

文章编号: 1000-7598-(2007)02-0247-06

公路长隧道与横通道空间斜交结构施工力学研究

张志强^{1,2}, 许江², 万晓燕³

(1. 西南交通大学 土木工程学院, 成都 610031; 2. 重庆大学 西南资源开发及环境灾害控制工程教育部重点实验室, 重庆 400044;
3. 中铁西南科学研究院, 成都 610031)

摘 要: 针对高速公路主隧道与车行横通道组成空间交叉结构, 采用现场实测以及三维有限元数值模拟研究手段, 进行了结构施工力学研究。结果表明, 因横通道施工导致主隧道与横通道交叉部结构, 特别是与横通道连接一侧结构处于十分不利的受力状况和变形特征, 因此需要采取加固措施, 以确保主隧道与横通道交叉部结构的安全。与无横通道情况相比, 由于拱形支撑作用被切断, 结构受力已不再是单一轴向受力, 而产生了部分弯曲受力的复杂受力状况。归纳来看, 交叉角越小, 围岩应力集中程度越高, 从设计角度考虑, 交叉角应尽量大一些。研究结论对长大公路隧道设计、施工横通道, 有一定参考价值。

关 键 词: 长大隧道; 横通道施工; 交叉角; 拱形支撑; 应力集中

中图分类号: TU 454

文献标识码: A

Study on tunnel construction mechanics at intersection of horizontal adit and major tunnel in highway

ZHANG Zhi-qiang^{1,2}, XU Jiang², WAN Xiao-yan³

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031 China;

2. Educational Ministry Key Laboratory of Southwest Resources Development and Environmental Disaster Control Engineering, Chongqing University Chongqing 400044, China; 3. Southwest Research Institute of China Railway Engineering, Chengdu 610031, China)

Abstract: The mechanical behaviour of intersection of horizontal adit and main tunnel in Wanxian to Liangping expressway in Southwest China is studied by using 3D finite element numerical simulation method and in-situ test. Due to adit construction, the research demonstrates the disadvantageous distribution of deformation and internal forces in intersection of adit and main tunnel, particularly in its side-wall connected to the adit. Comparing with the case of no adit, because of arch tunnel set being broken; the intersection structure is subjected to combination of complicated stresses including transverse stress, but not the axial stress. Therefore, it is necessary to take some reasonable reinforcement measures to guarantee safety of the intersection of adit and main tunnel. Furthermore, the intersection angle is more small, the stress concentration of intersection is more high. For example, while intersection angle is 60 degree, the maximum coefficient of stress concentration is up to 1.95; but while intersection angle is 90 degree, the maximum coefficient of stress concentration is about 1.5. The results are helpful for designing and construction of intersection of main tunnel and adit in major highway tunnel.

Key words: major tunnel; adit construction; intersection angle; arch tunnel set; stress concentration

1 前 言

在山区修建公路隧道时, 由于受交通安全的要求和地形条件的限制, 往往需要在隧道中间一定长度位置设置与紧急停车带相连接的横通道, 以防范交通事故发生时引离故障车辆于干道, 避免隧道火灾带来的损失, 使车辆在发生火灾时能迅速撤离隧道, 确保公路交通安全与畅通。对于长大隧道, 设

置车行横通道或人行横通道是十分重要的必不可少的附属设施^[1-3]。

为了确保万梁高速公路马王槽一号隧道(左洞长 1 206 m, 右洞长 1 266 m)运营期间的安全与畅通, 在隧道内分别设置 2 个紧急停车带, 分别与车行横通道和人行横通道相交。在紧急停车带处隧道形成扩大断面, 其中与车行横通道交叉部开挖面积较大, 最大开挖宽度达到 14.44 m, 如图 1 所示。

车行横通道自身的开挖宽度达到 6.7 m, 且与隧道交叉高度为 6.44 m, 交叉角度为 60° [4]。

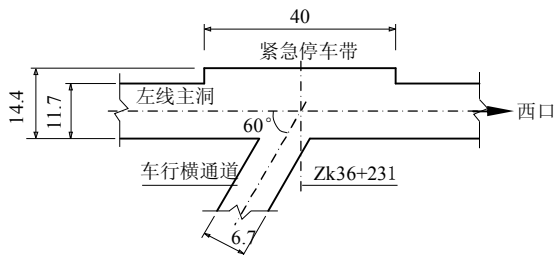


图 1 主隧道与车行横通道交叉 (单位: m)

Fig.1 Intersection of adit and main tunnel (unit: m)

从图 1 可以看出, 由于主隧道与横通道空间斜交, 交叉部结构的受力十分复杂, 施工难度显著增大。随着我国公路建设的快速发展, 公路隧道正在向长大、深埋方向发展, 沿长大公路隧道修建紧急停车带与横通道交叉结构情况越来越多, 掌握交叉部结构施工技术显得很重要[5]。本文以马王槽一号隧道交叉结构为依托工程, 从现场实测及三维数值模拟两方面入手, 对公路隧道与车行横通道空间斜交结构稳定性进行了分析研究。

2 施工方案研究及现场量测

2.1 施工方案研究

横通道开挖均是在本线主隧道贯通基础上沿横向进行的交叉隧道施工, 具体分为两种情况: 一是在主隧道二次衬砌完成后施工横通道; 二是主隧道进行初期支护时即进行交叉部施工, 然后再衬砌。比较来看, 第一种情况, 随着横通道开挖主隧道“刚性”衬砌将要承受主隧道变形, 因开挖、变形引起的应力场分布产生的附加荷载。第二种情况对吸收变形有利, 在隧道所在地段围岩条件“好的”情况下采用, 对隧道衬砌结构的合理受力非常有利。

根据现场勘察和地质报告, 马王槽一号隧道紧急停车带与横通道交叉处工程地质状况较好, 主要由Ⅲ级围岩组成, 在现场施工时采用了主隧道进行初期支护, 即进行交叉部施工的第二种施工方案。由于按未紧跟二次衬砌考虑, 仅由初期支护来承担变形及受力荷载, 在此条件下初期支护的受力是最为不利的, 但却能较好地吸收变形, 并确保二次衬砌具有由较高的安全储备。

2.2 围岩压力和衬砌结构受力现场量测

马王槽一号隧道左洞围岩压力和衬砌结构受力

量测项目包括围岩压力、二次衬砌混凝土应变和钢筋应力。量测断面设置在紧急停车带和车行横通道交叉口附近, 共埋设 3 个量测断面, 分别位于 Zk36+226、Zk36+231、Zk36+236, 其中 Zk36+226、Zk36+236 两个断面位于在交叉口两侧的主洞上(距交叉口边缘约 2.5 m), Zk36+231 断面位于在车行横通道与隧道交叉的轮廓线上, 见图 2。

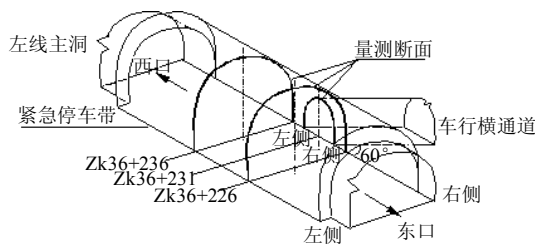


图 2 交叉地段量测断面布置图

Fig.2 Layout of measured sections

现场量测中, 压力盒、混凝土应变计和钢筋计埋设位置分别位于拱顶及两侧拱腰、拱脚及两侧边墙的中部等 7 个部位上, 其中混凝土应变计环向埋入二次衬砌混凝土的内缘一侧, 钢筋计布置在衬砌外缘环向受力钢筋上。测点布置如图 3、图 4 所示。

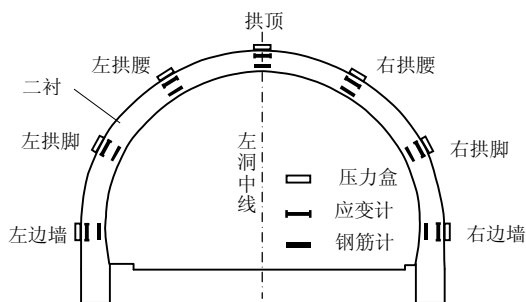


图 3 主隧道测点布置

Fig.3 Measured positions in main tunnel section

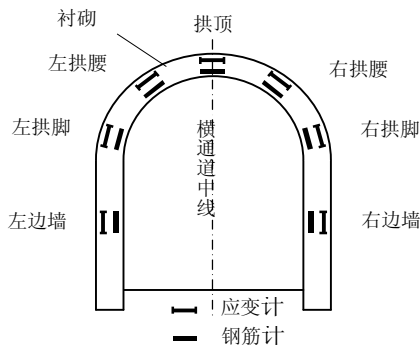


图 4 车行横通道衬砌受力测点布置

Fig.4 Measured positions in adit section

3 施工模拟

3.1 基本考虑

3.1.1 地应力场模拟

根据工程地质勘察报告,主隧道与横通道交叉处最大埋深约为 240 m,该段围岩为石英砂岩夹煤层,地下水较丰富,推测隧道区构造应力残存较小,因此地应力场按自重应力场进行模拟。

3.1.2 计算模型

从施工模拟的重点考虑,选取马王槽左洞主隧道与 1/2 横通道尺寸范围,建立三维有限元数值模型。为了保证计算结果的合理,在选取计算范围时,除了按隧道力学理论,即取洞室开挖直径 5 倍范围外,还选取上覆 100 m 围岩作为隧道上部计算范围,进行有限元离散,整体模型如图 5 所示。

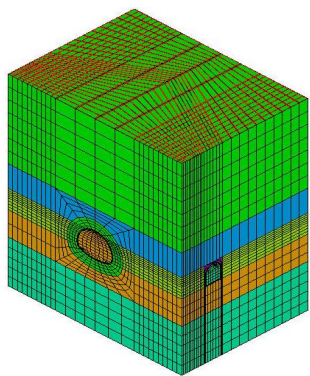


图5 整体建模

Fig.5 Fem modeling analysis

对于主隧道及横通道喷混凝土初期支护,选用等参 8 结点空间壳单元模拟,如图 6 所示。围岩采用等参 20 结点三维实体单元模拟。采用 Drucker-Prager 屈服准则,进行有限元^[6]非线性分析。

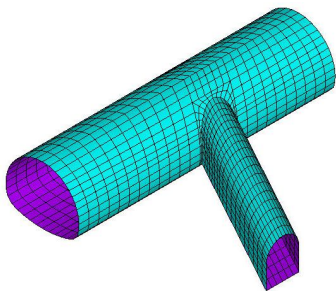


图6 主洞与车行横通道(交角为 60°)衬砌支护网格

Fig.6 Mesh of supporting intersection

3.2 计算参数

3.2.1 围岩计算参数

依据马王槽隧道工程地质勘察报告,交叉部隧

道为Ⅲ级围岩,对照现行国内隧道围岩分类相关技术规范 and 标准,选取计算物理力学指标见表 1。

表1 围岩物性指标参数

Table 1 Mechanical parameters of ground

取值方法	指 标				
	E/GPa	$\gamma/\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$	ν	c/MPa	$\varphi/(\text{°})$
实际计算	3.0	25	0.26	0.6	35.0
喷锚构筑法	3~10	23~25	0.23~0.29	0.4~1.7	35~40
公路隧规值	5~25	23~25	0.15~0.30	55°	~66°

注:公路隧规值 φ 角为计算摩擦角。

3.2.2 支护结构参数

交叉部隧道支护,采用Ⅲ级围岩复合式衬砌。其中初期支护采用 C20 喷射混凝土,厚度为 100 mm,设钢筋网,打设长 2.5 m、直径为 $\phi 22$ mm 砂浆锚杆,间距为 150 cm $\times$ 130 cm。二次衬砌为 C25 模筑混凝土,厚 350 mm,在隧道初期支护完成后施作。对系统锚杆支护,按整体锚杆加固圈方式考虑,通过提高锚固范围内围岩参数(提高 10%材料参数),实现对系统锚杆支护的模拟。

4 三维计算结果分析^[7]

4.1 交叉部围岩应力集中效应分析

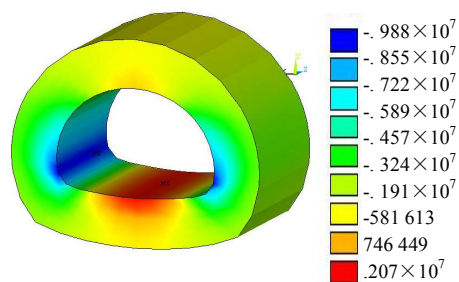
修筑紧急停车带车行横通道,不仅破坏了主隧道原有的成拱效应荷载分布,同时导致交叉部围岩应力集中效应。显然,交叉部围岩应力集中程度,与横通道开挖断面大小及横通道与主隧道交角密切相关,通过比较交叉部范围内围岩最大主应力与交叉部外未受影响主应力结果的变化情况见表 2,其相关应力分布参见图 7。归纳来看,可得到如下认识:

- (1) 交叉部围岩应力局部增大。从施工安全考虑,在横通道施工前,对其拱部范围采用超前锚杆及压注砂浆等预加固支护措施是十分必要的。
- (2) 交叉部围岩应力的集中程度。与一般部位相比,大致上是交叉角为 60° 时为 2.0 倍,90° 时为 1.5 倍^[7],归纳来看,交叉角越小,倍数越大,故交叉角应尽量接近直角。

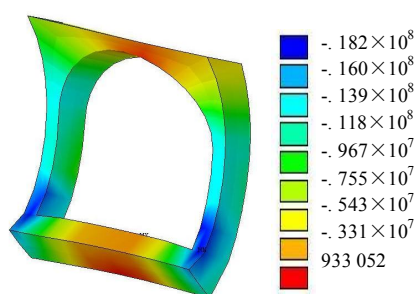
表2 车行横通道交叉部围岩应力集中效应分析

Table 2 Analysis of rock stress concentration of intersection

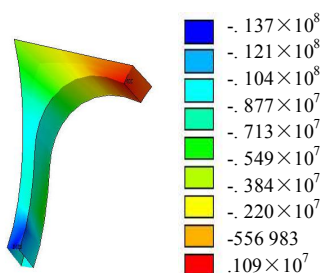
横通道施工进程	围岩最大压应力	应力集中情况	
		锐角一侧	钝角一侧
毛洞开挖	交叉部范围最大值 $\sigma_{\max}/\text{MPa}$	-18.20	-13.70
	交叉部外(未受影响)稳定值 σ_u/MPa	-9.88	-9.88
	应力集中系数 $(\sigma_{\max}/\sigma_u)$	1.84	1.39
初期支护	交叉部范围最大值 $\sigma_{\max}/\text{MPa}$	-19.4	-14.5
	交叉部外(未受影响)稳定值 σ_u/MPa	-9.95	-9.95
	应力集中 $(\sigma_{\max}/\sigma_u)$	1.95	1.46



(a) 远离交叉部（一般部位）围岩压应力



(b) 交叉部附近围岩压应力



(c) 交叉部钝角一侧围岩压应力

图 7 因车行横通道施工引起的交叉部围岩压应力变化
(单位: Pa)

Fig.7 Compression stress changes due to adit construction
(unit: Pa)

(3) 围岩应力增大的范围, 以主隧道洞跨 D 计, 大体上是: 交叉部锐角一侧 60° 时为 2 倍洞跨 D , 钝角一侧 60° 时为 1.58 倍洞跨 D 。

4.2 交叉部围岩拉应力分析

如图 8 所示, 横通道开挖前后主隧道与横通道交叉部围岩拉应力区分布范围变化, 得到认识:

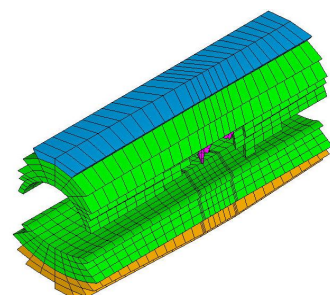
(1) 完成主隧道施工后主隧道拱顶与底板均出现了拉应力区, 主隧道拱顶最大深度为 4.06 m, 底板最大深度为 4.13 m, 见图 8(a)。

(2) 因横通道开挖主要引起了交叉部环绕横通道围岩体拉应力区巨大变化, 其中交叉部上方拉应力区深度为 3.78 m。开口锐角一侧拉应力区深度为 1.06 m, 而在开口钝角一侧拉应力区深度为 3.01 m,

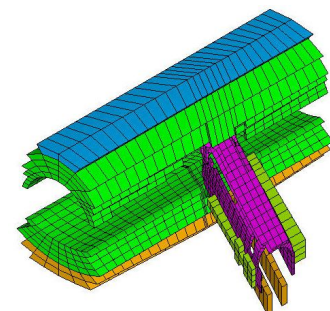
在横通道拱顶拉应力区增加 2.6 m, 见图 8(b)。

(3) 完成横通道初期支护后主隧道拱顶与底板拉应力区基本保持不变, 如图 8(c)所示, 但横通道周边围岩拉应力区范围却继续增加, 其中交叉部上方局部拉应力区深度增长 6.23 m, 开口锐角一侧拉应力区深度增长 1.78 m, 而在开口钝角一侧拉应力区则增长超过了 3.01 m 深度, 横通道拱顶拉应力区则增长超过了 2.6 m 深度。

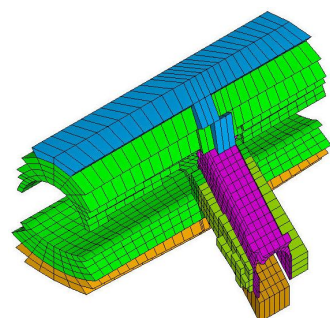
总体上看, 车行横通道以 60° 交角与主隧道斜交, 出现了较大的拉应力区分布范围, 特别是在开口钝角一侧, 这是值得关注的。



(a) 完成主隧道施工后围岩受拉区分布



(b) 横通道毛洞开挖后受拉区分布



(c) 完成横通道初期支护后受拉区分布

图 8 横通道开挖前后交叉部围岩拉应力区分布范围变化
Fig.8 The tensioned zones changes of surrounding rock mass of intersection caused by the adit construction

4.3 交叉部衬砌结构内力分析

交叉部衬砌, 由于拱形支撑作用被切断, 故不再起拱的作用, 而是板或壳的作用。因横通道施工, 衬砌刚度降低, 由主隧道衬砌与横通道衬砌组成了

受力十分复杂的空间交叉结构, 因此衬砌结构受力已不再是单一轴向受力, 而产生了部分弯曲受力的复杂受力状况, 见表 3。

表 3 车行横通道施工前后, 交叉部结构内力分析
Table 3 Analysis of internal forces of temporary support of intersection caused by the adit construction

位置	施工过程及内力变化特征	内力变化			
		横向		纵向	
		最大横向弯矩 /kN·m	相应轴力 /kN	最大纵向弯矩 /kN·m	相应轴力 /kN
拱顶	完成主隧道	1.83	-5 394.20	-2.85	-605.11
	开挖横通道	3.57	104.97	10.19	-2 085.50
	横通道初支	4.59	116.16	11.74	-2 144.05
	内力变化特征/倍	2.51	整体截面受拉	-4.16	3.54
	由横、纵向正弯矩(内拉外压)及横截面整体受拉力组成拱顶最不利受力情况。				
锐角一侧	完成主隧道	-1.10	-7 737.75	-10.30	-2 837.43
	开挖横通道	-16.02	-13 467.38	-45.11	-4 694.98
	横通道初支	-16.99	-15 700.10	-57.35	-5 389.03
	内力变化特征/倍	1.68	2.03	5.73	1.90
	由横、纵向负弯矩(内压外拉)及相应轴力组成偏心受压边墙最不利受力情况(发生在钝角一侧而不是锐角一侧)。				
钝角一侧	完成主隧道	-23.84	-5 212.63	-51.27	-1 508.60
	开挖横通道	-92.74	-26 814.25	-139.46	-3 414.65
	横通道初支	-99.46	-28 757.25	-150.66	-3 997.05
	内力变化特征/倍	4.18	5.53	2.94	2.65
	由横、纵向负弯矩(内压外拉)及相应轴力组成偏心受压边墙最不利受力情况(发生在钝角一侧而不是锐角一侧)。				

5 现场量测交叉段衬砌受力结果

根据现场实测结果(图 9、图 10), 可将交叉口处衬砌环向应力特征归纳为以下几点:

(1) 外缘应力明显大于内缘。量测显示, 交叉口处衬砌外缘环向钢筋应力量级一般达到 100 MPa, 而内缘实测混凝土应力一般只有 10^{-2} MPa 量级, 其换算钢筋应力最大也仅 10^{-1} MPa 量级, 该处截面应力的中性轴将明显靠内缘一侧, 截面主要受弯和大偏心拉压应力作用。同时, 外缘应力拉压变化也十分明显。

(2) 交叉口处衬砌应力量测值在排除混凝土浇筑影响后环向最大衬砌应力仅为 5 MPa 水平, 其中最大压应力为 -5.438 MPa, 最大拉应力为 2.973 MPa, 均为外缘钢筋应力, 而内缘混凝土最大拉、压应力仅 0.038 MPa 和 -0.065 MPa (换算钢筋应力分别为 0.271 MPa 和 -0.463 MPa)。衬砌建成半年后, 内缘混凝土应力平均仅每月增长 0.007 MPa (换算钢筋应力每月增长 0.047 MPa), 外缘钢筋应力平均每月为 0.237 MPa, 均主要向受拉方向增长。

(3) 总的来看, 交叉口处衬砌在环向应力上不论是应力量值, 还是增长程度均很小, 衬砌混凝土和钢筋应力均远小于各自材料的强度标准, 表明在主隧道进行初期支护时, 即进行交叉部施工再施作二次衬砌方案, 虽然使得初期支护的受力较为不利, 但对于交叉衬砌结构而言, 具有较高的强度安全储备。

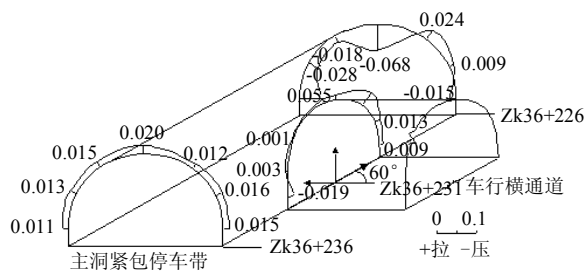


图 9 交叉口处衬砌内缘混凝土应力量测值分布(单位: MPa)
Fig.9 Stress distributions of internal measured positions of intersection lining in terms of in situ-stress measurement(unit: MPa)

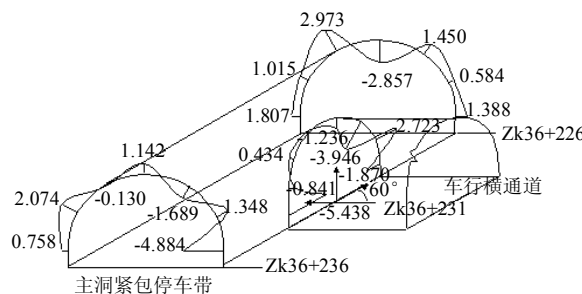


图 10 交叉口处衬砌外缘混凝土应力量测值分布(单位: MPa)
Fig.10 Stress distributions of external measured positions of intersection lining in terms of in situ-stress measurement(unit: MPa)

6 结 论

(1) 交叉部围岩应力集中, 与主隧道和横通道交角有密切关系, 交叉角越小, 围岩应力集中越高。

(2) 在主隧道与车行横通道交角为 60° 情况下围岩应力增大的范围, 在交叉部锐角一侧, 为 2 倍洞跨 D , 而在钝角一侧, 为 1.58 倍洞跨 D 。

(3) 交叉部衬砌, 由于拱形支撑作用被切断, 故不再起拱的作用。结构受力已不再是单一轴向受力, 而产生了部分弯曲受力的复杂受力状况。

(4) 对与主隧道斜交车行横通道进行施工, 在开口钝角一侧拉应力区范围显著增大。根据主隧道邻近交叉部一侧拱腰最大拉应力区深度情况, 建议打设长锚杆予以加固。

(5) 通过现场实测, 得到横通道交叉口处截面

主要受弯和大偏心拉压应力作用, 且衬砌外缘应力明显大于内缘应力的交叉口处衬砌环向应力特征。

参 考 文 献

- [1] JTG D70—2004, 公路隧道设计规范[S].
- [2] 陈中. 公路隧道行车横洞与正洞交叉连接部的设计简介[J]. 科学技术通讯, 2000, (1): 1—4.
CHEN Zhong. Introduction of intersection design of adit and highway tunnel[J]. **Journal of Science & Technology Communication**, 2000, (1): 1—4.
- [3] 铁道部第二勘测设计院(译). 日本道路公团设计要领[M]. 成都: 铁道部第二勘测设计院, 1990.
- [4] 铁道部第二勘测设计院. 万县至梁平高速公路隧道设计施工图[Z]. 成都: 铁道部第二勘测设计院, 1999.
- [5] 马栋, 黄立新. 铁路长大隧道斜井与正洞交叉软弱层围岩开挖支护施工方法浅析[J]. 世界隧道, 1999, (3): 23—27.
MA Dong, HUANG Li-xin. Analysis of tunneling construction method at intersection of inclined adit and railway tunnel[J]. **Journal of World Tunnel**, 1999, (3): 23—27.
- [6] 王国强. 实用工程数值技术及其在 ANSYS 上的实践[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1999.
- [7] 张志强, 万晓燕, 马王槽一号隧道与联络横通道空间交叉结构稳定性分析报告[R]. 成都: 西南交通大学, 2003.

《岩土力学》2006 年第 10 期 (总 127) EI 收录论文 (44 篇, 收录率 100 %)

No.	论文题名	作 者	页 码
1	考虑三向应力效应的最大 Mises 应力复合断裂判据	栾茂田, 杨新辉, 杨 庆, 等	1647—1652
2	深覆盖层上面板堆石坝的圆弧型防渗墙	郇能惠, 孙大伟, 米占宽	1653—1657
3	矩形运动荷载作用下软土地基的三维振动研究	刘干斌, 汪鹏程, 姚海林, 等	1658—1662
4	地下洞室群对地面运动影响问题的级数解答: SH 波入射	梁建文, 李艳恒, Vincent W Lee	1663—1667, 1672
5	湿陷性黄土结构性变形特性分析	邵生俊, 龙吉勇, 杨 生, 等	1668—1672
6	考虑有机物降解的变形试验和计算方法研究	施建勇, 雷国辉, 艾英钵, 等	1673—1677
7	碎石桩复合地基性状的弹塑性分析	刘 杰, 赵明华	1678—1684
8	复合地基沉降计算的半解析元法	刘丽萍, 黄 义, 李向阳, 等	1685—1688
9	随机介质热弹性平面轴对称问题的解析解	康 健, 赵阳升, 赵峥嵘, 等	1689—1692
10	基于离散元的强度折减法分析岩质边坡稳定性	雷远见, 王水林	1693—1698
11	膨胀土弹塑性本构关系数值建模方法研究	任青阳, 朱以文, 王靖涛, 等	1699—1702
12	岩石变形破坏过程中渗透率演化规律的试验研究	王环玲, 徐卫亚, 杨圣奇	1703—1708
13	单孔复合型锚索单元锚固段受力测试新方法及实践	李邵军, 冯夏庭, 张友良, 等	1709—1713
14	基于修复策略的改进和声搜索算法求解土坡非圆临界滑动面	李 亮, 迟世春, 褚雪松	1714—1718
15	路堤荷载下盖板的浆固碎石桩桩土应力比研究	顾长存, 刘汉龙, 邢恩达, 等	1719—1722
16	考虑土体应力历史影响的沉降修正初探	王志亮, 孙锡杰	1723—1726
17	岩石破裂过程 TMD 耦合数值模型研究	李连崇, 杨天鸿, 唐春安, 等	1727—1732
18	打入桩承载力确定方法对安全系数的影响	李典庆	1733—1738
19	碎石桩加固双层地基固结简化分析	邢皓枫, 龚晓南, 杨晓军	1739—1742
20	盾构衬砌管片土压力反分析研究	钟小春, 朱 伟	1743—1748
21	现浇混凝土筒桩承载特性试验分析	朱向荣, 朱明双, 王金昌	1749—1753
22	EPS 块体动变形特性的室内试验研究	王庶懋, 高玉峰	1754—1758
23	一种改进的确定地基承载力的动参数法	刘明贵, 张 波	1759—1762
24	煤岩强度离散性及三轴压缩试验研究	杨永杰, 宋 扬, 陈绍杰, 等	1763—1766
25	纳米硅水泥土破坏准则研究	王立峰, 夏建中, 朱向荣	1767—1771
26	不同初始饱和度红砂岩冻融损伤差异性研究	王 俐, 杨春和	1772—1776
27	土性高斯平稳场-马尔可夫场在渗流随机分析中的应用研究	林 琳, 史良胜, 杨金忠, 等	1777—1780
28	基于 P-Y 曲线法的水平受荷桩非线性有限元分析	苏静波, 邵国建, 刘 宁	1781—1785
29	基于统一强度理论的灰土挤密桩应力分析	曹黎娟, 赵均海, 魏雪英	1786—1790
30	基于 GIS 的地层剖面图形生成技术	高明忠, 谢和平, 李 洪, 等	1791—1794, 1799
31	用三维有限元法对超长单桩桩端承载力的研究	吴 鹏, 龚维明, 梁书亭	1795—1799
32	基于可拓理论的围岩稳定分类方法的研究	黄祥志, 余成学	1800—1804
33	饱和黏性土和砂砾石料振动孔压的试验研究	张 茹, 何昌荣, 费文平, 等	1805—1810
34	多剖面反算滑带土抗剪强度指标的研究	程媛彩, 戴自航	1811—1814
35	地震历史对砂土抗液化性能影响的试验研究	苏 栋, 李相崧	1815—1818
36	端头扩大型土锚的新发展——船锚式注浆张开型土锚	陈浩华, 黄 铭, 葛修润	1819—1822
37	基于 GIS 和 RDB 的勘察数据一体化管理	李伟忠, 艾东海, 汪新庆, 等	1823—1826
38	不同水泥土混合桩周围土体的扰动与强度恢复	沈水龙, 唐翠萍, 庞晓明	1827—1830
39	石板水电站重力坝坝基渗流渗压观测资料的统计回归分析	张强勇, 林春金, 向 文	1831—1834
40	黄河下游堤防非饱和土边坡渗流分析	刘海宁, 王俊梅, 王思敬, 等	1835—1840
41	三峡库区宝塔滑坡泥化夹层泥化过程的水岩作用	李守定, 李 晓, 张年学, 等	1841—1846
42	基于随机有限元的堤防渗透失稳概率分析	李锦辉, 王 媛, 胡 强	1847—1850
43	江底盾构隧道施工期外水压分布规律的现场试验研究	谢红强, 何 川, 李 围	1851—1856
44	高速铁路软土地基处理方法对比试验	董 亮, 叶阳升, 蔡德钧, 等	1856—1860