

立井井筒地层注浆加固实测数据分析

商翔宇, 周国庆, 赵光思, 程晋源, 周 杰

(中国矿业大学 建筑工程学院, 江苏 徐州 221008)

摘 要: 针对某矿地层注浆治理立井井壁破裂工程期间获得的大量实测数据, 分析处理得出相应无量纲影响因子以及任意注浆段注浆活动对井壁中任意监测点竖向应变改变量的影响关系式。结果表明, 注浆孔位与监测点的空间相对位置、注浆压力及注浆量对监测点的竖向应变改变量的影响均属非线性, 其中竖向相对位置影响较为显著。

关 键 词: 注浆; 立井; 监测; 数据分析

中图分类号: TO 26

文献标识码: A

Monitoring data analysis of soil grouting reinforcement in vertical shaft

SHANG Xiang-yu, ZHOU Guo-qing, ZHAO Guang-si, CHENG Jin-yuan, ZHOU Jie

(Institute of Rock and Soil Mechanics, School of Architecture and Civil Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221008, China)

Abstract: A great amount of monitoring data were obtained during the grouting reinforcement process in vertical shaft; and then several specific non-dimensional impact factors were deduced from these original test data. Using nonlinear least square approximation method, the relation between the vertical strain change of arbitrary position on the shaft lining and the given grouting phase was reached. The analysis result shows that not only the relative space location between grouting place and monitoring point, but also the grouting pressure and injected amount affects this vertical strain change nonlinearly; and that vertical relative location has the more prominent affection.

Key words: soil grouting; vertical shaft; monitoring; data analysis

1 引 言

自 20 世纪 80 年代以来, 我国华东地区深厚表土层中相继有 100 多个立井井筒发生了井壁破裂灾害。根据竖直附加力是导致井壁破裂主要因素的“附加力”理论^[1], 人们研究并实践了多种防治井壁破裂的技术和方法, 其中地面注浆加固含水层是从“本”上解决问题, 能够有效缓释和抑制井壁竖直附加力^[2-5], 可在较长时间内保证井壁安全, 而且治理工程期间几乎不影响煤矿的正常生产。文献[2]阐述了地面注浆法治理井壁破裂的机制, 并结合工程监测应变数据对治理效果进行了分析, 文献[6]结合工程实际对注浆期间应变数据进行分析。文献[7]则借助于弹塑性理论对土层注浆加固机制及注浆参数进行了研究, 文献[8-10]对不同注浆参数的演变规律进行了理论研究。目前文献中对注浆期间监测

应变、注浆指标进行统一分析的报道较为少见, 本文对某注浆治理井壁破裂工程应变数据、注浆统计数据进行分析, 以寻求实测数据与注浆活动之间的关系。

2 注浆工程概况

华东地区某煤矿主井井口标高 38.50 m, 井筒深 628.60 m, 井筒净直径为 5.50 m。主井井筒穿过第四系表土层厚 242.84 m, 采用冻结法施工, 井壁结构为普通双层钢筋混凝土井壁, 内壁厚 400 mm, 外壁厚 600 mm, 基岩段采用单层素混凝土井壁。2004 年该煤矿主井井壁发生混凝土剥落、开裂、淋水、露筋弯曲等破坏现象, 严重影响矿井的提升运行, 决定采用地层注浆加固方法对其进行治理。

根据该矿主井井筒穿过地层的地质、水文地质条件, 确定注浆加固范围为垂深 90~250 m, 其中

含水层 6 层。设计将加固土层划分为 12 个注浆段高, 设计注浆孔数 10 个, 其分布见图 1。地层注浆治理工程于 2005 年 6 月 15 日至 7 月 14 日和 10 月 19 日至 2006 年 3 月 15 日两个阶段实施完成。通过注浆治理, 该主井井壁竖向压应变增加的趋势得到明显的缓释和抑制, 井筒周围地层抬升均匀。各项检测表明, 地面注浆起到加固土层和保护井筒的作用, 对井壁竖直附加力有明显的缓释作用。本文主要讨论注浆期间各监测数据与注浆活动之间的相互关系, 以下对注浆期间的监测系统作简单介绍。

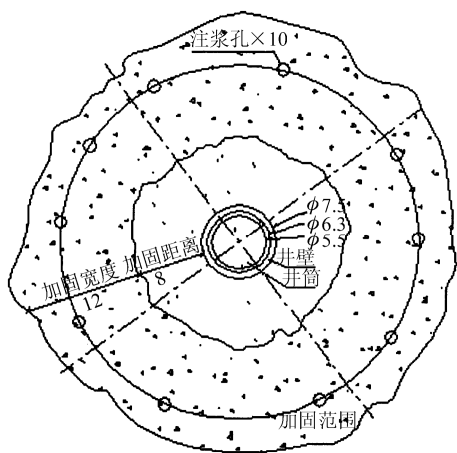


图 1 注浆孔位布置图示 (单位: m)
Fig.1 Layout of grouting bores (unit: m)

监测系统由井壁应变测试系统和地表沉降观测系统两部分组成。应变测试系统包括传感器、传输信号电缆、集线箱、测量单元和计算机。在注浆加固范围内设置了 4 个测试水平, 基岩段内设置一个测试水平, 每一水平均布 4 个测点, 共有 40 个应变计。监测数据由计算机数据采集系统实时自动进行采集和处理。地表沉降观测系统由井筒顶端及附近四周方向设置的 27 个测点组成, 在注浆期间共测量 45 次。另外, 对注浆期间的各个注浆孔位的时间、注浆量和压力均有详细记录。

3 实测数据整理与分析

3.1 实测数据的数学描述

井壁竖向应变直接反映注浆抬升加固地层的作用, 而导致某层传感器的竖向应变值变化的因素十分复杂, 诸如注浆层位、方向、注浆量和注浆压力, 均会对不同层位和不同方位的传感器造成不同的影响。本文数据分析的目的即在于得出第 m 注浆段 (共包括有 5 个注浆孔位) 对于任意应变监测点 j 处的竖向应变改变量的影响关系。要得到此关系,

首先须定量给出注浆孔位的关键特征, 这些特征包括描述注浆孔位与应变监测点之间的空间位置关系的几何特征和描述注浆本身工程特征的注浆量和注浆压力; 其次利用上述关键特征参数分析得出该注浆段中任一注浆孔位对 j 处的竖向应变改变量的影响关系。以下给出描述几何特征的空间坐标系。

采用以井筒地表中心为坐标原点, 以竖向为 z 轴的空间圆柱坐标系, 对分析所涉及各量进行描述。课题所涉及量如注浆位置、传感器位置在径向方向基本固定, 故不考虑径向变化。各空间点的描述, 采用 z 坐标和以正东向为起始轴顺时针方向为正向的角度坐标。坐标系如图 2 所示。图中标明了 10 个注浆孔的位置坐标。5 个奇数孔 1、3、5、7、9 的角度坐标分别为 270° 、 0° 、 60° 、 135° 和 210° ; 5 个偶数孔 2、4、6、8、10 的角度坐标分别为 315° 、 30° 、 90° 、 180° 和 240° 。工程共计 13 个射孔段, 每一注浆段内对 z 坐标进行平均, 即取其平均值作为该射孔段的 z 坐标值。传感器方位 WS、ES、NE 和 NW 分别对应于 135° 、 45° 、 315° 和 225° , 5 层传感器自上而下 z 坐标分别为 170、190、215、240 m 和 260 m。

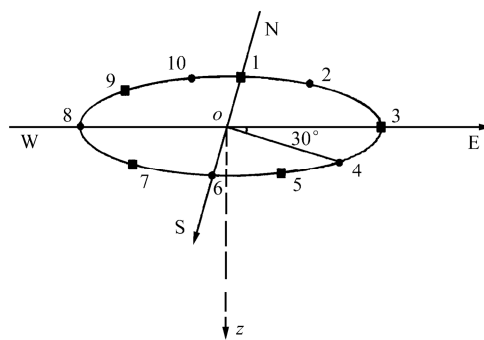


图 2 分析所用坐标系图示
Fig.2 Analysis reference frame

基于上述坐标系, 首先给出描述空间几何特征的相关参数: ①竖向距离影响因子, 定义为注浆点与观测应变位置点竖向相对距离除以总加固范围, 记作 δ_z , 即

$$\delta_z = \frac{z_z - z_c}{H} \quad (1)$$

式中: δ_z 为竖向距离影响因子; H 为注浆总加固范围 (本工程项目为 160 m); z_z 为注浆点竖向坐标; z_c 为应变观测点竖向坐标。当 $\delta_z > 0$ 时则表明注浆在测点位置之下, 反之则在测点位置之上。②环向

距离影响因子, 定义为为注浆点的角度坐标与测点角度坐标之差除以 180° , 记作 δ_a 。考虑两点之间的相对角度, 当 $\delta_a > 180^\circ$ 时, 用 $(360^\circ - \delta_a)$ 代替 δ_a 。然后, 给出描述注浆本身工程特征的注浆量和注浆压力参数:

注浆量影响因子:

$$q = Q/Q_d \quad (2)$$

式中: Q 为实际注浆量; Q_d 为设计注浆量。当 $q > 1$ 时, 即记 $q = 1$ 。

注浆压力影响因子为

$$p = e^{-q} \quad (3)$$

式中: p 为注浆压力因子; q 为注浆量影响因子。由于本注浆工程中, 在不出注浆压力上限情况下, 注浆压力小则注浆量大、反之则小, 因此, 根据本注浆工程的统计, 可以用式 (3) 粗略表示注浆压力的影响。

需要注意的是, 上述注浆量影响因子、注浆压力影响因子、竖向距离影响因子、环向距离影响因子均为无量纲量。按照上述定义的数学描述, 分析目的是得到关于应变变化与上述诸影响因子之间的关系式, 即 $\varepsilon = \varepsilon(q, p, \delta_z, \delta_a)$ 的具体形式。

3.2 实测数据的处理分析

分析按照如下思路进行: 任意注浆段 m 对埋设在井筒中的传感器 j 的影响程度由上述不同的影响因子决定。按照上述数据描述方法, 可以得到这样的样本数据组: 每一数据组包括一个竖向应变改变量 ε , 1 个竖向因子 δ_z , 5 个环向因子 δ_a , 5 个注浆量因子 q 和 5 个注浆压力因子 p 共 17 个数据, 其中 ε 为因变量, 其他因子均为自变量。分析的目的是得到因变量与众多自变量之间的关系。

本文选用 1~3、5 共 4 个层位, 共 $4 \times 4 = 16$ 个传感器, 注浆工程包括偶数孔和奇数孔共 26 个注浆段, 共计 $26 \times 5 = 130$ 个注浆孔位。每一个注浆段对上述 16 个监测点的竖向应变均有不同程度的影响, 换言之, 这里提供 $26 \times 16 = 416$ 个样本数据组, 限于篇幅, 文中不再给出这些数据样本, 而着重于样本数据的分析。

将注浆工程按时间顺序进行分段, 共分 7 段, 图 3 给出其中两段工程变化进展, 图中阴影部分为注浆段, 空白部分为注浆间歇期, 以方便显示每一注浆段对不同测点竖向应变改变量的影响。

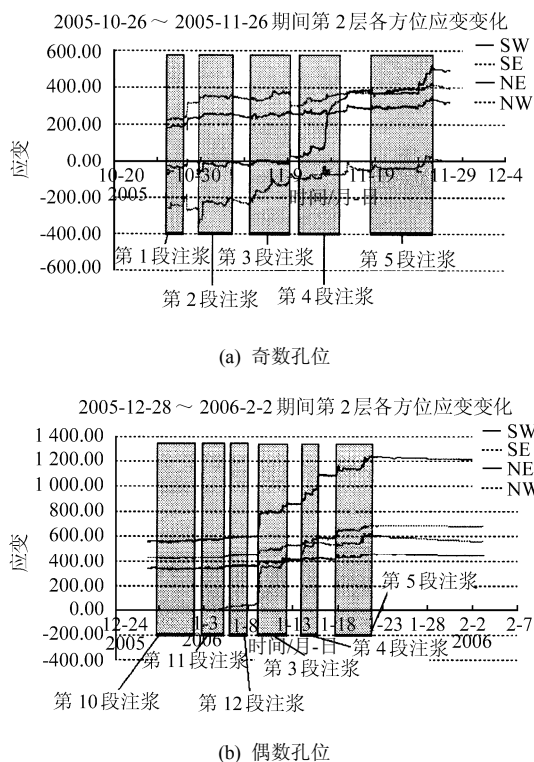


图3 第2层各测点竖向应变量随注浆工程进展变化图示
Fig.3 Evolution of 2nd floor monitoring vertical strain change with grouting process

以具体以偶数裸孔注浆段对第2层 SW 和 SE 方向测点竖向应变的影响为例, 统计各影响因子。首先计算得竖向距离因子 $\delta_z = (240 - 190)/160 = 0.3125$, 再以 SW 方向为观测应变方位, 进行其他因子的统计, 其他方向与之不同的只有环向因子, 见表 1。

表1 偶数裸孔注浆段对第2层位西南方向影响因子
Table 1 Impact factors of given gouting process on 2nd southwest vertical strain change

ε / $\mu\varepsilon$	δ_z	影响因子	δ_a				
			1	0.583 3	0.250 0	0.250 0	0.583 3
-40	0.312 5	q	0.279 0	0.387 5	0.625 0	0.320 0	0.850 0
	0.312 5	p	0.756 5	0.678 8	0.535 3	0.726 1	0.427 4

表 1 较清晰地反映了偶数裸孔段注浆对第2层不同方位竖向应变的影响, 为进一步分析各因子对竖向应变的影响作用奠定了基础, 其他各层传感器不同方位竖向应变变化对不同注浆孔位的响应也可以做类似的统计分析。

3.3 无量纲数据关系分析研究

经过对实测数据的上述处理, 得到了 416 组 (每组 17 个, 共 7 072 个数据) 的无量纲化数据。这些数据能够有效准确地反映注浆工程中诸如注浆

工程特征和井壁竖向应变变化的时空特征, 比较全面地刻画了注浆工程中各主要因素。以下对这些数据进行分析, 以期得到各主要因素之间的关系。

相同注浆段不同孔位对给定层位传感器竖向应变的竖向影响因子是相同的, 因此竖向因子为相对独立性较高的因子。分析表明, 环向因子、注浆量因子和注浆压力因子不像竖向因子与竖向应变改变量之间有较为明显的统计规律, 这是因为这里提供的统计样本中的每一个因变量即竖向应变改变量是由某个给定的注浆段引起的, 这个注浆段只有一个竖向因子, 但却有代表 5 个注浆孔位的 5 个环向因子、注浆量因子和注浆压力因子, 是它们的综合作用引起了井壁竖向应变的改变量。通过考察竖向因子对井壁竖向应变改变量的影响, 利用数据拟合工具可以得出竖向因子对井壁竖向应变平均改变量的影响函数形式:

$$\varepsilon = k(\delta_z) = 4.315\ 62 + 75.521\ 95e^{-20.733\ 4(\delta_z - 0.135\ 41)^2} \quad (4)$$

式中: ε 为应变监测点的竖向应变改变量。值得注意的是, 上述其他 15 个影响因子可以进一步划分为 5 个相对独立的因子集团, 即每一个注浆孔位的环向因子、注浆量因子和注浆压力因子共同构成一个相对独立的因子集团, 代表着该注浆孔注浆对样本提供的竖向应变改变量的贡献。由于每个因子集团中的分量因子已经描述了不同孔位的空间特征和注浆参数特征, 因此注浆段内各孔位的集团因子完全可以由一个函数表示。假设该因子集团可以用函数 $g(\delta_a, p, q)$ 表示, 考虑式 (4) 竖向因子的影响函数为 $k(\delta_z)$, 则一个注浆段 m (其中共有 5 个注浆孔位, 用 i 表示) 对传感器 j 所测井壁竖向应变改变量的影响作用就可以用式 (5) 函数描述。

$$\varepsilon_{jm} = k(\delta_z)_{jm} \sum_{i=1}^5 g((\delta_a)_{ij}, p_i, q_i) \quad (5)$$

式中: ε_{jm} 为注浆段 m 引起传感器 j 的竖向应变改变量; $(\delta_z)_{jm}$ 为注浆段 m 与传感器 j 所在空间点两者竖向相对距离的竖向因子; $(\delta_a)_{ij}$ 为注浆孔位 i 与应变监测传感器 j 所在空间点二者环向相对距离的环向因子; p_i 为注浆段 m 之第 i 个注浆孔位的注浆压力因子; q_i 为注浆段 m 之第 i 个注浆孔位的注浆量因子。

综上, 除竖向因子之外的 3 个影响因子可以组合成为一个因子集团加以分析处理, 换言之, 要寻找出合适的 $g(\delta_a, p, q)$ 形式以表示该因子集团对应变监测点处井壁竖向应变改变量的影响作用。经过

对样本数据的大量对比分析发现, 如下形式的因子集团较能表现出与井筒竖向应变改变量之间的相关性:

$$g(\delta_a, p, q) = e^{(a+b\delta_a+c\delta_a^2)}(d+fp+hq+lpq) \quad (6)$$

式中: a 、 b 、 c 、 d 、 f 、 h 和 l 均为待定常数。

将式 (4)、(6) 代入式 (5), 把 3.2 中统计出的所有数据相应地代入式 (5) 中, 然后采用非线性最小二乘法对这些数据点拟合运算, 最终得到平均意义上的最优解。经计算, 式 (5) 中待定常数的计算结果为: $a = 2.2$, $b = -3.131\ 5$, $c = 3.763\ 2$, $d = 0.261\ 96$, $f = -0.174\ 9$, $h = -0.301\ 91$ 和 $l = 0.162\ 34$ 。图 4 为拟合结果和原始散点结果的对比。

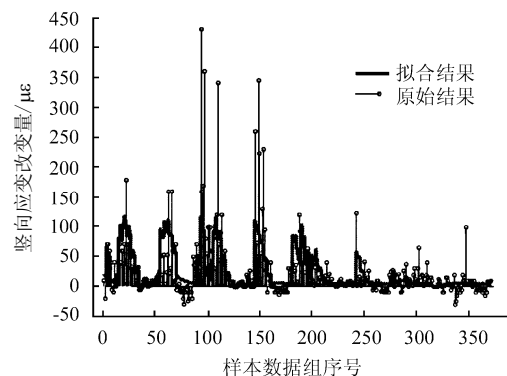


图 4 竖向应变改变与各因子综合的原始与拟合数据对比图

Fig.4 Comparison of approximation and actual measurement

由图 4 可以看到出, 拟合后的数据从绝对意义上看有较为明显的误差, 但从统计的平均意义上看, 拟合数据则具有较好的质量, 在相当程度上能够反映出前文定义各个影响因子对于井筒竖向应变改变量的综合影响。

将上述各分析和计算结果代入式 (5), 即可得到能在统计平均意义上较大幅度地反映各个影响因子对井筒竖向应变改变量综合影响的数学表达式:

$$\varepsilon_{jm} = 4.315\ 62 + 75.521\ 95e^{-20.733\ 4((\delta_z)_{jm} - 0.135\ 41)^2} \sum_{i=1}^5 e^{(2.2 - 3.131\ 5(\delta_a)_{ij} + 3.763\ 2(\delta_a)_{ij}^2) \cdot (0.261\ 96 - 0.174\ 9p_i - 0.301\ 91q_i + 0.162\ 34p_iq_i)} \quad (7)$$

从式 (7) 可以看出, 各因子对井筒竖向应变改变的影响作用均属非线性影响, 且这些影响作用之间也存在相互影响。

4 结 语

本文对某矿地层注浆治理立井井壁破裂工程期间获得的大量实测数据进行无量纲化分析,得到相当数量的样本数据组。借助于数据拟合工具,得出任意注浆段注浆活动对于井壁中任一监测点竖向应变改变量的影响关系式。结果表明,注浆孔位与监测点的空间相对位置和注浆压力、注浆量对监测点的竖向应变改变量的影响均属非线性,且其中竖向相对位置影响较为显著。本文结果尚未考虑地层性质以及注浆对于地层性质的影响,这是以后需要进一步完善的工作。本文结论对同类工程实测数据分析具有较好的借鉴意义。

参 考 文 献

- [1] 崔广心, 杨维好, 吕恒林, 等. 深厚表土层中的冻结壁和井壁[M]. 北京: 中国矿业大学出版社, 1998.
- [2] 周国庆, 刘雨忠, 冯学武, 等. 围土注浆缓释和抑制井壁附加力效应及应用[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(7): 742—745.
ZHOU Guo-qing, LIU Yu-zhong, FENG Xue-wu, et al. Application and effect of grouting in surrounding soil on releasing and restraining additional stress of shaft lining[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2005, 27(7): 742—745.
- [3] 刘志强, 周国庆, 赵光思, 等. 立井井筒表土层注浆加固过程的控制方法及应用[J]. 煤炭学报, 2005, 30(4): 472—475.
LIU Zhi-qiang, ZHOU Guo-qing, ZHAO Guang-si, et al. The control method and its application about the soil grouting reinforcement process in vertical shaft[J]. **Journal of China Coal Society**, 2005, 30(4): 472—475.
- [4] 赵光思, 周国庆, 别小勇, 等. 注浆加固地层法治理井壁技术的工程应用[J]. 矿山压力与顶板管理, 2004, (2): 109—111.
- [5] 葛晓光. 地面与破壁注浆治理井壁破裂灾害的工程分析[J]. 煤炭学报, 2002, 27(1): 41—44.
GE Xiao-guang. Engineering properties of two grouting techniques in mending shaft lining ruptures[J]. **Journal of China Coal Society**, 2002, 27(1): 41—44.
- [6] 付厚利. 深厚表土层地面注浆加固过程中井壁应变变化规律[J]. 岩土力学, 2003, 24(a1): 21—23.
FU Hou-li. Strain variation regularity of shaft lining during grouting reinforcement process for deep topsoil ground[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2003, 24(a1): 21—23.
- [7] 刘全林, 程桦. 立井壁后土层注浆加固机理及注浆参数研究[J]. 煤炭学报, 2000, 25(5): 486—490.
LIU Quan-lin, CHENG Hua. Study of grouting mechanism and parameters in the depths of thick topsoil[J]. **Journal of China Coal Society**, 2000, 25(5): 486—490.
- [8] 杨秀竹, 雷金山, 夏力农, 等. 幂律型浆液扩散半径研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(11): 1803—1806.
YANG Xiu-zhu, LEI Jin-shan, XIA Li-long, et al. Study of grouting diffusion radius of exponential fluids[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(11): 1803—1806.
- [9] 李哲, 仵彦卿, 张建山. 高压注浆渗流数学模型与工程应用[J]. 岩土力学, 2005, 26(12): 1972—1976.
LI Zhe, WU Yan-qing, ZHANG Jian-shan. Mathematical model of high pressure injection cement liquid and its application[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(12): 1972—1976.
- [10] 葛晓光, 钱家忠, 汪家权, 等. 井壁破坏注浆治理中的浆液孔隙压强模型[J]. 煤田地质与勘探, 2003, 31(6): 37—39.
GE Xiao-guang, Qian Jia-zhong, WANG Jia-quan, et al. Porous grout pressure modeling in mending shaft lining ruptures[J]. **Coal Geology & Exploration**, 2003, 31(6): 37—39.