

# 深圳市南山区后海片区风化深槽的岩土特性研究

张小芳,李志波,王贤能,许建瑞

(深圳市工勘岩土集团有限公司,深圳 518057)

**摘要:** 深圳市南山后海片区揭露有地下埋深50 m到160 m不等的花岗岩风化深槽,为研究深槽区内外岩土特性的差异,通过钻孔数据分析风化深槽内外的岩土体物理力学参数,主要包括土体密度、土体含水性、土体孔隙性、土体压缩性、土体可塑性和岩体的抗压强度,发现风化深槽区内岩土特性较差,且物理力学参数随着深度变化规律也较复杂。结合风化深槽区内的岩芯构造特征分析,发现断层发育是造成该区域内风化深槽区岩土体的工程性质较差的主要原因。研究可为风化深槽区内的工程建设提供依据。

**关键词:** 风化深槽;岩土特性;岩芯构造分析;断层

**中图分类号:** TU443;P642 **文献标识码:** A

## STUDY ON GEOTECHNICAL CHARACTERISTICS OF WEATHERED DEEP TROUGH IN HOUHAI AREA, NANSHAN DISTRICT, SHENZHEN CITY

ZHANG Xiao-fang, LI Zhi-bo, WANG Xian-neng, XU Jian-rui

(Shenzhen Geosky Group Co., Ltd., Guangdong Shenzhen 518057, China)

**Abstract:** In the Houhai area of Nanshan, Shenzhen, there are granite weathered deep troughs with underground depths ranging from 50 m to 160 m. It mainly includes soil density, soil water content, soil porosity, compressibility, soil plasticity and rock compressive strength. Also more complicated. Combined with the analysis of the structural characteristics of the core in the weathered deep trough area, it is found that the development of faults is the main reason for the poor geotechnical engineering properties in the weathered deep trough area. The research can provide a basis for engineering construction in the weathered deep trough area.

**Key words:** weathered deep trough; geotechnical characteristics; core structural analysis; fault

## 1 引言

同一地区的岩体风化特征会受地质环境影响而产生差异,但一般情况下,同一部位同类岩体的风化特征差异不会相差太大,然而在一定的地质背景条

件下,相同部位同类岩体会产生局部差异风化,使部分岩体风化厚度骤增,从而形成风化深槽。

目前国内外针对风化深槽的岩土特性研究较少,而关于风化深槽区内的隧道施工技术研究较多。2006年郭衍敬等<sup>[1]</sup>研究厦门海底隧道穿越风化深

槽施工方案时采用全断面帷幕注浆和辅助注浆、超前注浆小导管预支护、双侧壁导坑法开挖等一系列措施,确保海底隧道安全施工。2010年孙钧等<sup>[2]</sup>则采用位移反分析法动态反演预测模型,以确保隧道施工能够顺利穿越海底风化深槽,解决了风化深槽区内施工隧道的一大难题。2020年段元振等<sup>[3]</sup>针对船闸建筑在风化深槽区修建时提出了地基换填、盖重固结灌浆等施工方案,有效提高了船闸稳定性。

在风化深槽的形成机制方面,早在1995年郑万模<sup>[4]</sup>便提出岩石矿物的抗风化能力和岩石的结构构造是风化深槽形成的主要因素,破裂构造则对风化深槽的形成起着控制作用,同时水下环流、卸荷裂隙以及风化营力也能促进风化深槽的发育。2006年李光耀等<sup>[5]</sup>研究厦门风化深槽时发现断裂破碎带经后期风化作用会形成风化深槽,并研究了风化深槽内岩土体的物理力学性质指标。陈卫红等<sup>[6]</sup>将某堆积风化深槽的形成过程分为冲沟形成阶段、冲沟填埋阶段和相对稳定阶段,并认为是断裂切割层状结构岩质边坡形成了堆积风化深槽。

在风化深槽的岩土特性方面,杨友刚等<sup>[7]</sup>分析了变质岩区岩体风化深槽的物理力学性质,但仅给出风化深槽区内的物理力学参数,并未对同地区风化深槽区外的物理力学参数进行分析比较;邓忠文<sup>[8]</sup>在研究某水电工程坝址区花岗岩风化特征时,发现岩体风化的水平、垂直分带性明显,且微观岩片可观察到风化隐微裂隙的发育和部分矿物蚀变为黏土矿物;张昌新等<sup>[9]</sup>研究深圳地区花岗岩地层岩土工程特性,给出了深圳地区花岗岩残积土的天然含水量、重度、天然孔隙比、压缩系数等物理力学参数的室内试验统计结果,同时发现花岗岩残积土及全风化岩具有遇水软化崩解的特点。

深圳市南山区后海片区位于深圳市南部,属于深圳湾的填海区,填海前原始地貌为滨海滩涂,大量的工程兴建之后,土方开挖及填土回填使后海片区的原始地貌发生变化,风化层厚度不均匀。后海片区基岩主要为花岗岩,根据钻孔揭露,该地区从地表至地层深部分别为人工填土层、第四系沉积层、残积土层、花岗岩,其中花岗岩自上而下又分为全风化层、强风化层、中风化层、微风化岩层。一般而言,该区域内微风化花岗岩顶板在地下埋深50 m以内揭露,但在研究区内拟建工程勘察论证时发现部分地区微风化花岗岩顶板在地下-50 m到-160 m之间均有分布。如图1所示,研究区内一般在地下-50 m到-70 m之间揭露花岗岩微风化岩层顶板,然而部分地区的中风化花岗岩可揭露至地下近百

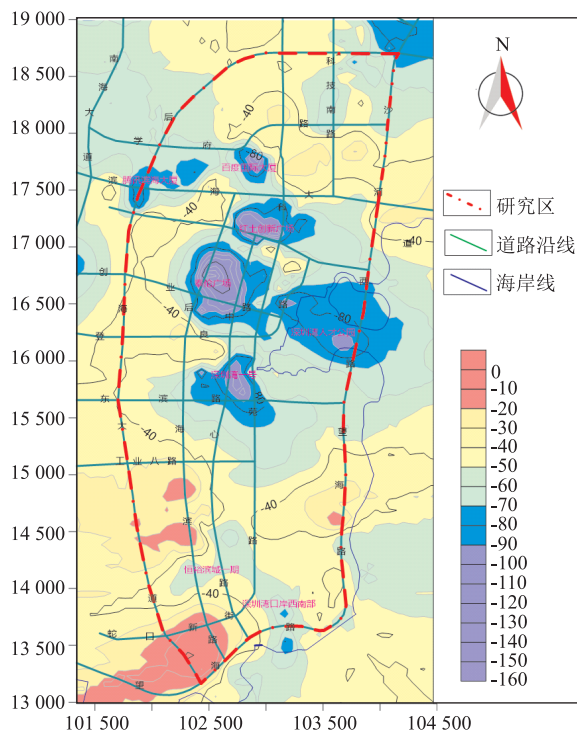


图1 南山区后海片区风化深槽(微风化层顶板)分布图

米。为研究深圳市南山后海片区的风化深槽岩土特性,本文分析了研究区的岩土物理力学参数在风化深槽区内外的差异、岩土力学参数随深度变化的分布规律,并进一步研究风化深槽的形成机理,以期为风化深槽区内的工程项目实践提供建设依据。

## 2 风化深槽区的岩土体特性分析

在漫长的地质历史中,岩土体要经历风化作用、沉积作用、岩浆运动、应力作用等地质活动使其形成各自独特的岩土体特性,且组成岩土体的物质成分、多相性也使其具有复杂的物理力学性质,因此对风化深槽区内的岩土体特性分析,离不开对岩土体物理力学参数的研究,本文主要包括土体的天然密度、干密度、土粒比重、含水率、饱和度、天然孔隙比、压缩系数、粘聚力、内摩擦角等物理力学参数。值得注意的是,研究区的风化深槽(微风化层顶板)虽在地下埋深50 m到160 m之间均有分布,但钻孔数据中的土体物理力学参数数据是来源于取土钻孔的土工试验数据,因此取样深度基本分布在地下一50 m以内(工程上对超过地下一50 m的残积土取样较少),岩样的取样深度则可达地下深度100 m左右,因此本文将分别介绍研究区的土体物理力学参数和岩体的抗压强度分布规律。本节主要介绍研究区内残积土试样的物理力学参数在风化深槽内外的分布规

表1 南山区后海片区残积土物理力学参数均值统计表

分布位置	天然密度 /g·cm <sup>-3</sup>	干密度 /g·cm <sup>-3</sup>	土粒比重	天然含水率 /%	饱和度 /%	天然孔隙比	压缩系数 /MPa <sup>-1</sup>	塑性指数 /%	钻孔数量 /个
深槽区外	1.86	1.52	2.68	27.2	86.2	0.84	0.51	32.1	57
深槽区内	1.78	1.46	2.71	28.4	85.3	0.92	1.8	21.3	219

律,有关岩体的风化深槽内外的强度差异将在第3节展开介绍。

如表1所示,为深圳市南山后海片区风化深槽区内外残积土试样的物理力学参数均值,可以看出,相较于风化深槽区外,深槽区内的残积土天然密度、干密度均较小,分别为1.78 g/cm<sup>3</sup>和1.46 g/cm<sup>3</sup>。深槽区内的土粒比重为2.71,大于风化深槽区外的2.68,天然含水率为28.4%,略高于风化深槽区外,但土体饱和度却较小,天然孔隙比和压缩系数均比风化深槽区外更大;说明深槽区内的残积土密度小、天然含水率高、孔隙较多、压缩性更高。总体而言,风化深槽区内残积土的工程岩土特性比同一地区风化深槽区外的残积土更差。表1仅从残积土试样的室内岩土试验所得的物理力学参数均值来分析深圳市南山区后海片区的岩土物理力学参数在风化深槽区内外分布差异,但在地表以下不同深度,各岩土物理力学的分布特征亦不相同。为进一步分析残积土的岩土物理力学参数在风化深槽区内外随着深度变化的分布规律,本节将分别从深圳市南山区后海片区残积土的土体密度、含水性、孔隙性、压缩性和可塑性进行介绍。

## 2.1 风化深槽区的土体密度研究

为研究南山区后海片区内的土体密度在风化深槽内外随深度的变化规律差异,本节主要统计了该区域内钻孔数据中的天然密度、干密度、土粒比重这3个岩土物理指标,以下将分别阐述。

### 2.1.1 天然密度

由钻孔资料获取南山区后海片区风化深槽内、外土体的天然密度数据作图2,可知在地表下0~50 m深度范围内,深槽区内土体天然密度值较为集中地分布在1.7~2.1 g/cm<sup>3</sup>区间,土体除砾质黏性土、砂质黏性土、淤泥质黏土外,浅层还分布有大量的砾砂、中砂、圆砾等,使该部分的残积土土颗粒密度波动较大。风化深槽区外由于微风化层顶板分布较浅,一般在地下埋深0~35 m范围以内(即钻孔在地下埋深0~35 m范围内就已取得微风化层顶板),因此风化深槽区外获得的钻孔数据均在深度范围0~35 m内,导致其天然密度分布1.7~2.65 g/cm<sup>3</sup>内,土体力学性质较差。从天然密度的均值来看(参见表1),深槽区外的天然密度为1.86 g/cm<sup>3</sup>,

也高于深槽区内的天然密度均值1.78 g/cm<sup>3</sup>。总体而言,风化深槽区内残积土的天然密度低于深槽区外残积土层的天然密度,说明天然状态下,深槽区内土体的结构较疏松,或在土体结构相同的情况下,孔隙中水分较多也会使其天然密度较小。

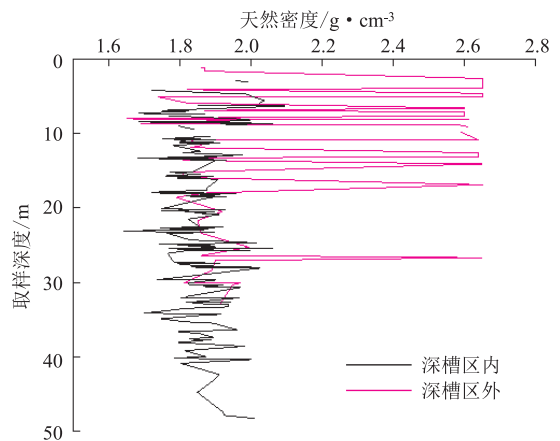


图2 残积土天然密度随深度变化图

### 2.1.2 干密度

如图3所示,为深槽区内土体干密度-取样深度变化曲线,可以看到在取样深度0~30 m范围内,深槽区外土体的干密度多集中于1.3~1.9 g/cm<sup>3</sup>,深槽区内的土体干密度则在1.2~1.5 g/cm<sup>3</sup>之间,总体呈现深槽区外的土体干密度比深槽区内土体干密度更大的分布规律;在30~50 m范围内,土体干密度最大值相比0~30 m深度范围略有提升,局部超过1.6 g/cm<sup>3</sup>,达到1.8 g/cm<sup>3</sup>左右。干密度的大小取决于单位体积土中固体颗粒含量及组成土粒的矿物密度,也反映了土体的孔隙性。由图3可以看出,深槽区内土体的组成矿物密度较小,孔隙体积较风化深槽区外大,随着深度的增加,深槽区内干密度略有增加,但提高幅度不大。

### 2.1.3 土粒比重

由图4中土粒比重随取样深度变化规律可知,无论是深槽区内,还是深槽区外,土体的土粒比重均集中分布在2.68左右,深度0~30 m范围内,深槽区外的土体含水率与深槽区内相差不大,且变化规律较一致。土粒比重仅与组成土粒的矿物密度有关,而风化深槽区内土体多为含砂粉土、含砂淤泥质土、含砾粉质黏土、砾质黏性土等,砂砾的矿物密度

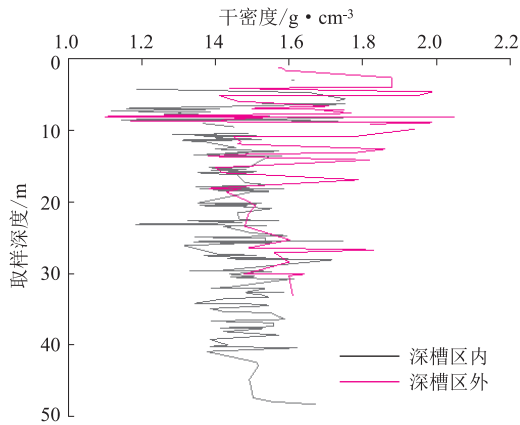


图3 干密度随深度变化图

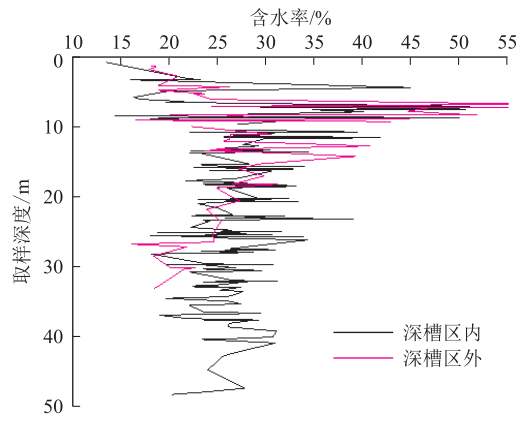


图5 天然含水率随深度变化图

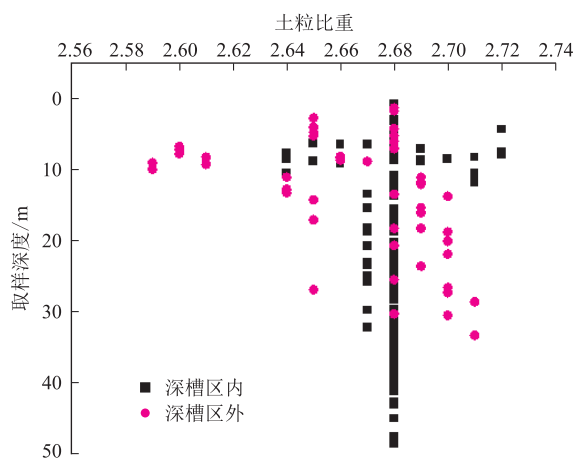


图4 土粒比重随深度变化图

较低,因此深槽区内的土粒比重较小。

## 2.2 风化深槽区的土体含水性研究

### 2.2.1 天然含水率

由图5可知,在0~20 m深度范围内,深槽区外的土体含水率与深槽区内相差不大,且变化规律较一致:即土体含水率波动幅度大,土体含水率大多在22%~55%之间;相邻深度的含水率增量可达2倍,这与地下水位分布、土的孔隙体积、吸水性均有关。在地下深度20~50 m范围内,随着深度增加,含水率有减少的趋势,尤其在风化深槽区外,随着深度增加,含水率明显由30%降至15%左右,推测原因为深槽区外地下水位分布较浅,使土体天然含水率明显降低;而深槽区内地下水位分布较深,土体含水率分布在20%~35%之间,比0~20 m深度的土体含水率小,但比同一深度的深槽区外土体天然含水率略高。

### 2.2.2 土体饱和度

土体中的天然含水率是用来表明土中含水的质量与土粒质量的相对比值,而饱和度则可以反映土

中孔隙的充水程度。由图6可知,南山区后海片区内土体的饱和度大部分在70%以上,部分土体甚至达到完全饱和状态,这是由于地下水位分布深度、砾质黏土和砂质黏土的物理性质决定的:在地下水位以下时,砾质黏土、砂质黏土中的孔隙被水分充满,达到完全饱和状态。由图6还可看出:风化深槽区内残积土的饱和度分布比深槽区外更分散,说明地下水位的分布在风化深槽区内的变化更为复杂。

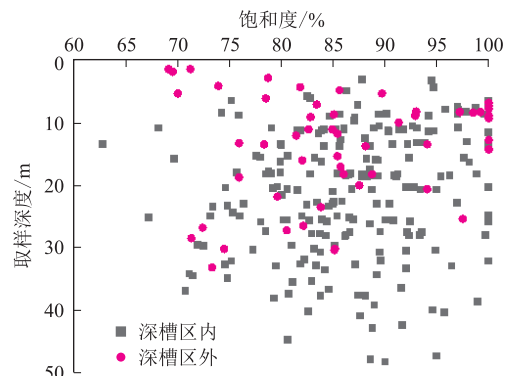


图6 饱和度随深度变化图

## 2.3 风化深槽区的土体孔隙性和压缩性研究

### 2.3.1 天然孔隙比

由图7可知,取样深度0~10 m范围内,土体孔隙比在0.5~1.4区间居多,总体变化趋势不明显;此外,在取样深度10 m左右,土体的天然孔隙比分布较为分散,随着深度变化幅度较大,局部土样在地下分布深度相差仅0.2 m,但孔隙比差异却达到0.68,说明地下埋深10 m左右的土体孔隙比倾向于产生强烈的空间变异性。在取样深度10~50 m范围内,除个别深槽区外土体样本的孔隙比在1.6左右,大部分土体的天然孔隙比在0.6~1.0范围内浮动,总体表现为深槽区外的天然孔隙比变化浮动较大,分布在0.5~1.3之间,深槽区外土体的天然

孔隙比则较为集中地分布在 0.6~0.8 之间。孔隙比越大,表明土中孔隙体积越多,土体结构越疏松<sup>[10]</sup>,土体的压缩性越高。深槽区内土体的天然孔隙比分布较为分散,在 10~50 m 深度范围内的土体天然孔隙比的最大值比深槽区外大,最小值也比风化深槽区外小,说明风化深槽区内土体结构的疏松程度变化幅度较大,推测原因为深槽区内土体受构造活动影响,在土体结构较为致密的地质背景下,风化深槽因构造侵入活动使其土体分布支离破碎,因此风化深槽区内的天然孔隙比变化幅度较大。

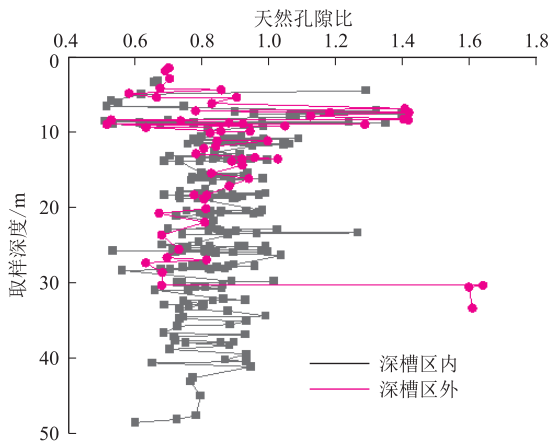


图 7 孔隙比随深度变化图

### 2.3.2 压缩系数

作为孔隙比减小值与压力增加值的比值,压缩系数用以衡量单位压力变化值下的孔隙比变化幅度,即表征土体的压缩性能,压缩系数越大,表明压缩性越高。由图 8 可知,取样深度 0~50 m 范围内,土体的压缩系数处在 0.25~1.0 MPa<sup>-1</sup> 范围居多,局部土样的压缩系数在 2.5~3.5 MPa<sup>-1</sup> 之间,原因是南山区后海片区在地下 10 m 深度左右分布有淤泥质土,因此该部分土样的压缩系数较高;其余土样大部分为砂质黏性土、含砾粉质黏土、砾砂等,压缩系数处在 0.25~0.5 MPa<sup>-1</sup> 之间的居多,为中压缩性土。

## 2.4 风化深槽区的土体可塑性研究

### 2.4.1 液限与塑限

液限、塑限能反应黏性土中水对土性质的影响,由图 9 液限、塑限的分布可知,同一深度下风化深槽区内残积土的液限高于风化深槽区外,且随着深度增加,液限也逐渐提高的规律,说明风化深槽区内黏性土处于可塑状态到流动状态的界限含水率由地表逐渐向下升高。同一深度下,风化深槽区内的塑限高于风化深槽区外,说明风化深槽区内黏性土处于半固体状态到可塑状态的界限含水率更高;且随着

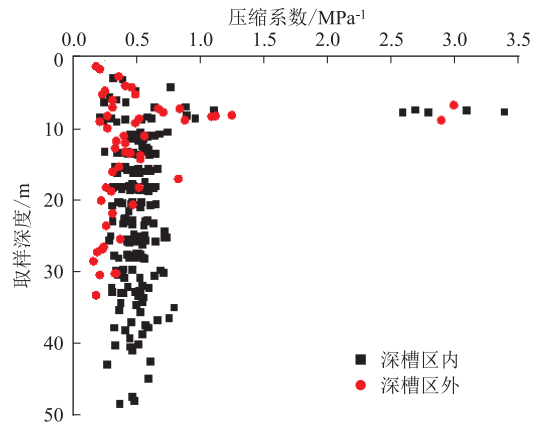
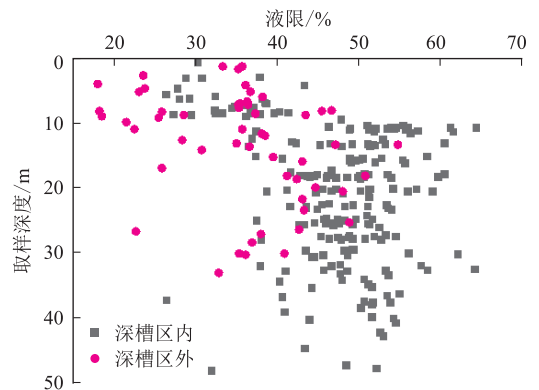
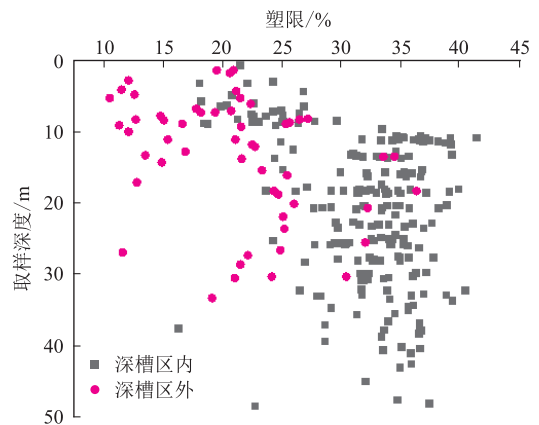


图 8 压缩系数随深度变化图

深度增加,深槽区内外的残积土塑限均有所提高。



(a) 液限随深度变化图



(b) 塑限随深度变化图

图 9 塑限、液限随深度变化图

### 2.4.2 塑性指数

由液限与塑限的差值可以得到残积土对应的塑性指数,如图 10 所示,可以看出风化深槽区内塑性指数总体比深槽区外来得大。塑性指数的大小主要取决于土中黏粒含量和黏粒矿物的亲水程度,土中黏粒含量越多、黏粒矿物亲水性越强时,塑限值越大,风化深槽区内土体塑性指数较大,说明风化深槽区内土体的可塑性较强,土体含有的有机质黏土矿

物较多、黏土矿物的亲水性较高,使风化深槽区内土体的可塑性更强。

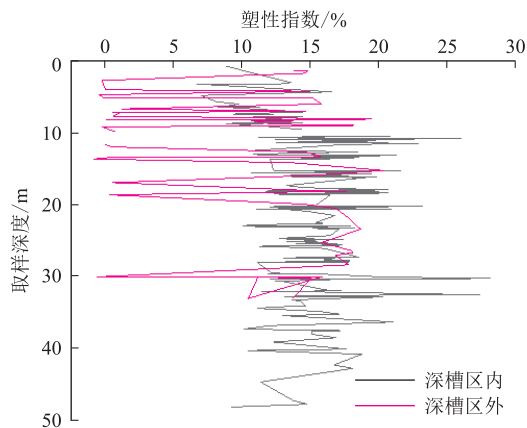


图10 塑性指数随深度变化图

### 3 风化深槽区的岩体抗压强度研究

由图11可以看出,岩石抗压强度随着深度增加呈现阶跃式提高,但在地下埋深60 m、90 m、100 m、120 m处可见强度骤降,岩石抗压强度仅为10~20 MPa,因此处揭露有碎斑岩,推测为碎斑岩的抗压强度。当不看最低抗压强度点时,发现深槽区内的岩石抗压强度总体并不比风化深槽区外低,说明风化深槽区的岩体风化除受构造活动影响对侵入岩、碎斑岩的强度有所减小外,对于未受构造活动影响的基岩无明显的强度影响,且呈现随着深度增加,强度逐渐提高的趋势,这与谢和平等<sup>[11]</sup>研究地下深部岩石的抗压强度随深度变化的规律一致。

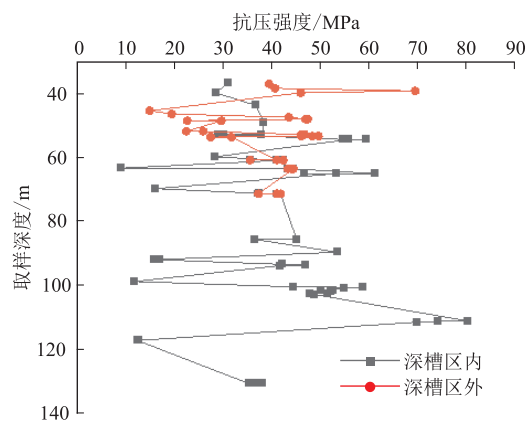


图11 岩石抗压强度随深度变化图

### 4 南山前海片区风化深槽岩芯构造分析

南山区前海片区是由填海造陆形成,地形较平坦,地表建筑林立,没有丘陵、坡地分布,较少基岩露

头揭露,为探明前海片区内风化深槽的地质成因,对研究区域钻孔岩芯的微构造进行成因分析,本次以研究区域内的腾创未来前海项目为例,收集该项目钻探中发现的许多反应构造痕迹的岩芯,包括带有张节理、剪节理、共轭剪节理、绿泥质胶结、擦痕台阶等构造特征的岩样。如表2所示,为腾创未来前海项目岩芯的构造分析,根据这6组岩芯分析可知,研究区域内分布有平移断层、逆断层。

由表2中前3组岩芯分析可知,岩体受构造应力作用后,岩体极破碎、裂隙极发育,近垂直的张节理并有泥质充填,说明原岩受到构造应力主要为水平方向,据此推断可能为平移断层,断层埋深34.0~93.8 m,埋深相差59.8 m,高程为-29.1~-87.2 m,高程相差58.1 m。根据表2中后3组岩芯分析可知,研究区域分布压扭性逆断层,断层埋深51.8~112.5 m,埋深相差60.7 m,高程为-43.4~-104.5 m,高程相差61.1 m。根据断层节理切割次序分析发现剪节理切割近垂直的张节理,说明岩体受过两次构造作用,首次构造作用引发平移断层而在岩体中形成近垂直的节理;二次构造作用引发压扭性逆断层,并在岩体形成破劈理。由以上分析,可以得出结论:研究区内经历过两次构造运动作用,形成两种断裂构造,平移断层先形成,被后生成的压扭性逆断层切割。


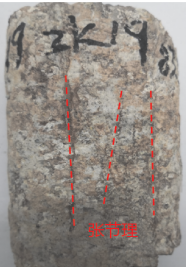


由表2还可知,腾创未来前海项目的风化层厚度均达到100 m左右,最小的厚度也达83.7 m,最高的甚至达到128.7 m,说明该项目位于风化深槽区内,且场地内岩芯揭露有构造角砾岩、断层破碎岩,说明研究区内风化深槽的形成与断层发育密切相关。场地内揭露的岩芯含有断层角砾岩的绿泥质胶结,岩芯的节理、裂隙发育使其工程岩土特性较差,也揭示了深圳市南山前海片区风化深槽区内外岩土特性差异的原因。

### 5 结论

研究深圳市南山前海片区风化深槽的岩土体物理力学参数,发现相比于风化深槽区外,风化深槽区内的土体密度较小,干密度较大,土粒比重相差不大;含水率较小,天然孔隙比分布波动较大,塑性指数较大,岩体强度较低。总体而言,风化深槽区内岩土体的工程性能较差,随深度的变化规律也较为复杂,说明风化深槽区内由于构造活动影响,岩土特性的分布也较复杂。

风化深槽的形成与断层发育密切相关。研究区域内风化深槽区可以发现断层角砾岩的绿泥质胶

表 2 南山区后海片区腾讯未来后海项目岩芯构造分析表

取样孔号	取样深度 /m	风化层厚度 /m	岩样类型	构造特征	岩样图片	构造分析
DK38	-34.00	96.3	粗中粒斑状黑云母花岗岩	张节理		原岩结构基本清晰,石英晶体完整程度高,局部被切割,长石呈砂土状晶体,局部风化成高岭石,偶见云母,晶体表面附着绿泥石。 受构造应力的作用,岩芯断口可见一组密集的近垂直的张节理,部分矿物晶体被切割。近垂直的张节理并有泥质充填,说明原岩受到构造应力主要为水平方向,据此推断可能为平移断层。
DK43	-83.50	83.7	粗中粒斑状黑云母花岗岩	剪节理		岩样中风化花岗岩,花岗结构、块状构造,呈肉红色、紫红色、灰白色、灰黑色;主要矿物成分为石英、长石、云母,少量高岭石,除高岭石呈土状外,其余矿物呈晶体状。高岭石多依附于矿物晶体阴角。 岩体中发育一组剪节理面,40条/m,结合差,易剥离,节理面倾角约 75°,节理面上有台阶,但滑动方向不明显。
ZK19	-86.80	103.4	粗中粒斑状黑云母花岗岩	张节理		根据岩芯观察,岩石为中风化花岗岩,花岗结构、块状构造,呈肉红色、紫红色、灰白色、灰黑色;主要矿物成分为石英、长石、云母、高岭石,除高岭石土状外,其余矿物呈晶体状。高岭石较发育,多依附于矿物晶体阴角。 岩体中发育一组近垂直张节理,裂隙微张,被充填,矿物晶体被压扁有定向排列的趋势。
ZK19	-85.40	103.4	粗中粒斑状黑云母花岗岩	共轭剪节理		根据岩芯观察,岩石为中风化花岗岩,花岗结构、块状构造,呈紫红色、肉红色、灰白色、灰黑色;主要矿物成分为石英、长石、云母,矿物呈晶体状。发育气孔构造,高岭石较发育,多依附于矿物晶体阴角。 观察岩样可发现其发育共轭节理,大主应力方向竖向,小主应力方向水平。
ZK113	-86.10	108.5	断层角砾岩	碎裂构造		该处岩芯取出时呈软塑状,母岩为粗中粒斑状黑云母花岗岩,碎裂结构,变余构造,呈乳白色、灰绿色、肉红色;主要矿物成分为石英、长石、绿泥石,未见云母矿物。矿物呈晶体状,可见有些晶粒被压扁、拉长。除石英外,长石多以变质为绿泥石、云母基本消失,绿泥石发育。 岩样为绿泥石胶结的构造角砾岩,揉皱严重,判断此处为构造作用强烈的位置。
ZK66	-112.50	128.7	粗中粒斑状黑云母花岗岩	擦痕、阶步		岩样为中风化花岗岩,花岗结构、块状构造,呈肉红色、灰白色、灰黑色或灰绿色;滑动面及附近有高岭石,易刻划。除高岭石土状外,其余矿物呈晶体状,滑动面附近矿物有定向排列趋势,呈片麻状构造。 岩样存在断面,倾角约 47°,断面两侧均有擦痕、阶步,根据擦痕分析,上盘向右滑动,下盘相对向左下滑动,据此判断为逆断层。

结,岩芯的节理、裂隙发育,使风化深槽区内的工程岩土特性较差。

### 参考文献

- [1] 郭衍敬,张明聚,张斌.海底隧道穿越风化深槽施工方案[J].北京工业大学学报,2006,32(06):520-525.
- [2] 孙钧,戚玉亮.隧道围岩稳定性正算反演分析研究——以厦门海底隧道穿越风化深槽施工安全监控为例介绍[J].岩土力学,2010,31(08):2353-2360.
- [3] 段元振,周灿,黄圣平.风化深槽对株洲二线船闸方案的影响及对策[J].湖南交通科技,2020,46(04):116-120.
- [4] 郑万模.长江三峡斗坪坝址深风化槽形成机制探讨[J].地质灾害与环境保护,1995,6(2):46-49.

作者简介: 张小芳(1996—),女,硕士,主要从事地质灾害及防治研究。E-mail: zxf1216341792@163.com

- [5] 李光耀,夏支埃.厦门东通道海底隧道风化深槽的岩土工程特征研究[J].资源环境与工程,2006,20(1):23-28.
- [6] 陈卫红,夏宏良,邓向阳.龙滩水电站右岸坝肩堆积风化深槽成因分析与治理[J].水力发电,2004,51(6):44-46.
- [7] 杨友刚,邓争荣,吴树良,等.某变质岩区岩体风化深槽特征及其形成机理[J].华北水利水电学院学报,2011,32(2):115-118.
- [8] 邓忠文.某水电工程坝址区花岗岩岩体风化特征研究[J].地质灾害与环境保护,2012,23(1):45-49.
- [9] 张昌新,郑太航,余志江.深圳地区花岗岩地层岩土工程特性及对地铁工程的影响[J].铁道勘察,2014,40(5):26-29.
- [10] 唐大雄,刘佑荣,张文殊,等.工程岩土学[M].地质出版社,2014.
- [11] 谢和平,李存宝,高明忠,等.深部原位岩石力学构想与初步探索[J].岩石力学与工程学报,2021,40(2):217-232.

(上接第58页)

采用水泥土搅拌桩加固地基的工后沉降量。素混凝土桩加固方法能够更好地控制深层软土的工后沉降,可以较好满足规范要求容许工后沉降量 $\leq 0.1$  m的要求。

通过路基横断面各点的最终沉降量可以看出素混凝土桩在深层软土路基沉降量的长期控制方面也要明显优于水泥土搅拌桩,具有更好的长期稳定性。

### 3 结论

本文针对南部海湾某高速公路桥头过渡段深层软土路基沉降控制问题,分别进行了水泥土搅拌桩和素混凝土桩两种地基加固方案沉降量计算。结果表明相较于水泥土搅拌桩方案,素混凝土桩方案对深层软土路基的工后沉降量控制效果更好,可以满

足公路建设要求,且更具有一定的长期沉降稳定性。

### 参考文献

- [1] 董汉刚,胡建军.高速公路软土路基沉降机理及计算方法[J].岩土力学,2002,23(S1):96-98+102.
- [2] 程健.软土地基路堤工后沉降时参反演与预测[D].浙江大学,2005.
- [3] 中华人民共和国交通运输部.公路路基设计规范(JTG D30-02-2015)[S].北京:人民交通出版社,2015.4.
- [4] 孙忠弟.软土区域路基设计与处治[J].西安公路交通大学学报,1994,14(4):108-113.
- [5] 中华人民共和国交通运输部.公路软土地基路堤设计与施工技术规范(JTG/T D31-02-2013)[S].北京:人民交通出版社,2013.4.
- [6] 中华人民共和国交通运输部.公路沥青路面设计规范(JTG D50-2017)[S].北京:人民交通出版社,2017.3.

作者简介: 郝腾飞(1991—),男,硕士,工程师,主要从事岩土设计工作。E-mail:2568641118@qq.com