

· 工程地质 ·



# 珠江三角洲入海口工程地质单元层探讨

郭晓勇, 马秋柱, 廖先斌

(中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东 广州 510230)

**摘要:** 港珠澳大桥岛隧工程从满足香港、澳门和珠海三地勘察标准出发, 需要建立一个符合英国标准 (BS) 和中国标准 (GB) 的工程地质单元层, 为岩土工程评价提供基础依据。综合利用工可、初勘、详勘和补勘成果, 根据地质成因及时代、地层岩性及物理力学性质, 统一不同规范的资料, 划分符合国内外勘察标准的工程地质单元层, 为珠江三角洲入海口工程地质单元层确立提供基础。

**关键词:** 工程地质单元层; BS; GB; 港珠澳大桥; 珠江三角洲

**中图分类号:** U 44

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1002-4972(2013)07-0048-06

## On engineering geological unit layer in Pearl river delta estuaries

GUO Xiao-yong, MA Qiu-zhu, LIAO Xian-bin

(CCCC-FHDI Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510230, China)

**Abstract:** Hong Kong-Zhuhai-Macao bridge island tunnel project needs to meet the investigation standards of Hong Kong, Macau and Chinese Mainland. Thus it's necessary to set up an engineering geological unit layer to provide the criterion for geotechnical engineering evaluation. Based on the feasibility stage investigation report, preliminary investigation report, detailed investigation and supplement investigation report, and according to the geological origin and times, soil information rocks and physical & mechanical properties, we unify different specifications divide the engineering geological unit layer in keeping with investigation standards to provide a basis for the Pearl river delta estuaries.

**Key words:** engineering geological unit layer; BS; GB; Hong Kong-Zhuhai-Macao bridge; Pearl river delta

港珠澳大桥横跨香港、珠海、澳门, 在珠江三角洲入海口, 分项工程包括桥梁、隧道及人工岛。进行准确的岩土工程评价是基础设计的根本, 而岩土工程特性评价的精度取决于工程地质单元层划分的合理性。

港珠澳大桥先后进行了工可阶段、初步设计阶段、施工图设计阶段及施工图补充勘察, 采用的规范标准不一, 包括中国标准规范、BS规范、ASTM规范及香港标准等, 国内外设计人员在应用时对不同的单元体系划分的地层有不统一, 使用时比较混乱。为统一不同的规范标准间工程地质单元体系的差别, 同时也满足香港、澳门、中国

三地标准要求, 本文通过港珠澳大桥岛隧工程等勘察资料, 建立一套符合英国标准 (BS) 和中国标准 (GB) 工程地质单元层, 为珠江三角洲入海口工程地质单元层确定提供初步依据。

## 1 区域地质概况

### 1.1 地貌、场地地形

珠江三角洲是组成珠江的西江、北江和东江入海时冲击沉淀而成的一个三角洲, 面积大约一万多平方公里。珠江三角洲入海口场地大致可分为3大地貌区, 即西部丘陵区 (珠海沿岸)、东部低山丘陵区 (深圳、香港)、中部和南部伶

收稿日期: 2013-05-02

作者简介: 郭晓勇 (1987—), 工程师, 从事岩土工程勘察。

伶仃洋水域。港珠澳大桥位于珠江三角洲伶仃洋水域,地貌单一,呈海底平原状。伶仃洋是珠江喇叭口形的河口湾,湾顶在虎门一带,宽3 km,中部宽27 000 m,在澳门—香港之间宽58 000 m。

### 1.2 区域地质发育历史

根据《广东省区域地质志》<sup>[1]</sup>,场区区域上位于华南褶皱系粤北、粤东北—粤中坳陷带的永梅—惠阳坳陷,经历了长期复杂的构造运动,主要有加里东、印支、燕山和喜马拉雅四期运动,以褶皱、断裂构造发育和岩浆活动强烈为特征。构造行迹以北东及北西向为主,东西向次之。特别是上新世开始的喜马拉雅运动(第二幕),继承性断裂的强烈活动引起地壳差异性的升降运动,使晚第三纪剥蚀面部分地段开始抬升,三角洲内某些断块下陷,最终形成珠江三角洲棋盘格状基底地貌。经过晚第三纪至第四纪晚更新世早期的长期剥蚀之后,场区区域上新构造运动表现为地壳差异性升降运动。总体表现为珠江三角洲边缘为上升剥蚀区,内部平原为沉降区。在沉积过程中地壳间歇性升降频繁,引起海面升降交替变化,出现了3次海侵海退3个沉积旋回。与此同时,珠江三角洲亦从古三角洲发展成老三角洲,最后发展成新三角洲。

## 2 工程地质单元层划分

### 2.1 划分原则

根据BS<sup>[2]</sup>、ASTM<sup>[3]</sup>、香港标准<sup>[4]</sup>和GB<sup>[5]</sup>土和岩石分类标准的共性,确定以下可适用于各种标准的工程地质单元层划分原则:

1) 处于同一构造部位或地貌单元,并属相同的地质年代及成因类型,划分为主层。

2) 具有相同岩性和物理力学性质划分为亚层。

### 2.2 单元层划分及编号说明

根据时代成因划分为主层,编号为带圈数字(如①);根据岩性和物理力学性质划分为亚层,编号为阿拉伯数字(如1),见图1。

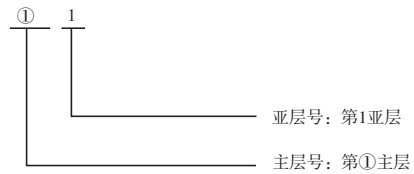


图1 单元层划分

上述编号组合结合地质图件可以很直观地反映地质时代成因、性质,为进一步建立地质模型打下基础。

### 2.3 主层划分

据港珠澳大桥工程工可<sup>[6]</sup>、初勘<sup>[7]</sup>、详勘<sup>[8-9]</sup>和补勘<sup>[10]</sup>地质资料,珠江三角洲入海口发育的地层主要有第四纪覆盖层、燕山期花岗岩和震旦纪变质岩。工程地质单元主层包括:第四纪覆盖层自上而下为第①层全新世海相松散沉积物、第②层更新世陆相松散沉积物、第③层更新世海陆交互相松散沉积物、第④层更新世河流相冲洪积松散沉积物、第⑤层全新世残积层,基岩层为第⑥层燕山期花岗岩、第⑦层震旦纪混合片岩和第⑧层震旦纪系混合花岗岩。岛隧简化综合地质纵剖面图(图2)显示,各单元主层区域上分布连续,厚度较为稳定。

### 2.4 亚层划分

根据岩性和物理力学特征,对工可、初勘、详勘和补勘划分的单元亚层进行分析与归纳,确定的亚层划分如表1所示。

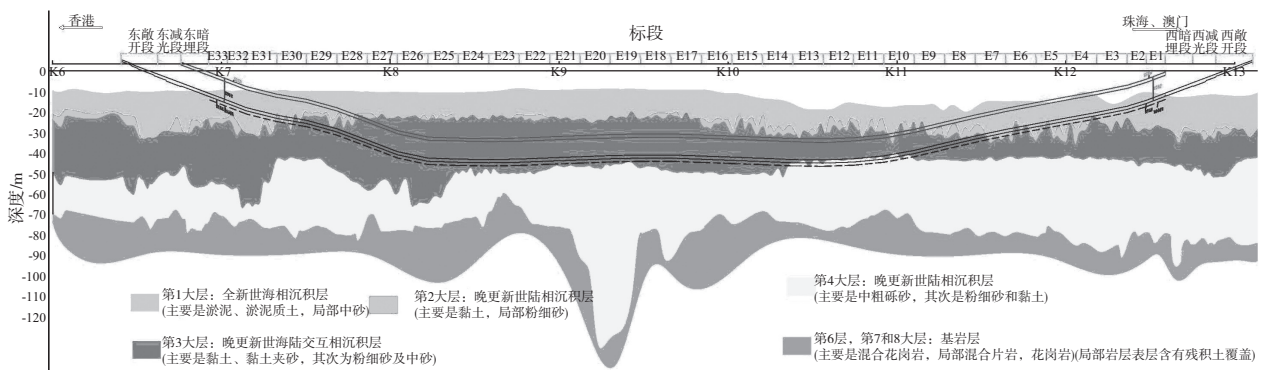


图2 岛隧简化综合地质纵剖面

表1 工程地质单元层划分

地层单元	时代成因	地层名称 (含BS名称)	地质特点
① <sub>1</sub>	$Q_4^m$	淤泥-淤泥质土	灰色, 流塑-软塑
① <sub>2</sub>		中砂	灰色, 松散
② <sub>1</sub>	$Q_3^{al+pl}$	黏土	灰黄色为主, 含灰色等, 可塑为主
② <sub>2</sub>		粉细砂	灰黄色, 黄色, 中密
③ <sub>1</sub>	$Q_3^{mc}$	黏土	灰色, 浅灰色为主, 可塑-硬塑为主
③ <sub>2</sub>		黏土夹砂	灰色, 可塑-硬塑为主, 夹多层粉细砂
③ <sub>3</sub>		粉细砂	灰色, 深灰色为主, 中密为主
③ <sub>4</sub>		中砂	灰色, 灰黄色为主, 中密-密实为主
④ <sub>1</sub>	$Q_3^{al+pl}$	黏土	灰色为主, 含灰色, 深灰色, 以硬塑为主
④ <sub>2</sub>		粉细砂	浅灰色, 灰色为主, 含灰绿色, 中密-密实为主
④ <sub>3</sub>		含砾细砂	浅灰绿色, 中密-极密实
④ <sub>4</sub>		中砂	灰色, 灰黄色, 灰绿色为主, 密实-极密实为主
④ <sub>5</sub>		含砾粗砂	灰色, 灰黄色, 灰绿色为主, 密实-极密实为主
④ <sub>6</sub>		圆砾	灰色, 灰黄色, 灰绿色, 极密实为主
⑤	$Q^{el}$	残积土	褐黄色, 棕黄色为主, 可塑-硬塑砂质黏性土状
⑥ <sub>1</sub>	$\gamma_5^{2(3)}$	全风化花岗岩	灰黄色, 灰白色, 蓝灰色, 灰绿色, 岩芯呈含砾黏性土状
⑥ <sub>2</sub>		强风化花岗岩	灰黄色, 肉红色, 灰白色, 灰绿色, 岩芯呈含砾黏性土状, 局部半岩半土状
⑥ <sub>3</sub>		中风化花岗岩	肉红色杂灰白色, 灰绿色, 中粗粒结构, 块状构造
⑦ <sub>1</sub>	Z	全风化混合片岩	青灰色, 岩芯呈砂质黏性土状
⑦ <sub>2</sub>		强风化混合片岩	深灰色, 灰绿色, 褐黄色等, 岩芯呈砾质黏性土状
⑦ <sub>3</sub>		中风化混合片岩	灰黑色, 灰白色为主, 鳞片变晶结构, 条带状构造
⑧ <sub>1</sub>		全风化混合花岗岩	黄色, 岩芯呈砂质黏性土状, 岩芯呈砾质黏性土状
⑧ <sub>2</sub>		强风化混合花岗岩	灰绿色, 灰黄色, 青灰色等
⑧ <sub>3</sub>		中风化混合花岗岩	灰色, 浅灰色, 灰绿色等, 变晶结构, 块状构造

2.5 地质单元层物理力学指标

利用工可、初勘、详勘及补勘的成果, 对地质单元层的物理力学指标进行综合分析, 确定的含水量、土粒密度、天然密度、孔隙比、塑性指数、液性指数、压缩模量 (100~200 kPa)、

压缩指数、回弹指数、超固结比及标贯修正值  $(N_1)_{60}$  等指标见表2。

确定的岩石的颗粒密度、天然密度、吸水率、饱和吸水率、天然抗压强度、饱和抗压强度及干燥抗压强度见表3。

表2 各层土的物理力学指标

单元层号	含水率 $w/\%$	颗粒密度 $\rho_s/(g \cdot cm^{-3})$	天然密度 $\rho/(g \cdot cm^{-3})$	孔隙比 $e$	塑性指数 $I_p$	液性指数 $I_L$	压缩模量 $E_{s1-2}/MPa$	凝聚力(有效) $c'/kPa$	内摩擦角(有效) $\varphi'/(\circ)$	超固结比 $OCR$	标贯修正值 $(N_1)_{60}/击$
① <sub>1</sub>	61.3	2.72	1.62	1.723	32.3	1.06	1.3	5.7	26.0	0.94	
① <sub>2</sub>			1.63				17.8			1.9	
② <sub>1</sub>	30.5	2.73	1.87	0.866	23.8	0.47	5.7	1.6	34.6	1.52	18.0
② <sub>2</sub>			1.86				28.8			1.40	20.9
③ <sub>1</sub>	39.1	2.71	1.81	1.052	25.5	0.6	7.1	29.8	24.0	2.16	12.3
③ <sub>2</sub>	33.1	2.70	1.85	0.958	19.3	0.67	4.7	36.2	23.8	1.49	19.9
③ <sub>3</sub>		2.68	1.92	0.826			37.9			1.08	24.1
③ <sub>4</sub>			1.92	0.700			39.0			1.40	28.2
④ <sub>1</sub>	28.0	2.69	1.90	0.827	16.1	0.47	7.4			1.19	15.2
④ <sub>2</sub>		2.68	2.00	0.650			40.4			1.01	25.3
④ <sub>3</sub>			2.00	0.550			41.6				23.0
④ <sub>4</sub>		2.66	2.03	0.470			54.1			1.25	28.6
④ <sub>5</sub>		2.67	2.05	0.460			62.5			1.42	30.6
④ <sub>6</sub>		2.67	2.05	0.460			104.0			1.33	42.9
⑤	27.5	2.73	1.84	0.863	16.8		3.0				22.6
⑥ <sub>1</sub>	18.5	2.72	1.86	0.774	14.7		4.0				54.9
⑥ <sub>2</sub>	15.8	2.72	1.89	0.643	13.1		4.6				108.6
⑦ <sub>1</sub>	22.2	2.71	1.95	0.702	13.1		4.9				44.5
⑦ <sub>2</sub>											109.0
⑧ <sub>1</sub>	25.9	2.72	1.89	0.808	12.9		4.2				38.8
⑧ <sub>2</sub>					13.1						77.3

表3 中风化混合片岩和混合花岗岩的物理力学指标

单元层号	项目	颗粒密度/ ( $g \cdot cm^{-3}$ )	天然密度/ ( $g \cdot cm^{-3}$ )	吸水率/ %	饱和吸水率 /%	天然抗压强度/ MPa	饱和抗压强度/ MPa	干燥抗压强度/ MPa
⑥ <sub>3</sub>	最大值	2.63	2.68	0.89	0.99		71.9	109.9
	最小值	2.63	2.36	0.36	0.38		18.9	23.7
	平均值	2.63	2.59	0.55	0.61		43.27	69.50
⑦ <sub>3</sub>	最大值	2.81	2.59	1.37	1.78	74.60	71.90	82.80
	最小值	2.65	2.54	0.39	0.48	54.10	32.40	49.40
	平均值	2.71	2.57	0.81	1.05	62.65	49.60	62.85
⑧ <sub>3</sub>	最大值	3.09	2.61	2.46	3.03	103.6	95.6	101.4
	最小值	2.64	2.48	0.55	0.90	24.9	10.6	24.1
	平均值	2.71	2.56	1.29	1.68	46.7	46.6	59.6

### 3 各单元层划分的合理性分析

地质单元层划分后, 特别绘制了物理力学指标在隧道区沿走向变化趋势(图3~图6), 同时对孔隙比、含水率、天然密度、标贯击数的统计变异系数(表4)来说明工程地质单元层划分的合理性。

结果显示: 各土层的孔隙比、含水率、天然密度、SPT等指标沿大桥隧道走向具有较好的一致性, 同时变异性较小, 离散性相对较小, 反映了各单元土层的分层比较合理。

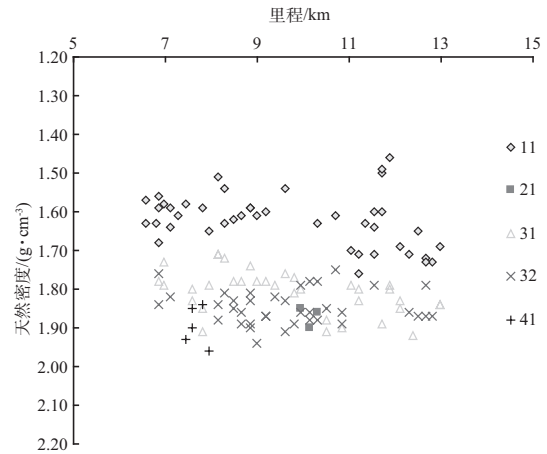


图5 天然密度与里程变化

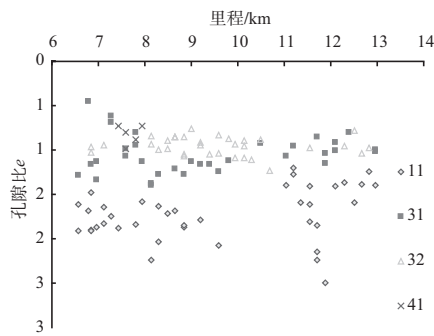


图3 细粒土层孔隙比与里程变化

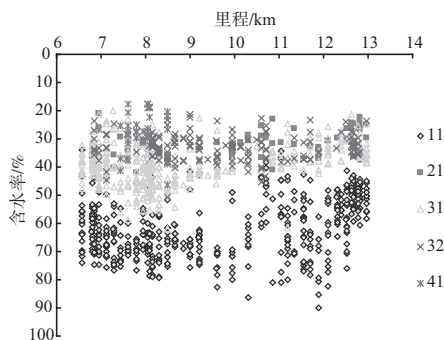


图4 细粒土层含水率与里程变化

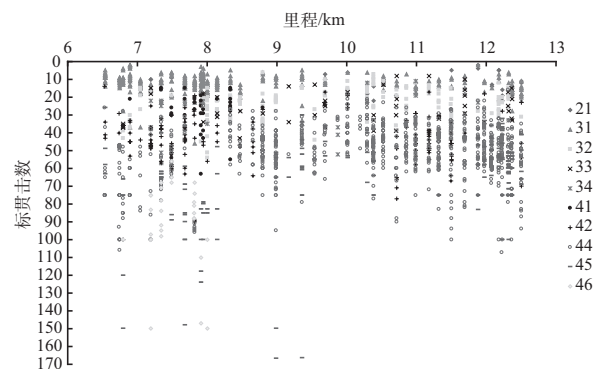


图6 各土层标贯击数与里程变化

表4 部分土层物理力学指标变异系数

物理力学指标	统计变异系数
孔隙比	0.11~0.17
含水率	0.14~0.25
天然密度	0.02~0.04
SPT	0.27~0.42

#### 4 各地质单元层工程地质特征

表1~3对本区域的地层岩性及物理力学性质进行了归纳介绍,下面就上述地层的工程地质特点详细叙述。

##### 1) 第①层:表层软土层。

本层发育①<sub>1</sub>灰色淤泥-淤泥质土和①<sub>2</sub>灰色中砂,其中①<sub>2</sub>中砂层仅在局部区域揭露。本次软土层的底高程为-25.63 m(-17.73~-35.15 m),厚度13.4 m(3.5~25.4 m),偶含少量细砂及贝壳,局部含有少量腐植物。本层软土分布广,厚度大,含水量平均61.3%,孔隙比大,压缩性高,且为微欠固结-正固结土,工程性质差,不适宜直接作为基础持力层。应注意以下工程问题:软土震陷的可能,软土层及软土层后期可能承受长期荷载产生负摩阻力对桩的影响,灌注桩钻孔过程中易缩孔和灌注时有偏斜、缩径、失稳等问题,钢管桩打入使表层软土孔隙水压力急剧增高而造成土的侧向或向上的流动和涌出。同时还应注意①<sub>2</sub>中砂层的地震液化势。

##### 2) 第②层:第一层黏性土层。

本层发育②<sub>1</sub>可塑灰黄色夹灰色黏土和②<sub>2</sub>中密灰黄色粉细砂,其中②<sub>2</sub>粉细砂分布范围小,局部分布且呈透镜体状分布于②<sub>1</sub>黏土中,厚度小。本层黏土层分布相对较连续,局部缺失,分布厚度差异较大,平均厚度2.8 m(0.6~10.5 m),顶高程-24.78 m(-19.16~-34.51 m),底高程-27.55 m(-20.78~-37.11 m)。本层属于晚更新世沉积,沉积固结作用时间长,②<sub>1</sub>黏土属超固结土,含水率约30%,压缩性中等,具有一定的承载强度,但是本层厚度较小,埋藏深,不适合直接作为浅基础持力层。场区采用桩基时,应注意本层黏性土在灌注桩施工时可能产生的糊钻现象;也应考虑②<sub>2</sub>粉细砂层的地震液化势。

##### 3) 第③层:第二层黏性土层。

本层中包含4个土的亚层,大层层顶高程-19.46~-28.02 m,包括③<sub>1</sub>可塑灰色-浅灰色黏土、③<sub>2</sub>可塑-硬塑灰色黏土夹砂、③<sub>3</sub>中密灰色粉细砂和③<sub>4</sub>中密-密实灰色为主中砂,其中③<sub>1</sub>黏土与③<sub>2</sub>黏土夹砂分布厚度大和广,③<sub>3</sub>粉细砂和③<sub>4</sub>

中砂分布范围相对黏土层范围及厚度较小,主要夹在黏土层或黏土夹砂层中。本层沉积环境为海陆交互带,呈现砂与黏土相互交错的特点,黏性土的孔隙比接近于1.0,土层为超固结土。本层中各土层都具有一定的强度(除局部的软土外),埋藏深,不适合直接作为浅基础持力层。场区采用桩基时,应注意在灌注桩施工时本层黏性土可能产生的糊钻现象和砂层可能产生的埋钻现象。由于黏土层中夹杂砂土层,应注意由此产生的构筑物差异变形。

##### 4) 第④层:第一层砂土层。

本层中包含6个亚层,大层层顶高程在-40.98~-69.45 m,本层层底高程根据揭露岩层的钻孔推测大致在平均-72 m(-57.96~-83.5 mm),包括④<sub>1</sub>硬塑为主的灰色、深灰色黏土、④<sub>2</sub>中密-密实浅灰色和灰色粉细砂、④<sub>3</sub>中密-极密实浅灰绿色含砾粉细砂、④<sub>4</sub>密实-极密实灰色、灰黄色等中砂、④<sub>5</sub>密实-极密实灰色、灰黄色等含砾粗砂及④<sub>6</sub>极密实灰色、灰黄色、灰绿色圆砾。本层主要以④<sub>4</sub>中砂为主,④<sub>5</sub>含砾粗砂次之,其次为④<sub>1</sub>黏土及④<sub>2</sub>粉细砂,且主要是呈透镜体状分布,④<sub>3</sub>含砾细砂及④<sub>6</sub>圆砾仅在局部呈透镜体分布。本层砂土多以中密-极密实为主,属于超固结土层,土层强度较高,且埋藏深度相对区域中较深,总体来讲是较好的天然地基,特别对于上覆荷载不是特别高的构筑物是较好的桩基持力层。但是砂层中局部夹杂④<sub>1</sub>黏土层,对上部桩基可能产生差异性变形影响,需要对本层黏土加以防范。另外场区采用桩基时,应注意在灌注桩施工时本层黏性土可能产生的糊钻现象和砂、砾层可能产生的埋钻、卡钻现象。预制桩施工时应注意桩穿过本层砂、砾层的可行性。

##### 5) 第⑤层:残积土层。

本层为燕山三期花岗岩和震旦纪变质岩的残积土,为硬塑黏性土、砂质黏性土状或砾质黏性土状,局部分布,厚度小,埋藏深,不适宜做为基础持力层。

##### 6) 第⑥层:燕山三期花岗岩。

本次勘察及前期资料未有揭露该层,根据港

珠澳大桥主体工程桥梁施工图设计DB01标工程地质勘察总报告中揭露的花岗岩可以分为3个亚层:⑥<sub>1</sub>全风化花岗岩,⑥<sub>2</sub>强风化花岗岩和⑥<sub>3</sub>中风化花岗岩,大层层顶高程大致为-38.25~40.42 m,揭露厚度较大。其中⑥<sub>2</sub>强风化混合片岩可分为两个次亚层,区分主要是根据风化情况,一种为风化成坚硬土状(不包含风化碎块石),另一种为风化成半岩半土状。风化层分布较稳定,地基承载力较高,无论是强风化岩、还是中风化岩,都属于工程性质较好的工程地质层,从工程地质的角度,都可选做桩端持力层。特别是中风化层,强度较高、工程地质条件较好,是桥基良好的桩端持力层。另外场区采用桩基时,应注意在灌注桩施工时本层风化岩可能产生的埋钻、卡钻现象。预制桩施工时应注意桩穿过本层风化岩的可行性。

#### 7) 第⑦层:混合片岩。

本大层中包含了3个亚层,大层层顶高程大致为-57.96~-69.26 m,包含⑦<sub>1</sub>全风化混合片岩、⑦<sub>2</sub>强风化混合片岩及⑦<sub>3</sub>中风化混合片岩。其中⑦<sub>2</sub>强风化混合片岩可分为两个次亚层,区分主要是根据风化情况,一种为风化成坚硬土状(不包含风化碎块石),另一种为风化成半岩半土状。⑦<sub>1</sub>全风化和⑦<sub>2</sub>强风化是在⑦<sub>3</sub>中风化岩风化后的产物,分布于中风化岩之上,由于风化不均匀,部分区域没有全风化和强风化岩。⑦<sub>3</sub>中风化混合片岩是较硬岩,破碎~较完整,岩石基本质量等级为IV~III级。本大层是区域中的基岩层,埋深较深,是较好的天然地基持力层,在使用该层作为深基础时,应根据勘察资料及设计上覆荷载进行桩型及桩长的验算,选取合适的入岩深度,以达到设计荷载和经济效应的要求。另外场区采用桩基时,应注意在灌注桩施工时本层风化岩可能产生的埋钻、卡钻现象。预制桩施工时应注意桩穿过本层风化岩的可行性。

#### 8) 第⑧层:混合花岗岩。

本大层包含3个亚层,大层层顶高程大致为-57.96~-68.17 m,包含⑧<sub>1</sub>全风化混合花岗岩、⑧<sub>2</sub>强风化混合花岗岩及⑧<sub>3</sub>中风化混合花岗岩。⑧<sub>1</sub>全风化和⑧<sub>2</sub>强风化是在⑧<sub>3</sub>中风化岩风化后的产物,分布于中风化岩之上,由于风化不均匀,

部分区域没有全风化和强风化岩。⑧<sub>3</sub>中风化混合花岗岩是较硬岩,破碎~较完整,岩石基本质量等级为IV~III级。本大层分布广,埋深较深,对于深基础,该层是良好的天然基础持力层,在使用该层作为深基础时,应根据勘察资料及设计上覆荷载进行桩型及桩长的验算,选取合适的入岩深度,以达到设计荷载和经济效应的要求。另外场区采用桩基时,应注意在灌注桩施工时本层风化岩可能产生的埋钻、卡钻现象。预制桩施工时应注意桩穿过本层风化岩的可行性。

## 5 结论

1) 本次勘察资料遵循国际和国内勘察标准,依据地层的成因时代、岩性、物理力学性质特点划分了珠江三角洲入海口一带工程地质单元层,初步建立了工程地质模型。

2) 工程地质单元层的建立,清晰反映了工程地质特征,对于岩土工程评价具有区域性的参考作用。

3) 本次研究划分的工程地质单元层根据BS或GB标准应用时,建议根据不同的要求可进一步展开划分次亚层进行工程分析。

## 参考文献:

- [1] 广东省地质矿产局. 广东省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1986: 721-829.
- [2] BS5930:1999+A2:2010. Code of Practice for Site Investigations[S].
- [3] ASTM Standard D2487. Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purpose (Unified Soil Classification System) [S].
- [4] Geotechnical Engineering Office. Geoguide 3 : Guide to Rock and Soil Descriptions [S].
- [5] GB 50021—2001 岩土工程勘察规范[S].
- [6] 中铁大桥勘测设计院有限公司. 港珠澳大桥海中桥隧主体工程可行性研究阶段补充工程地质勘察报告[R]. 武汉: 中铁大桥勘测设计院有限公司, 2008.
- [7] 中交第二航务工程勘察设计院有限公司. 港珠澳大桥主体工程工程地质初步勘察报告[R]. 武汉: 中交第二航务工程勘察设计院有限公司, 2009.