

黄土公路隧道衬砌参数影响性状分析

赵占厂¹, 谢永利²

(1. 路桥集团桥梁技术有限公司, 北京 100102; 2. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064)

摘要: 针对黄土公路隧道常采用模筑混凝土强支护型式, 利用数值仿真技术分析了衬砌混凝土强度、厚度和考虑龄期与否对围岩及隧道衬砌结构的影响。研究表明: 混凝土强度提高对围岩和衬砌结构影响不大; 存在一个“合理经济”的衬砌厚度; 仿真计算中是否考虑混凝土龄期对衬砌轴力影响较大。

关键词: 黄土公路隧道; 衬砌; 性状分析

中图分类号: TU 947.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2005)11-1291-05

作者简介: 赵占厂(1973-), 男, 工学博士, 主要从事岩土工程与隧道工程方面设计和研究工作。

Performance analysis of loess highway tunnel affected by lining parameters

ZHAO Zhan-chang¹, XIE Yong-li²

(1. Bridge Technology Corporation of Road and Bridge Group, Beijing 100102, China; 2. Highway College of Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: With regard to the strong support type of cast-in-place concrete often adopted in loess highway tunnels, the influences of strength, thickness and age of concrete on surrounding rock and lining structure were analyzed by use of numerical imitation technology. The results showed that the influences of concrete strength on the soil and lining were not great, there was rational and economical thickness of the lining, and the age of concrete had large effect on axial force of lining.

Key words: loess highway tunnel; lining; performance analysis

0 引言

“新奥法”的基本思想是充分保护围岩, 发挥围岩的自承能力, 在岩石隧道中有着广泛应用。但是对于黄土公路隧道, 由于黄土强度相对较低, 开挖扰动后变形较大, 加之公路隧道大跨径、大断面和扁坦状等特点, “强支护”仍是黄土公路隧道施工指导原则之一。具体作法通常是利用整体性较好和刚度较大的模筑混凝土作为支护手段。文献[1]研究了工程因素对黄土洞室的影响, 结果表明: 衬砌由三铰拱变为无铰拱时, 围岩压力仅增加 4%~7%, 有仰拱的洞室周围土体位移显著减小, 围岩压力显著增加; 当衬砌已经有一定厚度后, 继续增加衬砌厚度, 围岩压力增加不明显, 洞室围岩压力与衬砌截面厚度近似呈双曲线关系; 围岩压力与衬砌材料变形模量呈双曲线关系; 采用低模量回弹材料作为回填层对减小围岩压力是有利的, 但洞周土体位移将增加。由于研究背景的差异使得这些成果并不能完全指导黄土公路隧道的设计施工, 针对黄土公路隧道衬砌参数影响性状的研究分析较少, 论文利用数值仿真技术手段分析衬砌混凝土强度、厚度和考虑龄期与否对围岩及隧道衬砌结构的影响, 以

期提高黄土公路隧道衬砌设计水平。

1 计算模型及参数

1.1 本构模型及参数

土体采用邓肯-张模型, 泊松比的计算采用了旦尼尔提出的较简单的 V_t 随应力水平直线变化的公式, 衬砌本构关系采用线弹性。程序计算中对加卸荷判断、固结压力作用历史、应力修正以及中主应力问题也作了相应的考虑^[2], 土体计算参数如表 1。混凝土采用线弹性本构关系, 拱圈和边墙混凝土泊松比取 0.167, 仰拱标号 C15, 弹性模量取 2.0×10^7 kPa, 泊松比取 0.167。

$$E_t = \left[1 - R_f \frac{(1 - \sin j)(s_1 - s_3)}{2c \cos j + 2s_3 \sin j} \right]^2 k p_a \left(\frac{s_3}{p_a} \right)^n, \quad (1)$$

$$u_t = u_i + (u_{ir} - u_i) \frac{(s_1 - s_3)(1 - \sin j)}{2c \cos j + 2s_3 \sin j}, \quad (2)$$

$$E_{ur} = k_{ur} p_a \left(\frac{s_3}{p_a} \right)^n. \quad (3)$$

收稿日期: 2004-12-16

表 1 隧道土体计算参数

Table 1 Parameters of soil in the tunnel

土体参数	天然容重/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	n_i	k	n	k_{ur}	R_f	c/kPa	$j/(\circ)$	n_{if}
数值	18.5	0.28	350	0.5	875	0.85	50	25 $^\circ$	0.45

1.2 开挖荷载

开挖荷载实际上是被开挖掉的那部分单元体通过开挖界面与剩下的单元之间的相互作用力,因此在开挖前它在本质上是内力,根据力的平衡可得开挖荷载 f_E ^[2]。严格说来,隧道结构的受力状态特别是在施工时,属于空间问题,但由于三维数值分析计算工作量大,而将隧道力学问题简化为二维问题进行分析也能得到令人满意的结果。

$$f_E = \sum_{\Omega_E} \int_{\Omega_E} B^T s d\Omega - \sum_{\Omega_E} \int_{\Omega_E} N^T b d\Omega \quad (4)$$

1.3 计算范围及边界条件

隧道埋深为 82 m,毛洞开挖跨径 13.1 m,断面轮廓为单心圆,双洞中心线间距 70 m,选取一单洞进行了计算分析。实践和理论分析表明^[3],对于地下洞室开挖后的应力应变,仅在距洞室中心 3~5 倍开挖宽度的洞室周围范围内存在影响,所以右边界和底边界计算范围可按 3~5 倍宽度确定,左边界为双洞中心线,上边界为地表面。计算边界条件为底边节点竖向位移约束,左右两侧节点水平位移约束,地表面为自由边界条件,单元网格图参见文献[4]。

2 计算结果及分析

2.1 衬砌混凝土强度影响

计算中衬砌混凝土强度分别选取 C15、C20、C25 和 C30 四组,弹性模量相应取 2.0×10^7 kPa、 2.3×10^7 kPa、 2.85×10^7 kPa 和 3.0×10^7 kPa,泊松比取为定值 0.167。由图 1~7 可以看出,随混凝土标号的增大,土体位移、拱顶土体侧压力系数以及衬砌竖向压力、衬砌侧向压力并未发生太大变化。从图表上看,地面沉降有一定的差异,但其差异相对于总值很小,沉降的差异数量级为 10^{-3} m,地面沉降表现为单洞中心线处较小,而双洞中心线处较大的变化规律,是由于计算模型选择了双洞隧道中的一个单洞,双洞中心间距为 70 m,这种变化规律反映了两个单洞同时施工时地表面的相互影响。衬砌轴力和衬砌弯矩均随着标号的增加而增大,轴力变化最大范围为 3469.0~3527.2 kN,弯矩变化最大范围为 632.3~726.2 kN·m,最大范围均出现在墙脚处。尽管弯矩、轴力变化不大,但由于混凝土标号增加,混凝土强度增高,使得衬砌结构安全度大为提高。

2.2 衬砌厚度影响

计算分析时选取了三组衬砌厚度,以分析“强支

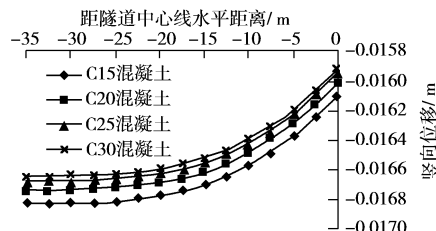


图 1 混凝土强度对地面沉降影响

Fig. 1 Influence of concrete strength on surface settlement

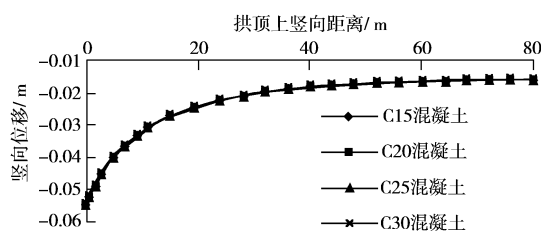


图 2 混凝土强度对拱上中心线土体竖向位移影响

Fig. 2 Influence of concrete strength on vertical displacement of soil in the center line

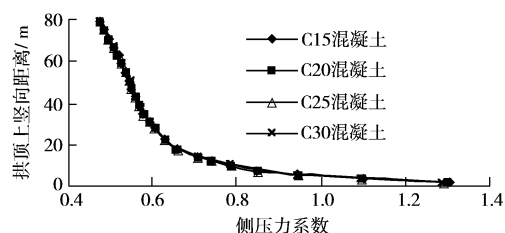


图 3 混凝土强度对拱上中心线土体侧压力系数影响

Fig. 3 Influence of concrete strength on lateral soil pressure coefficient in the center line

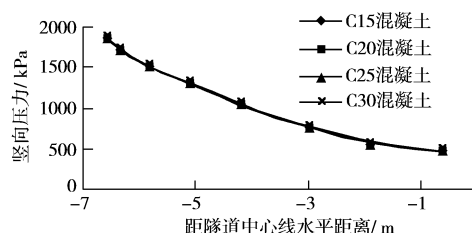


图 4 混凝土强度对衬砌竖向压力影响

Fig. 4 Influence of concrete strength on vertical pressure of lining
护”方法对围岩和衬砌结构力学性态的影响,从图 8~14 可以看出,随着衬砌截面的加厚,地表面沉降先减小而后又增加,而对于拱上土体的竖向位移和拱上土体侧压力系数,因计算结果相差不大,难以从图表上看出差异,但从计算数据可以看出,先是随着截面厚度的增加,两者都略有减小,当截面厚度再增加时,土体竖向位移在拱上 7 m 以上有所增加,土体侧压力

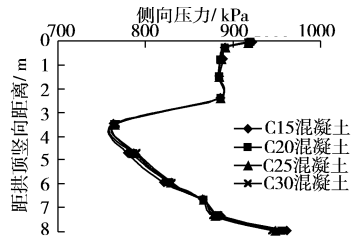


图 5 混凝土强度对衬砌侧向压力影响

Fig. 5 Influence of concrete strength on lateral pressure of lining

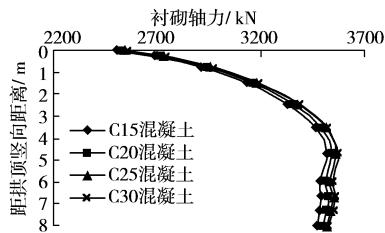


图 6 混凝土强度对衬砌轴力影响

Fig. 6 Influence of concrete strength on axial force of lining

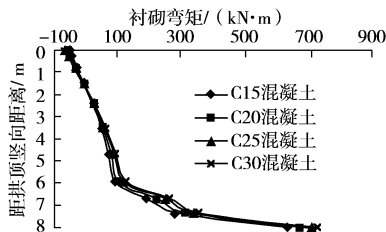


图 7 混凝土强度对衬砌弯矩影响

Fig. 7 Influence of concrete strength on bending moment of lining
系数在拱上 18 m 处以上增加。衬砌竖向压力在距中心线 4 m 范围内随厚度增加而增大, 在 4 m 范围以外, 随厚度增加而减小, 拱腰以上衬砌侧向压力随厚度增加开始变化不大, 而后有较大幅度的增加, 拱腰以下衬砌随厚度增加略有减小而后减大幅度增大。上述所得计算结果是可相互印证的, 说明了围岩和衬砌结构相互作用特性复杂多变。衬砌轴力随着厚度增加先减小后又增加。衬砌弯矩在拱顶 1 m 左右范围处随着厚度增加而持续增加, 在 1 m 处以下至起拱线之间也在增加, 而在边墙部位起初增加, 而后又减小。从土体位移、衬砌压力和内力的角度看, 应该存在经济合理的衬砌厚度, 盲目增加衬砌厚度以求减小土体位移, 提高衬砌结构安全度, 并不一定取得明显效果。

2.3 衬砌混凝土龄期影响

众所周知, 混凝土的强度及模量随着龄期变化而逐渐增长, 在模筑混凝土衬砌完成后, 开挖工作面继续向前推进, 初始应力继续释放, 但是在以往的计算分析中, 很少考虑混凝土龄期的影响, 这种影响究竟有多大难以说清。参考文献[5], 混凝土弹性模量随龄期增长按下式计算:

$$E(t) = E_0 (1 - be^{-at}) \quad (5)$$

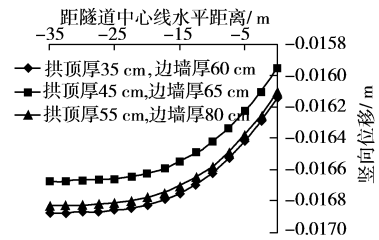


图 8 衬砌厚度对地面沉降的影响

Fig. 8 Influence of lining thickness on surface settlement

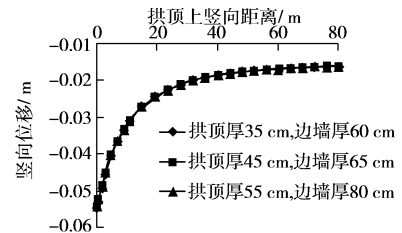


图 9 衬砌厚度对拱上中心线土体竖向位移影响

Fig. 9 Influence of lining thickness on vertical displacement of soil in the center line

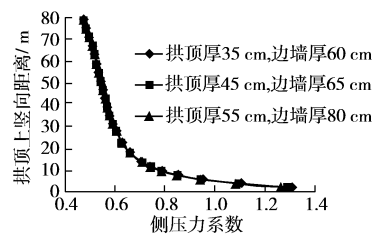


图 10 衬砌厚度对拱上中心线土体侧压力系数影响

Fig. 10 Influence of lining thickness on lateral soil pressure coefficient in the center line

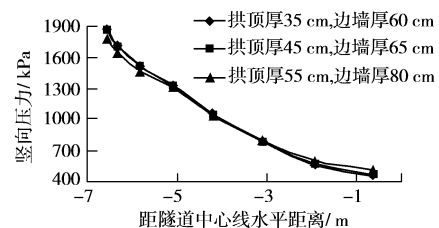


图 11 衬砌厚度对衬砌竖向压力的影响

Fig. 11 Influence of lining thickness on vertical pressure of lining

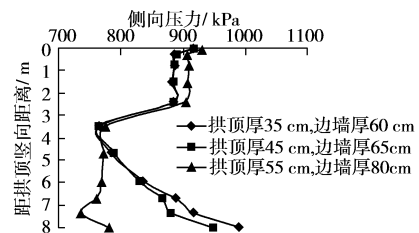


图 12 衬砌厚度对衬砌侧向压力的影响

Fig. 12 Influence of lining thickness on lateral pressure of lining
式中 $E(t)$ 为不同龄期的弹性模量; E_0 为成龄期的弹性模量; b 、 a 为经验系数, $b=1$, $a=0.09$; t 为龄期 (d)

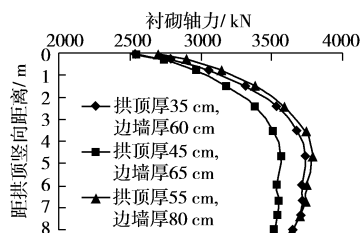


图 13 衬砌厚度对衬砌轴力的影响

Fig. 13 Influence of lining thickness on axial force of lining

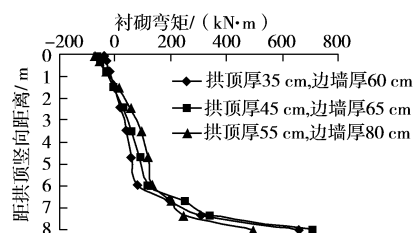


图 14 衬砌厚度对衬砌弯矩的影响

Fig. 14 Influence of lining thickness on bending moment of lining

应力释放率的确定可参照文献[5]确定,开挖面进尺按每天 1.5 m 进行计算。只进行了拱部开挖的计算,表 2 列出了随天数增长的混凝土弹性模量和应力释放率。

表 2 弹性模量和应力释放率的取值

Table 2 The value of elastic mod and stress releasing ratio

推进距离/m	应力释放率/%	弹性模量/kPa
1.5	56	
4.5	81	0.47×10^6
7.5	90	0.86×10^6
10.5	94	1.19×10^7
13.5	98	1.46×10^7
16.5	99	1.69×10^7
19.5	100	1.88×10^7

图 15~21 为应力释放结束时考虑龄期影响与不考虑龄期影响的计算结果。考虑龄期影响将使土体竖向位移增大,拱上中心线土体侧压力系数增大,土体“拱效应”作用加强,考虑龄期影响时距中心线 3 m 范围内衬砌竖向压力减小,而在 3 m 范围以外增加,拱顶处变化范围为 379.7~482.1 kPa。衬砌侧压力在拱顶处 1 m 范围会增大,而在 1 m 范围以外会减小,在起拱线处的变化幅度为 1458.5~1533.3 kPa。龄期的影响对衬砌轴力有较大影响,最大变化范围为 2700.8~3242.3 kN,对于衬砌弯矩分布的影响规律,大致可分为三个区间,但影响量较小。

3 结 论

随着西部地区高等级公路的发展,穿越黄土地区的公路隧道将越来越多。针对黄土公路隧道常采用模筑混凝土强支护型式及研究不足状况,利用数值仿真

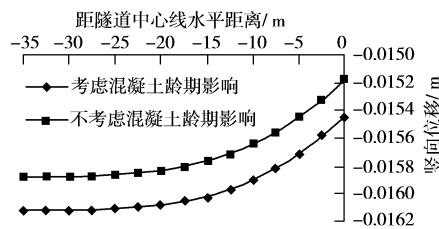


图 15 龄期对地面沉降的影响

Fig. 15 Influence of concrete age on surface settlement

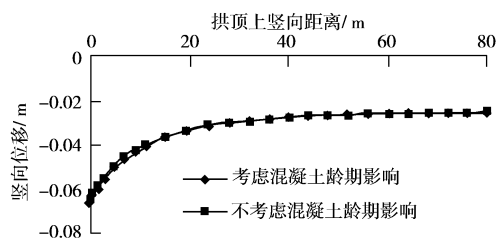


图 16 龄期对拱上中心线土体竖向位移影响

Fig. 16 Influence of concrete age on vertical displacement of soil in the center line

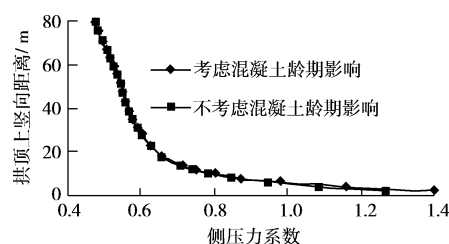


图 17 龄期对拱上中心线土体侧压力系数的影响

Fig. 17 Influence of concrete age on lateral soil pressure coefficient in the center line

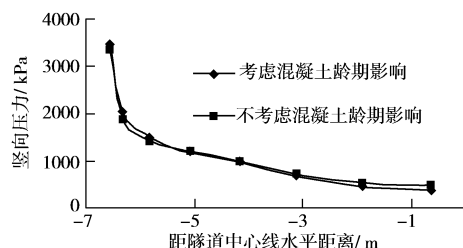


图 18 龄期对衬砌竖向压力影响

Fig. 18 Influence of concrete age on vertical pressure of lining

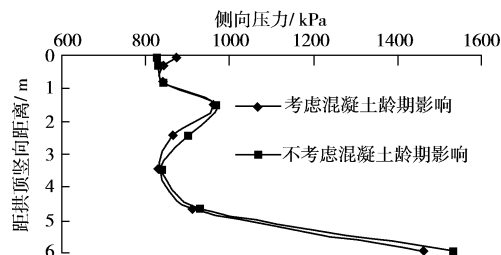


图 19 龄期对衬砌侧压力的影响

Fig. 19 Influence of concrete age on lateral pressure of lining
技术分析了衬砌混凝土强度、厚度和考虑龄期对围岩及隧道衬砌结构的影响。

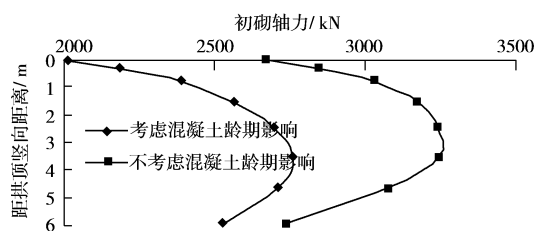


图 20 龄期对衬砌轴力的影响

Fig. 20 Influence of concrete age on axial force of lining

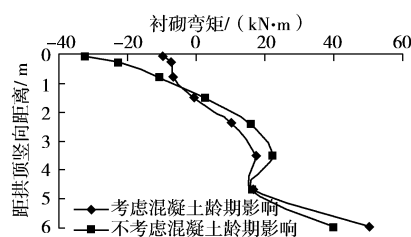


图 21 龄期对衬砌弯矩的影响

Fig. 21 Influence of concrete age on bending moment of lining

(1) 混凝土强度提高对围岩和衬砌结构影响不大, 但由于混凝土标号增加, 混凝土强度增高, 使得衬砌结构安全度大为提高。

(2) 从土体位移、衬砌压力和内力的角度看, 存

在经济合理的衬砌厚度, 盲目增加衬砌厚度以求减小土体位移, 提高衬砌结构安全度, 并不一定取得明显效果。

(3) 通常仿真计算中很少考虑混凝土龄期因素的影响, 研究表明考虑混凝土龄期与否对衬砌轴力影响较大, 对衬砌和围岩其他量值影响较小。

参考文献:

- [1] 刘祖典. 黄土力学与工程[M]. 西安: 陕西科技出版社, 1996.
- [2] 郑宏, 葛修润. 关于岩土工程有限元分析中的若干问题[J]. 岩土力学, 1995, 16(3): 7-12.
- [3] 于学馥, 郑颖人, 刘怀恒, 方正昌. 地下工程围岩稳定分析[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1983.
- [4] 赵占厂. 黄土公路隧道结构工程性状研究[D]. 西安: 长安大学, 2004.
- [5] 王铁梦. 工程结构裂缝控制[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.

TU 建筑科学类核心期刊表

序 号	刊 名	序 号	刊 名	序 号	刊 名
1	岩土工程学报	1 1	施工技术	2 1	西安建筑科技大学学报·自然科学版
2	建筑结构学报	1 2	建筑技术	2 2	水文地质工程地质
3	土木工程学报	1 3	世界建筑	2 3	建筑机械
4	岩石力学与工程学报	1 4	建筑科学	2 4	四川建筑科学研究
5	建筑结构	1 5	世界地震工程	2 5	重庆建筑大学学报
6	工业建筑	1 6	建筑学报	2 6	新型建筑材料
7	哈尔滨建筑大学学报	1 7	混凝土	2 7	空间结构
8	中国给水排水	1 8	工程勘察	2 8	城市规划汇刊
9	岩土力学	1 9	城市规划		
1 0	建筑技术通讯·给水排水(改名为: 给水排水)	2 0	暖通空调		

[编者按] 本表摘自北京大学出版社 2004 年出版的《中文核心期刊要目总览》(第 4 版)第 83 页。《总览》1992 年初版, 以后每 4 年改版一次, 每一版都对入编期刊做一定增删、调整。《总览》收录了我国各学科发表论文较多, 文摘率、引文率、读者利用率相对较高, 在本学科学术水平较高、影响力较大的期刊。