

# 湿陷性黄土地区倾斜建筑物的膨胀法纠偏 加固理论分析与实践

朱彦鹏, 王秀丽, 周 勇

(兰州理工大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730050)

**摘要:** 湿陷性黄土地区往往由于地基处理不当, 造成建筑物地基的不均匀沉降和上部结构的偏移, 给建筑物的安全使用带来了很大的安全隐患, 通过研究和多项工程实践, 在理论分析及工程实践经验的基础上, 提出了一种膨胀法纠正湿陷性黄土地区建筑物倾斜的技术, 并用孔隙挤密原理推导出了膨胀材料使用量的计算公式, 将经验的膨胀材料顶升技术上升到了理论高度, 通过多项工程的实践, 并运用控制监测技术使膨胀法纠偏和加固地基技术在多项工程中得到了成功的应用, 实现了建筑物的纠偏与加固。

**关键词:** 土力学; 湿陷性黄土; 建筑物; 不均匀沉降; 纠偏; 加固; 技术

**中图分类号:** TU 43

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-6915(2005)15-2786-09

## THEORETICAL ANALYSIS AND PRACTICE OF RECTIFYING REINFORCEMENT USING EXPANSIVE METHOD FOR INCLINE BUILDING ON COLLAPSIBLE LOESS

ZHU Yan-peng, WANG Xiu-li, ZHOU Yong

(College of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

**Abstract:** Incline buildings can be always found in collapsible loess regions because of the improper ground treatment. Differential settlement of the foundation and inclination of the upper-structure bring the building greatly potential danger. Through research and practice of many projects, an expansive rectifying method that the quicklime piles may be used for the rectifying and reinforcement of foundation is proposed on the basis of theoretical analysis and practical experience, and the computational formula for application amount of expanding material is deduced by using pore extruding principle. This method is to drive mixture quicklime piles into the soil under the foundation by applying control monitoring technology and the expansive slaking lime can extrude the loess under the foundation, lift-up the original foundation and increase the compactness of foundation soil, then the purpose of rectifying and reinforcement of foundation is realized. This method was used in many projects and satisfactory results were obtained.

**Key words:** soil mechanics; collapsible loess; building; differential settlement; rectifying deviation; reinforcement; technology

**收稿日期:** 2004-04-20; **修回日期:** 2004-05-18

**基金项目:** 甘肃省科技攻关项目(ZS011-A50-013-G)

**作者简介:** 朱彦鹏(1960-), 男, 1982年于重庆建筑工程学院结构工程专业获硕士学位, 现任教授、博士生导师, 主要从事结构工程和工程事故分析与处理方面的研究工作。E-mail: zhuyup@lut.cn.

## 1 引言

西北黄土高原及相邻地区大都分土质为湿陷性黄土,在 20 世纪 60~90 年代,这些地区大量修建的多层建筑物和构筑物基本上都采用了天然地基或简单地基处理的浅基础。随着时间的推移,这些建筑物和构筑物中有些由于地下管线漏水或雨水长期浸泡而造成地基不均匀沉降,使建筑物和构筑物出现倾斜,由于这些建筑物上部结构基本完好,远没有到达设计基准期,但由于基础不均匀沉降导致建筑物出现安全隐患,为了保证这些建筑物和构筑物的安全和正常使用,应使其倾斜得到纠正并使原基础得到加固。

对一般倾斜建筑物的纠偏可以采用常用的静压桩法,刚性加固顶升法等,这些方法由于造价较高,施工要求难度大,并要采用多种技术配合使用的方法才能成功,对结构材料比较离散(像砌体结构)的建筑物和构筑物。采用这种方法风险较大,一不小心可能将整个建筑物破坏,使其不能使用,失去纠偏的目的<sup>[1-5]</sup>。湿陷性黄土地区建筑纠偏也可利用湿陷性黄土遇水湿陷(自重湿陷性黄土)的特点,采用挖孔取土释放未沉降部分地基的应力,并利用注水沉降法实现建筑物的纠偏,但是这种纠偏方法所需时间长,给使用者带来不便,纠偏时需要信息技术全面监控不能出现半点差错和马虎,另外这种方法所冒风险较大,若纠偏失控可能带来无法控制的后果,甚至导致纠偏失败<sup>[6,7]</sup>。

对地处湿陷性黄土地区的建筑物和构筑物的纠偏方法和地基加固技术进行了研究,提出了利用混合膨胀材料纠偏建筑物和加固地基的方法,并根据膨胀材料的膨胀量,应用孔隙挤密原理推导出了膨胀材料使用量的计算公式,通过多项工程的实践,并运用控制监测技术,使膨胀法纠偏和加固地基技术在多项工程中得到了成功的应用,实现了建筑物的纠偏与加固。

## 2 膨胀法纠偏和地基土加固基本原理

地处湿陷性黄土地区的建筑物或构筑物,当在受水不均匀浸泡时,产生不均匀沉降。沉降产生后将影响建筑物的正常使用。膨胀法纠偏的基本思路是采用石灰桩人工或机械在土体中成孔,然后灌入生石灰块,经夯实后形成的一根桩体。桩身还可掺

入其他活性与非活性材料。其加固和纠偏机理包括打桩挤密,吸水消化,消化膨胀,升温作用,离子交换,胶凝作用,碳化作用。可将其概括为<sup>[8]</sup>:

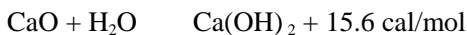
### (1) 桩挤密作用

石灰桩的成孔工艺有不排土工艺和排土成孔工艺。在非饱和粘性土和其他渗透性较大的地基中采用不排土成孔工艺施工时,由于在成孔的过程中,桩管将桩孔处的土体挤进桩周土层,使桩周土层空隙减小,密实度增大,承载力提高,压缩性降低。土的挤密效果与土的性质、上覆压力和地下水位状况等密切相关,一般地,地基土的渗透系数越大,挤密的效果就越明显,地下水位以上的土体的挤密效果比地下水位以下的明显。但在饱和粘土中,采用不排土成孔工艺施工不会对土体产生挤密效果。

### (2) 桩间土的脱水挤密作用

#### 吸水作用

生石灰填入桩孔后,吸收桩周土的水分发生消化反应,生成熟石灰,同时桩身体积膨胀并释放出大量的热量,反应方程式为



对于渗透系数小于桩体材料渗透系数的土体,由于桩周边土中被石灰吸收的水分得不到迅速补充,再加上消化反应释放的热量的蒸发作用,在桩周约 0.3 倍桩径的范围内出现脱水现象。脱水区内,土体的含水量下降,孔隙比减小,土颗粒密实度增大。生石灰的吸水量随着桩周土围压的增大而降低,随粉煤灰或火山灰等活性掺料的增多而减小。实际工程中,石灰桩的桩长大都不长(一般在 8 m 左右),土体对桩体的围压大致在 50~100 kPa。在 50 kPa 的压力下,1 kg 生石灰可吸水 0.8~0.9 kg,其中约 0.25 kg 为生石灰熟化吸水,其余熟石灰熟化后继续吸水。若采用 10% 的置换率进行加固,桩间土的平均失水量为 8%~9%;在桩体置换率为 9%、桩间距为 3 d 的软基上实测的失水量约 5%。5%~9% 含水量的降低值,可使土的承载力得到 15%~20% 的增长。

#### 胀发挤密作用

生石灰吸水消化后,桩体体积发生膨胀。生石灰体积膨胀的主要原因是固体崩解,孔隙体积增大,颗粒比表面积增大,表面附着物增多,固相颗粒体积也得到增大。体积的膨胀量与生石灰磨细度、水灰比、熟化温度、活性钙含量和外部约束等有关。生石灰越细,膨胀量越小;熟化温度越高,膨胀量越大;粉煤灰或火山灰等活性掺料量越大,膨胀量

越小；外部约束越大，膨胀量越小。大量室内实验表明，在 50~100 kPa 的围压下，石灰消化后桩体体积的胀发量为 1.2~1.5，相当于桩径胀发量 1.1~1.2 倍。在渗透系数大于桩体材料渗透系数的土层中，土层因石灰桩胀发挤压所产生的超孔隙水压力能迅速消散，桩周边土得以迅速固结。在渗透系数小于桩体材料渗透系数的土层中，由于石灰桩的吸水蒸发，在桩周边形成脱水区，脱水区内含水量下降，饱和度减小。随着桩体的吸水胀发，桩周边土层得以挤密压实。

#### 升温加热作用

伴随着生石灰的消化反应，反应释放出大量的热量，使桩周土的温度升高 200~600℃，桩周土中水分产生一定程度的汽化。由于水化反应释放出了大量的热能，从而大大促进了土层中胶凝反应的进行。

#### (3) 桩体的置换作用

##### 离子交换作用

生石灰消化后，消石灰进一步吸水，并在一定的条件下电解成  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{OH}^-$ 。 $\text{Ca}^{2+}$  与粘土颗粒表面的阴离子交换，并吸附在土颗粒表面，由 1~4 μm 的粒径形成 10 μm 甚至 30 μm 的大团粒，使土中粘粒的颗粒含量大大减小，土的力学性质有所改善。

##### 胶凝反应的作用

随着溶液中电离出的钙离子  $\text{Ca}^{2+}$  数量的增多，并且超过上述离子交换所需要的数量后，在碱性的环境中，钙离子  $\text{Ca}^{2+}$  能与石灰桩围边土中的二氧化硅( $\text{SiO}_2$ )和胶质的氧化铝( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )发生反应，生成复杂的硅酸钙水化物( $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ )和铝氧钙水化物( $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ )以及钙铝黄长石水化物( $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ )。这种水化物形成一种管状的纤维胶凝物质，牢牢地把周围土颗粒胶结在一起，形成网状结构，使土颗粒连接得更加牢固，土的强度大大提高。纯石灰桩周边的胶凝反应需经历很长的时间，才能形成 2~10 cm 厚的胶凝硬壳。

在掺以粉煤灰、火山灰、钢渣、粘土等活性掺料的生石灰桩中，掺料中所含的可溶性  $\text{SiO}_2$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  等离子首先与吸附在其表面的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  进行水化反应，生成水化硅酸钙( $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ )、水化铝酸钙( $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ )及水化铁酸钙( $\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ )等硬性胶凝物。在粉煤灰玻璃体表面及其界面处形成纤维状、针状、蜂窝状及片状结晶体，互相填充于未完全水化的粉煤灰孔隙间，胶结成密实而坚硬的水化物。使未完全水化的粉煤灰颗

粒间由摩擦和咬合而变成主要靠胶结，从而使颗粒间的强度大幅提高。由于掺活性掺料的石灰桩的胶凝反应发生在整个桩身内，因而桩身的后期强度高于纯石灰桩。

#### (4) 碳化作用

石灰与土中的二氧化碳气体反应，可生成不溶的碳酸钙。这一反应虽不如凝硬反应明显，但碳酸钙的生成也起到了使桩身硬壳形成的作用。

## 3 膨胀法纠偏加固的基本理论

膨胀法纠偏加固的基本方法是用机械或人工的方法成孔，然后将不同比例的生石灰(块或粉)、掺合料(粉煤灰、炉渣、矿渣、钢渣等)及少量附加剂(石膏、水泥等)灌入，并进行振密或夯实形成石灰桩桩体，桩体与桩间土形成复合地基的地基处理方法。石灰桩法具有施工简单、工期短和造价低等优点，混合膨胀材料的方法对于湿陷性黄土地区偏移建筑物的纠偏和地基加固，具有明显的技术效果和经济效益，目前已在我国得到广泛应用<sup>[1-3]</sup>。尽管石灰桩法已列入《建筑地基处理技术规范》(JGJ79-2002)修订稿中，但对石灰桩复合地基理论尚缺乏系统深入的研究。本研究首先基于弹性理论得出石灰桩膨胀桩径的计算公式，然后根据地基土孔隙比变化给出了基础下纠偏用石灰桩的体积计算公式，使石灰桩膨胀挤密法从经验提高到理论。

### 3.1 石灰桩的体积膨胀量计算

石灰桩成桩过程及体积膨胀石灰桩桩体材料生石灰吸水后固结崩解，孔隙体积增大，同时颗粒的比表面积增大，表面附着物增多，使固相颗粒体积也增大，在成桩过程中会产生强大的膨胀力，挤压桩周土体。假设桩周土体为理想弹性体， $E$  和  $\mu$  分别为土体弹性模量和泊松比。石灰桩体的膨胀力为  $P$ ，桩体设计直径为  $d$ ，将其视为具有圆形孔道的无限大弹性体承受内压  $P$  的轴对称平面问题。其平衡方程<sup>[9]</sup>为

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + (\sigma_r - \sigma_\theta)/r = 0 \quad (1)$$

几何方程为

$$\varepsilon_r = \frac{du_r}{dr}, \quad \varepsilon_\theta = \frac{u_r}{r} \quad (2)$$

物理方程为

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_r &= [(1-\mu^2)/E][\sigma_r - \mu\sigma_\theta/(1-\mu)] \\ \varepsilon_\theta &= [(1-\mu^2)/E][\sigma_\theta - \mu\sigma_r/(1-\mu)] \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

由式(1)~(3)可求出径向位移为

$$u_r = [(1 - \mu)d^2 / (4E)] / (p / r) \tag{4}$$

石灰桩桩体膨胀后的直径为

$$d_1 = d + 2u_r \Big|_{r=\frac{d}{2}} = d[1 + p(1 + \mu) / E] \tag{5}$$

石灰桩膨胀压力通常与生石灰掺量有关, 大致范围为 0.5 ~ 10 MPa, 土体的弹性模量通常在 2 ~ 10 MPa,  $\mu$  的取值范围通常为 0.3 ~ 0.45。若能从石灰掺量估算出石灰桩膨胀压力, 即可得出石灰桩的膨胀桩径。工程实践中, 石灰桩的膨胀量在 1.2 ~ 1.5 倍, 桩径膨胀量一般为设计桩径的 1.1 ~ 1.3 倍。

### 3.2 基础下纠偏用石灰桩的体积计算

要使纠偏量在设计控制范围内, 首先必须计算出在基础下布置的石灰桩的体积使用量, 现根据加固深度和加固范围确定用石灰桩的体积计算。

(1) 石灰桩周围土体挤压密实度的确定(图 1)

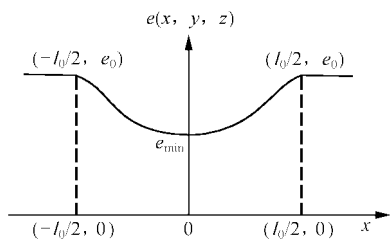


图 1 生石灰桩周围土体密实度分布函数

Fig.1 Compactness distribution function of soil body around quicklime piles

石灰庄周围土体在桩膨胀后的孔隙率变化应符合以下函数规律:

$$e = e(x, y, z) \tag{6}$$

式中: 当  $x = 0$  时,  $e = e_{\min}$ ,  $e_{\min}$  为土体最小孔隙率; 当  $x = \pm l_0 / 2$  时,  $e = e_0$ ,  $e_0$  为原地基土体的压实系数,  $l_0$  为膨胀挤压影响范围。

如假定原基础下土体孔隙率相等, 膨胀挤压顶升完成后孔隙率在单位长度范围内沿  $x$  方向呈二次抛物线分布, 则孔隙率的分布方程为

$$e = e(x, y, z) = \frac{4(e_0 - e_{\min})}{l_0^2} x^2 + e_{\min} \tag{7}$$

(2) 石灰桩周围土体纠偏所需挤压顶升量的曲线(图 2)

基础下地基土的沉降量即为纠偏所需的顶升量, 即在加生石灰桩膨胀挤压地基土并顶升基础时, 顶升量应与基础不均匀沉降量  $\Delta$  相等, 基础两侧膨胀量应符合如下曲线规律:

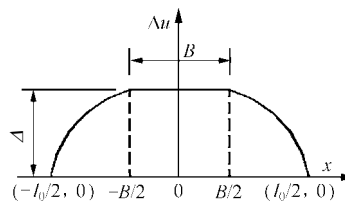


图 2 基础顶升量曲线

Fig.2 Lift-upping curve of foundation

$$\Delta u = \begin{cases} \Delta & -\frac{B}{2} \leq x \leq \frac{B}{2} \\ \frac{\Delta}{B^2 - l_0^2} (4x^2 - l_0^2) & -\frac{l_0}{2} \leq x \leq -\frac{B}{2}, \frac{B}{2} \leq x \leq \frac{l_0}{2} \end{cases} \tag{8}$$

式中:  $\Delta u$  为基础下土体顶升量曲线,  $\Delta$  为基础下土体的最大顶升量,  $B$  为基础宽度。

(3) 基础下膨胀材料使用量的计算

由于石灰桩在横向压力和基础的竖向压力作用下, 若压力为 50 ~ 100 kPa 时石灰桩产生的膨胀量为原体积的 1.3 ~ 1.5 倍, 挤密顶升后基础底部土体产生的体积增大量如图 2 所示。为了能够计算石灰桩的使用量现作如下假定:

根据基础下地基土的层理分布, 持力层所处位置来确定及挤密石灰桩的深度  $h$ 。

由于挤密石灰桩以下土层密实度较高, 其压缩性较小, 因此假定石灰桩以下土层是不可压缩的。

假定基础下原土体的压实系数和孔隙比相等。

假定基础下地基土原孔隙率与挤密后的孔隙率之差沿深度方向呈线性分布。

根据基础下土体的原单位孔隙的变化, 以及地基土的顶升量, 石灰桩挤密后土体体积缩小量应为

$$\begin{aligned} \Delta V &= \iiint_V (n_0 - n) \frac{h+y}{h} dv = \iiint_V \left( \frac{V_{v0}}{V_0} - \frac{V_v}{V} \right) \frac{h+y}{h} dv = \\ &= \iiint_V \left( \frac{V_{v0}}{V_{s0} + V_{v0}} - \frac{V_v}{V_s + V_v} \right) \frac{h+y}{h} dv = \\ &= \iiint_V \left( \frac{e_0}{1+e_0} - \frac{e(x, y, z)}{1+e(x, y, z)} \right) \frac{h+y}{h} dv = \\ &= 2 \left\{ \int_0^1 \int_{-l_0/2}^{-B/2} \int_{-h}^{\frac{\Delta}{B^2 - l_0^2} (4x^2 - l_0^2)} \left[ \frac{e_0}{1+e_0} - \frac{1}{[1 + (e_0 + e_{\min}) / 2]} \right] \right. \end{aligned}$$

$$\left( \frac{4(e_0 - e_{\min})}{l_0^2} x^2 + e_{\min} \right) \left] \frac{h+y}{h} dydx dz + \int_0^1 \int_{-B/2}^0 \int_{-h}^A \left[ \frac{e_0}{1+e_0} - \frac{1}{[1+(e_0 + e_{\min})/2]} \right. \right. \\ \left. \left. \left( \frac{4(e_0 - e_{\min})}{l_0^2} x^2 + e_{\min} \right) \right] \frac{h+y}{h} dydx dz - \int_0^1 \int_{-V_{ql}/2(h+\Delta)}^0 \int_{-h}^A \left[ \frac{e_0}{1+e_0} - \frac{1}{[1+(e_0 + e_{\min})/2]} \right. \right. \\ \left. \left. \left( \frac{4(e_0 - e_{\min})}{l_0^2} x^2 + e_{\min} \right) \right] \frac{h+y}{h} dydx dz \right\} \quad (9)$$

式中： $n_0$  为原基础下地基土的孔隙率， $n$  为不挤压后基础下地基土的孔隙率， $V_{v0}$  为原基础下地基土的孔隙体积， $V_0$  为原基础下地基土的总体积， $V_{s0}$  为原基础下地基土的土颗粒体积， $V_v$  为挤压后基础下地基土的孔隙体积， $V$  为挤压后基础下地基土的总体积， $V_s$  为挤压后基础下地基土的土颗粒体积。

设单位长度上所需石灰桩的体积为  $V_{ql}$ ，则膨胀后石灰桩的体积为  $\beta V_{ql}$ ，故石灰桩膨胀后的体积膨胀量为  $(\beta - 1)V_{ql}$ ，于是单位长度范围内基础下需补加固顶升石灰桩的体积由  $(\beta - 1)V_{ql} = \Delta V$  可得

$$V_{ql} = \frac{1}{(\beta - 1)} 2 \left\{ \int_0^1 \int_{-B/2}^0 \int_{-h}^A \frac{4(e_0 - e_{\min})}{l_0^2} (4x^2 - l_0^2) \left[ \frac{e_0}{1+e_0} - \frac{1}{[1+(e_0 + e_{\min})/2]} \right. \right. \\ \left. \left. \left( \frac{4(e_0 - e_{\min})}{l_0^2} x^2 + e_{\min} \right) \right] \frac{h+y}{h} dydx dz + \int_0^1 \int_{-B/2}^0 \int_{-h}^A \left[ \frac{e_0}{1+e_0} - \frac{1}{[1+(e_0 + e_{\min})/2]} \right. \right. \\ \left. \left. \left( \frac{4(e_0 - e_{\min})}{l_0^2} x^2 + e_{\min} \right) \right] \frac{h+y}{h} dydx dz - \int_0^1 \int_{-V_{ql}/2(h+\Delta)}^0 \int_{-h}^A \left[ \frac{e_0}{1+e_0} - \frac{1}{[1+(e_0 + e_{\min})/2]} \right. \right. \\ \left. \left. \left( \frac{4(e_0 - e_{\min})}{l_0^2} x^2 + e_{\min} \right) \right] \frac{h+y}{h} dydx dz \right\} \quad (10)$$

由式(10)则可确定单位长度基础下纠偏所需石灰桩的体积。

### 4 湿陷性黄土地区膨胀法纠偏加固的工程实践

为了验证以上计算理论的正确性，作者于多项工程中在以上理论的指导下进行了实践，下面举例说明。

某学校教学楼，建成于 1986 年，总建筑面积约 4 800 m<sup>2</sup>。原设计包括 4 部分，其中教师办公楼 3 层砖混结构由于地基湿陷，墙体裂缝等原因已经拆除。现在仅存 3 部分：(1) 门厅部分为 5 层框架结构；(2) 教学楼部分为 4 层砖混结构；(3) 电教室部分为 3 层框架结构。此三部分结构用沉降缝分隔，建筑平面见图 3。原设计中教室部分基础采用砖砌条形基础，门厅和电教室基础采用柱下条形基础。地基处理采用大开挖后整片土垫层增湿强夯方案。地基土处理范围超出建筑物外墙 3 m，有效处理深度自基础底面以下 3 m。设计要求处理后的地基土的压实系数  $\lambda_c$  为 0.90 ~ 0.95。

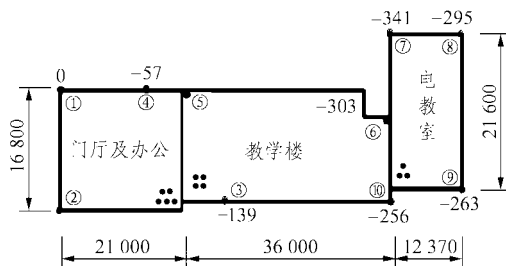


图 3 教学楼基础各控制点相对竖向位移(单位：mm)

Fig.3 Relative vertical displacement of each control point of teaching building foundation(unit: mm)

#### 4.1 现场勘察情况

接到任务后作者及相关技术人员对该教学楼进行了实地测绘勘察。该建筑物所处场地土为 Ⅱ级自重湿陷性黄土，虽经人工处理仍未能消除该地基土的湿陷性。实地勘察表明，该建筑因为雨水排水不畅导致地基不均匀下沉。勘察中发现，该建筑物东南面雨水井存在积水现象，由于防水措施年久失修，雨水井抹灰层出现开裂，雨水向地下渗流，该建筑东北方向雨水井未能打开观察，估计存在相似问题。另外表现比较明显的，教学楼背面雨水沟排水不畅，只有当雨水量聚集到一定程度时积水才能从原设计的水下通道排走。各部分勘察结果分述如下：(1) 教学楼部分。该建筑物教学楼部分外墙出现明显裂缝，

并有相互错动痕迹，内墙许多门窗洞口上角出现常见的由于地基沉降不均匀而产生的斜向裂缝，裂缝方向不一致表明其不均匀沉降情况复杂，并有扭转现象发生。教学楼内外有多处抹灰层脱落，多数并非地基沉降引起；(2) 电教室部分。电教室部分外填充墙出现方向一致的明显开裂，表明楼身整体发生不均匀沉降，并伴有楼身扭转现象；电教室柱子抹灰层也有剥离现象，通过剥离位置观察柱身并未发现混凝土开裂现象；(3) 门厅部分。门厅办公部分在屋面处有多处裂缝，办公墙体未见开裂，门厅外部柱也存在粉刷层剥落现象，未发现柱本身开裂情况。

通过全站仪观测，绘出整个大楼各个控制点的沉降量和位移量如图 3, 4 所示。各控制点数据统计见表 1。

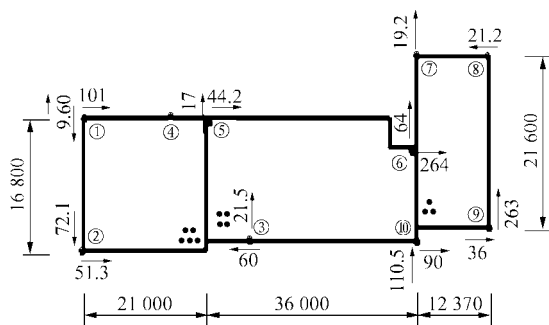


图 4 教学楼顶各控制点水平位移(单位：mm)

Fig.4 Horizontal displacement of each control point on the top of teaching building(unit：mm)

表 1 某学校教学楼各控制点位移一览表

Table 1 Displacement of each control point of the teaching building of a certain school

| 部位                   | 控制点 | 相对沉降/mm | 水平位移量  |       |         |       |
|----------------------|-----|---------|--------|-------|---------|-------|
|                      |     |         | 纵向     |       | 横向      |       |
|                      |     |         | 绝对值/mm | 倾斜率/% | 绝对值/mm  | 倾斜率/% |
| 门厅部分框架总高度<br>18.25 m | 1   | 0       | 101.0  | 0.6   | 96.0    | 0.5   |
|                      | 2   | 63      | 51.3   | 0.3   | 72.1    | 0.4   |
|                      | 4   | - 57    | -      | -     | -       | -     |
| 教学楼砖混<br>14.39 m     | 3   | - 139   | 60.0   | 0.4   | 21.5    | 0.1   |
|                      | 5   | -       | 44.2   | 0.3   | 17.0    | 0.1   |
|                      | 10  | - 256   | 90.0   | 0.6   | 110.5   | 0.8   |
|                      | 6   | - 303   | 264.0  | 2.0   | 64.0    | 0.5   |
| 电教室框架<br>13.08 m     | 7   | - 341   | -      | -     | 19.2    | 0.1   |
|                      | 8   | - 295   | 21.2   | 0.2   | -       | -     |
|                      | 9   | - 263   | 36.0   | 0.3   | - 263.0 | - 2.0 |

另外对基础施工情况，基础结构的完整性，基础下土的物理力学性能和湿陷性等进行勘察，勘察的结果是：基础下 3-7 灰土垫层和条形基础整体性良好，条形基础梁随地基存在变形，地基土经测试评定为 I 级自重湿陷性黄土。基础下土体的物理力学性能如表 2 所示。

表 2 基础下土体的物理力学性能

Table 2 Physical and mechanical properties of the soil under foundation

| 土的重度<br>(kN · m <sup>-3</sup> ) | 土的干<br>重度 ρ <sub>d1</sub><br>(kN · m <sup>-3</sup> ) | 黄土的<br>湿陷性<br>系数 δ <sub>s</sub> | 黄土的<br>压实系<br>数 λ <sub>c</sub> | 黄土的<br>比重 G <sub>s</sub><br>(kN · m <sup>-3</sup> ) | 黄土的<br>含水率 w | 黄土的<br>孔隙比 e <sub>0</sub> |
|---------------------------------|--|---------------------------------|--------------------------------|---|--------------|---------------------------|
| 18.0                            | 15.65  | 0.08                            | 0.93                           | 27.1  | 15%          | 0.73                      |

经过与建筑结构鉴定标准对照，该建筑物基础危险等级为 C，上部结构大部分承重墙体、梁、柱均存在危险点，危险等级为 B。教学楼以及门厅部分危险等级为 B，需要修缮；电教室部分危险等级为 C，需要加固。

#### 4.2 膨胀法基础顶升加固设计计算

根据现场试验，经计算黄土的最大干重度为 ρ<sub>dmax</sub> = 16.83 kN/m<sup>3</sup>，基础下挤密加固石灰桩周围土体的最大压实系数可达到 λ<sub>cmax</sub> = 0.97，相应的黄土干重度为 ρ<sub>d2</sub> = 16.33 kN/m<sup>3</sup>，最小孔隙比为 e<sub>min</sub> = 0.66。试验证明石灰桩的膨胀系数 β = 1.25，当沉降量为 240 mm，设计灰土顶升挤密桩自基础下长为 5 m，基础宽度为 1.8 m，挤密影响范围为基础宽度的 2 倍即 3.6 m，则单位长度基础下计算所需石灰桩体积为

$$V_{qt} = \frac{1}{(1.25-1)} \times 2 \left[ \int_0^1 \int_{-3.6/2}^{-1.8/2} \int_{-5}^{0.24} \frac{0.73}{1+0.73} - \frac{1}{1 + \frac{0.73+0.66}{2} \left( \frac{4(0.73-0.66)}{3.6^2} x^2 + 0.66 \right)} \frac{5+y}{5} dy dx dz - \int_0^1 \int_{-1.8/2}^0 \int_{-5}^{0.24} \left[ \frac{0.73}{1+0.73} - \frac{1}{1 + \frac{0.73+0.66}{2} \left( \frac{4(0.73-0.66)}{3.6^2} x^2 + 0.66 \right)} \right] \frac{5+y}{5} dy dx dz - \left( \frac{4(0.73-0.66)}{3.6^2} x^2 + 0.66 \right) \frac{5+y}{5} dy dx dz - \right]$$

$$\int_0^1 \int_{-V_0/2(5.24)}^0 \int_{-5}^{0.24} \left[ \frac{0.73}{1+0.73} - \frac{1}{1+\frac{0.73+0.66}{2}} \right. \\ \left. \left( \frac{4(0.73-0.66)}{3.6^2} x^2 + 0.66 \right) \frac{5+y}{5} dy dx dz \right] \quad (11)$$

解方程得

$$V_{ql} = 0.1584 \text{ m}^3 \quad (12)$$

根据以上计算进行了基础加固顶升设计，采用生石灰桩加固顶升沉降量较大的部分基础，加固具体施工顺序及方法是：首先挖开条形基础让基础加固部分全部暴露，并用机械钻斜向开洞，开洞角度为 15°，深度为 5 m，孔径 150 mm，孔距为 600 mm，每米长度上生石灰用量则为 0.1524 m<sup>3</sup>。开洞应先从沉降量最大处开始，花插开洞；然后用质量上好的生石灰混合按一定比例夯填斜洞，石灰桩顶要封顶，并用相应配重压顶；最后等第一轮施工结束后，暂停 6~7 d 观察基础沉降变化和建筑物的侧移变化，再对下一步基础顶升加固设计进行调整施工，以弥补加固顶升理论和实验的不足。基础膨胀顶升及加固具体做法见基础加固设计图 5，6。

按照本加固方案，基础顶升加固施工与一般工程施工有很大的区别，特别是基础顶升加固是一个发展变化的过程，因此作者单位派专人现场进行了技术指导并跟踪检测，及时解决施工中出现的各种问题，保证了工程施工过程的安全可靠。根据现场施工情况，测绘人员定期测量沉降量和房顶侧移变化以及墙体和其他构件的变形及裂缝变化，为施工

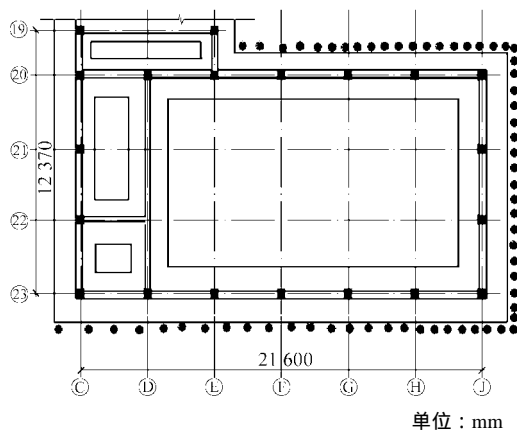


图 5 加固顶升生石灰桩局部平面布置图

Fig.5 Local plane arrangement of quicklime piles used in reinforcing and lift-upping

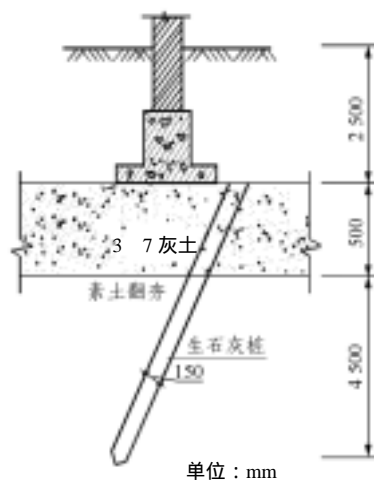


图 6 加固顶升生石灰桩剖面图

Fig.6 Profile of quicklime piles used in reinforcing and lift-upping

提供指导性的建议，以保证顶升加固目标的最终实现。

### 4.3 加固施工后各观测点的位移及结果分析

根据顶升加固设计方案，施工结束后，适时记录各观测点的位移变化情况，由于基础顶升加固是一个发展变化的过程，施工 1 周后和 6 周后屋顶各控制点水平位移和基础各沉降观测点位移记录见表 3，4。

从以上观测结果可以看出，除个别点由于施工过程破坏未取得最后观测数据外，经过顶升加固后建筑物各部分的沉降均得到了很好的恢复，最大恢

表 3 施工 1 周后各控制点位移

Table 3 Displacement of each control point one week after construction

| 部位                | 控制点  | 相对沉降 /mm | 水平位移量   |        |         |        |
|-------------------|------|----------|---------|--------|---------|--------|
|                   |      |          | 纵向      |        | 横向      |        |
|                   |      |          | 绝对值 /mm | 倾斜率 /% | 绝对值 /mm | 倾斜率 /% |
| 门厅部分框架总高度 18.25 m | 1    | 0        | 45.0    | 0.20   | 21.0    | 0.1    |
|                   | 2    | 47       | 48.0    | 0.30   | 17.0    | 0.1    |
|                   | 4    | -15      | -       | -      | -       | -      |
| 教学楼砖混 14.39 m     | 3    | -143     | 10.0    | 1.00   | 10.0    | 0.1    |
|                   | 5    | -        | 17.0    | 0.30   | 3.0     | 0.0    |
|                   | 10   | -174     | 44.0    | 8.30   | 83.0    | 0.6    |
| 电教室框架 13.08 m     | 6    | -287     | 35.0    | 3.00   | 30.0    | 0.2    |
|                   | 7    | -277     | 21.0    | -      | -       | -      |
|                   | 8    | -238     | -       | 3.20   | 32.0    | 0.2    |
| 9                 | -190 | 55.0     | 1.00    | 10.0   | 0.1     |        |

表 4 施工 6 周后各控制点位移一览表

Table 4 Displacement of each control point six weeks after construction

| 部位                   | 控制点 | 相对沉降<br>/mm | 水平位移量      |           |            |           |
|----------------------|-----|-------------|------------|-----------|------------|-----------|
|                      |     |             | 纵向         |           | 横向         |           |
|                      |     |             | 绝对值<br>/mm | 倾斜率<br>/% | 绝对值<br>/mm | 倾斜率<br>/% |
| 门厅部分框架总高度<br>18.25 m | 1   | 0           | 11.0       | 0.1       | 18.0       | 0.1       |
|                      | 2   | 40          | 10.0       | 0.1       | 12.0       | 0.1       |
|                      | 4   | - 54        | 25.0       | 0.1       | -          | -         |
| 教学楼砖混 14.39 m        | 3   | - 25        | 18.0       | 0.1       | 15.0       | 0.1       |
|                      | 5   | - 23        | -          | -         | -          | -         |
|                      | 10  | - 58        | 36.0       | 0.3       | 62.0       | 0.4       |
| 电教室框架 13.08 m        | 6   | -           | -          | -         | -          | -         |
|                      | 7   | - 155       | 26.0       | 0.2       | -          | -         |
|                      | 8   | - 102       | -          | -         | 10.0       | 0.1       |
|                      | 9   | - 72        | 38.0       | 0.3       | 11.0       | 0.1       |

复量达 193 mm, 倾斜率也得到了很大的改善, 水平位移最大恢复量 252 mm, 相应的可以使上部结构减轻由于地基沉降引起的附加应力, 从而有效的控制了上部结构墙体裂缝的进一步扩展, 同时地基也得到了很好的加固, 使建筑物更加安全可靠。加固顶升施工结束后, 将对建筑物的周边排水系统进行全面改建, 使得建筑物在以后的使用过程中不致于由于地面渗水造成地基不均匀沉降。

## 5 结 论

本文针对地处湿陷性黄土地区的建筑物和构筑物, 由于地基不均匀沉降而导致建筑物的偏移的纠偏方法和地基加固技术进行了研究, 提出了利用混合膨胀材料纠偏建筑物和加固地基的方法, 采用膨胀法纠偏和加固地基技术, 并在多项工程中得到了应用, 成功地实现了建筑物的纠偏, 通过理论研究和工程实践可以得出以下结论:

(1) 经过大量的工程实践, 采用膨胀材料顶升纠偏加固湿陷性黄土地区偏移建筑物工程多项, 加固顶升效果良好, 使建筑物的各个组成纠偏部分的沉降基本上都能按设计预测要求得到恢复, 各监测点水平位移都能达到较小值, 满足了现行规范的要求, 减小了裂缝的宽度并抑制了裂缝的进一步发展, 同时对地基基础进行了全面加固, 保证了建筑物在正常使用条件下不会发生新的地基沉降、上部结构

倾斜及墙体裂缝等工程问题, 顶升纠偏达到或基本达到了预期的目标, 说明在湿陷性黄土地区采用生石灰桩这种膨胀材料顶升纠偏加固偏移建筑物是可行的。

(2) 推导的单位长度基础下顶升膨胀材料体积分量的计算公式对加固顶升具有指导意义, 计算结果准确可靠, 施工中仅需根据工程实际情况进行适当调整即可。

(3) 采用膨胀材料顶升纠偏加固湿陷性黄土地区偏移建筑物是一项细致的工作, 需要采用现代信息技术, 对各控制点的位移和裂缝宽度进行全面测控, 以保证施工安全可靠。

(4) 采用膨胀材料顶升纠偏加固湿陷性黄土地区偏移建筑物仅适用于基础不均匀沉降和建筑物偏移量相对较小的建筑物, 对建筑物偏移量较大的建筑物进行纠偏建议使用其他方法<sup>[4, 5, 7]</sup>。

## 参考文献(References):

- [1] 陈希哲. 地基事故与预防——国内外建筑工程实例[M]. 北京: 清华大学出版社, 1994.(Chen Xizhe. Foundation Accidents and Prevention (Building Cases in Home and Abroad)[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1994.(in Chinese))
- [2] 江见鲸, 陈希哲, 崔京浩. 建筑工程事故处理与预防[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 1995.(Jiang Jianjing, Chen Xizhe, Cui Jinghao. Treatment and Prevention of Building Accidents[M]. Beijing: China Building Material Press, 1995.(in Chinese))
- [3] Szechy C. Foundation Failures[M]. London: [s. n.], 1961.
- [4] 卫龙武, 徐学军. 复合地基房屋倾斜纠偏实践[J]. 建筑结构, 1999, 29(2): 36-37.(Wei Longwu, Xu Xuejun. Practice of rectifying deviation to inclined building on composite foundation[J]. Building Structures, 1999, 29(2): 36-37.(in Chinese))
- [5] 刘祖德. 某危房的地基应力解除法纠偏工程实例[J]. 土工基础, 2000, 14(4): 29-31.(Liu Zude. The rectification of a building by stress relief method[J]. Soil Engineering and Foundation, 2000, 14(4): 29-31.(in Chinese))
- [6] Zhu Y, Wang X, Liang Y, et al. Settlement rectifying method and application of incline building on collapsible loess[A]. In: Advances in Mechanics of Structures and Materials[C]. [s. l.]: A. A. Baikema, 2002. 128-131.
- [7] 朱彦鹏, 王秀丽. 湿陷性黄土地区倾斜建筑物的沉降法纠偏技术及其应用[J]. 甘肃工业大学学报, 2003, 29(2): 101-103.(Zhu Yanpeng, Wang Xiuli. Deviation rectification of inclined buildings on collapsible loess with settlement method and its application[J]. Journal of Gansu University of Technology, 2003, 29(2): 101-103.(in



- Chinese))
- [8] 林 彤, 刘祖德. 粉煤灰与生石灰加固软土的室内试验研究[J]. 岩石力学, 2003, 24(6) : 1 049 - 1 052. (Lin Tong, Liu Zude. Study on indoor tests of fly ash and quicklime improving soft soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(6) : 1 049 - 1 052. (in Chinese))
- [9] 郑俊杰, 刘志刚. 石灰桩复合地基固结分析[J]. 华中理工大学学报, 2000, 28(5) : 111 - 113. (Zheng Junjue, Liu Zhigang. Consolidation analysis of composite ground with lime-flyash pile[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 2000, 28(5) : 111 - 113. (in Chinese))

## 《岩石力学与工程学报》2005 年第 10 期被 EI 收录论文(28 篇)

| No. | 论 文 题 目                        | 作 者 名        | 页 码           |
|-----|--------------------------------|--------------|---------------|
| 1   | 岩石力学离散单元计算方法中的若干问题探讨           | 陈文胜 王桂尧 刘 辉等 | 1 639 - 1 644 |
| 2   | 地震载荷作用下的节理岩体破裂模型               | 张振南 葛修润      | 1 645 - 1 648 |
| 3   | 基于直接法节理网络模拟的三维离散单元法计算          | 王 涛 盛 谦 陈晓玲  | 1 649 - 1 653 |
| 4   | 地震和降雨诱发的两个流动性滑坡的流动化机制及运动模拟(英文) | 汪发武          | 1 654 - 1 661 |
| 5   | 工作应力状态下岩体变形模量的研究               | 于震平 李铁汉      | 1 662 - 1 666 |
| 6   | 含瓦斯岩破裂过程流固耦合数值模拟               | 徐 涛 唐春安 宋 力等 | 1 667 - 1 673 |
| 7   | 含吸附煤层气煤的有效应力分析                 | 吴世跃 赵 文      | 1 674 - 1 678 |
| 8   | 多井条件下煤层气不定常渗流问题的数值研究           | 刘曰武 张大为 陈慧新等 | 1 679 - 1 686 |
| 9   | 抽注水引起含水层水平径向运动的位移方程            | 冉兴龙 夏 斌      | 1 687 - 1 691 |
| 10  | 长江下游桥梁工程地基土体渗透特性研究             | 李筱艳 董学武 陈志坚等 | 1 692 - 1 696 |
| 11  | 隧道开挖的围岩损伤扰动带分析                 | 吉小明          | 1 697 - 1 702 |
| 12  | 地铁隧道施工拱顶下沉值的分析与预测              | 张顶立 黄 俊      | 1 703 - 1 707 |
| 13  | 低地应力区地下洞室围岩变形破坏有限元数值模拟研究       | 胡夏嵩 赵法锁      | 1 708 - 1 714 |
| 14  | 轻轨地下车站主体结构设计与施工研究              | 黄伦海 程崇国 蒋树屏等 | 1 715 - 1 721 |
| 15  | 隧道中用陆地声纳法在开挖的岩面式衬砌表面测围岩松弛带深度   | 钟世航 曹大明      | 1 722 - 1 727 |
| 16  | 圆梁山隧道毛坝向斜高水压富水区注浆施工技术          | 刘招伟 张顶立 张民庆  | 1 728 - 1 734 |
| 17  | 岩样单轴压缩塑性变形及断裂能研究               | 王学滨          | 1 735 - 1 739 |
| 18  | 双轴拉压混凝土在冻融循环后的力学性能及破坏准则        | 覃丽坤 宋玉普 陈浩然等 | 1 740 - 1 745 |
| 19  | 基于小波分析的隧道衬砌结构动力响应规律研究          | 王祥秋 杨林德 高文华等 | 1 746 - 1 750 |
| 20  | 基于解耦子波和优化神经网络的大坝变形预测           | 曹茂森 任青文 毛伟兵  | 1 751 - 1 757 |
| 21  | 地面水对黄土地区桥梁桩基承载力影响试验研究          | 冯忠居 谢永利 张宏光等 | 1 758 - 1 765 |
| 22  | 单一连续墙的平面非线性有限元分析               | 万 文 曹 平 高文华  | 1 766 - 1 771 |
| 23  | 考虑土体侧胀性的路堤沉降计算探讨               | 王志亮 李永池 殷宗泽  | 1 772 - 1 777 |
| 24  | 水泥土的环境侵蚀效应与破裂过程分析              | 宁宝宽 陈四利 刘 斌  | 1 778 - 1 782 |
| 25  | 膨胀土与改性膨胀土及动力特性试验研究             | 毛 成 邱延峻      | 1 783 - 1 788 |
| 26  | 尾砂分形级配与胶结强度的知识库研究              | 刘志祥 李夕兵      | 1 789 - 1 793 |
| 27  | 光测方法在岩石力学实验观测中的应用述评            | 马少鹏 赵永红 金马昌等 | 1 794 - 1 799 |
| 28  | 梁板式筏基与地基共同作用的弹性分析              | 蔡 健 何春保 沈建华等 | 1 804 - 1 810 |