

文章编号: 1000-7598 (2009) 04-1102-07

偏压、错台小间距隧道施工位移场动态模拟分析

杜菊红¹, 黄宏伟²

(1. 中建国际设计顾问有限公司, 上海 200235; 2. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092)

摘 要: 采用三维非线性有限元法, 对偏压、错台的浅埋小间距隧道在不同开挖顺序下的动态施工过程进行了模拟。通过对位移场的分析, 研究了其施工力学特性。由于两隧洞之间的相互影响, 并行小间距隧道对围岩的扰动程度大于两独立隧道作用的叠加; 相互影响对中间岩柱的作用最为明显, 对洞周、地表影响相对较弱。两洞开挖顺序不同, 最终位移场的分布规律相同, 但量值上存在一定差异。研究给出了在偏压、错台情况下的两洞开挖的合理顺序。

关 键 词: 偏压; 小间距隧道; 相互影响; 三维数值模拟;

中图分类号: U 25

文献标识码: A

Dynamic simulation analysis of displacement field of bias closely spaced tunnel with altitude difference

DU Ju-hong, HUANG Hong-wei

(1. China Construction Design International, Shanghai 200235, China; 2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: A three-dimensional nonlinear finite element analysis is performed to simulate the observational construction procedure of bias closely spaced tunnels with altitude difference. The main works are focused on the displacement field to investigate the construction mechanics features under alternative construction sequences. The results present more deterioration of adjacent rock for parallel tunnels with small distance than superposition of two independent tunnels because of the interaction; and the interaction effect more on pillar than ground surface and tunnel periphery. Though the construction sequences are different, the basic features of final displacement field are consistent; they are just different in quantity. The preferable construction sequence under the presented condition is given.

Key words: unsymmetrical pressure; closely spaced tunnels; mutual influence; 3D numerical simulation

1 引 言

我国《公路隧道设计规范》^[1]提出了小净距隧道的概念, 将不同于分离式隧道、连拱隧道的隧道型式统称为小净距隧道, 说明小净距隧道已是重要的隧道型式。近些年来公路隧道建设的蓬勃发展促进了小净距隧道理论及工程实践的进步, 在技术、经济、社会效益方面发挥了很大的优势。研究中笔者发现, 隧道之间的间距是决定设计施工技术的重要影响因素, 间距不同, 隧道的设计施工技术也要随之进行相应调整, 距离越近, 要求越高。以往研究多集中在间距为 2~8 m 左右的隧道, 对于间距

为 10 m 以上的情况研究较少, 后者既不需要极小间距隧道那样严格的施工措施, 必须对相互影响加以考虑, 所以设计施工技术等方面就需要进行针对性地研究。为区别起见, 本文将间距在 10 m 以上的小净距隧道称为小间距隧道, 对其进行相关研究。

双洞之间的相互影响是近距离并行隧道的主要特征, 国内外依托具体工程已展开一系列研究。早在 1942 年就有间距为 0.425D 的超小净距的工程项 目^[2], 1977 年 Ghaboussi 和 Ranken^[3]利用有限元方法, 系统分析了围岩 (特别是中间岩柱) 内力、隧道位移、衬砌内力、地表沉降等参量, 研究了中间岩柱厚度、隧道埋深、支护情况及开挖顺序等主要因素

收稿日期: 2007-07-30

基金项目: 云南省交通厅科研项目 (No. TST(2004)538119B); 教育部“新世纪优秀人才支持计划” (No. NECT-04-0368) 资助。

第一作者简介: 杜菊红, 女, 1979 年生, 博士研究生, 主要从事岩石隧道领域的科研工作。E-mail: dujhtj@gmail.com

对并行隧道力学特性的影响, 指出相互影响随中间岩柱厚度的增大而减小, 其具体影响程度还与埋深及隧道支护状态相关。此后, 二维有限元分析以其计算机时短且能满足分析要求, 在此研究领域得到了广泛应用, 我国学者也依托具体工程, 利用2D模拟对此类隧道进行了大量有限元分析, 对开挖工法、支护、加固等众多方面进行了研究^[4-6]。

对于施工过程的时间和空间效应, 需用三维数值模拟研究, Duddeck和Soliman^[7]通过三维有限元计算对间距分别为0.5D、1.0D并行隧道的施工进行了弹性分析。Ng (2004 年)^[8]利用三维模拟研究了两隧道不同施工距离时的相互影响情况, 并对孔隙水压力变化进行了分析。刘伟^[9] (2004年) 利用三维弹塑性有限元分析, 对不同开挖工法、开挖工序进行了研究。贾蓬^[10] (2006年) 对近距离平行隧道的3种典型开挖方式也进行了三维分析。有限元计算方法与实际工程结合的研究, 在一定程度上深化了对小间距隧道施工力学、围岩稳定方面问题的认识, 充分证实了有限元计算的可靠性。本文以实际工程为研究背景, 通过分析隧道施工中位移场特性, 对小间距隧道之间的相互影响作用进行相应的研究。

2 工程概况

云南省平年隧道工程位于剥隘地区, 隧道岩体介质为泥岩、泥质粉砂岩, 且以砂岩为主。围岩类别主要为IV、V级围岩。整个隧道位于一个大的背斜和向斜构造带中, 地形偏压较重, 最大埋深为57 m, 双洞净距罗村口端18 m, 距富宁端25 m, 两隧洞之间存在高差, 左洞比右洞高3~4 m, 所以平年隧道是集偏压、浅埋、错台于一身的小间距双洞隧道。

已有对小间距隧道的研究大多集中于水平地表情况, 而对我国当前山区大量存在的类似平年隧道偏压情况下的小间距隧道的分析较为少见, 在小间距隧道施工中积累的经验也不多, 所以对其施工力学相关认识相对较浅, 在施工时常出现坍塌等问题, 施工难度较大。平年隧道在洞口开挖过程中发生了坍塌事故, 经分析隧道的开挖顺序可能是诱发原因之一。为了掌握偏压、错台情况下小间距隧道之间的相互影响情况, 需研究其开挖合理顺序, 本文以平年隧道为原型, 采用大型有限元程序 MSC.Marc 进行三维弹塑性分析。

3 三维数值模型

3.1 模型的确定

由 Marc 所建立的三维有限元分析基本模型如图1所示。隧道开挖洞径 $B=12.5$ m, 洞高 $H=10.5$ m, 其双洞实际净距为20 m, 右洞拱顶至地表距离为23 m, 偏压角度为 13° , 两洞之间存在4 m错台。为了便于说明, 将两洞按左右关系命名, 沿如图1(a)所示开挖方向作为正向, 左侧洞室为左洞, 右侧洞室为右洞, 左洞拱顶高程高于右洞拱顶。开挖的影响范围为开挖跨度的0.5~2.5倍^[11], 参考以往工程经验, 横断面上对隧道左右两侧及下方岩体选用3倍洞径作为有限元分析范围, 纵向计算长度取为110 m。位移边界条件采用两侧面限制水平方向位移, 顶面为自由边界, 底面施加固定约束, 纵向方向为垂直边界面的Z向约束见图1(b)。

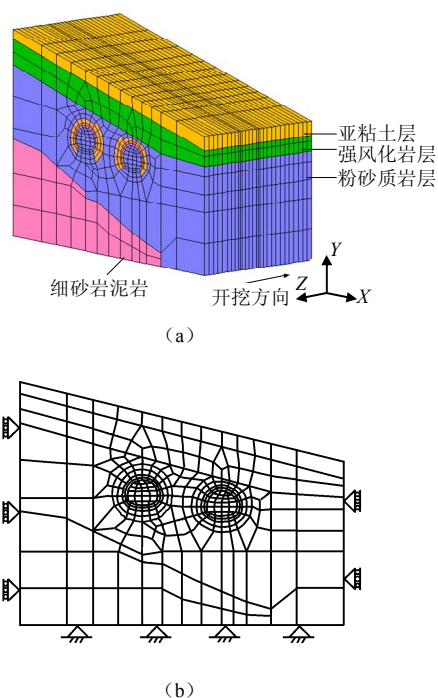


图1 三维弹塑性有限元分析模型

Fig.1 Model of 3D elastoplastic finite element method

本文对超前支护及锚杆的作用不具体研究, 此处采用等效原则进行模拟, 即用提高围岩凝聚力 c 和内摩擦角 φ 的方法进行概化处理^[12]。计算所采用的围岩、加固区具体参数见表1。围岩用8节点实体单元进行模拟, 初次支护结构采用4节点薄壳单元模拟, 考虑到三维计算的实效性, 网格在隧道结构的周边围岩单元布置适当加密, 其他距离洞身较远的地方网格则稀疏布置, 模型中有节点13 032个, 单元13 125个。

表 1 数值计算中材料物理力学参数
Table 1 Physico-mechanical parameters of materials in numerical simulation

名称	弹性模量 /MPa	泊松比	凝聚力 /kPa	内摩擦角 /(°)	重度 /(kN/m ³)
亚黏土层	3.75×10 ²	0.40	60	22	18.0
强风化岩层	5×10 ²	0.37	50	26	26.2
粉砂质泥岩	1.9×10 ⁴	0.34	120	26	26.9
细砂岩泥岩	2×10 ³	0.32	80	25	26.9
超前加固区	1×10 ⁴	0.20	200	30	35.0
锚杆加固区	2.4×10 ³	0.30	600	27	27.8

3.2 计算假定及结构分析过程

3.2.1 计算假定

(1) 将围岩视为理想弹塑性材料, 选用 D-P 准则作为屈服准则。这里主要研究小间距隧道施工中的位移、应力发展规律, 并对左右洞不同开挖顺序下的力学反应进行分析, 所以不考虑地形带来的影响因素, 选取山顶纵向为平坦情况。

(2) 初始地应力的分布往往决定着开挖后 2 次应力场的大小与分布, 是地下隧洞工程设计中要考虑的重要因素。本次研究的浅埋隧道, 初始应力场仅考虑重力作用。

(3) 计算时不考虑地下水的影响。

3.2.2 动态模拟施工工况

利用 Marc 程序的单元“生死”功能可方便模拟开挖岩体、支护施作。将开挖范围内的单元“杀死”, 即可模拟开挖过程。加固区域块体单元的材料属性是随着施工过程变化的, 通过在合适的载荷步中利用程序提供的改变材料属性功能来实现。

隧道采用台阶法进行施工, 两洞依次开挖。开挖过程的动态模拟主要包括以下步骤: ①初始地应力场形成; ②超前支护; ③上台阶开挖并初次支护; ④下台阶开挖并支护, 上、下台阶相差 10 m; ⑤重复步②~④至先行洞开挖完成; ⑥后行洞采用相同开挖过程至结束。

实际工程中以 1 m 为一个开挖支护进尺, 进行循环施工。考虑到数值计算的效率, 本研究以 2.5 m 为一循环进尺, 超前支护范围达到掌子面前方 5 m 处, 支护结构则滞后开挖一个施工步施作; 考虑到仰拱的作用是及时封闭断面, 所以在模拟中仰拱施作与下台阶开挖支护同步进行, 及时闭合掌子面。

4 计算结果分析

位移是现场施工监测、数值模拟计算中最直观的参量指标, 特别在现场监测中最接近于实际状态、最大限度反映了真实施工变化, 本文主要对地表、洞周、中间岩柱等重点关注点进行位移分析, 两洞的相互影响及开挖顺序问题。

4.1 地表沉降

左右洞单独存在时的地表沉降曲线与双洞共同存在情况下的沉降曲线如图 2 所示, 其中曲线 1~2 分别为左右洞单独存在时的地表沉降曲线, 其形状类似高斯曲线形状, 拱顶处的地表位移值最大, 但不同于水平地表的对称沉降曲线, 在偏压情况下曲线是不对称的, 地表上距离拱顶相同距离时, 左侧地表沉降大于右侧。

已有计算并行隧道地表沉降的方法, 是将两隧道单独开挖情况下的沉降曲线进行各点叠加处理或简化为体积等效的单个高斯曲线^[13], 而有关现场实测与有限元模拟结果表明, 水平地表情况下当两隧道距离较近时后推进隧道引起的地表沉降是较单独开挖情况下增大的^[14]。本文所研究偏压作用下也有类似情况, 当存在相邻隧道时地表沉降曲线发生根本变化, 为双峰值的曲线形式, 两峰值仍出现在两拱顶上方位置处; 对比曲线 3 和曲线 4 可以看出, 由于两洞之间的相互影响, 其最终的地表沉降值大于两洞单独作用的叠加值, 特别是对于两洞室周围的岩体作用明显, 左洞拱顶上方地表沉降值由于右洞的存在增大 19 %。

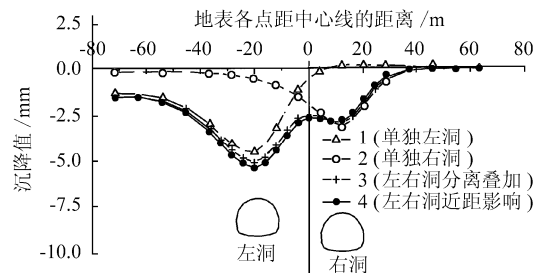


图 2 地表沉降曲线

Fig.2 Surface ground settlement profiles

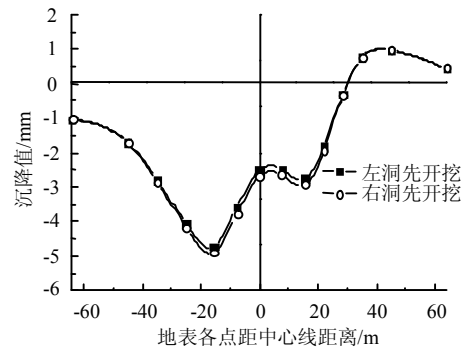


图 3 不同开挖顺序时的地表沉降

Fig.3 Variations in surface settlement profile with different construction sequences

图 3 为左右洞不同开挖顺序下的地表沉降曲线对比图。开挖顺序的变化对于双洞周围地表沉降影

响明显,右洞先开挖各点的沉降值均大于左洞先开挖时的沉降值,增幅约为5%~8%;在右洞先行的情况下,右洞拱顶上方周围地表土体都是先向下沉降后隆起,其最大沉降值较左洞开挖时的最大值增大20%。

4.2 洞周位移

洞周位移是评价洞室自身稳定性重要参考因素。图4为先右洞后左洞开挖全过程的拱顶、仰拱的位移发展变化曲线。洞周各点的位移主要发生在开挖面附近分析断面附近;洞室开挖会对相邻洞室洞周产生影响,但相对于其本身洞室开挖引起的位移,相邻洞室开挖引起的位移比例较小,左洞的存在使右洞拱顶、仰拱位移值变化分别为7%、2%。

工程中测得的拱顶沉降与数值计算结果的对比如图5所示,实际量测时得到的拱顶沉降是在掌子面开挖后的沉降变化值,而计算中的拱顶沉降值包括了拱顶围岩在此断面开挖前产生的变形,所以将开挖后的计算值分离出来与实测值进行比较,以数值分析中的计算步作为施工步,将实测数据与之对应。由图中可以看出,二者的发展规律基本一致,逐渐趋于稳定;由于施工现场影响因素较多,现场实测数据具有波动性;后期的实测数据大于计算值,究其原因是软弱围岩蠕变变形的作用结果,数值计算中未充分考虑围岩的蠕变性质。通过与实测数据的比较,进一步证明了有限元计算中模型和参数选取的合理性。

左右洞开挖次序对洞周位移的影响如图6所示,右洞先开挖时,右洞拱顶、左拱脚位移分别比左洞先开挖情况下增大6%、19%,左右洞不同开挖顺序对洞周拱脚横向位移的影响大于对拱顶沉降影响。对于左洞洞周关键点位移有着同样的规律,洞室本身先开挖情况下,其位移值大于后开挖情况下产生的值,所以后开挖有利于洞室本身的稳定。

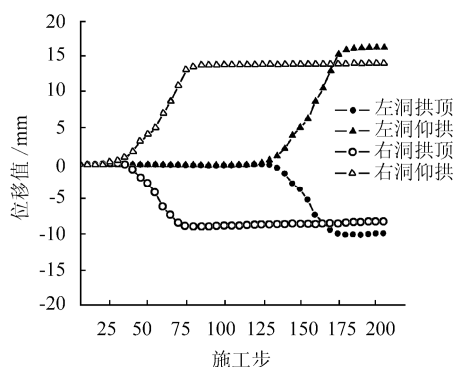


图4 两洞室拱顶及仰拱处位移发展曲线
Fig.4 Displacements at crown and invert

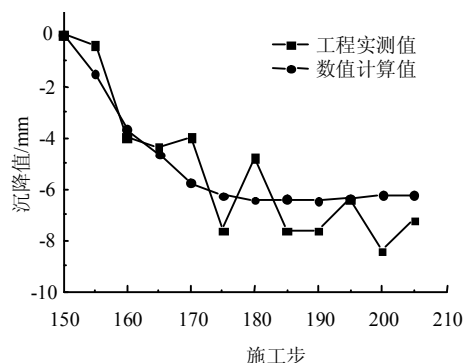
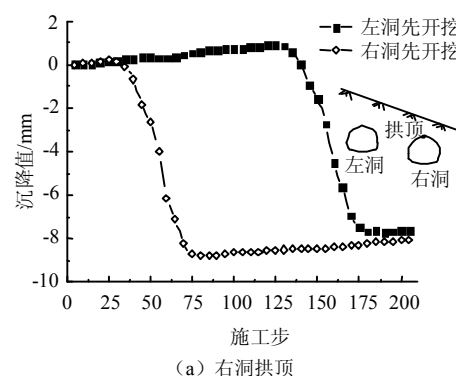
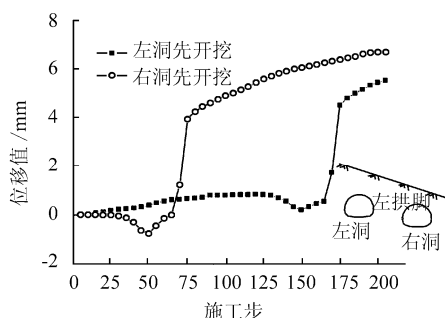


图5 拱顶沉降实测值与计算值对比
Fig.5 Contrast of settlement at crown between measured and simulated values



(a) 右洞拱顶



(b) 右洞左拱脚

图6 不同开挖顺序时的洞周变形
Fig.6 Peripheral deformation of section with different construction sequences

4.3 中间岩柱位移

对于中间岩柱的分析主要集中于具有代表性的两洞中间岩柱的中心线位置。如图7所示,当左右洞单独存在时,其水平位移曲线有着明显区别(曲线1~2):右洞单独开挖时,上部中间岩柱都向右侧产生位移;左洞开挖时,中间岩体近地表处向左侧移动,靠近洞室位置处向右侧移动。位于两洞室下方的中间岩柱仅向左侧产生微小位移,受洞室开挖影响较小。从曲线3、4可以看出,在双洞同时存在的情况下,其中间岩柱的水平位移值(曲线4)明显大于两洞单独作用下的结果叠加(曲线3),位于两洞室上方的围岩受影响较大,增大值达到1 mm,约为最大值的30%。

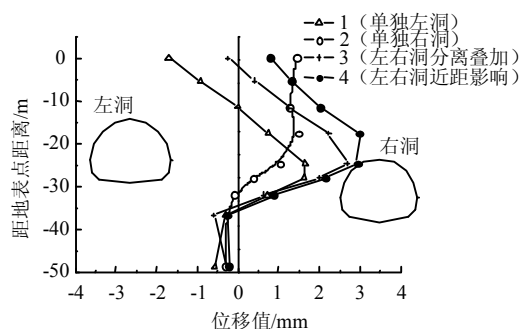


图7 中间岩柱水平位移

Fig.7 Horizontal displacements in pillar

不同开挖顺序时的中间岩体位移比较如图8所示, 主要影响区域是洞室周围的岩体, 此范围内, 右洞先开挖时的位移值比左洞先开挖时增大7%~10%, 说明左洞先开挖有利于减小中间岩柱的水平位移。

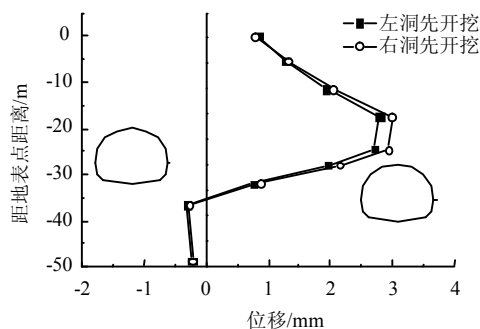


图8 不同开挖顺序时的中间岩体水平位移

Fig.8 Variations of horizontal displacements in pillar with different construction sequences

5 讨论

隧洞之间的距离(即中间岩柱厚度)是区分各种隧道类型的基本标准, 而距离变化所最带来的相互影响的不同是最本质的原因。距离增大到一定程度, 则两隧洞之间没有相互影响, 按独立隧道设计施工, 对于小净距隧道、连拱隧道在设计施工中都要考虑相互影响的作用。本文所研究的小净距隧道是间距大于10m的小净距隧道, 双洞之间的相互影响决定着施工力学特征, 是研究的主要方面。

对于小净距隧道, 施工过程中, 先行洞施工扰动了周围岩体, 初始应力场发生变化, 恶化了后行洞施工时的围岩条件, 从而使后期开挖所带来的作用效果加剧, 应力、位移变化增大。由于相互影响的作用, 双洞小净距隧道最终所引起的位移变化大于两单洞独立作用的简单叠加; 相互影响所引起的变化主要集中在两洞室周围, 洞室外侧1D外几乎

不受影响; 中间岩柱是双洞作用的叠加区域, 在施工中反复扰动, 易产生失稳, 是设计施工中需要重点关注的部位。在施工过程中要确保中间岩柱的稳定性, 这是小间距隧道区别于分离式隧道的一个重要方面。

除了中间岩柱, 隧道埋深、开挖顺序、支护情况等都是影响双洞之间相互作用的重要因素, 设计施工中应全面考虑。当隧道线形、断面确定后, 开挖顺序的确定便成了施工的关键问题。开挖顺序的确定最终还是归结到两隧道之间相互影响的具体情况, 通过分析不同开挖顺序下围岩的位移沉降、塑性区分布、支护内力等方面进行最优选择。相关研究成果有: (1) 对于不存在偏压且处于同一水平面的隧道, 后开挖隧道对先开挖隧道有较大影响, 且影响程度随着间距的减少而增大, 而先开挖隧道对后开挖隧道的的影响基本程度保持一定^[15]; (2) 地表水平情况下, 对于同一隧道, 在低于其位置处开挖新隧道(下隧道)所产生的影响大于在高出开挖新隧道, 即低处隧道开挖产生的影响相对较大, 且随着竖向距离的减小影响增大^[16]; (3) 对于两隧道处于同一水平位置、间距为4.0m、地形偏压为25°的小净距隧道, 当先开挖深埋侧隧道时, 两隧道相对应位置处围岩塑性区程度、范围相对较大, 中间岩柱、深埋侧隧道拱顶位移都比先开挖浅埋侧隧道时大, 先开挖浅埋侧隧道优于先开挖深埋侧隧道^[17]。已有工程实践也表明, 对于两隧道水平的偏压隧道, 先开挖浅埋侧有利于施工的安全稳定。

通过已有研究可以得出, 两隧道的相互位置关系(水平距离、竖向距离)、地形地质条件(特别是偏压情况)都影响着开挖顺序的确定。本文所研究的小间距隧道处于地形偏压情况下, 竖向存在4m的距离, 有其特殊性。通过对两隧道不同开挖顺序下的位移场分析结果表明, 当两隧道之间存在竖向距离时, 在偏压情况下的开挖顺序不同于同一水平位置的偏压小间距隧道, 应先开挖左洞(上)隧道为佳。

两洞开挖顺序不同, 最终位移场的分布规律基本相同, 在量值上存在一定差异。右洞先开挖时地表沉降值相对增大5%~8%, 且右洞拱顶上方地表历史最大沉降值较左洞开挖时增大20%。右洞先开挖时, 其拱顶沉降、右拱脚位移分别比左洞先开挖情况下增大6%、19%, 洞室本身先开挖时的位移值大于后开挖情况下产生的位移值, 后开挖有利于洞室本身的稳定。对于中间岩柱, 左洞先开挖比右洞先开挖时减小中间岩柱的水平位移7%~

10%, 左洞先开挖对保持中间岩柱稳定性有着积极作用。综合以上内容可以得出, 处于低处的右洞先开挖时的影响作用较大, 这与已有结论一致。先开挖左洞可以减小地表沉降值、中间岩柱位移值及右洞洞周位移值, 仅本身洞周位移值相对增大。与已有研究成果相比, 由于两隧道之间存在竖向距离, 相互影响作用有别于处于同一水平位置的两隧道, 本文研究模型情况下, 先开挖左洞(此为深埋侧)优于先开挖右洞(浅埋侧)。竖向间距不同, 对开挖顺序的影响也将产生变化, 还有待进一步地系统研究。

开挖顺序的确定是各种因素综合作用的结果, 相互位置、荷载情况甚至围岩类别、隧道断面形状等都将对开挖影响产生不同效果, 需要综合分析和确定。需要指出的是, 已有研究都是基于连续均匀介质假定的规律性研究, 在工程中还需要结合具体围岩地质等条件综合分析各中因素影响, 合理确定开挖顺序。

6 结 论

通过三维有限元的弹塑性计算在偏压错台情况下的小间距隧道位移场特性分析, 并与部分实测数据对比验证了其结果的可靠性, 得出如下结论:

(1) 小间距隧道所引起的位移变化大于两单洞独立作用的简单叠加; 小间距隧道相互影响的作用对中间岩柱最为明显, 变化率达到30%, 对洞周变形、地表沉降影响相对较弱, 最多增大10%, 且对于各部分距离两洞越远影响越小。在小间距设计施工中, 应采取措施加强两洞之间的中间岩柱的稳定。

(2) 对于左右洞不同开挖次序, 右洞先开挖时的洞室周围地表沉降值相对增大5%~8%, 且右洞拱顶上方地表历史最大沉降值较左洞开挖时增大20%。洞室先开挖时自身的位移值大于后开挖情况下产生的位移值。

(3) 对于两洞周围的中间岩柱, 左洞先开挖比右洞先开挖时减小中间岩柱的水平位移7%~10%, 左洞先开挖对保持中间岩柱稳定性有着积极作用。

(4) 隧道的相互位置关系(水平距离、竖向距离)、地形地质条件(特别是偏压情况)都影响着开挖顺序的确定。

通过对不同开挖顺序下地表沉降、洞周位移、中间岩体位移的比较分析, 在此种偏压、错台情况下左洞先开挖时对周围岩体所产生的效果较好, 但需要加强措施保证左洞本身的稳定。实际工程中还要具体问题具体分析, 抓住主要控制因素, 从而选

择最优的开挖顺序。

致谢: 本文主要工作是笔者在同济大学地下建筑与工程系攻读博士学位时完成的, 研究全过程得到导师黄宏伟教授的悉心指导。云南罗富高速公路建设指挥部、云南省第一公路桥梁有限公司的领导及技术人员为研究提供了有力的现场项目支持, 在此对他们表示衷心的感谢。

参 考 文 献

- [1] 中华人民共和国交通部. JTGD70-2004 公路隧道设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- [2] TERZAGHI H. Linear-plate tunnels on the Chicago subway[J]. **Proceedings of the American Society of Civil Engineers**, 1942, 68(6): 862—899.
- [3] GHABOUSSI J, RANKEN R E. Interaction between two parallel tunnels[J]. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, 1977, 1(1): 75—103.
- [4] 刘艳青, 钟世航, 卢汝绥, 等. 小净距并行隧道力学状态试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(5): 590—594.
LIU Yang-qing, ZHONG Shi-hang, LU Ru-sui, et al. Experimental study on mechanical characteristics of twin tunnels with small spacing[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2000, 19(5): 590—594
- [5] 晏启祥, 何川, 姚勇, 等. 小净距隧道施工小导管注浆效果的数值模拟分析[J]. 岩土力学, 2004, (增刊): 239—242.
YAN Qi-xiang, HE Chuan, YAO Yong, et al. Numerical simulation analysis of little tremie grouting effect while construction of going into portal at small-distance tunnel[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, (Supp.): 239—242.
- [6] 王景春, 殷杰. 相邻隧道中心距的研究[J]. 石家庄铁道学院学报, 1995, 8(2): 109—113.
WANG Jing-chun, YIN Jie. A Study of proper distance between adjacent tunnels[J]. **Journal of Shijiazhuang Railway Institute**, 1995, 8(2): 109—113.
- [7] SOLIMAN E, DUDDECK H, AHENS H. Two and three dimensional analysis of closely spaced double-tube tunnels[J]. **Tunneling and Underground Space Technology**, 1993, 8(1): 13—18.
- [8] NG C W W, LEE K M, TANG D K W. Three-dimensional numerical investigations of new Austrian tunnelling method(NATM)twin tunnel interactions[J]. **Geotechnique**, 2004, 41: 523—539.

- [9] 刘伟. 小净距公路隧道净距优化研究[博士学位论文][D]. 上海: 同济大学, 2004.
- [10] 贾蓬, 张晋毅. 近距离平行隧道开挖的三维有限元数值分析[J]. 现代隧道技术, 2006, 43(1): 7—11.
JIA Peng, ZHANG Jin-yi, Three dimensional numerical analyses of the construction of two closely-spaced parallel tunnels[J]. **Modern Tunnelling Technology**, 2006, 43(1): 7—11.
- [11] 王毅才. 隧道工程[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003.
- [12] 朱维申, 张玉军, 任伟中. 系统锚杆对三峡船闸高边坡岩体加固作用的块体相似模型试验研究[J]. 岩土力学, 1996, 17(2): 1—6.
ZHU Wei-shen, ZHANG Yu-jun, REN Wei-zhong. Similar model rock tests for reinforcing effects of systematic bolts on rock mass of high slope of three gorges flight lock[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 1996, 17(2): 1—6.
- [13] BARTLETT J V, BUBBERS B L. Surface movements caused by bored tunneling[C]//Proceedings of Conference on Subway Construction, Budapest-Balatonfured. [S. l.]: [s. n.], 1970.
- [14] ADDENBROOKE T I. Numerical analysis of tunnelling in stiff clay[D]. London: University of London, 1996.
- [15] 陈先国, 高波. 地铁近距离平行隧道有限元数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(9): 1330—1334.
CHEN Xian-guo, GAO Bo. 2D FEM Numerical simulation for closely-spaced parallel tunnels in metro[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2002, 21(9): 1330—1334.
- [16] ADACHI T, KIMURA M, OSADA H. Interaction Between Multi-Tunnels Under Construction[C]// Proceedings of the Eleventh Southeast Asian Geotechnical Conference. Singapore: [s. n.], 1993.
- [17] 靳晓光, 刘伟, 郑学贵, 等. 小净距偏压公路隧道开挖顺序优化[J]. 公路交通科技, 2005, 22(8): 61—64.
JIN Xiao-guang, LIU Wei, ZHENG Xue-gui, et al. Optimization of excavating sequence for closely spaced bias double tube tunnels[J]. **Journal of Highway and Transportation Research and Development**, 2005, 22(8): 61—64.

岩土锚固·土钉·喷射混凝土——原理、设计与应用

著译者: 程良奎等 标准书号: ISBN9787-112-10406-2 开本: 16 开 页数: 706 定价: 98.00 元

出版单位: 中国建筑工业出版社 装帧: 平装 出版时间: 2008 年 12 月

【内容简介】本书系统地论述了岩土锚固的作用机理, 设计技算、防腐保护、工程材料、施工工艺、试验方法、监理测量和长期性能。特别深入阐述了各种类型锚杆和锚固的工作特性和使用条件; 不同条件下岩土锚杆的设计计算与稳定性分析; 锚杆的粘接应力分布与荷载能力传递方式等。本书全面的反映了岩土锚固技术在国内外隧道、边坡、洞室、深坑等工程的最新发展和应用实践等。

【读者对象】本书适用于水利、水电、铁路、公路、矿山、建筑、军工、桥梁等的工程设计, 也可作为监理人员阅读使用, 也可供院校师生及科研人员参考。

【目录】第 1 篇 岩土锚固: 第 1 章 岩土锚固的基本原理、力学作用与应用领域; 第 2 章 岩土锚固的新进展; 第 3 章 岩土锚杆的类型与工作特性; 第 4 章 岩土锚杆的设计; 第 5 章 锚杆内的荷载传递及锚杆的特殊荷载问题; 第 6 章 锚杆材料与施工; 第 7 章 锚杆的腐蚀与防护; 第 8 章 锚杆试验与锚固的工程长期监测; 第 9 章 岩土锚固工程的长期性能与安全评价; 第 10 章 隧道及地下洞室的锚固; 第 11 章 岩土边坡的锚固; 第 12 章 深基坑挡土结构的锚固; 第 13 章 混凝土坝的锚固; 第 14 章 抗浮结构的锚固; 第 15 章 基础与桥梁结构的锚固; 第 16 章 国内外岩土锚杆规范的现状与特点。第 2 篇 土钉支护及复合型土钉支护: 第 17 章 土钉支护的概念和发展; 第 18 章 复合土钉支护的形式和应用; 第 19 章 复合型土钉支护受力变形性状; 第 20 章 复合型土钉支护设计; 第 21 章 土钉支护稳定性验算; 第 22 章 复合型土钉支护整体稳定性计算程序的开发及工程应用; 第 23 章 按抗拔力计算土钉; 第 24 章 土钉及复合土钉支护的变形; 第 25 章 土钉及复合土钉支护施工; 第 26 章 复合型土钉支护监测; 第 27 章 工程应用实例。第 3 篇 喷射混凝土: 第 28 章 喷射混凝土技术的特点与新进展; 第 29 章 各类工程喷射混凝土结构的作用与设计; 第 30 章 喷射混凝土的原材料及其配合比; 第 31 章 喷射混凝土性能; 第 32 章 喷射混凝土施工工艺; 第 33 章 喷射钢纤维混凝土与喷射合成纤维混凝土; 第 34 章 喷射混凝土的质量控制与检验; 第 35 章 喷射混凝土的工程应用。

(信息来源: 中国建筑书店)