

深圳湾后海风化深槽的工程地质特征分析

王贤能 李志波

(深圳市工勘岩土集团有限公司, 广东深圳 518057)

【摘要】 风化深槽对建筑地基基础工程, 尤其是桩基工程, 具有很大影响和危害。深圳湾地区发育多处风化深槽, 其中后海风化深槽是目前揭露的规模最大的风化深槽, 槽底深度 175.9 m。通过分析风化深槽的发育规模和工程地质特征, 重点探讨了风化深槽内隐伏断裂发育迹象。结果表明, 断裂破碎带是形成风化深槽的控制因素, 深圳湾地区受北东向五华—深圳断裂带和北西向狮子洋—珠江口断裂带相互交切作用, 断裂破碎带宽, 断裂力学性质属压扭性兼具张性, 利于风化作用向深部扩展; 后海风化深槽内全风化岩、强风化岩特别深厚, 风化岩强度低。

【关键词】 后海风化槽; 发育规模; 工程地质特征; 断裂破碎带

【中图分类号】 P 642

【文献标识码】 A

doi: 10.3969/j.issn.1007-2993.2023.02.006

Engineering Geological Characteristics of Houhai Weathered Deep Trough in Shenzhen Bay Area

Wang Xianneng Li Zhibo

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

【Abstract】 There are many weathered deep troughs in Shenzhen Bay area, among which Houhai weathered deep trough is the largest exposed at present, with a bottom depth of 175.9 m. The existence of weathered deep troughs causes trouble to pile foundation engineering. The development scale and geotechnical engineering characteristics of weathered deep trough were analyzed, and the characteristics of fracture development in weathered deep trough were emphatically discussed. The results show that the fracture zone is the controlling factor for the formation of weathering deep trough. The Shenzhen Bay area is intersected by the northeast Wuhua-Shenzhen fault zone and the northwest Shiziyang-Pearl River Mouth fault zone. The fracture bandwidth and fracture mechanical properties are both compressional and tensional, which are conducive to the propagation of weathering deep. The fully and strongly weathered rock in Houhai weathered deep trough are particularly deep and the strength of weathered rock is low.

【Key words】 Houhai weathered deep trough; development scale; geotechnical engineering characteristics; fracture zone

0 引言

风化深槽是一种特殊的风化类型, 指岩石风化作用形成的深槽。在水力学中, 深槽是指河床中的相对低洼的水下地形, 是一种普遍存在的河床地貌形态。参照水力学的定义, 风化深槽可定义为岩石风化底界相对较深的凹陷槽。

影响岩石风化作用的主要因素有岩石的特征、地质构造、气候条件、地形条件等, 而影响风化深槽形成的控制因素则是地质构造破碎带^[1]。当岩体中存在规模较大延展性较深的断层破碎带或断裂交汇带、岩脉与断裂交叉带、不稳定矿物富集带时, 利于

风化深槽的形成。

20 世纪 70—80 年代, 长江三峡水利枢纽大坝选址阶段查明, 在太平溪坝址存在甲谷石风化深槽, 为不规则长条形, 风化带总厚度 15 ~ 29 m; 三斗坪坝址存在登子石、中堡岛西端、史经滩以及后河上段等四条风化深槽, 平面形状近椭圆形、似透镜体状, 均受断裂控制, 风化带总厚度 37.5 ~ 73.9 m^[2], 给大坝选址带来了较大的麻烦和危害。

厦门翔安海底隧道海域段存在多条构造破碎带, 海底局部段全、强风化岩异常深厚, 强风化底界深度达 100 m 以深, 形成 F1、F2、F3、F4 风化深槽构造

基金项目: 深圳市科创委技术攻关项目(JSGG20180504170317195)

作者简介: 王贤能, 男, 1969 年生, 汉族, 四川仁寿人, 工学博士, 正高级工程师, 主要从事岩土工程和地质灾害防治工程。E-mail: 1735150767@qq.com

带^[3],与海水直接相连,发生隧道突水、涌泥、坍塌的风险性极大。

深圳花岗岩风化带厚度变化比较大,在福田中学、原大沙河口地段及南山桂庙一带,风化带总厚度可达 80 m 以上。在构造断裂发育地区,风化作用可沿断层破碎带向深度发展形成风化槽^[4]。

深圳市南山后海填海区发育有一条规模较大的风化深槽,名为后海风化深槽,深槽底部微风化岩顶板埋深最深达 175.9 m。通过收集后海片区工程勘察设计资料,分析了后海风化深槽的分布特征及岩土特性,探讨了断层发育迹象,分析了深圳湾地区断裂带的性质对形成风化深槽的影响。

1 深圳湾地区的地形地貌及地质条件

深圳湾,香港称为后海湾,位于深圳市西南面、香港西北面,为珠江口伶仃洋东侧中部的内湾,深圳湾口门朝西南。深圳湾北岸属深圳市南山区、福田

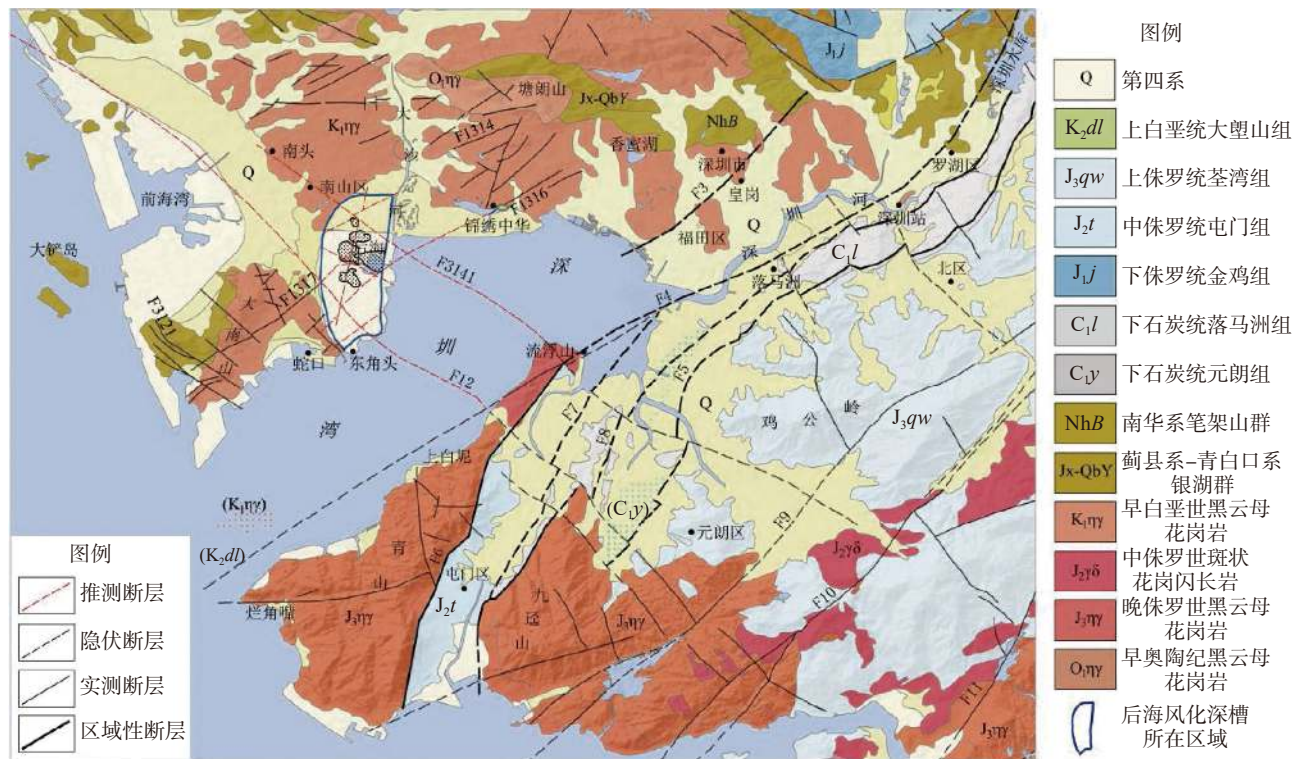
区,深圳湾南岸属香港的元朗区、屯门区。

深圳湾面积约 95.93 km²,是外窄内宽的半封闭海湾。走向北东 50°,长轴长约 17.5 km^[5],湾宽各处不等,最窄处从深圳东角头至香港上白坭村,水面宽仅 4.2 km;原最宽处从深圳大学至深圳河口香港米埔自然保护区,水面宽度达 10 km,但因深圳侧填海造陆,现最宽处从大沙河口至香港尖鼻嘴,水面宽 6.0 km。

深圳湾沿岸主要地貌类型有海滩、河谷平原、阶地、台地、丘陵等。

深圳湾深圳一侧的地层比较简单^[6],而香港一侧的地质条件比较复杂^[7-8],图 1 为深圳湾地区地质简图。除第四系外,主要岩石地层从老到新简述如下:

蓟县系—青白口系混合花岗岩(Jx-Qby),主要分布在深圳小南山、前海湾,在深圳湾海上钻孔中也有揭露。



F3 为九尾岭断裂, F4 为罗湖—屯门断裂, F5 为莲塘断裂, F6 为青山断裂, F7 为屯门断裂, F8 为落马洲断裂, F9 为粉岭—东涌断裂, F10 为盐田断裂, F11 为荔枝角断裂, F12 为流浮山—东博寮海峡断裂, F1314 为磨地山断裂, F1317 为赤湾断裂, F1321 为小南山断裂, F1341 为深圳大学断裂

图 1 深圳湾地区地质构造简图(根据深圳、香港地质图改编^[6,8])

下石炭统元朗组(C_{1y}),香港元朗一带工程钻探揭露,地表下隐伏着大片的大理岩和变质灰岩,与深圳福田保税区南部隐伏的石碇子组大理岩相连。

下石炭统落马洲组(C_{1l}),分布在香港元朗低丘地带,主要岩性为千枚岩、石墨片岩、变质砂岩、石英岩夹含砾石英岩,沿北东走向延入罗湖区罗芳、莲

塘等地。该组地层广泛埋藏在元朗平原下,在深圳地区划为测水组。

中侏罗统屯门组火山岩(J_{2t}),分布在屯门河谷西,是香港地区最早的火山岩系地层,主要岩性为变质安山岩、凝灰岩、火山角砾岩。

上侏罗统荃湾火山岩群(J_{3qw}),分布在香港上水、

粉岭、元朗以东低丘地带,沿北东方向延入深圳境内,与深圳地区梧桐山群下段相连接,主要岩性为凝灰岩、凝灰质角砾岩和粉砂岩。

晚侏罗世黑云母花岗岩($J_3\eta\gamma$),分布在香港流浮山、青山,以及屯门河谷以东九迳山等地。

早白垩世黑云母花岗岩($K_1\eta\gamma$),分布在深圳大南山、南头、香蜜湖、皇岗,在深圳湾海上钻孔中大量揭露。

上白垩统大壘山组(K_2dl),分布在华侨城锦绣中华景区、香港流浮山,在深圳湾海上钻探中也有揭露,在香港地质图中划为吉澳组,主要岩性为紫红色砾岩和砂砾岩。

深圳湾的展布方向和岸线轮廓明显受断裂控制,刘杏玲等^[5]认为深圳湾是北东向五华—深圳断裂与北西向南岗—虎门断裂成“X”交切^[5],地壳块断陷后形成的。李焯芬^[9]将深圳湾称为“流浮山断陷盆地”。

五华—深圳断裂是一条北东向的区域性深大断裂带,从深圳罗湖延伸入深圳湾、蛇口半岛、香港元朗、屯门,在深圳湾地区主要由罗湖—屯门断裂束、安托山—赤湾断裂束组成。

南岗—虎门断裂,走向北西,又称为狮子洋—珠江口断裂,从南岗到虎门,经蛇口半岛、深圳湾、香港流浮山、深井到东博寮海峡。在文献中,该断裂北西段称为南岗—太平断裂、中段称为虎门—蛇口断裂^[10-11]、南东段称为流浮山—东博寮海峡断裂^[8]。

2 后海风化深槽的岩土工程特性

后海填海区位于深圳大学以南、蛇口半岛以东、大沙河以南,原为海域,于 1995—2005 年期间陆续填海造陆形成,面积约 12.5 km²。地面高程一般

为 3.5~7.0 m。该区下伏基岩为早白垩世粗中粒黑云母花岗岩,部分为粗中粒黑云母二长花岗岩,发育一大型风化深槽,名为后海风化深槽。该深槽东界沙河西路、南界工业八路、西界后海滨路、北界高新南十道,呈北东走向,长约 3000 m、宽约 600~900 m。

后海风化深槽微风化岩顶板埋深大于 100 m,从北到南有 5 个极深区,分别位于百度国际大厦东塔、红土创新广场、南海御景大厦、人才公园、深圳湾一号项目建设场地,各极深区内微风化岩顶板高程及风化带厚度见表 1,后海风化深槽北东—南西向剖面简图见图 2。

表 1 后海风化深槽内各极深区所在位置

极深区位置	钻孔编号	孔口 高程/m	风化带 厚度/m	微风化岩顶板 高程/m
百度国际大厦东塔	ZK63	5.52	120.0	-124.38
红土创新广场	XK53	4.53	154.9	-159.47
人才公园	BZK1	2.80	85.6*	-101.00*
南海御景大厦	ZK6	5.07	166.1**	-170.83**
深圳湾一号项目	CK63	6.36	94.1*	-113.74*

注: *表示钻孔未揭穿强风化岩; **表示钻孔未揭穿中等风化岩。

根据钻探揭露,后海风化深槽规模大、风化带深厚、断层发育、局部花岗岩蚀变现象严重、风化球及石英脉较发育。

花岗岩的风化规律一般是上部风化严重,随深度增加风化程度逐渐减弱,从新鲜母岩到残积土的风化过程是连续的。后海风化深槽内强风化岩深厚,强风化带可细分为三个亚带,即上带、中带、下带,上带为土状强风化、中带为砂砾状强风化、下带为碎块状强风化。

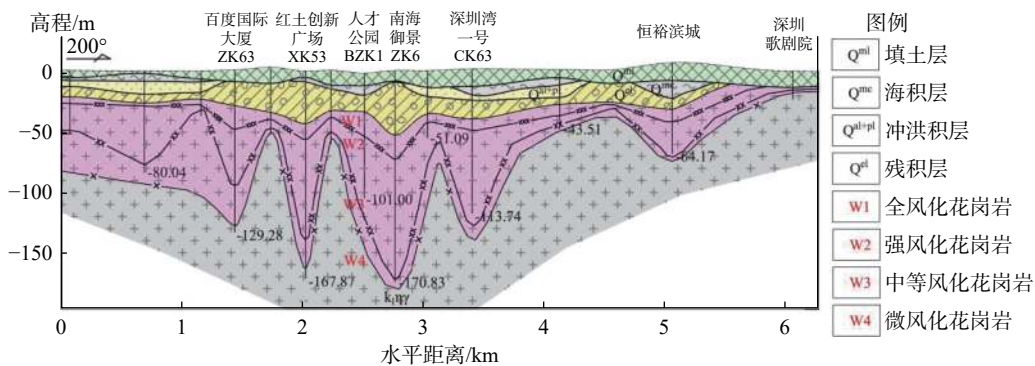


图 2 后海风化深槽剖面简图

残积砾质黏性土、全风化岩、强风化岩上带的物理力学指标见表 2。强风化岩中带、下带,呈半土半岩样,无法取土样进行室内土工实验。中等风化岩、微风化岩的饱和单轴抗压强度见表 3。

从表 2 可知,砾质黏性土、全风化岩、强风化岩上带的压缩模量、黏聚力及内摩擦角接近,表明三层风化层的力学性质相近。

据表 3 中得知,风化深槽内中等风化、微风化岩

表 2 风化深槽内主要风化土层的物理力学指标

花岗岩 风化层	重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	含水率 $w/\%$		孔隙比 e_0		塑限 $w_p/\%$		液限 $w_L/\%$		压缩模量 E_s/MPa		黏聚力 c/kPa		内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	
		范围值	均值	范围值	均值	范围值	均值	范围值	均值	范围值	均值	范围值	标准值	范围值	标准值
砾质黏性土	18.4	21.3~30.1	25.9	0.72~1.31	0.84	21.6~32.7	28.0	36.8~49.4	44.5	3.68~6.24	4.56	12.5~36.0	21.8	19.7~30.2	22.8
全风化岩	18.8	18.7~29.2	23.5	0.69~1.0	0.76	24.3~30.0	25.6	39.0~45.0	41.2	3.79~6.60	4.74	13.1~26.6	22.7	20.5~26.5	22.8
强风化 岩上带	19.0	19.3~26.9	21.3	0.66~0.89	0.72	13.0~26.3	17.8	34.3~41.4	36.2	4.24~5.07	4.57	15.0~32.7	24.7	23.0~26.2	24.6

表 3 风化深槽内岩体单轴抗压强度试验值

风化层名称	试块数量/个	饱和单轴抗压强度/MPa			
		最小值	最大值	平均值	标准值
中等风化花岗岩	274	4.7	50.3	19.7	18.7
微风化花岗岩	108	14.5	79.7	45.5	42.8

饱和单轴抗压强度标准值分别为 18.7 MPa、42.8 MPa,较正常风化地区的花岗岩单轴抗压强度值低。

风化深槽内风化带基本连续,但界限模糊,采用岩体波速测试方法,比标贯更能准确判断岩石风化程度。风化深槽内钻孔波速测试结果见表 4,可知随风化程度由强到弱,波速值逐渐增大。其中,残积土、全风化岩、强风化岩、中等风化岩的纵波波速值基本正常。但是微风化岩的纵波波速值偏低,在深圳正常风化地区花岗岩波速测试得到的纵波波速值为 4200~6200 m/s^[4],这与受断层构造影响有关。

表 4 风化深槽内岩土层的波速测试值

风化层名称	纵波 $v_p/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	横波 $v_s/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	泊松比 ν	动弹性模量 E_d/MPa	动剪切模量 G_d/MPa
砾质黏性土	604	188	0.45	190	66
全风化岩	916	315	0.43	526	184
强风化岩上带	1173	429	0.42	967	340
强风化岩中带	1416	542	0.41	1539	544
强风化岩下带	1617	646	0.41	2345	835
中等风化岩	1941	818	0.40	4288	1540
微风化岩	3311	1431	0.39	14200	5126

花岗岩风化层中普遍存在球状风化现象,称为风化球或孤石,前海片区也发育风化球。部分工程勘察期间揭露的风化球分布情况见表 5,风化球主要发育在强风化岩层中,呈中等风化状态,视厚度一般为 1.0~3.0 m,最厚者达 10.0 m,发育深度 33.5~102.0 m。特别是在百度国际大厦、红土创新广场、泰伦广场、腾创未来等风化深槽区域内,风化球发育深度达 90 m 以深。

3 前海片区花岗岩蚀变现象

在研究区多处花岗岩体发现明显的蚀变现象。

表 5 前海片区钻孔揭露的风化球分布情况

项目名称	数量/个	埋深/m	厚度/m	
			范围值	均值
百度国际大厦东塔楼	5	51.6~90.0	0.4~10.0	3.1
百度国际大厦西塔楼	4	40.2~90.6	0.6~2.3	1.3
腾讯滨海大厦	9	33.5~52.8	0.7~9.1	2.8
航天科技广场	5	50.4~71.4	1.1~6.5	3.8
红土创新广场	2	85.0~91.0	2.0~4.0	3.0
华润北区住宅	3	47.3~52.6	0.7~1.7	1.2
泰伦广场	1	102.0	7.3	7.3
南海御景大厦	1	67.9	2.3	2.3
腾创未来大厦	33	54.8~92.5	0.9~5.5	2.1
深圳湾文化广场BC块	5	50.8~69.8	0.5~5.3	2.1
字节跳动大厦	7	72.8~95.6	1.1~3.5	2.2
海能达全球总部大厦	2	42.9~64.1	1.2~3.8	2.5

蚀变现象主要沿断层破碎带、节理密集带和岩脉带分布^[12],多期的岩浆活动带来大量的气液为蚀变作用提供了物质基础。主要蚀变类型有黏土化、绢云母化、绿泥石化等。蚀变岩石在低压下形成,矿物颗粒之间的连接强度差,因此蚀变花岗岩强度低、岩质不均、强度差异大。正常的微风化花岗岩颜色鲜亮,敲击声清脆;微风化蚀变花岗岩颜色暗淡,不新鲜,敲击声沉闷。

在海能达全球总部大厦、中建钢构大厦、钢构博物馆等建设场地内各钻孔均揭露了蚀变花岗岩。

海能达全球总部大厦场地内基岩均为蚀变花岗岩,风化深槽发育,微风化蚀变花岗岩层顶埋深为 62.9~120.7 m,受区域地质构造影响,基岩裂隙发育,蚀变严重,绿泥石化现象显著,碎裂岩化明显。在中等风化蚀变岩中局部夹微风化蚀变岩夹层,层顶埋深 60.2~91.2 m。根据饱和单轴抗压强度试验,中等风化蚀变花岗岩、微风化蚀变花岗岩的强度不高,标准值分别为 13.1 MPa、20.7 MPa。在场地南侧 ZK22 号钻孔内揭露完整的中等风化碎裂岩,紫褐色、灰白色、肉红色,碎斑结构,块状结构,由粗粒花岗岩

破碎重新胶结形成,岩芯呈长柱状为主。

中建钢构大厦、钢构博物馆建设场地内基岩均为蚀变花岗岩,微风化蚀变花岗岩层顶埋深 34.2~54.9 m。基岩大部分裂隙发育,蚀变严重,绿泥石化现象显著,碎裂岩化明显。根据点荷载试验、饱和单轴抗压强度试验,中等风化蚀变花岗岩、微风化蚀变花岗岩的强度不高,标准值分别为 3.19 MPa、20.8 MPa。

4 后海风化深槽内隐伏断裂发育迹象

后海片区建设工程场地内揭露了大量的断裂迹象,重点介绍后海滨路以东、东滨路以北、大沙河以南的隐伏断裂迹象。

根据工程钻探揭露的断裂迹象分布范围、断裂力学性质,研究区内断裂迹象划为后海中心组、大沙河组、滨海白石立交组。

4.1 后海中心组隐伏断裂迹象

大致呈北东—南西向分布,是后海填海区内规模最大的一组隐伏断裂迹象。从北东到南西逐点介绍如下。

航天科技广场,位于地铁后海站北侧,场地内基岩起伏大。中等风化岩层顶埋深 38.61~116.55 m,相差 77.94 m,微风化岩层顶埋深 52.36~124.61 m,相差 72.25 m。主楼采用直径 2.5 m 钻孔灌注桩,以中等风化岩作为桩端持力层,对每桩布置 1~3 个超前钻钻孔,在钻探中发现场地存在风化不均现象,部分地段在残积土中夹强风化碎块,在强风化岩中夹中等风化岩碎块。中等风化岩呈褐黄色、褐灰色,裂隙发育,部分为断层碎裂岩,岩芯呈块状、碎块状。

深圳工商银行大厦,位于地铁 11 号线后海站南侧,场地内基岩埋深起伏大。微风化岩层顶埋深 51.0~120.0 m,裂隙较发育,裂隙面倾角 50°~80°,受区域地质构造影响,斜长石蚀变明显,部分绿泥石化现象显著,局部碎裂岩化现象明显。

地铁 11 号线途经科苑南路海德三道路口以东段,揭露了断裂构造(f12 断层)^[13],属 NE 向构造,产状 N45°E/NW $\angle$ 75°,破碎带宽度约 90 m,构造岩为碎裂岩,岩石极破碎,断层性质为压扭性。

华润总部大厦,位于深圳湾体育中心南侧,场地内有 11 个钻孔揭露了石英脉,层顶埋深 16.4~38.0 m,视厚度 0.3~6.1 m,平均厚度 2.7 m,主要发育在残积土、全风化岩、强风化岩中,大致沿华润总部大厦至人才公园北门一线分布,呈北东向分布。地铁 11 号线途经人才公园北门段,揭露了断裂构造(f11 断层),构造岩为压碎岩,并见硅化,岩石具碎裂

结构,断层性质为压扭性。

南海御景大厦,位于后海滨路与创业路东北,风化深槽发育,中等风化花岗岩埋藏深,仅 3 个钻孔揭露了中等风化岩,浅肉红色、岩石裂隙发育,裂隙面倾角大小不均,裂隙面铁锰质浸染严重,绿泥石化现象明显,岩芯多呈碎块状。

中国海油大厦建设场地内风化深槽发育,基岩埋深起伏大,微风化岩层顶埋深 80.0~129.47 m。场地内发现有一条构造破碎带,属张扭性正断层,根据 29 号钻孔揭露,在微风化花岗岩之下发育深厚碎裂岩,青灰色,岩芯破碎,多呈泥夹碎块状,粒径一般为 10~40 mm,大小不一,呈次棱角状,硅化、绿泥石化现象明显,裂面光滑,呈镜面,具擦痕。其强度相当于中等风化岩,揭露厚度 20.9 m,未揭穿。推测该断层产状为 N40°E/NW $\angle$ 70°。

字节跳动大厦建设场地内风化深槽发育,微风化岩层顶埋深达 90.3~122.3 m,在多个钻孔内揭露了碎裂岩,绿泥石化现象明显。

位于东滨路与科苑南路西北的深圳湾一号项目,风化深槽发育,受区域地质构造的影响,基岩裂隙发育,蚀变严重,绿泥石化现象显著,碎裂岩化明显,部分地段基岩呈压碎结构。在 T5、T6 栋,有 8 个钻孔揭露了碎裂岩,呈强风化、中等风化状,中等风化碎裂岩层顶埋深 82.7~102.5 m,揭露厚度 2.4~7.7 m,未揭穿。

腾创未来项目建设场地内,基岩起伏大,中等风化岩顶埋深 40.0~116.4 m,在 15 个钻孔内见到明显的构造痕迹,节理面发育擦痕、阶步,主要构造岩为糜棱岩、碎裂岩、断层角砾岩等,局部绿泥石化现象明显。断裂力学性质早期为压性、压扭性,晚期为张性。

地铁 2 号线后海站—登良站区间段勘察,在登良站以北 240 m 附近有 2 个钻孔揭露到断层迹象,分别揭露了厚度约 10 m 的糜棱岩、碎裂岩,未钻穿。

海能达全球总部大厦、中建钢构大厦、中建钢构博物馆的建设场地内均揭露了蚀变花岗岩。

4.2 大沙河组隐伏断裂迹象

地铁 11 号线途经大沙河河口段,揭露了断裂构造(f10 断层),属 NW 向构造,产状为 N22°W/NE $\angle$ 70°,发育在燕山期粗粒花岗岩中,构造岩为碎裂岩及构造透镜体,断层性质以压扭性为主,断层规模大,破碎带宽度近 70 m。

该断裂向北西方向延伸到百度国际大厦,在百度国际大厦东塔、西塔场地内均发育风化深槽,钻孔内揭露了蚀变花岗岩。

4.3 滨海白石立交组隐伏断裂迹象

主要分布在滨海白石立交桥东南侧,大致呈北东向分布。

易思博大厦、数字音频大厦,位于滨海大道以北、高新南九道以东,两栋大厦相邻。在数字音频大厦东南部 11 个钻孔中揭露了硅化构造岩,呈碎块状、碎石状,发育在砾质黏性土、全风化岩、强风化岩中,视厚度 0.8~6.5 m,平均厚度 4.2 m,硅化构造岩层顶埋深 10.7~21.0 m。

在易思博大厦建设场地内揭露碎斑岩、辉绿岩脉,在其东南部 5 个钻孔中揭露碎斑岩,发育在强风化花岗岩、中等风化花岗岩之下,层顶埋深 35.5~54.7 m,视厚度 1.0~8.1 m,平均厚度 5.1 m;碎斑岩呈中等风化状,暗红、铁红色,斑状结构,块状构造,主要矿物为钾长石、石英,裂隙极为发育,岩芯破碎,多呈块状。在 K11 钻孔中揭露了辉绿岩脉,灰绿、淡绿色,主要由基性斜长石和普通辉石组成的基性浅成岩,裂隙较发育,岩体较破碎,层顶埋深 37.5 m,视厚度达 8.3 m,饱和单轴抗压强度标准值为 16.08 MPa。

南山供电局生产基地,位于滨海白石立交东南侧,风化深槽发育,基岩面起伏较大。在 3 个钻孔中揭露了蚀变花岗岩,埋深 80.0~109.0 m,绿泥石化现象明显。场地内氡气测试值 9426~15976 Bq/m³,平均值达 13762 Bq/m³,综合表明场地内有断层发育。

在南山供电局生产基地以南海德三道,地铁 11 号线勘察揭露了断裂构造(f13、f14 断层),f13 断层位于海岸城西座北侧,破碎带宽度约 10 m,构造岩为灰白色夹褐红色的碎裂岩,呈角砾状,钙质胶结,力学性质属压扭性。f14 断层位于天利中央广场北侧,破碎带宽度约 15 m,构造岩为碎裂岩,断层性质为压扭性。

5 深圳湾地区断裂构造对风化深槽发育的影响

除前海风化深槽以外,在深圳湾海域及周边陆地也揭露了风化深槽的迹象。这些风化深槽的分布特征、发育规模均与断裂构造有关。区内北东向和北西向断层形成棋盘状构造形态,加剧了风化作用,形成了风化槽。

5.1 北东向断裂构造对风化深槽发育的影响

罗湖—屯门断裂束是深圳湾南岸香港一侧的北东向断裂^[10,14],包括青山断裂(F6)、屯门断裂(F7)、落马洲断裂(F8)等,是深圳湾地区内最早形成的主干断裂,形成于晚侏罗世后,经历多期构造活动的作用,断裂以压扭性为主,兼具张扭性。

在深圳市南山区华侨城锦绣中华景区、香港流浮山以及香港屯门区烂角嘴西海域,出露(或揭露)了上白垩统红层,主要岩性为紫红色、砖红色角砾状砾岩及砂砾岩。三处红层区域不连续分布,总体上呈北东向排列,表明在晚白垩世北东向断裂曾经历张性正断构造活动,形成了微型断陷盆地,沉积了红层。

屯门断裂分布在元朗夏村以南,浅水湾组火山岩和落马洲组沉积岩的分界线,是罗湖—屯门断裂束最年轻的断裂,控制了第四系的分布,也影响了岩石的风化程度。沿屯门河谷,基岩在断裂带中的风化深度比在断裂带两侧的要深得多,最大风化深度为海平面以下 130 m^[10,15]。

安托山—赤湾断裂束是深圳湾北岸深圳一侧的北东向断裂,穿行于蓢县系—青白口系混合花岗岩和早白垩世花岗岩中,形成于早白垩世后^[6]。断裂力学性质以压扭性为主,个别断裂具有张扭性、压扭多期构造活动,其中磨地山断裂(F1314)就具有张扭—压扭多期构造活动的特点。该断裂出露于安托山以西的磨地山,向南西方向经过大沙河河口,掩埋在大涌村至南山桂庙一带第四系之下,产状为 N60°~70°E/SE $\angle$ 70°,构造岩主要为压碎花岗岩,沿断层填充岩脉及石英脉,节理发育。大沙河河口、桂庙一带的风化深槽与该断裂有关。

由此可见,深圳湾地区北东向断裂的特征是破碎带宽、具有张性性质。这种特征利于岩体风化向纵深扩展,逐渐形成风化深槽。

5.2 北西向断裂构造对风化深槽发育的影响

小南山断裂(F3121)、流浮山—东博寮海峡断裂(F12)属于北西向狮子洋—珠江口断裂的组成部分。

小南山断裂具有压性—张扭—压扭多期构造活动特征,产状为 N20°~30°W/NE $\angle$ 50°,构造岩为碎裂岩、硅化岩、糜棱岩,在妈湾港区原采石场露头,可见断层破碎带宽度大于 150 m;据了解,在邻近的妈湾港填海区发育一条北西走向的风化深槽。

流浮山—东博寮海峡断裂,产状为 N30°W/NE $\angle$ 53°~75°,张性正断层^[16],沿断裂出露压碎带,填充石英脉。该断裂控制了天水围和元朗平原、控制了汲水门海峡、马湾海峡、东博寮海峡的展布,断裂通过的海域,海底地貌多表现为狭长的深切凹槽,凹槽走向稳定、延伸较长。该断裂向北西方向穿过深圳湾,在蛇口与香港上白坭之间海域,经钻探和物探发现一个北西向的凹槽带,钻孔一般在深 40~50 m 可见到基岩,但个别地段 100 m 深仍未见基岩^[14]。在北西方向,该断裂继续延伸,从大南山与南头之间

的海积阶地第四系之下隐伏穿越,到达前海填海区。地铁11号线穿越前海港湾学校区段也揭露到该条断层,该处构造岩为碎裂岩,断层力学性质为张扭性,破碎带宽度达42 m,其中L26钻孔在地面以下88.30 m还没有穿过断层破碎带,破碎带揭露厚度大于50 m且未钻穿,形成全线最深的风化深槽^[13]。

5.3 现今构造应力作用下断裂力学性质及其影响

深圳地区现今构造应力以水平向为主,在北西—南东向现今构造应力作用下,北东向断裂具有以压性为主的力学性质,北北东向断裂具有压扭性、左旋的力学性质,北西向断裂则具有张性或张扭性的力学性质。

在各组断裂相交部位,因北西向断裂具有张性、张扭性,岩体风化易沿北西向断裂向纵深扩展,利于风化槽的形成,继而追踪其他走向的断裂,利于风化槽的继续扩展。

6 结论

(1)深圳湾地区后海片区在开发建设过程中,逐渐探明存在一个规模宏大的风化深槽。该风化深槽呈北东走向,长约3000 m,宽约600~900 m,槽底基岩埋深普遍大于100 m,最深达到175.9 m,是目前已揭露发育最深的风化深槽。

(2)后海风化深槽内主要岩土体为全风化、强风化花岗岩,风化层力学强度低、波速值偏低。钻孔内揭露大量的断裂迹象,构造岩主要有糜棱岩、碎裂岩、碎斑岩、断层角砾岩,具有压性、压扭性、张性等多期构造活动特征。

(3)后海风化深槽的形成主要受断裂控制。深圳湾地区北东向断裂成生时间早,断层破碎带宽、且具有张性特征,利于岩体风化发展且向纵深发展;北西向断裂成生时间晚,切割了早期形成的北东向断层,具有压扭性、张性活动特点,而且在现今构造活动作用下北西向断裂呈张性,因此在北西向断层以及与北东向断层交切的位置,岩体风化速度快且易于向纵深扩展,逐渐形成风化深槽。

致谢: 本文编写过程中,收集了研究区内多个建设

工程的勘察设计资料,限于篇幅未一一列出,在此表示感谢!

参 考 文 献

- [1] 周炳桦. 海底隧道穿越风化槽段突水机理及风险评价[D]. 济南: 山东大学, 2019.
- [2] 郑万模. 长江三峡三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.
- [3] 潘世建主编. 厦门翔安海底隧道工程技术丛书(上册)设计与施工[M]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
- [4] 深圳地质编写组. 深圳地质[M]. 北京: 地质出版社, 2009.
- [5] 刘杏玲, 赵焕庭, 郑德延, 等. 深圳湾的演变与开发利用[J]. 热带海洋, 1988, 6(2): 8-12.
- [6] 中华人民共和国深圳市地质图说明书[M]. 广州: 广东省地图出版社, 2014.
- [7] 李作明, 林极峰. 香港地区地质构造特征的探讨[J]. 贵州工学院学报, 1987, (4): 52-66.
- [8] 丁原章. 广东和香港地震风险概论[M]. 香港: 商务印书馆, 2004.
- [9] 李焯芬, 蒋 溥, 梁小华. 香港地区地震风险评价和设防区划[J]. 工程地质学报, 1998, 6(1): 40-54.
- [10] BURNETT A D, 黎权伟. 香港的航摄地质线性影像和断裂系统[J]. 华南地震, 1986, 6(1): 12-25.
- [11] 地质矿产部《深圳市区域稳定性评价》编写组. 深圳市区域稳定性评价[M]. 北京: 地质出版社, 1991.
- [12] 毕 丹, 王忠福. 天池抽水蓄能电站上坝址趾板建基面优化研究[J]. 岩土工程技术, 2014, 28(5): 243-249.
- [13] 赖培铎, 葛 帆. 深圳地铁11号线沿线的断裂构造及其对地铁施工的影响[C]//深圳地质工程三十年——深圳市地质学会30周年志庆. 武汉: 中国地质大学出版社有限公司, 2013.
- [14] 康镇江, 李作明. 深圳(罗湖)—香港(元朗)断裂带的特征及其稳定性研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1998, 9(S1): 168-174.
- [15] 黄玉昆. 广东莲花山断裂带在香港地区的表现[J]. 华南地质, 1984, 4(2): 12-19.
- [16] 丁原章, 黎权伟, 黄日恒, 等. 香港地区断裂构造的新活动性[J]. 华南地震, 1997, 17(2): 9-12.

收稿日期: 2022-05-16