

盛艳蕊、张子广、张素欣等, 2013, 楼盘施工注浆及荷载对唐山矿井水位的影响分析, 中国地震, 29(1), 142 ~ 147。

# 楼盘施工注浆及荷载对唐山矿井水位的影响分析

盛艳蕊<sup>1)</sup> 张子广<sup>1)</sup> 张素欣<sup>1)</sup> 孙东霞<sup>2)</sup> 单连君<sup>1)</sup> 尹宝军<sup>2)</sup>

1) 河北省地震局, 石家庄市槐中路 262 号 050021

2) 唐山市地震局, 河北唐山 063000

**摘要** 2010 年唐山矿井水位上升速率明显加快, 上升幅度明显高于往年同期。本文从地下水动力学和荷载效应角度, 利用抽(注)水试验模型和均布荷载下半无限大的弹性空间理论模型, 分析井孔附近楼盘施工注浆及建成后荷载作用对井水位的影响。结果表明, 距井孔 200 ~ 700m 范围内注浆, 每天注浆 2500 m<sup>3</sup>, 注浆 270d, 能引起井水位上升 8 ~ 11m 的变化; 大面积的楼盘荷载作用可以引起井水位上升约 4m 的变化。通过对这些影响因素的分析, 认为唐山矿井水位的上升异常与楼盘施工注浆及建成后的荷载作用有一定的相关性。

**关键词:** 唐山矿井 水位上升 均布荷载理论模型 抽水试验模型

[文章编号] 1001-4683(2013)01-0142-06 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

## 0 引言

影响地震流体观测井水位的因素较多, 如抽水、排灌、注水、地表载荷(列车、河流等)等, 以及随着城市化进程的加快而出现的楼盘施工、环城水系建设等。为更有效地利用流体观测井的观测数据, 需要排除上述因素的影响(孙小龙等, 2011)。张昭栋等(1990)利用弹性理论和地下水动力学理论讨论了油田注水和采油压力的变化对承压井水位变化的影响; 张义民(1993)利用均布荷载下半无限弹性空间的弹性理论解释了井水位对地表水体荷载效应的响应; 车用太等(2004)利用土力学中矩形荷载模型计算了列车荷载下的垂直应力引起的井水位变化。唐山矿井水位自观测以来具有较好的年变规律, 1999 ~ 2005 年受地下水开采的影响呈趋势性下降; 2006 年 7 月水位在趋势性下降背景下转折上升; 2010 年年变规律消失, 上升速率明显加快, 上升幅度约 11m, 数字化观测水位和模拟观测水位同步变化。经调查发现, 2009 年 4 月唐山矿井附近某楼盘开始施工, 2010 年 3 月 2 日井孔水位探头发生故障, 提起探头发现有黄色浆液附着, 说明注浆可能与井孔含水层产生水力联系。该楼盘建筑面积较大, 与井孔距离较近, 荷载作用也可能会对水位有影响。本文应用地下水动力学理论和均布荷载下的弹性理论, 分析楼盘施工注浆及建成后的荷载作用对唐山矿井水位的

[收稿日期] 2012-09-14; [修稿日期] 2012-10-30

[项目类别] 震情跟踪合同制定向工作任务(2011020303)资助

[作者简介] 盛艳蕊, 女, 1983 年生, 硕士, 主要从事地下流体与地震预测研究。E-mail: shengyr2007@sina.com

影响。

### 1 井孔概况

唐山矿井, 又名山西水 2 井或唐山井, 构造上位于燕山褶皱带与华北平原沉降带的结合部, NE 向唐山断裂与 NWW 向隐伏断裂于此通过(国家地震局《一九七六年唐山地震》编辑组, 1982)。该井自 1981 年 1 月开始观测, 2001 年至今数字观测与模拟观测并行。观测含水层系奥陶系灰岩岩溶裂隙水, 现有井深 207m, 观测段深度 154 ~ 207m, 井孔柱状图见图 1。水位潮汐现象明显, 水位气压系数约 3.5mm/hPa; 水震波显著(尹宝军等, 2009)。

近几年来由于城市建设的发展, 唐山矿井周边环境发生改变。2009 年 4 月距离井孔约 200m 处的某楼盘大面积施工, 对观测井造成一定程度的影响。本文从楼盘施工及建成后荷载作用两方面来分析其对井水位的影响程度。

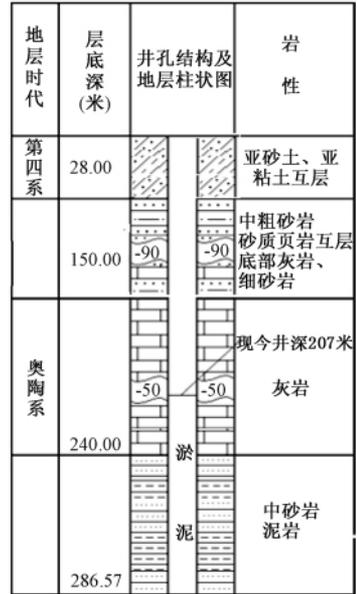


图 1 唐山矿井井孔柱状图

### 2 注浆对水位的影响

2009 年 4 月唐山矿井东北方向大面积楼盘施工, 该楼盘与井孔最近距离约 175m, 最远距离约 700m。井孔附近地区地下灰岩有溶洞发育, 为避免地面楼盘下沉, 该楼盘于 2009 年底 ~ 2010 年 8 月, 通过钻孔向地下注浆, 封住可能的溶洞, 钻孔深度约 27 ~ 28m。如井孔柱状图(图 1)显示, 井孔含水层以上(地面以下 29 ~ 150m)为页岩、砂岩等渗透率较高的岩性, 注浆过程中可能会有浆液下渗。图 2 为注浆前后唐山矿井水位变化曲线, 由图 2 可见, 注浆期间唐山矿井水位上升速率较快, 水位探头上附着有类似所注浆液的黄色物质, 说明注浆过程有浆液下渗现象。

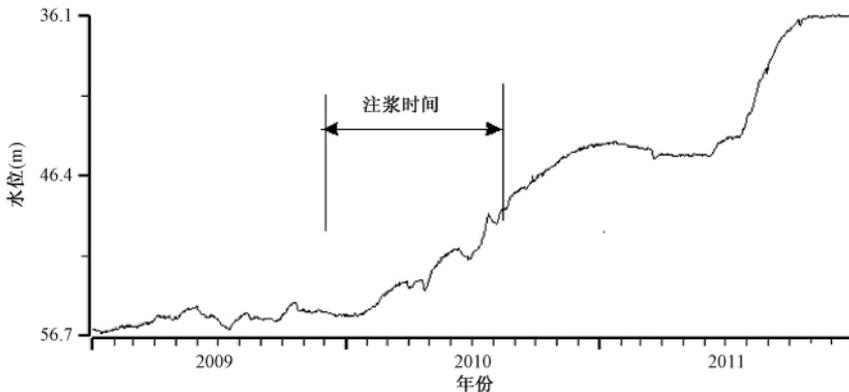


图 2 注浆前后唐山矿井水位变化曲线

本文从地下水动力学角度分析注浆过程中浆液下渗引起的水位上升变化。据泰斯理

论,距离抽水井为  $r$  的某点在连续抽水一段时间  $t$  后,等厚无越流承压含水层中完整井水位降深  $h$  (薛禹群,1997)

$$h = \frac{Q}{4\pi T} \int_u^\infty \frac{e^{-u}}{u} du \quad (1)$$

$$u = \frac{r^2 S}{4\pi t} \quad (2)$$

式中,  $Q$  为等速抽水量;  $T$  为含水层导水系数;  $S$  为含水层储水系数;  $t$  为抽水时间;  $r$  为抽水井到观测井的距离。

已有研究显示,抽水引起含水层孔隙压力降低,井水位下降;注浆时浆液下渗,孔隙压力增大,引起水位上升(刘耀炜等,2011;晏锐等,2008; Emily et al,2003)。本文收集了楼盘打桩注浆的相关数据:地基打桩数量 66000 根,每根重量约 12~13t,注浆浆液密度约  $1.3t \cdot m^{-3}$  (国家技术监督局,1995),估算注浆量约为  $6.6 \times 10^5 m^3$ ,注浆 270d,每天须注浆约  $2500 m^3$ 。依据唐山矿井含水层参数(含水层厚度  $M=54m$ ,导水系数  $T=194.4m^2 \cdot d^{-1}$ ,储水系数  $S=1.7 \times 10^{-6} m^{-1}$ ) (殷积涛等,1990;唐九安等,2006),利用上述抽(注)水试验模型,模拟了井孔水位变化与注浆距离、注浆时间的关系(图 3)。图 3 中左图为注浆时间 1~9 个月井水位随注浆距离的变化,右图为在不同注浆距离下井水位随注浆时间的变化。由图 3 可以看出,距离井孔 200~700m 处,每天等速注浆  $2500 m^3$ ,注浆 9 个月,可以引起井水位上升 8~11m;注浆 1 个月,会引起井水位上升 6~8m。因此,如果每天注浆量大于  $2500 m^3$ ,那么,井水位上升幅度应该更大。

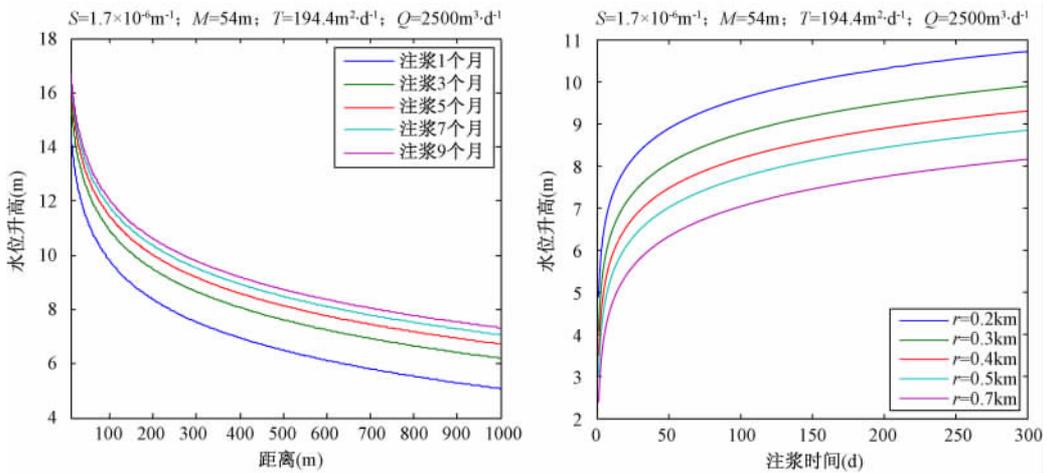


图 3 水位变化与注浆时间、注浆距离的模拟关系

### 3 荷载作用对井水位的影响

地表荷载作用到其垂直下部和井孔含水层顶板,含水层受压后,变形产生的孔隙压力变化会传递影响到井孔水位(国家地震局科技监测司,1995)。地表荷载(包括降雨、楼盘、列车以及海湖江河、水库等地表水体)的变化,会引起某些承压井水位不同程度的变化。

井孔附近楼盘占地面积约 25 万  $\text{m}^2$ , 总建筑面积约 104 万  $\text{m}^2$ , 建成后的楼盘荷载会传递到地基土层, 并向深处与外围井孔含水层扩散。本文利用均布荷载下半无限大弹性空间理论和布辛奈斯克公式(朱旦育等, 2010; 罗奇峰, 1988) 来分析荷载对井孔水位的影响。布辛奈斯克(Boussinesq) 给出的集中力  $Q$  在半无限弹性体内任意点  $M(x, y, z)$  所引起的垂直应力  $\sigma_z$  的计算公式如下

$$\sigma_z = \frac{3z^3 Q}{2\pi R^5} \quad (3)$$

式中  $\sigma_z$  为作用于坐标原点, 并与地面垂直的集中力;  $Q$  为集中应力;  $z$  为  $M$  点与  $xoy$  平面的距离;  $R$  为  $M$  点的向径,  $R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ 。

假定井孔含水层在水平方向上为无限大, 其上部岩层为弹性地质体(张昭栋等, 1990; Wang et al, 1989), 将楼盘附加应力简化为地面上的理想矩形竖直均布荷载  $p$ , 井孔在载荷弹性体内的矩形角点, 以矩形角点  $(0, 0, 0)$  建立如图 4 所示的坐标系, 在荷载分布面上取微元面积  $dx dy$ , 在微面积作用的力  $dF = p dx dy$ , 利用布氏公式, 矩形楼盘均布荷载条件下井孔含水层顶板埋深  $z$  处的应力分布  $\sigma$  为

$$\sigma(0, 0, z) = \frac{3pz^3}{2\pi} \int_0^l \int_0^b \frac{dx dy}{(x^2 + y^2 + z^2)^{5/2}} = K \cdot p \quad (4)$$

式中  $l$  为矩形楼盘的长;  $b$  为矩形楼盘的宽;  $z$  为井孔含水层顶板埋深;  $K$  为应力系数;  $p$  为楼盘荷载力。

当井孔含水层受到楼盘荷载垂直应力  $\sigma$  的作用时(不考虑力的衰减), 含水层骨架和含水层水体均承受力的作用, 在含水层顶板上各应力间的平衡关系为(张义民, 1993)

$$K \cdot p = \Delta p + \Delta p_s \quad (5)$$

$$\text{在井内, } \Delta H \cdot d = \Delta p \quad (6)$$

式中  $\Delta H$ —井水位变化量;  $d$ —水体比重;  $\Delta p$ —孔隙水压增量;  $\Delta p_s$ —含水层骨架受的压力增量;  $K$  为应力系数;  $p$  为楼盘荷载力。

由下式(国家地震局, 1986)

$$\frac{\Delta p}{\Delta p_s} = \frac{\beta_s}{n\beta_w} \quad (7)$$

推导出

$$\Delta H = \frac{K \cdot p \cdot \beta_s}{\beta_s + n\beta_w} \quad (8)$$

式中  $\beta_s$  为含水层骨架压缩系数;  $\beta_w$  为含水层中水体压缩系数;  $n$  为含水层孔隙度。

根据唐山矿井含水层相关参数( $\beta_w = 5 \times 10^{-10} \text{m}^2/\text{N}$ ,  $\beta_s = 0.8 \times 10^{-10} \text{m}^2/\text{N}$ ,  $d = 1.0 \times 10^3 \text{kg}/\text{m}^3$ ,  $n = 0.1$ ) (高业新等, 2009) 以及估算的楼盘相关数据( $l = 540\text{m}$ ,  $b = 460\text{m}$ ,  $z = 150\text{m}$ ,  $p = 8.08 \times 10^9 \text{N}$ ), 计算楼盘建成后的荷载作用可能引起唐山矿井水位上升  $\Delta H = 4.34\text{m}$ , 计算

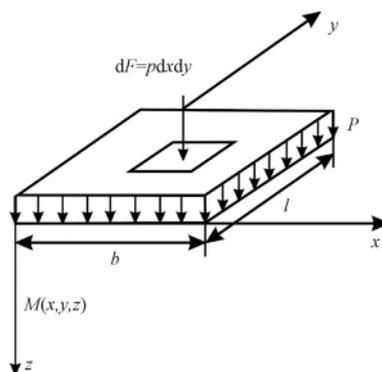


图4 弹性理论模型计算简图  
(据张辉杰等(2010))

过程中假定井孔位于矩形荷载的角点,而实际井孔距离楼盘有一定的距离,考虑到力的衰减,楼盘荷载引起的唐山矿井水位上升小于 4.34m。

## 4 结论与讨论

唐山矿井附近的楼盘施工注浆过程中浆液下渗,井水位上升速率较快,表明注浆对井水位有一定的影响;因楼盘占地面积较大、与井孔距离较近,井水位大幅度的变化,可能说明井水位对楼盘荷载的响应。利用抽(注)水试验模型和均布荷载下半无限大弹性空间理论模型分别解释施工注浆、楼盘荷载作用对水位的影响,方法可行。计算结果表明,距离井孔最远的 700m 处,每天等速注浆 2500m<sup>3</sup>,注浆 1 个月,足以引起井水位上升 6m;楼盘建成后的荷载作用引起的水位上升约 4m,两者总计约 10m,与 2010 年唐山矿井水位上升幅度基本相当。因此,分析认为唐山矿井水位的异常上升与楼盘施工注浆及荷载作用有关,在井水位异常分析中应该考虑这些因素的影响。2011 年唐山地区雨季降水量偏大,井水位上升幅度较大。从趋势上看,2011 年以来唐山矿井水位年动态基本恢复,但相比 2006~2008 年正常动态的水位埋深 60m,水位在 35~40m 的高值变化,说明水位上升除受降雨的影响之外,还与楼盘建成后的持续荷载作用有关,在以后的资料分析中应考虑这一因素。

由于收集到的楼盘相关数据不太精确,以及井孔周边地质资料不完备,导致计算结果可能有些偏差,但是计算的唐山矿井水位变化的数量级应该可靠。抽水过程是动态变化过程;荷载作用从楼盘开始施工就存在,也是动态过程。唐山矿井水位的变化包含了对上述两种作用的响应,本文分析中仅考虑了两个过程的独立作用,具有一定的局限性。若应用数值模拟方法模拟水位的变化,结果可能更可靠,在今后的工作中需要对此作进一步的深入分析。

感谢中国地震台网中心晏锐、中国地震局地壳应力研究所孙小龙的指导和帮助,感谢唐山市地震局、唐山矿台站观测人员提供资料。

## 参考文献

- 车用太、鱼金子,2004,地下流体典型异常的调查与研究,北京:气象出版社。
- 高业新、吴庆华、韩玉英等,2009,抽水含水层对非抽水含水层水位影响的效应分析,现代地质,23(1),164~170。
- 国家地震局,1986,地下水动态资料汇编,北京:地震出版社。
- 国家地震局《一九七六年唐山地震》编辑组,1982,一九七六年唐山地震,北京:地震出版社。
- 国家地震局科技监测司,1995,地震地下水手册,北京:地震出版社。
- 国家技术监督局,1995,水泥密度测定方法,中华人民共和国国家标准 GB/T208-1994,北京:中国标准出版社。
- 罗奇峰,1988,对气压、降雨等附加应力对井水位影响机理的理论分析,西北地震学报,10(2),1~7。
- 刘耀炜、许丽卿、杨多兴,2011,龙滩水库诱发地震的孔隙压力扩散特征,地球物理学报,54(4),1028~1037。
- 孙小龙、刘耀炜、晏锐,2011,利用水位资料反演华北地区构造应力场变化,地震,31(2),42~48。
- 唐九安、梁子斌、常千军等,2006,辽宁深井承压水位潮汐响应函数的初步研究,东北地震研究,22(1),5~10。
- 薛禹群,1997,地下水动力学,北京:地震出版社。
- 晏锐、陈颀、高福旺等,2008,从昌平井体应变、水位对地震波的响应特征推算含水层的 Skempton 常数,地震学报,30(2),144~151。
- 殷积涛、郑香媛,1990,通过固体潮分析确定含水层导水系数,地震科技情报,(4),29~39。
- 尹宝军、马丽、陈会忠等,2009,汶川 8.0 级地震及其强余震引起的唐山井水位同震响应特征分析,地震学报,31(2),195~204。

张辉杰、李玉根,2010,均布荷载作用下土中附加应力计算,西部大开发,(2),70~71。

张义民,1993,双王井水位的渭河水体荷载效应及其机理分析,地震,(3),77~80。

张昭栋、郑金涵、冯初刚等,1990,深井水位的地表荷载效应及其与含水层物理力学参数关系初探,地震学刊,(1),27~32。

朱旦育、于广云、张径伟等,2010,非半无限空间均布荷载下地基附加应力的理论计算,地基处理,21(4),64~68。

Emily E, Brodsky E R, Douglas W, et al, 2003, A mechanism for sustained groundwater pressure changes induced by distant earthquakes, Journal of Geophysical Research, 108 (B8), 2390.

Wang R J, Hans J K, 1989, Poroelasticity: Efficient modeling of strongly coupled, slow deformation processes in a multilayered half-space, Geophysics, 94, 9453~9462.

## Impact of grouting and loading of building construction on water level in Tangshan mine wells

Sheng Yanrui<sup>1)</sup> Zhang Ziguang<sup>1)</sup> Zhang Suxin<sup>1)</sup> Sun Dongxia<sup>2)</sup> Shan Lianjun<sup>1)</sup>  
Yin Baojun<sup>2)</sup>

1) Earthquake Administration of Hebei Province, Shijiazhuang 050021, China

2) Earthquake Administration of Tangshan City, Tangshan 063000, Hebei, China

**Abstract** The water level rising rate of Tangshan mine well significantly accelerated in 2010, and the ascensional range was obviously higher than the same period in previous years. From the point of view of groundwater dynamics and loading effects, using the pumping (pouring) water test model and semi-infinite elastic space theory model under uniform load, grouting and loading of the near building construction were analyzed. Results represent that range of 200~700m grouting, daily grouting 2500m<sup>3</sup>, grouting 270d, can cause rising change in 8~11m of well water level, and loading of large area of the near building can cause about 4m changes of well water level. The analysis of these factors shows that water level anomalous rising of Tangshan mine well was relevant to grouting and loading of the near building construction. This study provides a scientific basis for anomalous rising analysis of water level in Tangshan mine wells.

**Key words:** Tangshan mine well Water level rise Uniform load theory model Pumping test model