

RUANTU DIJI GONGCHENG DIZHI TEXING PINGJIA
YI FOSHANSHI ZHONGXINCHENGQU WEILI

软土地基工程地质特性评价 ——以佛山市中心城区为例

毛绪美 易珍莲 钟晓清 梁广星 杨鹏 著



中国地质大学出版社
ZHONGGUO DIZHI DAXUE CHUBANSHE

RUANTU DIJI GONGCHENG DIZHI TEXING PINGJIA
YI FOSHANSHI ZHONGXINCHENGQU WEILI

软土地基工程地质特性评价

——以佛山市中心城区为例

毛绪美 易珍莲 钟晓清 梁广星 杨 鹏 著



中国地质大学出版社
ZHONGGUO DIZHI DAXUE CHUBANSHE

内 容 提 要

有效预测软土地面沉降可以为城市建设和规划提供科学依据,也是城市地质环境评价的重要内容。在标准化研究区所有钻孔的基础上,应用 GMS 软件构建了佛山软土空间格架,基于太沙基渗流固结理论,采用分层总和法预测了佛山市软土地面沉降量。对比两种工况及佛山市中心城区地面沉降现状,说明进行地基处理能大大减小软土地基地面沉降量;未来进行工程建筑时,进行必须的地基处理可以有效减少软土地基地面沉降灾害的发生。利用 MAPGIS 空间分析功能,对佛山市中心城区工程地质特性进行评价并分区,为城市发展规划提供科学依据。

图书在版编目(CIP)数据

软土地基工程地质特性评价——以佛山市中心城区为例/毛绪美,易珍莲,钟晓清,梁广星,杨鹏著. —武汉:中国地质大学出版社,2010.9

ISBN 978-7-5625-2434-2

I. 软…

II. ①毛…②易…③钟…④梁…⑤杨…

III. 软土地基-工程地质-研究-佛山市

IV. ①TU471.8②P642.13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 041613 号

软土地基工程地质特性评价——以佛山市中心城区为例

毛绪美 易珍莲
钟晓清 梁广星 著
杨 鹏

责任编辑:王凤林

责任校对:张咏梅

出版发行:中国地质大学出版社(武汉市洪山区鲁磨路 388 号)

邮政编码:430074

电话:(027)67883511

传真:67883580

E-mail:cbb@cug.edu.cn

经 销:全国新华书店

http://www.cugp.cn

开本:787 毫米×1 092 毫米 1/16

字数:205 千字 印张:8

版次:2010 年 9 月第 1 版

印次:2010 年 9 月第 1 次印刷

印刷:武汉教文印刷厂

印数:1—1 000 册

ISBN 978-7-5625-2434-2

定价:26.00 元

如有印装质量问题请与印刷厂联系调换

前 言

广东省佛山市是国家城市地质环境调查与评价研究的 4 个试点城区之一,本书是佛山市中心城区软土地基工程地质特性评价专题研究成果。对城区的软土地基工程地质特性进行评价,是城市环境地质研究的一个重要方面,其有利于评估城市建设区和发展规划区的优越地质环境条件或制约因素,为城市规划发展提供参考。常用的工程地质环境特性评价方法有模糊综合判定法、模糊聚类法、信息量统计法等。这些评价方法仅从地质条件方面进行评价,缺乏利用 GIS 技术对地质环境空间格局进行描述。本书以佛山软土地面沉降研究为例,基于 GMS 和 MAPGIS 对软土地基工程地质特性进行评价,建立研究区域的空间格架,并在此基础上进行空间分析,最终综合得出研究区分区图。

系统收集和整理广东省(或广东省佛山市)自然地理、社会经济与发展规划、地质、构造(含新构造运动)、地质灾害、人工建筑物分布等资料,特别整理了广东省佛山市更新世以来古地理环境的演化过程和已有的软土相关资料。把“以软土为研究对象,从地质环境演化的角度探讨软土沉降规律,并比照人类工程活动引起的沉降”作为工作指导原则。针对佛山市中心城区软土地质灾害问题,依托先期三维地质结构调查,调查评价佛山市中心城区软土的分布及其特性,深入研究因软土固结沉降产生的地质灾害规模与危害状况等,根据地质环境条件、地质灾害现状及危险性,划分适宜发展区、基本适宜发展区及高风险区,从地学角度论证已有城市规划的合理性,提出防治软土地基沉降地质灾害的措施和建议。

在标准化研究区所有钻孔的基础上,应用 GMS 软件构建了佛山软土空间格架,GMS 构建的研究区软土分布和厚度与其他方法相比更加形象和直观。以佛山市未来城市发展中工程建筑物为附加应力,选取各层不同的岩土体物理力学参数,以太沙基渗流固结理论为指导,应用分层总和法分别计算了按照建筑地基基础设计规范 GB50007—2002 的地基处理和不按规范进行地基处理两种工况下软土地面最大沉降量。在获得的 GMS 三维立体沉降图中就可以查询任何一个地点软土的厚度、力学参数、建筑物附加应力、沉降量等情况,并且可以从不同方向、不同角度查看整个工程区的沉降情况,获得工程区的地下虚拟现实,GMS 构建的研究区软土地面沉降情况非常形象和直观。同时,对比两种不同工况后发现研究区软土地基对建筑物的影响明显,佛山市中心城区修建建筑物时必须进行软土地基处理。

由于佛山市中心城区经济发展迅速,城市化进程非常快,人类工程活动对地质环境破坏强烈,要准确查明建筑物沉降历史比较困难,对软土地基沉降的预测有一定的局限性。由于知识水平所限和时间仓促,难免存在诸多错误和不妥之处,请同行和读者不吝指出。在此向引用的主要参考文献的作者们表示衷心感谢,同时也对可能遗漏的参考文献的作者们表示谢意。

作者

2009 年 12 月

目 录

第一章 软土概论	(1)
第一节 软土及其成因类型	(1)
第二节 软土的工程性质	(2)
第三节 软土沉降研究现状	(4)
第四节 研究意义	(7)
第二章 区域地质环境	(11)
第一节 自然地理	(11)
第二节 气象水文	(12)
第三节 地层与构造	(13)
第四节 水文地质与工程地质	(17)
第三章 研究区软土基本特征	(21)
第一节 研究区第四纪古地理演化	(21)
第二节 软土发育与分布特征	(22)
第三节 软土工程力学性质	(28)
第四节 软土工程地质问题	(32)
第四章 软土地基沉降分析与预测	(35)
第一节 软土地基沉降现状	(35)
第二节 软土地基沉降分析	(37)
第三节 沉降预测模型的建立	(40)
第四节 软土地基沉降计算	(43)
第五节 沉降预测结果分析	(48)
第五章 软土地基工程地质特性评价	(53)
第一节 软土地基工程地质特性评价方法	(53)
第二节 软土地基沉降分区	(54)
第三节 软土地基沉降灾害防治分区	(59)
第六章 软土地基沉降灾害防治对策与措施	(64)
第一节 软土地基沉降灾害防治对策	(64)
第二节 软土地基沉降灾害防治措施	(65)
附件 佛山软土钻孔标准化及其力学参数	(68)
主要参考文献	(120)

第一章 软土概论

第一节 软土及其成因类型

一、软土

软土是指滨海、湖沼、谷地、河滩沉积的天然含水量高、孔隙比大、压缩性高、抗剪强度低的细粒土。具有天然含水量高、天然孔隙比大、压缩性高、抗剪强度低、固结系数小、固结时间长、灵敏度高、扰动性大、透水性差、土层层状分布复杂、各层之间物理力学性质相差较大等特点。

不同行业对软土的定义略有不同,如《工程地质手册》(第三版,P475 页)对软土的定义:“软土一般是指天然含水量大、压缩性高、承载能力低的一种软塑到流塑状态的黏性土。如淤泥、淤泥质土以及其他高压缩饱和黏性土、粉土等”;我国建设部《软土地区工程地质勘察规范》(JCJ83—91)规定凡符合以下三项特征即为软土:①外观以灰色为主的细粒土;②天然含水量大于或等于液限;③天然空隙比大于或者等于 1.0。有的规范则主要从定量的方面给出软土的定义,如《岩土工程勘察规范》6.3.1 条的定义如下:天然孔隙比大于或等于 1.0,且天然含水量大于液限的细粒土应判定为软土,包括淤泥、淤泥质土、泥炭、泥炭质土等,其压缩系数大于 0.5MPa^{-1} ,不排水抗剪强度小于 30kPa ;我国铁路部门建议以下列指标作为区分软土的界限:天然含水量接近或者大于液限;孔隙比大于 1;压缩模量小于 4000kPa ;标准贯入击数小于 2;静力触探贯入阻力小于 700kPa ;不排水强度小于 25kPa 。

二、成因类型

软土按照沉积环境可分为滨海沉积型、湖泊沉积型、河滩沉积型和沼泽沉积型四类。

1. 滨海沉积型

滨海沉积在表层广泛分布一层由近代各种营力作用生成的厚 $0\sim 3\text{m}$ 黄褐色黏性土的硬壳,下部淤泥多呈深灰色或灰绿色,间夹薄层粉砂。常含有贝壳及海洋生物残骸。由于河流及海潮的复杂交替作用,而使淤泥与薄层砂交错沉积,受海流与波浪的破坏,分选程度差,结构不稳定,多交错成不规则的尖灭层或透镜体夹层,结构疏松,颗粒细小。

2. 湖泊沉积型

湖泊沉积是近代淡水盆地和咸水盆地的沉积。其物质来源与周围岩性基本一致,为有机质和矿物质的综合物,在稳定的湖水期逐渐沉积而成。沉积物中夹有粉砂颗粒,呈现明显的层理。淤泥结构松软,呈暗灰、灰绿或灰黑色,表层硬层不规律,厚为 $0\sim 4\text{m}$,时而有泥炭透镜体。湖相沉积淤泥软土一般厚度较小,约为 10m ,最厚者可达 25m 。

3. 河滩沉积型

河滩沉积主要包括河漫滩相和牛轭湖相。成层情况较为复杂,其成分不均一,走向和厚度变化大,平面分布不规则。一般地,软土常呈带状或透镜状,间与砂或泥炭互层,其厚度不大,一般小于 10m。

4. 沼泽沉积型

沼泽沉积一般发育在湖盆和海滩上,在地下水和地表水排泄不畅的低洼地带,因蒸发量不足水淹地面的情况下,喜水植物滋生,经年淤积并逐渐衰退形成的一种沉积物,多以泥炭为主,且常出露于地表。下部分布有淤泥层或与泥炭互层。

不同的沉积环境形成的软土结构各异。土体微结构是指土体颗粒及孔隙的排列、形状、接触关系的组合形式。主要内容包括:①单元体特征,包括结构单元体的物质组成、大小、形状、表面特征等;②颗粒的排列特征,主要反映结构单元体之间的空间关系;③孔隙性,包括孔隙的大小、形状、数量以及连通性等方面;④结构连接,主要指结构单元体之间的相互作用或结合的性质。周翠英和牟春梅(2004)对珠江三角洲软土分布及其结构类型进行了划分,研究表明珠江三角洲海积软土以高孔隙性和结构连接、排列(黏土矿物之间的黏结、黏粒与粉粒之间的连接和排列)为主要特征;根据土体微结构特征,将珠江三角洲软土天然状态下的微观结构划分 5 种类型。

(1)蜂窝状结构。在连续沉积或堆积情况下形成的一种多孔、貌似蜂窝的结构。颗粒接触关系以面一面为主,黏粒粒径为 $1\sim 2\mu\text{m}$,黏粒含量高,大于 25%。结构疏松,孔隙率高,可达 60%~90%,天然含水量常超过液限。

(2)海绵状结构。黏粒形成的聚集体,以面一面、边一边的接触方式,形成细小而多孔的网状结构。孔隙较均匀地散布在集合体之间,黏粒含量高,大于 30%,结构疏松,强度低。

(3)骨架状结构。黏粒含量高,粉粒含量较低。以粉粒为骨架,构成松散而均匀的多骨架结构,黏粒不均匀地呈薄膜状覆于颗粒表面或在粉粒之间,起黏结作用,孔隙率高。

(4)絮状结构。在珠三角淤泥中发现的一种比较特殊的结构。此种结构的黏粒含量大,黏粒之间以面一面接触,黏土矿物以高岭石为主。黏粒层叠,呈长絮状集合体,具成层性,粉粒独立地散布在集合体周边。孔隙率大,可达 50%~60%。其间的裂隙分布于长絮状集合体间,不均匀。

(5)凝块状结构。黏粒组成的微集合体集成粒径大于 $30\mu\text{m}$ 的团块,粒径之间的接触以面一面为主,粉粒含量较少,散布于团块表面或在团块之间,起黏结作用,常有贯通各团块之间的无定向裂隙发育。结构比蜂窝状稍密。

第二节 软土的工程性质

特定的沉积环境决定了各类软土物质的组成和微观结构,从而形成了软土一系列的特殊性质,最基本的是其“三低三高”特性,即高含水量、高孔隙比、高压缩性、低强度、低渗透性、低固结系数。

软土天然含水量高。软土多呈软塑或半流塑状态,其天然含水量很大,一般超过 30%。山区软土含水量可高达 70%,甚至达 200%。软土的饱和度一般大于 90%,液性指数多大于 1。

软土的孔隙比大,具有高压缩性的特点。软土的压缩系数一般在 $0.5 \sim 2.0 \text{MPa}^{-1}$ 之间,最大可达 4.5MPa^{-1} 。如其他条件相同,则软土的液限愈大,压缩性也愈大。大部分软土是由磷片状土粒以分散结构或絮凝结构组成的,土的压缩性主要是由于土粒的挠曲、变形和相对滑移而使得土体积的变小所致,具体表现为孔隙中水和气体的向外排出。

软土的透水性很低,其渗透系数一般在 10^{-7}cm/s 数量级上,有的甚至低至 10^{-10}cm/s 。因此软土固结需要相当长的时间。当地基中有机质含量较大时,土中可能产生气泡,堵塞渗流通道而降低其渗透性。

软土的抗剪强度很低,并与排水固结程度密切相关。在不排水剪切时,软土的内摩擦角接近于零,抗剪强度主要由内聚力决定,而软土的内聚力值一般小于 20kPa 。经排水固结后,软土的抗剪强度便能提高,但由于其透水性差,当应力改变时,孔隙水渗出过程相当缓慢,因此抗剪强度的增长也很缓慢。

软土具有絮凝结构,是结构性沉积物,具有触变性。当其结构未被破坏时,具有一定的结构强度,但一经扰动,土的结构强度便被破坏。当软土中含亲水性矿物(如蒙脱石)多时,结构性强,其触变性较显著。软土具有流变性,其中包括蠕变特性、流动特性、应力松弛特性和长期强度特性。蠕变特性是指在荷载不变的情况下变形随时间发展的特性;流动特性是土的变形速率随应力变化的特性;应力松弛特性是在恒定的变形条件下应力随时间的延长而逐渐减少的特性。土的流变性质受许多因素的影响,在不同的条件下显示出不同的性状。为了尽量准确地预测各种因素对现场土的流变性质的影响,在试验测定上的有关流变性质指标时应尽量符合现场实际条件,避免因条件变化带来不应有的误差。

(1)矿物成分的影响。黏粒含量及其矿物成分对土的流变性质有很显著的影响,黏粒含量愈多,塑性指数愈大,流变性质也愈显著。黏粒含量相同时,含蒙脱石土样的流变性最显著,伊利石次之,高岭石的流变性相对最不显著。

(2)含水量及孔隙水性质的影响。含水量大小对土的流变性具有明显影响,含水量愈大,流变性质也愈显著;孔隙水的性质对土的流变性质影响明显,孔隙水黏性愈大,结合水的黏性也愈大,土的流变性质也愈明显。

(3)应力历史和应力路径的影响。流变土体的变形和强度与时间有关,故现有固结应力作用持续的时间及历史上应力变化过程对以后土的变形和强度也将产生影响。试验研究表明,在同样大小偏应力作用下,平面应变试验和轴对称三轴试验测得的蠕变曲线及破坏时间是不同的,因此土的流变性质受应力路径的影响。

(4)应力大小的影响。当剪应力小于某一值时,土的蠕变现象逐渐减弱,应变速率也随之而逐渐减小,最后趋向于零,而永远达不到破坏,这种现象称为阻尼蠕变。若应力大于某一值时,则产生非阻尼蠕变。

(5)温度的影响。在常规试验中,一般不考虑温度对土的性质影响。实际上,温度变化时,孔隙水的黏滞性和压力都将发生变化,从而影响土的流变性质。一般说来,温度越高,蠕变速率越大,松弛应力越小。当温度变化很大时,甚至可能使土的蠕变从阻尼型变为非阻尼型。

第三节 软土沉降研究现状

一、城市地质环境研究

近 50 年来,随着人类文明的进步,世界城市化进程迅速扩张,城市化已经是、将来也是我国社会发展的必然趋势。城市人口急剧增加,使得城市地质环境所受影响和压力与日俱增,与城市土地利用、资源开发、废物处置、环境保护和灾害防治等有关的地质问题日益突出,甚至直接影响和制约着城市的可持续发展。同时,城市的可持续发展需要足够的自然资源(如土地、水、建材及其他矿产资源)作为物质基础。

在城市规划、城市建设、城市安全和城市管理中经常涉及到许多地质、地质环境和地质灾害等问题,这些问题直接或间接与城市地区的基础地质、水文地质条件、岩土工程性质及人类工程活动相关。为解决或减少城市出现的地质问题或灾害,欧美发达国家自 20 世纪 90 年代陆续开展了城市及周边地区的地质调查工作,采集多学科地学信息,建立了城市灾害数据库系统,为城市规划、城市建设、城市安全、城市管理与城市防灾减灾打下良好基础。一些发展中国家也相继开展了城市地质灾害、水资源利用与环境地质方面的城市地质调查,对城市土地利用与利用、城市安全和城市发展起到了不可替代的重要作用。

20 世纪 80 年代中期以来,亚洲各国对城市地质工作的重要性认识逐渐提高,各国地质调查机构纷纷开展了与城市地质相关的工作。近 10 年来,随着现代计算机技术的高速发展,英国、美国、加拿大等国家针对地学资料在城市规划与管理运用中存在的仅有表层的、粗糙的地质资料的缺憾问题,先后开展了新一轮的城市地质调查,不但对原有地学数据进行了更新,而且更加注意其高效实用性和准确性。

鉴于西方发达国家百年来城市化的经验教训,发达国家和大多数发展中国家认识到有必要进行城市地质调查,为城市规划和土地利用规划提供科学依据和指南,以尽量减少城市地质灾害和环境问题,保持国家和城市的可持续发展。因此,作为与经济和社会发展密切相关的城市地质工作,成为了 2004 年 8 月在意大利佛罗伦萨召开的第 32 届国际地质大会的一大亮点,这一现象表明城市地质工作已是国际地质调查工作前沿的一个新领域,而且国际上在国际地科联(IUGS)之下已成立了城市地质工作组(Urban geological working group)。

目前,国外城市地质工作主要体现在以下 3 个方面。

1. 城市基础地质或城市地质环境背景调查

城市是建立在地质体之上的城市,城市的发展受基础地质背景和地质资源的限制,城市布局、城市地下空间的利用与城市地质构造有关,城市的安全制约于城市地质环境条件,因此要实现城市的可持续发展,必须在详细查明城市基础地质结构和地质资源、构建系统全面的城市地区三维立体地质结构的基础上进行城市的规划,同时,城市基础地质调查是查明与防治地质灾害、建立城市安全体系的基础。

英国较早开展“应用地质填图”计划,在 20 世纪 90 年代初期,设立了“城市地学”子项目,已经完成了至少 25 个城市地质项目。加拿大于 20 世纪 70 年代开发了城市地质自动化系统并投入使用,以实现城市中心地区的有序和高效发展,现在已推广到加拿大 26 个主要城市。美国地

质调查局依靠现代填图技术开展了“城市动态填图”项目和“城市地质灾害调查与填图计划”。澳大利亚于 1996 年实施了“城市项目”,德国于 20 世纪 90 年代将工作重点由矿产勘查转向地质环境调查研究,为城市规划建设和地下水利用服务。荷兰进行了基于 GIS 平台的数字化的各种区域工程地质和环境地质填图工作,大约有 200 个城镇进行土壤技术质量编图并建立基础地质信息数据库。受 1923 年大地震造成的毁灭性灾难影响,日本东京政府设立了“城市地质项目”,建立了地质构造数据库。洛杉矶、伦敦和莫斯科等主要城市开展了“地下深部调查和填图项目”,新西兰北岛、泰国曼谷、巴基斯坦卡拉奇、菲律宾马尼拉、印尼雅加达、孟加拉达卡和印度杰伊德布尔等城市也相继开展了城市地质灾害、水资源利用与环境地质方面的城市地质调查,为城市土地规划与利用、城市安全、未来城市的发展起到不可替代的重要作用。

2. 开展为城市地下空间开发服务的区域三维地质结构调查

城市的地下空间利用越来越成为城市规划发展的重要方向,是国际城市发展开发的前缘。然而,传统地质填图不能满足这一需要,开展浅层三维立体城市地质调查是地质工作的必然方向。显然,查明城市及区域三维地质结构,为地下空间开发规划服务;了解城市地下工程条件和工程地质环境安全性,为地下空间设施建设服务;模拟地下开发对地下生态环境的影响,维护城市可持续发展,是地下空间地质调查的主要目标。

3. 以城市地质灾害调查与防治为重点的地质工作

各城市地质背景不同,地质灾害类型不同,调查的重点、调查的方法也不同。俄罗斯开展了莫斯科城市区地下石炭纪灰岩中的喀斯特溶洞形成与发育情况的调查,评价喀斯特溶洞导致的塌陷对城市交通线、城市工业中心、矿山采矿、地下设施规划以及农业的重大影响。美国调查了加利福尼亚州地震带大断裂的活动,日本对东京湾 Chiba 开发区地震引起的岩石液化、流态化进行了调查研究,墨西哥市北部开展了落石崩塌灾害填图与评估,智利开展了海岸带国土开发环境参数的调查,葡萄牙在考依姆布拉地区进行了降雨与滑坡关系的调查。一些国家或城市也将地质灾害填图与评价作为重要内容,如加拿大自然资源部提出的“城市地质计划”,美国科学基金会推出的“城市研究开创性计划”,英国自然环境研究委员会的“城市改造与环境计划”,美国和巴西若干城市的“地质灾害调查与填图计划”,澳大利亚的“城市社区地质灾害易损性计划”,以及洛杉矶、东京、伦敦和莫斯科等城市的“地下深部调查和填图项目”等。

与国外相比,中国的城市地质调查工作具有一定的计划性。1989 年,中国在 100 余座城市中开展了为城市规划、建设和管理服务的综合勘查、地质论证、供水勘查、工程地质及环境地质勘查等方面的工作,在北海、三亚、秦皇岛、汕头、石家庄、桂林等 38 个城市开展了为城市规划决策服务的综合评价工作,广东省则完成了广州地区、湛江和汕头地区的相关工作,但目前尚缺少权威性的综合调查研究成果,在城市建设规划、城市地下空间开发与利用、城市地质灾害防治和地质环境保护等方面,缺乏最基本的基础地质资料。

目前,中国制定了城市灾害防治计划和防治目标以及地质环境保护规划,完成了北京、天津、上海等重要城市的环境地质综合勘查评价,计划在 2010 年前,完成 100 座重要城市的地质环境保护规划工作。自 2004 年开始,中国地质调查局与地方政府合作在北京、上海、天津 3 个直辖市和杭州、南京、广州 3 个省会城市开展了系统的城市地质调查工作。我国当前阶段城市地质调查主要内容包括城市及周边地区地表地质与地理地貌(区域构造、地层、岩石、古生物、古地理环境等)、地下空间三维地质结构与深部活动构造、地质灾害、地下水资源与质量、环境地球化学、矿产与旅游地质资源和土地开发利用状况等方面的调查,为政府进行城市规划、建

设、管理服务。我国前期已开展的 6 个城市地质调查工作均已取得了初步成果,上海市已初步构建了可视化三维地质结构,北京市完成了奥运场馆地区三维地质结构构建与隐伏断裂调查及其活动性研究、全市垃圾分布调查及其环境影响评价,广州城市地质调查工作也已完成了 60% 的面积性调查。鉴于城市地质的实用效应,2005 年,安徽省合肥市由地方财政单独出资开展了全市城市地质调查工作;2006 年,重庆市亦已立项,拟地方财政单独出资 6 000 万元开展重庆市城市地质调查工作。

二、软土沉降研究

软土的理论研究集中在微观和宏观两个方向。在微观方面,为了阐明软土的特性和内部机理,我国著名学者高国瑞教授出版了专著《近代土质学》。该书以电化学、胶体化学为基础,系统地研究了软土的物质成分及微观结构,并分析了它们对软土工程的影响程度。在宏观方面,沈珠江院士以大量的室内试验资料为基础,对软土的特性尤其是其强度特性进行了系统的研究,全面探讨了软土在不同应力条件下的应力应变关系以及其表现出来的强度特性。研究表明,软土的压缩曲线和剪切曲线都可以分成两段,后一段特性可以从通常的室内试验进行测试,前一段则易受取样扰动的影响,只能通过原位测试方法来确定。

软土对人类工程的主要影响是引起地面沉降。地面沉降是在自然和人为因素作用下,地壳表层土体压缩而导致地面标高降低的一种环境地质现象。地面沉降具有生成缓慢、持续时间长、影响范围广、成因机制复杂和防治难度大等特点,是一种对资源利用、环境保护、经济发展、城市建设和人民生活构成威胁的地质灾害。

现有文献资料表明,1891 年墨西哥城最早记录地面沉降现象,但当时由于地面沉降量不大,危害也不明显,所以没有引起人们的重视。20 世纪意大利的 Ravenna 地区发生了大面积的地面沉降,起初沉降不大,每年数毫米,第二次世界大战后,由于过度抽取地下水,以每年 110mm 的沉降量剧增。美国于 1922 年最早在加州萨克拉门托 San Joaquin 流域发现沉降,1920—1969 年地下水位下降达 137m,累积地面沉降达 2.6m,影响范围 9 100km²。至 20 世纪 70 年代初期,美国已有 37 个州因开采地下流体而产生了不同程度的地面沉降现象;至 1995 年,美国 50 个州均有地面沉降发生。据统计,目前世界上已有 60 多个国家和地区发生地面沉降,包括美国、中国、日本、墨西哥、意大利、泰国、英国、俄罗斯、委内瑞拉、荷兰、越南、匈牙利、德国、印度尼西亚、新西兰、比利时、南非等国家。

20 世纪 20 年代初,中国最早在上海和天津市区发现地面沉降灾害,至 20 世纪 60 年代两地地面沉降灾害已十分严重。20 世纪 70 年代,长江三角洲主要城市及平原区、天津市平原区、华北平原东部地区相继产生地面沉降;80 年代以来,中小城市和农村地区地下水开采利用量大幅度增加,地面沉降范围也由此从城市向农村扩展,在城市上连片发展。同时地面沉降地区伴生的地裂缝加剧了地面沉降灾害。自 1921 年上海市区最早发现地面沉降以来,至今中国已有 90 多个城市和地区发生不同程度的地面沉降,到 2003 年沉降面积达 93 885km²。代表性的地区有上海,天津,浙江的宁波、嘉兴,江苏的苏州、无锡、常州,河北的沧州、唐山、衡水、保定、任丘、南宫,山东的菏泽、济宁、德州,安徽的阜阳,山西的临汾、太原、大同,河南的安阳、开封、洛阳、许昌、郑州,台湾的台北、彰化、屏东等 8 个县市,陕西的西安,以及北京和松辽平原等。在这些地区中最为突出的是以上海为代表的长江三角洲、以天津为代表的环渤海区和西安等地。

国内外有关地面沉降的预测方法很多,主要有模糊神经网络、灰色理论等。例如王寒梅和唐益群等利用灰色理论建立非等时距 GM(1,1)模型,对上海路家嘴地区因工程环境效应因素引起的地面沉降进行了预测,并和实测数据进行了比较,预测值与实测结果基本相符,具有较好的精度。李涛和潘云等在分析天津市地面沉降特点的基础上,结合人工神经网络原理,预测了 2010 年天津市地面沉降的情况。当沉降均匀平稳时,宜采用灰色预测,当沉降波动较大时,宜采用人工神经网络预测。沉降是一个受多方面因素影响的复杂过程,其影响因素与沉降之间存在着复杂的非线性关系,正确选择预测方法和建立相应的模型,对于精确的预测沉降和防止事故的发生显得尤为重要。

软土沉降理论分析的方法主要是理论公式法,它首先确定在荷载作用下压缩土层中应力的增量,然后再采用合适的土的应力—应变关系估算这些力增量所引起的沉降。但由于现有的弹塑性的本构模型不能很好地反映天然软土的规律,必须利用数学分析方法(如有限元法),它可以计算荷载作用下土中任意一点的应力和应变情况。虽然数值分析方法有一定难度,在工程中未能得到广泛应用,但是,这是软土沉降分析的发展方向。

第四节 研究意义

《佛山市近期建设规划(2006—2010 年)》(粤府[2007]6 号文)明确指出,2010 年佛山市将初步形成紧密联系的组团城市新格局,基本建设成为城市功能完善、产业重点突出、生态环境良好、社会稳定和谐、水乡特色鲜明、历史文化底蕴深厚的现代化大城市。基本形成两个百万以上人口组团和 5 个 30~50 万人口组团的生态组团城市框架,以中心组团新城区和大良容桂组团新城区的建设为重点,加快“2+5”组团城市建设,以及由以多个组群式节点为发展主体的组团式大城市新格局,形成“簇群模式、多级格局、组团城市”的空间形态,实现“走向网络型、簇群互动与理性发展的城市空间系统”的城市空间规划目标(图 1-1)。建成工业布局合理、

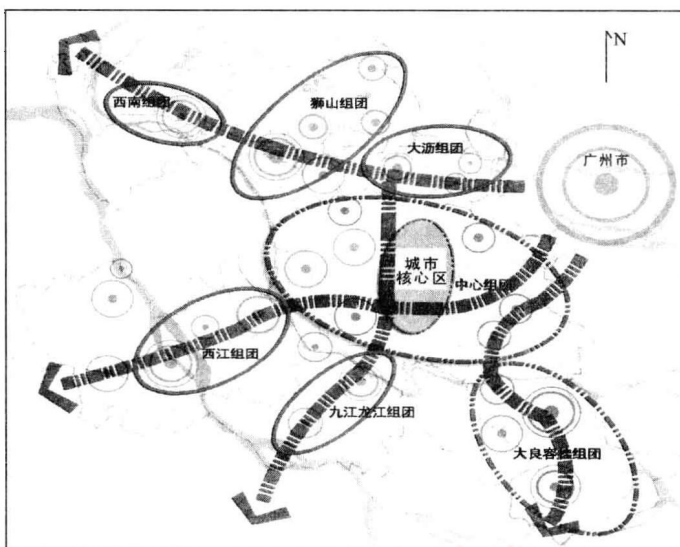


图 1-1 佛山市城市发展框架

先进发达的制造业基地,快速发展以物流业为重点,面向本地优势产业的现代服务业。构筑“二纵二横两环”高速公路系统和“五纵九横三国道七支线”快速干线系统组成的干线公路网,实现以各组团中心为节点的半小时交通圈。同时,大力推进佛山市快速轨道交通网、佛山市境内珠三角城际轨道交通网和铁路网的建设,加快广佛地铁建设,加强佛山与广州道路交通网络的对接,为广佛都市圈的构筑创造条件。随着佛山城市建设的迅速发展,人类活动对地质环境破坏与影响与日俱增,城市环境地质问题日益突出。

一、城市化进程中面临的主要城市地质环境问题

1. 突变性城市地质环境问题影响佛山城市安全

近年来,佛山市地质灾害经常发生,表现在地面沉降、地面塌陷和崩塌、滑坡、泥石流等地质灾害的突变性危害。据不完全统计表明,1991—2004年之间地质灾害给佛山市人员、农田等造成了较大的危害,其中死亡16人、伤3人,损坏民房19间,损坏农田5.358亩,受威胁人员1140人,民房1120间,农田12.3亩。2005年7月12日,南海九江镇沙口西江大堤出现险情,有11栋楼房以及其他建筑相继滑入滔滔西江,其中6座是居民楼,塌方面积达2050m²。2006年4月10日下午,佛山市南海区桂和路扩宽工程现场出现隐伏岩溶塌陷,公路路面很快塌陷进溶洞中,形成了一个面积近200m²、深度约10m的大洞,塌方一度造成佛山通往广州花都的交通瘫痪。2006年8~9月,佛山就发生崩塌17处、滑坡8处、泥石流1处及地面沉降1处,其中2006年8月4日,受“派比安”台风带来的特强降雨影响,国家4A级旅游区西樵山发生了早见的泥石流地质灾害,共造成了9人死亡,6000多人集中迁移。

2. 地基岩土의 复杂性影响高层建筑的建设

佛山地处珠江三角洲西部,西江和北江两岸,一方面分布着大量的第四纪松散沉积物,另一方面北东、北西向断裂构造发育。这些第四纪松散沉积物厚度巨大,分布不均匀,大部分为饱和土,其承载力低,属软弱地基。加上佛山市地下水位高,地层中地下水丰富,对进行软基处理也是不利因素。在这些软弱地基上修建高层建筑和对浅层地下空间进行开发,岩土地质条件并不理想,其主要危害表现在建筑物沉降过大、建筑物倾斜与开裂、基坑失稳、滑移或坑底隆起、桩位偏移或断桩、缩颈及地面隆起问题,而软弱地基的施工和地基处理是岩土工程的主要难题。区内发育北东、北西向断裂构造是块体不稳定的根源,佛山周边历史上有多次破坏性地震发生,是地震较活跃的地区。而且,佛山的禅城—顺德一带是珠江三角洲地区沉降最大的地区,年最大沉降量大于2.5mm。过去由于人们对地下地质条件和岩土工程条件认识不够,为城市建设埋下了许多隐患。如2004年2月3日南海九江镇潭涌口辉利大酒店对面发生地陷系因河道干枯、河床和堤坝收缩后导致,岭南明珠体育馆就因为处于断裂构造上而被迫修改设计方案。

3. 地下空间开发利用面临的地质环境问题

城市土地资源不足,以及地下空间具有节能、洁净、噪音少、安全等优点,使得地下空间成为重要的自然资源。目前,佛山已初步具备大规模开发地下空间开发的经济能力。根据规划,在广佛地铁的基础上,结合规划的珠三角城际轨道交通网络和广州轨道交通体系,佛山将构筑佛山轨道交通网络。由于佛山处于珠江三角洲地区,浅层地下空间(<50m)主要处在第四纪松散沉积层或基岩风化层与石灰岩中。这些松软的砂层、软土层和岩溶层,由于其地质环境特殊,容易产生诸多工程地质和地质环境问题,引起突发性的各种地质灾害,如海平面上升与潮

灾、边坡失稳、砂土液化、岩溶水涌出、地面岩溶塌陷、地面不均匀沉降以及软土地基变形等。同时,隐伏的断裂构造也给地下空间的开发利用造成很大限制,甚至会产生严重危害。

二、开展城市地质调查是佛山城市发展的需要

随着社会进步和科学技术的发展,城市化进程不断加快,城市人口迅速增加,城市规模不断扩大,城市对粮食、水资源、建筑材料和能源的需求也日益增大,与城市土地利用、资源开发、地下空间开发、固体废物处置、生态环境保护和地质灾害等问题日益突出,这些问题直接影响和制约着城市的发展。显然,搞好城市规划与发展、解决城市地质环境等问题已成为当务之急,而这些都需要提供详实的城市地质基础资料。因此,客观上需要城市地质调查工作先行。

为贯彻“人口、资源、环境”可持续发展的基本国策,创建和谐社会,保障人们的身心健康,需要开展“以人为本、以人居环境”为主题的城市地质环境条件的调查评价工作,调查评价城市地质资源、城市地质环境及其对城市发展对人类健康的影响,以保证城市建设与人口、资源、环境协调发展。为了从根本上协调和缓解城市经济开发、空间开发与地质环境载体之间的矛盾,使城市向着良性的方向发展,避免或减少城市地质灾害的发生,城市规划者与城市管理者需要了解城市的基础地质、水文地质、工程地质和环境地质特征及其演化规律,以满足城市规划、城市建设、城市安全和城市管理的需要,合理地适应和利用城市的水文地质条件、工程地质条件和环境地质条件,最大限度地利用地质环境条件适宜、基本适宜区,规避高风险区,并予以酌情改造和治理中等风险区,最终使城市管理者对城市的规划、建设做出科学决策。因此,开展佛山城市地质调查是落实城市“科学发展观”的具体体现,也是落实《国务院关于加强地质工作的决定》精神,发挥地质工作为国家 and 区域经济社会发展服务的先行性、基础性作用的具体体现,也是推进珠江三角洲地区城市化进程、保障珠三角地区城市安全和城市防灾减灾的需要。

佛山市目前还存在诸多的城市地质环境问题,为实现佛山市的城市规划发展目标,构建和谐的城市生态结构,需要尽早开展城市地质调查工作,以了解佛山城市及其外围的地质环境特征与演化规律,合理规划开发、利用、保护和综合治理,有效地抵御人类生存环境的不断恶化。从佛山的城市地质环境和地质资源的实际状况和自然属性出发,探讨佛山城市地质与城市可持续发展之路。

在佛山城市发展和地下空间的开发利用中,对地下地质条件的了解至为重要。必须了解地下地质状况的复杂程度、断裂破碎带展布、地下水位的变化、古河道分布与变迁、松散堆积层与风化层的厚度和软弱地基分布状况等。因此,需要开展工程地质、水文地质、地球物理的调查和评价工作。通过城市立体地质调查工作,建立三维地质结构数据库,可以为正在进行的城市建设和城市地下空间开发规划提供最为直接的服务。

在城市总体规划编制过程中需要详实的地质资料作支撑,地铁、过江隧道和地下商业街等地下空间开发、主干交通规划需要地下三维空间地质结构资料,对于城市土地利用规划和城市环境保护规划需要了解表层水土体、地下水质量与污染状况,城市减灾防灾规划也需查明地质灾害的空间分布,城市突发性事件的快速处理需要地质资料作支撑。这样,佛山市原有的城市地质资料已不能满足现有城市规划与建设的需求,因此,开展佛山城市地质调查是佛山城市规划、建设和管理的需要。

佛山市是广东省第三大城市,居住人口几百万。各种城市地质问题日益突出,如地面沉降、地面塌陷、崩塌和滑坡,水资源短缺、水土流失,粗放式的工业化生产和垃圾不合理堆放造

成城市水土严重污染,环境严重恶化,加上人类活动已强烈地参与到自然地质作用之中,从而使佛山城市地质环境问题日益突出。佛山市北东和北西向断裂构造发育,历史上有多次破坏性地震发生,佛山周边是地震活动较活跃的地区。晚近时期,区内仍有不同形式和不同程度的潜在构造活动,如广从断裂与沙湾断裂缓慢蠕变、西江断裂的断陷及广三断裂的走滑等。在城市建设中多次穿越大断裂破碎带,造成施工困难或者安全事故,人类工程也将增大诱发地震的可能性。这就要求我们需要进一步加强对新构造运动尤其是断裂构造活动性的调查研究。总之,防患各种地质灾害,构筑城市安全体系,需要城市地质工作来提供基础技术方面的支撑。

随着人民生活水平的提高和现代科学技术的迅速发展,人们对自己生活质量的要求也相应地提高。人民群众对自己居住的城市建设与居住区越来越关注。加上因城市迅速发展带来的环境恶化,如水土污染和引发的灾害特别是地质灾害,使得人们普遍比较关注自己生存环境的质量和安。因此,地质环境的安全已成为企业家和市民投资的决策依据,最简单的例子就是市民在选购商品房时已开始考虑其地下的地质结构是否稳定了。这就出现了社会公众对周围环境信息特别是地质信息的需求。为了满足这一需求,有必要进行城市地质数据库的建设,构建城市地质信息系统,充分体现以人为本的环境知情权。

城市化是产业革命和经济发展的必然结果,人类社会的可持续发展重点和关键在城市,为保持其可持续发展,城市必须要有足够的地质环境容量和质量来给予支撑。城市是建立在地质体上的城市,因此,城市地质工作是在城市及其周边地区或城市潜在发展地区的特定空间范围内,综合考虑各种地质要素,研究其对城市发展所提供的地质环境与资源,评价其促进因素和制约条件以及城市发展对其产生的影响,为城市规划、建设和管理服务的地质工作。城市地质工作的目的就是查明城市的地质环境条件和地质资源状况,建立起三维可视化城市地学信息管理与服务系统,补充和建立“数字佛山”、“数字城市”和“数字广东”,达到为城市规划、建设、管理和可持续发展提供基础性的地质信息服务和决策平台。

开展城市地质调查不仅是一项查清佛山市地质环境和自然资源家底的重要工作,而且是通过佛山的地质、环境和灾害进行详细调查和监测及对地质数据进行多学科综合与研究的基础上,可以从根本上协调和缓解城市土地资源开发、地下空间开发与地质环境载体之间的矛盾,使之向良性方向发展,可以为城市的建设与发展提供基础性、先导性与科学性方面的支撑与服务。因此,佛山城市地质调查是为城市规划、城市建设、城市管理和城市安全提供科学依据的一项迫切的、必要的基础性工作,对高标准推进佛山城市现代化建设、将佛山建成现代化大城市具有非常重要的意义。

第二章 区域地质环境

第一节 自然地理

一、基本概况

佛山市位于广东省中部偏西,珠江三角洲腹地,地处东经 $112^{\circ}23'01'' \sim 113^{\circ}23'10''$,北纬 $22^{\circ}38'45'' \sim 23^{\circ}34'33''$ 。佛山市东倚广州,西接肇庆,南连珠海,北通清远,毗邻港澳。水陆空交通便利,高速公路、主干公路四通八达,广湛铁路经过市内,水路网络纵横,航运便捷,已形成一个公路、铁道、河运齐备,辐射力强的现代交通网络。



图 2-1 佛山市地理位置示意图

佛山市市域面积 $3\,848.49\text{km}^2$,常住人口数量达到 612 万人,其中户籍人口总量达到 357 万人,人口密度 $1\,590\text{人}/\text{km}^2$,辖禅城、南海、顺德、三水和高明 5 个区,36 个镇(街道办),786 个村(居)委会。佛山市为广东省重要的工业基地之一,目前已形成了以家用电器、光机电一体化、电子信息集装备制造、陶瓷及其他材料、纺织服装、金属材料加工与制品、塑料制品、化工、医药、食品饮料、家具用品制造等优势行业为主体的发展格局。广东美的、格兰仕、科龙、北电通信、健力宝及佛山普立华、佛山塑料、陶瓷、照明、华新包装、杜邦鸿基、海天调味、顺达电脑、

溢达纺织等大型企业(集团)拥有雄厚的经济和技术实力,在国内同行中保持领先地位。高新技术产业迅速成长,初步形成以电子信息、数码光学、环保家电和设备、生物工程、新材料等行业为主导的高新技术产业群。

农业以蔬菜、花卉种植和塘渔、禽畜养殖业为主。全市各区镇均有各自的特色农业,如顺德陈村镇的花卉,三水区的白鸭,三水大塘镇的冬瓜、白菜,三水迳口的韭菜花,高明更合镇的葛粉,高明三洲黑鹅等名声大噪,饮誉海内外。

矿产资源丰富,富含花岗岩、石灰岩、油页岩、盐岩、膨润土、石膏、天然气、二氧化碳气、煤、铁、锰、金、银、铅、锌等,其中富湾银矿是国内目前发现的最大的独立银矿床,银储量规模达超大型。

二、地形地貌

佛山市现辖禅城、南海、顺德、高明和三水五区,其“2+5”组团被确定为佛山市城区,其中的中心组团、大良容桂组团为中心城区,面积为723km²。中心城区主体为北江、西江三角洲平原,海拔高度一般小于5m,多在1.2~4m,河汊众多,堆积层厚度大,沉积物细小。平原中零星分布的基岩山丘海拔高度小于100m,坡度15°以下,风化层较厚,达15m以上。在北部有小面积的残留台地,顶部海拔高度20~40m,浑圆低平,风化层厚。地势总体较为低平,起伏较小,以平原为主,其间零星分布有丘陵残丘以及残留台地。

第二节 气象水文

一、气象

佛山市属亚热带季风海洋性气候,温湿多雨,夏无酷暑,冬无严寒。年平均气温22.7℃,最高气温39.2℃,最低气温0.7℃,年无霜期平均为363天;年平均日照时间为1841.1小时。

当地降雨充沛,多年平均年降雨量为1678.7mm,最大年降雨量为2220.2mm(2001年),最小年降雨量为1326.8mm(2004年),降雨集中分布在3~10月,5~8月为雨量最大,降雨量占全年的80%左右。多年平均年蒸发量为1567.3mm,一般夏秋高温期蒸发量大,冬春蒸发量小。年均相对湿度为76.3%,干旱指数1.05。

本区春季至初秋盛行偏南风,秋季至冬末盛行偏北或偏东风。5~10月为台风季节,占全年总数的90%以上,以7月份出现台风最多,强热带气旋年平均1~4次,风力一般为6~9级,最大风速25.8m/s。根据《中华人民共和国公路自然区划图》,本区属华南沿海台风7区。

本区自然灾害有热带气旋、暴雨、洪涝、寒潮、低温阴雨和强大对流天气等,夏季洪涝和夏秋台风是主要的灾害性天气。

二、水文

区内河流纵横交错,珠江水系中的西江,北江在市内通过,属北江及西江下游河网区。其中三水区有西南涌、曲河、芦苞涌、刘寨涌、乐平涌、左岸涌;南海区有平洲水道;禅城区有佛山水道和东平水道;顺德区有甘竹河、马宁水道、东海水道、容桂水道、顺德水道、潭州水道等;高