

文章编号: 0451-0712(2007)02-0158-07

中图分类号: U456.3

文献标识码: A

高速公路隧道支护结构力学行为研究

余健¹, 何川², 汪波², 李祖伟^{1,2}

(1. 重庆高速公路发展有限公司 重庆市 400010; 2. 西南交通大学地下工程系 成都市 610031)

摘要: 以渝黔高速公路二期工程的笔架山隧道为工程背景,采用对现场主体工程施工过程和隧道建成初期的跟踪监测,与三维弹塑性数值模拟相互对照的方法,得出了高速公路隧道施工期间和建成初期的力学行为及变化规律。另外,采用偏于安全的结构—荷载模式对此隧道不同类别的二次衬砌长期安全性进行了计算,得出了各类围岩隧道结构的长期安全性指标的数值大小和横向分布规律。其结论可为隧道设计和施工提供重要参考。

关键词: 高速公路隧道; 现场监控量测; 数值模拟; 长期安全性

我国高速公路隧道普遍采用新奥法设计施工技术,隧道主体结构以锚喷支护和模筑混凝土复合衬砌结构为主流形式。但在具体的施工方法中,开挖步骤及锚喷支护和模筑混凝土的施设时机,往往因施工单位的技术水平、围岩和环境条件出现极大的差异,而导致同样的主体结构而具有不同水平的安全储备^[1]。同时,计及不同围岩长期流变而引起的荷载转移,及锚杆失效、钢筋锈蚀、混凝土腐蚀等各种复杂因素,都将使衬砌结构实际承载力下降。为此,对新建高速公路隧道进行跟踪监控量测,从而探明以锚喷支护和模筑混凝土复合隧道结构体这一主流结构形式,在修建阶段及早期运营阶段的实际力学行为,同时可对结构进行实时量测,为结构安全性评价及工程维护加固对策提供基础数据。另外,为了弥补现场试验的局限性以及现场试验不能反映开挖的时空效应,采用三维数值模拟的方法,对开挖过程进行模拟计算,并与现场实测结果相互印证,反过来也可检验数值模拟的正确性和实用性。最后,采用结构—荷载模式对结构的长期安全性进行计算并评价,得出需要重点关注的结构部位。以上研究具有很强的工程意义和学术价值。

1 现场量测

1.1 量测项目及仪器布置

量测断面里程及量测内容见表1,量测仪器布置见图1所示。

表1 量测断面里程及量测内容

里程	围岩类别	埋深/m	量测内容
YK121+621.2	Ⅱ	50	锚杆轴力
ZK122+288.6	Ⅲ	320	二次衬砌压力
YK121+963.7	Ⅳ	250	二次衬砌内力

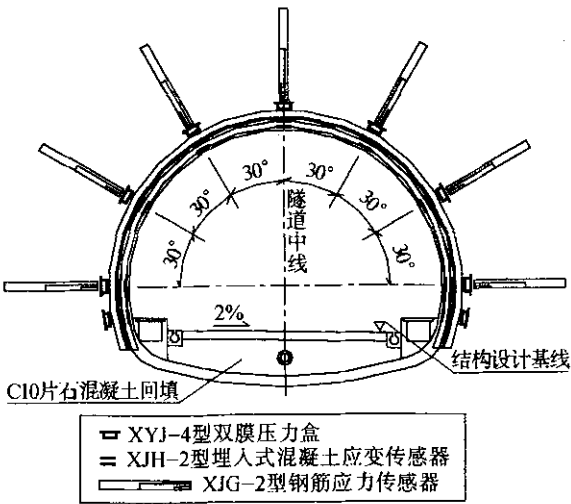


图1 量测仪器布置

1.2 量测数据及结果分析

1.2.1 锚杆轴力

在现场,将锚杆安装完毕后,经过一段时间的现场量测,取得了丰富的锚杆轴力现场数据,其锚杆轴力在横断面的分布曲线及锚杆轴力随时间的变化曲线如图2~图5所示。因篇幅所限此处仅给出Ⅱ类围

岩的轴力—时间曲线。

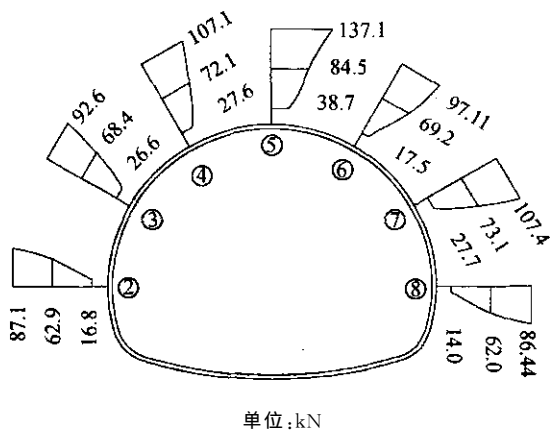


图2 Ⅱ类围岩锚杆轴力的横向分布

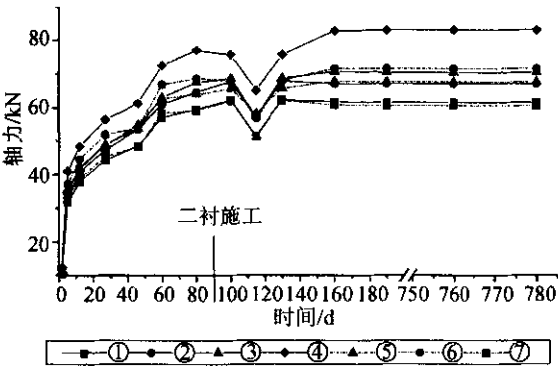


图3 Ⅱ类围岩锚杆轴力—时间曲线

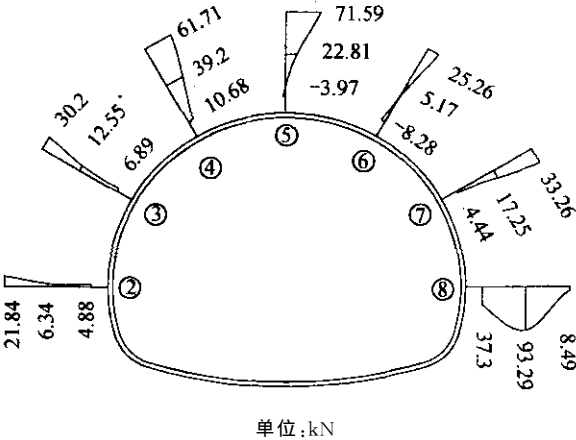


图4 Ⅲ类围岩锚杆轴力的横向分布

从锚杆轴力分布图可以得出以下结论。

(1) 围岩类别越低, 锚杆的轴力相应越大。这说明隧道开挖后, 低类别围岩易于变形, 而施作的锚杆阻止围岩变形, 则锚杆受到较大的轴力作用, 而高类别围岩变形小, 则锚杆所受的轴力小。故低类别围岩中锚杆的支护效果优于高类别围岩中的锚杆。因此, 低类别围岩中的系统锚杆都采用全周满布, 而高类别围岩中则往往仅在拱顶局部布设锚杆, 或不用锚杆支护。

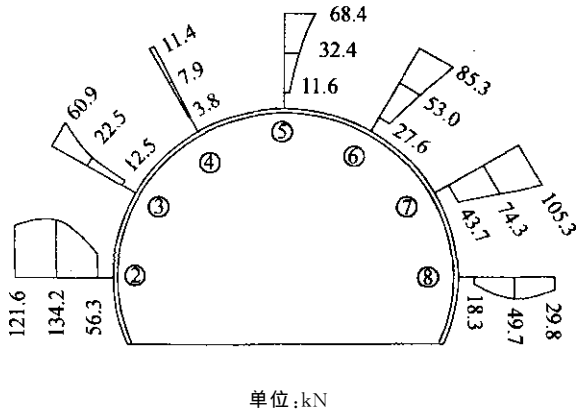


图5 Ⅳ类围岩锚杆轴力的横向分布

(2) 从锚杆轴力—时间曲线可知对于Ⅱ类围岩, 即使施作了二次衬砌以后, 仍然可见锚杆轴力在继续变化, 说明Ⅱ类围岩的二次衬砌是与初期支护一起共同受力以抵抗围岩压力的。而对于Ⅲ、Ⅳ类围岩, 锚杆轴力在隧道开挖后大约40 d左右的时间里变化较大, 其后趋于缓慢, 在施作二次衬砌之后, 变化更小, 表明隧道围岩的应力重分布在开挖以后40 d内已经完成, 此时初期支护与围岩应力达到一个平衡状态。因此, 在新奥法开挖的隧道中, 在Ⅲ、Ⅳ类围岩条件下, 隧道结构主要是靠初期支护来平衡围岩应力, 而二次衬砌结构主要是作为隧道的长期安全储备, 利于通风和起内饰作用。

(3) 从锚杆轴力—时间变化曲线中还可以看出, 二次衬砌施作以后, 锚杆轴力都有不同程度的下降, 然后再回升的一个过程, 只是Ⅱ类围岩轴力下降的幅度比例最大, Ⅲ类围岩有小幅影响, 而Ⅳ类围岩几乎未受影响。这从另一方面也说明了低类别围岩二次衬砌是与初期支护一起受力, 但随着围岩类别的提高, 二次衬砌受力减少, 甚至不受力。

1. 2. 2 初期支护与二次衬砌的接触压力

此处给出各类围岩接触压力在横断面的分布曲线以及典型围岩(Ⅳ类围岩)接触压力—时间的变化曲线, 见图6、图7所示。

从图6可知: 对于不同类别围岩, 初期支护对二次衬砌的接触压力是不同的, 其中Ⅱ类围岩的最大值为0.15 MPa左右, Ⅲ类围岩的最大值为0.10 MPa左右, Ⅳ类围岩的最大值为0.064 MPa, 可见围岩类别越低, 初期支护对二次衬砌上的接触压力最大值越大。说明作用荷载的大小与隧道围岩的类别有密切的关系, 围岩类别越高, 作用荷载越小, 围岩类别越低, 作用荷载越大。因此, 低类别围岩的安全性评价是我们研究的重点。从接触压力的横

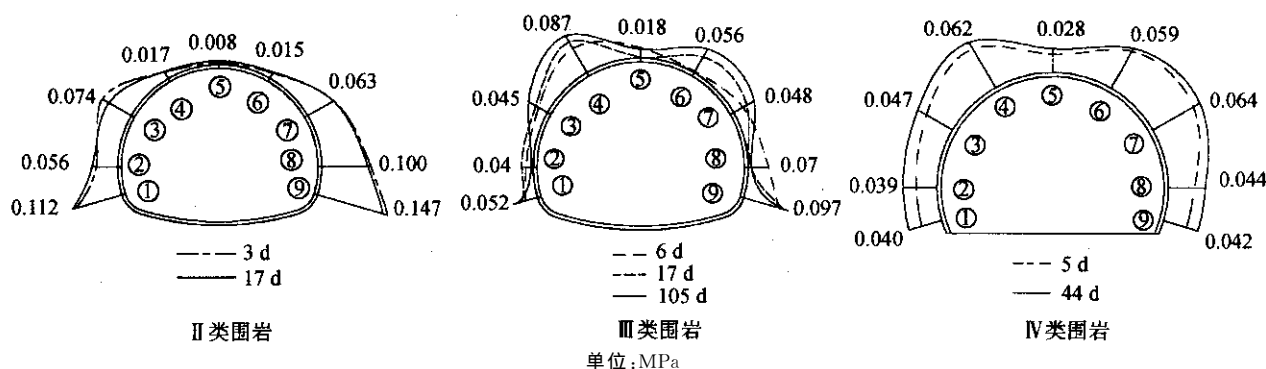


图6 各类围岩接触压力的分布曲线

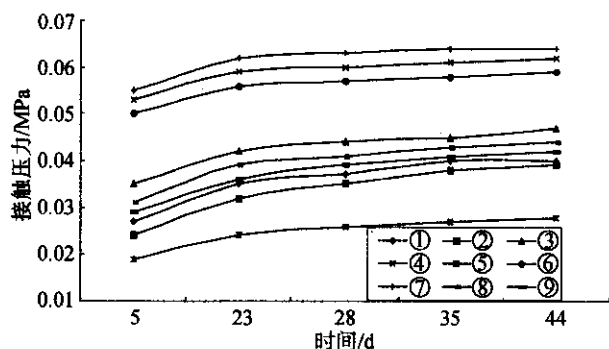


图7 IV类围岩接触压力—时间变化曲线

断面分布形状来看, II、III类围岩接触压力呈拱肩、拱脚大的“X”形对称分布;而IV类围岩呈拱肩大的“V”

字形对称分布。也就是说围岩从软到硬,接触压力由“X”形分布逐渐退化为“V”字形分布。从围岩接触压力随时间的变化曲线中可以看出(II、III类未示出):二次衬砌施作以后的一段时间里接触压力变化较大,而后逐渐趋于稳定,稳定的时间依围岩类别和二次衬砌与初期支护施作的间隔时间有关,稳定时间一般为21~42 d。围岩越软弱,其接触压力的稳定期越长,且变化幅度越大。

1.2.3 二次衬砌的内力量测结果分析

此处给出典型的内力横断面分布及内力—时间变化曲线(III类围岩),见图8~图10所示(弯矩值以外侧受拉为正;轴力以受拉为正,受压为负)。

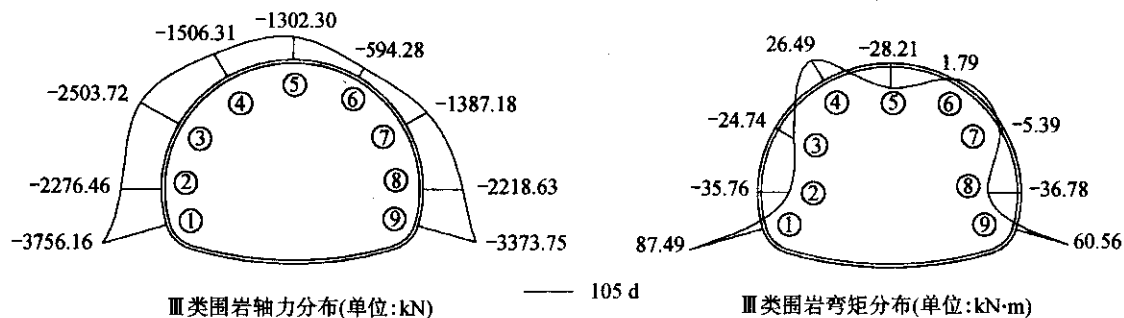


图8 典型内力分布

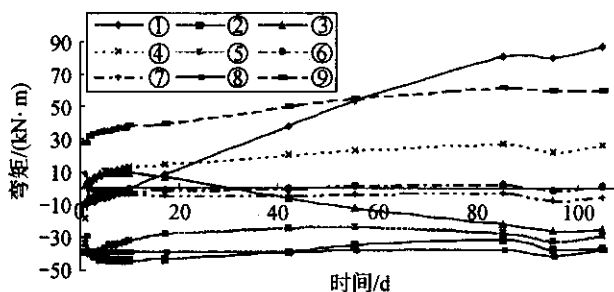


图9 III类围岩轴力随时间的变化曲线

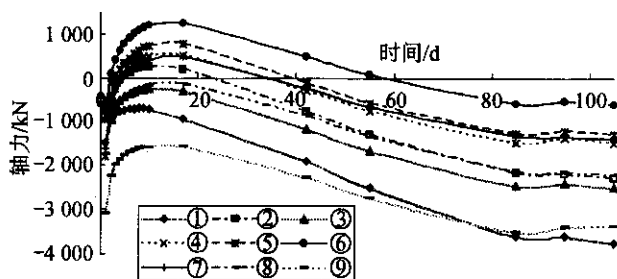


图10 III类围岩弯矩随时间的变化曲线

从稳定后的内力横断面分布图来看(II、IV类未示出),二次衬砌的最大弯矩值和最大轴力值几乎都

出现在墙脚部位,因此可知拱脚部承受了较大的围岩压力,此截面即为围岩承载力的控制截面。因此对

于低类别围岩必须施设仰拱,同时仰拱应早上,并作好铺底;另外,仰拱与边墙应尽量圆顺连接,以减少应力集中。这样,既可有效地改善二次衬砌的受力状态,又可改善施工环境条件。从轴力、弯矩随时间的变化曲线来看,其值在施工后 7 d 以内变化较大,而后逐渐稳定,稳定的时间长短不但与围岩的类别有关,而更主要的是与初期支护施作到二次衬砌施作之间的时间长短密切相关,从各类围岩内力—时间变化曲线可以看出,Ⅲ类围岩的稳定期最长为 70 d,Ⅳ类围岩的稳定期次之为 35 d,Ⅱ类围岩的稳定期最短为 6 d。而各类围岩从初期支护施作到二次衬砌施作之间的时间分别为:Ⅱ类围岩间隔时间为 136 d、Ⅲ类围岩为 42 d、Ⅳ类围岩为 95 d。因此可以得出,初期支护施作到二次衬砌施作之间的时间越长,其二次衬砌施作以后,内力的稳定期越短。此规律与前述接触压力变化规律一致。

2 数值模拟

为了弥补现场试验对施工过程力学行为研究之

不足,采用三维数值模拟的方法,对开挖过程进行模拟计算。反过来也可用现场实测结果验证模拟计算的正确性,使模拟计算发挥更大的作用。

2.1 建模情况

根据施工设计图纸资料,取埋深最大的一处Ⅱ类围岩考虑,里程为右线 K121+621.2~+646.2,最大埋深 50 m。三维弹塑性数值计算根据此段地质参数、地形实态建模。为保证计算的准确性,整体建模严格按照施工图纸建立,其模型尺寸为:隧道横向取 120 m(大于 5 倍洞径),竖直向上取至地表(最小值 40 m,最大值 60 m),竖直向下取 30 m(3 倍洞径),纵向取 36 m。因模型结构对称,受力对称,开挖对称,因此,模型为对称问题,实际模型为沿对称面取一半进行计算^[3,4]。为准确求解,在隧道结构的附近和分析的目标面附近采用细密单元,模型单元总数为 49 254,节点总数为 53 040。计算模型的边界条件除上部为垂直荷载边界外,其余各侧面和底面为法向约束边界。因隧道埋深较浅,故计算时按自重应力场考虑^[5,6]。计算模型如图 11 所示,物理力学参数见表 2。

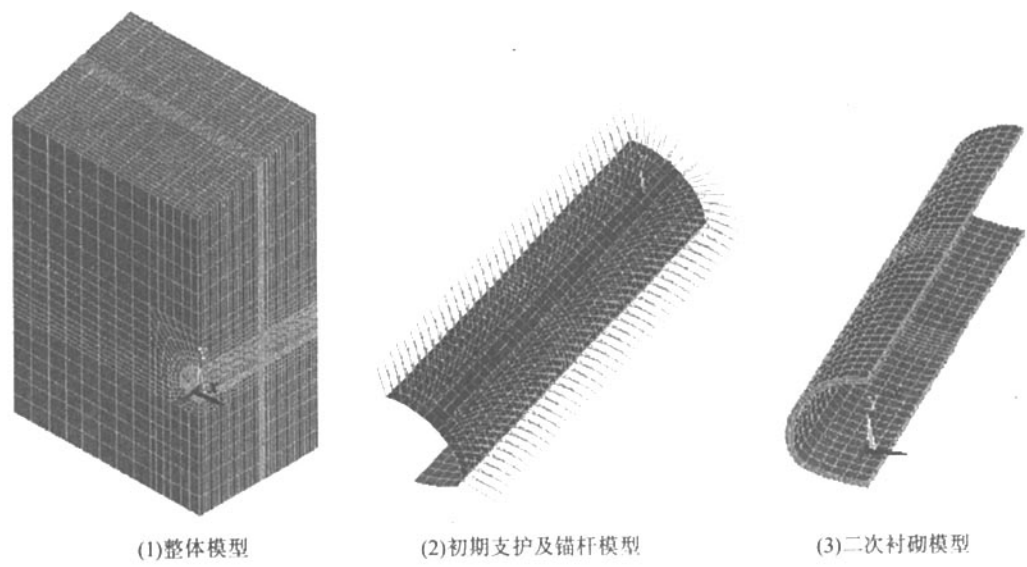


图 11 计算模型

表 2 计算力学参数

项目	E/GPa	ν	$\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	c/MPa	$\varphi/(^{\circ})$
围岩	1.8	0.38	22	0.1	30
二次衬砌	28.5	0.2	25	—	—
仰拱回填	18.5	0.2	23	—	—
锚杆	200	0.3	79	—	—
初期支护	30	0.3	25	—	—

2.2 计算结果比较

2.2.1 锚杆轴力

此处给出施工完成以后,中间断面锚杆轴力的横向分布,如图 12 所示。

将图 12 与现场实测轴力分布相互比较可知,轴力分布均表现出从拱顶到拱脚所受轴力由大变小的分布态势。而从计算和现场量测锚杆的轴力数值大小来看,两者的大小均在同一数量级上,这充分印证

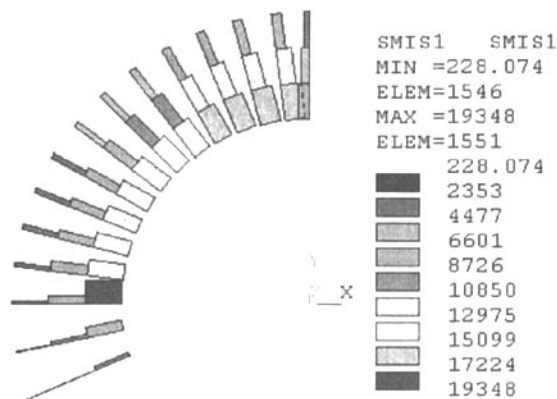


图 12 锚杆轴力的横向分布

了模拟计算的正确性。另外,实测中锚杆沿轴向的轴力呈内小外大分布,而模拟计算则成内大外小的分布。究其原因是在开挖后安装锚杆的,此时围岩从开挖面至围岩内部的变形呈由大到小的变化,越靠近开挖面应力释放越快,而安装锚杆之后,围岩变形得以控制,此时的变形为内大外小,锚杆轴力与之对应。而在模拟计算中,都是采用同步释放相同的荷载^[7],围岩靠衬砌侧位移大,远离衬砌侧则位移小,因此,模拟计算中出现内大外小的轴力分布。

2.2.2 初期支护与二次衬砌的接触应力

模拟计算的初期支护与二次衬砌接触应力横向分布见图 13 所示。

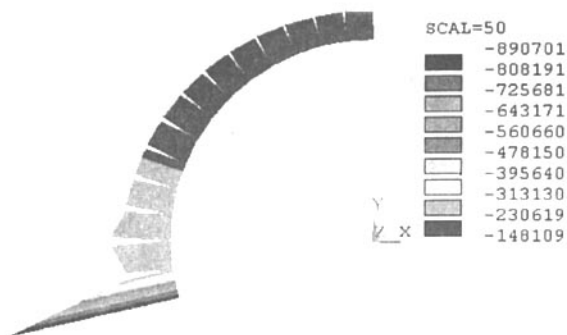


图 13 初期支护与二次衬砌接触应力

从图 13 中可清晰地看出,接触压力从拱顶到拱脚呈现出由小到大的变化趋势,且在拱脚处接触压力出现突然变大的分布,此处的最大值约为拱顶处接触压力的 6 倍。将图 13 与 II 类围岩的实测接触压力相互比较,可知两者的分布变化趋势是一致的;另外,两者从数值上来看,其值均在同一数量级上,只是计算值稍大。这主要是因为现场本应埋设于拱脚位置处的土压力盒,因为施工原因,只安设在了拱腰

至拱脚之间的位置,这样就直接影响了土压力盒的读数,使该处的接触压力值较小造成的。

2.2.3 二次衬砌内力

二次衬砌所受的应力如图 14 所示。从图 14 的分布来看,二次衬砌内侧从拱顶到拱脚,应力分布呈现出内侧顶部受压,逐渐过渡为拱肩内侧受拉,至拱脚部拉应力由小变大的趋势;而二次衬砌外侧则在拱顶和拱脚部呈受压状态,拱肩部受拉的分布形式。此内外应力分布规律与现场实测应力分布完全吻合,且应力值均在同一数量级。

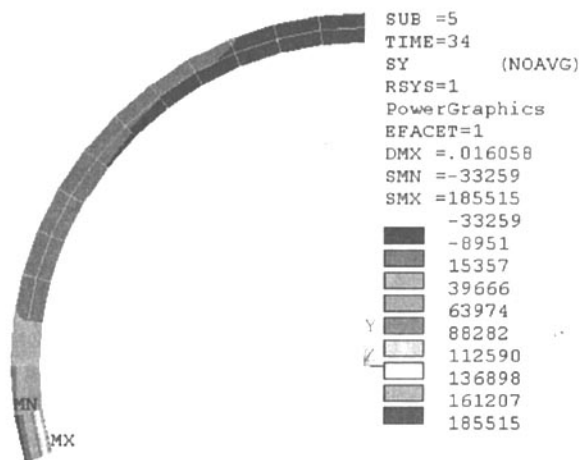


图 14 环向单元应力分布

从以上计算结果与量测数据在锚杆轴力、接触应力以及二次衬砌应力分布特征的对比来看,其分布规律、变化形式和数量级是极其吻合的,充分印证了模拟计算的正确性。因此,可以用模拟计算更加全面地分析开挖过程中隧道结构的应力、应变和位移变化规律。

3 二次衬砌结构受力特征数值分析

3.1 计算模型和材料参数

二次衬砌受力分析中采用偏于安全的荷载—结构模式,建模概况如图 15、图 16 所示,围岩和衬砌结构物理力学参数见表 3。

3.2 计算结果及分析

此处给出典型围岩类别(II 类围岩)的内力计算结果,见图 17 所示。

从 II 类围岩内力分布图可以看出,由于弯矩在两拱脚、仰拱底以及拱顶部位变化较大,故使得二次衬砌的最大应力值(轴力+弯曲应力)在以上弯矩变化较大处,均超过了混凝土的轴心抗拉强度,结构需进行配筋设计。而从设计图纸来看,此段正好处于进

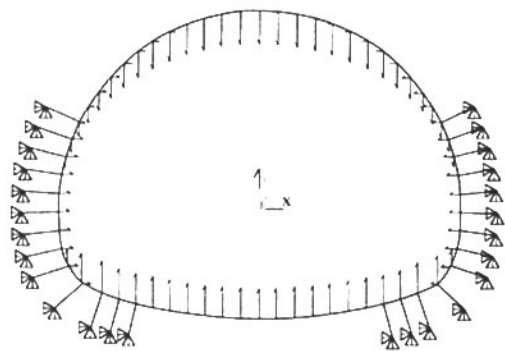


图 15 II、Ⅲ类围岩整体建模

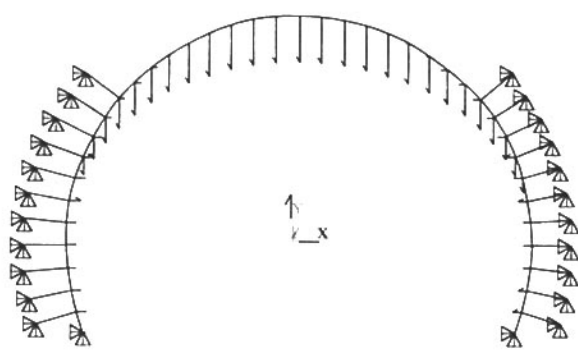


图 16 IV类围岩整体建模

表 3 材料物理力学参数

围岩类别	围岩参数			埋深/m	二次衬砌(C25)		
	弹性抗力系数 $K/(\text{MPa}/\text{m})$	泊松比 μ	容重 $\gamma/(\text{kN}/\text{m}^3)$		弹性模量 E/MPa	泊松比 μ	容重 $\gamma/(\text{kN}/\text{m}^3)$
II	150	0.37	19	30	2.85×10^4	0.2	23
III	350	0.27	21	深埋	2.85×10^4	0.2	23
IV	800	0.23	24	深埋	2.85×10^4	0.2	23

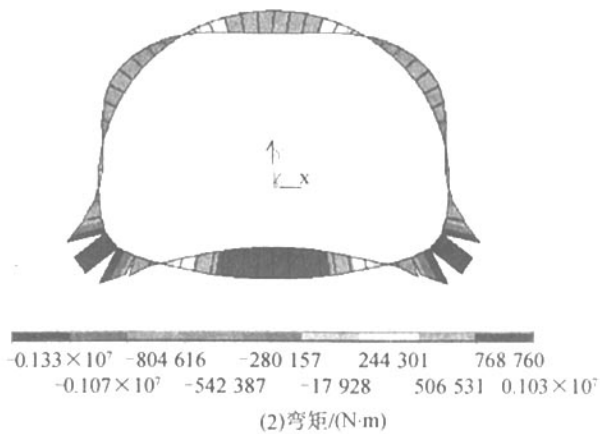
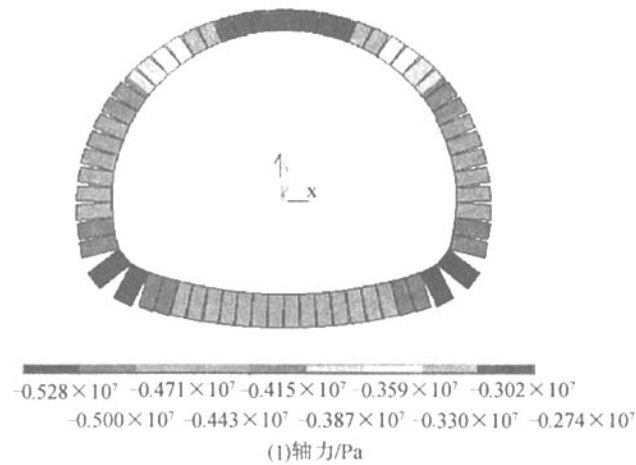


图 17 II类围岩内力

口加强段,已进行配筋设计,故抗拉强度满足要求。而二次衬砌的最小应力值(轴力—弯曲应力),在两拱脚和仰拱底部的压应力值均超过混凝土的抗压强度,这主要是两拱脚处曲率大,产生应力集中造成的,而实际施工时两拱脚及仰拱都进行了贫混凝土回填,故实际的受力大为改善,但此处应作为重点观测部位。从Ⅲ类围岩内力计算结果可知,二次衬砌的抗压均满足要求,但二次衬砌的最大应力在拱顶部和拱脚的拉应力均已超出轴心抗拉强度,故需进行局部配筋处理。而Ⅳ类围岩的最大、最小应力分布较均匀,且其最大拉应力和最大压应力值均小于混凝土的轴心抗拉和抗压强度,故Ⅳ类围岩二次衬砌结

构满足安全性要求。

4 结论

从以上分析可得出如下结论。

- (1)围岩类别越高,开挖后弹性能释放越快,影响范围越小,但锚杆所起的作用越大,因此,围岩类别越高,锚杆越短,布置越稀。
- (2)Ⅲ、Ⅳ类围岩的应力重分布在开挖以后 40 d 内已经完成,结构体主要是靠初期支护来平衡围岩应力,而二次衬砌结构主要是作为隧道的长期安全储备、利于通风和起内饰作用。对于Ⅱ类围岩则是通过二次衬砌与初期支护一起共同受力,以抵抗围岩

压力的。

(3) 初期支护对二次衬砌接触压力的大小与隧道围岩的类别有密切的关系, 围岩类别越高, 接触压力越小, 围岩类别越低, 接触压力越大。因此, 低类别围岩的安全性评价是我们研究的重点。

(4) 二次衬砌内力的稳定期长短主要由初期支护到二次衬砌之间的施作时间决定, 其施作时间越长, 二次衬砌施作以后, 内力的稳定期越短, 反之亦然。

(5) 低类别围岩必须施设仰拱, 且仰拱与边墙应尽量圆顺连接, 同时仰拱应早上, 并作好铺底, 这样, 既可有效地改善二次衬砌的受力状态, 又可改善施工环境条件。

(6) 现场的实际量测值与模拟计算值相互比较, 其锚杆轴力、接触应力以及二次衬砌应力分布特征和量值上都极为吻合, 这充分证明了模拟计算的方法和结果是正确的和可信的。因此, 可以用模拟计算的方法对隧道结构进行全面的研究。

(7) 当认为结构初期支护全部失效, 而按结构—荷载模式进行二次衬砌的安全性计算时, 结果表明,

Ⅳ类围岩的衬砌结构具有足够的安全储备; Ⅲ类围岩衬砌的拱顶和拱脚需进行局部配筋处理; Ⅱ类围岩两拱脚有压溃的可能, 需重点关注。

参考文献:

- [1] 王建秀, 朱合华, 唐益群. 高速公路隧道跟踪监测及承载状况诊断[J]. 土木工程学报, 2005, 38(2).
- [2] 潘昌实. 隧道力学数值方法[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1995.
- [3] 徐干成, 白洪才, 郑颖人, 刘朝. 地下工程支护结构[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001.
- [4] 朱汉华, 尚岳全. 公路隧道设计与施工新法[M]. 北京: 人民交通出版社, 2002.
- [5] Gu Desheng, Deng Jian, Li Xibing. Three dimensional numerical simulation of excavation and backfilling in mining engineering [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 1999, 9(2).
- [6] Mari R J. Ground movement around shallow tunnels in soft clay[J]. Tunnels and Tunnelling, 1982, (6).
- [7] 美国 ANSYS 公司驻成都办事处. 非线性分析指南[Z]. 2000.

A Study on Mechanical Behavior of Support Structure in Expressway Tunnel

SHE Jian¹, HE Chuan², WANG Bo¹, LI Zu-wei^{1,2}

(1. Chongqing Expressway Development Co., Ltd., Chongqing 400010, China;

2. Dept. of Tunnel and Underground Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: On the basis of Bijiaoshan Tunnel in 2nd stage project of Yu-Qian Expressway, monitor and 3D numerical simulation are applied to study on structures during construction stage and initial completion stage, and to find mechanical behavior and variation laws of expressway tunnel during construction stage and initial completion stage. In addition, structure-load mode on the safe side is used to compute long-term safety of final linings with different type, and magnitude and transversal distribution of long-term safety index are attained for tunnel structures under different surrounding conditions. The results provide the references for design and construction of tunnel.

Key words: expressway tunnel; in-situ measurement; numerical simulation; long-term safety