

# 含水率影响下全风化泥质灰岩工程地质特性 及桩孔稳定性分析

何昭宇<sup>1,2</sup>, 秦永军<sup>1,2</sup>, 张玉旗<sup>\*3</sup>, 徐云龙<sup>1</sup>, 李翔<sup>4</sup>

(1. 山东建勘集团有限公司, 山东 济南 250031; 2. 山东省基坑与边坡工程研究中心, 山东 济南 250031;  
3. 上海市岩土地质研究院有限公司, 上海 200072; 4. 中建八局第一建设有限公司, 山东 济南 250100)

**摘要:**全风化泥质灰岩成分复杂、结构特殊,遇水易软化崩解,强度迅速降低,极易诱发多种工程地质灾害。以济南大涧沟地区全风化泥质灰岩为研究对象,通过现场勘察与室内试验相结合,从物理、力学和水理等方面研究了全风化泥质灰岩的工程地质特性,并基于PFC离散元软件对钻进过程孔壁稳定性进行评价,得到钻孔孔内应力与灌浆压力间的相关关系,为今后桩基施工提供合理的建议和参考。研究表明:全风化泥质灰岩耐水性差、易崩解,且含水率对崩解速率影响尤为显著;随着含水率升高,全风化泥质灰岩抗剪强度呈指数函数趋势减小,强度损伤劣化规律明显;在动态扰动下全风化泥质灰岩内部单元损伤严重,建议将泥浆压力设定为0.3 MPa,可在不造成土层破坏的前提下对孔壁生成较为明显的法向接触力,为孔壁的稳定性提供较好的支撑。

**关键词:**全风化泥质灰岩;工程地质特性;抗剪强度;孔壁稳定性;桩基;数值模拟

**中图分类号:**TU45;TU473 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2023)04-0084-10

## Engineering geological characteristics of completely weathered argillaceous limestone under the influence of water content and analysis of pile hole stability

HE Zhaoyu<sup>1,2</sup>, QIN Yongjun<sup>1,2</sup>, ZHANG Yuqi<sup>\*3</sup>, XU Yunlong<sup>1</sup>, LI Xiang<sup>4</sup>

(1. Shandong Jiankan Group Co., Ltd., Jinan Shandong 250031, China;

2. Shandong Foundation Pit and Slope Engineering Research Center, Jinan Shandong 250031, China;

3. Shanghai Institute of Geotechnical Geology Co., Ltd., Shanghai 200072, China

4. The First Company of China Eighth Engineering Bureau Ltd., Jinan Shandong 250100, China)

**Abstract:** Completely weathered argillaceous limestone has complex composition and special structure. When countered water, it is easy to be softened and disintegrated, and its strength is rapidly reduced, which is very easy to induce various engineering geological disasters. Taking the completely weathered argillaceous limestone in Dajiangou area of Jinan as the research object, the engineering geological characteristics of the completely weathered argillaceous limestone are studied from the physical, mechanical and hydraulic aspects through the combination of field investigation and laboratory test, moreover, the stability of the hole wall during the drilling process is evaluated based on the discrete element software PFC. The correlation between the stress in the hole and the grouting pressure is obtained, which provides reasonable suggestions and references for the future pile foundation construction. The results show that the

收稿日期:2023-02-10; 修回日期:2023-05-11 DOI:10.12143/j.ztgc.2023.04.012

基金项目:山东省住房和城乡建设科技计划(编号:2020-K1-1)

第一作者:何昭宇,男,汉族,1995年生,工程师,硕士,岩土工程专业,从事岩土工程勘察与设计方面的工作,山东省济南市无影山路686号,834970120@qq.com。

通信作者:张玉旗,男,汉族,1993年生,助理工程师,硕士,岩土工程专业,从事岩土工程勘察与设计的工作,上海市静安区灵石路930号,918121520@163.com。

引用格式:何昭宇,秦永军,张玉旗,等.含水率影响下全风化泥质灰岩工程地质特性及桩孔稳定性分析[J].钻探工程,2023,50(4):84-93.

HE Zhaoyu, QIN Yongjun, ZHANG Yuqi, et al. Engineering geological characteristics of completely weathered argillaceous limestone under the influence of water content and analysis of pile hole stability[J]. Drilling Engineering, 2023,50(4):84-93.

completely weathered argillaceous limestone has poor water resistance and is easy to disintegrate, and the water content has a significant impact on the disintegration rate. With the increase of water content, the shear strength of completely weathered argillaceous limestone decreases exponentially, and the deterioration of strength is obvious. Under dynamic disturbance, the internal unit of completely weathered argillaceous limestone is seriously damaged. It is recommended to set the mud pressure at 0.3MP, which can generate relatively obvious normal contact force on the hole wall without causing soil damage, and provide better support for the stability of the hole wall.

**Key words:** completely weathered argillaceous limestone; engineering geological characteristics; shear strength; stability of the hole wall; pile hole; numerical simulation

## 0 引言

风化岩是母岩在长期物理、化学风化作用下形成的产物,其工程地质特性与气候变化、母岩性质、地质构造及风化程度等多种因素有关,表现出明显的空间变异性,并根据风化程度可分为全风化、强风化、中等(弱)风化、微风化和未风化5个等级<sup>[1]</sup>。其中,全风化岩又被视为“特殊性土”,其天然状态下工程性质良好,具有孔隙比大、密度低、强度高、压缩性小等特点,一些力学指标甚至超出当前规范、规程对土体界定的取值范围,以目前沉积土获得的经验公式将难以准确预测其力学参数;另一方面,全风化岩成土环境特殊、物质成分及结构特征复杂,遇水易软化崩解,强度迅速降低,极易诱发滑坡、基坑坍塌、地基承载力不足等工程事故<sup>[2-4]</sup>。因此,开展对全风化岩工程性质的研究具有重要的现实意义。

Lumb<sup>[5]</sup>曾对香港地区花岗岩的风化过程进行探讨,系统阐述了全风化花岗岩物理力学指标及指标变异性;尚彦军等<sup>[6]</sup>对全风化花岗岩的孔隙直径、颗粒组成和矿物成分等结构特征进行研究,揭示了控制全风化花岗岩宏观强度特性的微观机制,并对微观结构细化及分类提供依据;肖红兵<sup>[7]</sup>通过现场载荷试验、标准贯入度试验和室内试验,分析了海南东环客运线路堤基底压力的分布规律,建立了一种适用于全风化花岗岩地基沉降变形的计算方法;李凯等<sup>[8]</sup>针对桂东南地区全风化花岗岩典型滑坡问题,研究了饱和度与风化岩抗剪强度间的相互关系,较好的解释了降雨诱发浅层滑坡形成机理及成灾特征。然而,以往的专家和学者对全风化岩的研究多集中在我国东南、华南地区出露的全风化花岗岩,对于其它易风化母岩的研究却相对较少,而泥质灰岩作为一种化学成因的灰质沉积岩,成土过程与花岗岩有着明显的差异,使得全风化泥质灰岩工程地质特性及强度劣化规律与一般风化岩差别较大。

本文以济南大涧沟地区全风化泥质灰岩为研究对象,通过现场勘察与室内试验相结合,系统调查该类岩体的物理、力学和水理性质。同时,针对工程建设期间出现的地表降雨—蒸发、水库水位升降、地下水渗流等情况,使得全风化泥质灰岩含水率处于动态变化过程,造成现场大直径钻孔灌注桩施工塌孔、缩径及漏失问题严重,通过自主研发的无损损伤浸水仪,对不同含水率下全风化泥质灰岩强度劣化规律进行研究,并结合渗流力学与弹塑性力学相关理论,采用PFC离散元软件对钻进过程孔壁稳定性进行模拟分析,提出合理的桩基施工建议,为全风化泥质灰岩地区的工程建设及灾害防治提供有益参考。

## 1 场地工程概况

场地位于济南市大涧沟村以北,卧虎山水泥厂以东,场地整体起伏较大,地形西高东低,地面标高112.63~141.21 m,属山前冲洪积平原地貌单元。在勘察深度范围内,地层自上而下依次为:杂填土( $Q_4^{ml}$ )、黄土状粉质粘土( $Q_4^{al+pl}$ )、粉质粘土( $Q_3^{al+pl}$ );下覆全风化泥质灰岩( $\delta$ )、强风化石灰岩(O)。其中,该地区全风化泥质灰岩属于白垩系燕山晚期,厚度范围为2.57~21.83 m,平均厚度为9.57 m,颜色呈黄绿—黄白色,风化程度均匀,钻孔岩心呈土柱状,少量碎块状,岩质较坚硬,力学强度较高,勘察时采用冲击方法钻探较困难,场地情况见图1所示。

对自然含水状态下全风化泥质灰岩室内试验资料进行统计分析,得到基本物理力学性质指标参数,如表1所示。由表1可以看出,该层孔隙比较大,结构性较强,呈硬塑状态,属于中压缩性土,且自由膨胀率 $\delta_{ci}=52\sim 63\%$ ,具有较弱的膨胀性和较差的压实特征。现场标贯试验测得全风化泥质灰岩标贯击数 $N=35\sim 49$ 击,标准贯入锤击数较大,工程地质性质较好,可作为良好的天然地基持力层。



图1 全风化泥质灰岩取样地点与试样

Fig.1 Sampling location and sample of completely weathered argillaceous limestone

表1 全风化泥质灰岩物理性质指标

Table 1 Physical property indexes of completely weathered argillaceous limestone

物理性质	指标范围	平均值
含水量 $w/\%$	22.9~25.70	24.35
重度 $G_s/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	27.3~27.6	27.5
密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	1.90~1.98	1.94
孔隙比 $e$	0.82~0.88	0.87
液限 $w_L/\%$	43.20~49.60	45.70
塑限 $w_P/\%$	23.80~27.10	25.30
塑性指数 $I_P$	19.40~22.50	20.4
液性指数 $I_L$	0.11~0.17	0.15
压缩系数 $a_{1-2}/\text{MPa}^{-1}$	0.10~0.17	0.13
压缩模量 $E_{s1-2}/\text{MPa}$	10.90~17.90	14.50

随着济南地区持续降雨影响,2021年10月市区累计降雨量平均 1020.6 mm,比历年同期上涨 61.7%。为应对持续降雨给防汛工作带来的不利影响,场地上游卧虎山水库开始泄洪放水,地下水位上升至标高 103.50~106.42 m,使得全风化泥质灰岩在水-岩作用下强度指标弱化明显,桩孔混凝土充盈系数 1.6~2.2,塌孔、缩径及漏失等现象严重,给工程建设带来了一定的安全隐患。

## 2 试样制备与土工试验

### 2.1 常规指标

由于前期勘察工作仅分析了天然状态下全风化泥质灰岩工程性质,多属非饱和或部分饱和状态,缺乏不同含水率下特殊力学行为的机理研究,故对场地内全风化泥质灰岩进行再次取样,按照《土工试验

方法标准》将全风化泥质灰岩加工制成标准试件<sup>[9]</sup>,见图 2 所示,得到的物理力学指标见表 2 所示。



图2 试样加工

Fig.2 Sample Processing

表2 试样常规物理力学指标

Table 2 Conventional physical and mechanical indexes of samples

物理性质	指标范围	平均值
含水量 $w/\%$	35.2~38.5	36.9
重度 $G_s/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	27.4~27.6	27.5
密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	1.85~1.98	1.91
孔隙比 $e$	0.72~0.95	0.85
液限 $w_L/\%$	40.80~48.50	45.09
塑限 $w_P/\%$	23.00~26.70	24.89
塑性指数 $I_P$	17.80~22.00	20.20
液性指数 $I_L$	0.24~0.46	0.36
压缩系数 $a_{1-2}/\text{MPa}^{-1}$	0.26~0.34	0.31
压缩模量 $E_{s1-2}/\text{MPa}$	7.20~11.80	8.91

随着含水率升高,全风化泥质灰岩的液塑性结果均位于 A 线以上,表现出粘性土的特征,且液性指数在 0.25~0.75 之间,定义状态为可塑,见图 3 所示。虽然风化作用使全风化泥质灰岩已经没有母岩的层理构造,但仍保留一定的母岩特征,主要表现为试样中含较多残余节理,又常被铁锰等氧化物充填,呈褐黑色或黑色薄夹层,使得重度又明显高于一般粘性土。采用杠杆式高压固结仪对试件进行一维固结压缩试验,具体数据见表 3 所示。

### 2.2 水理性质

#### 2.2.1 浸水性特征

为了研究含水率影响下全风化泥质灰岩工程地质特性,试验分别配制标准试样的初始含水率为



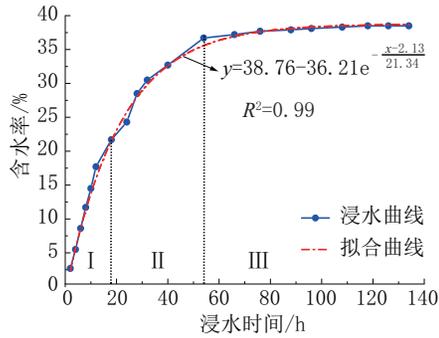


图5 全风化泥质灰岩含水率随浸水时间变化规律

Fig.5 Water content of completely weathered argillaceous limestone changes with immersion time

风化泥质灰岩含水率增长速率逐渐减小,含水率随浸水时间呈负指数函数增长趋势。根据变化趋势可大致分为3个阶段:Ⅰ含水率快速增长阶段,试块含水率在0~30.5%快速增长,浸水曲线呈线性增加,平均增长速率0.921%/h;Ⅱ含水率缓慢增长阶段,试块含水率在30.5%~37.2%增长缓慢,浸水曲线和拟合曲线的斜率开始逐渐减小,平均增长速率在0.282%/h;Ⅲ含水率基本稳定阶段,试块含水率在37.2%~38.4%,浸水曲线和拟合曲线与时间轴近似平行,试块含水率几乎不再增长,平均增长速率仅为0.029%/h。

### 2.2.2 崩解速率测定试验

利用无损浸水仪将全风化泥质灰岩制备成5个不同含水率试样(分别为 $w=0\%$ 、 $10\%$ 、 $20\%$ 、 $30\%$ 、 $38\%$ ),采用保鲜膜进行包裹。在试验开始前,通过准备好的烧杯、电子秤、漏网和托物架等设备,将试样通过漏网与托物架连接且不与烧杯接触,然后对盛水的烧杯进行称重,并开始计时观测,崩解速率测定装置见图6所示。试验开始后,每隔10s记录一次崩解数据,超过5min后,每1min记录1次崩解数据,直至试样崩解完全或连续1h内读数无变化。

其中,崩解速率计算公式如下:

$$v = m / (\rho_s - \rho_1) \quad (2)$$

式中: $\rho_s$ ——试样密度; $\rho_1$ ——水的密度; $v$ ——试样崩解体积; $m$ ——电子秤读数。

$$m_b = \rho_s m / (\rho_s - \rho_1) \quad (3)$$

$$\mu = m_b / t = \rho_s m / [(\rho_s - \rho_1) t] \quad (4)$$

式中: $\mu$ ——试样崩解速率; $m_b$ ——崩解试样质量; $t$ ——计数时间间隔。

得到全风化泥质灰岩不同含水率下崩解速率关



图6 崩解速率测定装置

Fig.6 Disintegration Rate Measuring Device

系如图7所示。从图中可以看出,含水率对全风化泥质灰岩崩解速率影响尤为显著,干燥状态下试样崩解剧烈,最大崩解速率达到0.3 g/s左右,并在9 min内完全崩解;随着试样含水率的增加,崩解过程缓慢持久,崩解速率呈先增大后减小最后趋于0的变化趋势,最大崩解速率约为0.1 g/s左右;当试件达到饱和状态时,剧烈崩解发生在17 min后,峰值崩解速率仅为0.05 g/s左右,且崩解速率整体变化不大,遇水几乎不崩解。

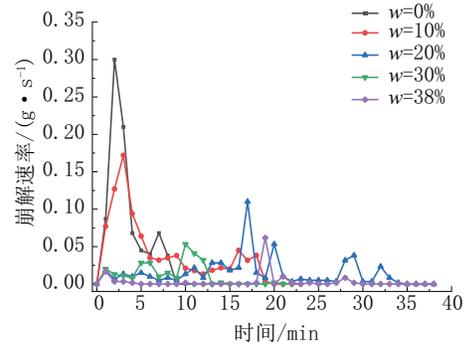


图7 全风化泥质灰岩在不同含水率下崩解速率

Fig.7 Disintegration rate of completely weathered argillaceous limestone under different water content

因此,全风化泥质灰岩的初始含水率越小,其结构破裂越快、泥化程度越高,最终崩解状态也更完全;而随着含水率增大,将直接影响全风化泥质灰岩前期崩解过程,这主要是由于前期吸水作用导致试样质量增加,崩解掉落颗粒的质量不足以抵消试样吸水增加的质量,使得崩解速率几乎不变。

### 2.2.3 耐崩解指数计算

试验基于规范《工程岩体试验方法标准》对全风化泥质灰岩的耐崩解指数进行计算,耐崩解指数计

算公式如下<sup>[10]</sup>:

$$I_d = (m_{r2}/m_0) \times 100\% \quad (5)$$

式中: $I_d$ ——全风化泥质灰岩耐崩解指数; $m_{r2}$ ——第二次崩解试验后试块残余烘干质量,g; $m_0$ ——崩解试验前试块烘干质量,g。

试验共选取了 5 组全风化泥质灰岩,随耐崩解试验的进行,全风化泥质灰岩浸水后发生剧烈崩解现象,数分钟内从水槽内出现碎块崩裂和塌落,且水槽内水质变浑浊,具体情况见表 4 所示。根据试验数据可以看出,崩解后的试样残余质量变化较大,平均耐崩解指数为 20.67%,可将其归为强崩解类。然而,在工程实践中仅依靠耐崩解指数对全风化泥质灰岩的工程特性进行描述又往往不够全面,全风化泥质灰岩虽然具有较低的耐崩解特性,但在含水率的影响下,崩解速率却又受到一定的抑制作用,也间接反映了全风化泥质灰岩的崩解特性与自身层理结构及粘土矿物含量相关。

表 4 试样崩解循环后残余质量与耐崩解指数

Table 4 Residual weight and disintegration resistance index of samples after disintegration cycle

试件	试验前/ g	第一次循 环后/g	第二次循 环后/g	耐崩解指 数/%
1	211.7	97.4	26.5	12.52
2	181.7	98.9	44.4	24.44
3	232.8	126.2	55.9	24.01
4	201.3	95.4	37.9	18.83
5	217.5	102.5	51.2	23.54

### 2.3 力学性质

#### 2.3.1 全风化泥质灰岩力学性能指标统计

目前,我国岩土工程领域广泛采用 Mohr-Coulomb 破坏准则,该准则认为岩土体破坏的主要类型是剪切破坏,而粘聚力和内摩擦角作为评价抗剪能力的重要技术指标<sup>[11-12]</sup>,计算公式如下:

$$\tau = c + \sigma \tan \varphi \quad (6)$$

式中: $\tau$ ——试样剪切应力,kPa; $c$ ——试样粘聚力,kPa; $\sigma$ ——试样正应力,kPa; $\varphi$ ——内摩擦角,(°)。

天然状态下全风化泥质灰岩表现出较高的强度特征,见图 8 和表 5,快剪强度指标  $c_{cq}=94.5$  kPa,  $\varphi_{cq}=20.8^\circ$ ,虽然该试样按属性可划分为粘性土,但得到的内摩擦角  $\varphi$  较大,主要由于全风化泥质灰岩中

母岩风化残余颗粒较差的定向排列特征所导致的。随着持续降雨影响,场地全风化泥质灰岩处于浸水饱和状态,快剪强度指标  $c_{cq}=42.5$  kPa,  $\varphi_{cq}=17.8^\circ$ ,含水率的增加使粘聚力明显降低,而内摩擦角变化却相对不大,说明水对全风化泥质灰岩强度影响主要反映在对胶结效应的破坏,出现粘土颗粒间胶结物质流失或丧失强度,从而削弱了骨架颗粒间的摩擦力,表现出力学性能显著下降。

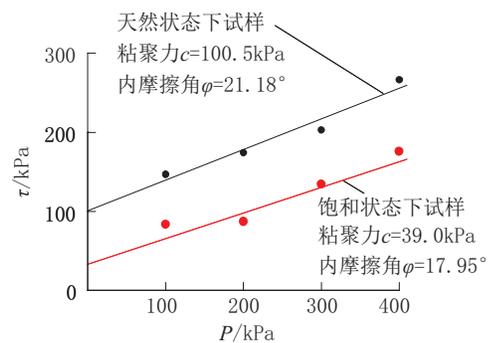


图 8 全风化泥质灰岩剪应力-正应力分布

Fig.8 Shear stress-normal stress distribution curve of completely weathered argillaceous limestone

表 5 全风化泥质灰岩固结快剪试验成果

Table 5 Consolidated quick shear test results of completely weathered argillaceous limestone

阶段	组数 n	粘聚力 $c_{cq}$ /kPa		内摩擦角 $\varphi_{cq}$ /(°)	
		范围	平均值	范围	平均值
天然状态	8	74.2~108.6	94.5	16.9~21.2	20.8
饱和状态	14	39.0~45.8	42.5	15.9~20.9	17.8

#### 2.3.2 含水率对抗剪强度的影响

为了得到全风化泥质灰岩的抗剪强度与含水率之间的关系,本文采用 TSZ10 型应变控制式三轴仪对不同含水率的试样进行分析(见图 9),得到全风化泥质灰岩的剪应力-应变曲线见图 10。



图 9 全风化泥质灰岩三轴剪切试验

Fig.9 Triaxial shear test of completely weathered argillaceous limestone

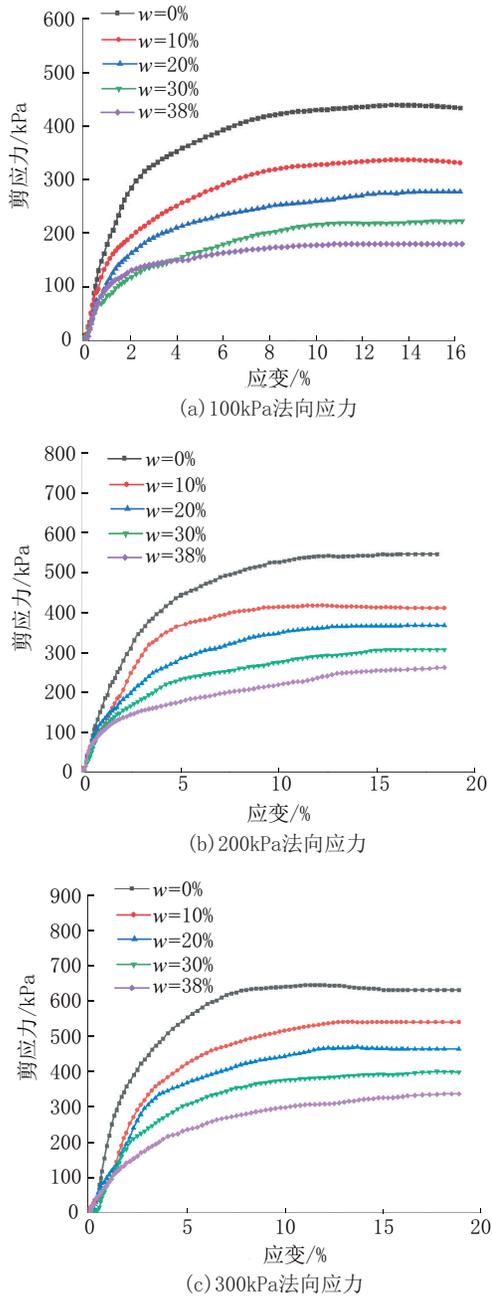
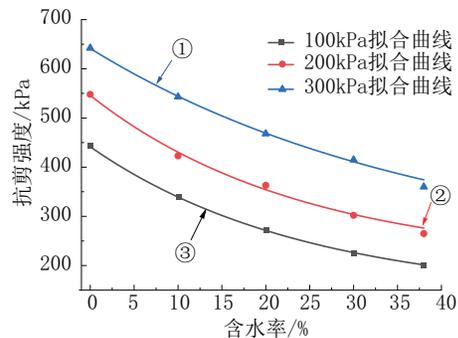


图 10 不同含水率全风化泥质灰岩剪应力-应变曲线  
 Fig.10 Shear stress-strain curve of completely weathered argillaceous limestone with different water content

加载初期,全风化泥质灰岩剪应力-应变曲线斜率不断升高,试样剪切模量不断增加;随着剪应力逐渐增大,曲线斜率逐渐减小,且依旧保持缓慢上升趋势,表明试件逐渐由原来的剪切带破坏转变为压缩性破坏。而在含水率的影响下,全风化泥质灰岩峰值剪应力均逐渐减小,如试样由干燥  $w=0\%$  到  $w=38\%$ , 100 MPa 法向应力条件下试样应变峰值数据

由 446.95 kPa 减小至 179.66 kPa, 减小幅度为 59.8%; 200 MPa 法向应力条件下试样峰值剪应力由 547.54 kPa 减小至 261.62 kPa, 减小幅度为 52.2%; 300 MPa 法向应力条件下试样峰值数据由 648.76 kPa 减小至 349.55 kPa, 减小幅度为 46.1%。

全风化泥质灰岩抗剪强度与含水率之间关系如图 11 所示。在水的作用下,试样的抗剪强度与含水率呈负相关,与法向应力呈正相关,且随着含水率增加,强度劣化越严重,试样抗剪强度呈指数函数趋势减小。



$$\text{① } y=213.46+408.95e^{-\frac{x+1.76}{38.82}}, R^2=0.98$$

$$\text{② } y=206.1+336.48e^{-\frac{x-0.25}{24.08}}, R^2=0.98$$

$$\text{③ } y=137.26+304.94e^{-\frac{x+0.05}{24.41}}, R^2=0.99$$

图 11 全风化泥质灰岩抗剪强度与含水率关系

Fig.11 Relationship between shear strength and water content of completely weathered argillaceous limestone

### 3 全风化泥质灰岩钻进孔壁稳定模拟

#### 3.1 流-固耦合离散元模型建立

虽然在含水率影响下全风化泥质灰岩崩解的速率得到有效抑制,但地下水对地层弱化作用明显,再加上桩基施工机械在该处扰动较大,导致了现场塌孔、扩径严重,浇筑质量难以保证。为此,本文基于 PFC 离散元软件建立全风化泥质灰岩二维概化地层数值模型,得到钻孔孔内应力与灌浆压力间的相关关系,并对钻进过程孔壁稳定性进行评价,进而为桩基施工提出合理化建议和措施。

为模拟桩孔钻进过程中泥浆通过渗透、压密等方式与全风化泥质灰岩相互作用,模型颗粒之间除受到相邻颗粒所施加的法向作用力和切向作用力外,还要受到流体的压力作用,以此实现流体与固体的耦合作用<sup>[13-14]</sup>。而泥浆能否较好地发挥护壁作

用,主要在于泥浆压力与地层土水压力的平衡,即泥浆压力等于全风化泥质灰岩地层水土压力,则可保持开挖孔(槽)或开挖面的稳定性。

对于宏-细观参数的选取,徐松<sup>[15]</sup>曾利用 PFC2D 数值双轴试验模拟研究了粘性土的宏观剪切指标粘聚力  $c$ 、内摩擦角  $\varphi$  与细观颗粒的法向粘结强度  $F_n$ 、切向粘结强度  $F_s$ 、摩擦系数  $\mu$  等定性、定量的关系,本文根据其得出的函数关系,用饱和状态下全风化泥质灰岩室内固结快剪试验结果进行参数反算,具体细观参数如表 6 所示。由于土颗粒的真实粒径极小,而模拟对象的尺寸远大于颗粒粒径,一般采用放大法来扩大颗粒粒径,模型中的颗粒代表真实土粒团或土粒簇用于分析岩土破坏问题<sup>[16]</sup>,一般将模型颗粒总数控制在 20000 以内,既能加快运算速率也能较好的反映出模拟结果。

表 6 土体颗粒细观参数

Table 6 Meso parameters of soil particles

最小粒径 $R_{min}/m$	最大粒径 $R_{max}/m$	摩擦系数 $\mu$	初始孔隙率 $n$	法向粘结强度 $F_n/N$	切向粘结强度 $F_s/N$
0.03	0.05	0.24	0.08	3.4e5	1.0e7

基于此,在 PFC2D 模拟中选用接触粘结模型,建立模型长宽均为 6.0 m,桩孔直径为 1.0 m,共由 8329 个颗粒组成,并对模型边界施加相应的 15 kPa 围压来反应一定深度下的沉积环境。同时,考虑到

流-固耦合计算需要大量的计算力,为了更好地实现颗粒体与域的耦合,将颗粒粒径比设置为 1.67:1,颗粒随机生成并使之均匀分布,以模拟全风化泥质灰岩地层的物理力学性能,颗粒流数值模型见图 12。

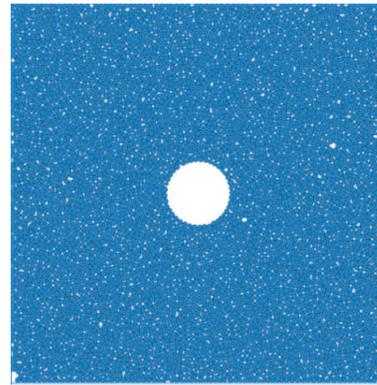


图 12 全风化泥质灰岩地层钻进颗粒流数值模型

Fig.12 Numerical model of drilling particle flow in completely weathered argillaceous limestone formation

### 3.2 钻孔周边接触力分布特征

在钻孔施工工程中,泥浆护壁作用的本质是通过泥皮的作用,将部分泥浆压力转化为抵抗地层土压力的有效应力,而泥皮的形成则是泥浆在地层中渗透的结果<sup>[17]</sup>。为此,采用离散元流-固耦合方法对不同泥浆压力作用下钻孔孔壁的接触力进行分析,具体情况见图 13。

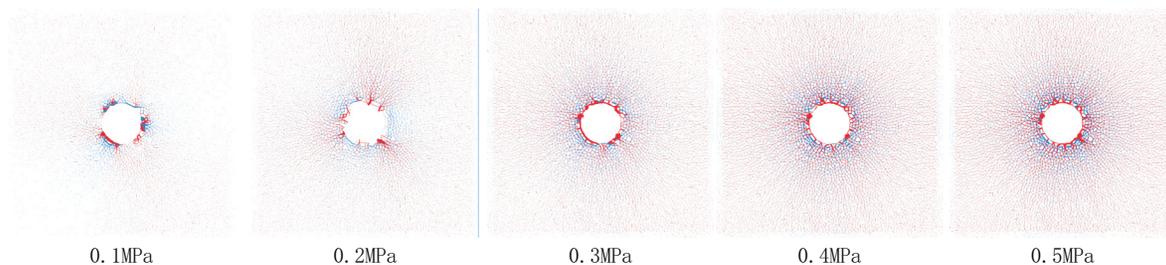


图 13 不同泥浆压力作用下钻孔孔壁的接触力

Fig.13 Contact force of borehole wall under different mud pressures

根据孔壁塑性区分布的模拟结果,分别采用 0.1~0.5 MPa 的泥浆压力对孔壁的稳定性进行研究,图中垂直孔口边缘呈放射性的线条代表颗粒间的法向接触压力,孔壁周围垂直法向接触压力的环形线条则代表环向的张拉应力,线条的宽度与接触力的大小成正比。由图可以看出,在 0.1 MPa 的泥浆压力作用下,孔壁上颗粒的接触力基本为零,说明

此处的颗粒在土的自重应力及泥浆压力的综合作用处于临界平衡状态;当泥浆压力达到 0.2 MPa 时,孔壁开始出现法向接触力,开始产生一定的有效应力;当泥浆压力达到 0.3 MPa 时,孔壁上生成了较为明显的法向接触力,为孔壁的稳定提供了较好的支撑;当泥浆压力达到 0.4 MPa 时,孔壁上的法向接触力进一步增大,但同时也出现了环向的张拉应力,这对

孔壁的稳定是不利的;当泥浆压力达到0.5 MPa时,该趋势更为明显,孔壁已经出现了明显的张拉破坏,颗粒出现剥落现象。

### 3.3 泥浆压力分布特征

在钻进过程中,随着泥浆压力的逐渐增大,泥浆

将对全风化泥质灰岩地层出现不同程度的渗透,从而产生“泥皮效应”,有利于提高钻孔孔壁稳定性,而泥浆压力则可通过其自重或者附加应力提供,具体情况见图14所示。

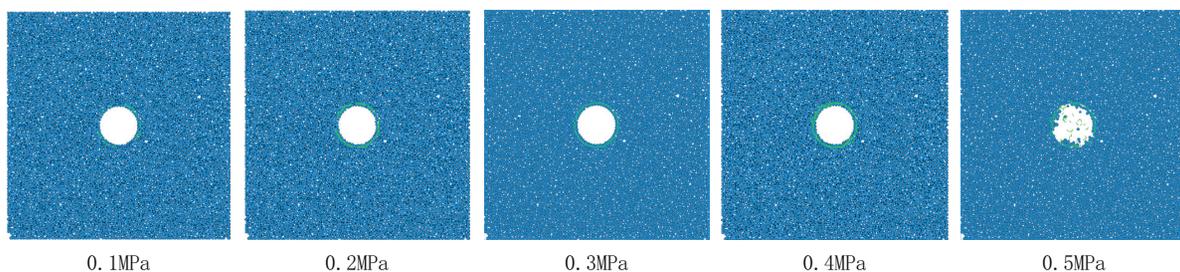


图14 不同泥浆压力作用下泥浆渗透扩散规律

Fig.14 Mud permeation diffusion law under different mud pressures

由图14可以看出,当泥浆压力由0.1 MPa逐渐增加到0.5 MPa时,泥浆将不断向孔壁渗透,扩散范围也逐渐增加,呈现为不规则圆形。其中,图上绿色代表泥浆压力,其大小与灌浆压力成正比。当泥浆压力达到0.1 MPa时,泥浆扩散范围不明显,较难形成护壁作用;当泥浆压力为0.2 MPa和0.3 MPa时,泥浆扩散范围逐渐增大,基本可形成闭合的同心圆形;当泥浆压力为0.4 MPa时,泥浆的渗透扩散出现了明显的不规则性,此时泥浆可能在地层表面形成致密的泥皮或者泥皮+渗透带;当泥浆压力达到0.5 MPa时,地层表面形成了明显的泥浆渗透的方向,说明此时钻孔的孔壁已经出现了张拉破坏,泥浆优先通过了张拉裂缝向孔壁远端渗透,并对裂缝周边其他区域的泥浆扩散作用产生了抑制,将不利于全风化泥质灰岩孔壁的稳定。

综上所述,针对全风化泥质灰岩工程地质特性,在不造成土层破坏的前提下,泥浆的压力越大,对孔壁稳定性将越好,故泥浆压力可设定为0.2~0.3 MPa。另一方面,随着桩孔不断开挖,机械的扰动会引起地层的应变突增,加剧全风化泥质灰岩内部单元的损伤,造成塌孔破坏。为此,建议采用0.3 MPa泥浆压力进行护壁,并减小钻机钻进速度和单次钻进深度,以及在孔口位置增设钢护筒等措施来提高孔壁稳定性。

## 4 结论

本文以济南大涧沟地区广泛分布的全风化泥质

灰岩为研究对象,通过室内试验从物理、力学和水理性质等方面对白垩系燕山晚期全风化泥质灰岩的工程地质特性进行了深入研究,并基于流-固耦合离散元理论,运用PFC离散元软件对大直径钻孔灌注桩孔壁的稳定性进行分析,其主要结论如下:

(1)天然状态下全风化泥质灰岩孔隙比较大,结构性较强,呈硬塑性状态,具有较弱的膨胀性和较差的压实特征;而随着含水率升高,全风化泥质灰岩遇水软化、崩解,出现粘土颗粒间胶结物质流失或丧失强度,从而削弱了骨架颗粒间的摩擦力,力学性能显著下降,表现出粘性土的特征。

(2)由全风化泥质灰岩浸水特征、耐崩解指数以及崩解速率测定等试验结果可知,全风化泥质灰岩耐水性差、易崩解,且含水率对崩解速率影响尤为显著;在自然吸水过程中,含水率随时间变化可分三个阶段:Ⅰ快速增长阶段,平均增长速率0.921%/h,Ⅱ缓慢增长阶段,平均增长速率在0.282%/h,Ⅲ基本稳定阶段,平均增长速率仅为0.029%/h。

(3)通过对不同含水率下全风化泥质灰岩强度劣化规律进行研究,得到全风化泥质灰岩抗剪强度与含水率呈负相关,与法向应力呈正相关,且随着含水率增加,强度劣化越严重,抗剪强度呈指数函数趋势减小。

(4)基于PFC离散元软件对全风化泥质灰岩桩孔壁稳定性分析可知,当泥浆压力达到0.3 MPa时,孔壁上生成了较为明显的法向接触力,可起到较好的泥浆护壁作用,有利于全风化泥质灰岩孔壁的稳定。

定,并为今后全风化泥质灰岩地区类似的工程建设提供有益参考。

### 参考文献(References):

- [1] GB/T 50218—2014, 工程岩体分级标准[S].  
GB/T 50218—2014, Engineering rock mass classification standard[S].
- [2] 陈德金. 全风化花岗岩隧道塌方灾害致灾机理研究[J]. 土工基础, 2021, 35(2): 194-198, 202.  
CHEN Dejin. Research on the disaster mechanism of the collapse disaster of the fully weathered granite tunnel[J]. Geotechnical Foundation, 2021, 35(2): 194-198, 202.
- [3] 茶增云, 朱涛, 沈孟龙, 等. 浅埋富水全风化花岗岩公路隧道塌方数值模拟分析[J]. 施工技术(中英文): 1-7.  
CHA Zengyun, ZHU Tao, SHEN Menglong, et al. Numerical simulation analysis of collapse of shallow-buried water-rich fully weathered granite highway tunnel[J]. Construction technology (Chinese and English): 1-7.
- [4] 刘泽, 李友云. 全风化花岗岩边坡坡面降雨冲刷数值模拟分析[J]. 湖南交通科技, 2018, 44(2): 52-57.  
LIU Ze, LI Youyun. Numerical simulation analysis of rainfall scouring on completely weathered granite slope[J]. Hunan Communications Science and Technology, 2018, 44(2): 52-57.
- [5] Peter Lumb. The properties of decomposed granite[J]. Géotechnique, 1962, 12(3): 226-243.
- [6] 尚彦军, 王思敬, 岳中琦, 等. 全风化花岗岩孔径分布-颗粒组成-矿物成分变化特征及指标相关性分析[J]. 岩土力学, 2004(10): 1545-1550.  
SHANG Yanjun, WANG Sijing, YUE Zhongqi, et al. Pore size distribution-particle composition-mineral composition change characteristics and index correlation analysis of completely weathered granite[J]. Geotechnical Mechanics, 2004(10): 1545-1550.
- [7] 肖红兵. 高速铁路深厚全风化花岗岩地基沉降特性及加固技术研究[D]. 西南交通大学, 2016.  
XIAO Hongbing. Research on settlement characteristics and reinforcement technology of deep and completely weathered granite foundation of high-speed railway[D]. Southwest Jiaotong University, 2016.
- [8] 李凯, 王志兵, 韦昌富, 等. 饱和度对风化花岗岩边坡土体抗剪特性的影响[J]. 岩土力学, 2016, 37(S1): 267-273.  
LI Kai, WANG Zhibing, WEI Changfu, et al. Effect of saturation on shear properties of weathered granite slope soil[J]. Geotechnical Mechanics, 2016, 37(S1): 267-273.
- [9] GB/T 50123—2019, 土工试验方法标准[S].  
GB/T 50123—2019, Standard for soil test methods[S].
- [10] 何昭宇. 古近系巨厚“红层”工程地质特性及灾害隐患预测研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.  
HE Zhaoyu. Research on the engineering geological characteristics and hazard potential prediction of Paleogene thick “red beds”[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019.
- [11] 陈伟乐, 徐国平, 宋神友, 等. 风化岩遇水软化的强度试验及力学特性研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(S1): 67-76.  
CHEN Weile, XU Guoping, SONG Shenyou, et al. Strength test and mechanical properties study of weathered rock softening with water[J]. Geotechnical Mechanics, 2022, 43(S1): 67-76.
- [12] 汤华, 严松, 杨兴洪, 等. 差异含水率下全风化混合花岗岩抗剪强度与微观结构试验研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(S1): 55-66, 76.  
TANG Hua, YAN Song, YANG Xinghong, et al. Experimental study on shear strength and microstructure of completely weathered migmatite under different water content[J]. Geotechnical Mechanics, 2022, 43(S1): 55-66, 76.
- [13] 曾卫. 基于离散元流-固耦合优化算法的岩石渗透破裂机理研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2018.  
ZENG Wei. Research on the mechanism of rock permeation and fracture based on discrete element flow solid coupling optimization algorithm[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2018.
- [14] 董琪, 王媛, 冯迪. 水压致裂起裂压力的细观离散元模拟及试验研究[J/OL]. 岩土力学, 2022(12): 1-11.  
DONG Qi, WANG Yuan, FENG Di. Mesoscopic discrete element simulation and experimental study of hydraulic fracturing initiation pressure[J/OL]. Geotechnical Mechanics, 2022(12): 1-11.
- [15] 徐松. 黏性土宏-细观参数关系的PFC2D模拟研究[J]. 中国水运, 2017(8): 3.  
XU Song. PFC2D simulation study on the relationship between macro and micro parameters of cohesive soil[J]. China Water Transport, 2017(8): 3.
- [16] 石崇, 徐卫亚. 颗粒流数值模拟技巧与实践[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.  
SHI Chong, XU Weiya. Techniques and Practice for Numerical Simulation of Particle Flow[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015.
- [17] 郑万栋, 申翊, 靳利安, 等. 泥浆的有效静液压力及在泥浆护壁中的作用[J]. 土工基础, 2019, 33(6): 704-708.  
ZHENG Wandong, SHEN Hong, JIN Li'an, et al. Effective hydrostatic pressure of mud and its role in mud retaining wall[J]. Geotechnical Foundation, 2019, 33(6): 704-708.

(编辑 王文)