双连拱隧道施工过程的三维数值模拟分析

胡庆安　夏永旭　王文正

（长安大学公路学院，西安，710064）

摘　要：研究双连拱隧道施工过程中开挖面的空间效应、左右洞施工的相互影响以及中墙的变形和稳定性。右洞开挖对左洞围岩位移的影响范围约为开挖面前后 3B（B 为单洞开挖跨度）。右洞施工时，开挖面后方的中墙产生整体向左的偏转，墙身中部向左侧鼓出，基部右趾向上抬起。中墙侧的回填有效地抑制了中墙的变形，所以施工时中墙侧必须回填密实。为了控制中墙的变形，两开挖面间距应小于 2.5～3B。

关键词：　双连拱隧道　施工　中墙　变形　三维分析　数值方法

0.引言

在公路隧道的结构分析中，按平面应变问题所建立的模型，仅适用于已建成的隧道或者远离掌子面的洞身。而对于开挖掌子面附近的结构分析，不得不采用三维空间模型。空间计算模型不但可以较为真实地模拟初期支护，尤其锚杆与拱架格栅的物理力学参数与它们在实际隧道中的位置，而且可以模拟真正的开挖过程，体现施工各工序在空间上的安排，分析在不同施工过程中隧道围岩与支护结构的应力、应变变化规律。本文以西汉高速某连拱隧道为背景进行三维线弹性分析，考察连拱隧道施工过程开挖面的空间效应、左右洞施工的相互影响，以及中墙的变形和稳定性。

1. 空间计算模型的建立及施工工序的简化

计算模型取为各向同性线性弹性；岩体初始应力场不考虑构造应力，仅考虑其自重应力；锚杆和拱架看作对围岩因施工爆破而松弛的补强；一二衬同时施作，不考虑其施作的时间差的影响。计算参数按照文献[1]的规定选取。有限元模型计算范围在水平方向取距隧道中心 5 倍半跨，下边界取为洞高的 3 倍，上边界可取隧道的实际埋深，纵深方向取 5B（B 为单洞开挖跨度），即 60m。在模型的底面加固定支座，在平行隧道走向的两侧施加滑动支座，只约束 X 方向的自由度而释放 Y 方向上的自由度，垂直于隧道走向的两侧施加 Z 方向的约束。

根据实际施工中“一洞在前，一洞在后”的常用施工方案，计算工序简化如下：第 1 步，自重应力场计算；　第 2 步，三导洞全线开挖贯通，同时浇筑中墙和边墙二次衬砌；第 3 步至第 11 步，开挖右洞剩余岩体，施作衬砌，每次开挖进尺 0.5B，共开挖 9 次，即到 4.5B 处；第 12 步至第 20 步，开挖左洞剩余岩体，施作衬砌，每次开挖进尺 0.5B，共开挖 9 次，与右洞齐平；在第 3 步开始右洞开挖时，先对中墙顶进行了回填，同时为了考察中墙在施工中的偏转状况，对中墙左侧进行回填与不回填两种分析。

2 计算结果与分析

2.1 连拱隧道开挖面空间效应

“三导洞法”开挖连拱隧道时，导洞开挖引起的群洞效应以及中隔墙的支撑作用，使得开挖面在纵断面和横断面上的约束作用与一般单洞有所不同。在距初始开挖面 2.5B 处，右洞拱顶位置选取特征点 A。图 1 是右洞开挖时，A 点沉降随开挖面推进的变化曲线。可以看出，三导洞开挖时 A 点已产生一部分的先期沉

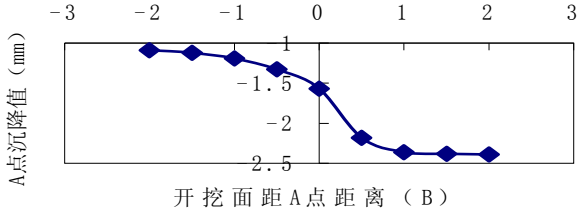


图 1 A 点沉降随开挖面推进变化曲线

降；在开挖面距 A 点 1.5B 时，A 点沉降开始加速，表明此时右洞开挖引起的卸载已经开始；当开挖面到达 A 点时，A 点垂直位移释放系数约为 65%（计入导洞开挖时产生的先期沉降）；当开挖面经过 A 点后 1B 的范围内，其沉降增大加剧，位移释放系数达到 98.7%。若不计及导洞产生的先期沉降，仅考察右洞开挖面的影响，则开挖面自距 A 点 1.5B 处推进到 A 点时产生的位移释放系数为 36.6%；开挖面经过 A 点 1B 后位移释放系数为 97.7%。由此可见，受开挖面影响较大的围岩区域为开挖面前方 1.5B（未开挖）和后方 1B，对于本章建立的模型就是前方 18m 和后方 12m。

2.2 左右洞施工的相互影响

双连拱隧道施工中后进坑道由于先进坑道造成的凌空面而产生较大变形；先进坑道由于后进坑道施工而再次卸载，从而增大作用在支护上的荷载。选择距初始开挖面 0.5B、2.5B 和 4.5B 处，左洞拱顶位置的 B、C、D 三点。由于受模型长度的限制，特选取 B、D 两点来分别考察右洞开挖面通过前和通过后左洞沉降变化规律。图 2 表示的是左洞 B、D 点随右洞开挖面推进的变形曲线。右洞在开挖的过程中，其开挖面的空间效应不仅影响到右洞开挖面前后围岩位移，而且影响到左洞的围岩变形。其对左洞围岩位移的影响范围约为开挖面前后 3B。图 3、图 4 表示的是左洞开挖时，右洞 A 点的主应力随开挖面推进的变化曲线。

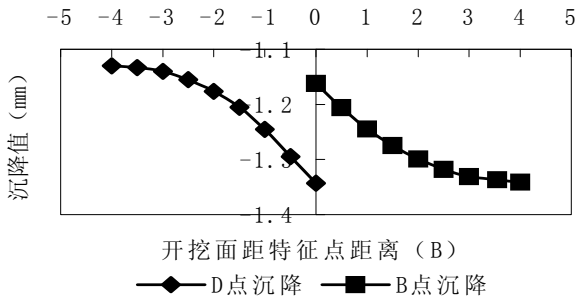


图 2 右洞开挖对左洞沉降的影响

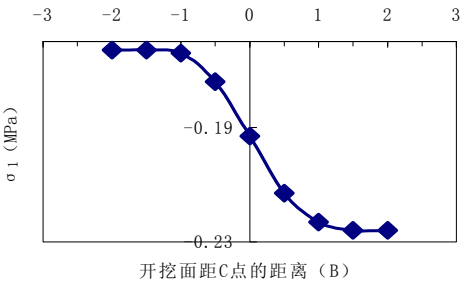


图 3 左洞开挖对 A 点 σ_1 的影响

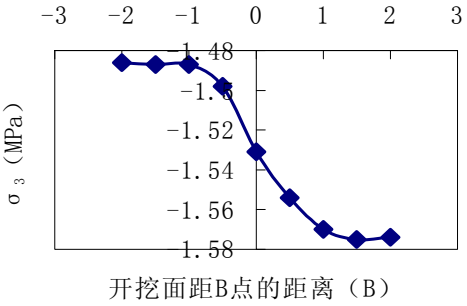


图 4 左洞开挖对 A 点 σ_3 的影响

可以看到开挖面推进到距 A 点 1B 时，A 点的 σ_1 和 σ_3 开始增加；当开挖面通过 A 点 1.5B 后，A 点的 σ_1 和 σ_3 值基本稳定。说明左洞开挖对右洞的影响约在开挖面前 1B 和开挖面后 1.5B 的范围。所以施工时

左洞开挖面和右洞尚未达到强度要求的二衬之间应保证留有至少 1B 的间距。

2.3 中隔墙变形及稳定性分析

双连拱施工过程中中墙的变形是复杂的，其不仅有横断面上的变形，而且纵断面上亦存在弯曲扭转的变形。为了便于比较，考察中墙的稳定性，对施工时中墙左侧不回填的情况也进行了分析。中墙左侧回填时，随右洞开挖面的向前推进，开挖面后方的中墙产生整体向左的偏转，墙身中部向左侧鼓出，基部右趾向上抬起。同时在纵断面方向，开挖面后方中墙向左侧凸出，产生纵向的弯曲。左洞开挖后，随其开挖面的推进，中墙整体向左的偏转得到纠正，墙身向左的鼓出大有收敛，基脚右趾的上抬得到抑制。纵向弯曲随左洞的施工逐渐恢复。同时发现，由于左洞衬砌的回推作用，中墙向左的偏转恢复的同时略偏向右侧，而左洞开挖面前方未作衬砌段，中墙向左的偏转加重，由此中墙在纵向上产生扭曲。中墙左侧未回填时，随右洞的施工，中墙的变形特征明显大于回填时的情况。尤其是当左洞施工时，左洞衬砌的回推作用使得中墙在纵向上的扭曲变形更为显著[6]。

由此可见，中墙左侧的回填不仅在先进坑道施工时，对于限制横向上中墙的偏转以及纵向上中墙的弯曲是有效的，更重要的是，回填可以在后进坑道施工时限制中墙在纵向的扭曲变形，从而保证先行坑道支护结构的稳定性，避免中隔墙施工时因留有变形缝而出现错台现象。因此，连拱隧道施工时，必须对中墙侧回填或进行其他的支挡处理。

彭定超等在文献[2]中，曾对金竹桥连拱隧道中墙影响进行了空间分析。他采用中墙顶部和底部的位移差作为参数，对中墙的变形和稳定性进行了分析。但在以上分析中我们已看出，中墙的变形不是简单的整体偏转，同时中墙基脚右趾的抬起变形显著，同样可以反映中墙的变形。因此，以下我们将以中墙基部左右趾 A、B 两点的位移差为参数，来具体考察中墙在施工中的变形规律。A、B 点位置如图 5 所示。

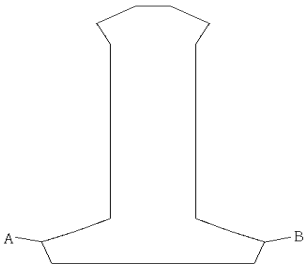
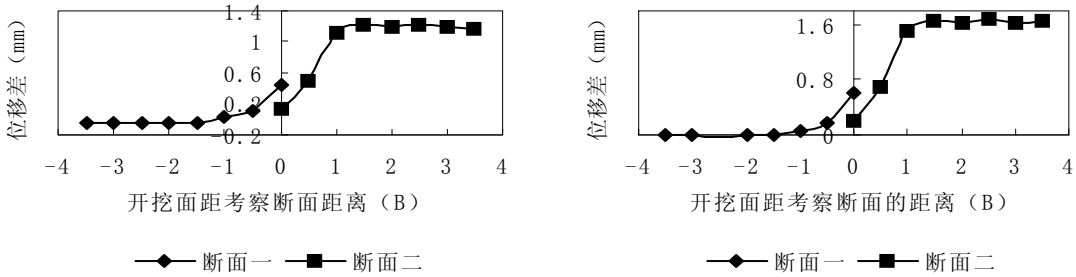


图 5　A、B 点位置示意图

a）　右洞施工时中墙变形情况

由于模型长度的限制，特取距初始开挖面 0.5B 和 4.5B 两个断面，来分别考察开挖面前方和后方中墙的变形情况。中墙随右洞开挖面推进的变形曲线见图 6。从图中可以看出，右洞开挖对中墙的影响约在开挖面前后 1.5B 的范围。开挖面通过 1.5B 后，中墙的变形达到最大。同时通过回填和不回填两种情况的比较看出，中墙左侧不回填时中墙的变形大于左侧回填时的情况。因此，中墙侧的回填有效地抑制了中墙的变形，是施工中必需完成的内容。



（a）回填时　　图 6 中墙随右洞开挖面推进的变形曲线　　（b）不回填时

b） 左洞施工时中墙变形情况

图 7 表示的是左侧回填时中墙各断面随左洞开挖面推进的位移变化曲线，图中每条曲线表示两开挖面间距为某一值时中墙上各断面的变形值。从图中可以看出，当两开挖面间距为 4.0B 时，开挖面间中墙有长度大约为 2B 的部分变形相同，保持在最大值（整个施工中的最大值）；当开挖面间距减小为 3.5B 时，开挖面间中墙的变形保持为最大值的部分减小为 1～1.5B；当开挖面间距为 2.5～3B 时，开挖面间中墙的变形开始低于最大值，说明两开挖面对中墙的影响范围开始交叠。当两开挖面间距为零时，中墙变形达到最小。由此可见，当两开挖面间距大于 2.5～3B 时，开挖面间中墙总有部分变形达到最大值。因此，从控制中墙变形的角度讲，两开挖面间距应小于 2.5～3B。

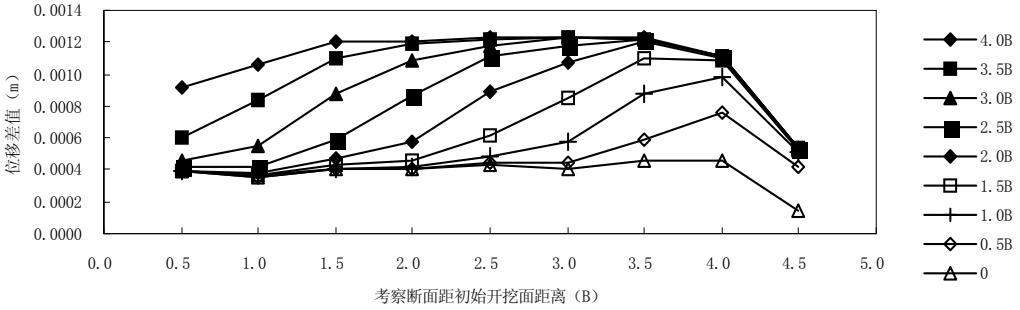


图 7 中墙各断面位移随左洞开挖面推进的变化曲线

3. 结论

本文应用空间模型对连拱隧道进行了模拟分析，重点考察了连拱隧道施工过程中开挖面的空间效应、左右洞施工的相互影响以及中墙的变形和稳定性，得出如下结论：

（1） 右洞开挖时，受开挖面影响较大的围岩区域为开挖面前方 1.5B（未开挖）和后方 1B。

（2） 右洞开挖对左洞围岩位移的影响范围约为开挖面前后 3B。左洞开挖对右洞的影响约在开挖面前 1B 和开挖面后 1.5B 的范围。所以在施工时，左洞开挖面和右洞尚未达到强度要求的二衬之间应保证留有至少 1B 的间距，以减轻左洞施工对右洞衬砌的扰动。

（3） 中墙左侧不回填时的变形远大于中墙侧回填的情况。因此在双连拱隧道施工时，为了有效地抑制中墙的变形。中墙一侧必须认真的回填。

（4） 右洞开挖对中墙的影响约在开挖面前后 1.5B 的范围。当左右洞开挖面间距为 2.5～3B 时，开挖面间中墙的变形已低于最大值，说明两开挖面对中墙的影响范围开始交叠。因此，从控制中墙变形的角度讲，两开挖面间距应小于 2.5～3B。

参考文献

1. 孙钧、侯学渊，地下结构(M)，北京：科学出版社，1987。P398～500
2. 彭定超、袁勇，开挖施工方式对连拱隧道中墙影响的空间分析(M)，现代隧道技术，2002.2，p
3. 蒋树屏，我国公路隧道建设技术的现状及展望(C)，国际隧道研讨会暨公路建设技术交流大会论文集，北京：人民交通出版社，2002.11。p537～546
4. 中华人民共和国交通部：公路隧道设计规范（JTJ 026-90）(S)，北京：人民交通出版社，1990。P10～

12

5. 中华人民共和国交通部：公路隧道施工技术规范（JTJ 042-94）(S)，北京：人民交通出版社，1994。P15～47

6. 王文正，双联拱公路隧道开挖方法及施工过程数值模拟研究(D)，长安大学研究生学位论文，2003.5。p39～45

7. 夏永旭、王永东，隧道结构力学计算(M)，北京：人民交通出版社，2004。P79～103

Spatial Numerical Analysis on Double-arch Tunnel’s Construction Process

Hu Qing’an Xia Yongxu Wang Wenzheng

(Highway College, Chang’an University, Xi’an, 710064)

Abstract With three-dimensional model, this paper simulates the spatial effect during double-arch tunnel construction, analyzes the transaction between the left tunnel and the right tunnel, and also analyzes the deformation and stability of mid-partition. The region of the left tunnel affected by the excavation of the right tunnel is 3B in front of and at the back of the excavating face. During the construction of the right tunnel, the mid-partition behind the excavating face deflects to the left as a whole, the middle part of the mid-partition bulges to the left and the right toe rises. The backfill on the left of mid-partition prevents it from deforming effectively, so the quality of it should be guaranteed during construction process. Distance between the two excavating faces should be less than 2.5～3B to control the deformation of mid-partition.

Key Words: Double-arch Tunnel, construction, middle-wall ,deformation ,three-dimensional analysis , numerical method.