

文章编号:1001-831X(2002)03-191-06

渝怀铁路彭水隧道出口大跨段 施工方案的数值分析^{*}

雷升祥¹, 周晓军²

(1. 中铁十八局集团公司, 天津 300222; 2. 西南交通大学土木工程学院, 成都, 610031)

摘 要: 对渝怀铁路彭水隧道出口段大跨度隧道, 采用中壁法和下导坑超前台阶法两种不同施工方法开挖过程的二维有限元计算, 对比分析了两种开挖方式下引起的地层沉降、隧道围岩塑性区、隧道衬砌内力以及拱顶下沉的变化特点, 结果得出采用下导坑超前台阶法施工要比中壁法安全, 因此该大跨度隧道宜采用下导坑超前台阶法施工。

关键词: 大跨度隧道; 中壁法; 下导坑超前台阶法; 地层沉降; 塑性区

中图分类号: U455.4

文献标识码: B

1 引言

渝怀铁路是国家实施西部大开发战略的十大重点工程之一。由于渝怀铁路线路所经过的地区多属于山岭、沟壑地形, 沿线地形和地质条件复杂多样, 而且全线桥隧所占比重大, 给线路的设计和施工带来较大的困难。

全线共有隧道 188 座, 隧道总延长占线路总长的 38.7%。其中彭水隧道是渝怀铁路线上的第 4 长大隧道, 位于重庆市彭水县, 其进口里程为 DK238+706, 出口里程为 DK247+734, 全长 9028m, 其中出口段从里程 DK247+478 至里程 DK247+734 段设计为具有 8 个变截面的喇叭口隧道, 此处是线线路和预留线线路的交汇处。该段隧道出口紧连彭水火车站, 且车站部分结构亦设置在大跨度隧道内部。喇叭口隧道的开挖跨度为 14.38m~21.78m。出口段隧道埋深一般为 20m~40m, 最小为 20m, 属于浅埋隧道。由于隧道的最大跨度为 21.78m, 该段设计长度为 30m, 且隧道出口段所穿越的围岩属于Ⅱ级~Ⅲ级, 给隧道的安全施工带来较大的困难。

此外, 彭水隧道穿越剥蚀、溶蚀中低山区, 隧道穿越地层主要有灰岩、泥灰岩、钙质泥岩、页岩夹薄

~中层状砂岩、炭质页岩夹煤层。隧道进口岩层为灰岩、泥质页岩夹砂岩, 而隧道出口具有以下工程特点:

(1) 出口洞身段为页岩, 出口段地形平缓, 岩石为砂粘土(Q_4), 呈浅黄、黄褐色, 软塑~硬塑状, 夹少许卵砾石, 围岩属Ⅱ~Ⅲ级, 地质条件较差。

(2) 隧道出口岩层倾角为 29°, 层间摩擦角为 16°。表层风化极为严重, 岩层厚 11m, 由于洞口开挖路堑较高, 极易发生顺层滑移。该洞口在边仰坡刷坡期间, 即发生了山体开裂滑移现象。

(3) 隧道所处地区雨量充沛, 岩层中富含水, 这会加剧顺层滑移, 不利隧道进洞开挖。

鉴于上述工程地质与水文地质条件, 为确保出口段大跨度隧道的施工安全, 尽量减少隧道开挖引起的地层沉降和围岩变形, 拟采用中壁法或下导坑超前台阶法进行施工^[2,4]。但这两种施工方法各自具有不同的施工工艺要求, 且各自开挖引起的地层变形和隧道支护结构受力状态也不尽相同。如何选择合理的施工方法, 确保大跨度隧道的施工安全是该隧道修建中必须解决的关键技术。因此对这两种施工方法进行数值计算和分析, 以便选择更为安全可靠与经济合理的施工方法。

* 收稿日期: 2002-05-22

作者简介: 雷升祥, 男, 工学硕士, 高级工程师, 中铁十八集团有限公司总工程师

2 计算模型与地层物理力学参数

为了分析上述两种施工方法对隧道开挖时围岩变形及其支护结构受力状态的影响,数值计算中采用平面应变的二维有限元地层结构模型。为便于对比,在模拟大跨度隧道的开挖过程时,两种方法均采用相同尺寸、地层参数以及相同边界约束条件的有限元模型,而区别仅在于两者所采用的施工工艺和土层开挖顺序不同。

有限元计算模型的水平宽度取为隧道跨度的 4.5 倍,而垂直高度亦即从计算模型的地表至下部边界取为跨度的 3.5 倍^[1,2,4]。整个隧道与地层共同作用模型的水平宽度为 100m,高度为 82m。模拟计算采用 ANSYSV5.6 版程序。在模拟中壁法时建立的有限元模型总共划分为 2293 个有限单元,

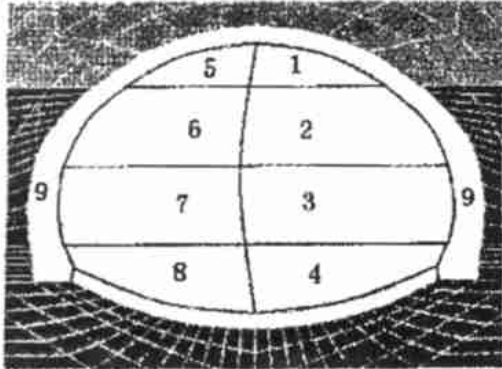


图 1 中壁法有限元计算模型

而模拟下导坑超前台阶法建立的有限元模型总共划分 2396 个有限单元。隧道主体结构 and 围岩均采用平面 8 节点等参单元,而隧道开挖过程中的临时横撑如工字钢等采用梁单元。

计算时将地层依据该地段工程地质条件划分为 4 层,从上部地层到计算下部边界依次划分为Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ和Ⅳ级围岩,其厚度分别为 25.00m、9.73m、9.45m 和 37.82m。彭水隧道出口段采用中壁法和下导坑超前台阶法施工的有限元计算模型分别如图 1 和图 2 所示。模型中各地层及隧道衬砌结构的物理力学参数见表 1。

图 1 和图 2 中的阿拉伯数字 1 至 8 代表两种施工方法设计的岩土体开挖顺序,而其中的数字 9 代表施做隧道的混凝土整体式衬砌。

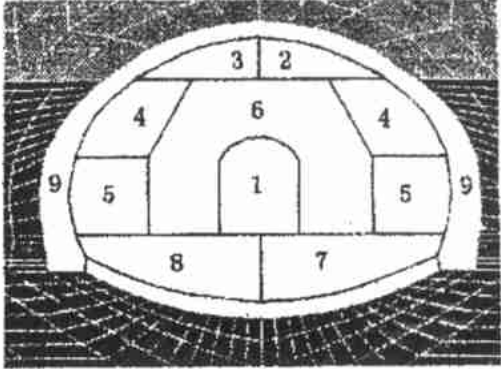


图 2 下导坑超前台阶法有限元计算模型

有限元计算的地层物理力学参数 表 1

围岩级别	弹性模量 E(MPa)	泊松比 μ	容重 (10N/m ³)	内聚力 C(kPa)	内摩擦角 (°)	厚度 m
Ⅰ级	600	0.38	1900	50	27.5	25.00
Ⅱ级	2000	0.32	2100	200	32.5	9.73
Ⅲ级	5500	0.26	2250	800	37.5	9.45
Ⅳ级	10000	0.20	2300	3000	42.5	37.82
衬砌 C20 混凝土	28000	0.20	2500	/	/	/
18 号工字钢横撑	210000	0.28	7800	/	/	/

3 计算荷载

在平面有限元计算当中,岩土体的本构方程采用 Drucker - Prager 弹塑性的非线性本构模型。根据 Drucker - Prager 模型,岩土类材料的塑性屈服准则为^[3]

$$J_1 + (J_2)^{\frac{1}{2}} = k \tag{1}$$

式中 $J_1 = \frac{1}{3}(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)$ 为第一应力不变量;
 $J_2 = \frac{1}{6}[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2]$ 为第二偏应力张量不变量,其表达式为

$$+6\left(\frac{\sigma_{xy}^2}{\sigma_x\sigma_y}+\frac{\sigma_{yz}^2}{\sigma_y\sigma_z}+\frac{\sigma_{zx}^2}{\sigma_z\sigma_x}\right)]\tag{2}$$

c —— 岩土类材料的内聚力,MPa;
φ——岩土类材料的内摩擦角。

隧道结构的计算采用隧道支护与地层共同作用的地层荷载模式,分析各个施工阶段隧道衬砌结构和围岩的受力与变形特点。根据隧道出口段的地质条件,隧道穿过的围岩为Ⅱ级,隧道采用矿山法施工。因此地层压力主要由隧道围岩和混凝土整体式衬砌共同承受。

4 计算结果

通过对彭水隧道出口段大跨度隧道采用中壁法和下导坑超前台阶法施工过程的模拟计算,得到隧道衬砌结构和围岩变形在上述两种施工方法下的变化与分布特点。有限元模拟计算的主要考察结果是每个施工工序地表的沉降和隧道拱顶的下沉量。

需要说明的是,由于两种施工方法各自具有不同的施工工艺,且隧道断面的开挖在时间和空间上划分为 9 个不同的开挖顺序,如图 1 和图 2 所示。因篇幅有限,在此未能全部示出每开挖一步所引起的地层沉降和隧道支护结构的变形特点,仅列出隧道最后开挖成型时的计算结果。

4.1 地表沉降

通过模拟计算,两种施工方法各个开挖步骤所引起的最大地表沉降值如表 2 所示。由表 2 可知,两种施工方法所引起地表最大沉降值并不是出现在开挖的最后一步,采用中壁法开挖时引起地表最大沉降出现在第 9 步中,而采用下导坑超前台阶法开挖时,地表最大沉降出现在开挖的第 4 步中。两者相比,前者引起地表最大沉降值是后者的 1.06 倍。

当隧道整体式衬砌施工完成以后,两种施工方法下的地层沉降如图 3 和图 4 所示。

地表最大沉降			表 2		
开挖步骤	地表最大沉降值(mm)		开挖步骤	地表最大沉降值(mm)	
	中壁法	下导坑超前台阶法		中壁法	下导坑超前台阶法
1	14.384	12.918	6	17.890	17.166
2	15.238	14.332	7	17.890	17.191
3	15.475	15.889	8	18.109	17.207
4	15.496	17.399	9	18.415	17.244
5	17.408	16.409	/	/	/

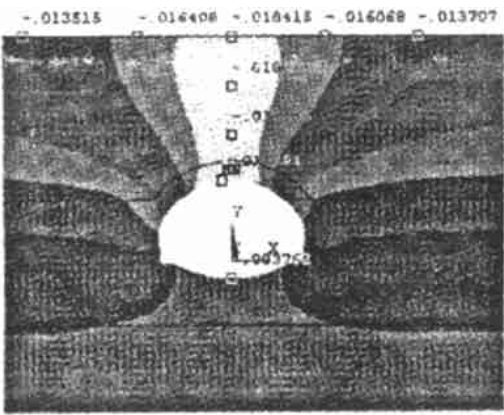


图 3 中壁法的地表沉降量(单位:mm)

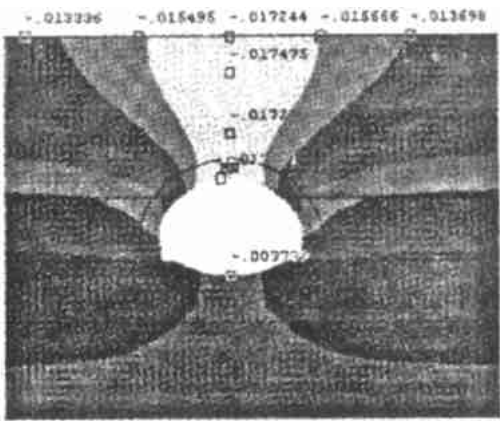


图 4 下导坑超前台阶法的地表沉降量(单位:mm)

结合表 2 以及图 3 和图 4 可知,采用中壁法开挖时引起地表最大沉降要大于采用下导坑超前台阶法开挖时产生的地表最大沉降。

两种施工方法在各个开挖步骤下所引起的隧道衬砌拱顶最大下沉量如表 3 所示。两种开挖方

法所引起隧道衬砌拱顶的最大下沉量均出现在开挖的第 9 步中,也即挖除全部土体,拆除临时横撑并浇注混凝土衬砌的步骤当中。采用中壁法时引起的隧道拱顶最大下沉量是采用下导坑超前台阶法施工产生的拱顶最大下沉量的 1.12 倍。

在浇注混凝土整体式衬砌之后,混凝土支护结 构的变形分别如图 5 和图 6 所示。

隧道拱顶最大下沉量

表 3

开挖步骤	拱顶最大沉量(mm)		开挖步骤	拱顶最大沉量(mm)	
	中壁法	下导坑超前台阶法		中壁法	下导坑超前台阶法
1	14.146	8.410	6	19.064	17.647
2	14.816	14.15	7	19.064	17.639
3	15.086	15.85	8	19.417	17.654
4	15.124	16.923	9	19.881	17.691
5	18.619	16.012	/	/	/

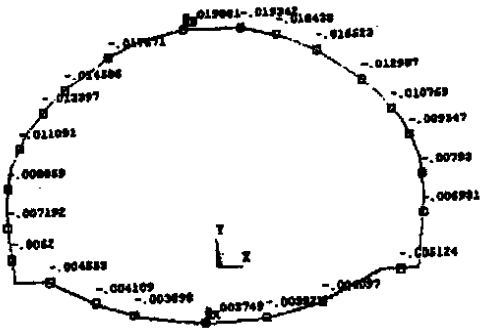


图 5 中壁法的隧道支护变形 (单位:m)

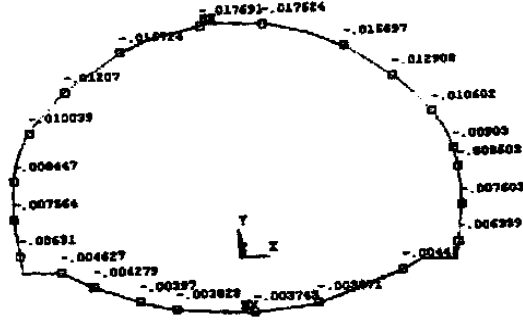


图 6 下导坑超前台阶法的隧道支护变形 (单位:m)

由上图可得,采用中壁法开挖时引起的隧道拱顶下沉量要大于采用下导坑超前台阶法开挖时引起的隧道拱顶下沉量。因此,采用下导坑超前台阶法施工可减少地层沉降和拱顶下沉。

4.2 衬砌内力

隧道衬砌的内力计算主要包括弯矩和轴向力。两种开挖方式下施做混凝土整体式衬砌后,混凝土衬砌的弯矩分别如图 7 和图 8 所示,而其轴向力分别如图 9 和图 10 所示。隧道衬砌内力的最大值见表 4。



图 7 中壁法的隧道衬砌弯矩 (单位:Nm)

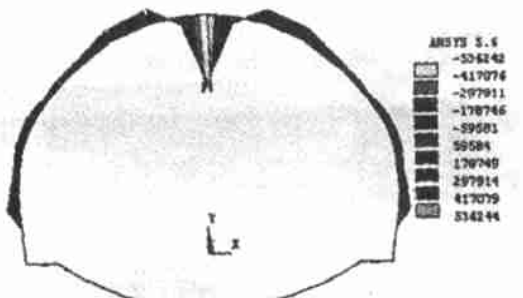


图 8 下导坑超前台阶法的隧道衬砌弯矩 (单位:Nm)

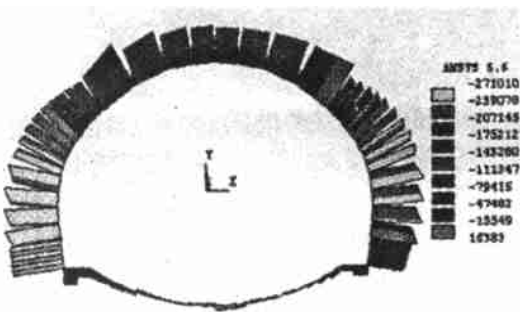


图 9 中壁法的隧道衬砌轴向力 (单位:N)

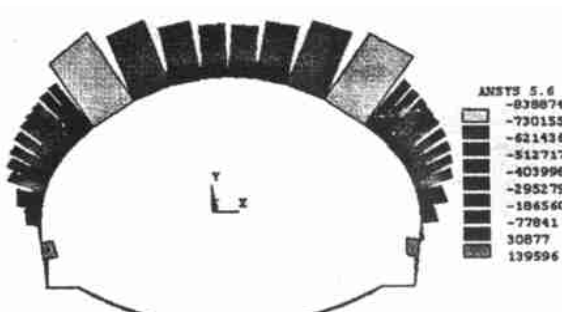


图 10 下导坑超前台阶法的隧道衬砌轴向力 (单位:N)

隧道衬砌的最大内力		表 4
开挖方法	弯矩 (kNm)	轴向力 (kN)
中壁法	- 38.253	- 271.010
	38.271	16.383
下导坑超前台阶法	- 536.242	- 838.874
	536.244	139.596

分析上述隧道衬砌的弯矩和轴向力分布图,不难看出,采用中壁法施工时,隧道衬砌所承受的弯矩和轴向力较小,而采用下导坑超前台阶法时隧道衬砌所承受的弯矩和轴向力较大。结合两种开挖方式下隧道衬砌的受力特点,分析其内力的分布状况可以认为大跨度隧道衬砌的内力特点为拱腰和拱顶的弯矩和轴向力较大,而仰拱所承受的弯矩和轴向力均比较小。根据对该大跨度隧道有限元数值模拟计算的结果,综合分析隧道开挖时两种施工方法所引起的地面和地层沉降大小,可以认为,若隧道衬砌所承受的内力较小,则地层沉降较大,而隧道衬砌所承受的内力大,则地层沉降较小。

4.3 围岩塑性区

由数值模拟计算,采用两种施工方法时隧道围岩形成的塑性区分别如图 11、图 12 所示。

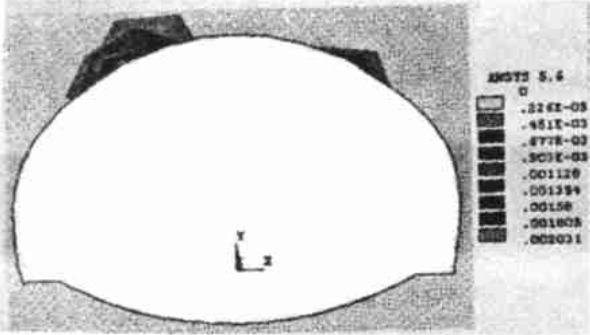


图 11 中壁法的隧道围岩塑性区

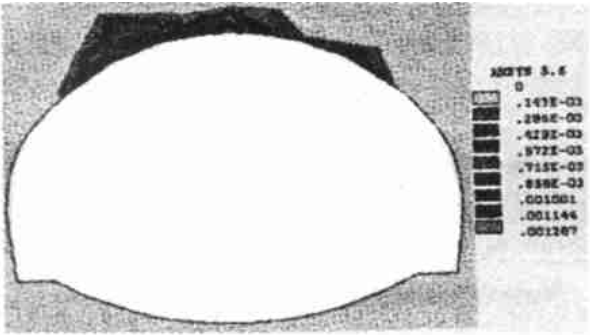


图 12 下导坑超前台阶法的隧道围岩塑性区

根据图 11 和图 12 分析,大跨隧道开挖后,在隧道左右拱腰两侧的岩土层中均出现塑性区。采用中壁法开挖时,隧道围岩塑性区主要分布在隧道

左侧拱腰范围的岩土层内,其沿径向深度约为 2.67m,切向宽度约为 6.3m。采用下导坑超前台阶法开挖时,隧道围岩塑性区在衬砌拱顶范围内岩层中亦出现。其沿径向深度约为 2.8m,切向宽度约为 10.3m。虽然塑性区的范围要比采用中壁法开挖时引起的围岩塑性区范围大,但其发生的塑性位移较小。下导坑超前台阶法施工所引起的围岩最大塑性位移为 1.287mm,而中壁法的围岩最大塑性位移为 2.031mm。两者相比前者是后者的 63.37%。因此,采用中壁法开挖时,隧道围岩塑性区的变形量要比采用下导坑超前台阶法开挖时引起的大。因此采用下导坑超前台阶法开挖时可减少围岩塑性变形,对隧道安全施工较为有利。

5 结论

通过对渝怀铁路彭水隧道出口段大跨度隧道拟采用的中壁法和下导坑超前台阶法两种施工方案的数值计算与对比,得出如下一些结论。

(1) 就隧道开挖引起的地层沉降而言,采用下导坑超前台阶法开挖时引起的地层沉降要小于采用中壁法开挖时引起的地层沉降,而且采用前者施工时所引起地表下沉量以及隧道衬砌的拱顶下沉也要小于采用后者开挖所产生的下沉。相比而言,前者引起的隧道拱顶下沉为后者拱顶下沉量的 88.9%。因此,采用下导坑超前台阶法开挖要比采用中壁法开挖引起的地层沉降小,在出口段大跨度隧道施工时宜优先采用下导坑超前台阶法。

(2) 从隧道围岩塑性区的分布范围分析,采用两种方法开挖时均在隧道左右两侧拱腰岩层中出现塑性区。但采用中壁法开挖时,隧道发生的围岩塑性位移较大,而环形导坑法开挖时发生的围岩塑性区变形量较小,因此下导坑超前台阶法施工有利于减少隧道围岩发生的塑性变形。

(3) 从两种施工方法的施工工艺和隧道断面各部位岩土体的开挖步骤来分析,虽然下导坑超前台阶法的施工工序和采用中壁法施工时的工序相当,但前者在开挖过程中引起的地层沉降和变形以及围岩塑性区的变形要小于后者,因此在减小地层沉降和围岩塑性变形这一点上,下导坑超前台阶法具有优势。从确保隧道施工安全的角度而言,采用下导坑超前台阶法施工要比采用中壁法施工更能维持隧道围岩的稳定,因此在该段大跨隧道施工时宜采用下导坑超前台阶法。

(4) 采用下导坑超前台阶法施工可减少炸药

与临时横撑的用量,与采用中壁法相比,前者可节省施工成本,降低工程造价,因此比较经济合理。

通过对彭水隧道出口段大跨度隧道采用两种不同施工方法开挖过程的有限元数值分析,从隧道开挖引起的地层沉降、围岩塑性区以及衬砌拱顶下

沉三个方面的计算结果均表明:采用下导坑超前台阶法要比中壁法安全经济,因此建议在开挖大跨度隧道时优先采用下导坑超前台阶法施工,以确保隧道施工的安全。

参考文献:

- [1] 周晓军,高波. 广州地铁广纺联区段设计方案的数值分析[J]. 西部探矿工程,2000,12(1),66-68.
- [2] Zhou Xiaojun, Gao Bo. Three - dimensional finite element analysis on construction process of large span tunnel of Guangzhou Metro [A]. Tunnels and Underground Structures, A. A. Balkema/ Rotterdam [C]. Brookfield, 2000. Singapore, 335 - 342
- [3] 潘昌实. 隧道力学数值方法[M]. 北京:中国铁道出版社,1995
- [4] 铁道部隧道工程局. 隧道与地下工程施工技术安全管理和操作控制要点[M]. 北京:中国铁道出版社,1993.

《地下空间》征订启事

本刊是地下空间开发利用的综合性科技刊物;旨在通过国内外地下空间开发利用新成果的交流,并兼论与之相关的地下工程与基础工程的科技问题,以促进我国地下空间的合理开发利用。

本刊为公开发行刊物。国内统一刊号 CN50-1084/TU,国际标准刊号 ISSN1001-831X,国际刊名代码 CODEN DIKOEI。自1981年创刊以来,承各方面支持,办刊质量逐步提高,本刊已连续13年入选为国家科技部中国科技信息中心的科技论文核心统计源刊,并作为《中国学术期刊综合评价数据库》和《中国科学引文数据库》统计源期刊。论文的平均被引率位居全国前列。本刊具有内容广泛、深入浅出、理论与实践相结合,学术论文与讨论报导共存的特点。可给广大从事城市规划、建筑、人防、地铁、隧道及地下工程、环境保护和大专院校等有关专业人员在规划、设计、研究、教学、施工、管理等方面提供有价值的信息。

本刊为季刊,大16开本,全国非邮发联合征订和编辑部自办发行,全年订费50元(含邮寄费),欢迎订阅。欲订者请向本刊编辑部函索订单。

联系人:重庆市:重庆大学B区《地下空间》编辑部 陈 林

邮政编码:400045

电 话:023-65120728

《地下空间》编辑部 2002.9

《地下空间》征稿启事

1. 征文范围:

国内外地下空间开发利用的新构想、新成果;地下工程和相关岩土工程勘察、规划、设计、施工、监测和管理方面研究论文或工程实例;国外近二年内发表的有关上述方面文章的译文。

2. 来稿约定和注意事项:

(1) 来稿应是作者尚未公开发表的文章,勿一稿多投。文稿应注意到论点明确,文字简炼,公式正确、数据可靠。字数不超过7000字。正文中物理量和计量单位应符合国家现行标准。

(2) 文稿题名不超过20个字;论文摘要约150个字(写明研究目的、方法、结果);关键词3~5个;参考文献采用顺序编码(按文中出现先后顺序编号)。文稿首页下方附第一作者简介(包括:姓名、出生年、性别、民族、籍贯、学历、职称、主要工作或研究方向)。若来稿有基金资助背景,请写明何种基金及基金编号,列在第一作者简介下方。

(3) 来稿尽可能用计算机打印在A4纸上(最好同时提供软盘),文中图、表应随文出现,插图线条清晰、注字清楚(能制版印刷),表格采用“三线表”格式。

(4) 编辑部收到来稿后,将请同行专家审读,由编辑部集体决定是否录用。若半年内未收到本刊录用通知,作者可另投他刊,恕不退回原稿。文稿一经采用酌寄稿酬。

(5) 来稿文责自负,勿涉及国家机密。

(6) 为适应我国信息化建设需要,扩大学术交流渠道,本刊已加入《中国学术期刊(光盘版)》及“中国期刊网”和“万方数据期刊网”。作者的著作权使用费将与本刊稿酬一次性支付。

《地下空间》编辑部 2002.9

UNDERGROUND SPACE

Vol. 22 , No. 3

(Serial No. 91) Quarterly

September 2002

CONTENTS & ABSTRACTS

Numerical Analysis of the Construction Scheme for Large - span Exit Section of the Pengshui Tunnel in Chongqing - Huaihua Railway LEI Sheng-xiang et al. (191)

[**Abstract**] Two-dimensional finite element computation is performed to simulate the driving process of large span exit section of Pengshui Tunnel in Yuhai Railway by means of Center Diaphragms (CD) and Bottom Drift with Upper Annular Benching (BDUAB) method. The comparison of varying features of ground subsidence , plastic zone in surrounding soil and roof settlement of tunnel lining induced by construction of the large span exit between the two tunneling methods has been carried out. The obtained results show that the adoption of BDUAB method is much more safe and rational than the CD method to excavate the exit section of Pengshui tunnel. Therefore , the BDUAB method is highly recommended to excavate the exit section of the tunnel.

[**Key words**] large span tunnel ; center diaphragm method ; bottom drift with upper annular benching method ; ground subsidence ; plastic zone

Summary of Calculative Methods for Underground Construction JIANG Wei et el. (197)

[**Abstract**] This paper introduces the present method of numerical analysis and design model for structure calculation in underground construction. Then , these calculative methods were evaluated.

[**Key words**] underground engineering ; design model ; numerical analysis

Urban Underground Space and the Planning for Its Development and Utilization MA Jin-yue (200)

[**Abstract**] From the vexation appeared in development of ground space during modernization of the city , it is pointed out that the urban underground space is a large resource for urban development. The advantages of urban underground space as a resource were demonstrated. It is proved that for the modernization of the city a perfect planning for development and utilization of urban underground space is necessary. Some problems deserving notice during planning for development and utilization of urban underground space were pointed out.

[**Key words**] urban underground space ; development and utilization ; planning

Interaction of Transference Space of Subway Terminal with the Development of Real Estate along the Subway WU Jun-yu et al. (205)

[**Abstract**] In recent years , with the growing care about the resource of the underground space , a kind of its effective application has become the subway , which plays an important role to increase the efficiency of the land utilization , to alleviate the ground transportation , to improve the mankind residential environment , to realize the separation of people from the vehicles , to reduce the pollution of the environment and preserve the historic cultural landscape. At the same time , with the expansion of city center , the transportation in metropolis strides forward to the public high-speed track transportation. From the aspect of the urban design , this paper discusses the highly effective space utilization concerning the line transference and joining in the underground terminal , and how to give play to the superiority of the estate along the subway and use various funds for subway construction in order to realize the balance between the subway construction and the land exploitation along the subway and promote the development of the urban space and the commerce.

[**Key words**] underground terminal ; transference ; joining ; estate along the subway

Combination of Urban Traffic Tunnel with Urban Roads- Introduction to Wenzhou Huagai Dual Tunnel CHEN Hong-cai (209)

[**Abstract**] In urban construction there may be barrier formed by the mountain encountered , separating the roads or commercial zones and excavation of tunnel is needed for their connection. Except for meeting the traffic needs , the urban tunnel should be in coordination with the