

文章编号: 1000-7598-(2008)12-3451-08

# 全程注浆在隧道穿越既有建筑物中的试验研究

逢铁铮<sup>1, 2</sup>

(1. 北京交通大学 隧道及地下工程教育部工程研究中心, 北京 100044; 2. 厦门路桥建设集团有限公司, 厦门 361026)

**摘 要:** 厦门市成功大道工程是福建省 2005 年重点建设项目, 项目由多座立交和两条特长城市隧道组成, 其中莲前至梧村山隧道里程长度为 3 700 m, 采用双洞双向 6 车道标准。隧道在埔南工业区的 685 m 段采用跨度达 34 m 的浅埋连拱结构穿越地面 67 栋密集建筑物。洞顶至地表的覆盖层只有 7~24 m, 水文、地质较差, 洞顶基本为杂填土和残积亚黏土层, 洞底多为全、强风化花岗岩, 地下饱和水位高(局部洞身地处海平面以下 20 m 左右), 施工风险极大。为了保证既有地面建筑物的安全, 提出了以过程控制和过程恢复为核心的全过程注浆方案, 并预留 104#和 105#拆迁房为试验楼, 采取地面注浆和洞内注浆的方法来进行过程控制和房屋抬升的试验。在现场试验中, 根据全过程注浆的思路, 提出了建筑物安全风险控制标准。通过室内试验比较了不同浆液的注浆效果, 分析实际施工中房屋基础改造和地基注浆加固、动态跟踪注浆以及工后房屋恢复抬升的特点和效果。在注浆过程中进行实时的信息反馈和分析, 进而了解注浆工艺和参数与地层加固效果和建筑物抬升效果之间的关系, 得出了一系列有意义的结论。试验结果为隧道后续穿越建筑物施工提供经验和指导, 研究思路可为类似的隧道穿越工程提供一定的参考。

**关 键 词:** 全程注浆; 注浆抬升; 跟踪注浆; 恢复注浆

**中图分类号:** U 459.2

**文献标识码:** A

## Experimental study of whole process grouting used in tunnel passing through existing structures

PANG Tie-zheng<sup>1, 2</sup>

(1. Tunnel and Underground Engineering Research Center of Ministry of Education, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. Xiamen Road And Bridge Construction Group Co., Ltd., Xiamen 361026, China)

**Abstract:** Xiamen Triumph Avenue Project is a significant construction project in Fujian Province in 2005. This project consists of multi-overpass and two overlength tunnels. The tunnel from Lianqian to Wucunshan covers 3.7 km, which is the standard twin-tunnel two-way six-lane. The first stage project of Xiamen airport line located at Punan Industrial Zone contains multi-arch tunnel with width of 34 m buried in shallow depth. It passes through the bottom of 67 existing buildings and may cause great risks. The layer between the ground surface and the tunnel top is only 7~24 m of length and is bad in hydrology and geology. The top of the tunnel consists of mixed backfill soils and sedentary sub-clay layers, and the bottom consists of fully and strong weathered granites. The ground water level is high (part of the tunnel is about 20 m below sea-level). In order to guarantee the safety of existing ground surface structures, whole process grouting is put forward which aims at process control and process restoration. #104 and #105 buildings which are going to be removed are reserved as structures for experiment. The method of surface grouting and grouting from tunnel is adopted on these two buildings. According to the thought of whole process grouting, control standards for the existing structures are made. Laboratory experiment is made to compare the effect of different kinds of groutings. The effect and feature of grouting and consolidation on foundation, dynamic track grouting and restoration uplift after tunnel complete are studied. The relationship between grouting and uplift effect is also studied. The result of this experiment can provide experience and guidance for further construction of the first stage project of Xiamen airport line and the study can be adopted as reference for similar projects.

**Key words:** whole process grouting; uplift grouting; dynamic track grouting; restoration grouting

收稿日期: 2008-01-16

作者简介: 逢铁铮, 男, 1969 年生, 博士研究生, 高级工程师, 现任厦门市成功大道工程建设指挥部总工程师, 主要从事道路桥梁设计及城市道路、桥梁、隧道建设管理工作。E-mail: ptzcom@163.com

## 1 引言

厦门市成功大道工程莲前至梧村山隧道, 埔南工业区段总长约 685 m, 在密集的建筑物的下穿过, 影响范围内共有 67 栋城市建构筑物。隧道为开挖跨度达 34 m 的连拱隧道及小间距隧道, 隧道埋深仅 7~24 m, 施工风险极大。如何在隧道施工中保证既有建筑物的安全是项目成功的关键。

为保证成功大道莲前至梧村山隧道穿越既有建筑物过程中地面建构筑物的安全, 验证全程注浆思路的可行性和积累施工经验, 预留 104<sup>#</sup>和 105<sup>#</sup>拆迁房为试验楼, 采取地面注浆和洞内注浆的方法来进行过程控制和房屋抬升的试验。

试验房 104<sup>#</sup>和 105<sup>#</sup>为两栋联体楼, 位于成功大道工程莲前至梧村山隧道 (YK7+520~YK7+545) 正上方, 其中 104<sup>#</sup>楼 3 层, 砌体结构, 绝大部分楼板已拆除, 产生了大量通长宽裂缝, 破损严重; 105<sup>#</sup>楼 4 层, 框架结构, 破损较小, 如图 1 所示。房屋总体长 80 m, 宽 10.3 m; 基础厚 50 cm, 宽 2.1 m, 两侧各挑出 90 cm。房屋基础断面及其与隧道关系图见图 2。



图 1 试验房外观图

Fig.1 Appearance of the buildings for experiment

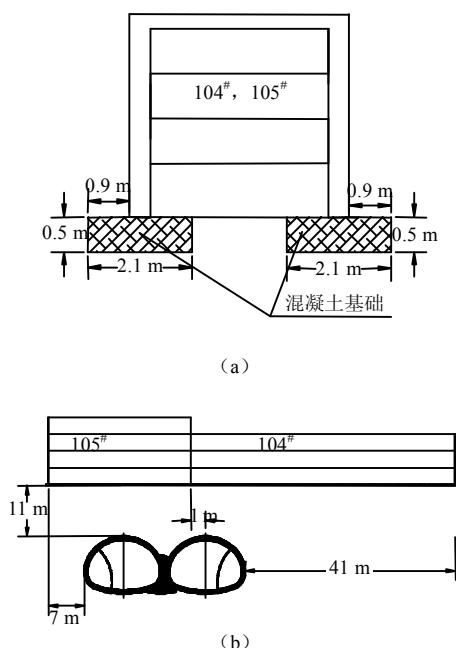


图 2 104<sup>#</sup>和 105<sup>#</sup>房屋基础及其与隧道位置关系图

Fig.2 Position relation between tunnel and building

此段地表以下 0~3 m 范围内为填筑土, 多以生活垃圾为主; 3~7 m 范围内为泥质粗砂, 呈松散~松软状, 流动性较强; 7 m 以下为全风化花岗岩, 稳定性很差, 遇水很容易流失、塌陷。隧道底部以下为砂砾状强风化正长岩, 地下水埋深为 3~5 m。

## 2 全程注浆思路

为保证隧道穿越既有建筑物过程中结构的安全, 在隧道现场施工中提出了以过程控制和过程恢复为核心的全过程注浆, 如图 3 所示。先对既有结构的抗变形能力进行评估, 对隧道施工造成的结构变形进行预测评价, 把评估和评价的结果进行对比分析, 如果结构安全可以根据评价结果制定各个施工阶段的控制标准进行下一步施工; 否则, 必须采取有效措施, 保证结构安全。采取的措施包括施工方法优化、既有结构加固、洞内注浆加固等, 在采取加固措施的同时, 必须加强现场监控量测, 做到动态控制, 实时掌握控制措施和控制效果之间的关系, 必要时采取过程恢复和工后恢复对建筑物进行抬升。

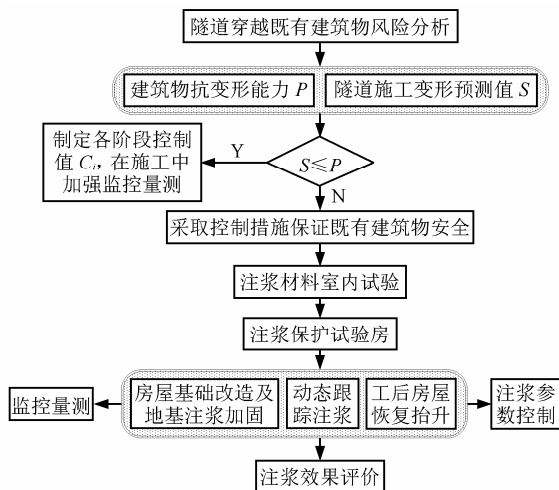


图 3 全过程注浆流程图

Fig.3 Flow chart for whole process grouting

## 3 全程注浆的工程应用

### 3.1 隧道穿越既有建筑物风险分析

建筑物由于隧道开挖而受到的损害通常有下列几种表现形式: (1) 均匀沉降损害; (2) 差异沉降损害; (3) 曲率损害; (4) 水平变形损害。隧道开挖对建筑物的影响, 往往是这几种变形同时作用的结果。综合考虑 104<sup>#</sup>和 105<sup>#</sup>楼的建筑物和隧道施工特点, 参考文献[5-8]建筑物变形破坏的控制指标

为：既有建筑物裂缝宽度和其倾斜度。

在控制标准值的制定中，采用了数值分析软件 ANSYS 进行计算分析（计算模型见图 4），取建筑物在地表沉降槽曲线上的不同位置，分别给定不同的位移值（竖向沉降和水平位移），通过数值模拟分析建筑物出现的变形破坏。根据计算结果，当施加的位移值超过隧道施工前建筑物的极限承载力，即认为建筑物破坏。以此位移值作为建筑物在相应状况下的控制标准值。综合考虑数值分析结果，并参考相关文献资料<sup>[5-8]</sup>，采取综合控制指标保证既有建筑物安全：建筑物倾斜值控制为 2‰，裂缝最大扩展宽度为 2 mm，地表沉降控制值为 50 mm。

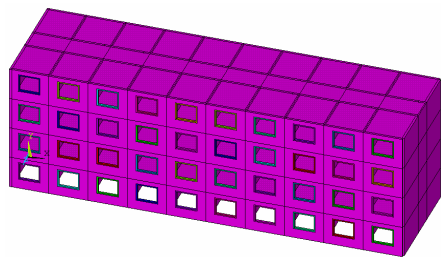


图 4 建筑物控制标准计算模型

Fig.4 Calculating model for structure control standard

针对下穿 104<sup>#</sup>和 105<sup>#</sup>试验楼连拱隧道的具体施工情况，根据现场实测地质参数，采用 FLAC<sup>3D</sup> 有限差分程序，通过反分析的手段，根据文献[9, 10]中的方法获得相应的分析参数，并根据该参数进行后续计算<sup>[11]</sup>（计算模型见图 5），得到中洞上方地表沉降曲线如图 6 所示，地表沉降槽见图 7。通过计算分析可知，由 104<sup>#</sup>和 105<sup>#</sup>试验楼的所处位置可知，试验楼在倾斜和绝对沉降上都已经超限，必须采取措施进行控制。这样做一方面是为了验证以注浆抬升为核心的全过程注浆的可行性，为隧道后续大量的穿越工程积累经验；另一方面是在实际施工中动态了解既有建筑物变形的全过程，并在一定程度上修正既有控制标准，制定后续风险点施工的阶段沉降控制值。

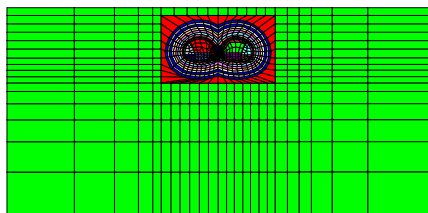


图 5 施工模拟分析模型

Fig.5 Analysis model for construction simulation

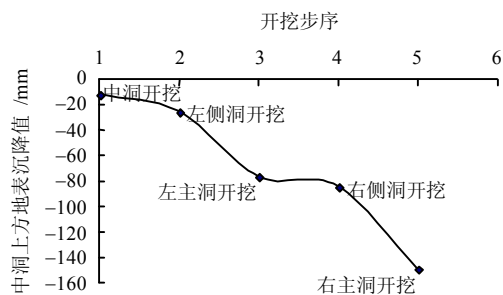


图 6 地表沉降阶段累计曲线

Fig.6 Ground surface settlement history curve

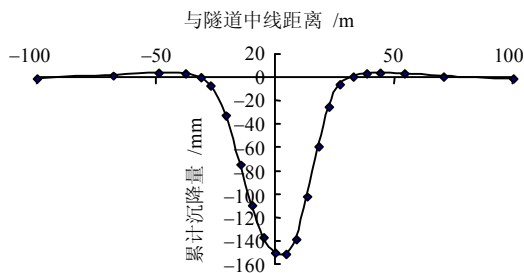


图 7 地表沉降槽曲线

Fig.7 Ground surface settlement trough

### 3.2 注浆材料室内试验

为了使房屋抬升获得较好的效果，除了对注浆工艺和参数进行试验总结分析外，还对注浆材料选择和配比进行室内试验，以获得性能稳定、低收缩的材料。为此，对普通水泥单液浆、普通水泥-水玻璃双液浆及 HSC（超细高强水泥浆）3 种浆液进行室内试验对比，试验结果如表 1 所示。

表 1 注浆材料室内试验表

Table 1 Laboratory experiment for grouting materials

| 材料名称  | 浆液配比  |     | 初凝时间   | 泌水率  | 干收缩率 | 3 d 强度 |
|-------|-------|-----|--------|------|------|--------|
|       | W:C   | C:S |        | /%   | /%   | /MPa   |
| 普通水泥  | 0.8:1 | /   | 23 h   | 24.4 | 6.3  | 0.45   |
| 水泥水玻璃 | 1:1   | 1:1 | 160 s  | 7.2  | 3.34 | 0.23   |
| HSC   | 1:1   | /   | 45 min | 2.0  | -2.2 | 1.01   |

注：W:C 为水灰比，C:S 为水泥：水玻璃。

由表可知，普通水泥单液浆凝胶时间较长，初凝后泌水率达到 24.4%，干收缩率为 6.3%，不适合房屋抬升注浆。普通水泥-水玻璃双液浆凝胶时间较短，浆液扩散范围容易控制，可操作性较强，但在压力作用下也容易泌水，且终凝后有 3.34% 的干收缩，房屋抬升后，因泌水和干收缩可能有一定的下沉引起少量回落。HSC 浆凝胶时间可控，且为单液浆，可操作性强，泌水率为 2.0%，液终凝后有一定的膨胀性，膨胀率为 2.2%，且强度较高。

### 3.3 试验楼房屋保护方案

试验楼房屋保护通过地表注浆和洞内注浆实现，注浆施工分为 3 个阶段：（1）房屋基础改造及

地基注浆加固；(2) 动态跟踪注浆；(3) 工后房屋恢复抬升。

### 3.3.1 房屋基础改造及地基注浆加固

#### (1) 竖向止浆帷幕施作

在房屋小里程一侧及房屋两侧，采用二重管双液浆注浆的方法施作止浆帷幕。止浆帷幕距房屋边沿 2 m，注浆孔间距为  $0.6\text{ m} \times 0.6\text{ m}$ ，共布设 2 排，孔深为 8 m。房屋大里程侧采取旋喷桩作为止浆帷幕，距离房屋基础 3 m，如图 8 所示。

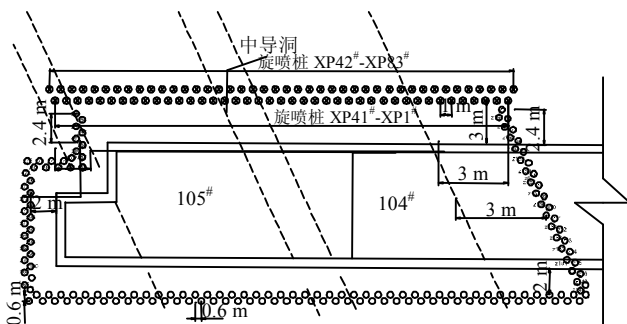


图 8 周边止浆帷幕布孔图  
Fig.8 Curtain grouting layout

#### (2) 房屋条基及地基加固

在 105#房屋范围内，距房屋边缘外 1.5 m 处进行倾斜孔注浆（地基加固注浆孔编号用 D 表示），采用二重管双液浆施作反力层，如图 9、图 10 所示。

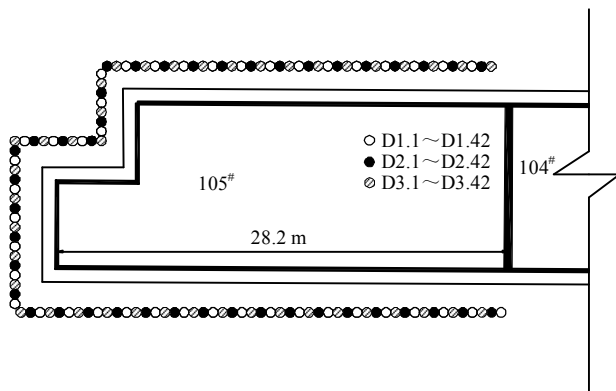


图 9 105#房屋基础加固布孔平面图  
Fig.9 Reinforcement grouting hole plane for #105

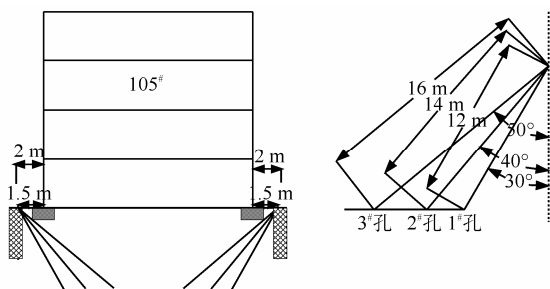
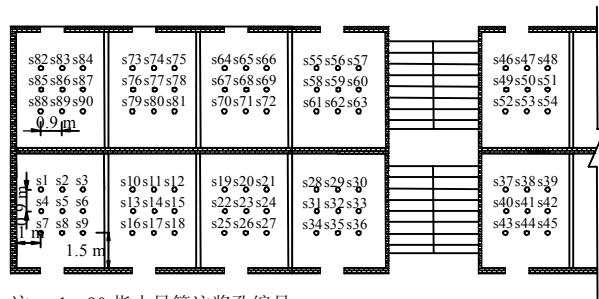


图 10 105#房屋基础加固纵剖面图  
Fig.10 Longitudinal plane for reinforcement grouting hole of #105

在 104#房屋开间内部采用人工风钻成孔，打入 5 m， $\phi 42\text{ mm}$  注浆小导管，下入芯管，注入水泥-水玻璃双液浆，如图 11 所示。



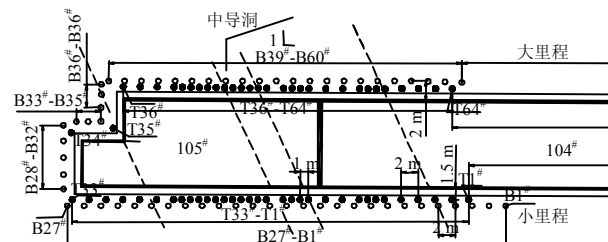
注：s1-s90 指小导管注浆孔编号。

图 11 104#房屋基础加固小导管布置平面图  
Fig.11 Small pipe reinforcement layout for the foundation of #104

### 3.3.2 动态跟踪注浆

(1) 补偿注浆。补偿注浆孔沿房屋边沿 2 m 处，在止浆墙范围内通长设置，孔间距为 2 m，俯角为  $30^\circ$ ，孔深为 8 m。

(2) 抬升注浆，抬升注浆沿房屋基础边外 1.5 m 布设，俯角为  $60^\circ$ ，孔深为 4 m。根据隧道开挖引起地表沉降规律，在沉降槽区域内加密布置抬升孔，孔间距为 1 m，两翼按 2 m 孔间距进行布孔。补偿注浆与室外抬升注浆孔孔位布置如图 12、图 13 所示。



注：B1#-B60#为补偿注浆孔编号；T1#-T64#为抬升注浆孔编号。

图 12 补偿注浆孔及抬升注浆孔孔位布置平面图  
Fig.12 Uplift grouting hole layout

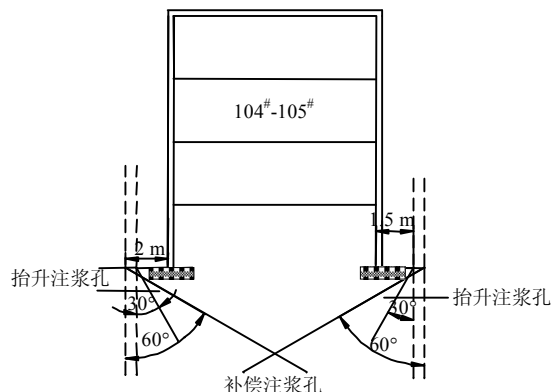


图 13 补偿注浆及抬升注浆孔孔位布置剖面图  
Fig.13 Longitudinal plane for uplift grouting hole

### 3.3.3 工后房屋抬升

(1) 隧道开挖施工通过房屋后，通过房屋基础下抬升孔注浆，对抬升效果进行评价。

#### (2) 洞内注浆加固抬升

当隧道左线开挖至 Yk7+516 里程时，开始施工左洞洞内抬升注浆。具体布置见图 14。

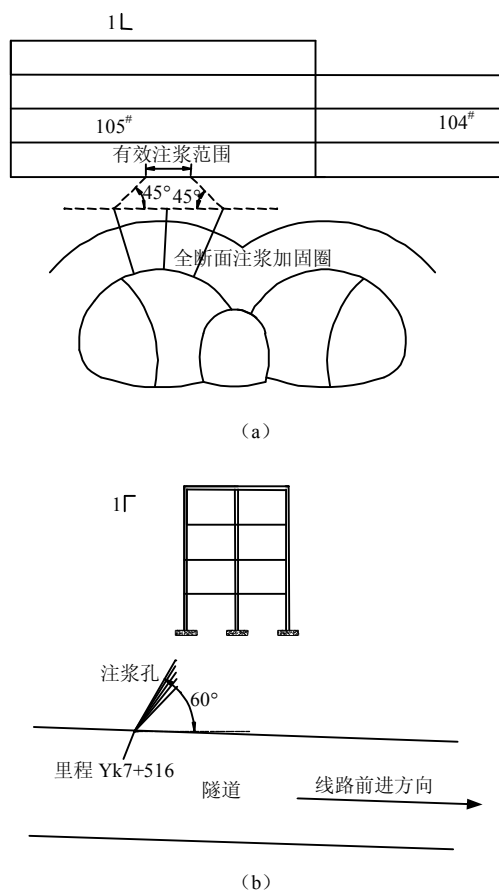


图 14 洞内抬升试验孔位布置示意图  
Fig.14 Uplift grouting hole in tunnel

## 3.4 注浆控制参数研究

### 3.4.1 基础加固注浆参数

房屋加固注浆拟采用普通水泥——水玻璃双液浆，浆液配比如下：水泥浆水灰比为 0.8:1~1:1，水泥-水玻璃比为 1:1，水玻璃浓度为 35 Be'。

注浆结束标准按注浆压力和注浆量相结合的方式进行控制，注浆压力为 0.6~1.5 MPa，注浆量为 200~300 L/m，当注浆压力达到设计压力范围或注浆量达到设计注浆量时，均可结束注浆施工。

### 3.4.2 补偿注浆及抬升注浆参数

补偿注浆和抬升注浆均采用袖阀管进行注浆施工，因此，要求浆液凝胶时间可控，强度不能太高，以保证袖阀管反复可注性，满足房屋抬升施工要求。

为了确定对房屋抬升压力和单次最大抬升值，

抬升注浆试验期间采用一台注浆泵对单个抬升孔实施后退式注浆，并在和注浆孔相对应的房屋主体结构上布设测点 D2，在 D2 两侧间隔 5 m 布设计测点 D1，D3，并在注浆过程中对测点进行连续监测。根据试验过程绘制房屋抬升值和注浆压力历时曲线图，本次试验共完成 5 组，其中第 1 组抬升值和注浆压力关系如图 15 所示。

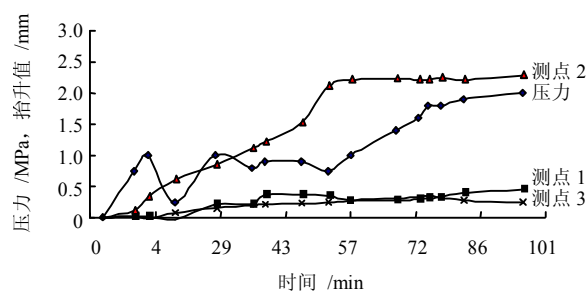


图 15 房屋抬升试验单点抬升历时曲线图  
Fig.15 Uplift history curve for building

由图可知：

(1) 当注浆压力达到 0.7~1.0 MPa 时，房屋开始出现明显抬升。

(2) 根据现场施工情况当注浆压力达到 2.0 MPa 时，房屋抬升即达到最大单次抬升值，再继续注浆，压力降低，房屋基础附近的地表开始出现隆起或裂缝。

(3) 每次房屋抬升注浆施工中，单次最大抬升值在 2.2~3.1 mm 之间。

(4) 房屋抬升注浆过程中应以注浆压力为主要的控制标准。

(5) 注浆施工过程中，当注浆压力突然降低，应注意观察注浆区域地表和室内地板变化，防止引起局部地表隆起。

(6) 房屋抬升过程中，单点抬升影响半径可达到 5 m。

(7) 房屋抬升过程是反复对地层充填劈裂再充填劈裂的过程。

## 3.5 实时监测分析

### 3.5.1 房屋沉降监测分析

104<sup>#</sup>, 105<sup>#</sup>房屋测点沉降历时曲线如图 16 所示。由图可知，房屋沉降趋势主要经历 5 个阶段。

(1) 第 I 阶段，期间累计最大沉降量为 -11.68 mm，沉降速率为 -0.39 mm/d，房屋最大差异沉降量为 19.83 mm。该阶段隧道施工已接近房屋下方，地层失水及基础加固钻孔扰动引起房屋沉降较前期明

显,但沉降速率较小,沉降曲线比较平缓。

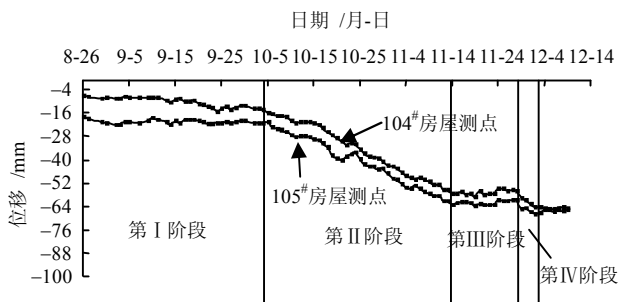


图 16 104<sup>#</sup>, 105<sup>#</sup>房屋测点沉降历时曲线图  
Fig.16 Settlement history curve for #104, #105

(2) 第Ⅱ阶段,该段时间房屋沉降具有明显的加速现象,期间累计最大沉降量为-40.15 mm,平均沉降速率为-1.34 mm/d,最大差异沉降量为26.44 mm。该区域前期随着隧道开挖逐渐接近房屋基础下部,同时地表在钻设补偿注浆孔和抬升注浆孔对房屋基础有一定的扰动,从而沉降较前段时间有所增加,后期虽然开始进行房屋补偿注浆和抬升注浆施工,但因为3号洞开挖均在穿越房屋,随着开挖施工对地层扰动,从而导致房屋加速下沉。

(3) 第Ⅲ阶段,该阶段房屋沉降速率明显减缓,最大沉降速率为-0.19 mm/d。随着补偿注浆和抬升注浆的进行,地层加固密实,房屋抬升量明显增加,有效地抑制了房屋继续沉降,房屋差异沉降也明显减小。

(4) 第Ⅳ阶段,该阶段房屋各测点沉降又出现加速现象,沉降速率明显加大。因第Ⅲ阶段较第Ⅱ阶段沉降速率明显减小,而在第Ⅲ阶段隧道3号洞开挖已通过房屋,很难判断房屋沉降速率减小是施工原因还是抬升注浆效果。因此,第Ⅳ阶段停止抬升注浆施工,以便和第Ⅲ阶段注浆期间进行比较。从沉降曲线可以明显看出,停止注浆后房屋沉降再次加剧,平均沉降速率达到-1.30 mm/d,12月4日恢复注浆后,房屋又表现出明显的上升趋势。

通过分析可知,以压力作为房屋抬升主要控制标准及时进行跟踪及抬升注浆,是具有明显的抬升和阻止房屋继续沉降效果,其对房屋沉降速率控制量占总沉降速率的73.2%。

### 3.5.2 跟踪注浆期间测点沉降变化分析

跟踪注浆期间,房屋沉降历时曲线如图17所示。从图中可以明显看出,沉降曲线出现锯齿状、上下起伏,较为真实地反映出抬升注浆对房屋沉降

控制的工作状态。由于隧道穿越房屋下方,注浆过程房屋表现出明显的上升趋势,停止注浆后,房屋又开始下沉。另外,由于房屋抬升注浆过程采取的是水泥-水玻璃双液浆,浆液在地层压力作用下,初凝浆体会产生泌水,终凝后会产生少量的干缩,也是引起抬升出现波动的因素。

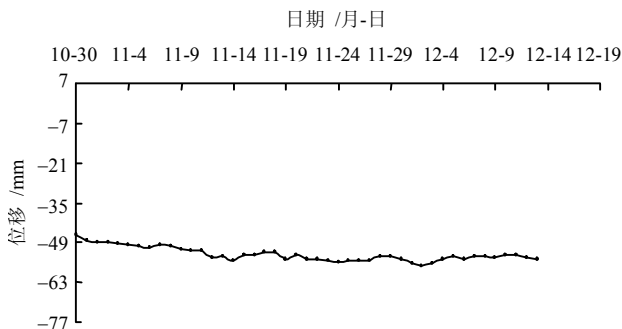


图 17 跟踪注浆期间房屋沉降曲线  
Fig.17 Building settlement curve during track grouting

在隧道通过房屋期间,虽然房屋沉降处于加速沉降状态,但采取跟踪注浆的方式,能够有效地控制沉降速率,阻止房屋沉降的继续发生,并采取低泌水、抗干缩注浆材料可避免因缩水而产生沉降。

### 3.5.3 差异沉降及裂缝情况监测分析

房屋结构安全性最直观的表现就是裂缝,由于目前对于墙体裂缝的预警值、报警值及极限值很难确定,尤其对已有裂缝值有可能已经超过民用建筑鉴定标准的极限值,因此,在注浆抬升施工前应对已存在的裂缝进行调查统计,并在施工过程中对裂缝进行跟踪监测,根据裂缝的宽度、发展速率等对房屋保护情况进行评估,确保房屋主体结构安全。

为便于记录,将104<sup>#</sup>房屋分成A, B, C, D, E共5个单元,既有裂缝分布图如图18所示。裂缝发展历时曲线如图19所示。

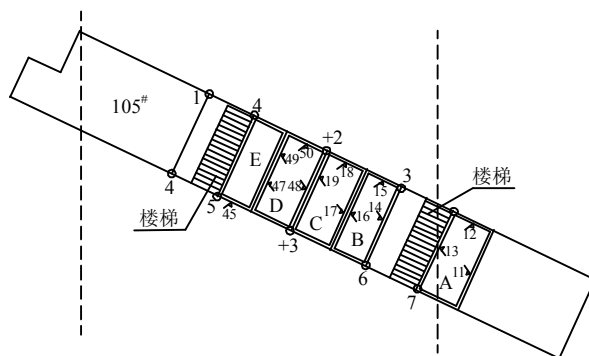


图 18 房屋既有裂缝观测布置图  
Fig.18 Crack monitor for building

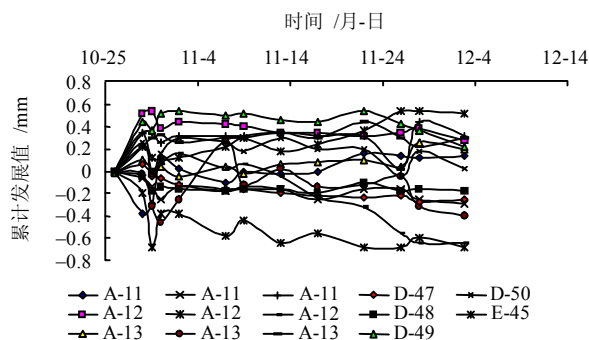


图 19 房屋裂缝发展历时曲线图

Fig.19 Crack development history curve

从既有裂缝分布可以看出, 房屋裂缝主要分布在开间内纵向隔墙上, 外围墙体裂缝比较少, 房屋本身结构比较稳定。从图 19 可以看出, 在施工期间裂缝发展趋势都比较小, 累计最大发展宽度为 0.72 mm, 发展速率比较小, 房屋结构没有因为施工而造成功能性破坏, 个别裂缝还出现闭合趋势, 结构比较安全。

施工期间中也产生少量新的裂缝, 但裂缝宽度很小, 目前均没有表现出明显的发展趋势, 不会造成房屋结构性破坏。

房屋本身产生的差异沉降, 是房屋产生裂缝和裂缝发展的关键, 104<sup>#</sup>、105<sup>#</sup>房屋沉降槽曲线如图 20 所示 (图中 104+2 指 104<sup>#</sup>附近的测点编号, 以此类推)。

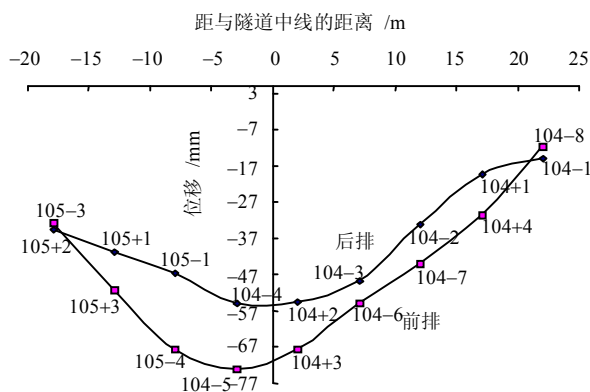


图 20 房屋沉降槽曲线图

Fig.20 Settlement trough for building

由图可以看出, 沉降量最大处位于隧道中线右侧, 即 104<sup>#</sup>、105<sup>#</sup>房屋连接部位。沉降曲线横向沉降速率比较大, 但其切线斜率变化比较小, 没有出现明显的拐点, 两房屋均表现为向内倾斜。因此, 在横断面上墙体裂缝发展比较缓慢, 也没有新的裂缝出现。新裂缝主要出现在沉降槽附近房屋的纵向

隔墙墙面, 其产生裂缝时 104-4 和 104-5 两测点间最大差异沉降均超过 23 mm。

### 3.6 注浆效果评价

#### 3.6.1 竖向止浆帷幕施作效果评价<sup>[12]</sup>

止浆帷幕在房屋基础加固期间, 帷幕外侧地表均没有抬升现象, 帷幕起到了很好的止浆效果。在房屋抬升注浆过程中, 止浆帷幕有效地限制土体侧移, 达到了抬升既有建筑物的目的。

#### 3.6.2 基础加固效果评价

根据基础加固施工过程, 由于室内空间位置限制了 104<sup>#</sup>室内小导管地基加固, 钻孔和下管操作较困难, 且注浆过程中大量浆液沿管壁向上部应力小的土体串流, 引起房屋混凝土地板隆起和跑浆现象, 浆液向地层内部扩散范围较小, 对地基加固改良效果不理想。而 105<sup>#</sup>房采取室外倾斜孔加固, 施工比较方便, 注浆施工过程采用后退式注浆, 浆液可以有效地向地层扩散, 地层吸浆量比较大, 对房屋基础加固效果明显。

通过对房屋基础进行注浆加固改良, 增加地基密实度, 形成持力层, 在补偿和抬升注浆过程中没有出现跑浆、漏浆等现象的发生, 且房屋抬升比较均匀, 避免产生较大的差异沉降, 能够保证房屋结构的安全性, 因此, 跟踪注浆前对房屋基础进行加固改造是很必要, 也是很有效的。

#### 3.6.3 补偿注浆和抬升注浆效果评价

补偿注浆和抬升注浆是施工中的重点, 也是达到控制房屋沉降、减小房屋差异沉降的主要环节。两者均通过预先设置好的注浆袖阀管, 实施后退式分段注浆方式进行抬升施工。

为了避免因注浆压力过大造成附近袖阀管受挤压变形或剪断, 影响后续的反复注浆施工, 为此, 补偿注浆初期, 根据房屋沉降量大小, 以注浆量为主要控制标准 (控制标准为 200 L/m), 按照少量多次的原则进行注浆施工, 逐渐对地层进行劈裂挤密加固, 控制房屋沉降。后期随隧道开挖施工进入房屋基础下方, 沉降速率加大, 增加注浆量, 并依压力做为结束标准 (1.0~1.5 MPa), 房屋沉降得到有效控制, 出现明显的抬升。

由于补偿和抬升注浆经过多次反复注浆后, 袖阀管开始出现串浆、漏浆现象而引起堵管, 造成补偿及其抬升注浆孔报废, 因此在房屋抬升期间及时对报废的孔进行补充施作, 保证抬升的连续性。

## 4 结 论

为了保证隧道穿越既有建筑物过程中既有结构的安全,在实际施工中提出了以过程控制和过程恢复为核心的全过程注浆方案,并以 104<sup>#</sup>和 105<sup>#</sup>拆迁房为试验楼进行了现场试验,得到了以下结论和建议:

(1) 提出了包括施工前的安全风险分析,施工中实时信息反馈、过程控制以及工后评估在内的全过程注浆思路,并在隧道穿越 104<sup>#</sup>和 105<sup>#</sup>试验楼中得到了很好的应用。

(2) 分析了注浆抬升的机制,并针对注浆抬升过程的 3 个阶段:土体压密抬升阶段、土体初次劈裂加固阶段、土体二次劈裂抬升阶段进行了系统分析。

(3) 针对 104<sup>#</sup>和 105<sup>#</sup>试验楼进行全过程注浆试验得到了以下结论:

① 根据对既有结构的抗变形能力进行评估和对隧道施工造成的结构变形进行预测评价,制定了综合评价体系保证既有建筑物的安全,建筑物倾斜值控制为 2 ‰,裂缝最大扩展宽度为 2 mm,地表沉降控制值为 50 mm (最终只有地表沉降超限)。

② 通过对不同注浆材料进行室内试验认为,HSC 浆液的注浆效果最好,但考虑到施工的经济性等多方面因素,实际注浆中采用水泥-水玻璃双液浆。

③ 以注浆压力作为房屋抬升主要控制标准及时进行跟踪及抬升注浆,具有明显地抬升和阻止房屋继续沉降效果。

④ 止浆帷幕的施作能够有效地限制土体侧移,从而提高后续注浆施工抬升既有建筑的效果。

⑤ 通过对房屋基础进行注浆加固改良,增加地基密实度,形成持力层,且在房屋注浆抬升过程中抬升比较均匀,避免产生较大的差异沉降,能够保证房屋结构的安全性,因此,跟踪注浆前对房屋基础进行加固改造是很必要,也是很有效的。

⑥ 补偿注浆和抬升注浆可以有效地进行地层加固,抬升既有房屋,并有效地抑制了房屋后续沉降,同时减小了房屋的差异沉降。

## 参 考 文 献

- [1] HEENAN DOUGLAS M, XU MICHAEL. Grouting to minimize settlements prior to tunnel excavation——a case study[M]. New York: Geotechnical Special Publication, 2003: 1 546—1 556.
- [2] 邝健政,杜嘉鸿. 岩土注浆理论与工程实践[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [3] 程晓,张凤祥. 土建注浆施工与效果检测[M]. 上海: 同济大学出版社, 1998.
- [4] 彭振斌. 注浆工程设计计算与施工[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1997.
- [5] 阳军生,刘宝琛. 城市隧道施工引起的地表移动及变形[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2002.
- [6] 中华人民共和国城乡建设环境保护部. GBJ7—89 建筑地基基础设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [7] 中冶集团建筑研究总院. GBJ144—90 工业厂房可靠性鉴定标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1990.
- [8] 重庆土地房屋管理局. JGJ125—99 危险房屋鉴定标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000.
- [9] JEON Y S, YANG H S. Back analysis for tunnel engineering as a modern observational method[J]. **Tunneling and Underground Space Technology**, 2003, 18: 185—196.
- [10] FAKHIMI A, SALEHI D, MOJTABAI N. Numerical back analysis for estimation of soil parameters in the Resalat Tunnel project[J]. **Tunneling and Underground Space Technology**, 2004, 19: 57—67.
- [11] Itasca Consulting Group, Inc. FLAC<sup>3D</sup>, Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions, version 2.0, User's Manual[R]. USA: Itasca Consulting Group, Inc. 1997.
- [12] 张顶立,李治国. 高压富水区隧道帷幕注浆止浆系统分析[J]. 岩土力学, 2004, 25(7): 1 151—1 154.  
ZHANG Ding-li, LI Zhi-guo. Analysis of borehole occluding system for tunnel curtain grouting in high pressure and rich water zone[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(7): 1 151—1 154.