

黄河三角洲地区人工建筑对地面沉降的影响研究^{*}

徐丽雯^{1,2}, 黄海军^{1*}, 刘艳霞¹, 毕海波¹, 王 耕³, 严立文¹, 董慧君⁴

(1. 中国科学院海洋研究所 海洋地质与环境重点实验室, 山东 青岛 266071;

2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 辽宁师范大学 城市与环境学院,

辽宁 大连 116029; 4. 东营市勘察测绘院, 山东 东营 257091)

摘 要:选取黄河三角洲地区4个年份(1976, 1986, 1996和2006年)的Landsat MSS/TM数据, 以东营市为研究对象, 对其境内建筑比较密集的典型中心城区(市中心)、县(垦利县)、镇(孤店镇), 运用ArcGIS对这3个区域在不同时间段内的遥感影像进行解译, 得到建筑面积的变化情况。利用土力学的分层总和法, 结合东营市经济发展的实际情况和建筑荷载状况, 计算城镇建筑物对地面沉降的贡献值。计算结果表明, 东营中心城区、垦利县、孤店镇1976—2006年建筑物导致地面年平均沉降量为2.42, 1.11, 0.23 mm, 所得结果与现有资料数据监测到的这几个地区的沉降量情况吻合较好。

关键词:黄河三角洲; 东营; 地面沉降; 分层总和法

中图分类号: P642.26

文献标识码: A

黄河流域是人类文明的发祥地, 黄河三角洲地区也是最早有人类活动的地方之一, 黄河作为世界上输沙量最大的河流, 频繁的尾闾改道, 使这一地区的土层较活跃, 以东营为主体的现代黄河三角洲地区淤积了大量软土、黏土、粉砂等具有很强压缩性的土层^[1]。现在所说的黄河三角洲即指现代黄河三角洲, 是1855年以来黄河冲积形成的冲积扇, 主体在东营市, 以利津为顶点, 北起徒骇河口, 南抵小清河口, 位于现代地壳沉降区, 所以选择黄河三角洲作为研究区域具有典型性^[2]。

地面沉降是由多种因素(主要分为自然因素和人为因素)引起的地面标高缓慢降低的环境地质灾害现象, 具有明显的区域性特征^[3]。随着黄河三角洲地区上升为国家发展战略的高度, 城市化的步伐必将加快, 由此带来的大规模城市建设是不可避免的。本文基于当前各

^{*} 收稿日期: 2015-04-10

资助项目:国家自然科学基金项目——黄河三角洲地面沉降监测与形成机理研究(41276082)和渤海西南岸末次冰期以来古海岸线重建及影响因素分异研究(41106041); 中国科学院知识创新工程重要方向性项目——现代河口三角洲垂向形变驱动机制与环境效应研究((KZCX2-EW-207)); 海洋公益性行业科研专项——温带典型海岛地质灾害监测及风险评价与区划示范研究(201005010-2); 国家自然科学基金青年基金项目——悬浮颗粒矿物成分对近岸水体光学参数的影响及光谱响应研究(41306190)

作者简介:徐丽雯(1992-), 女, 硕士研究生, 主要从事河口三角洲地质灾害方面研究。E-mail: xuliwen1992@126.com

通讯作者:黄海军(1963-), 男, 研究员, 博士, 主要从事海洋地质遥感与GIS方面研究。E-mail: hjhuang@qdio.ac.cn

(张 骞 编辑)

地区计算地面沉降量数据有限的情况,以现代黄河三角洲流经的主体东营为研究对象,选取东营市建筑比较密集的中心城区——东营市中心城区、县——垦利县、镇——孤岛镇为研究对象,利用搜集到的1976年黄河三角洲地区80 m分辨率TM遥感影像和1986,1996,2006年黄河三角洲地区30 m分辨率TM遥感影像,对定量计算建筑物导致的地面沉降进行探索。

1 研究区概况

从地质构造来看,黄河三角洲位于太行山东麓断裂带和郑庐断裂带之间,处在华北现代沉降区内^[4]。黄河三角洲地貌类型多样,在埋深25 m以内多为第四系全新统地层,岩性以粉土为主,土质以黏土、粉砂为主,地势平坦坡降小、结构疏松、含水量大^[5]。

根据山东省地质矿产勘查开发局第二水文地质工程地质大队《黄河三角洲水工环地质综合勘察报告》将东营市天然地基划分为:

- 1) 承载力低($f_k < 80$ kPa): 不宜采用天然地基;
- 2) 较低(f_k 为 80~100 kPa): 稍作处理,可作为一般建筑的持力层;
- 3) 中等(f_k 为 100~120 kPa): 不做或稍作处理,即可作为一般建筑的持力层;
- 4) 较高($f_k > 120$ kPa): 不做处理可直接作为持力层。

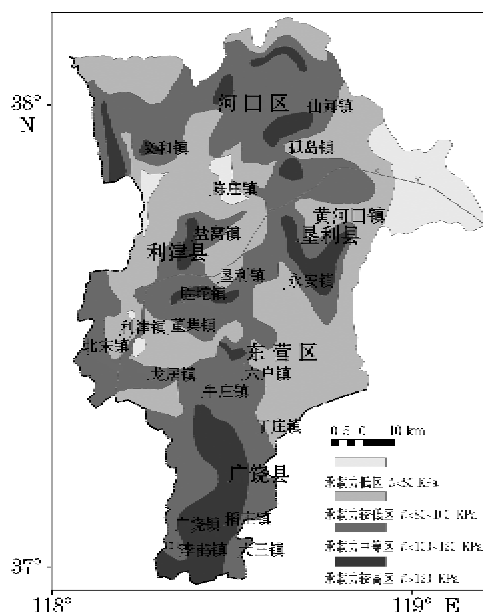


图1 东营市自然地基承载力分布图

Fig.1 Bearing capacity distribution of natural foundation in Dongying City

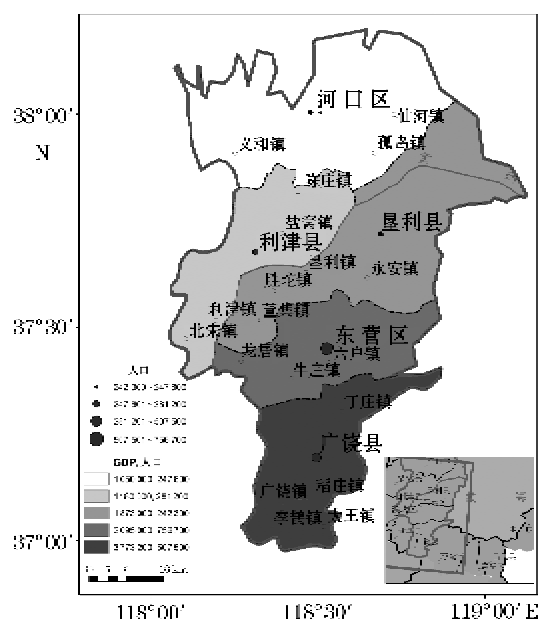


图2 东营市行政区划图

Fig.2 Administrative Map of Dongying City

天然地基承载力具体分布如图 1 所示,从图中可以看出,承载力低区主要分布在黄河入海口处,在东营市内呈小片状,共有 4 处分布;承载力较低区在东营市内分布有一定的规模,如东营市的东四中心城、河口区西南部及新户乡一带、利津县的东南部;承载力中等区分布于现代黄河三角洲顶点附近和决口扇的顶部,如利津县明果乡一带、东营西城区的南部;承载力较高区零星分布于东营市行政区划内,主要分布于广饶县陈官乡、垦利县下镇乡、河口区义和镇西北部等区域^[6]。

东营市行政区划内辖两区三县,东营市行政区划、人口、GDP 如图 2 所示。

2 研究方法

2.1 数据来源

2.1.1 遥感数据

搜集以 10 a 为间隔的 1976—2006 年的 Landsat MSS/TM 覆盖黄河三角洲地区的影像 4 景,应用计算机分类结合人工目视解译的方法提取城市建筑物面积。具体步骤为:1)影像预处理;2)初步判读,建立判读标志;3)野外调查或资料验证;4)详细判读,更新目标的定性、定位;5)图形与属性文件生成;6)检查,输出图像^[7]。

2.1.2 建筑荷载数据

建筑的重量与建筑的结构类型、层数、使用性质、抗震设防烈度、填充墙材料有关,而对于不同结构类型每层建筑的重量,在国际、国内并没有一个统一的规定、标准,下面从不同建筑结构类型角度,对现有的一般住宅每层平均荷载估算情况进行统计(以下数值为行业经验数值):

- 1)一般砌体结构,钢筋混凝土结构多层建筑 9~12 kPa;
- 2)钢筋混凝土结构高层建筑 14~16 kPa;
- 3)框架结构建筑 13~15 kPa;
- 4)框架-剪力墙结构建筑 15~17 kPa;
- 5)剪力墙结构建筑 16~18 kPa;
- 6)框筒结构建筑 13~15 kPa。

2.2 测算方法

分层总和法是计算沉降量时被广泛采用的方法,分层总和法以无侧向变形条件下的压缩量公式为基础^[8],在沉降计算深度范围内划分若干土层,计算各层的压缩量,然后求其总和,即得地基表面的最终沉降量。以下为分层总和法的计算步骤:

- 1)按比例绘制柱基础及地基土的剖面图;
- 2)计算地基土的自重应力;
- 3)计算基底压力 P :

$$P = \frac{F + G}{A} \quad (1)$$

$$G = \gamma \cdot A \cdot d \quad (2)$$

式中, F 为正常使用极限状态荷载效应标准组合时,上部结构作用在基础底面中心的竖直荷载; G 为基础及其上回填土的总量,在地下水位以下部分应扣去浮力; A 为基础底面积,

对矩形基础, L 和 b 分别为矩形基础的长度和宽度; γ 为土的天然重度, 取 20 kN/m^3 ; d 为基础埋深;

4) 计算基底处附加应力 P_0 :

$$P_0 = P - \gamma \cdot d \quad (3)$$

5) 计算地基中的附加应力;

6) 地基受压层厚度 Z_n 的确定:

$$Z_n = \frac{\sigma_z}{\sigma_c} < 0.2 \quad (4)$$

式中, σ_z 为地基中的附加应力; σ_c 为土的自重应力;

7) 计算压缩层范围内各分层的平均自重应力、附加应力;

8) 根据土的压缩曲线确定地基土受压前后的孔隙比;

9) 计算各分层的压缩量:

$$\Delta S_i = \frac{e_{1i} - e_{2i}}{1 + e_{1i}} H_i \quad (5)$$

式中, ΔS_i 为第 i 层土的压缩量; e_{1i} 为受压前孔隙比; e_{2i} 为受压后孔隙比;

10) 计算最终沉降量 S :

$$S = \sum_{i=1}^n \Delta S_i \quad (6)$$

3 研究区地面沉降测算

3.1 研究区建筑物面积测算

3.1.1 研究区建筑物面积解译

利用搜集到的 1976 年黄河三角洲地区 80 m 分辨率 TM 遥感影像和 1986, 1996, 2006 年黄河三角洲地区 30 m 分辨率 TM 遥感影像, 解译出不同年份研究区建筑面积的变化情况。图 3~图 5 为分别以 1976, 1986, 1996, 2006 年黄河三角洲地区的 TM 遥感影像为底图, 研究区建筑面积的解译情况。

本文所搜集到的研究区实际用地面积为: 东营市中心城区建设用地 $40\,500 \times 10^4 \text{ m}^2$ (2009 年第二次全国土地调查); 垦利县建设用地面积 $22\,900 \times 10^4 \text{ m}^2$ (2009 年底)。与本文解译得到的截至 2006 年研究区建筑用地面积比较可以发现(表 1), 按本文解译研究区建筑用地增长速度预测, 2009 年建筑用地面积均小于实际数值, 分析原因可能与 2009 年国务院批复《黄河三角洲高效生态经济区发展规划》, 标志着黄河三角洲开发建设正式上升为国家战略, 致使 2009 年研究区域建筑面积快速增长有直接关系^[9]。表 2 为研究区域每年新增建筑面积统计表。



图 3 东营市中心城区建筑面积解译图

Fig. 3 Interpretive charts of the building area in central region of Dongying City



图 4 垦利县建筑面积解译图

Fig. 4 Interpretive charts of the building area in Kenli Country



图 5 孤岛镇建筑面积解译图

Fig. 5 Interpretive charts of the building area in Gudao Town

表 1 本文解译与所搜集到的研究区建筑用地面积统计表(10⁴ m²)

Table 1 Statistics of the construction land area interpreted and collected for the studied regions(10⁴ m²)

研究区域	1976 年	1986 年	1996 年	2006 年	按本文解译增长速度 至 2009 年	本文搜集 至 2009 年
东营城区	1 865	4 131	10 919	27 600	29 835	40 500
垦利县	823	2 338	3 974	10 300	13 436	22 900

表 2 研究区每年新增建筑用地面积统计表(10⁴ m²)

Table 2 Statistics of the construction land area newly increased in the studied regions each year(10⁴ m²)

研究区域	1976 年以前	1977—1986 年新建	1987—1996 年新建	1997—2006 年新建	合计
东营城区	1 865	2 266	6 788	16 650	27 569
垦利县	823	1 515	1 636	6 301	10 275
孤岛镇	115	636	979	2 077	3 807

3.1.2 研究区平均荷载的确定

因以往并没有与东营地区平均建筑层数相关的统计工作,所以仅能从不同年份国家的经济发展状况结合东营的实际情况,对研究区域的平均建筑层数进行估计,而平均荷载的确定参考不同年代我国三线城市的建筑结构类型^[10]。结合本文 2.1.2 的内容得到的不同时期、不同地区建筑平均层数与平均荷载估计情况,取值如表 3 所示。

表 3 研究区域不同时期平均层数、平均荷载统计表

Table 3 Statistics of average storey and load of buildings in the studied regions in different time periods

研究区域	20 世纪 70 年代		20 世纪 80 年代		20 世纪 90 年代		截止 2006 年	
	平均层数	平均荷载 /kPa	平均层数	平均荷载 /kPa	平均层数	平均荷载 /kPa	平均层数	平均荷载 /kPa
东营城区	1.0	9.0	1.5	15.0	2.0	15.0	3.0	13.0
垦利县	1.0	14.0	1.0	14.5	1.5	14.5	2.0	15.0
孤岛镇	1.0	14.0	1.0	14.0	1.0	14.0	1.0	15.0

3.1.3 研究区地基埋深确定

基础埋深是指从室外设计地坪至基础底面的垂直距离。埋深大于等于 5.0 m 或埋深大于等于基础宽度的 4 倍的基础称为深基础;埋深在 0.5~5.0 m 之间或埋深小于基础宽度的 4 倍的基础称为浅基础^[11]。基础埋深不得浅于 0.5 m。

我们参考了一个地基埋深的实例:北京市勘察设计研究院张在明等^[12]以两栋分别为 15 层和 25 层的建筑,考虑了地震作用和地基的种种不利因素,用圆弧滑动面法进行分析,得出从地基稳定的角度考虑,当 25 层建筑物基础埋深为 1.8 m 时,其稳定安全系数为 1.44,如埋深为 3.8 m(1/17.8)时,则安全系数达到 1.64。考虑东营市长期以来建筑层数较低,大部分地区土层不适宜直接用做建筑物持力层^[13],假设东营市建筑平均基础埋深 $d=1$ m。

3.2 研究区沉降量测算

根据杜廷芹^[14]对黄河三角洲地区土层的研究情况,将黄河三角洲土层分为:砂土 4 m;黏土 2 m;埋深 6 m 以下为软土,地下水位深度 2 m,如表 4 所示。从表中可知土的天然重度 $\gamma=19.1\text{ kN/m}^3$,地基土的天然孔隙比 $e=0.75$ 。基础埋深 $d=1\text{ m}$,根据不同土性的重度不同,得到不同埋深下土的自重应力。

表 4 黄河三角洲地区土体的相关参数统计表^[14]
Table 4 Soil parameters in the Yellow River Delta Region^[14]

相关参数	地下水位 上部砂性土	地下水位 下部砂性土	黏性土层	软土层		
				0~5 m	5~10 m	>10 m
有效重度/ $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$	19.1	9.1	9.5	8.5	8.5	8.5
孔隙比	0.758	0.758	0.780	1.310	1.460	1.330
压缩系数/ MPa^{-1}	0.170	0.170	0.200	0.745	0.855	0.900

根据本文 2.2 所示计算步骤,结合本文表 2、表 3、表 4 的平均层数 η' ,平均荷载 q' 和面积 S 数据可得研究区域的附加压力:

$$F = \sum_{i=1976}^{2006} \eta' q' S = 1 \times 9 \times 1\,865 \times 10^4 + 1.5 \times 15 \times 2\,266 \times 10^4 + 2 \times 15 \times 6\,788 \times 10^4 + 3 \times 13 \times 16\,650 \times 10^4 = 920\,760 \times 10^4 \text{ kPa} \quad (7)$$

$$P = \frac{F+G}{A} = \frac{F+\gamma_G \cdot A \cdot d}{A} = \frac{F+20 \cdot A \cdot d}{A} = \frac{920\,760 \times 10^4 + 20 \times 27\,569 \times 10^4 \times 1}{27\,569 \times 10^4} \approx 53.398 \text{ kPa} \quad (8)$$

$$P_0 = p - \gamma d = 53.398 - 19.1 \times 1 = 34.298 \text{ kPa} \quad (9)$$

进一步可以得到东营市中心城区 1976—2006 年建筑物导致地面沉降量 S (表 5)。

表 5 东营市中心城区建筑物导致地面沉降量
Table 5 Land subsidence caused by buildings in central region of Dongying City

土 层	点 号	深 度 Z_i/m	自重 应力 σ_c/kPa	附加 应力 σ_z/kPa	层 厚 H_i/m	平均自重应力 $\frac{\sigma_c(i-1)+\sigma_{ci}}{2}$ / kPa	平均附加应力 $\frac{\sigma_z(i-1)+\sigma_{zi}}{2}$ / kPa	自重应 力+附 加应力 / kPa	压 缩 曲 线	受压 前孔 隙比 e_{1i}	受压 后孔 隙比 e_{2i}	ΔS_i / mm	S / mm
砂 土	0	0	19.1	34.30					密 实 砂 土				
	1	1	38.2	34.16	1.0	28.65	34.23	62.88		0.463	0.454	5.8	
	2	2	47.3	33.20	1.0	42.75	33.68	76.43		0.459	0.451	5.8	
黏 土	3	3	56.4	31.28	1.0	51.85	32.24	84.09	粘 土	0.457	0.449	5.5	
	4	4	65.9	28.40	1.0	61.15	29.84	90.99		0.934	0.893	21.6	72.6
	5	5	75.4	25.38	1.0	70.65	26.89	97.54		0.921	0.883	19.6	
软 土	6	6	83.9	22.36	1.0	79.65	23.87	103.52	软 土	0.896	0.885	5.4	
	7	7	92.4	19.48	1.0	88.15	20.92	109.07		0.892	0.883	4.8	
	8	8	100.9	17.01	1.0	96.65	18.25	114.90		0.888	0.881	4.2	

所以用分层总和法得到东营中心城区 1976—2006 年建筑物导致地面平均沉降 72.60 mm,年平均沉降量 2.42 mm。

用上述方法,可分别求得垦利县、孤岛镇 1976—2006 年建筑物导致地面沉降量。垦

利县 1976—2006 年建筑物导致地面平均沉降 33.29 mm, 年平均沉降量 1.11 mm; 孤岛镇 1976—2006 年建筑物导致地面平均沉降 7.04 mm, 年平均沉降量 0.23 mm。

4 讨论

本文在通过遥感影像解译仅得到研究区建筑面积的基础上, 对研究区域建筑物面积变化导致地面沉降量进行计算, 所以有必要在参数较匮乏的情况下, 对参数选取、方法选择的合理性以及计算结果的可靠性方面进行分析, 并对影响黄河三角洲地面沉降的其他因素进行讨论。

4.1 参数选取、方法选择合理性分析

在参数的选取上主要涉及构筑物平均层数、构筑物荷载、基础形式。

现有的资料中并未发现有关东营市建筑层数的数据, 北京市作为我国的一线城市, 其住宅层数的发展对预测东营地区的建筑层数有一定的参考作用, 胡世德^[15]对北京市 1949—1992 年不同时期不同住宅层数所占的比重做了统计。1974—1977 年北京住宅平均层数为 4 层; 1986—1989 年北京住宅平均层数为 6 层; 1992 年北京住宅平均层数为 5 层。东营作为我国的三线城市, 经济的发展水平决定了其平均建筑层数不会高于北京地区, 北京地区从 1974—1992 年住宅建筑层数稳中有变, 本文在对东营地区的建筑层数假设中也有所体现, 而垦利县、孤岛镇的建筑层数也是随着其上一级城镇的发展有所变化, 但变化幅度不会超过东营市。所以本文将研究区建筑物平均层数确定在 1~3 层。

构筑物荷载的变化是随着构筑物使用的材料而变化的, 我国建筑材料的使用主要经历了从建筑材料比较容易获得的土墙、砖木材料到保温、隔音效果较好的砖混结构, 再到抗震效果较好的框架结构的过程。杜拱辰和吴家骝^[16]认为我国 1985 年之前的建筑 90% 为砖混结构, 具有自重重大、抗震性差的特点, 根据 GB50009—2012《建筑结构荷载规范》的取值, 建筑平均荷载为 15~20 kPa, 东营市 1983 年建市, 1961 年发现油田后直到建市前都只有一些政府机关和家属楼, 所以根据东营的实际情况结合建筑材料的变化, 在本文中建筑平均荷载确定在 9~15 kPa。

计算方法的选择上选取目前计算沉降被广泛采用的分层总和法, 该方法在计算地面沉降方面历时已久, 王国体^[17]介绍了几种计算地面沉降的方法其中就包括分层总和法; 徐金明和汤永净^[18]通过编制可视化程序对分层总和法进行改进; 杨光华等^[19]通过实际工程应用证明分层总和法计算地基非线性沉降效果较好; 叶为民等^[20]利用分层总和法计算因降水引起的地面沉降量; 杨泽飞等^[21]利用分层总和法计算地表固结沉降量。

4.2 计算结果可靠性分析

引起地面沉降的因素主要分为自然因素(构造运动、地震、土体固结压实等)和人为因素(地表荷载、抽取地下水、油气资源的开采等), 通常所说的地面沉降包括了自然因素与人为因素两方面引起的地面沉降, 即总的沉降量。国内外研究建筑物导致的地面沉降, 主要通过长时间的监测数据进行研究, 鉴于建筑物沉降监测周期长、数据难获得的特点, 本文将前人研究成果的总沉降量与自然因素引起的沉降量之差看作人类活动导致的地面沉降量, 所得差值与本文计算结果进行比较, 确定本文结果的合理性。

2002-08 山东省地矿局鲁北地质勘察院在东营市布设了鲁北院一等水准点、二等水

准点和基岩标二等水准点,2002-12—2008-06,一等水准点 D32(位于东营市中心城区东城)是监测到的沉降量最大的点位,沉降量 77 mm,沉降速率 14 mm/a, D30(位于东营市中心城区东城)点沉降量最小为 34.9 mm,沉降速率为 6.3 mm/a,总的平均沉降量为 55.95 mm,平均沉降速率 10.2 mm/a^[6,22]。龚士良^[23]的研究结果表明城市工程建筑产生的沉降量是总沉降量的 29.7%,则东营市 2002-12—2008-06 由工程建筑产生的年平均沉降量为 3.0 mm/a,与本文计算所得东营市中心城区建筑产生的平均沉降量 2.42 mm/a 极为相似;刘勇等^[24]研究表明黄河三角洲地面沉降典型区大部分区域沉降速率在 10~30 mm/a;张金芝等^[22]利用 PSInSAR 技术对 1992—1995 年东营东城区和西城区进行地面沉降监测结果分别为 7.4 mm/a 和 7.1 mm/a,1995 年垦利县城在地表荷载影响下平均沉降速率为 6.8 mm/a。杜廷芹等^[25]的研究表明,近几十年黄河三角洲地区由于区域构造运动和均衡运动引起的地表绝对下沉速率为 3.42 mm/a,可以把 3.42 mm/a 看做是自然因素引起的沉降量,将这个数值与本文计算所得由于建筑物荷载导致地面沉降的数值相加,并考虑其他可能引起地面沉降的因素,如抽取地下水、建造大坝等,与鲁北地质勘察院^[6,22]、刘勇^[24]、张金芝^[22]、杜廷芹等^[25]对该区域监测的实际沉降量作比较,可以发现本文所得计算结果具有合理性。

4.3 影响黄河三角洲地面沉降的其他因素

黄河三角洲地区地面沉降除本文讨论的建筑物荷载外,抽取地下水资源、开采油气资源、区域构造运动以及沉积物固结压实也是导致该地区地面沉降的原因。刘桂卫等^[26]证实小清河以南由于过量开采地下水已形成降落漏斗,漏斗中心沉降速率达 10~25 mm/a;冯浩鉴等^[27]认为黄河三角洲地区地壳下沉速率为 1~2 mm/a;任美镔^[28]认为黄河三角洲浅层沉积物固结速率约为 3~4 mm/a;刘桂仪等^[29]研究发现东营石油开采区地面沉降速率可达 10 mm/a;本文研究得到黄河三角洲地区建筑物荷载导致地面沉降速率为 0.23~2.42 mm/a。

由此可知,建筑物荷载导致地面沉降速率远小于开采地下水和石油导致的地面沉降速率,建筑物兴建较活跃的区域沉降速率略高于最大地壳下沉速率,与浅层沉积物固结最小速率接近,在国家开发建设黄河三角洲地区的政策下,黄河三角洲地区建筑物的大量建设不可避免,建筑物荷载将成为该地区地面沉降研究不可忽视的一个重要因素^[30]。

5 结 论

1) 本文通过计算的方法求得建筑物导致的地面沉降,计算得到 1976—2006 年东营市中心城区、垦利县、孤岛镇建筑物导致的平均地面沉降量分别为 2.42, 1.11, 0.23 mm。

2) 建筑面积的变化相比于平均荷载的变化在地面沉降中影响更大。

3) 在估算过程中所需参数取值合理、易于获得,估算方法简洁,易于应用于实践中,具有广泛适用性。

4) 通过与黄河三角洲地区抽取地下水、地壳下沉、沉积物自重固结和石油开采的沉降速率比较发现,建筑物荷载导致地面沉降速率有接近该地区沉积物固结速率的趋势,建筑物荷载将成为黄河三角洲地区地面沉降研究的新热点。

参考文献:

- [1] HIGGINS S, OVEREEM I, TANAKA A, et al. Land subsidence at aquaculture facilities in the Yellow River delta, China[J]. Geophysical Research Letters, 2013, 40(15): 3898-3902.
- [2] 别君, 黄海军, 樊辉, 等. 现代黄河三角洲地面沉降及其原因分析[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2006, 26(4): 29-35.
- [3] 张阿根, 杨天亮. 国际地面沉降研究最新进展综述[J]. 上海地质, 2010, 34(4): 57-63.
- [4] 秦伟颖, 庄新国, 黄海军. 现代黄河三角洲地区地面沉降的机理分析[J]. 海洋科学, 2008, 32(8): 38-43.
- [5] 谭晋钰, 黄海军, 刘艳霞. 黄河三角洲沉积物压实固结及其对地面沉降贡献估算[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2014, 34(5): 33-38.
- [6] 刘勇. 黄河三角洲地区地面沉降时空演变特征及机理研究[D]. 青岛: 中国科学院海洋研究所, 2013.
- [7] 赵英时. 遥感应用分析原理与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [8] 龚晓南. 土力学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [9] 连煜, 王新功, 黄肿, 等. 基于生态水文学的黄河口湿地生态需水评价[J]. 地理学报, 2008, 63(5): 451-461.
- [10] 许妍, 梁斌, 鲍晨光, 等. 渤海生态红线划定的指标体系与技术方法研究[J]. 海洋通报, 2013, 32(4): 361-367.
- [11] 刘润, 王磊, 丁红岩, 等. 复合加载模式下不排水饱和软粘土中宽浅式筒型基础地基承载力包络线研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(1): 146-154.
- [12] 刘冬柏, 王璇. 高层建筑基础埋深的几个问题讨论[J]. 中外建筑, 2010, (4): 40-42.
- [13] 李广雪, 李君, 刘勇, 等. 黄河三角洲软弱层变形和刺穿作用[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2009, 28(5): 29-36.
- [14] 杜廷芹. 现代黄河三角洲地区地面沉降特征研究[D]. 青岛: 中国科学院海洋研究所, 2009.
- [15] 胡世德. 北京地区建筑层数的发展分析[J]. 建筑技术, 2004, 35(9): 706-707.
- [16] 杜拱辰, 吴家骊. 探讨我国房屋建筑结构发展趋势[J]. 建筑结构, 1985, (1): 2-4.
- [17] 王国体. 以计算沉降为控制条件的群基础底面积优化设计[J]. 地基基础工程, 1994, 4(2): 7-12.
- [18] 徐金明, 汤永净. 分层总和法计算沉降的几点改进[J]. 岩土力学, 2003, 24(4): 518-521.
- [19] 杨光华, 王鹏华, 乔有梁. 地基非线性沉降计算的原状土割线模量法[J]. 土木工程学报, 2007, 40(5): 49-52.
- [20] 叶为民, 赵少阳, 陈永贵, 等. 二元结构土层分布区工程降水诱发地面沉降变形研究[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2012, 43(11): 4446-4450.
- [21] 杨泽飞, 魏纲, 林磊磊, 等. 盾构法隧道施工工后横向地表总沉降研究[J]. 岩土力学, 2013, 34: 338-343.
- [22] 张金芝, 黄海军, 刘艳霞, 等. 基于 PSInSAR 技术的现代黄河三角洲地面沉降监测与分析[J]. 地理科学, 2013, 33(7): 831-836.
- [23] 龚士良. 上海城市建设对地面沉降的影响[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1998, 9(2): 108-111.
- [24] 刘勇, 黄海军, 李培英, 等. 黄河三角洲深层地下水漏斗引发的地面沉降特征[J]. 应用基础与工程科学学报, 2014, 22(5): 896-908.
- [25] 杜廷芹, 黄海军, 别君. 现代黄河三角洲地面沉降对洲体演变的影响[J]. 海洋科学, 2011, 35(9): 78-84.
- [26] 刘桂卫, 黄海军, 杜廷芹, 等. 黄河三角洲地区地面沉降驱动因素研究[J]. 海洋科学, 2011, 35(8):

- 43-50.
- [27] 冯浩鉴,顾旦生,张莉,等. 中国东部地区地壳垂直运动规律及其机制研究[J]. 测绘学报,1998,27(1):16-23.
- [28] 任美镔. 黄河长江珠江三角洲近 30 年海平面上升趋势及 2030 年上升量预测[J]. 地理学报,1993,48(5):385-393.
- [29] 刘桂仪,张兴乐. 黄河三角洲油气资源开发的环境地质问题与经济可持续发展[J]. 上海地质,2001,B12:36-38.
- [29] 严学新,龚士良,曾正强,等. 上海城区建筑密度与地面沉降关系分析[J]. 水文地质工程地质,2002,6(21):831-836.

Impact of Artificial Construction on Land Subsidence in the Yellow River Delta Region

XU Li-wen^{1,2}, HUANG Hai-jun¹, LIU Yan-xia¹, BI Hai-bo¹, WANG Geng³,
YAN Li-wen¹, DONG Hui-jun⁴

(1. *Key Laboratory of Marine Geology and Environment, Institute of Oceanology,
Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China;*

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. School of Urban and Environmental Science, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China;

4. Reconnaissance Mapping Dongying City Hospital, Dongying 257091, China)

Abstract: By selecting Landsat MSS/TM data obtained in four years (1976, 1986, 1996 and 2006) in the Yellow River Delta Region and taking Dongying City as the study object, the remote sensing images of three typical regions with dense buildings (i. e. center region of Dongying City, Kenli County and Gudao Town), which were acquired at different time periods, are interpreted by using ArcGIS software, thus obtaining the changes in the areas of the three regions. By using the layer-wise summation method of soil mechanics and combining with the economic development and building load of Dongying City, the contributions of town buildings to land subsidence are calculated. The results show that the annual average land subsidence caused by the town buildings in central region of Dongying City, Kenli County and Gudao Town from 1976 to 2006 was 2.42 mm/a, 1.11 mm/a and 0.23 mm/a, respectively. These are in good agreement with the results from the existing data.

Key words: Yellow River Delta; Dongying; land subsidence; layer-wise summation method