

建筑群负荷引起的大地水准面起伏及对高程的影响

王解先^{1,2} 季善标³ 曹月玲¹ 余美义³

(1 同济大学测量系,上海市四平路 1239 号,200092)

(2 现代工程测量国家测绘局重点实验室,上海市四平路 1239 号,200092)

(3 上海市测绘院,上海市武宁路 419 号,200063)

摘要:以负荷潮理论为基础,利用上海市测绘院所提供的上海市楼群分布数据,计算和分析了高层建筑群作为地表负荷引起的地面径向形变及大地水准面起伏,进而分析其对高程产生的影响。计算结果表明,地面的垂直形变和大地水准面起伏均已达到 mm 级,大都市高密度建筑群对城市精密工程测量和形变监测影响非常大,在实际应用中应予以充分考虑。

关键词:负荷潮;建筑物负荷;地面形变;大地水准面起伏

中图法分类号:P223.0

地球除受太阳和月亮所施加的引力外,还受到表面变化着的负荷作用,从而使地球产生负荷潮汐。负荷潮理论主要研究地面负荷质量变化,进而改变地表负荷,导致整个地球物理场的变化,它已经成为国内外学者的主要研究领域。

随着经济的发展,城市人口不断增多,建筑物数量也随之不断增加,大面积密集的高层建筑群作为地面上的附加质量,必然会破坏弹性地球原有的平衡状态,引起地球质量的重新分布,导致附近地面和大地水准面形变。这些变化将使市区原有的测量资料产生偏差,尤其是水准资料。本文以负荷潮研究为理论依据,采用实际数据,计算分析了建筑群负荷引起的大地水准面起伏、地壳垂直形变及其对高程的影响。

1 建筑群负荷引起的地面垂直形变、大地水准面起伏以及对高程的影响

本文利用上海市测绘院提供的楼群分布数据,计算城市高层建筑群作为地表负荷对上海市及周边地区地面和大地水准面产生的影响。

1.1 单幢建筑引起的地面和大地水准面形变

为便于研究,将每幢建筑物视为质点,质心为

其几何中心。如图 1 所示,在球面坐标系中, O 为地球质心,设 P 为待计算点, Q 为建筑物,其质量为 m , P 点到 Q 点的距离为 s ,则质点 Q 对 P 点的引力位为^[1]:

$$v = \frac{Gm}{|r_2 - r_1|} = \frac{Gm}{s} \quad (1)$$

式中, G 为万有引力常数,将 $1/s$ 按勒让德多项式展开,有^[2,3]:

$$v = Gm \sum_{n=0}^{\infty} \frac{|r_1|^n}{|r_2|^{n+1}} P_n(\cos\beta) \quad (2)$$

因为 P 、 Q 均在地球表面上,则 $|r_1| \approx |r_2| \approx R$, R 为地球平均半径。将关系式 $g = GM/R^2$ 代入式(2),得:

$$v = \frac{mgR}{M} \sum_{n=0}^{\infty} P_n(\cos\beta) \quad (3)$$

根据负荷潮汐理论,在建筑物负荷的作用下地球由于形变自身还会产生附加位,因而在 Q 的作用下 P 点总的位的变化为:

$$\phi = v + v' = \frac{mgR}{M} g_0(R) \sum_{n=0}^{\infty} (1 + k'_n - h'_n) P_n(\cos\theta)$$

其中, h'_n 和 k'_n 是负荷勒夫数,它们是弹性均衡方程的解,用以表征地球在表面点负荷作用下的形变。

根据布隆斯公式得到大地水准面的起伏

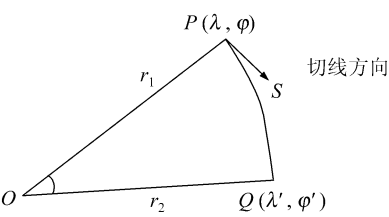


图 1 计算点、质量元与地心关系示意图

Fig. 1 The Sketch Map in Connection with Point P , Unit Mass Q and the Center of the Earth O

为^[4]:

$$\delta h = \frac{\phi}{g} = \frac{mR}{M} \sum_{n=0}^{\infty} P_n(\cos\beta)(1 + k'_n - h'_n) \quad (4)$$

同理,得到由质点负荷 Q 引起的 P 点的垂直位移为^[2]:

$$u_r = \frac{Rm}{M} \sum_{n=0}^{\infty} h'_n P_n(\cos\beta) \quad (5)$$

方向以向上为正。

1.2 建筑群负荷引起的地面和大地水准面形变

在计算建筑群负荷引起的地面和大地水准面形变时,由于垂直位移方向相同,因此将各幢建筑物引起观测点的垂直位移相加,就可得到整个建筑群引起的观测点的总的垂直位移:

$$u_r = \sum u_{ri} \quad (6)$$

城市建筑群引起的观测点的总的位变化等于各幢建筑物引起的观测点位的变化量之和。因此引起的大地水准面起伏为各幢建筑物引起的大地水准面起伏之和:

$$\delta h = \sum \delta h_i \quad (7)$$

1.3 高程变化模型

如图 2 所示,在建筑群负荷的作用下,地面点 P 移至 P' 点,高程由 H 变为 H' , u_r 为地面垂直形变, δh 为大地水准面起伏,因而有等量关系^[3]:

$$H + \delta h = H' + u_r$$

所以, P 点的高程变化量为:

$$\mathrm{d}h = H' - H = \delta h - u_r \quad (8)$$

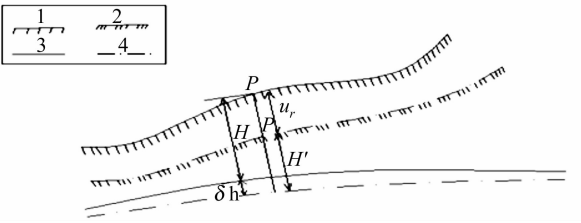


图 2 观测点高程变化示意图

Fig. 2 The Elevation Changes of the Observation Point

图 2 中,1 为未发生形变的地球表面;2 为已经形变的地球表面;3 为形变前的大地水准面;4 为形变后的大地水准面。

2 算例分析

本文使用上海市测绘院提供的上海市高层建筑属性数据,共有 6 284 幢,通过编程计算上海市高层建筑群对上海市及周边地区地面及大地水准面的影响,部分计算结果见表 1。

表 1 建筑群负荷引起的垂直位移、大地水准面起伏和高程变化

Tab. 1 The Ground Vertical Deformation, the Geoid Undulation and the Elevation Changes Caused by the Building Loading

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	...
U_r/mm	-0.089 1	-0.206 9	-0.509 4	-1.107 4	-1.311 0	-1.084 9	-0.426 2	-0.117 5	...
$\delta h/\text{mm}$	-0.034 7	-0.060 9	-0.113 9	-0.199 1	-0.232 1	-0.213 5	-0.096 6	-0.042 0	...
$\mathrm{d}h/\text{mm}$	0.054 4	0.146 0	0.395 5	0.908 3	1.0789	0.871 4	0.329 6	0.075 5	...

由图 3、图 4 可以看出,在建筑群负荷的作用下地面发生的最大垂直形变已超过 1.2 mm,且形变随着到建筑群中心距离的增大而迅速减弱。

由图 5、图 6 可以看出,在建筑群负荷的作用下,大地水准面产生的最大起伏为 0.2 mm,且起伏以正弦波的形式向四周扩散,振幅随着到建筑群中心距离的增大而迅速减弱。

由图 7、图 8 可以看出,在建筑群负荷的作用下,地面点高程的最大变化已超过 1 mm,且高程变化随着到建筑群中心距离的增大而迅速减弱。

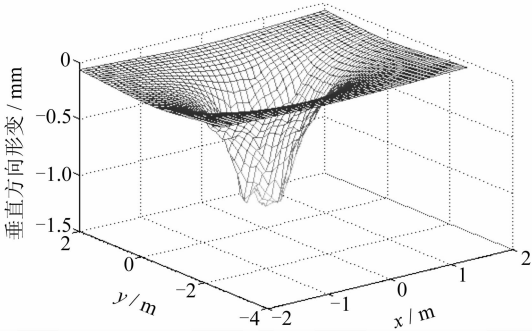


图 3 建筑群负荷引起的地面垂直形变图

Fig. 3 The Tridimensional Chart of Ground Vertical Deformation Caused by the Building Loading

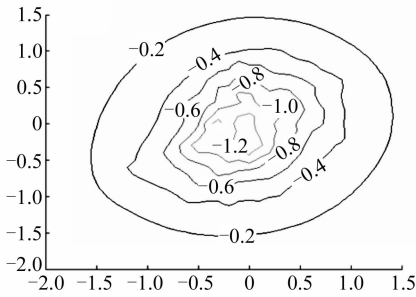


图 4 建筑群负荷引起的地面垂直形变等值线图
Fig. 4 The Isoline Chart of Ground Vertical Deformation Caused by Building Loading

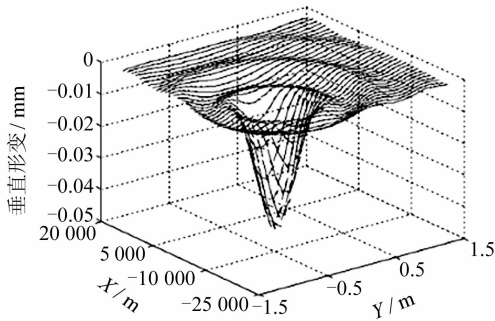


图 5 建筑群负荷引起的大地水准面起伏三维矢量图
Fig. 5 The Tridimensional Chart of Geoid Undulation Caused by the Building Loading

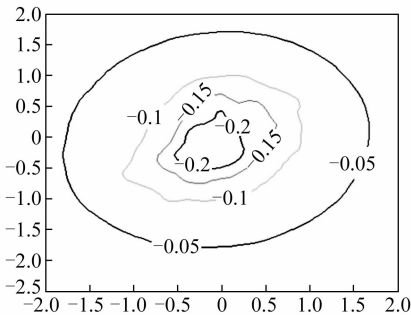


图 6 大地水准面起伏等值线图
Fig. 6 The Isoline Chart of Geoid Undulation

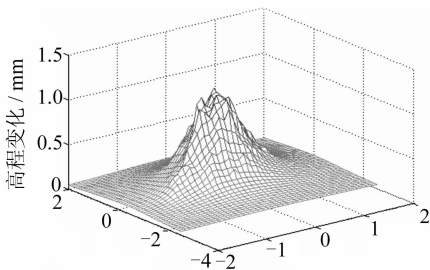


图 7 地面点高程变化三维矢量图
Fig. 7 The Tridimensional Chart of Elevation Changes

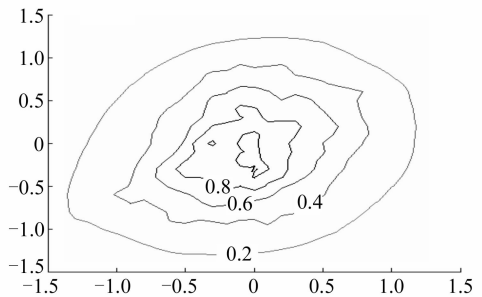


图 8 高程变化等值线图
Fig. 8 The Isoline Chart of Elevation Changes

3 结 语

1) 本文以负荷潮理论为基础,探讨单幢建筑作为地表负荷对地球表面及大地水准面产生的影响,从而推广到整个城市建筑群,建立地球表面垂直形变、大地水准面起伏、高程变化模型。

2) 利用上海市测绘院提供的数据,计算了上海城市建筑群对上海市及其周边地区地球表面及大地水准面产生的影响。计算结果表明,在上海市建筑群负荷的作用下,地面发生垂直位移的最大值为 $-1.326\ 9\text{ mm}$,该建筑群导致大地水准面的最大起伏为 -0.25 mm ,最大高程变化为 $1.105\ 2\text{ mm}$ 。

3) 在地面垂直形变效果图中可以看出,在建筑群负荷的作用下地面发生的垂直形变和地面点的高程变化随着到建筑群距离的增加而逐渐减小。同样,大地水准面的起伏也是随着距离的增大而逐渐减弱,变化趋势形同衰减的正弦波。

参 考 文 献

[1] 汪孔政,王解先.建筑物负荷引起的地面和大地水准面形变研究[J].地壳形变与地震,1999,19(2): 48-54

[2] 方俊.固体潮[M].北京:科学出版社,1984

[3] 梅尔基奥尔.行星地球的固体潮[M].北京:科学出版社,1984

[4] 党诵诗.物理大地测量学的数学基础[M].北京:测绘出版社,1988

第一作者简介:王解先,教授,博士生导师,从事 GPS 理论和卫星定轨、定位研究。
E-mail:wangjiexian@mail.tongji.edu.cn