

# 基于高密度钻孔分析广州城区的软土空间分布特征及其震陷情况\*

毕丽思, 陈小芳\*, 马浩明, 卢帮华

(广东省地震局 地震监测与减灾技术重点实验室, 广东 广州 510070)

**摘要:** 以面积为 270 km<sup>2</sup> 的广州城区为研究区, 利用高密度分布的近 12 000 个钻孔, 判别出广州城区的软土层, 详细分析了其空间分布特征。结果表明: 广州城区内的软土主要为淤泥、淤泥质土, 大部分地段为单层, 埋藏深度小于 6.0 m, 且中部较浅, 南北两侧较深。软土的沉积厚度较大, 并呈现出研究区南部、西部的厚度大, 中部、北部的厚度小, 靠近河流岸边的厚度大, 远离河流的厚度小的特点, 同时还存在 2 个沉积中心。在强烈地震时广州城区内相当一部分面积可能产生软土震陷, 软土震陷区主要集中在研究区的西部和南部。由于软土的厚度与埋深、液性指标和孔隙比等指标不同, 震陷性在空间上呈现出轻微、中等、严重等不同危害程度。

**关键词:** 广州城区; 钻孔; 软土; 地震; 震陷

**中图分类号:** P315.912

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0666(2018)04-0637-07

## 0 引言

软土即软弱粘性土, 是一种在沿海沿河地域常见的特殊性土, 如珠江三角洲就广泛分布着软土。它具有诸多工程不良特性, 而且作为地基, 土层存在沉降变形、抗滑稳定性差和震陷等工程危害(顾宝和, 张福存, 1981; 杨顺安等, 2000; 彭承光, 李运贵, 2004)。历次震害表明, 软土在地震荷载作用下极易丧失强度而产生震陷, 从而导致严重的地震破坏。如 1906 年旧金山地震和 1923 年日本关东地震, 由于土体失稳导致了地下管线的破坏, 进而引起了严重的次生灾害(卢振恒, 2002; 方陵生, 2006)。1975 年海城、1976 年唐山、1985 年墨西哥、1999 年台湾集集、2013 年芦山等地震均产生了因软土地基失稳而引起上部结构破坏甚至坍塌的现象(中国科学院工程力学研究所, 1979; 刘恢先, 1986; 钮泽蓁, 1991; 彭承光, 李运贵, 2000; 齐文浩等, 2013)。因此, 在软土地区, 一旦发生震陷, 将对工程造成难以估量的影响, 人民生命财产安全也将失去保障。

广州作为珠江三角洲以及粤港澳大湾区的建设

中心, 高楼林立、人口密集, 由于濒临南海, 珠江水系穿流而过, 是软土发育的典型地区(周翠英, 牟春梅, 2004; 何萍等, 2017)。据文献记载, 广州城区及其周边曾多次发生破坏性地震, 而其近、远场范围历史上亦曾发生过 6 级以上地震十余次, 其中 7 级以上强震 4 次(郭钦华等, 2008; 梁干, 吴业彪, 2013)。已有研究结果表明, 厚层软弱场地的地震动具有长周期分量丰富的特点, 尤其是大震、远震时, 经过长距离传播已经衰减的地震动在经过深软地基土到达地面后, 可能成为长周期震动十分突出、破坏性极大的强震动, 使工程结构、尤其是高层建筑与大跨度工程, 产生严重破坏(夏法, 黄玉昆, 1992; 彭承光, 李运贵, 2004; 胡聿贤, 2006; 苏永奇等, 2016)。由此看来, 广州城区的软土震陷潜在风险不可低估, 开展软土勘察、分析软土震陷及其防御等研究工作十分必要。虽已有学者分析指出, 软土震陷是珠江三角洲未来场地震害的主要形式之一(郭钦华等, 1995; 宿文姬等, 2006; 韩喜彬等, 2010), 但其利用的钻孔数量少, 大多是基于工程经验作出的定性分析, 在震陷性上没有深入研究。随着广州市工程勘察钻孔数据的积累以及大数据工程的建设, 本文利用海量、高密度的钻孔

\* 收稿日期: 2018-05-09.

基金项目: 广东省省级科技计划项目(2017B030314082)和广东省防震减灾“十二五”规划重点项目(125-22-06)共同资助。

♣ 通讯作者: 陈小芳(1966-), 高级工程师, 主要从事城市震害预测与灾害防御研究. E-mail: 3211290447@qq.com.

数据,定量分析软土的空间分布特征,并评估广州城区软土震陷的危害程度。

## 1 研究区概况

本文研究区是广州市城区的一部分,包括荔湾区、越秀区、海珠区、天河区南部、白云区南部,面积  $270 \text{ km}^2$  (图1)。研究区位于珠江三角洲北缘,是珠江水系南流入海的河口地带,河海交互作用强烈。区内地势由 NE 向 SW 倾斜,大部分区域是出露全新统或上更新统的河、海冲积三角洲平原,地势平缓,局部零星分布着出露前第四系的低矮残丘。由于珠江水系在研究区西北部汇合后流穿整个研究区,支流众多、河网密布,河、海相沉积厚度大,一般为  $20 \sim 30 \text{ m}$ ,以淤泥、淤泥质土、亚砂土和砂为主,易产生塑流(黄镇国等,1982)。广泛发育的软土已成为制约广州城市

建设的不利地质环境因素,而因软土引起的地基不均匀沉降问题亦已成为广州地区主要的地质灾害之一(李平日等,1989;夏法,黄玉昆,1992,1995;夏法等,1992;符诗存,张建国,2008;董好刚等,2012)。在构造上,研究区位于近 EW 向瘦狗岭断裂南侧,NE 向广州—从化断裂、EW 向广州—三水断裂、NW 向天河—北亭断裂贯穿全区。这些断裂具有诱发破坏性直下型地震的危险(梁干,吴业彪,2013)。再者,研究区所在的珠江三角洲为断块型三角洲,在新构造期经历过多次构造变动,洲内断块间垂直运动明显,第四纪受多组断裂带活动控制,地震活动频繁而强烈(黄镇国等,1982;黄玉昆等,1983;陈国能,张珂,1995;陈伟光等,2002;张珂等,2009;马晓静,吕作勇,2017)。因此,广州受地震的影响较大,其抗震设防烈度为Ⅶ度,广州城区的软土震陷潜在风险不可低估,应予以重视。

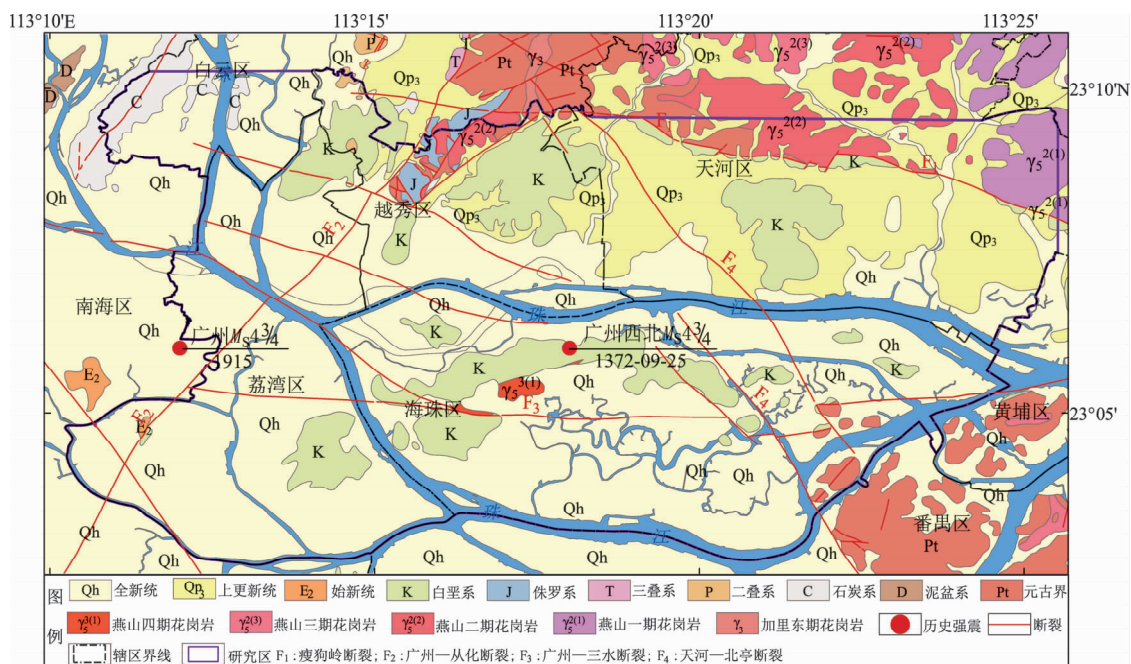


图1 研究区地震构造图

Fig. 1 Seismic tectonic map of the study area

## 2 钻孔数据

笔者收集了研究区内近 12 000 个钻孔,平均密度为  $44 \text{ 个/km}^2$ ,密度较高(图2a)。钻孔空间分布均匀,终孔深度均达基岩,这样能很好地从三维空间上控制软土的分布(图2b)。此次收集的钻孔数据信息齐全,包含了钻孔的基本信息、地

层信息、标贯信息、波速信息、土样物理力学试验信息等,这为实现从岩性、岩土状态、物理力学数据等多角度判别软土及评估软土震陷提供了可靠、丰富的数据支持。用如此数量大、密度高、信息多样的钻孔数据来揭露广州市城区的软土空间分布特征,分析其震陷危害程度是以往的研究及工程项目都未曾有过的。

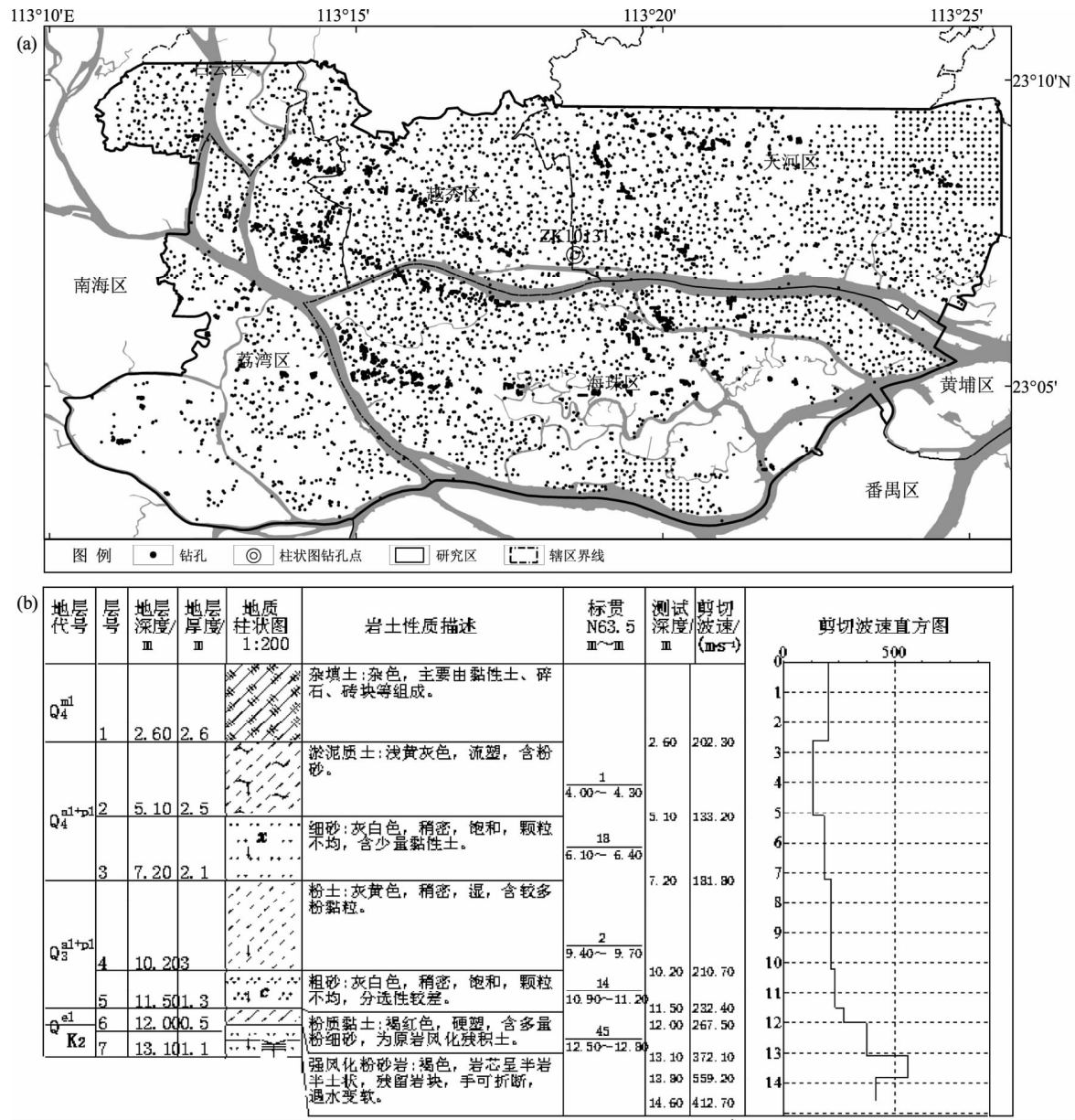


图 2 研究区钻孔分布图 (a) 及钻孔 ZK10131 柱状图示例 (b)

Fig. 2 Distribution of holes in the study area (a) and the column of a hole ZK10131 as an example (b)

3 软土及其震陷判别方法

3.1 软土判别方法

目前,各行业规范对软土的定义主要从定性和定量 2 方面来描述。软土定性描述为:由天然含水量大、压缩性高、承载能力低、流变性高的细粒土,包括淤泥、淤泥质土、泥炭、泥炭质土等,如《道路工程术语标准》(GBJ 124—88)、《软土地区岩土工程勘察规程》(JGJ 83—2011)等。定量描述则给出了具体的物理力学指标来界定。如

《岩土工程勘察规范》(GB 50021—2001)规定: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;《公路软土地基路堤设计与施工技术规范》(JTJ 017—96)列出软土的鉴别表,指出应按以下指标鉴别软土:天然含水量大于或等于 35%,与液限,天然孔隙比大于或等于 1.0,十字板剪切强度小于 35 kPa;《公路工程地质勘察规范》(JTG C20—2011)规定:具有以下工程地质特性的土,应判定为软土:天然含水量大于或等于液限,标准贯入试验锤击数小于 3 击,静力触探比贯入阻力小于或等于 750 kPa,十

字板抗剪强度小于 35 kPa。

笔者综合各行业规范对软土的定义,结合所采集的钻孔数据信息,对符合下述条件之一者可判别为软土层:(1)岩土名称为淤泥、淤泥质土、泥炭、泥炭质土的土层;(2)岩土名称为粘性土(含粉质粘土、粘土),并且岩土状态为软塑、流塑或软塑-流塑的土层;(3)土样物理力学试验数据中,天然孔隙比大于或等于 1.0,且天然含水量大于液限的土层。

### 3.2 软土震陷判别方法

强烈地震时软土发生震陷,不仅被科学实验和理论研究证实,而且在以往震害调查中多次被发现。但由于软土发生震陷的原因十分复杂,机理影响因素相当多,现今国内外对于软土震陷的研究还不够深入,积累的成果资料和工程经验不多,很难对软土是否震陷进行准确预测(张建毅等,2012)。目前,在我国涉及软土震陷判别的规范主要有《岩土工程勘察规范》(GB 50021—2001,2009)、《软土地区岩土工程勘察规程》(JGJ 83—2011)与《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)。对于规范要求进行专门震陷分析计算的还有不同学者提出的各种方法,这些方法由于模型复杂、公式及参数繁多、计算量大、受扰动软土试验困难等原因,在实际应用上很受限制(石兆吉,郁寿松,1989;郁寿松,石兆吉,1989;王忆等,1992;周健等,1996;刘金韬,2014;田洪水等,2015;辜俊儒等,2017;李平等,2017)。本文考虑岩土工程一般性勘察要求以及场地震害预测与防震减灾规划等应用,结合钻孔数据信息内容,认为可采用《软土地区岩土工程勘察规程》(JGJ 83—2011)与《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)等有关规定来评估广州城区软土震陷。

《软土地区岩土工程勘察规程》(JGJ 83—2011)指出,设防烈度等于或大于Ⅶ度时,对厚层软土分布区宜判别软土震陷的可能性。当地基主要受力层内软土厚度大于 3 m 或地基土等效剪切波速值小于 90 m/s 时,地基土会发生不同程度的震陷。宿文姬等(2006)提出,一般的勘察设计的很多情况下依据软土厚度大于 3 m,且连续分布,顶板埋深小于 20 m,地下水位小于 3 m,含砂量较少和承载力小于 70 kPa 的地段,作

为在地震作用下容易引起软土震陷的地区。一般来说,软土越厚,其震陷程度越大;软土的埋藏越浅,其震陷可能性也越大(李兰,1994)。因此,本文通过软土层的厚度与埋深来评估其震陷危害程度。

虽然广州城区的设防烈度为Ⅶ度,但它仍具有遭受烈度为Ⅷ度地震影响的危险。《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)给出了Ⅷ度和Ⅸ度时判别地基土软弱粘性土层震陷的方法:当饱和和粉质粘土塑性指数小于 15,且  $W_s \geq 0.9 W_L$  与  $I_L \geq 0.75$  ( $W_s$  为天然含水量,  $W_L$  为液限含水量,  $I_L$  为液性指数),可判定为震陷性软土。由于土的液性指数越大,土质越差,当  $I_L > 1$  时,土为软塑状。同时,土的孔隙比( $e$ )越大,其压缩性越高,发生震陷时沉降量亦越大。因此,本文进一步利用软土的液性指数、孔隙比等物理指标来评估其震陷危害程度。

## 4 软土空间分布特征

广州城区内的软土主要为淤泥、淤泥质土,少部分为泥炭、泥炭质土、淤泥质粉质粘土,一般分布在地表硬壳层之下,大部分地段为单层,局部为双层,其下卧层多为砂层,部分为粉质粘土层。软土在广州城区广泛分布,除越秀区中北部,天河区林和西、天园、珠吉等地,海珠区中部沙园、南石头、昌岗一带,荔湾区白鹤洞,白云区金沙等残丘台地无软土分布外,其余将近 80% 的面积其下伏地层均有软土分布(图 3)。

总的来说,软土层在广州城区埋藏较浅,其顶板埋深浅于 6.0 m,其中近 200 km<sup>2</sup> 的地区其下伏软土层的顶板埋藏浅于 3.0 m,只有小部分地段深于 3.0 m(图 3a)。另外,广州城区的软土层埋深呈现中部浅、南北两侧深的特点。在荔湾区白鹤洞与海珠区中部南石头、昌岗、新港、凤阳、赤岗、江海一带的残丘台地外围区的软土层埋藏很浅,约 0.5 ~ 1.5 m,呈东西向带状延伸。以这一东西向条带为中心分别往北、南,软土层的埋藏逐渐变深。在北侧最深处位于荔湾区北部桥中、多宝、沙面一带,埋深约 3.0 ~ 4.5 m,呈较大面积连续分布。在南侧最深处位于荔湾区东沙紧邻珠江处,埋深约 4.5 ~ 6.0 m,面积很小,呈孤立



小片状；其次，在荔湾区与海珠区南部紧邻珠江一带的软土层埋藏较深，约 3.0 ~ 4.5 m，面积不大，断续分布。

软土层在广州城区沉积厚度差异较大（图 3b），厚度不足 1.5 至 13.5 m 皆有分布，但总体来说，软土层的沉积厚度较大，其中厚度大于 3.0 m 的地区占了研究区面积的 32%。软土层的厚度在空间分布上呈现以下特点：（1）研究区南部、西部的软土层厚度大，中部、北部的厚度小。在研究区南部的海珠区南部，西部的白云区、荔湾区，其软土层的厚度大部分达 3.0 m 以上，部分地段厚

达十余米；而在研究区中部的海珠区中北部以及研究区北部的越秀区与天河区，其软土层厚度较小，大部分地区小于 1.5 m。（2）在研究区内软土层呈现 2 个沉积中心，沉积厚度大。一处是在海珠区华州以西，软土层厚度达 6.0 m 以上，最厚处 13.5 m，等厚线轴线呈 SN 走向。此处地貌是湿地沼泽，已被建成湿地公园。另一处位于荔湾区石塘围、茶滘、东濠一带，软土层厚度大于 4.5 m，最厚处大于 10 m，等厚线轴线总体呈 NNW—近 SN 走向。另外，这一带又包含 4 个次一级沉积中心，呈 NW 向斜列分布。（3）靠近河流岸边的软土

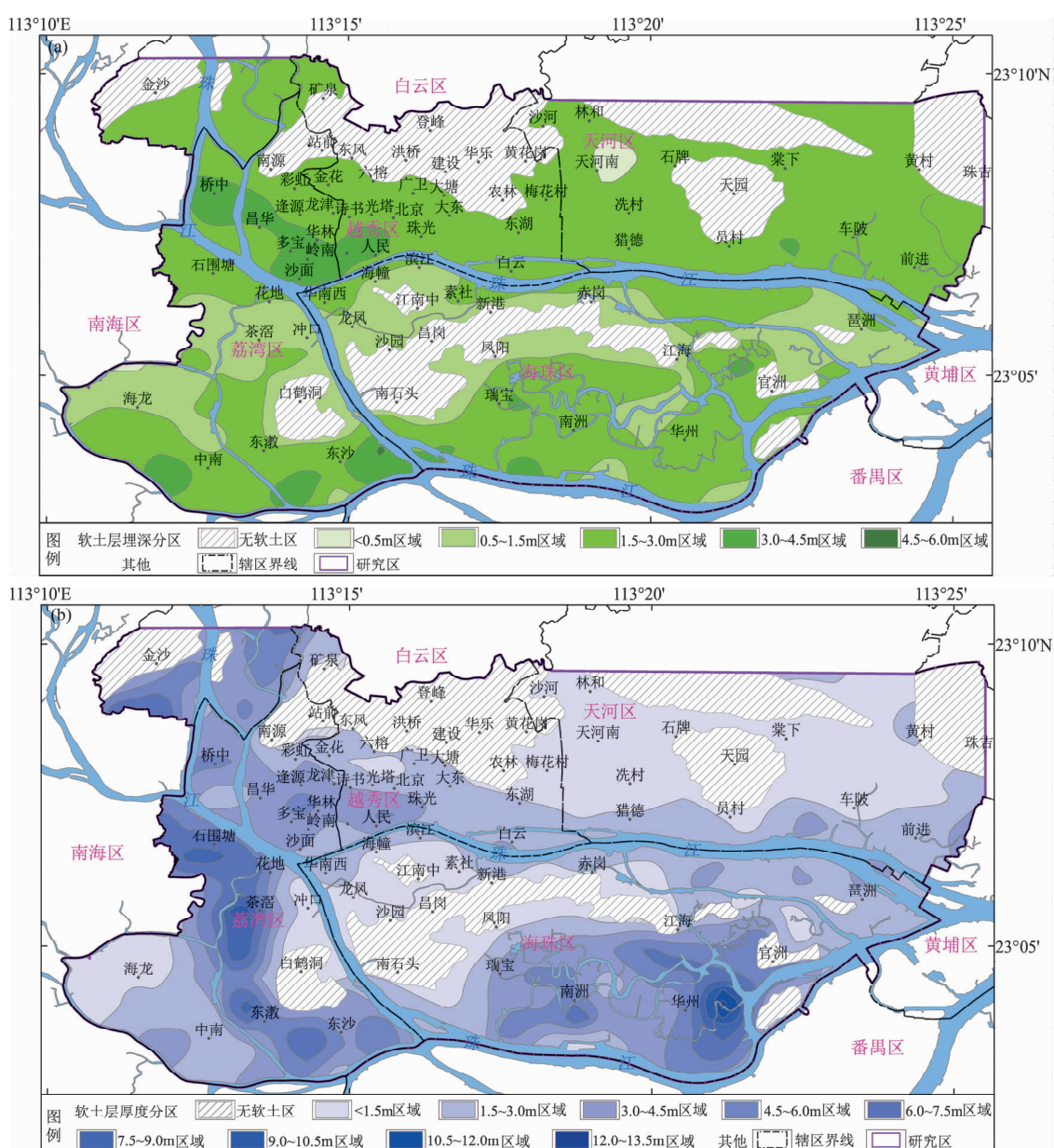


图3 广州城区软土层埋深 (a) 及厚度 (b) 分布图

Fig. 3 Depth (a) and thickness (b) distribution of softsoil layer in Guangzhou urban region

层厚度大, 远离河流的厚度小。在沙面、人民、白云、猎德、华南西、滨江、琶洲等珠江岸边地区, 软土层的厚度较大, 约 3.0 m 以上, 而远离珠江的地区, 如天河南、林和、棠下、沙园、凤阳等地, 其软土层厚度较小, 一般小于 1.5 m。

## 5 软土震陷评估

基于软土层的厚度及埋深, 根据表 1 所示条件, 本文评估了研究区内潜在软土震陷的危害程度 (图 4a)。由图 4a 可见, 广州城区内, 约 30%

的面积在强烈地震时 (Ⅶ度烈度下) 可能产生软土震陷。其中震陷最严重处是荔湾区茶滘、海珠区华州以西等地, 面积不大。中等震陷区的范围较大, 达 70 km<sup>2</sup>, 主要位于研究区的西部和南部; 在西部, 中等震陷区由研究区最北端延伸至最南端, 成片分布, 纵贯南北, 长约十余千米; 在南部则主要集中在海珠区瑞宝、南洲、华州一带的沼泽湿地区, 覆盖范围大。轻微震陷区主要分布在荔湾区北部和南部邻近珠江的地方。而天河区与越秀区大部分、海珠区北部与西部、荔湾区西南部为软土不震陷区。

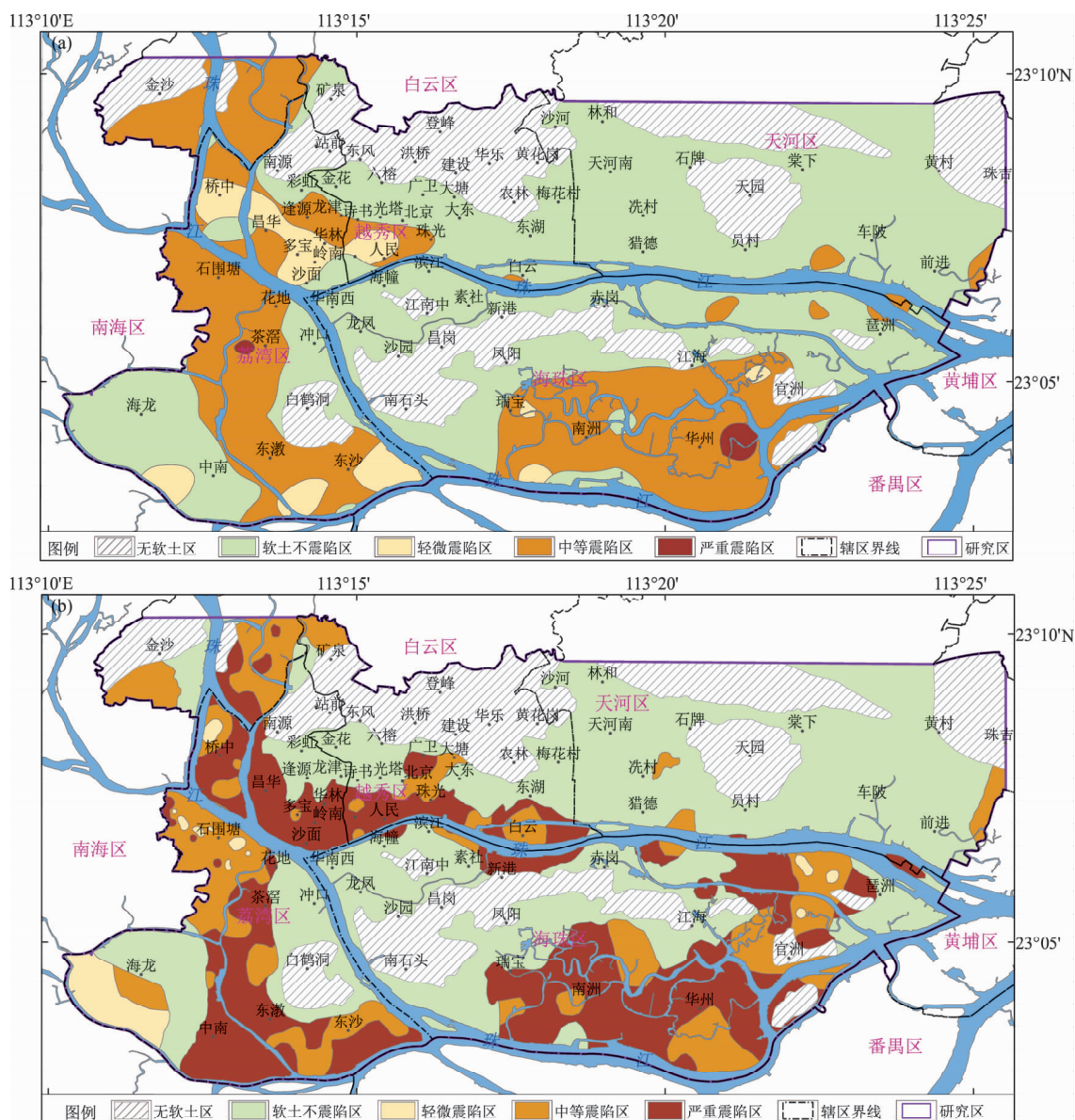


图 4 基于软土厚度与埋深 (a) 与软土物理指标 (b) 的广州城区潜在软土震陷分布图

Fig. 4 The distribution of potential seismic subsidence of softsoil in Guangzhou urban region based on depth and thickness of softsoil (a) and physical indices of softsoil (b)

表 1 广州城区潜在软土震陷危害程度评估结果（基于软土厚度与埋深）

Tab. 1 The evaluating damage degree of potential seismic subsidence of softsoil in Guangzhou urban region  
(based on depth and thickness of softsoil)

序号	分区	判别条件	面积/km <sup>2</sup>	主要分布区域
1	软土不震陷区	软土厚度不大于 3 m	130	天河区；越秀区；海珠区北部与西部；荔湾区西南部
2	轻微震陷区	软土厚度 3~9 m，埋深大于 3 m	10.8	荔湾区北部与南部邻近珠江处
3	中等震陷区	软土厚度 3~9 m，埋深不大于 3 m； 或软土厚度大于 9 m 埋深大于 3 m	70	白云区；荔湾区由北往南贯穿 10 km 宽 3 km； 海珠区瑞宝、南洲、华州一带
4	严重震陷区	软土厚度大于 9 m 埋深不大于 3 m	1.2	荔湾区茶滘；海珠区华州以西
5	无软土区	下伏地层无软土层	58	越秀区中北部；天河区林和西、天园、珠吉等地； 海珠区中部；荔湾区白鹤洞；白云区金沙

表 2 广州城区潜在软土震陷危害程度评估结果（基于软土物理指标）

Tab. 2 The evaluating damage degree of potential seismic subsidence of softsoil in Guangzhou urban region  
(based on physical indices of softsoil)

序号	分区	判别条件		面积/ km <sup>2</sup>	主要分布区域
		条件一	条件二		
1	软土不震陷区	不符合下列可判为震陷性软土的条 件：塑性指数大于 15 且 $W_s \geq 0.9$ $W_L$ ， $I_L \geq 0.75$ 的饱和粉质粘土	—	109	天河区大部分；越秀区中北部； 海珠区西部与中部；荔湾区中 南部
2	轻微震陷区	符合下列可判为震陷性软土的条件： 塑性指数大于 15 且 $W_s \geq 0.9$ $W_L$ ， $I_L \geq 0.75$ 的饱和粉质粘土	$0.75 \leq I_L \leq 1$ 且 $e \leq 1$	5.4	荔湾区中北部零星分布
3	中等震陷区	符合下列可判为震陷性软土的条件： 塑性指数大于 15 且 $W_s \geq 0.9$ $W_L$ ， $I_L \geq 0.75$ 的饱和粉质粘土	$0.75 \leq I_L \leq 1$ 且 $e > 1$ ； 或 $I_L > 1$ 且 $e \leq 1$	37.6	在各区均有出现，分布分散
4	严重震陷区	符合下列可判为震陷性软土的条件： 塑性指数大于 15 且 $W_s \geq 0.9$ $W_L$ ， $I_L \geq 0.75$ 的饱和粉质粘土	$I_L > 1$ 且 $e > 1$	60	荔湾区；越秀区南部；海珠区 西南部与北部；白云区南部
5	无软土区	下伏地层无软土层	—	58	越秀区中北部；天河区林和西、 天园、珠吉等地；海珠区中部； 荔湾区白鹤洞；白云区金沙

本文利用软土的液性指数、孔隙比等物理指标，根据表 2 所示条件，评估了Ⅷ度烈度下研究区内潜在软土震陷的危害程度（图 4b）。由图 4b 可见，广州城区内，近 40% 的面积在强烈地震时（Ⅶ度烈度下）可能产生软土震陷。与图 4a 相似，震陷区主要集中在研究区的西部和南部，但震陷范围更大。其中严重震陷区达 60 km<sup>2</sup>，呈大面积连续分布，主要分布在荔湾区、越秀区南部、海珠区西南部。中等震陷区则分布分散，断续出现，在各区均有分布。轻微震陷区分布范围小，在荔湾区中北部零星出现。

而天河区大部分、越秀区中北部、海珠区西部与中部、荔湾区中南部为软土不震陷区。

6 结论

本文利用高密度分布的近 12 000 个钻孔，详细分析了广州城区软土层的空间分布特征，并对广州城区软土震陷的危害程度进行评估，结论如下：

（1）广州城区内的软土主要为淤泥、淤泥质



土,大部分地段为单层,埋藏浅,在研究区的南北两侧较深。另外,软土层的厚度较大,而且研究区南部、西部的厚度比中部、北部的厚度明显大,靠近河流岸边的厚度比远离河流的厚度小,同时还呈现出2个沉积中心。

(2)在强烈地震时广州城区内部分区域可能产生软土震陷。软土震陷区主要集中在研究区的西部和南部,震陷性在空间上呈现出轻微、中等、严重等不同危害程度。

### 参考文献:

- 陈国能,张珂.1995.珠江三角洲断裂构造最新活动性研究[J].华南地震,15(3):16-21.
- 陈伟光,魏柏林,赵红梅,等.2002.珠江三角洲地区新构造运动[J].华南地震,22(1):8-18.
- 董好刚,黄长生,陈雯,等.2012.珠江三角洲环境地质控制性因素及问题分析[J].中国地质,39(2):539-549.
- 方陵生.2006.旧金山大地震:过去与未来[J].世界科学,(7):17-19.
- 符诗存,张建国.2008.广州市地质灾害现状及防治对策[J].中国地质灾害与防治学报,19(3):92-95.
- 辜俊儒,李平,周春澍.2017.软土震陷研究现状与展望[J].防灾减灾学院学报,19(2):32-37.
- 顾宝和,张福存.1981.在振动作用下软弱粘性土的强度及变形特征[J].工程勘察,(1):52-54.
- 郭钦华,郭良田,陈庞龙.2008.广州市城区地震地质灾害探讨[J].华南地震,28(2):85-94.
- 郭钦华,郑洁红,梁致荣,等.1995.珠江三角洲场地震害预测[J].华南地震,15(3):22-33.
- 韩喜彬,龙江平,李家彪,等.2010.珠江三角洲脆弱性研究进展[J].热带地理,30(1):1-7.
- 何萍,陈修吾,何霆.2017.基于GIS的东莞市地震灾害评估系统的设计与实现[J].华南地震,37(3):9-17.
- 胡聿贤.2006.地震工程学[M].北京:地震出版社.
- 黄玉昆,夏法,陈国能.1983.断裂构造对珠江三角洲形成和发展的控制作用[J].海洋学报,5(3):316-327.
- 黄镇国,李平日,张仲英,等.1982.珠江三角洲的形成发育演变[M].广州:科学普及出版社广州分社.
- 李兰.1994.动三轴软土震陷分析及抗震性能的评价[C]//中国土木工程学会第七届土力学及基础工程学术会议论文集,661-665.
- 李平,田兆阳,肖瑞杰,等.2017.基于三轴试验的软土震陷简化计算方法研究[J].震灾防御技术,12(1):145-156.
- 李平日,郑建生,方国祥.1989.广州地区第四纪地质[M].广州:华南理工大学出版社.
- 梁干,吴业彪.2013.广州市活动断层探测与地震危险性分析[M].北京:科学出版社.
- 刘恢先.1986.唐山大地震震害[M].北京:地震出版社.
- 刘金韬.2014.考虑软土层参数变化时震陷量的计算[J].地球物理学进展,29(1):412-417.
- 卢振恒.2002.地震引发惊人的系列火灾灾害——以地震火灾严重闻名于世的日本关东大地震[J].中国人民防空,(4):34-35.
- 马晓静,吕作勇.2017.广东地区重复地震识别及其在台网定位评价中的应用[J].华南地震,37(1):22-28.
- 钮泽葵.1991.1985年墨西哥地震高层建筑的地震表现[J].建筑结构,(1):58-62.
- 彭承光,李运贵.2000.台湾集集7.6级地震车笼埔发震断层场地灾害综述[J].地震科技情报,(9):9-13.
- 彭承光,李运贵.2004.场地地震效应工程勘察基础[M].北京:地震出版社.
- 齐文浩,陈龙伟,单振东,等.2013.芦山7.0级地震宏观场地效应[J].地震工程与工程振动,33(4):29-34.
- 石兆吉,郁寿松.1989.软土震陷计算中若干问题的讨论[J].地震工程与工程振动,9(4):92-97.
- 苏永奇,马巍,吴志坚,等.2016.兰州新区潜在地震地质灾害预测分析[J].地震研究,39(1):107-113.
- 宿文姬,蔡美峰,乔兰.2006.珠江三角洲场地震害分析与评判[J].北京科技大学学报,28(1):12-16.
- 田洪水,王华林,祝介旺,等.2015.山东安丘地区软土震陷及地震产生的土层构造新启示[J].岩土工程学报,37(4):734-740.
- 王忆,张克绪,谢君斐.1992.地震引起建筑物沉降的简化分析[J].土木工程学报,25(5):63-70.
- 夏法,黄玉昆,王建华.1992.珠江三角洲地质环境与灾害性地质问题[J].中山大学学报论丛,(1):138-146.
- 夏法,黄玉昆.1992.我国沿海城市的几种主要自然灾害[J].南海研究与开发,(1):8-14.
- 夏法,黄玉昆.1995.广东的地质灾害与地质环境[J].自然灾害学报,4(3):83-91.
- 杨顺安,冯晓腊,张聪辰.2000.软土理论与工程[M].北京:地质出版社.
- 郁寿松,石兆吉.1989.土壤震陷试验研究[J].岩土工程学报,11(4):35-44.
- 张建毅,张宇东,徐国栋,等.2012.软土震陷判别方法分析及工程应用[J].世界地震工程,28(3):53-59.
- 张珂,陈国能,庄文明,等.2009.珠江三角洲北部晚第四纪构造运动的新证据[J].华南地震,29(S1):22-26.
- 中国科学院工程力学研究所.1979.海城地震震害[M].北京:地震出版社.
- 周翠英,牟春梅.2004.珠江三角洲软土分布及其结构类型划分[J].中山大学学报(自然科学版),43(6):81-84.
- 周健,屠洪权,安原一哉.1996.动力荷载作用下软粘土的残余变形计算模式[J].岩土力学,17(1):54-60.
- GB 50011—2010,建筑抗震设计规范[S].
- GB 50021—2001,岩土工程勘察规范[S].
- GBJ 124—88,道路工程术语标准[S].
- JGJ 83—2011,软土地区岩土工程勘察规程[S].
- JTG C20—2011,公路工程地质勘察规范[S].
- JTJ 017—96,公路软土地基路堤设计与施工技术规范[S].



## Analysis on Spatial Distribution Feature of Softsoil in Guangzhou Urban Region and its Seismic Subsidence Based on Dense Drilling Holes

BI Lisi, CHEN Xiaofang, MA Haoming, LU Banghua

(*Key Laboratory of Earthquake Monitoring and Disaster Mitigation Technology,  
Guangdong Earthquake Agency, Guangzhou 510070, Guangdong, China*)

### Abstract

Taking Guangzhou urban region with an area of 270 km<sup>2</sup> as the study area, using about 12 000 drilling holes with a high density, we identified the softsoil layer, and analyzed its spatial distribution characteristics in detail. The results show that: The softsoil in Guangzhou urban is mainly composed of silt and muddy soil. Most of sections are single-layer, buried less than 6.0 m, and it is shallower in the middle and deeper in both sides of the north and south. The softsoil layer is rather thick, which shows thicker in the south and the west, thinner in the middle and the north, and thicker near the river, thinner far away from the river. Meanwhile, there exists two deposition centers where the softsoil layer is very thick. Besides, an evaluation of softsoil seismic subsidence in the Guangzhou urban region was made, and the result shows that the seismic subsidence of softsoil may happen in the west and the south of the study region when the strong earthquake occurred. And it will damage slightly, medium, or seriously in different zone because of the different thickness, buried depth, liquid index and void ratio of softsoil.

**Keywords:** Guangzhou urban region; drilling hole; softsoil; earthquake; seismic subsidence