

文章编号: 1000-7598-(2008)12-3261-05

扩挖盾构隧道建成两连拱地铁车站模型试验

李 围^{1,2}, 何 川², 张海波²

(1. 贵州大学 土木建筑工程学院, 贵阳 550003; 2. 西南交通大学 地下工程系, 成都 610031)

摘 要: 采用模型试验进行了扩挖盾构隧道建成两连拱隧道地铁车站的施工方案研究, 重点研究扩挖施工的可行性和地层位移规律。同时, 采用有限差分法进行了扩挖施工全过程二维数值模拟对比分析。结果表明, 采用中导洞法扩挖建成两连拱隧道地铁车站的施工方案是可行的, 但需进行拱脚和拱顶加固。施工完成后地层竖向位移场呈 U 型分布, 随着加固地层力学参数的提高, 地层位移减小, 拱脚加固能够有效地减小地层位移。地表沉降曲线为近似正态分布, 其宽度为 3 倍的车站结构总宽度。

关 键 词: 地铁车站; 区间盾构隧道; 两连拱隧道; 扩挖施工; 模型试验

中图分类号: U 451

文献标识码: A

Model test of twin-bore metro station constructed with expanding shield tunnel

LI Wei^{1,2}, HE Chuan², ZHANG Hai-bo²

(1. School of Architecture & Civil Engineering, Guizhou University, Guiyang 550003, China;

2. Department of Tunnel & Underground Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: By using model test, construction schemes for metro station of twin-bore tunnel with expanding construction based on shield tunnels are studied. Main research contents are the feasibility of expanding construction method and the displacement rule of stratum displacement. The contrast between results of the model test and 2D numerical simulation of the expanding construction with the finite difference method is carried out. Results show that the construction scheme for metro station of twin-bore tunnel with expanding construction by central drift method is feasible. But reinforcing the surrounding rock of the bottom and vault of tunnel arches are necessary during the expanding construction. The vertical displacement distribution of surrounding rock appears the U-shape after expanding construction. The displacement of surrounding rock decreases with its mechanical parameters. Reinforcing the surrounding rock at the bottom of tunnel arches is an effective method for reducing its displacement. The settlement curve of the ground surface appears approximately normal distribution, and the influencing breadth is 3 times as breadth as station of twin-bore structure.

Key words: metro station; sectional shield tunnel; twin-bore tunnel; expanding construction; model test

1 引 言

在我国已建和拟建的城市地铁中, 盾构法仅应用于修建一般的地铁区间隧道, 没有直接采用盾构法或间接地在盾构法修建的区间隧道的基础上扩挖建成地铁车站等复杂断面的尝试, 这一现状极大地限制了盾构法在城市地铁建设中的大规模采用, 并且盾构法要求在施工区间隧道之前先明挖修建车站作为盾构的始发井和到达井, 而地铁车站的建设费用占整个土建费的比例比较大, 导致整个工程的建

设周期和先期投入增加^[1]。因此, 为寻求盾构法在城市地铁工程中大规模应用为突破口, 结合我国实际情况, 进行扩挖区间盾构隧道建成地铁车站的技术研究具有重要意义。

本文以广州地铁 3 号线林和西路站为工程对象, 主要就扩挖区间盾构隧道建成两连拱隧道地铁车站的施工技术进行了模型试验研究, 并采用有限差分法进行数值模拟分析, 重点研究扩挖施工的可行性、地表沉降和地中位移规律, 并提出了相应的围岩加固处理措施。

2 试验方案

2.1 相似比及试验范围

采用大几何比例尺 1:30 进行模型试验, 以几何相似比和重度相似比为基础相似比, 各物理力学控制参数在弹性范围内满足相似性^[2]。试验范围: 试验原型的左右两侧边界选为 $2B$, 车站结构的下边界选为 $2H$ (B 为两连拱结构车站的总宽度; H 为车站结构的最大高度)。两连拱结构车站的总宽度为 24.1 m, 总高度为 9.35 m。而以轨面埋深 21 m 为标准, 车站的埋深为 13.4 m, 则试验原型范围为 120 m $\times$ 45 m, 模型试验装置如图 1 所示。



图 1 模型试验装置

Fig.1 Model test apparatus

2.2 相似材料

根据广州地铁 3 号线林和西路站的工程地质情况, 并考虑试验中具有可操作性, 且不使模拟失真, 将地层简化为相同的围岩 (II 类), 同时把加固圈简化为 III 类围岩。相似材料采用重晶石粉、机油、河砂 (细) 和粉煤灰进行配制。地层 A (围岩) 配合比为: 重晶石粉: 粉煤灰: 河砂: 机油 = 1:2:2:0.712, 而地层 B (加固圈) 为 1:0.943:1.894:0.336; 其配制方法是常温下机械拌和, 最后加压成型。地层相似材料物理力学参数及其对应的原型值列于表 1 中, 模型值稍微偏大^[2]。

根据混凝土结构设计规范中混凝土和钢材的弹性模量和抗压强度值以及相似比, 喷射混凝土 (C20)、二次衬砌混凝土 (C30) 和管片衬砌混凝土 (C50) 分别采用水石膏比为 1:1.4, 1:1.6, 1:1.75 的石膏材料模拟。盾构隧道管片钢筋采用直径为 2.2 mm@5 mm 的铁丝, 车站主体结构二次衬砌钢筋采用直径为 3 mm@5 mm 的铁丝, 中墙受压钢筋采用直径为 2.2 mm@50 mm 的铁丝, 钢拱架采用直径为 3.2 mm@25 mm 的铁丝。管片环向接头采用内外两侧同时开口的方式来模拟^[3], 其开口深度经计算 (其原理为等效刚度, 即在相同的荷载下,

其变形相同时, 其刚度相同) 取为 2/3 倍管片厚度, 即单侧 1/3, 两侧立柱与管片相连处为 1/2 厚度, 即单侧 1/4。

表 1 相似材料力学参数

Table 1 Mechanical parameters of similar materials

模型与原型	地层	凝聚力 c / kPa	内摩擦角 φ / (°)	重度 γ / kN·m ⁻³
原型	A	20.5	23.5	20.0
	B	300.5	31.0	22.0
模型	A	2.32	24.9	20.0
	B	9.28	34.0	22.0
对应原型	A	69.6	24.9	20.0
	B	278.4	34.0	22.0

2.3 量测项目

主要进行地表沉降及地中位移量测, 地表沉降测点布置 9 个, 地中位移测点布置 8 个, 位移计安装布置如图 2 所示。地表沉降及地中位移均用精度为 0.01 mm、量程为 30 mm 的差动位移计量测。

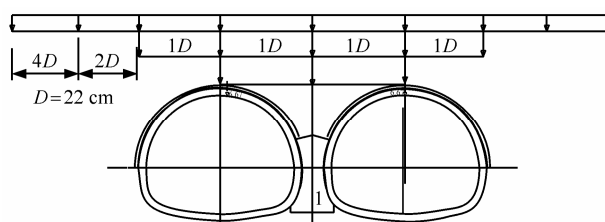


图 2 测点布置

Fig.2 Measuring points arrangement

2.4 试验步骤

试验模拟了中导洞+上弧导坑台阶法开挖方式, 其开挖步骤如图 3 所示。图中 S1 为修建左侧区间盾构隧道; S2 为修建右侧区间盾构隧道; S3 为开挖中导洞并修筑中墙; S4 为加固左洞拱部地层、开挖上弧槽并初期支护; S5 为拆除左侧管片结构、开挖下部土体; S6 为修筑左洞拱顶和仰拱结构; S7 为加固右洞拱部地层、开挖上弧槽并初期支护; S8 为拆除右侧管片并开挖下部土体; S9 为修筑右洞拱顶和仰拱结构。

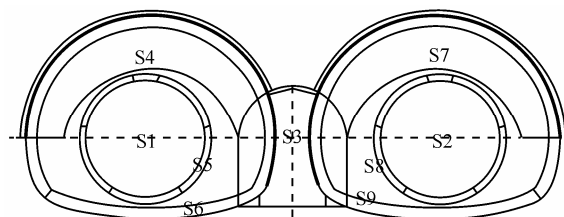


图 3 开挖步骤

Fig.3 Excavating steps

3 试验结果分析

3.1 地表沉降及地中位移变化规律

随着连拱隧道左右洞室的扩挖施工, 地表地中位移不断增加, 其变化速度也在增加, 如图 4 所示。在扩挖左洞时, 其正上方地层位移迅速增加, 在扩挖右洞时, 其正上方地层位移也迅速增加。这是由于在扩挖施工中, 产生了新的沉降槽, 而新的沉降槽又与旧的沉降槽进行叠加, 形成复合沉降槽。所以, 从地表地中位移曲线上可看出, 左右洞正上方沉降曲线的斜率要比中墙上方的大。同时因沉降槽曲线的叠加效应, 导致了左右盾构隧道正上方地层位移从下到上逐渐减小, 而中墙正上方地层位移从下到上先增加后减小, 说明中墙对其上方地层位移的下沉起到了很好的抑制作用。

3.2 地表沉降槽宽度和最大量值

车站修建完成后地表沉降曲线见图 4 (d), 随着连拱隧道左右洞室的扩挖施工, 导致地表沉降曲线的顶点先向左偏移、再向右偏移, 逐渐向中线靠近, 其最大的沉降量值发生在中线左侧 (先行隧道) 1~2 m 附近。扩挖修建完成后, 其最大地表沉降量

值为 40 mm 左右。按照 -3 mm 作为沉降槽宽度的计算起点, 则沉降槽宽度为 70 m 左右, 相当于盾构隧道左右两侧的影响宽度为 $1B$, 说明扩挖施工导致沉降槽的宽度增加了, 且其最大量值增加了 25 mm 左右, 主要是由于左右洞的扩挖施工产生新的沉降槽, 因洞径的增加导致沉降槽宽度的增加所产生的。

3.3 合理扩挖方案及加固措施

由扩挖施工引起的地表沉降槽宽度和最大量值以及地表地中位移随开挖过程的变化分析, 可得出采用中导洞+上弧导坑台阶法扩挖修建两连拱地铁站是可行的。在施工中, 上弧导坑开挖完成并作了初期支护后, 在开挖并拆除盾构隧道管片时, 由于拱部的初期支护的两侧没有支撑点, 会导致整体下沉和倾斜。因此, 在扩挖施工中, 一定要对拱部初期支护在两侧拱脚处采用锁脚锚杆进行加固处理后, 方能进行核心土的开挖。

因地表沉降值都超过了控制值 30 mm, 故在施工中应加强中洞扩挖前的加固圈土体的加固处理, 可采用双排小导管注浆的方式进行加固, 并达到其加固效果后方能扩挖施工, 做好施工监测, 以便施工的安全进行。

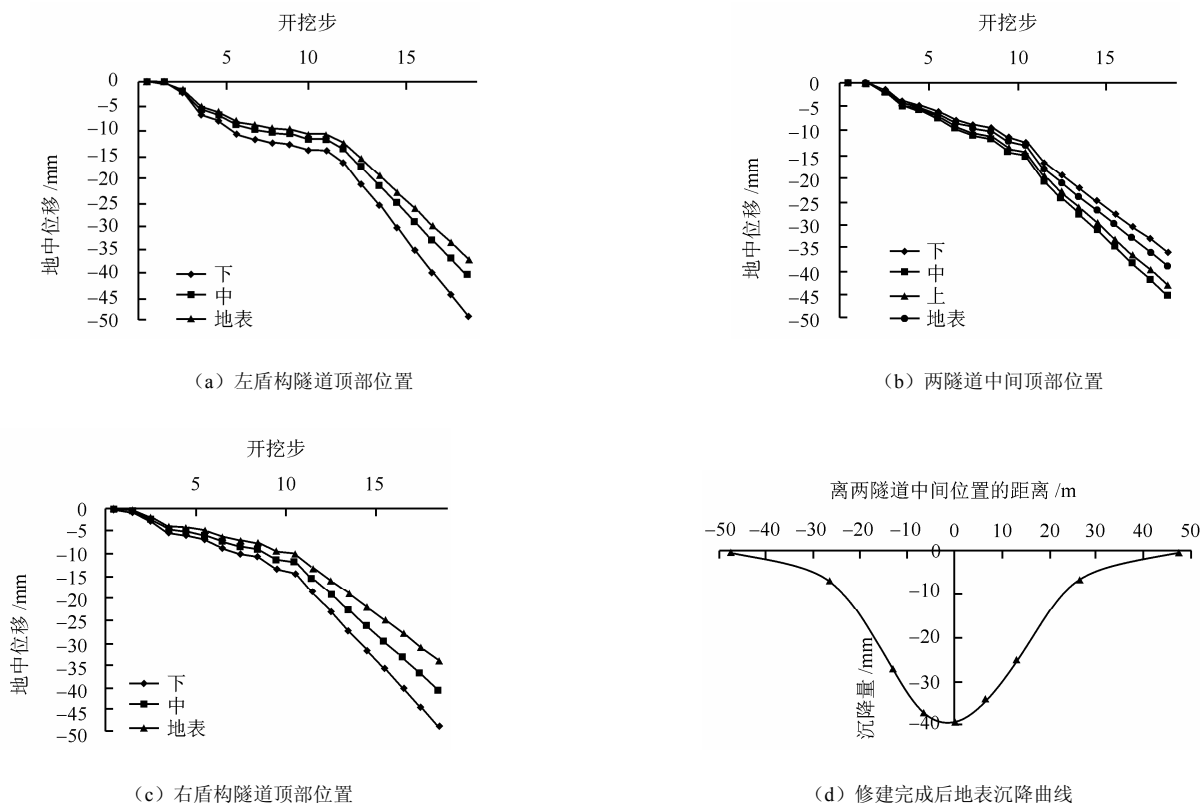


图 4 地表沉降及地中位移变化曲线

Fig.4 Change curves of the ground surface settlement and displacements of surrounding rock

4 有限差分数值模拟对比

4.1 模型建立

采用纵向为 1 m 并约束前后两侧边界纵向位移的三维模型来模拟二维问题, 模型的下边界施加竖向位移约束、左右两侧边界施加水平位移约束^[4, 5]。两连拱结构车站的模型局部放大网格见图 5 所示, 其计算边界宽为 120 m、高为 45 m, 具体范围选取见 2.1 节。

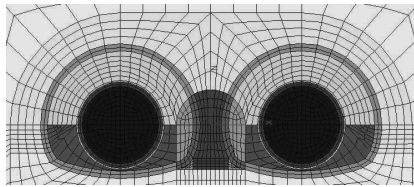


图 5 数值模拟网格

Fig.5 The mesh of the numerical simulation

因地层以黏土为主, 故采用大变形条件下的弹塑性摩尔-库仑本构模型模拟地层, 支护衬砌结构用弹性本构模拟, 采用开挖单元和载荷释放的概念来模拟隧道的开挖^[6]。采用实体单元模拟地层条件、管片衬砌、二次衬砌、立柱和中墙; 壳体单元模拟临时支护结构; 加固区地层、两连拱拱脚的锁脚锚杆的加固以及超前支护采用将围岩参数提高的等效方法进行模拟; 注浆固化过程采用改变材料参数的方法模拟^[7]。

计算分组为: N1 为加固参数达到地层 B, 拱脚未加固; N2 为加固参数达到地层 B, 拱脚加固, 其加固参数也为地层 B; N3 为加固参数达到地层 C (凝聚力为 400 kPa, 内摩擦角为 34°), 拱脚加固, 其加固参数也为地层 B。

4.2 地层竖向位移随开挖过程变化规律

施工完成后地层竖向位移场总体上还是呈“U 字型”分布, 地中最大位移呈一个“倒 V 字型”分布, 如图 6 所示。随着施工的进行, 地层位移是逐渐增加的, 如图 7(a) 所示。由计算结果可以看出, N2 计算组下车站扩挖施工完成后, 其地表最大沉降为 3.055 cm, 而 N3 计算组对应的地表最大沉降为 2.98 cm。说明随着加固参数的提高, 地层位移减小, 但达到一定量值后, 加固参数的提高对地表和地中位移的影响不大。

N1 计算组下地表最大沉降为 6.06 cm, 而进行拱脚加固处理后, 其地表最大沉降降为 3.055 cm。说明拱脚加固能够有效地减小地层位移, 这是由于隧道开挖后所施加的初期支护在两侧边墙处因地层未

加固易下沉, 从而引起初期支护整体下沉, 导致隧道顶部地层产生较大的竖向位移。在开挖左洞时地层的竖向下沉较大, 导致位移场向左偏移, 而拱脚加固能够有效地减小地中和地表位移, 且使得位移场趋于对称。

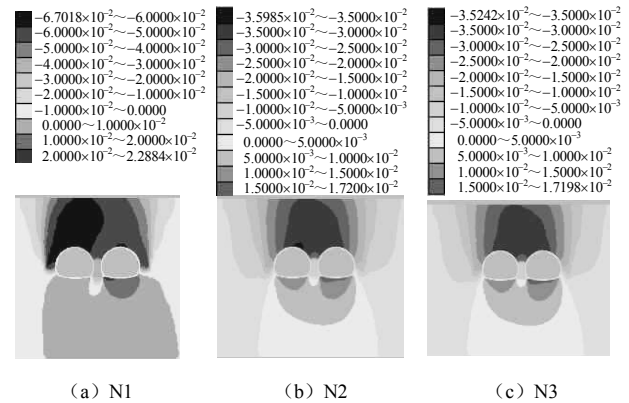
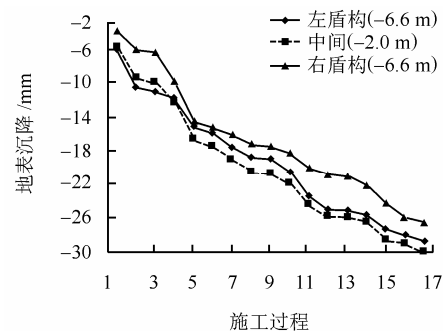


图 6 地层竖向位移分布 (单位: m)

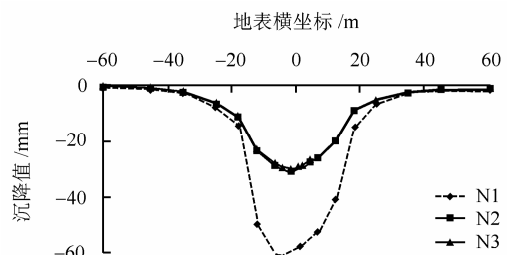
Fig.6 The vertical displacement distribution of surrounding rock (unit: m)

4.3 地表沉降槽宽度和最大量值

施工完成后地表沉降槽曲线为近似正态分布, 如图 7(b) 所示。其沉降槽宽为 70 m, 说明扩挖施工对盾构隧道施工引起的地层沉降槽的宽度有所增加 (相当于两侧各 1B)。在计算组 N3 条件下, 并进行拱脚加固后最大沉降为 29.8 mm, 满足地铁



(a) 地表沉降随施工过程变化(N3)



(b) 施工完成后地表沉降槽

图 7 地表沉降曲线

Fig.7 The settlement curves of ground surface

+1 cm 和-3 cm 的沉降控制要求。由图 7 (b) 还可看出, 拱脚加固与否, 对地表沉降槽宽度几乎没有影响, 而最大地表沉降值则相差 1 倍, 所以在扩挖施工中, 进行拱脚处围岩的加固处理是相当重要的。

4.4 合理扩挖方案及加固措施

选择中导洞+上弧导坑法扩挖是可行的, 但施工中, 需对拱脚采用锁脚锚杆进行加固, 其加固效果达到计算组 N3 的要求, 其超前加固采用双排小导管注浆, 并要达到其加固效果后, 才能进行土体开挖。同时, 建议在每一步土体开挖后, 及时施作初期支护, 抑制地层的下沉, 从而确保施工中围岩的稳定和施工安全。

4.5 与模型试验结果比较

由室内相似模型试验和数值计算结果可看出: 在区间盾构隧道的基础上扩挖建成两连拱隧道地铁站, 其地表和地中位移随施工过程的变化规律是相同的, 施工完成后产生的地表沉降曲线也是一样的, 包括顶点位置和沉降槽宽度, 只是在其最大地表沉降量值上, 模型试验值相对大一些, 这是由于模型试验中隧道的埋深相当小, 土体的开挖产生的扰动比较大, 且很快传到地表的缘故。根据地表沉降量值, 得出的合理扩挖方案和加固处理措施也是相同的。

5 结 论

通过室内相似模型试验和有限差分数值模拟分析结果, 可得出如下结论:

(1) 在区间盾构隧道的基础上扩挖建成两连拱隧道地铁站的施工方案是可行的。

(2) 施工完成后地层竖向位移场总体上还是呈“U 型”分布, 随着加固参数的提高, 地层位移减小, 拱脚加固能够有效地减小地层位移。

(3) 施工完成后地表沉降槽曲线为近似正态分布, 施工完成后其沉降槽宽度为车站两侧各 1B, 而最大量值在加固地层 C 条件下满足地铁规范对沉降控制的要求。

(4) 选择中导洞法+上弧导坑台阶法扩挖是可行的, 但施工中, 需对拱脚采用锁脚锚杆进行加固, 并采用双排小导管注浆超前加固, 达到其加固效果后, 才能进行扩挖施工。

(5) 建议在每一步土体开挖后, 应及时施作初期支护, 以便抑制地层的下沉, 从而确保施工中围岩的稳定和施工的安全进行。

参 考 文 献

- [1] 何川, 丁建隆, 李围. 配合盾构法修建地铁站的技术方案[J]. 西南交通大学学报, 2005, (3): 293—297.
- [2] 李围, 何川, 张志强. 大型地下结构下修建盾构隧道模型试验[J]. 西南交通大学学报, 2005, (4): 478—483.
- [3] 唐志成, 何川, 林刚. 地铁盾构隧道管片结构力学行为模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(1): 85—89.
- [4] 杜守继, 职洪涛, 翁慧俐, 等. 高速公路软岩隧道复合支护机理的 FLAC 解析[J]. 中国公路学报, 2003, 16(2): 70—74.
- [5] 郝哲, 万明富, 刘斌, 等. 韩家岭隧道围岩物理力学参数反分析[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2005, 26(3): 300—303.
- [6] 于宁, 朱合华. 盾构隧道施工地表变形分析与三维有限元模拟[J]. 岩土力学, 2004, 25(8): 1 330—1 334.
- [7] 于宁, 朱合华. 盾构施工仿真及其相邻影响的数值分析[J]. 岩土力学, 2004, 25(8): 292—296.