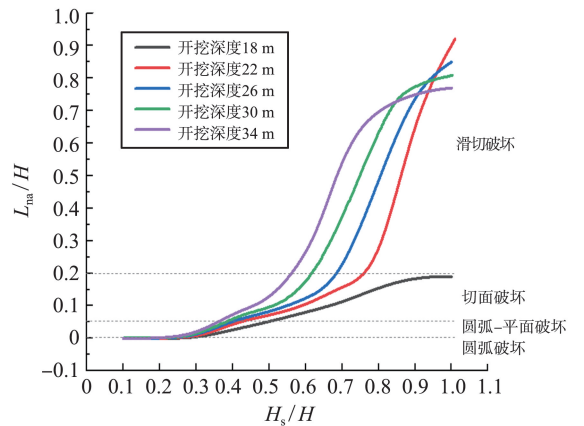


图9 不同开挖深度的基坑破坏模式规律曲线
Fig.9 Failure mode curves of foundation pit with different excavation depths

对于具体基坑工程中,可根据基坑开挖深度选定曲线,再结合上覆土层厚度和基坑开挖深度的比例明确横坐标,结合曲线中对应 L_{na}/H 的取值,即可判定该基坑的破坏模式。非圆弧段水平投影长度 L_{na} 的提出可将破坏模式用连续变量表达,且 L_{na} 的取值也可为土岩交界面上部土层实际变形、下卧岩体可能破坏的影响范围和支护设计提供参考。

结合工程地质手册^[23],获得济南、青岛地区分

布广泛的灰岩、花岗岩和辉长岩的地层参数见表8。

表8 地层参数

Table 8 Parameters of rock mass

地层名称	c/kPa	$\varphi/(\text{°})$	ν	E/MPa
粉质黏土	20	15	0.35	13
强风化灰岩	45	40	0.30	80
中风化灰岩	400	45	0.29	12 000
强风化花岗岩	40	45	0.27	65
中风化花岗岩	50	55	0.25	10 000
强风化辉长岩	35	35	0.16	75
中风化辉长岩	100	45	0.15	12 000

根据图9曲线的拟合公式,计算得到不同下卧岩体的土岩基坑破坏模式的规律曲线见图10。基坑开挖深度不同时,其判定标准取值范围存在差别。因此,计算的常见基坑开挖深度^[17-18]范围内,不同下卧岩体各破坏模式对应的上覆土层厚度作为基坑破坏模式判定标准,见表9。当下卧岩体为强风化灰岩、强风化花岗岩和强风化辉长岩时,基坑不发生滑切破坏,可供同类土岩基坑工程破坏模式判定参考。

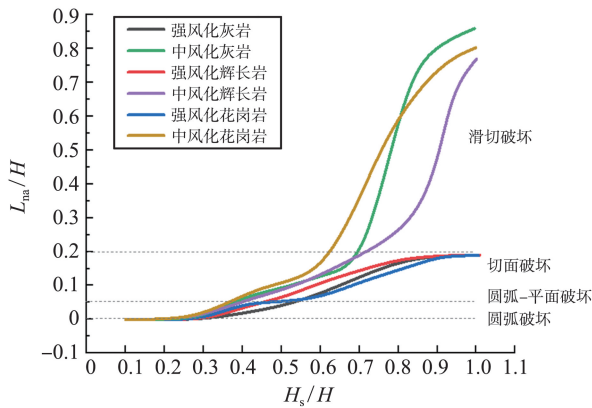


图10 不同下卧岩体的基坑破坏模式规律曲线

Fig.10 Regularity curves of foundation pit failure modes of different underlying rock masses

表9 不同下卧岩体的基坑破坏模式对应上覆土层厚度

Table 9 The foundation pit failure modes of different underlying rock mass correspond to the thickness of the overlying soil 单位:m

岩体名称	圆弧破坏	圆弧-平破坏	切面破坏	滑切破坏
强风化灰岩	0~6	6~7	≥ 7	—
中风化灰岩	0~12	12~13	13~16	≥ 16
强风化花岗岩	0~5	5~6	≥ 6	—
中风化花岗岩	0~7	7~8	8~12	≥ 14
强风化辉长岩	0~4	4~5	≥ 5	—
中风化辉长岩	0~9	9~10	10~14	≥ 16

注:“—”表示不发生此类破坏。

2 土岩二元基坑稳定性分析

2.1 基坑整体稳定性分析

基于土岩二元基坑存在的四种破坏模式,为推导图解整体稳定性统一解析解,建立4种破坏模式下统一力学分析,见图11,土岩条受力分析见图12。

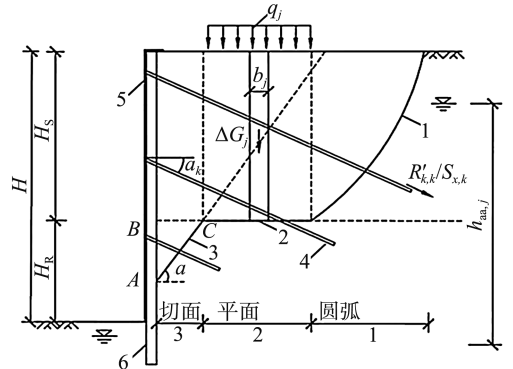


图11 土岩基坑破坏模式条分示意图

Fig.11 Failure mode stripe diagram of soil and rock foundation pit

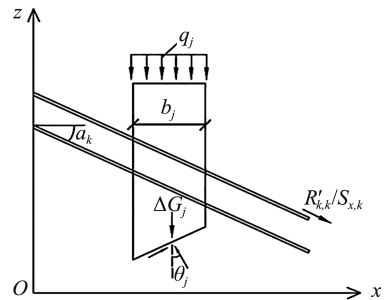


图12 土岩条受力分析示意图

Fig.12 Schematic diagram of soil rock strip force analysis

图11中,1为任意圆弧滑移面,2为任意平面滑移面,3为任意切角滑移面,4为土钉或锚杆,5为喷射混凝土面层,6为支护桩或止水帷幕, H_s 为上覆土层厚度, H_R 为下卧岩层厚度, H 为基坑开挖深度。

图12中, c_j, φ_j 分别为第 j 土(岩)条滑移面处土(岩)的粘聚力、内摩擦角; b_j 为第 j 土(岩)条的宽度; θ_j 为第 j 土(岩)条滑移面中点处的法线与垂直面的夹角; l_j 为第 j 土(岩)条的长度; q_j 为作用在第 j 土(岩)条上的附加标准分布荷载; ΔG_j 为第 j 土(岩)条的自重,按天然重度计算,对于多层土(岩)组合地层,取各层土(岩)按厚度加权的平均密度计算, u_j 为第 j 土(岩)条在滑移面上的孔隙水压力; $R_{k,k}$ 为第 k 层土钉、锚杆在滑动面以外的锚固段的标准极限抗拔承载力与土钉、锚杆杆体标准受拉承载力的较小值; a_k 为第 k 层土钉、锚杆的倾角; $S_{x,i}$ 为第 k 层土钉、锚杆的水平间距; ψ_v 为计算系数, $m=1,2,3; i=1,2,\dots,n; j=1,2,\dots,n$ 。

土岩二元基坑整体稳定性安全系数 K 应按下列公式计算:

$$K = \min\{K_{s,1}, K_{s,2}, \dots, K_{s,i}, \dots\} \geq K_s, \text{ 且 } \min\left\{\frac{R_{mi}}{T_{mi}}\right\} \geq K_s. \quad (1)$$

基坑边坡发生第 i 种破坏路径时,整体抗滑力与整体下滑力的比值

$$K_{s,i} = \frac{\sum R_{mi} + R_k}{\sum T_{mi}} \geq K_s. \quad (2)$$

第 m 段内第 i 种破坏路径时土(岩)整体抗滑力 R_{mi} 和第 m 段内第 i 种破坏路径土(岩)整体下滑力 T_{mi} 分别为

$$R_{mi} = \sum R_{mij}, T_{mi} = \sum T_{mij}. \quad (3)$$

第 m 段内第 i 种破坏路径第 j 土(岩)条的抗滑力 R_{mij} 和第 m 段内第 i 种破坏路径第 j 土(岩)条的下滑力 T_{mij} 分别为

$$R_{mij} = c_j l_j + [(q_j l_j + \Delta G_j) \cos \theta_j - u_j l_j] \tan \varphi_j + \frac{R'_{k,k} [\cos(\theta_j + \alpha_k) + \psi_v]}{S_{x,k}}, \quad (4)$$

$$T_{mij} = (q_j b_j + \Delta G_j) \sin \theta_j. \quad (5)$$

支护桩对破坏滑移土(岩)体提供的抗剪力

$$R_k = \frac{D}{L_d} \left(0.7f_i b_0 h_0 + 1.25f_{yv} \frac{A_{sv}}{S_0} h_0 + \tau_{qwz} A_{wz} \right) + \tau_{qwm} A_{wm}, \quad (6)$$

式中: D 为支护桩桩径; L_d 为支护桩桩轴间距; f_i 为混凝土抗拉强度设计值; b_0 为桩体截面宽度; h_0 为桩体截面有效高度; F_{yv} 为箍筋的设计抗拉强度; A_{sv} 为桩体截面箍筋的截面积; τ_{qwz} 、 τ_{qwm} 滑移面处微型桩、截水帷幕的标准抗剪强度, N/mm^2 , 由相关经验或试验结果确定; A_{wz} 、 A_{wm} 为微型桩、截水帷幕的截面面积, mm^2 .

当土岩二元基坑边坡破坏模式为圆弧破坏时

$$K = \min\{K_{s,i}\} = \frac{R_{1i} + R_k}{T_{1i}}, \quad (7)$$

当土岩二元基坑破坏模式为圆弧-平面破坏时

$$K = \min\{K_{s,i}\} = \frac{R_{2i} + R_{3i} + R_k}{T_{3i}}; \quad (8)$$

当土岩二元基坑破坏模式为切面破坏时

$$K = \min\{K_{s,i}\} = \frac{R_{1i} + R_{3i} + R_k}{T_{1i} + T_{3i}}; \quad (9)$$

当土岩二元基坑边坡破坏模式为滑切破坏时

$$K = \min\{K_{s,i}\} = \frac{R_{1i} + R_{2i} + R_{3i} + R_k}{T_{1i} + T_{3i}}. \quad (10)$$

根据基坑破坏模式判定标准,明确基坑破坏模式,

结合勘察报告 and 支护设计计算书中的相关参数,即可求出安全系数,进而判断基坑的整体稳定性^[24].

2.2 岩体切角稳定性分析

当土岩二元基坑发生切面破坏或滑切破坏时,下卧岩体会产生切角破坏^[25].滑切破坏是内部产生切面滑动而导致岩体发生切角破坏.岩体切角破坏会对土岩基坑工程中常采用的“吊脚桩”等支护结构^[26-29]的安全性和稳定性产生影响.

切角破坏实质是上覆土体产生的下滑力的作用结果,将切面破坏中土层内大直径圆弧段视为斜直线段,构建单位宽度三维岩体切角稳定性分析模型见图13,岩体切角受力分析示意图见图14.

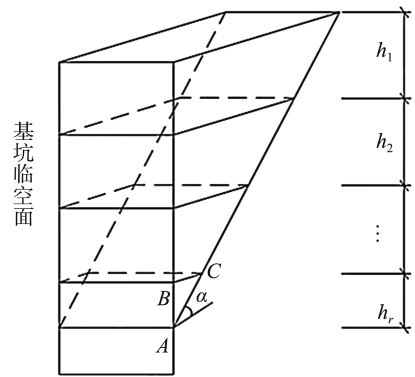


图13 岩体切角稳定性分析模型

Fig.13 Stability analysis model of rock mass tangential angle

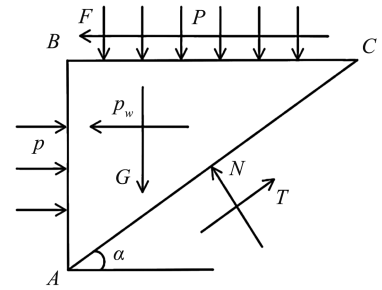


图14 岩体切角受力分析模型

Fig.14 Analysis of shear force of rock mass

选取上覆土层包含两种土为例,第一层土厚度为 h_1 ,重度为 γ_1 ,第二层土厚度为 h_2 ,重度为 γ_2 ;岩体切角深度为 h_r ,重度为 γ ,黏聚力为 c ,摩擦角为 φ .当岩体切角处于极限平衡状态时,岩体切角受到上覆土层产生的土压力 P ,土岩交界面上指向临空方向的摩擦力 F ,岩体自重 G ,开挖面支护作用压力 p ,孔隙水压力 p_w ,滑动面上的摩擦阻力 T ;法向作用力 N .

上覆土层产生的土压力

$$P = h_1 \gamma_1 \left[\frac{(h_1 + 2h_2) \sin \alpha \cos \alpha}{2} + \frac{h_r}{\tan \alpha} \right] + h_2 \gamma_2 \left(\frac{h_2 \sin \alpha \cos \alpha}{2} + \frac{h_r}{\tan \alpha} \right), \quad (11)$$

土岩交界面上的摩擦力

$$F = \frac{\cos^2 \alpha}{2} [(h_1 + 2h_2) h_1 \gamma_1 + h_2^2 \gamma_2], \quad (12)$$

岩体自重

$$G = \frac{h_r^2 \gamma}{2 \tan \alpha}, \quad (13)$$

岩体切角破坏时倾角

$$\alpha = 45^\circ + \frac{\varphi}{2}, \quad (14)$$

由竖直方向受力平衡,可知

$$G + P = N \cos \alpha + T \sin \alpha, \quad (15)$$

由水平方向受力平衡,可知

$$p + T \cos \alpha = p_w + N \sin \alpha + F, \quad (16)$$

由 Mohr-Coulomb 强度理论,推得

$$T = N \cos \varphi + c \frac{h_r}{\sin \alpha}. \quad (17)$$

根据表 8 地层参数,计算得到济南、青岛地区常见下卧岩体发生破坏时对应的临界上覆土层厚度:强风化灰岩对应上覆土层厚度为 8 m;中风化灰岩为 13 m;强风化花岗岩为 6 m;中风化花岗岩为 9 m;强风化辉长岩为 5 m;中风化辉长岩为 11 m。为得到保持岩体切角稳定时的最小支护作用力,联立式(11)~(17),可得

$$p = \left\{ p_w + \frac{\cos^2 \alpha}{2} [(h_1 + 2h_2) h_1 \gamma_1 + h_2^2 \gamma_2] \right\} \frac{(\cos \alpha + \sin \alpha \cos \varphi)}{(\sin \alpha \cos \varphi - \cos \alpha)} + \left\{ \frac{h_r^2 \gamma}{2 \tan \alpha} + h_1 \gamma_1 \left[\frac{(h_1 + 2h_2) \sin 2\alpha}{4} + \frac{h_r}{\tan \alpha} \right] + h_2 \gamma_2 \left(\frac{h_2 \sin 2\alpha}{4} + \frac{h_r}{\tan \alpha} \right) \right\} \frac{(\sin \alpha - \cos \alpha \cos \varphi)}{(\sin \alpha \cos \varphi - \cos \alpha)} - c h_r / \sin \alpha (\sin \alpha - \cos \varphi - \cos \alpha). \quad (18)$$

计算得到了不同下卧岩体破坏时的临界上覆土层厚度,与上文破坏模式判定标准互相印证。推导出保持岩体切角稳定所需最小支护作用力的计算公式,为支护结构的设计理论提供参考依据。

3 工程案例

3.1 数值模型建立

选取 4 个工程案例验证破坏模式判定标准及整体稳定性解析解的科学性,文献[23,28-30]中案例工况见表 10。分别建立 4 个案例的有限元模型,基

坑有限元模型及网格划分见图 15。

表 10 案例工况
Table 10 Working condition of case

案例	文献	基坑开挖深度/m	上覆土层厚度/m
一	[21]	15.5	4.4
二	[29]	20.0	6.0
三	[30]	20.5	10.0
四	[31]	22.3	18

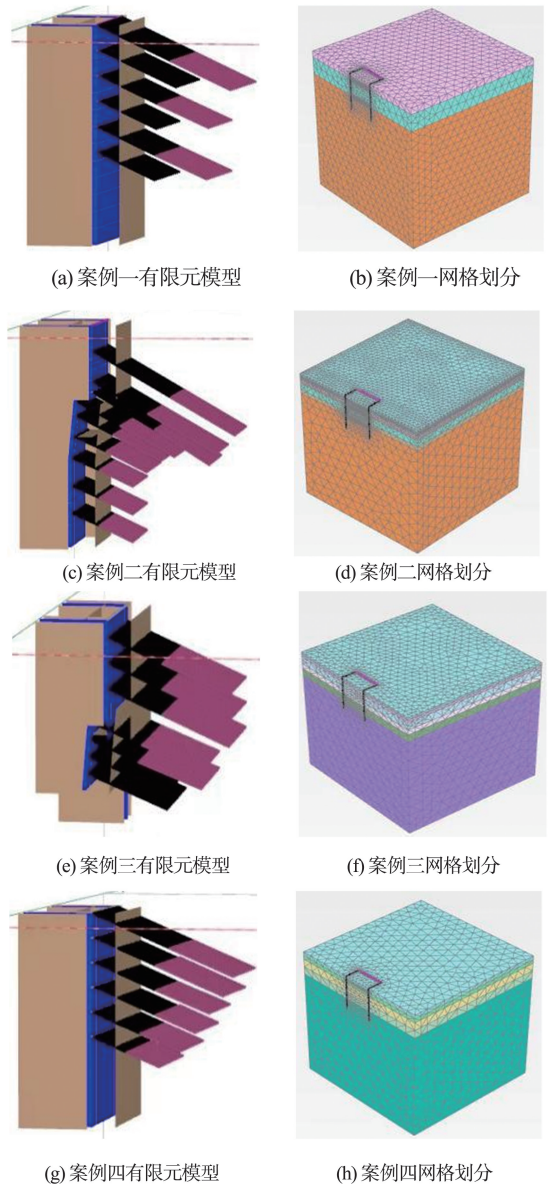


图 15 各案例数值模型及网格划分
Fig.15 Numerical model and meshing of each case

3.2 数值计算结果分析

由 PLAXIS 3D 数值模拟软件计算得到各案例破坏模式云图,并计算出基坑边坡临界状态的应力场,得到临界滑移线见图 16。1.4 节土岩基坑破坏模式判定标准、2.1 节整体稳定性解析解与有限元模拟结果对比分析见表 11。

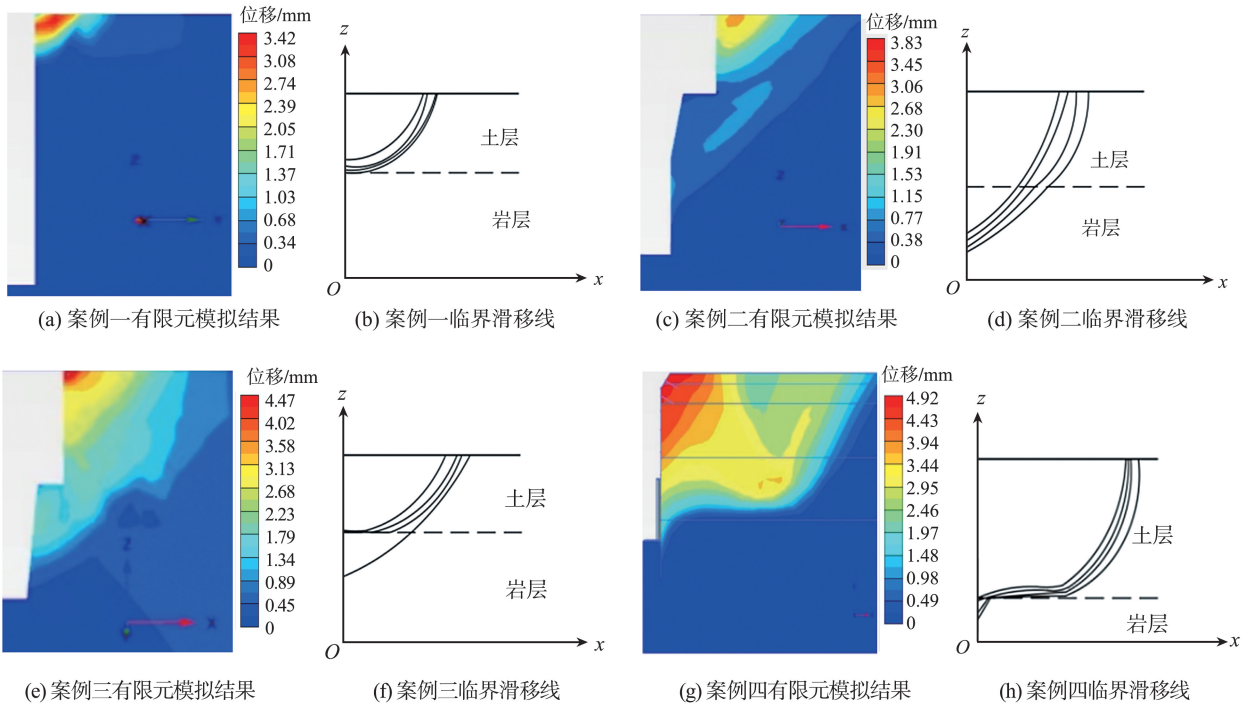


图 16 各案例增量位移云图及破坏滑移线

Fig.16 Incremental displacement cloud map and failure slip line in each case

表 11 各案例计算结果对比

Table 11 Comparison of calculation results of each case

案例	2.4 节判定标准结果	有限元模拟结果	3.1 节解析解计算结果	有限元计算结果
一	圆弧破坏	圆弧破坏	$K_1 = 4.490$	$K_2 = 4.647$
二	切面破坏	圆弧-平面破坏	$K_3 = 4.254$	$K_4 = 4.260$
三	切面破坏	切面破坏	$K_5 = 3.891$	$K_6 = 4.172$
四	滑切破坏	滑切破坏	$K_7 = 4.356$	$K_8 = 4.226$

由表 11 可知,各案例有限元模拟结果与 1.4 节判定标准所得结果基本吻合,破坏模式规律曲线与判定标准具有合理性。下卧岩体强度不足使得 1.4 节方法在案例二中破坏模式有所出入。因此,利用破坏模式判定标准时,还应综合具体工程中基坑开挖深度、地层参数。

整体稳定性解析解公式计算基坑边坡的安全系数,最小安全系数对应的滑移线即为临界滑裂线。使用有限元软件计算得到的安全系数与 2.1 节计算结果基本吻合,验证了文中方法的准确性。

4 结论

(1) 土岩二元基坑下卧岩体稳定时,土岩二元基坑的破坏模式随上覆土层厚度的增大,逐渐从圆弧破坏向圆弧-平面破坏、切面破坏和滑切破坏过渡转变。

(2) 得到了土体厚度占比和土岩二元基坑破坏

模式中非圆弧段水平投影长度 L_{na} 之间的变化规律,青岛、济南常遇土岩二元基坑下卧岩体(灰岩、辉长岩和花岗岩)在不同上覆土层厚度时的破坏模式规律曲线和判定标准。

(3) 推导出基坑一般破坏模式的整体稳定性和岩体切角稳定性解析计算公式,通过案例验证了公式的正确性。

(4) 明确了下卧岩体稳定条件下土岩二元基坑的破坏模式和土岩交界面变形和破坏范围,将此类基坑支护转化为上覆土层的支护。

参考文献:

- [1] 任望东,张同兴,张大明,等.深基坑多级支护破坏模式及稳定性参数分析[J].岩土工程学报,2013,35(增刊2):919-922.
REN Wangdong, ZHANG Tongxing, ZHANG Daming, et al. Parametric analysis of failure modes and stability of multi-level retaining structure in deep excavations[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35 (Suppl.2): 919-922.
- [2] 山东省住房和城乡建设厅.土岩二元基坑支护技术标准(附条文说明):DB37/T 5233—2022[S].北京:中国建筑工业出版社,2022.
- [3] 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(附条文说明):JGJ120—2012[S].北京:中国建筑工业出版社,2012.
- [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑边坡工程技术

- 规范(附条文说明):GB50330—2013[S].北京:中国建筑工业出版社,2013.
- [5] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑地基基础设计规范(附条文说明):GB50007-2011[S].北京:中国建筑工业出版社,2011.
- [6] 朱志华,刘涛,单红仙.土岩结合条件下深基坑支护方式研究[J].岩土力学,2011,198(增刊1):619-623.
ZHU Zhihua, LIU Tao, SHAN Hongxian. Study of supporting type for deep foundation pit in areas of rock and soil[J].Rock and Soil Mechanics, 2011, 198(Suppl. 1):619-623.
- [7] 戴自航,沈蒲生.土坡稳定分析简化 Bishop 法的数值解[J].岩土力学,2002,23(6):760-764.
DAI Zihang, SHEN Pusheng. Numerical solution of simplified bishop method for stability analysis of soil slopes[J].Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(10):4021-4029.
- [8] GRITTITHS D V, LANE P A. Slope stability analysis by finite elements[J]. Géotechnique, 1999, 49(3):387-403.
- [9] 赵尚毅,郑颖人,时卫民,等.用有限元强度折减法求边坡稳定安全系数[J].岩土工程学报,2002,24(3):343-346.
ZHAO Shangyi, ZHENG Yingren, SHI Weimin, et al. Analysis on safety factor of slope by strength reduction FEM[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(3):343-346.
- [10] 高政国,刘思海,黄新.基于强度折减法的边坡滑动破坏分析[J].地下空间与工程学报,2013,9(增刊1):1531-1535.
GAO Zhengguo, LIU Sihai, HUANG Xin. Slope slide-failure analysis based on strength reduction method[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013, 9(Suppl.1):1531-1535.
- [11] 张国祥,刘宝琛.潜在滑移线法分析边坡滑动面及稳定性[J].土木工程学报,2002,35(6):82-85.
ZHANG Guoxiang, LIU Baochen. Analysis of slope slip surface and stability by the potential slip surface theory [J]. China Civil Engineering Journal, 2002, 35(6):82-85.
- [12] SPENCER E. A method of analysis of the stability of embankments assuming parallel inter-slice forces [J]. Géotechnique, 1968, 18(3):384-386.
- [13] MARSAL R J. Large scale testing of rockfill materials [J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Dicision, 1967, 93(2):27-43.
- [14] 鲍树峰,莫海鸿,王友元,等.土岩组合基坑安全风险预警标准探讨[J].岩土工程学报,2014,36(增刊1):180-185.
BAO Shufeng, MO Haihong, WANG Youyuan, et al. Warning standards of safety risk for foundation pits of soil and weathered rock stratum [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(Suppl.1):180-185.
- [15] 严薇,杨超,左交明,等.土岩质基坑土层开挖稳定性计算[J].地下空间与工程学报,2015,11(1):246-250.
YAN Wei, YANG Chao, ZUO Jiaoming, et al. Stability calculation of soil layer in soil-rock foundation pit [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, 11(1):246-250.
- [16] 张楠.土岩组合地层深基坑变形规律研究[J].铁道工程学报,2021,38(7):1-5.
ZHANG Nan. Study on deformation law of deep foundation pit in soil-rock combination formation [J]. Journal of Railway Engineering, 2021, 38(7):1-5.
- [17] 王兴政.济南市典型土岩双元基坑破坏模式及其支护结构选型研究[D].济南:山东大学,2017.
WANG Xingzheng. Study on failure mode of typical soil-rock foundation pit in Jinan and the support structure [D]. Jinan: Shandong University, 2017.
- [18] 李连祥,贾斌,赵永新,等.土与全风化岩双元边坡整体稳定性计算分析[J].岩石力学与工程学报,2020,39(增刊1):2785-2794.
LI Lianxiang, JIA Bin, ZHAO Yongxin, et al. Calculation and analysis of the overall stability of the dual element slope of soil and fully weathered rock [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 39(Suppl.1):2785-2794.
- [19] 李连祥,贾斌,赵忠杨,等.土与强风化岩双元边坡圆弧-平面破坏模式与支护设计方法[J].重庆大学学报,2024,47(2):1-13.
LI Lianxiang, JIA Bin, ZHAO Zhongyang, et al. Arc-plane failure mode and support design method of dual-element slope of soil and strongly weathered rock [J]. Journal of Chongqing University, 2024, 47(2):1-13.
- [20] 贾斌.土与全、强风化岩石的双元边坡整体稳定性研究[D].济南:山东大学,2021.
JIA Bin. Study on global stability of double slope with soil and whole and strong weathered rock [D]. Jinan: Shandong University, 2021.
- [21] 吴瑞拓,顾晓强,高广运,等.基于HSS模型的上海地铁深基坑开挖变形分析[J].建筑科学与工程学报,2021,38(6):64-70.
WU Ruituo, GU Xiaoliang, GAO Guangyun, et al. Analysis of deep excavation deformation of Shanghai metro station using HSS model [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2021, 38(6):64-70.
- [22] 胡瑞庚,刘红军,王兆耀,等.邻近建筑物的滨海土岩组合基坑支护结构变形分析[J].工程地质学报,2020,28(6):1368-1377.
HU Ruigeng, LIU Hongjun, WANG Zhaoyao, et al. Deformation analysis of supporting structure for soil-rock

- combination foundation pit with adjacent buildings in coastal area[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2020, 28(6):1368-1377.
- [23] 化建新. 工程地质手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
- [24] 白晓宇, 张明义, 袁海洋. 移动荷载作用下土岩组合基坑吊脚桩变形分析[J]. *岩土力学*, 2015, 36(4): 1167-1173.
- BAI Xiaoyu, ZHANG Mingyi, YUAN Haiyang. Deformation analysis for end-suspended piles in the soil-rock foundation pits under moving loadings[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(4):1167-1173.
- [25] 孙书伟, 刘流, 杨肇熙, 等. 微型桩群加固边坡三维复合体形成判据研究[J]. *铁道工程学报*, 2021, 38(3): 1-7.
- SUN Shuwei, LIU Liu, YANG Zhaoxi, et al. Research on the formation criteria for three-dimensional body of micropiles-slope system[J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2021, 38(3):1-7.
- [26] 李洪晓. 土岩组合地层深基坑“吊脚桩”支护体系变形规律及稳定性研究[D]. 广州: 广州大学, 2021.
- LI Hongxiao. Research on deformation regularity and stability of “end-suspended pile” support system for deep foundation in earth-rock stratum [D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2021.
- [27] XU Q, BAO Z, LU T, et al. Numerical simulation and optimization design of nd-uspended pile support for soil-rock composite foundation pit[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2021:1-15.
- [28] 刘红军, 张庚成, 刘涛. 土岩组合地层基坑工程变形监测分析[J]. *岩土工程学报*, 2012, 32(增刊2): 550-553.
- LIU Hongjun, ZHANG Gengcheng, LIU Tao. Monitoring and analysis of deformation of foundation pits in strata with rock-soil combination[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, 32 (Suppl. 2): 550-553.
- [29] 黄敏, 刘小丽. 土岩组合地区桩锚支护基坑开挖地表沉降分析[J]. *岩土工程学报*, 2012, 34(增刊1): 571-575.
- HUANG Min, LIU Xiaoli. Ground settlement induced by excavation of pile-anchor retaining foundation pits in soil-rock mixed areas[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, 34(Suppl.1):571-575.
- [30] 李连祥, 刘嘉典, 李克金, 等. 济南典型地层HSS参数选取及适用性研究[J]. *岩土力学*, 2019, 40(10): 4021-4029.
- LI Lianxiang, LIU Jiadian, LI Kejin, et al. Study of parameters selection and applicability of HSS model in typical stratum of Jinan[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(10):4021-4029.
- [31] 陆瑶. 基于HSS模型的盾构隧道施工对邻近桥梁的影响及控制措施研究[D]. 济南: 济南大学, 2019.
- LU Yao. Study on construction effects of shield tunnel excavation adjacent bridges based on HSS Model and control measures[D]. Jinan: Jinan University, 2019.

(编辑:陈丽萍)