

广东省地质构造与岩土工程基本特征

林本海¹, 杨树庄², 朱伯善³, 吴厚信³

(1. 广州市科学技术委员会办公室, 广东 广州 510030; 2. 广东省地质勘查局, 广东 广州 510080;
3. 广东省地质建设工程集团公司, 广东 广州 510080)

摘要: 广东省自震旦纪以来, 地层发育完善, 构造岩浆活动强烈, 不同地层岩石和土的工程特征显著。在区域地质构造基础上, 结合岩土工程实例, 阐述珠江三角洲等主要地区和广州等主要城市的地质构造与岩土工程基本特征。指出结合区域地质构造条件、宏观与微观相结合以正确审视历史经验教训以及更经济合理地处理具体岩土工程问题, 可产生巨大的社会、经济效益。

关键词: 工程地质; 地质构造; 岩土工程; 基本特征; 工程实例

中图分类号: P 642; TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2006)增 2 - 3337 - 10

GEOLOGICAL STRUCTURE AND BASIC GEOTECHNICAL CHARACTERISTICS IN GUANGDONG PROVINCE

LIN Benhai¹, YANG Shuzhuang², ZHU Boshan³, WU Houxin³

(1. *Office of Guangzhou Construction Science and Technology Committee, Guangzhou, Guangdong 510030, China;*

2. Guangdong Bureau of Geology and Mineral Investigation, Guangzhou, Guangdong 510080, China;

3. Geological Construction Engineering Group Corporation of Guangdong Province, Guangzhou, Guangdong 510080, China)

Abstract: Since Sinian period, the strata of Guangdong Province have been well-developed. The lithostratigraphy and structural magma keep active, so the engineering characteristics of different layers of rocks and soils vary greatly. Based on the regional tectonics and practical engineering cases, the geological structural features and basic geotechnical characteristics of the main regions such as Zhujiang River Delta and Guangzhou City are discussed. If geotechnical problems are dealt with in the effective way with the cognition of regional geological structural conditions, and if macro- or micro- experience and lesson are adopted, large social benefit will be achieved.

Key words: engineering geology; geological structure; geotechnical engineering; basic characteristics; engineering cases

1 引言

广东省位于中国的东南部, 陆地面积 17.8×10^4

km^2 , 其中山地占 31.40%, 丘陵占 25.61%, 台地占 20.26%, 平原和谷地占 22.73%。最主要的两大平原为珠江三角洲平原和韩江三角洲平原。海岸线长 5 016.6 km, 沿海岛屿甚多。

收稿日期: 2006 - 05 - 18; **修回日期:** 2006 - 07 - 11

作者简介: 林本海(1964 -), 男, 博士, 1987年毕业于南京大学地球化学专业, 现任教授级高级工程师, 主要从事岩土工程方面的研究工作。E-mail: linbenhai@163.com

广东省经济增长迅速,主要城市建设规模宏大,城市化进程居国内领先地位,城乡相连,各种不同类型的建设量大面广。但由于地质构造、岩土工程特性复杂,软土分布广,地下水丰富且活动性大,给工程建设带来诸多难题。过去多侧重小范围、小区域和工程场地的研究,而从区域性、大范围、总格局的角度进行归纳和总结的工作有所欠缺,未能在总体上以宏观角度将相关基础地质条件较全面地运用到场地工程建设中。本文力求在此做出尝试,首先对广东省的地质构造进行概述,然后对广东省主要的岩土工程地质特征进行讨论,最后对主要地区和城市的岩土工程性质进行分析。但由于总结工作要求高,难度大,时间短,资料多,同时由于水平有限,难免存在问题,请同行们批评指正。

2 广东省地质构造基本特征

广东省的大地构造单元属后加里东华南准地台,是中国大陆一块年轻的陆壳,年龄不超过 1.50×10^9 a。其发展简史是在早古生代之前(4.05×10^8 a前)沉积震旦纪和下古生界地槽相复理石建造、加里东造山运动褶皱上升、变质构成基底;晚古生代至三叠纪中期(至约 2×10^8 a年之前)沉积地台相盖层,印支运动褶皱上升;之后燕山期地壳运动等表浅化,形成大量陆壳重熔花岗岩及中生界沉积~火山沉积建造,红色盆地特色,称之为地洼型建造^[1]。

2.1 广东省地质结构

广东省地层见表1。

广东省的第四系地层主要有滨海相、三角洲相及陆相堆积。三角洲沉积主要发育于珠江、韩江、漠阳江、鉴江河口区。

浅海相早期水下三角洲沉积特征:珠江口外水深 < 50 m,宽 $170 \sim 190$ km,主要堆积物为粗砂、砂砾层,厚 100 m;韩江口外为水深 35 m 以下。现代水下三角洲沉积特征:珠江口外水深 $15 \sim 45$ m,宽 $60 \sim 80$ km,沉积物以陆源碎屑为主,向外海粒度变细。

三角洲沉积特征:珠江三角洲由海相粉砂质淤泥及河流相6层组砂层、砂砾层组成3个沉积韵律,厚一般 30 m;韩江三角洲由海陆交互9层组组成,厚可达 $10 \sim 70$ m。

滨岸相主要沿海岸砂堤、砂坝、海积平原等分

布。在雷州半岛区有湛江组滨海相为主的砂砾层、砂层、亚砂土及黏土,形成高程 $60 \sim 80$ m 的台地,厚 $2 \sim 250$ m。之上为北海组亚黏土、砾石层夹透镜状亚砂土,厚 > 10 m,组成高程 $20 \sim 30$ m 的台地。

陆相堆积以河流相为主。河流冲积可分为5级阶地,分别高出现代河水面 $55 \sim 60$, $42 \sim 45$, $25 \sim 40$, $15 \sim 25$ 及 $5 \sim 15$ m,厚度分别为 $1.5 \sim 13.0$, $4.0 \sim 8.0$, $3.0 \sim 10.0$, $2.0 \sim 22.0$ 及 $2.0 \sim 20.0$ m。各阶地沉积一般下部为砾石层、向上变成砂和砂质黏土^[2]。

2.2 岩浆岩

广东省岩浆岩出露面积约占全省陆地面积的近 $1/3$,以粤中和粤东沿海最为集中,有超基性岩、基性岩、中性岩、中酸性岩、酸性岩、超酸性岩和碱性岩等。以酸性花岗岩占绝对优势,中酸性的二长花岗岩、花岗闪长岩、石英闪长岩其次,其余岩类极少。岩浆岩产状有岩基、岩株、岩瘤、岩墙、岩脉等。以大岩基体为主,其次为岩株体。岩墙、岩脉所占面积甚少,但属常见地质体。

岩浆岩时代有加里东期、华力西~印支期、燕山期及喜马拉雅期。各时期岩石强度相当,主要差别在构造、地貌条件及风化程度上表现特征不同。

2.3 构造

2.3.1 褶皱构造

广东区域大陆属于华南褶皱系的一部分,其基底褶皱由震旦纪和下古生界变质岩系组成,以紧密线型褶皱为特征,轴线以NEE向为主(见图1)。其中九连山—佛冈—郁南和蕉岭—增城—腰古—云开两条复背斜带,呈NE~EW~NEE向展布,略呈“S”形辗转弯曲,构成广东的重要构造骨架,对其后的构造变动、地层分布、岩浆活动和矿产的生成起着重要控制作用^[3]。

泥盆系至中三叠统地台的盖层褶皱,以过渡型褶皱为特征,常与同向高角度断裂同步产出,组成“褶皱构造带”。褶皱轴线方向多变,但以NE向为主。

上三叠统和侏罗系中的褶皱以宽展型的短轴背向斜为特征,而白垩系和第三系中则主要发育平缓的向斜、拱曲或单斜构造。

2.3.2 断裂构造与地震

广东区内断裂以NE向为主,其次为EW向,此外也有NW等方向的断裂(见图2)。

表1 广东省地层简表
Table 1 Strata introduction of Guangdong Province

界	系	统(群)	主要地层单位 (以粤北粤中为主)	沉积建造	地层厚度 /m	地壳运动期	大地构造学归纳		
							沉积建造与之后的构造运动	相关联想	
新生界	第四系	上第三系 下第三系	丹霞群 罗佛寨群	陆相及滨海碎屑沉积			喜马拉雅期	地洼建造: 改造原有陆壳为特色, 断裂构造、陆壳重熔岩浆活动强烈。不存在普遍的沉积建造, 但沿断裂带可出现凹陷盆地及断陷盆地红色建造	地壳活动表浅化, 地壳浅部低压区出现高温环境; 可产生地台型褶皱, 不能够使厚大岩层产生全形褶皱
				陆相碎屑岩、红层夹火山岩建造, 含可燃性(油柑窝组)有机岩	>3 000				
				陆相碎屑岩建造(红层)	>4 500				
				陆相碎屑岩建造(红层)	>4 500				
中生界	侏罗系	上统 中统 下统	高基坪群 百足山~漳平群 金鸡组	陆相火山碎屑岩、火山岩建造	>3 000	燕山运动期	地台相盖层建造: 由陆到海、由粗到细、由碎屑岩~碳酸盐岩较薄的大海入侵沉积系列, 反映地壳活动趋向稳定。之后由印支运动回返	毗邻有长期缓慢震荡上升的“闽粤台背斜”提供陆源碎屑	
				陆相火山碎屑岩建造					
				浅海碎屑岩建造(含煤系)					
				上统陆相~浅海含煤(小平煤系)建造。厚度>2 900 m					
				浅海滨海碎屑岩建造(仅分布于粤北阳山)	>438				
				浅海碳酸盐~碎屑岩建造	800				
中生界	三叠系	中统 下统	黄盆群 大冶群	浅海碳酸盐碎屑岩建造(龙潭煤系);	>1 500	华力西~印支运动期	地槽相复理石建造: 粗细递变反复交替的砂泥质陆源碎屑厚大沉积系列。反映地壳活动剧烈。最后由加里东运动回返形成褶皱基底	毗邻有长期迅速震荡上升的地盾大量提供陆源碎屑	
				浅海相碳酸盐夹含煤碎屑岩建造					
				(下统包括孟公坳组、石磴子段、测水段煤系、梓门桥段)	>1 800				
				浅海相复理石碎屑岩建造	>3 277				
中生界	二叠系	上统 下统	龙潭、大隆组 栖霞、孤峰、茅口组	浅海相复理石建造	>6 000				
				浅海相复理石建造					
				浅海相复理石建造					
				浅海相复理石建造					
上古生界	石炭系	上~中统 下统	壶天群 岩关阶、大塘阶	滨浅海相碎屑岩~碳酸盐-碎屑岩建造	>3 000				
				(下统仅分布于云浮)					
				壳相页岩建造					
				笔石页岩建造(志留系全省只有粤西有出露)	>4 300				
下古生界	志留系	上统 中统 下统	岭下群 文头山群 连滩群	笔石页岩建造	>3 700	加里东运动期			
				笔石页岩建造					
				(粤西三尖群、缩尾岭群为复理石碎屑岩建造)					
				笔石页岩建造					
下古生界	奥陶系	上统 中统 下统	龙头寨群 长坑水组 新厂组	浅海相复理石碎屑岩建造	>3 277				
				浅海相复理石碎屑岩建造					
				浅海相复理石碎屑岩建造					
				浅海相复理石碎屑岩建造					
元古界	震旦系	a, b, c, d 四层		浅海相复理石建造	>6 000				
				浅海相复理石建造					

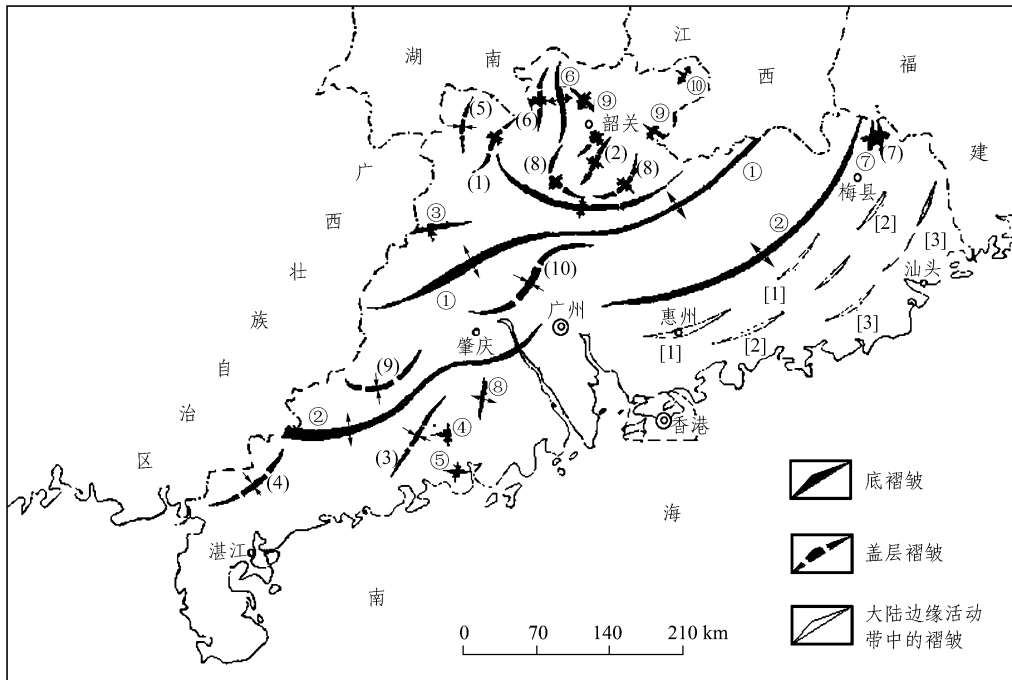
(1) NE 向断裂: 自 ES 沿海往 NW 依次有南澳、汕头—惠来、潮州—普宁、莲花山、紫金—博罗、河源、新丰—恩平以及四会—吴川等深大断裂。

(2) EW 向断裂: 一般由南往北依次有高要—惠来、佛冈—丰良和贵东—蕉岭等隐伏深大断裂。实际可见的 EW 向断裂常常为 NE 向断裂的派生构造。

(3) NW 向断裂: 广东省主要 NW 向断裂主要见于珠江三角洲及韩江三角洲一带。在粤东自 NE 向 SW 主要分布在大埔—饶平、丰顺—汕头和伶仃

洋—三水、芦苞一带。

广东省地震区属环太平洋带中一个地震带——中国东南沿海地震带。该带与台湾东部带、台湾西部带对应分布。其余地区不属于地震带。相对于台湾东部带、台湾西部带而言, 是比较弱的一个带。而相对整个华南地区而言, 则是相当强烈的地震带。地震的总体成因是太平洋板块与欧亚板块的碰撞挤压。广东省地震区划因此可概括划分为沿海带与内地带, 并以沿海带为强烈带, 其中与台湾对应关系



① 九连山—佛冈—郁南复背斜带；② 蕉岭—增城—腰古—云开复背斜带；③ 六堡—夏耶复向斜；④ 五点梅复向斜；⑤ 那崖复向斜；⑥ 瑶山复背斜；⑦ 蕉岭复背斜；⑧ 白水坑复背斜；⑨ 小鱼水—瑶岭复向斜；⑩ 小梅关复背斜
 (1) 郴县—怀集复式向斜；(2) 北江复式向斜；(3) 春湾复式向斜；(4) 廉江复式向斜；(5) 东陂—连州复式向斜；(6) 瑶山复式向斜；(7) 蕉岭复式向斜；(8) 英德弧形褶皱；(9) 贵子弧形褶皱；(10) 清远—高要“S”形褶皱
 [1] 潭下一七星幢—黄巢山复式褶皱；[2] 铜鼓幢—桐子洋—禾廉石复式褶皱；[3] 新丰—军埠—大南山复式褶皱

图1 广东主要褶皱分布示意图
 Fig.1 Sketch of the main fold distribution in Guangdong Province

密切的粤东地区，是广东省最活动的地区，地震相对强烈。按照构造应力释放等间隔的规律，次级活动区段在阳江地区。

广东地区自 1067 年有记载以来，迄今发生 6 级以上破坏性地震 11 次。其中 1918 年 2 月南澳 7.25 级地震后 3 a 内发生破坏性余震 3 次，是 1600 年南澳 7 级地震以来，华南地震史上惟一的强震原地重复区。东南沿海地震带即按该区地质构造条件据此划定。

NE 向断裂具有长期和多次活动的特点，是板块构造挤压的陆壳表现，为震源构造，控制地震、地热的总体分布，也可成为发震构造。河源新丰江地震为水库诱发地震。NW 向断裂形成较晚，具体控制地热带分布，常常成为发震构造。两者交会处多为地震集中区段。

按照国家地震局(2001)中国地震烈度区划，粤东潮汕地区 NE 向与 NW 向断裂交汇区为 VIII 度区，

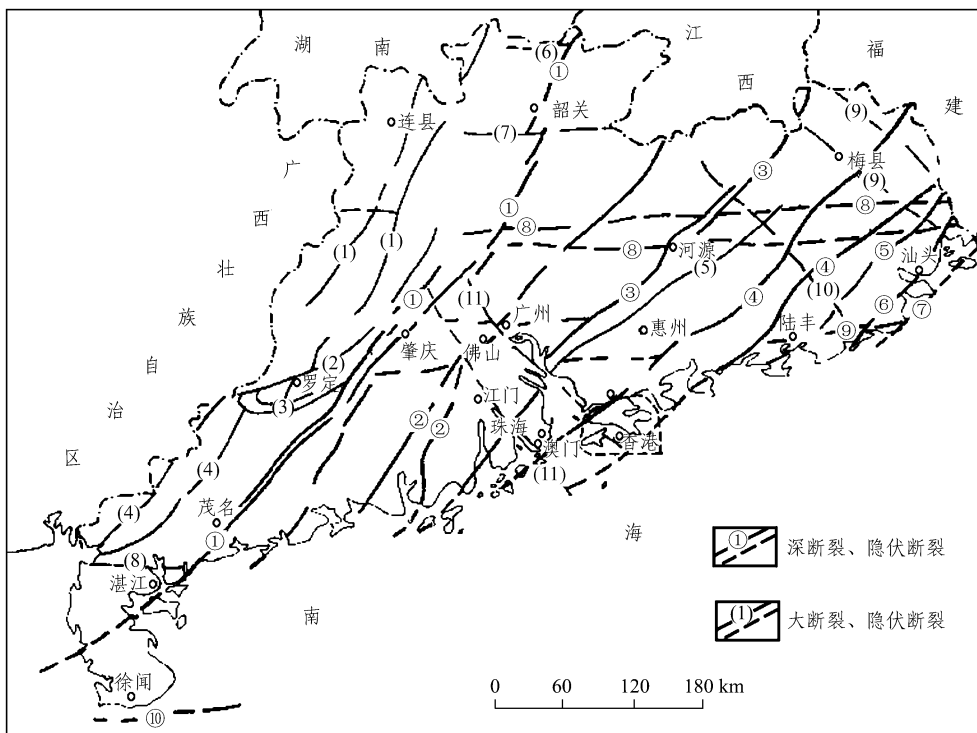
广东省沿海其余区为 VI~VII 度区。内地带烈度一般小于 VI 度，这些地区的断裂带不排除成为发震断裂，只是可能性很小而已。

3 广东省岩土工程基本特征与若干工程实例

3.1 地层岩石多样，不同地层的岩土工程特征显著

从震旦纪以来，各时代沉积的地层均有分布，以碎屑岩为主。碳酸盐岩出露分布面积 7 221 km²，红层分布面积 7 259 km²。各期次喷出岩、侵入岩大量产出，其中以花岗岩为主的侵入岩分布面积占全省面积的 1/3。混合岩、片麻岩广泛存在。

岩土工程特征差异与地层时代关系不明显，而与岩石种类密切相关。一般说来，在 50 m 深度内，花岗岩、灰岩、混合岩多属硬质岩；碎屑岩、红层多属软质岩，而胶结物为钙铁硅质的也可属硬质岩。



- ① 吴川—四会深断裂带；② 恩平—新丰深断裂带；③ 河源深断裂带；④ 莲花山深断裂带；⑤ 潮安—普宁深断裂带；⑥ 汕头—惠来深断裂带；⑦ 南澳深断裂带；⑧ 佛冈—丰良深断裂带；⑨ 高要—惠来深断裂带；⑩ 琼州海峡深断裂带
- (1) 柳县—怀集大断裂；(2) 罗定—悦城大断裂；(3) 贵子弧形大断裂；(4) 信宜—廉江大断裂；(5) 紫金—博罗大断裂；(6) 九峰山大断裂；(7) 贵东大断裂；(8) 遂溪大断裂；(9) 饶平—大埔大断裂；(10) 河婆—惠来大断裂；(11) 三洲—西樵山大断裂

图2 广东深大断裂略图

Fig.2 Outline drawing of the deep and large fractures in Guangdong Province

3.2 风化壳层发育

由于气候炎热，雨量充沛，岩石的物理化学风化作用强烈，残积土、全风化岩和强风化岩普遍存在，厚度多达 10~50 m，在断裂破碎带附近，风化深槽达 100 m。花岗岩类的风化剖面发育较完全。质纯灰岩常只见中微风化岩，当泥质、炭质灰岩或灰岩中有碎屑岩夹层时，残积土和全、强风化岩也常达一定厚度。灰岩风化界面起伏变化剧烈。红层岩石成岩作用不完全，由于胶结物不同，岩石性质成份、构造裂隙的差异，地下水作用的强弱，常出现软硬相间的状态。

地表下 50 m 深度内的中、微风化岩，岩体一般不完整。其完整程度多为较破碎、较完整。受断裂挤压影响的岩体常呈破碎状，岩土工程勘察中，如采用金刚石钻头，岩芯能较好地反映地下岩体的实际完整程度，但现行钻探，多采用合金钻头，岩芯机械破碎常较明显。

一些有规模的重要场地勘察，岩石取样不足，常满足于不少于 6 件组的最低要求，且常在中、下部取样，获得较硬、较好的岩芯样，其实缺乏代表性。勘查成果比较真实地反映岩石的风化程度、强度、岩体的完整性，对确定其承载力关系很大。

规范中对土-强风化岩作为地基土的承载力，考虑深宽修正，不同入土深度的桩基其承载力取值也有差异，但对岩石，一般规定不考虑深度修正。广东省自 1986 年在沙角电厂钻孔灌注桩试验中提出岩石的深度系数为 1.6 后，据林本海等^[4]研究，认为地基中岩体，受上覆岩土层压力和围岩压力的作用，根据大量的实测资料和室内三轴试验结果的统计分析及理论计算，地面 15 m 以下岩体所能承受的压力，一般为实验室无侧限天然单轴抗压强度 f_r 的 1.5~2.0 倍。这一成果有重大的工程经济价值，值得工程界参考并积累必要的工程经验。

3.3 低丘台地、平原地貌区风化壳普遍发育

在低丘台地区和平原区沉积土之下, 残积土和全、强风化岩分布普遍厚度较大。根据广东省标准《建筑地基基础设计规范》(DBJ15-31-2003)^[5], 明确变形模量 E_0 的计算方法, 为更有效地采用天然地基、大量采用预应力混凝土管桩基础提供技术上的法规依据。广东省是国内使用管桩最多的省份, 在高速公路大型桥梁建设中, 当中、微风化岩石埋藏很深时, 以全、强风化岩作灌注桩持力层, 已有很多成功的实例。残积土上不打桩建高层, 也已被不少人接受。进一步总结经验, 有条件地推广应用, 具有重大的工程经济意义。

3.4 海积平原、三角洲平原、冲积平原软土广泛分布

软土主要指淤泥、淤泥质土, 在广东省海、冲积平原区广泛分布(厚度较薄为 3~5 m, 较厚为 20~30 m)。广东省软土的主要特性一般是: 含水量高, 强度低, f_{ak} 只有 40~70 kPa; 孔隙比大, 变形模量低, E_0 为 0.8~2.0 MPa; 压缩性高, 受荷后沉降量大且不均匀, 最终沉降量为厚度的 10% 左右; 渗透性差, 固结系数为 $10^{-3} \sim 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$, 受荷后沉降速度缓慢, 沉降持续时间可长达 10~30 a; 灵敏度为 2~8, 属中等灵敏土~灵敏性土, 受强烈扰动, 土的结构破坏, 强度下降。

对建筑物来说, 软土的工程问题突出, 应通过岩土工程地质勘察查明土的工程性质, 根据工程需要测试土性指标, 并采取适当的加固治理措施。

海丰县招待所 7 层楼, 天然地基为浅基础, 未经勘察。建成后开张前一天大雨时造成整楼群垮塌。后钻探查明, 2.8 m 深度以下为厚层淤泥。

广州黄埔开发区建设初期, 对浅层软土危害性认识不足, 建成道路、管道, 约 1 个月后, 道路成波状, 管道折断。更有建 8 层楼尚未封顶时, 首层窗台已沉陷至地面。广州黄埔开发区管委会大楼, 长百米, 沉管灌注桩基础, 原设计 14 层, 建到第 8 层时因不均匀沉降, 梁断裂, 最大错距 20 cm。后虽用地下连续墙处理, 但也只好就此封顶。

珠江三角洲不少大跨度厂房和办公楼, 柱下为桩基, 沉降很小, 桩间软土或厂房地坪未做加固处理, 使用后不均匀沉降持续发展, 后患甚多, 应引以为戒。

3.5 沿海滩涂、低洼地带填土建设区多

广东省海岸带建设区多、工程量, 局部低洼

的建筑场地屡见不鲜, 岩土工程经常处理填土场地。对素填土, 如填土时分层碾压、夯实, 经检测, 常可作为荷载不大的建筑物地基持力层。但许多填土场地并不这样做, 一次总体回填压实后就试图建设, 事实上厚层填土后的碾压对中下部起不到压实加固作用。未经分层压实处理的厚层填土承载力低, 压缩性高, 均匀性差, 难作基础持力层。更有甚者, 填土时不考虑后续工程, 大量堆填大块石, 造成处理困难。

清远某地, 因水库蓄水淹没, 在山边新建圩镇, 楼高 4 层, 填土厚度最大达 14 m。用强夯法加固填土, 经检测承载力达 200 kPa, 可作浅基础持力层, 但花费较大的工程费用。

沙角电厂在某厚层淤泥滩涂填土时填入大量大块石, 勘察时钻孔遇厚层活动硬块填石很难钻进, 一个钻孔要钻 8~20 d。蛇口一个海滩工地, 在钻孔灌注桩造孔时, 遇到一块 1 m×2 m 的大块石已下沉到淤泥层 4~5 m 深处, 后下入长 6 m、直径 $\phi 2.6$ m 的钢管护壁才将其取出。

未经处理的厚层填土和淤泥, 在堆载较大时, 对桩产生负摩阻力, 其下拉荷载有时不可忽视。如南沙一住宅小区(6 层楼), 场地填土厚 3 m, 淤泥层厚 18 m, 沉管灌注桩基础, 楼房周边通道可行 5 t 汽车。楼房使用后周边地面持续下降, 6 a 后楼房整体倾斜, 经鉴定要纠偏。设计部门检查认为基础安全系数偏小。

3.6 存在活动断裂

广东省活动断裂较多, 其中有不少属于可能发生 5 级以上地震的断裂。根据历史地震震级、地壳活动速率、全新世活动强度和有感地震记录以及地下热水出露分布, 对全新世活动断裂分级: 南澳岛为强烈, 揭阳、河源、阳江、信宜为中等, 其余为微弱。

抗震设防烈度: 汕头一带 VII~VIII 度, 珠江三角洲大部、沿海地带、雷州半岛东半部 VII 度, 其余 VI 度或小于 VI 度。

对震级较高的汕头市、岩溶发育的花都市作地震小区划。对机场、重要港口、桥梁和高层建筑场地, 按国家规定进行地震安全性评价。

抗震设防烈度 VII 度以上的浅层砂土液化等级常属轻微~中等, 有的可达严重级。

3.7 灰岩区多

灰岩广泛分布于粤北曲江—仁化盆地、英德盆地、连阳盆地和广花盆地等。灰岩建设区主要城市有广州、韶关和肇庆等。灰岩是水溶性岩石，水文工程地质勘查相当重要。隐伏灰岩多是中、微风化硬质岩。泥炭质灰岩和灰岩层中的碎屑岩夹层，可有一定厚度的残积土~强风化岩。

灰岩区的主要岩土工程地质问题是土洞和溶洞发育，建筑区的土洞一般见洞率5%~15%，需充填治理；溶洞见洞率常为10%~30%，采用基桩时需打超前钻查明，并应有足够的安全厚度。

岩溶水较丰富。当城镇区抽水开采岩溶水，矿山排水，或地下水水位显著变化时，将引起地面下沉甚至塌陷，形成程度不同的建设后灾害。一些民用建筑物在使用期承重柱下沉时有发生。

一些矿山井巷重大充水事故，往往由破碎带、岩溶充水带突水引起。覆盖型岩溶区建高层建筑，并非一定要采用深桩基础。某高层建筑地上19层，地下一层，基坑面积2276 m²，打勘察孔16个，有14个孔在冲积层下浅部灰岩见1~4层溶洞。基础采用搅拌桩复合地基，至今已安全使用多年。该场地基坑深5.8 m，基底处80%面积为中粗砂层，余为粉质黏土层，搅拌桩中下部为厚层粉质黏土间少量淤泥质土，以下为灰岩。周边为多层、高层建筑。侧壁用搅拌桩帷幕止水。基坑到底后，侧壁可谓滴水不渗，但坑底大量涌水，判断是下部岩溶水通过二千多根搅拌桩桩周缝隙上渗。据此，采用基础下填碎石暗沟疏排水，流至四周明沟集水坑用离心泵抽入城市下水道。在地下室施工期间，日排水量稳定在4000 m³，历时5个月。施工队和当地质检站认为此法方便易行，安全省事，符合场地实际情况。

3.8 降雨量大而集中，边坡失稳问题突出

在低丘台地、平原地貌区，风化壳普遍发育条件下，降雨量大而集中，使边坡失稳成为突出问题。在这些地区，雨季常发生滑坡、崩塌。地面开挖工程面积大、植被被毁的较陡坡地区还容易产生泥石流。一些工业与民用建筑建筑场地开山而成，许多公路、铁路穿山而过，高边坡甚多，若防护措施不到位，暴雨时边坡失稳垮塌时有发生。

一公路隧道长300 m，勘察时主要采用波速法划分岩土层，钻孔控制不多，将II类围岩错划为V类岩石，结果在隧道贯通衬砌时，暴雨之夜隧道中段长40 m土体跨塌1.6×10⁴ m³。后经钻探证实，

从山顶高程95 m到隧道顶部均为残积土和强风化岩。

在地壳长期上升区，如英德盆地等，河流切割深，低处松散层薄，高处基岩裸露，一般不存在边坡问题。

3.9 地下水丰富、活动强烈

广东省地下水丰富，活动强烈。主要地下水有松散岩类孔隙水，侵入岩、变质岩、碎屑岩裂隙水，碳酸盐岩裂隙岩溶水，火山岩类孔隙裂隙水。内陆地下水对混凝土多不具腐酸性，局部有弱腐酸性。在咸水区，一些厂矿附近地下水受污染，对建筑材料有中等以上腐酸性，需采用防护措施。强透土层对混凝土体外侧有一定的冲刷作用。

基坑遇到的地下水一般是浅层水，水位受地形和降水影响变化。基坑涌水量差异很大，黏性土和红层，水量贫乏，可采用明沟排水；砂层水，基坑日涌水量几百到几千立方米，多采用井点降水；岩溶水富水性很不均匀，降水方法要据实而定。深基坑地下水的浮力作用不可忽视。有的人工挖孔桩遇到充水破碎带，水量也很大。基坑侧壁安全度不足，受水土侧压影响发生跨塌的事故也时有发生。

高水头压力的充水破碎带，一旦出现工程事故，后果是很严重的。粤北一隧道，山体高300 m，勘察时发现一条断裂破碎带，注浆加固时用了水泥约1.0×10⁵ kg。有一日火车通过后，破碎带突水，日出地下水万吨，注浆加固又用了水泥2.8×10⁶ kg，隧道封闭了1个月。

4 广东省主要地区和城市的岩土工程地质特征

4.1 珠江三角洲

珠江三角洲是广东经济发展的主体区，总面积11281 km²，其中平原区占77%，低山丘陵台地区占23%。平原区沉积土厚度一般为20~60 m，最厚83 m，其中软土厚度在中、北部地区多为5~20 m，南部滨海平原区达25~45 m。低丘地区为花岗岩类、红层、碎屑岩、变质岩等，广花盆地隐伏灰岩^[6]。

基底构造复杂。新构造运动特点是大沉小升，近代中、低级别地震较频繁，大部分地区地震烈度VII度；现代地壳垂直形变值，台地每年+(2~4) mm，平原为每年-(1~2) mm。珠江年输砂量约8×10¹⁰

kg, 河口地带堆积强烈, 成陆迅速。主要地质问题是软土地基不均匀沉降, 灰岩区溶洞土洞塌陷、堤防工程管涌冲刷等安全性及浅部砂土液化、河涌淤积。近些年堤防工程按统一部署抓紧开展达标。

由广东省交通厅牵头编著的《广东省高速公路软基处理实用技术》^[7], 其沉降检测、计算和软土地基处理方法, 对工业与民用建筑也有很好的借鉴价值。

平原区地下水在许多地方比较丰富。珠江三角洲河涌占地面积 8%, 河流纵向坡降 0.1%~0.5%, 咸水移动范围 20~80 km。三角洲中部、南部广大地区普遍存在咸水, 对混凝土构件和钢材均有一定的腐蚀性。

虎门大桥是在复杂地质条件下建设的悬索桥。能否在此建大桥有过争论。经地质勘察, 主桥东段为侏罗系砂岩, 中、西段为花岗片麻岩; 东岸、西岸边和中段有 3 条活动断裂穿过, 其中中段断裂破碎带宽 200 m。一般深 30~40 m 到硬岩, 最深风化深槽 107 m 才穿过半岩半土状强风化岩。经地震烈度复核为 VII 度。有相当一部分桩在硬质岩石的全、强风化岩中终桩, 钻孔桩强风化岩(以校正后的标准贯入度大于 50 击为准)极限摩阻力经试验取 300~350 kPa, 全风化岩极限摩阻力取强风化岩的一半, 大桥至今已安全运行 10 a。

4.2 韩江三角洲及近岸岛屿

韩江三角洲及近岸岛屿即统称潮汕平原, 有丘陵台地。平原土体为黏性土、砂性土和淤泥质软土, 总厚度一般 10~70 m, 最厚 168 m。台地区主要为坚硬块状侵入岩及残积土。地质构造复杂, 断层交织成网, 现代地壳垂直形变速率为 -2.5~+1.5 mm/a。南澳岛位于活动断裂带上, 为强震区, 历史上多次发生破坏性地震, 最大为 1918 年 2 月 13 日 7.25 级地震。潮汕地区地震基本烈度为 VII~VIII 度, 是广东地震烈度最高的地区。主要地质灾害危险性类似珠江三角洲, 但边坡稳定性较差, 周边丘陵区暴雨时常发生滑坡和泥石流。

4.3 广州市

在三元里—瘦狗岭断裂以南, 第四系沉积物主要是海冲积层, 基岩多为白垩系~第三系红层, 存在软硬相间地基, 桩基础常常要打超前钻。该断裂以北, 东半部以混合岩、花岗岩及其残积土为主; 西半部即广花盆地, 上覆河流冲积层, 下伏灰岩为

主。灰岩区岩溶、土洞多较发育, 见洞率 15%~40%。海冲积层中软土发育。广从、瘦狗岭、狮子洋、沙湾等断裂虽属活动性断裂, 但近代只发生过 5 级以下地震, 属全新世基岩微弱活动断裂, 危险性有限^[8]。

市区珠江两岸和南沙区淤泥及砂层厚度大, 在南沙, 淤泥及夹砂淤泥层厚达 25~45 m。

广州市是华南中心城市, 高层建筑数量从改革开放前屈指可数的几座, 到现在有三千多座; 基坑支护工程相应发展, 深基坑深已达 40 m 左右。基础形式多样。地铁从 1998 年一号线通车后, 正在加速建设, 到 2010 年将有 8 条线路总长度 260 km 投入运行。白云新机场、高等级公路、铁路新客站、广州南沙新港以及珠江新城核心区的建设等等, 将大大的促进岩土工程勘察、设计和施工技术的发展。

4.4 深圳市

深圳市毗邻香港, 是中国改革开放的新兴大城市, 经济总量居大城市前列, 进出口贸易居全国首位。机场、港口、核电站规模宏大, 高层建筑林立, 已开始建设地铁。

深圳市地处丘陵台地, 沿海低地、河谷平原狭小。基岩主要是花岗岩、碎屑岩、碳酸盐岩, 残积土发育。深圳地质构造复杂, 位于莲花山活动断裂带西南部, 地震烈度 VII 度。

20 世纪 80 年代初期, 罗湖区大规模高层建筑兴建之时, 有人对在活动断裂带上建那么多高层建筑提出疑问, 后经多单位多年地质调查研究, 对断裂裂隙作位移观测, 对地面升降运动作精密水准测量, 证明其活动性微弱, 只要设计、工程措施到位, 建筑物是安全的。

大亚湾核电站是中国第一座大容量核电站, 选址论证时, 国内外许多学者担心其安全性。后经详细岩土工程勘察研究, 有人提出“安全岛”概念, 解决选址争论。在核岛、常规岛的基础施工中, 原来该场址为 63 m 高的小山, 经剥离到海平面高程时, 发现角岩中有 NE 向白云岩透镜体, 发育溶洞和粗大裂隙, 采用斜钻固结灌浆处理。核岛、常规岛地震设计按 X 度, 核电站其他建筑物按 VII 度。现核电站已安全运行十多年。

深圳黄田机场跑道建在海滩边, 软基处理采用袋装砂井预压法, 并获得成功。

深圳制定一系列岩土工程规程规范, 关于残积

土、强风化岩的承载力, 变形模量等, 被国内许多规范、手册所引用, 在实际工程中参照使用。

预应力混凝土管桩有许多的优点, 广东应用最多。深圳宝安地区的预应力管桩, 在桩基工程中已占 80% 以上, 管桩已用于 39 层的高层建筑基础。徐至均和李智宇的《预应力混凝土管桩基础设计与施工》^[9]一书, 是以广东实践为主的理性提升, 具有很好的参考价值。

管桩常用桩径 ϕ 300~600 mm, 近年来桩径 ϕ 700 mm 的管桩和 900 t 的压桩机在广东省已有生产。管桩属挤密桩, 存在时间效应, 成桩后数月或数年, 桩的承载力增大。用规范经验公式计算得到的单桩承载力, 相当于成桩后初始状态至一个月试桩的承载力。桩的最终极限承载力会比初期增长 20%~40%。在工程实践中, 根据具体情况, 适当考虑一个时效系数, 有重要的工程经济意义, 设计、施工单位可沿此意向积累经验。

4.5 珠海市

珠海市属珠江三角洲西南部, 东临伶仃洋口, 西为西江三角洲前缘, 软土层深厚; 拱北与澳门交界地带第四系厚度深达 83 m。区内岩石主要为花岗岩, 地貌上呈低丘陵、台地, 残积土厚, 球状风化显见, 基础施工在松散层中常遇孤石。湾仔地区建设项目软土处理规模甚大, 地震烈度 VI~VII 度, 地基稳定性较好。

珠海市区已建成园林式滨海城市, 色彩鲜艳协调。长 40 km 的港珠澳跨海大桥已论证多年, 岩土工程地质条件适宜建筑施工, 即将开工。

4.6 东莞市

东莞市以原来一个县的建制, 成为广东省经济高速发展的城市化地区, 实际人口千万, 经济总量进入中国大城市行列, 进出口总量位居全国大城市前列, 高层建筑、高等级公路、港口、村镇建设欣欣向荣。

东莞市西、北部为东江河口三角洲, 属珠江三角洲东段, 软土和下伏红层发育; 其余大面积为低丘陵台地, 分布震旦纪花岗片麻岩、三迭侏罗系碎屑岩和燕山早期花岗岩及厚度较大的残积土。地震烈度除西部海岸 VII 度外, 其余为 VI 度。建筑物地基基础有: 天然地基、桩基, 尤其是管桩、地基处理等居多。

广东省岩土力学与工程学会陆培炎教授等提出

用弹塑性理论计算土的承载力和变形量, 引入危险度 λ 概念。当 $\lambda=0$ 时, 天然地基的承载力相当于国标、省标中土的承载力设计值; 当 $\lambda=1$ 时, 为极限值; 一般土如取 $\lambda=0.2\sim0.4$ 时, 土的承载力计算值大大提高。应用这一弹塑性混合课题解决残积土上不打桩建 20~30 层的高层建筑, 经沉降观测证明, 其可靠性、安全性很高, 取得显著的社会经济效益。值得有条件的地区, 慎重而大胆地研究使用。残积土地场的条件, 尤其有地下室者, 土的承载力提高, 变形模量比压缩模量大几倍, 均匀性也较好或经采取调整措施后, 满足设计要求。

4.7 雷州半岛及湛江市

雷州半岛为雷琼沉降带的中、北段, 沉积土层、砂层厚度逾千米, 是广东孔隙水最丰富的地区。地貌形态主要是第四纪多次火山喷溢活动形成的多级熔岩高台地和 Q_1, Q_2 冲洪积台地, 沿海平原和江河平原有软土分布。玄武岩残积红土层深厚。天然地基土承载力较高。主要城镇除南部徐闻在玄武岩台地区外, 湛江、雷州、遂溪多在沉积老黏土区, 地基土条件较好; 高层建筑、桥梁、码头可采用桩基。大开挖如南海舰队船坞采用井点降水和钢板桩。

地震烈度 VI~VII 度。有地裂缝发育。琼州海峡宽 20 km, 最大水深 114 m, 主要为黏性土。对预计长 50 km 的海底隧道和建海峡大桥的岩土工程地质条件, 曾作可行性勘察^[10]。湛江海湾大桥 2006 年 6 月主跨合龙。

雷州半岛城镇供水、农业用水, 大面积开采地下水。尤其湛江市, 每天开采几十万吨地下水, 降落漏斗面积已达一千多平方公里, 1984 年作二等精密水准测量, 最大地面沉降为 110 mm, 尚未引起海水入侵。沉降不大的主要原因是: 由于分层开采, 成层黏土厚、分布广, 浅部软土少, 城市荷载还不很大。目前继续监测。

5 结 语

本文对广东省的地质构造基本特征进行简要阐述, 对与工程建设有关的主要工程性质特点进行讨论, 对一些主要地区和城市的岩土工程性质进行分析。

本文作者长期从事于地质构造、岩土工程地质的工作, 在长期的社会实践中, 深深地认识到

岩土工程似乎囿于工程场地或小区域范围的研究和应用,对岩土工程性质、工程措施、工程处理也局限于工程场地或小区域范围的研究和应用,对大区域宏观的地质构造往往认识和把握不够,因而不能全面地指导小区域、场地建设,从而容易以点代面、以偏概全,不能给工程建设带来更大的经济效益。对于一个具体的工程场地,无论其工程地质和水文地质特征无不受到宏观地层与构造的控制。如果能够根据区域地质构造条件处理具体岩土工程,审视历史经验教训,不仅可产生巨大的社会和经济效益,还可在学术上上升一个层次,更经济合理地处理岩土工程问题。如2005年7月21日广州市海珠城广场基坑坍塌事故,就是对该区段地质构造条件及地下水活动规律缺乏认识造成。该场地在地面以下6m就出露红层的粉砂岩,但由于区域构造控制场地岩层倾向坑内,同时地下水沿层面或裂隙、节理渗透导致岩层中软弱风化夹层的产生形成滑移面,终于酿成重大的工程事故,教训是深刻的。本文的主要观点之一就是要使从事岩土工程的工程技术人员,注重微观与宏观相结合,把区域地质构造、岩土工程地质、水文工程地质的理论运用到场地和小范围的工程建设中,使工程建设提高到一个新的水平。

参考文献(References):

- [1] 陈国达. 地洼学说讲义[M]. 北京: [s. n.], 1985.(Chen Guoda. Teaching Materials of Diwa Theory[M]. Beijing: [s. n.], 1985.(in Chinese))
- [2] 广东省地质勘查局. 广东省1:500 000地质图说明书[R]. 广州: 广东省地质勘查局, 1977.(Guangdong Bureau of Geology and Mineral Investigation. Specification sheets of the ratio 1:500 000 geologic map of Guangdong Province[R]. Guangzhou: Guangdong Bureau of Geology and Mineral Investigation, 1977.(in Chinese))
- [3] 广东省地质勘查局. 广东省区域地质志[R]. 广州: 广东省地质勘查局, 1988.(Guangdong Bureau of Geology and Mineral Investigation. Local chronicles of the regional geology in Guangdong Province[R]. Guangzhou: Guangdong Bureau of Geology and Mineral Investigation, 1988.(in Chinese))
- [4] 林本海, 麦劲儒, 李业茂. 嵌岩灌注桩设计和勘察中若干问题的探讨[J]. 建筑结构, 1998, (11): 15 - 17.(Lin Benhai, Mai Jingru, Li Yemao. Research on design and investigation of cast-in place piles embedded rock[J]. Journal of Building Structures, 1998, (11): 15 - 17.(in Chinese))
- [5] 广东省行业标准编写组. 建筑地基基础设计规范(DBJ15 - 31 - 2003)[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.(The Professional Standards Compilation Group of Guangdong Province. Code for Design of Building Foundation(DBJ15 - 31 - 2003)[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2003.(in Chinese))
- [6] 广东省地质勘查局. 广东省广州幅、江门幅1:200 000区域水文地质普查报告[R]. 广州: 广东省地质勘查局, 1981.(Guangdong Bureau of Geology and Mineral Investigation. General survey report of the ratio 1:200 000 regional hydrological geology of Guangzhou and Jiangmen units of Guangdong Province[R]. Guangzhou: Guangdong Bureau of Geology and Mineral Investigation, 1981.(in Chinese))
- [7] 陈冠雄, 黄国宣, 洪宝宁, 等. 广东省高速公路软基处理实用技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005.(Chen Guanxiong, Huang Guoxuan, Hong Baoning, et al. Practical Technology of Highway Subgrade Treatment in Guangdong Province[M]. Beijing: China Communications Press, 2005.(in Chinese))
- [8] 广东省地质科学研究所. 1:50 000广州幅地质图、基岩地质图说明书[R]. 广州: 广东省地质科学研究所, 1989.(Institute of Geological Sciences of Guangdong Province. Specification sheets of the ratio 1:50 000 geologic map and bedrock geologic map of Guangzhou Unit[R]. Guangzhou: Institute of Geological Sciences of Guangdong Province, 1989.(in Chinese))
- [9] 徐至均, 李智宇. 预应力混凝土管桩基础设计与施工[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.(Xu Zhijun, Li Zhiyu. Design and Construction of Prestressed Concrete Pipe Pile Foundation[M]. Beijing: China Machine Press, 2005.(in Chinese))
- [10] 广东省地质勘查局水文工程地质一大队. 琼州海峡过海隧道工程地质调查报告[R]. 湛江: 广东省地质勘查局水文工程地质一大队, 1986.(The First Party of Hydrogeology and Engineering Geology, Guangdong Bureau of Geology and Mineral Investigation. Report of engineering geology investigation of the cross-sea tunnel engineering in Qiongzhou Channel[R]. Zhanjiang: the First Party of Hydrogeology and Engineering Geology, Guangdong Bureau of Geology and Mineral Investigation, 1986.(in Chinese))