

炭质泥岩基坑湿化变形特性研究

蒋 坤¹, 李盛南^{2,3}, 刘新喜¹, 吴 岩⁴, 马宸桢¹

(1. 长沙理工大学 土木工程学院, 长沙 410114; 2. 湖南工程学院 建筑工程学院, 湘潭 411104;
3. 长沙理工大学 道路灾害防治及交通安全教育部工程研究中心, 长沙 410114;
4. 长沙核工业工程勘察院有限公司, 长沙 410000)

摘 要: 为探究炭质泥岩基坑湿化变形规律, 以株洲枫溪大道(608所)基坑工程为研究对象, 通过不同含水率炭质泥岩的三轴试验获得应力应变曲线, 研究了炭质泥岩本构模型, 并利用FLAC 3D软件对炭质泥岩基坑湿化前、后变形进行数值模拟, 探究了炭质泥岩基坑开挖湿化前、后的支护桩水平位移、周边地表沉降变形规律, 探讨了炭质泥岩湿化后支护桩的桩径、桩距和锚索预应力对桩身水平位移、地表沉降的影响分析。结果表明: 采用邓肯-张EB模型可以较好的描述炭质泥岩本构模型; 基坑桩身水平位移呈先增大后减小趋势, 地表沉降曲线呈“勺”状且具有明显的空间性; 炭质泥岩湿化后基坑变形明显增大, 桩身水平位移、周边地表沉降分别增大约67.4%、51.4%; 炭质泥岩基坑湿化后桩径的改变对基坑变形影响较大, 桩间距与锚索预应力影响较小, 选取桩径1 m, 桩间距1.4~1.6 m, 锚索应力0.8~1.0F较为合适。研究成果可为同类型工程设计提供参考。

关键词: 炭质泥岩; 基坑开挖; 邓肯-张EB模型; 湿化变形; 数值模拟

中图分类号: TU452 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249(2026)05-0043-08

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2026.05.007

Study on Wetting Deformation Characteristics of Carbonaceous Mudstone Foundation Pit

JIANG Kun¹, LI Shengnan^{2,3}, LIU Xinxi¹, WU Yan⁴, MA Chenzhen¹

(1. School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;
2. School of Architectural Engineering, Hunan Institute of Technology, Xiangtan 411104, China;
3. Engineering Research Center of Catastrophic Prophylaxis and Treatment of Road and Traffic Safety of Ministry of Education, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;
4. Changsha Nuclear Industry Engineering Survey Institute Co., Ltd., Changsha 410000, China)

Abstract: In order to explore the deformation law of carbonaceous mudstone foundation pit, taking the foundation pit project of Fengxi Avenue (608 Institute) in Zhuzhou as the research object, the stress-strain curve of carbonaceous mudstone with different moisture content was obtained through triaxial test, the constitutive model of carbonaceous mudstone was studied, and the deformation of carbonaceous mudstone foundation pit before and after wetting was numerically simulated by FLAC 3D

项目来源: 国家自然科学基金资助项目(52108405, 51674041); 湖南省自然科学基金资助项目(2022JJ40122, 2022JJ50117)。

作者简介: 蒋 坤(1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向: 岩土。

收稿日期: 2025-01-10

岩土力学

software, an investigation was conducted into deformation law of supporting pile horizontal movement, peripheral surface settlement, both prior to and subsequent to the excavation of a carbonaceous mudstone foundation pit that underwent wetting, and the influence of pile diameter, pile spacing and anchor cable prestress on pile horizontal displacement and surface settlement after wetting of carbonaceous mudstone foundation pit was discussed. The results show that Duncan-Chang EB model can better describe the constitutive model of carbonaceous mudstone; The results show that the vertical displacement of the pile body of the base pit increases first and then decreases. The surface settlement curve is "spoon" shaped and has obvious spatial characteristics; The results indicate a significant increase in the deformation of the foundation pit following the wetting of carbonaceous mudstone. Specifically, the horizontal displacement of the pile body and the settlement of the neighboring land surface have risen by 67.4% and 51.4%, respectively; The wetting of the carbonaceous mudstone foundation pit significantly affects the deformation of the pit through changes in pile diameter, whereas the impacts of pile spacing and anchor cable prestress are relatively minor. It is more appropriate to select pile diameter of 1 m, pile spacing of 1.4~1.6 m and anchor cable stress of 0.8~1.0F. The research findings can serve as a valuable reference for similar engineering design projects.

Key words: carbonaceous mudstone; foundation pit excavation; Duncan-Chang EB model; wetting deformation; numerical simulation

0 引言

随着城市地下空间建设的发展,伴随产生越来越多的深基坑工程,而不同地层的深基坑变形存在较大差异^[1-2]。炭质泥岩广泛分布于中国中、西南地区,其工程特性表现为易风化、易崩解、遇水软化后整体稳定性大幅下降,这导致其在深基坑工程中极易发生变形,对基坑及周边建筑物安全造成严重威胁^[3-4]。因此对炭质泥岩基坑湿化变形进行研究具有重要意义。

近年来,许多学者在炭质泥岩方面做了大量研究。李盛南等^[5]通过实施多围压条件下的炭质泥岩三轴试验,系统探讨了围压参数对试样力学响应特性,并根据细观结构损伤机制结合应力应变曲线特征,分段建立了炭质泥岩损伤演化方程;叶朝良等^[6]通过物理、水理及力学性质试验,结合扫描电镜(SEM)技术对炭质泥岩的工程力学特性开展了研究;刘新喜等^[7-8]运用FLAC 3D研究了炭质泥岩路堑边坡开挖时的变形及稳定性规律;卢逸恒^[9]对动力湿化作用下的炭质泥岩粗粒土开展了颗粒破碎试验和静三轴试验,分析了炭质泥岩粗粒土路堤的变形特性;付宏渊等^[10]探究了降雨条件下炭质泥岩路堤的含水率入渗特性,以及由此引起的路堤沉降变形与稳定性变化。虽然这些研究大多针对于炭质泥岩路堤、边坡,但相关的研究工作具有重要借鉴作用。

而在基坑工程方面,现阶段主要是借助数值模

拟来进行研究。秦会来等^[11-13]采用有限元方法,对深基坑的变形特征进行了深入探讨,总结了变形控制措施及控制效果;韩健勇等^[14]通过有限元方法与现场实测数据分析,总结了砂土地层桩锚支护受力变形规律;吕松梅等^[15]基于数值模拟与现场监测对富水砂卵石层地区桩锚支护变形特性进行了系统研究;张巧慧等^[16]利用FLAC 3D建立数值计算模型,研究了软土地区双基坑开挖对既有车站位移的影响规律;刘维正等^[17]运用有限元软件并结合实测数据,对红砂岩地层桩锚支护基坑变形特性分析,考虑空间效应并通过改变地层、支护桩参数来揭示基坑变形规律。

综上,现阶段对于炭质泥岩基坑湿化变形研究较少,为此,以株洲枫溪大道(608所)下穿隧道改造工程为依托,通过三轴试验获取炭质泥岩应力应变关系,探究了炭质泥岩本构模型,采用邓肯-张EB模型在FLAC 3D软件中进行数值模拟,对炭质泥岩基坑湿化变形规律进行研究,以期为同类型炭质泥岩基坑的设计与施工提供参考。

1 炭质泥岩本构模型研究

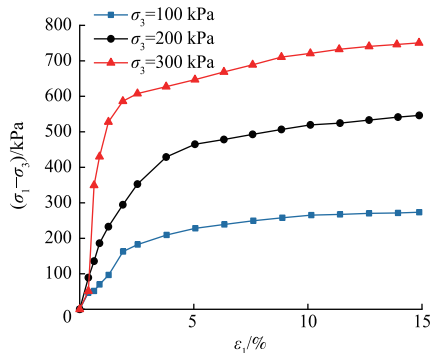
基坑工程数值计算中关键的问题之一是要采用合适的本构模型,不同的本构模型对数值模拟的结果影响较大^[18-19]。因此,对不同含水率炭质泥岩开展三轴试验,为炭质泥岩基坑湿化变形数值模拟选取合适的本构模型。

1.1 三轴试验

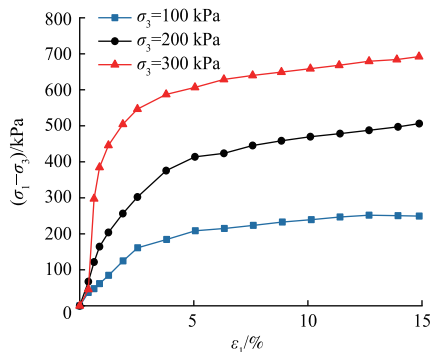
试验仪器采用英国制 GDS 多功能三轴仪, 试样采集于株洲市枫溪大道 (608 所) 段基坑③₁ 全风化炭质泥岩层, 制成高度为 200 mm 直径为 100 mm 的试样。

试验方法采取固结不排水试验, 围压分别为 100、200、300 kPa, 采取应变控制方法施加荷载, 加载速度选取 0.1 %/min。根据 GB/T 50123—2019 《土工试验方法标准》若试件的应力应变曲线有明显峰值点, 则取峰值点对应的应力为试件的破坏应力并结束试验提取数据, 若无明显峰值点, 则取轴向应变为 15% 所对应的应力为试样的破坏应力并结束试样提取数据。

根据三轴试验结果, 得到不同围压下应力-应变曲线, 限于篇幅只给出天然、饱和状态下应力应变曲线, 如图 1 所示。其应力应变曲线与邓肯-张 EB 模型曲线较为相似。因此选取邓肯-张 EB 模型进行炭质泥岩基坑数值计算。



(a) 天然状态



(b) 饱和状态

图 1 天然、饱和状态下炭质泥岩应力-应变曲线
Fig. 1 Stress-strain curve of carbonaceous mudstone in its natural, saturated state

1.2 邓肯-张 EB 模型理论

邓肯-张 EB 模型为非线性弹性模型, 并在一定的条件下反映土体的弹塑性变形特性。其应力-应变关系为:

$$\{\sigma\} = [D] \{\varepsilon\} \quad (1)$$

式中: $[D]$ 为弹性刚度矩阵

$$[D] = \frac{3B}{9B} \begin{bmatrix} 3B + E & 3B - E & 0 \\ 3B - E & 3B + E & 0 \\ 0 & 0 & E \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: E 为切线模量, kPa; B 为体积模量, kPa。其计算公式为:

$$E = K P_a \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^n (1 - R_s)^2 \quad (3)$$

$$R_s = \frac{(1 - \sin \varphi) (\sigma_1 - \sigma_3)}{2 \cos \varphi + 2 \sigma_3 \sin \varphi} R_f \quad (4)$$

$$B = K_b P_a \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^m \quad (5)$$

式中: σ_1 , σ_3 为最大、最小主应力, kPa; P_a 为大气压强, kPa; 卸载和重复加载时的弹性模量值为 E_{ur} , kPa; 其计算式为:

$$E_{ur} = K_{ur} P_a \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^n \quad (6)$$

邓肯-张 EB 模型共有 8 个参数: 强度参数 c /kPa, φ /°, 试验常数 K 、 n , 材料常数 K_b 、 m , 反映卸载后再加荷载地模量 K_{ur} 以及破坏比 R_f 。均可由三轴试验结果计算得出取值大小。

1.3 邓肯-张 EB 模型在 FLAC 3D 中的实现

1.3.1 FLAC 3D 计算方法

FLAC 3D 采用显式差分求解算法, 以 Gauss 定律由节点速度计算出单元应变率, 利用应力应变关系 (本构方程) 计算单元应力并进行积分得到节点力, 然后再根据平衡方程求解出节点速度和位移。

1.3.2 邓肯-张 EB 模型开发流程

FLAC 3D 软件可以利用 C++ 进行编程, 实现邓肯-张 EB 模型在 FLAC 3D 的开发。开发流程图如图 2 所示。

1.3.3 数值模拟验证

数值模拟与实际试验尺寸一致, 建立直径 100 mm, 高 200 mm 的圆柱形试样模型。模拟结果如图 3 所示, 三轴试验曲线与 FLAC 3D 模拟曲线变化趋势一致且契合较好。

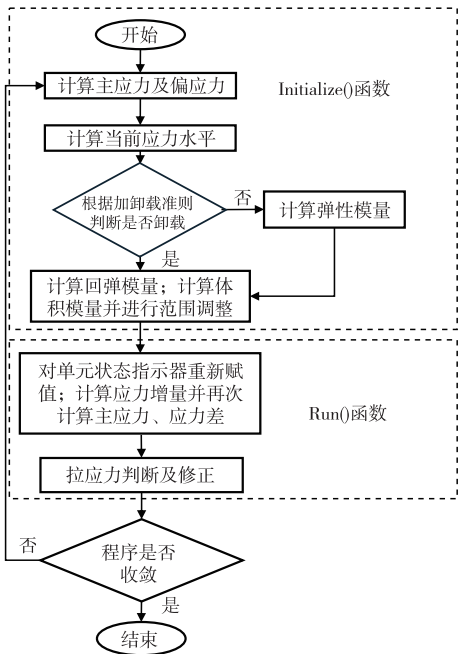


图2 邓肯-张 EB 模型开发流程图
Fig.2 Duncan-Chang EB model development flowchart

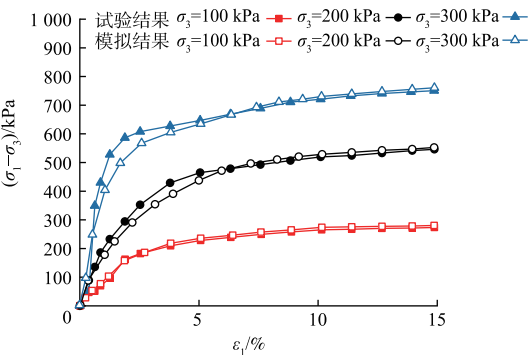


图3 三轴试验结果与模拟结果
Fig.3 Triaxial test results and simulation results

2 炭质泥岩基坑变形特性研究

2.1 工程概况

株洲市枫溪大道（608 所段）下穿改造工程位于株洲市芦淞区，为枫溪大道由航空大道至伟大路路段，枫溪大道红线宽度 60 m，长约 762.644 m，其中地面段长约 462.644 m，隧道段长 300 m，最大深度约 10 m，东、西两侧均有建筑物。

2.2 地质条件

地层由上而下依次为：①素填土、②粉质黏土、③₁ 全风化炭质泥岩、③₂ 强风化炭质泥岩、③₃ 中风

化炭质泥岩。基坑开挖范围内地层主要为全风化炭质泥岩。

2.3 基坑支护结构

基于项目地理位置、水文地质条件、基坑开挖深度以及周围环境条件等因素，基坑采用自然放坡、钻孔灌注桩加两道锚索的基坑围护方案，基坑支护体系剖面如图 4 所示。

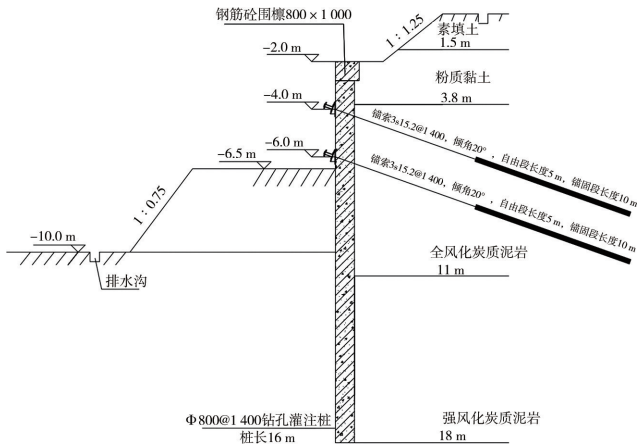


图4 基坑支护剖面图
Fig.4 Cross-sectional view of foundation pit support

2.4 模型建立

运用 FLAC 3D 软件进行数值模拟，为简化计算将各地层简化为水平面。考虑到模型边界效应以及既有建筑物对基坑开挖的影响，模型水平边界取实际宽度的 3~5 倍，模型高度取实际开挖深度 2~3 倍，基坑长度取 30 m。模型尺寸为 150 m×30 m×30 m。采用 FLAC 3D 中的“pile”结构单元模拟支护桩，采用“cable”单元对锚索进行模拟。

为简化计算流程，只考虑炭质泥岩基坑湿化至饱和状态。上部土层采用摩尔-库伦模型，下部炭质泥岩层采用邓肯-张 EB 模型，根据场地地质资料以及三轴试验得到数值模拟各地层参数见表 1、2。建立基坑数值计算模型如图 5 所示。

表1 上部土层参数

Table 1 Upper soil layer parameters					
土层	状态	黏聚力 /kPa	摩擦角 / (°)	重度 / (kN/m ³)	泊松比
素填土	天然	19.9	13.2	19.0	0.3
	饱和	13.2	8.9	19.3	0.3
粉质黏土	天然	30.2	20.9	20.0	0.3
	饱和	20.1	16.6	20.3	0.3

表 2 下部岩层参数
Table 2 Lower rock layer parameters

岩土层	状态	K	R_f	c/kPa	$\varphi/(\text{ }^\circ)$	n	m	K_{ur}	K_b
全风化	天然	286.34	0.86	45.5	20.3	0.15	0.24	715.85	66.23
炭质泥岩	饱和	186.47	0.79	28.5	15.5	0.21	0.15	466.17	54.74
强风化	天然	367.64	0.88	56.5	31.5	0.21	0.34	919.12	81.24
炭质泥岩	饱和	274.36	0.83	38.5	19.5	0.26	0.25	685.93	61.43

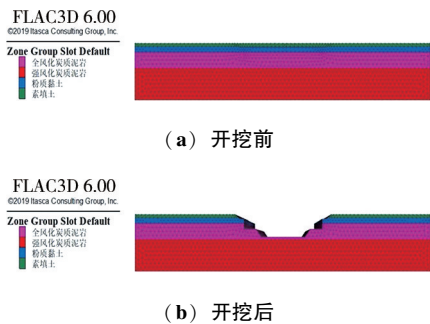


图 5 三轴试验模型图
Fig. 5 Numerical calculation model diagram

2.5 计算工况

模拟基坑主要施工步骤见表 3。

表 3 基坑施工主要步骤
Table 3 Steps of excavation process

施工步	工况
1	开挖至 2 m，围护桩及冠梁施工
2	开挖至 4.5 m，设置第一道锚索
3	开挖至 6.5 m，设置第二道锚索
4	开挖至基坑底部，深度 10 m

2.6 结果分析

2.6.1 桩身水平位移分析

由图 6 可知，总体上桩身水平位移实测值与模拟值较为吻合，呈先增大后减小趋势，基坑天然状态下桩身最大水平位移模拟值为 9.2 mm，实测值为 10.3 mm，模拟值小于实测值。分析其原因是：基坑施工的过程较为复杂，数值模拟无法将现场施工过程中受到的影响考虑进去，比如支护不及时、机器车辆振动、施工现场排水不到位等。

炭质泥岩基坑湿化后桩身水平位移曲线与天然状态基本一致，但是变形明显增大，饱和状态下桩身最大水平位移模拟值为 15.4 mm，较天然状态增大 67.4%。

2.6.2 地表沉降分析

由图 7 可知，地表沉降变形曲线呈“勺”形，主要表现为空间性，最大沉降量随距基坑边缘水平

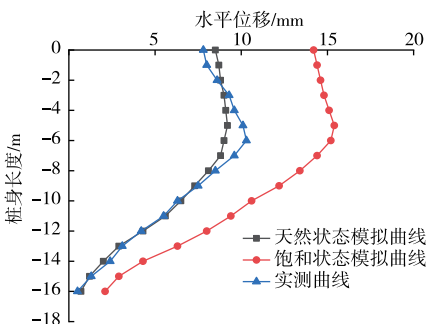


图 6 桩身水平位移
Fig. 6 Horizontal displacement of deep soil mass

距离增大而逐级减小，说明距离基坑越近，基坑开挖对沉降量影响越大。其核心原因为：基坑开挖后周边土体出现临空区，进而向坑内方向发生缓慢滑移，并发生剪切破坏。而距离基坑越远土体受到扰动程度越小，其沉降量也越低。在距基坑约 3 m 位置沉降最大，距基坑边 4 m 以外地表沉降逐渐减小，沉降值在距离基坑 40 m 处基本趋于 0，说明基坑开挖对周边土体沉降影响范围在 3~4 倍基坑深度。实测曲线与模拟曲线基本一致，最大地表沉降实测值为 12.6 mm，模拟值为 11.1 mm，由于现场车辆、材料堆积等因素导致实测值略大于模拟值。湿化至饱和状态后地表沉降曲线与天然状态曲线变形规律基本一致，最大地表沉降值为 16.8 mm，较天然状态增加约 51.4%，对周边地表沉降影响范围为 4~5 倍。

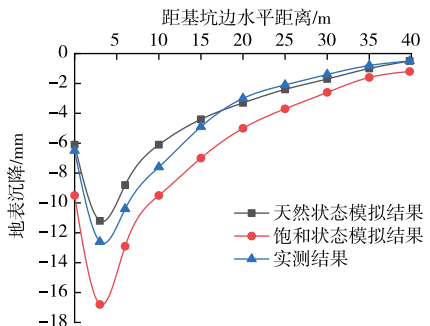


图 7 地表沉降变形规律
Fig. 7 The law of surface subsidence and deformation

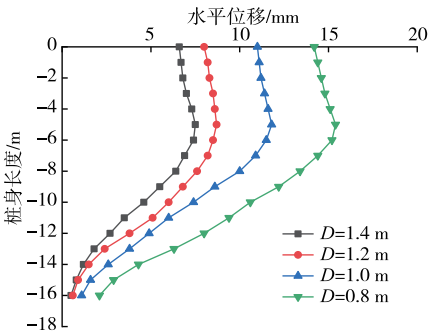
岩土力学

2.7 支护优化分析

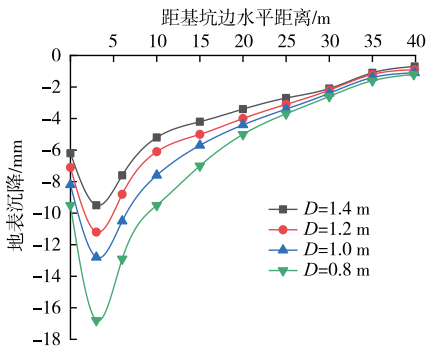
因炭质泥岩基坑湿化后变形增加较大, 故对支护结构参数优化进行探讨, 选取桩身直径 D , 桩间距和锚索预应力 F 三个变量对炭质泥岩湿化后基坑变形特性进行研究。

2.7.1 桩身直径影响分析

针对桩身直径 D 设计 4 种工况, 分别为 0.8 (实际工况)、1.0、1.2 与 1.4 m。基坑开挖完全后不同桩径桩身水平位移曲线以及地表沉降曲线如图 8 所示。基坑开挖完全后从桩径 0.8 m 增加至 1.4 m, 桩体水平位移与地表沉降并未按相关的比例减小, 而是减小的幅度逐渐降低。从原桩径 0.8 m 增加到 1.0 m, 桩身最大水平位移减小约 23.4%, 地表沉降减小约 23.8%; 同时原桩径 1.0 m 增大到 1.2 m 时, 桩身最大水平位移与周边地表沉降分别减小约 26.3%、12.5%。而当桩径 1.2 m 增大到 1.4 m 时, 桩身水平位移与地表沉降变化较小。因此可在原桩径基础上适当增加桩径至 1.0 m。



(a) 桩身水平位移曲线



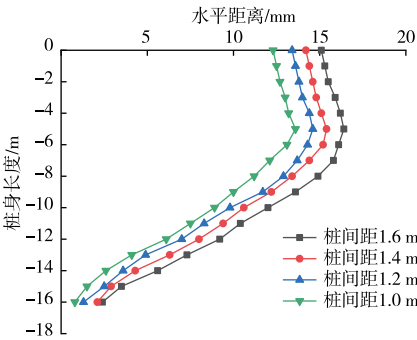
(b) 地表沉降曲线

图 8 不同桩身直径变形对比

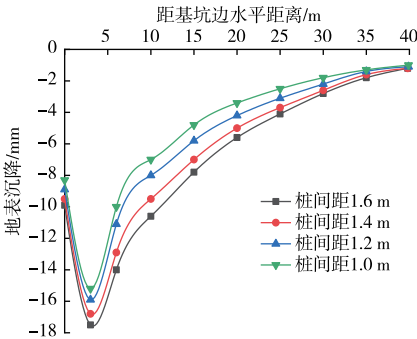
Fig. 8 Comparison of deformation under different pile diameters

2.7.2 桩间距影响分析

对桩间距取 1.0、1.2、1.4 (原桩距)、1.6 m 进行分析, 分析结果如图 9 所示。不同支护桩桩距对桩身变形以及地表沉降曲线影响较小。原桩距 1.4 m 减小至 1.0 m 时或是增大至 1.6 m 时, 两者位移变化较小, 说明桩间距在 1.0~1.6 m 范围内变化时对炭质泥岩基坑变形影响不大, 因此可以在原桩间距下适当增加桩间距至 1.4~1.6 m。



(a) 桩身水平位移曲线



(b) 地表沉降曲线

图 9 不同桩身直径变形对比

Fig. 9 Influence curves of different pile spacing

2.7.3 锚索预应力影响分析

枫溪大道标准段基坑锚索预应力设计值 F 为 70 kN, 分别取 0.8、1.0、1.2 和 1.4 F , 以基坑开挖结束后工况进行分析, 其对围护桩桩身水平位移、地表沉降曲线如图 10 所示。相较于支护桩桩径、桩距的改变, 锚索施加预应力对变形的约束效果有限, 随着锚索预应力的增加或减小, 桩身水平位移、地表沉降变化并不明显。虽然增加较大的预应力可以减小变形, 但是不经济。因此, 桩锚支护体系合理选取锚索预应力是一个关键因素, 可以根据经济因素适当减少至 0.8 F 。

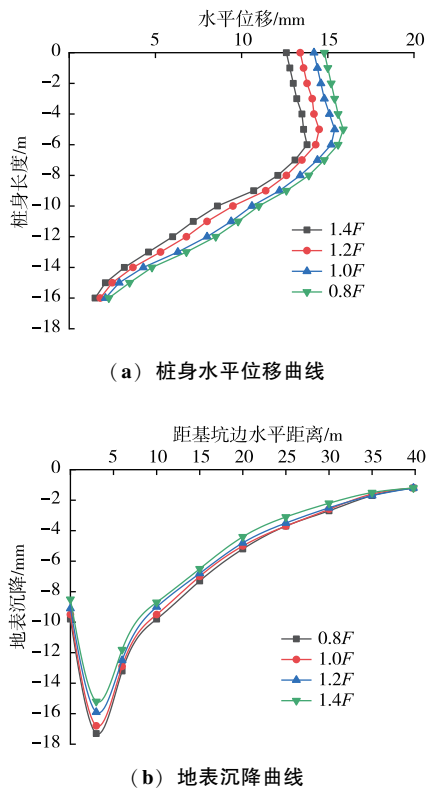


图 10 不同锚索应力变形对比

Fig. 10 Influence curves of different anchor cable stresses

3 结论

以株洲枫溪大道下穿隧道改造工程为依托，基于三轴试验对炭质泥岩本构模型开展了研究，通过数值模拟对炭质泥岩基坑湿化前、后变形特性进行研究，得出以下主要结论：

(1) 炭质泥岩基坑变形模拟值与实测值较为接近，采用邓肯-张 EB 模型可以较好地描述炭质泥岩本构关系。

(2) 炭质泥岩湿化后基坑变形明显增大，但变化趋势与湿化前基本一致，桩身水平位移先增大后减小，湿化后最大桩身位移较湿化前增大约 67.4%；周边地表沉降曲线近似“勺”状，具有明显的空间性，基坑湿化后对周边土体影响范围约为 4~5 倍基坑开挖深度，湿化后地表最大沉降较湿化前增大约 51.4%。

(3) 支护桩桩径增大、锚索应力的提升以及桩间距的缩小，均能使桩身水平位移与地表沉降变形减小。而桩径的改变对基坑变形影响较大，桩间距

与锚索应力对基坑变形影响较小。为了防止炭质泥岩基坑湿化后对基坑造成危害，该工程可以选取桩径 1 m，桩间距 1.4~1.6 m，锚索应力 0.8~1.0F 较为合适。

参 考 文 献

- [1] 郑刚, 朱合华, 刘新荣, 等. 基坑工程与地下工程安全及环境影响控制 [J]. 土木工程学报, 2016, 49 (6): 1-24.
- [2] 孙超, 郭浩天. 深基坑支护新技术现状及展望 [J]. 建筑科学与工程学报, 2018, 35 (3): 104-117.
- [3] 王玮玮, 刘新喜, 李盛南, 等. 干湿循环对炭质泥岩蠕变及损伤特性的影响 [J]. 湖南大学学报 (自然科学版), 2022, 49 (9): 173-181.
- [4] 付宏渊, 刘杰, 曾铃, 等. 考虑荷载与浸水条件的预崩解炭质泥岩变形与强度试验 [J]. 岩土力学, 2019, 40 (4): 1273-1280.
- [5] 李盛南, 刘新喜, 李玉, 等. 炭质泥岩渐进破坏过程的变形特性及损伤演化研究 [J]. 中国公路学报, 2022, 35 (4): 99-107.
- [6] 叶朝良, 薛飞招, 谢玉芳, 等. 炭质泥岩工程力学特性试验研究 [J]. 铁道工程学报, 2019, 36 (11): 1-6.
- [7] 刘新喜, 张平, 邓宗伟. 炭质泥岩软岩基座路堑边坡开挖过程稳定性分析 [J]. 中外公路, 2016, 36 (6): 14-16.
- [8] 刘新喜, 邓子君, 李盛南, 等. 炭质泥岩路堑边坡湿化变形模拟分析 [J]. 交通科学与工程, 2021, 37 (1): 1-6.
- [9] 卢逸恒. 动力湿化作用下炭质泥岩粗粒土填力学性能及路堤变形特性研究 [D]. 长沙: 长沙理工大学, 2022.
- [10] 付宏渊, 邱祥, 李光裕, 等. 降雨入渗条件下炭质泥岩路堤动态稳定性 [J]. 长安大学学报 (自然科学版), 2017, 37 (1): 33-42.
- [11] 秦会来, 黄俊, 李奇志, 等. 深厚淤泥地层深基坑变形影响因素分析 [J]. 岩土工程学报, 2021, 43 (增刊 2): 23-26.
- [12] 叶帅华, 李德鹏. 复杂环境下深大基坑开挖监测与数值模拟分析 [J]. 土木工程学报, 2019, 52 (增刊 2): 117-126.
- [13] 朱彦鹏, 李凤岐, 杨校辉, 等. 兰州地铁红砂岩基坑开挖监测与数值模拟分析 [J]. 兰州理工大学学报, 2022, 48 (1): 121-127.
- [14] 韩健勇, 赵文, 贾鹏蛟, 等. 桩锚支护结构深基坑受力变形及稳定性分析 [J]. 地下空间与工程学报, 2017, 13 (增刊 2): 907-914.
- [15] 吕松梅, 夏敏, 任光明, 等. 富水砂卵石层地区桩锚支护深基坑变形特性 [J]. 成都理工大学学报 (自然科学版), 2022, 49 (3): 347-357.
- [16] 张巧慧, 姜小磊. 软土地区双基坑开挖变形分析及其对既有地铁车站结构的影响 [J]. 粉煤灰综合利用, 2021, 35 (6): 51-57.

(下转第 63 页)

- [6] 孙冰, 邹春海, 曾晟, 等. 不同裂隙形式类岩体单轴压缩破坏特征研究 [J]. 防灾减灾工程学报, 2018, 38 (6): 959-966.
- [7] 杨平. 双轴压缩下混凝土预制双裂纹扩展与应力应变关系研究 [J]. 硅酸盐通报, 2018, 37 (2): 737-743, 748.
- [8] 田文岭, 杨圣奇, 黄彦华. 不同围压下共面双裂隙脆性砂岩裂纹演化特性颗粒流模拟研究 [J]. 采矿与安全工程学报, 2017, 34 (6): 1207-1215.
- [9] 肖桃李, 许可, 袁浩, 等. 含共面双裂隙复合岩石的力学特性与破坏规律研究 [J]. 矿业研究与开发, 2024, 44 (1): 94-103.
- [10] 易婷, 唐建新, 王艳磊. 裂隙倾角及数目对岩体强度和破坏模式的影响 [J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17 (1): 98-106, 134.
- [11] 刘杰, 杨新龙, 马建勇, 等. 断续三裂隙花岗岩变形破坏模式单轴压缩颗粒流分析 [J]. 公路, 2018, 63 (12): 258-263.
- [12] 陈少辉, 李尚辉, 王锋. 单压下含多条有序裂隙岩石破裂规律分析 [J]. 产业创新研究, 2021 (19): 76-78.
- [13] 苏海健, 靖洪文, 赵洪辉, 等. 平行裂隙群岩体强度与破裂特征的试验研究 [J]. 工程力学, 2015, 32 (5): 192-197, 207.
- [14] 张科, 刘享华, 李昆, 等. 含孔多裂隙岩石力学特性与破裂分形维数相关性研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37 (12): 2785-2794.
- [15] 汪学清, 赵云猛, 冯莹, 等. 含孔洞多裂隙复合岩层裂纹扩展和分形特性模拟研究 [J]. 煤矿安全, 2024, 55 (1): 42-49.

(上接第 27 页)

- [10] 王自柯, 付春豪, 赵军. 清水/海水环境下粉煤灰-矿渣基地聚合物混凝土抗冻性试验 [J]. 混凝土, 2025 (4): 28-33.
- [11] 原元, 赵人达, 占玉林, 等. 粉煤灰-矿渣基地聚合物混凝土的抗碳化性能 [J]. 西南交通大学学报, 2021, 56 (6): 1275-1282.
- [12] 崔钊玮, 杨靖韬, 刘荣桂, 等. 复掺白云石粉与粉煤灰混凝土力学性能试验研究 [J]. 混凝土, 2022 (12): 96-99, 109.
- [13] 林芳, 陈登. 白云石粉改性粉煤灰基地聚合物的渗碱研究 [J]. 非金属矿, 2023, 46 (4): 83-87.
- [14] 黄梓谕, 丁之尧, 曹丹, 等. 基于响应面法的多固废基地聚合物配比优化及其表征 [J]. 硅酸盐通报, 2025, 44 (2): 569-578.
- [15] 于子豪, 张彤炜, 张彤文, 等. 凝灰岩石粉制备凝胶材料及激发剂模数对抗压强度的影响 [J]. 工程科学学报, 2022, 44 (12): 2100-2110.

(上接第 49 页)

- [17] 刘维正, 葛孟源, 万家乐, 等. 考虑空间效应的桩锚支护深大基坑变形特性及影响因素数值分析 [J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18 (12): 3188-3200.
- [18] 蒋进, 周正华, 董青, 等. 土体本构模型及简化模型对基坑开挖变形数值分析结果的影响 [J]. 震灾防御技术, 2020, 15 (2): 285-292.
- [19] 王丹, 王国富, 路林海, 等. 黄河流域冲积层本构模型的深基坑适用性研究 [J]. 土木与环境工程学报 (中英文), 2019, 41 (1): 36-47.