

# 扩挖支护对软弱围岩公路隧道初期支护结构影响分析

王 星, 夏永旭, 黄腾飞, 周天跃, 秦楠, 王 蕾

(长安大学公路学院, 陕西 西安 710064)

**摘要:** 由于山子顶软弱围岩公路隧道施工现场所采用的环形开挖留核心土法并不能保证隧道施工的顺利进行, 提出扩挖支护施工方案。首先论述扩挖支护施工工序, 然后采用 ANSYS 有限元方法构建扩挖支护厚度为 0、20、30、40、50、60 cm 6 种三维计算模型, 系统分析扩挖支护与初期支护的力学行为。研究得出: 扩挖支护是软弱围岩隧道一种相对优越的施工方法, 且当扩挖支护厚度达到 60 cm 时初期支护的主压应力为 16.4 MPa, 主拉应力为 0.486 03 MPa, 满足其材料强度要求。

**关键词:** 公路隧道; 软弱围岩; 扩挖支护; 初期支护; 数值模拟

**DOI:** 10.3973/j.issn.2096-4498.2017.S2.015

**中图分类号:** U 455

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2096-4498(2017)S2-0102-07

## Influence of Expanding Lining on Primary Support Structure of Soft Surrounding Rock Highway Tunnel

WANG Xing, XIA Yongxu, HUANG Tengfei, ZHOU Tianyue, QIN Nan, WANG Lei

(School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

**Abstract:** The annular excavation with core soil method used in Shanziding Highway Tunnel can not guarantee successful tunnel construction in weak surrounding rock, so the expanding lining method is put forward. First, construction sequences of expanding lining method are discussed; and then, ANSYS finite element method is adopted to establish 3D computational models for expanding lining with thicknesses of 0, 20, 30, 40, 50 cm and 60cm; finally, mechanical behaviors of expanding lining and primary support are analyzed. It is concluded that expanding lining is a relatively superior method for tunnel construction in weak surrounding rock; and when thickness of expanding lining reaches 60 cm, principal compressive stress and tensile stress of primary support are 16.4 MPa and 0.486 03 MPa respectively, which can meet the material request.

**Keywords:** highway tunnel; weak surrounding rock; expanding lining; primary support; numerical simulation

### 0 引言

扩挖支护是指在隧道开挖施工过程中, 现场施工人员在原设计轮廓线基础上进行扩大开挖, 进而采用锚喷或模筑等方式所进行的衬砌支护。扩挖施工是在隧道开挖时就按照扩挖的轮廓开挖(即增大开挖轮廓)。扩挖支护与初期支护及二次衬砌联合形成 3 层支护而广泛应用于软弱围岩隧道施工中。

软弱围岩隧道施工一直是工程界的难题及重点研究课题<sup>[1-2]</sup>。最早在 1971 年奥地利 Tauern 隧道<sup>[3-5]</sup>施工过程中就遇到软弱围岩问题, 变形量达到 50 ~ 120 cm, 最大变形速率达 20 cm/d, 后采用长锚杆、伸缩式钢架及喷混凝土预留纵缝等措施进行联合治理。

1974 年在澳大利亚的 Arlberg 隧道<sup>[6-7]</sup>施工中也遇到软弱围岩问题, 变形量为 20 ~ 35 cm, 最大变形速率为 11.5 cm/d, 其参考 Tauern 隧道采用了伸缩式钢架及长锚杆进行处理。1978 年日本 Enasan 隧道采用浇筑 1.2 m 的双层混凝土衬砌、重型钢架、喷射钢纤维混凝土及加大预留变形量等措施进行软岩处理<sup>[8]</sup>。日本长 22.2 km 的饭山隧道同样采用了多重支护措施, 取得的支护效果较好。国内高地应力软弱围岩家竹箐隧道发生大变形后先采用厚 20 cm 的喷混凝土进行支护, 再次变形后又采用厚 15 cm 的喷混凝土支护; 同时采用 2 层二次衬砌, 其中外层厚 55 cm 为主要的受力结构, 内层厚 25 cm 作为安全储备<sup>[9-10]</sup>。乌鞘岭隧

收稿日期: 2017-07-17; 修回日期: 2017-10-10

第一作者简介: 王星(1989—), 男, 陕西华县人, 长安大学桥梁与隧道工程专业在读博士, 研究方向为隧道及地下工程。E-mail: 1548622258@qq.com。

道初期支护变形量达到 40 ~ 80 cm, 初期支护亦采用“多重支护”原则, 同时结合施作 6 m 长锚杆等其他措施<sup>[11]</sup>。木寨岭铁路隧道采用了 3 层支护措施, 其支护与衬砌混凝土总厚度达 1.5 m, 较为顺利地解决了高地应力软弱围岩条件下的隧道大变形问题。甘肃省某黄土隧道施工中也采用了 3 层支护措施, 由 6 cm 厚的 C20 锚喷初期支护、60 cm 厚的 C25 一次模筑初期支护混凝土和 60 cm 厚的二次模筑钢筋混凝土衬砌组成<sup>[12]</sup>。文献[13]结合迎风隧道软弱围岩情况, 论证了扩挖支护对围岩变形有良好的抑制作用, 并能充分改善初期支护的受力特性。

目前针对软弱围岩公路隧道多重支护施工措施, 国内外学者研究成果较多。其研究成果中涉及到多重支护施工方案时, 基本为首先在隧道开挖后立即施作第 1 层相对较薄的柔性衬砌, 目的是在限制围岩变形的条件下充分释放围岩压力; 其次施作厚度较大的初期支护衬砌及二次钢筋混凝土衬砌。该工法可顺利解决大多数的软弱围岩隧道施工问题, 然而对于一些地形地质条件较差的且存在高初始地应力的软弱围岩隧道, 第 1 层衬砌施作后该层衬砌可能会出现裂缝、大变形、甚至是坍塌, 如笔者之前在对兰州市南绕城黄土隧道监控量测过程中, 就出现某洞口段施工时坍塌现象。

针对梅州至大埔高速公路山子顶公路隧道施工过程中遭遇的软弱围岩大变形及侵限的实际工程问题, 鉴于扩挖支护施工工艺简单、优越、可行, 可在初期支护与二次衬砌外部形成保护壳体并快速提供支护强度, 同时该工艺支护刚度大且效果好, 决定采用扩挖支护施工。本文拟构建扩挖支护厚度为 0、20、30、40、50、60 cm 6 种扩挖支护工况的 ANSYS 计算模型, 以期较系统地分析扩挖支护措施对软弱围岩初期支护的影响机制, 同时对山子顶软弱围岩公路隧道施工参数进行优化。

## 1 工程概况

梅州至大埔高速公路山子顶公路隧道采用环形开挖留核心土配合超前小导管注浆的方式进行开挖, 在施工过程中遇到软弱围岩大变形及侵限, 不能满足施工要求, 研究采用扩挖支护施工。根据长安大学等检测单位现场监控量测, 位于右线 YK40 + 953 ~ + 910 段拱顶下沉量最大为 35 cm, 拱顶最大沉降速率为 27 mm/d, 周边收敛最大速率达到 34 mm/d<sup>[14]</sup>。

隧址区穿越地层位于华南褶皱系粤东北—粤中拗褶带之永梅凹褶断束内, 地层上部覆盖第四季残坡积层, 下伏基岩为前泥盆系 (AnD) 变质砂岩、千枚岩。隧址区地质属于单斜地层, 倾角 16° ~ 25°, 穿越地层围岩主要以 V、VI 级为主, 围岩呈现破碎、强风化, 岩体自稳性及完整性较差。

## 2 有限元计算模型

### 2.1 衬砌结构支护参数

本文依托梅大高速山子顶隧道 ZK41 + 060 ~ YK41 + 080 段进行研究, 桩号 ZK41 + 060 处隧道埋深为 352.97 m, 掌子面开挖岩性为强风化变质砂岩, 围岩级别判定为 V 级。结合隧道支护设计及施工现场围岩情况, 拟给出如下支护参数: 扩挖支护采用 C30 喷射或模筑混凝土进行半刚性支护, 其厚度按 0、20、30、40、50、60 cm 进行设置; 初期支护采用  $\phi 8$  单层钢筋网 (间距为 20 cm  $\times$  20 cm)、I20a 工字钢 (纵向布设间距为 90 cm) 和 26 cm 厚 C25 喷射混凝土; 二次衬砌采用 45 cm 厚 C30 模筑钢筋混凝土。衬砌结构计算模型如图 1 所示。

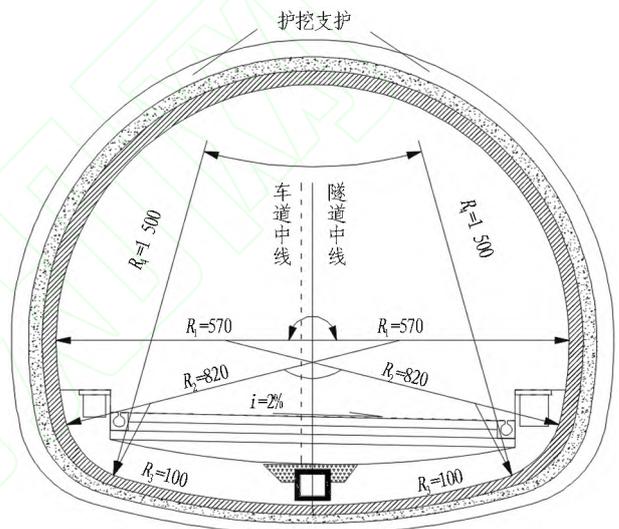


图 1 衬砌结构计算模型示意图 (单位: cm)

Fig. 1 Calculation model of lining structure (unit: cm)

### 2.2 扩挖支护施工工序

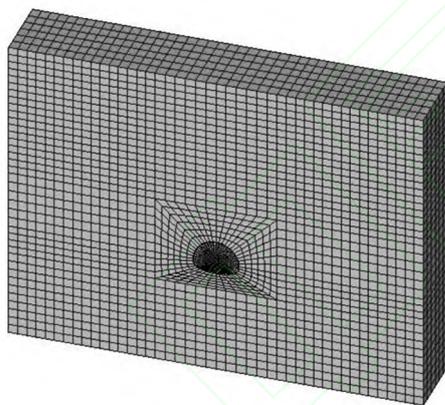
结合已有研究结果, 本研究软弱围岩公路隧道扩挖支护施工工序为: 1) 上台阶开挖; 2) 上台阶扩挖支护; 3) 上台阶初期支护; 4) 左拱脚开挖; 5) 左拱脚扩挖支护; 6) 左拱脚初期支护; 7) 右拱脚开挖; 8) 右拱脚扩挖支护; 9) 右拱脚初期支护; 10) 扩挖支护仰拱段闭合; 11) 初期支护仰拱段闭合; 11) 施作二次衬砌仰拱; 12) 仰拱回填; 13) 施作二次衬砌。

施工注意事项为: 1) 在隧道开挖后应及早进行衬砌施工, 防止隧道开挖失稳; 2) 在扩挖支护后应施作大尺寸的锁脚锚杆并严格控制其质量, 同时可制作扩大拱脚的扩挖支护以最大限度控制开挖后的沉降变形; 3) 当扩挖支护达到一定强度且围岩变形量达到一定值时应及时施作初期支护, 防止产生过大变形而失稳; 4) 左右拱脚开挖时应跳马错开开挖, 从而避免围岩及支护结构沉降过大; 5) 应尽快完成扩挖支护及初期支护在仰拱段的闭合, 使其成环; 6) 二次衬砌仰拱

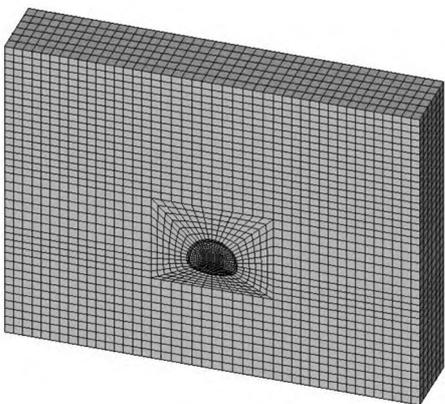
及仰拱回填应尽早施作;7)过程中应加密监控量测的测点布置间距,同时提高测点的检测频率;8)当初期支护结构变形量达到阈值后或者监控量测曲线趋于稳定时,应及时进行二次衬砌施作;9)施工时可根据现场情况在上下台阶法基础之上采用扩挖支护工艺(或者也可在三台阶、CD法、CRD法及双侧壁导坑法等施工工法基础上进行,具体要考虑现场围岩情况、施工条件等因素);10)扩挖支护可采用锚喷、模筑等工艺进行构筑;11)为确保施工安全,施工过程中应严格控制材料型号、尺寸及设置参数,同时应严格控制施工时的安全步距。

### 2.3 构建计算模型

采用 ANSYS 有限元软件对梅大高速山子顶隧道软弱围岩扩挖支护影响进行分析,结合梅大高速山子顶隧道标准断面设计情况构建了扩挖支护厚度为 0 (计算单元数目为 13 464 个)、20 cm (计算单元数目为 13 728 个)、30 cm (计算单元数目为 13 728 个)、40 cm (计算单元数目为 13 728 个)、50 cm (计算单元为 13 992 个)和 60 cm (计算单元数目为 13 992 个)6 种扩挖支护工况的 ANSYS 计算模型进行系统的对比分析研究,如图 2 所示。



(a) 扩挖支护厚度为 0



(b) 扩挖支护厚度为 60 cm

图 2 典型计算工况模型

Fig. 2 Calculation models of typical working conditions

结合现场实际施工情况,由于隧道埋深为 352.97 m,故隧道模拟分析按照深埋进行考虑。根据已有计算经验,当隧道上覆土层厚度为隧道净高的 5 倍时,隧道的部分上覆土层对于隧道结构的影响已经较为微弱,可以不予考虑,因而选取 5 倍的隧道净高来近似模拟 352.97 m 的隧道埋深,同时上表面为水平面。此外,隧道计算模型下部土层厚度为隧道净高的 3 倍,隧道计算模型左右侧均按照隧道净宽的 4 倍进行设置。计算模型的纵向长度为 20 m。模型整体采用位移边界条件进行控制,模型的前、后面均为  $U_y$  方向约束,左右侧均为  $U_x$  方向约束,下侧为  $U_z$  方向约束,模型上侧为自由表面,如图 2 所示。土体模型的上部定义为自由表面,表示隧道结构上部土体在自重的作用下发生沉降,并对隧道衬砌结构进行施压。

根据现场资料及 JTG D70/2—2004《公路隧道设计规范》中表 4.3.2 分离式独立双洞间距的最小净距要求,得出 V 级围岩的最小净距为 3.5 倍的隧道净宽,VI 级围岩的最小净距为 4.0 倍的隧道净宽。本研究中 V 级围岩取弹性模量为 1.2 GPa,偏向于 VI 级围岩,因而此处取最小净距为 4.0 倍隧道净宽。当隧道左右两侧净宽为 4.0 倍隧道净宽时,相邻双洞的两隧道之间的相互影响已经很微弱,可以不考虑,本研究简化为单洞隧道进行研究。

### 2.4 模型计算参数

本研究计算参数结合梅大高速山子顶隧道勘察设计文件、围岩和初期支护情况以及《公路隧道设计规范》进行确定。隧道围岩主要为强风化变质砂岩,模型试验中围岩均按连续弹塑性介质进行考虑,采用 D-P 屈服准则。D-P 准则适用于岩体和土壤等颗粒状材料,在 ANSYS 程序中 D-P 屈服准则是 VonMise 屈服准则的修正,比 Mohr-Coulomb 准则更加精确。

考虑到在隧道支护中“强者多劳”的原则,扩挖支护采用较高强度的 C30 喷射混凝土进行半刚性支护,同时初期支护采用钢拱架与 C25 喷射混凝土联合支护,扩挖支护与初期支护均按弹性介质进行考虑,最终确定模型的围岩及支护结构参数见表 1。

表 1 围岩及支护结构物理力学参数

Table 1 Physico-mechanical parameters of surrounding rocks and support structures

模型	重度/ ( $\text{kN}/\text{m}^3$ )	弹性模 量/GPa	泊松比	黏聚力/ MPa	内摩擦 角/ $(^\circ)$
V 级围岩	20	1.2	0.415	0.15	25
扩挖支护	25	27.5	0.200		
初期支护	24	22.5	0.220		

### 3 计算结果与分析

本研究通过布设于初期支护外缘拱顶、左右拱腰、边墙及仰拱过渡段和仰拱中心的 8 个特征点进行监测

分析,见图3。根据对称性,此处仅考虑拱顶测点A、左拱腰测点B、左边墙测点C、左仰拱过渡段测点D及仰拱中心点E共5个测量特征点。采用ANSYS模拟计算围岩位移、初期支护主拉和主压应力情况。

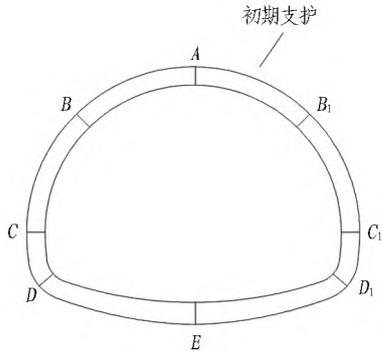


图3 特征点布设示意图

Fig. 3 Layout of characteristic points

### 3.1 扩挖支护对围岩及初期支护位移的影响

图4为围岩竖直方向的位移等值云图。在扩挖支护及初期支护完成的情况下,由围岩竖直方向位移云图可得出:随着扩挖支护的设置以及扩挖支护厚度不断增加,围岩竖直方向的位移逐步减小,据此可知扩挖支护措施对软弱围岩的位移变化起到很好的抑制作用。

图5为扩挖支护厚度为0、20、30、40、50、60 cm 工况下特征点A、B、D、E的竖向位移变化曲线。由试验结果可得:4个特征点的位移变化呈现相同规律,当扩挖支护厚度从0变化至20 cm 时,各特征点竖向位移大幅减小(缩减幅度范围为20%~50%);当扩挖支护厚度从20 cm 变化至60 cm 时,各特征点竖向位移呈平稳缓慢减小的趋势(相邻工况缩减幅度基本维持在10%左右)。

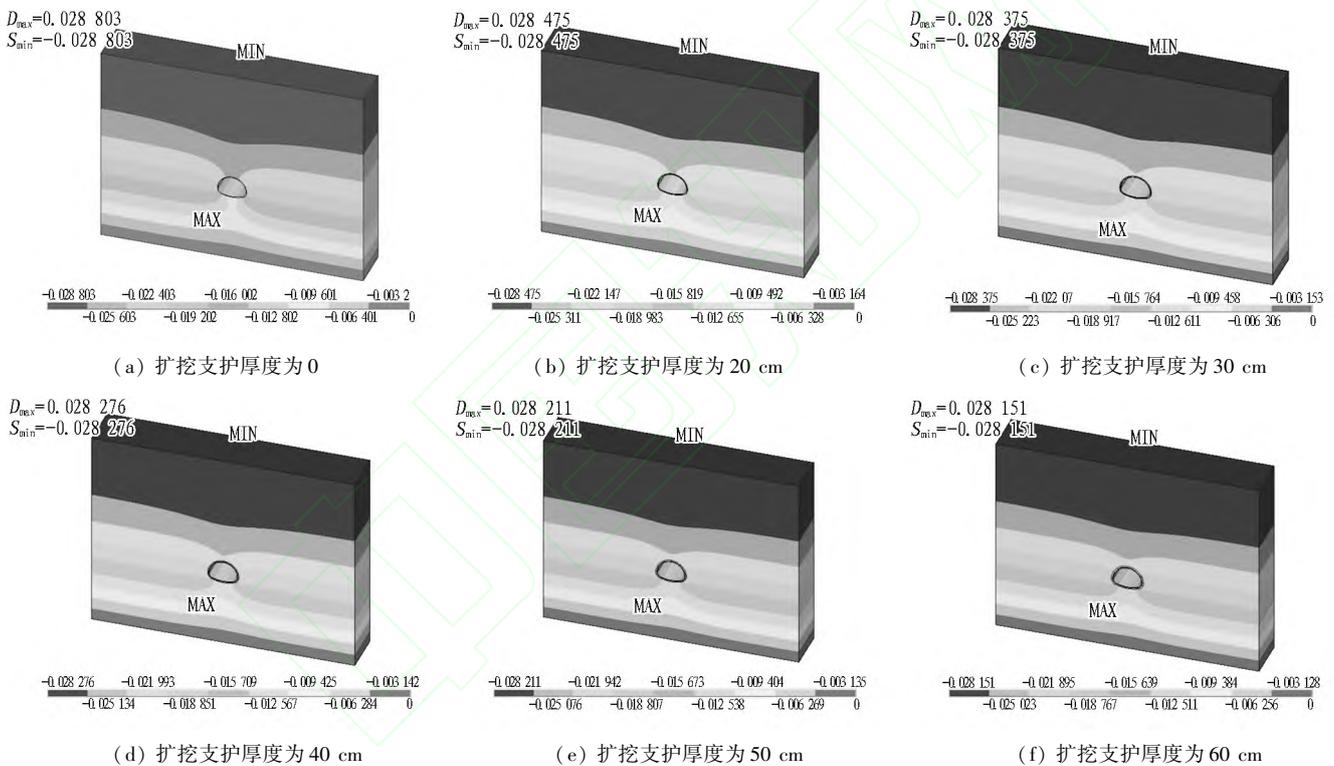


图4 围岩竖直方向的位移等值云图(单位:m)

Fig. 4 Equivalent nephograms of vertical displacement of surrounding rock (unit: m)

图6为扩挖支护厚度为0、20、30、40、50、60 cm 工况下特征点B、C、D的水平位移变化图。其中,特征点B水平位移变化规律随着扩挖支护厚度的增加呈现出平滑的渐减趋势,直至接近于0;特征点C水平位移则由正值逐渐变化为负值且逐渐增大;特征点D水平位移在扩挖支护厚度由0到20 cm 期间呈大幅减小,而在20~60 cm 期间基本保持不变。

总体而言,扩挖支护的设置使得初期支护竖向位移最大缩减50%,水平位移缩减90%左右,进而基本可得出扩挖支护结构对初期支护结构的竖向及水平向变形起到了很好的控制作用。

### 3.2 扩挖支护对初期支护结构变形的影响

初期支护和扩挖支护在不同扩挖支护厚度下的最大变形量如图7所示。从统计图可以得出:随着扩挖支护的设置,初期支护与扩挖支护结构的最大变形量均呈现出平稳的下降趋势,其中初期支护结构的最大变形减小量为8.8%,扩挖支护最大变形减小量为4.4%左右。

### 3.3 扩挖支护对初期支护受力的影响

图8和图9分别为各特征点在不同扩挖工况下的竖向压力和水平压力变化图。由试验结果可以得出:各特征点竖向及水平压力呈现基本相同的变化规律,

当扩挖支护厚度由 0 到 20 cm 时变化幅度最大(竖向及水平压力减小幅度均在 30% 左右),而当扩挖支护厚度由 20 cm 到 60 cm 期间变化时,各特征点竖向压力变化趋于平稳且幅度较小(竖向及水平向相邻工况减小幅度均在 10% 左右)。总体而言,竖向及水平向压力最大缩减幅度均为 70% 左右,因而可基本说明扩挖支护对于初期支护受力具有明显的改善作用。

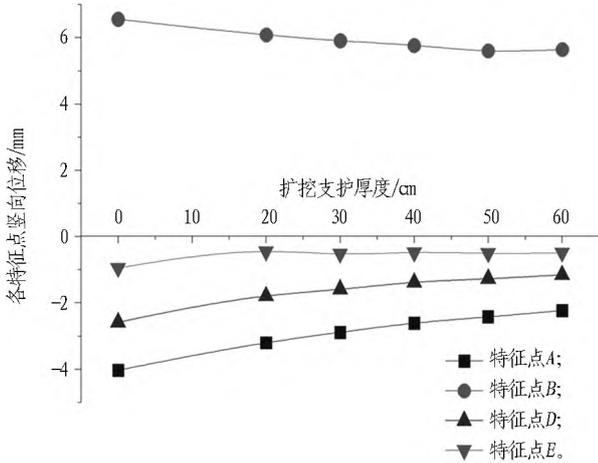


图 5 各特征点竖向位移曲线

Fig. 5 Vertical displacement curves of characteristic points

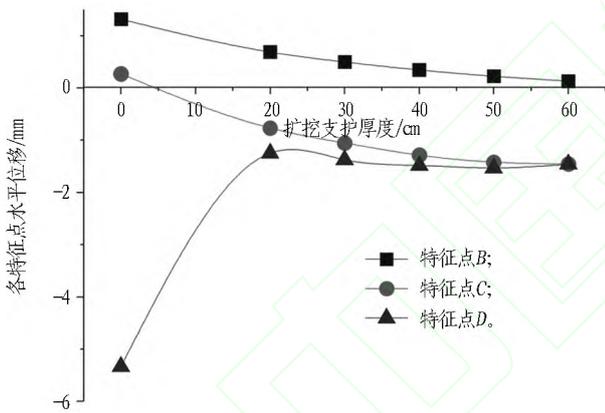


图 6 各特征点水平位移曲线

Fig. 6 Horizontal displacement curves of characteristic points

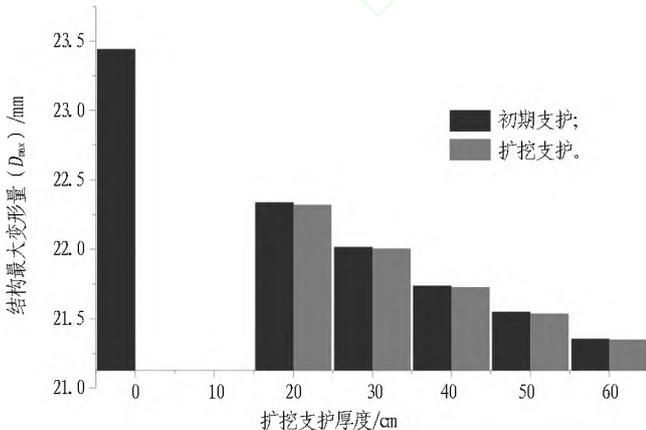


图 7 初期支护和扩挖支护结构最大变形量

Fig. 7 Maximum deformation of primary support and expanding lining

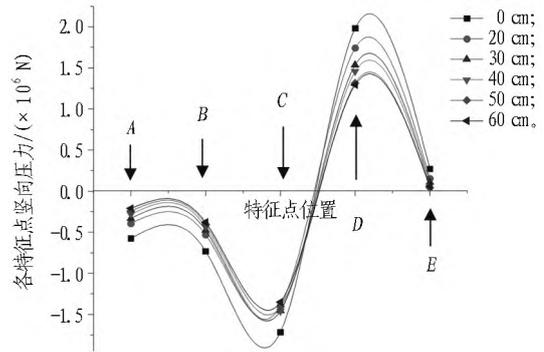


图 8 不同扩挖支护厚度下各特征点竖向压力曲线

Fig. 8 Vertical pressure curves of characteristic points under different expanding lining thicknesses

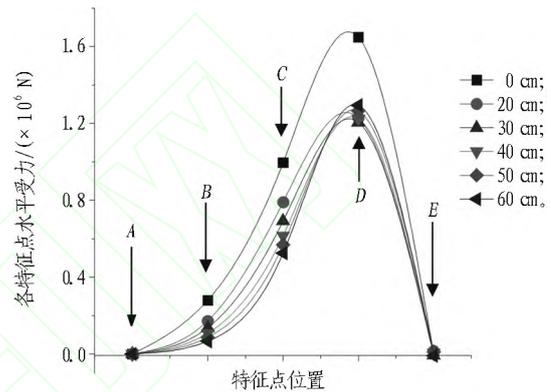


图 9 不同扩挖支护厚度下各特征点水平压力曲线

Fig. 9 Horizontal pressure curves of characteristic points under different expanding lining thicknesses

### 3.4 扩挖支护与初期支护结构压应力的相互影响

#### 3.4.1 主压应力结果分析

初期支护和扩挖支护在各工况下的主压应力曲线如图 10 所示。由图可知:采用扩挖支护措施后,初期支护的主压应力呈现出平稳快速的下降趋势,直到下降至最终合理强度值 16.4 MPa,小于 C25 混凝土的抗压强度标准值 16.7 MPa。同时,扩挖支护强度呈现出逐渐减小的趋势,且整个强度变化过程均在 C30 混凝土的抗压强度标准值 20.1 Mpa 范围内。初期支护压应力云图见图 11。

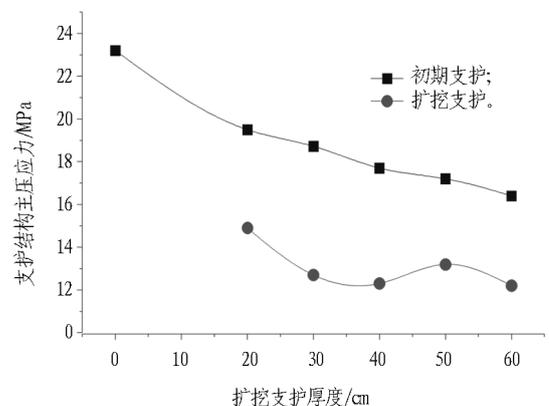


图 10 初期支护和扩挖支护结构主压应力曲线

Fig. 10 Principal compressive stress curves of primary support and expanding lining

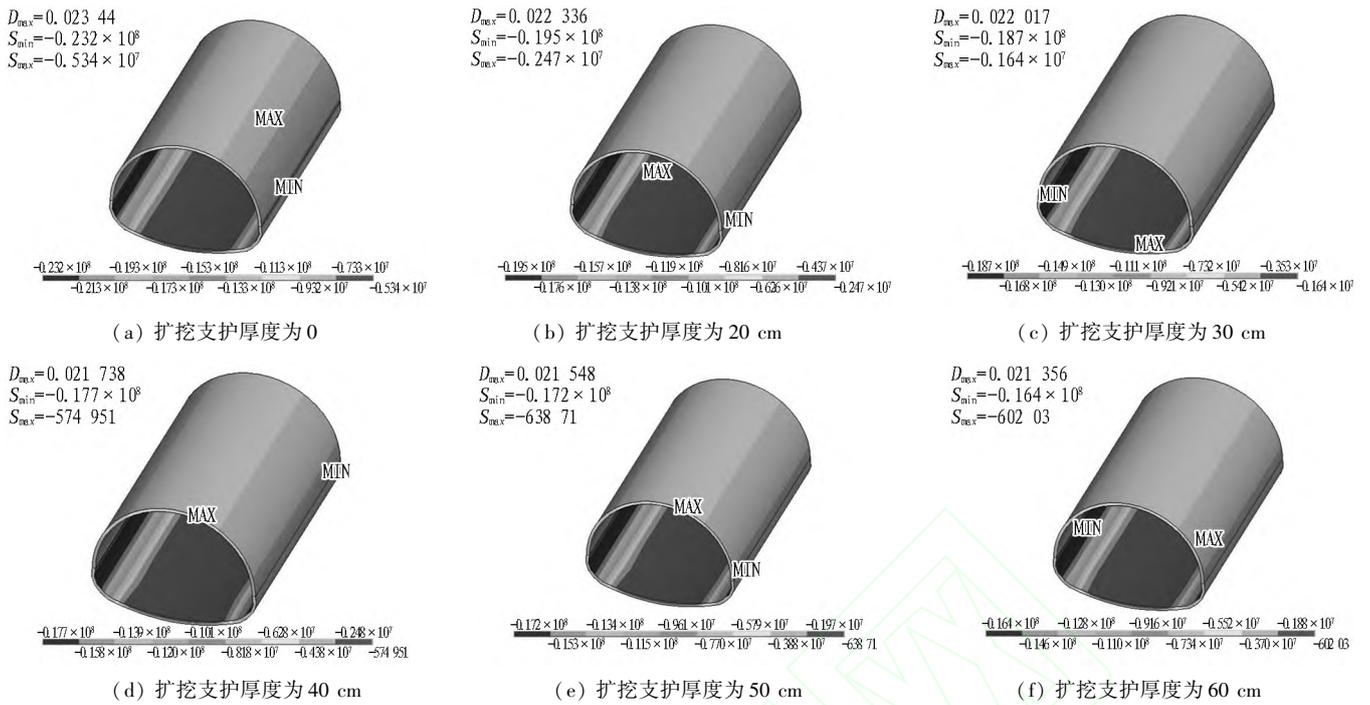


图 11 初期支护压应力云图(单位: Pa)

Fig. 11 Nephograms of compressive stress of primary support (unit: Pa)

### 3.4.2 主拉应力结果分析

初期支护和扩挖支护在各工况下的主拉应力曲线如图 12 所示。由图可知:二者结构的主拉应力均随着扩挖支护厚度的增加呈现出逐步减小的趋势,而在扩挖支护厚度为 40 cm 和 50 cm 时出现突变,同时二者结构的拉应力整体均在其抗拉强度标准值(初期支护为 1.78 MPa,扩挖支护为 2.01 MPa)范围内变动,且均降低至较低水平(初期支护拉应力降至 0.486 03 MPa,扩挖支护拉应力降至 0.748 53 MPa),因而可以得出,扩挖支护可较好地改善结构整体的抗拉强度情况。初期支护拉应力云图见图 13。

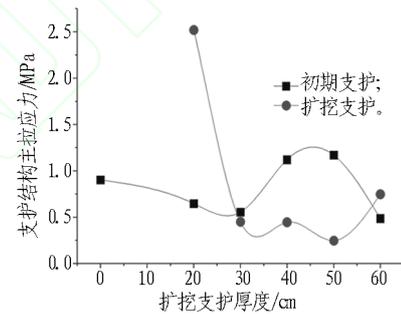


图 12 初期支护和扩挖支护结构主拉应力曲线

Fig. 12 Principal tensile stress curves of primary support and expanding lining

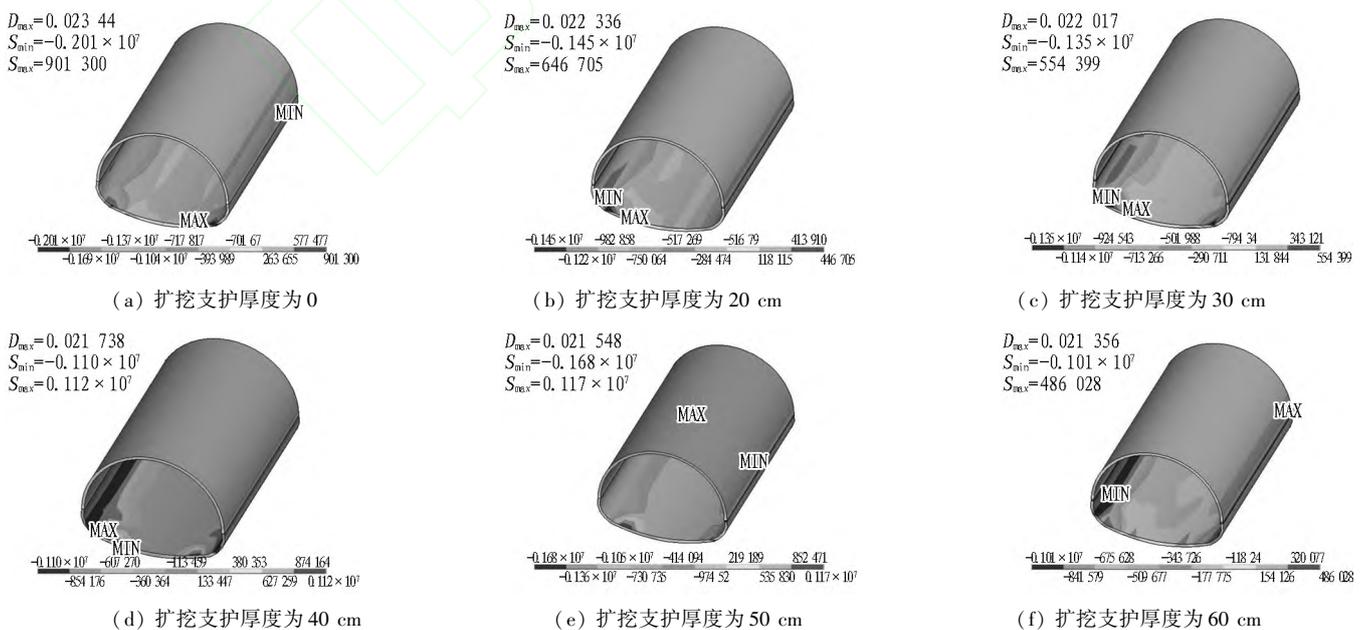


图 13 初期支护拉应力云图(单位: Pa)

Fig. 13 Nephograms of tensile stress of primary support (unit: Pa)

#### 4 结论与讨论

1) 扩挖支护对于软弱围岩开挖后的变形可起到良好的抑制作用,且随着扩挖支护厚度的增大其作用不断增强。刚度较大的扩挖支护一方面充分承受了围岩荷载,另一方面又保护了柔性的初期支护,起到了较好的过渡作用。初期支护与扩挖支护二者相结合在软弱围岩支护承载中作用显著。

2) 本文依托梅州至大埔高速公路山子顶公路隧道施工过程中遇到的软弱围岩大变形及侵限的实际工程问题进行隧道软弱围岩扩挖支护研究。当扩挖支护厚度达到 60 cm 时,初期支护混凝土的主压应力强度为 16.4 MPa,主拉应力强度为 0.486 03 MPa,满足 C25 混凝土强度标准。同时,扩挖支护的主压应力强度为 12.2 MPa,主拉应力强度为 0.748 53 MPa,也满足其材料强度要求。因而山子顶公路隧道可采用该方案进行隧道施工优化。

3) 通过对比分析 0、20、30、40、50、60 cm 厚的 6 种 C30 混凝土扩挖支护工况,得出扩挖支护措施具有以下作用:对于隧道开挖后拱顶处软弱围岩最大变形抑制率为 50% 左右;初期支护承载环各部位的竖向位移值最大缩减 50% 左右,水平位移值最大缩减 90% 左右;初期支护最大变形量减小最大幅度为 10% 左右;初期支护所承受的水平及竖直围岩压力最大减小 70% 左右;初期支护结构的最大压应力减小幅度最大为 30% 左右,最大拉应力减小幅度最大为 50% 左右。因此扩挖支护对于软弱围岩隧道或将是一种非常有效、实用的支护方式,同时也有效论证了本研究所提出的山子顶隧道施工优化方案切实可行。

4) 本文只针对扩挖支护及初期支护成环后的力学性能进行了分析,而对于考虑施工步及围岩压力释放率条件下的支护结构位移特性,将在后续工作中进行下一步研究。

#### 参考文献(References):

[1] 关宝树,赵勇. 软弱围岩隧道施工技术[M]. 北京:人民交通出版社,2011.  
GUAN Baoshu, ZHAO Yong. Construction technology of soft rock tunnel[M]. Beijing: China Communications Press, 2011.

[2] 王迎超. 公路隧道软弱围岩塌方机理及预测方法[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,2015.  
WANG Yingchao. Failure mechanism and prediction method of weak surrounding rock in highway tunnel[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2015.

[3] HACKL Enrich. Experiences from the construction of the Tauern Tunnel[J]. Rock Mech Felsmech Mec Roches,

1974, 6(2): 90.

- [4] BURGER Daniela, KOHLBOCK Bernhard, SCHOITSCH Christain. Geotechnics and mass balance of the earthworks for the second tube of Tauern Tunnel[J]. Geomechanik und Tunnelbau, 2010, 3(4): 391.
- [5] AYAYDIN Nejad. First and second tube of the Tauern Tunnel[J]. Geomechanik und Tunnelbau, 2010(4): 334.
- [6] JOHN M. Construction of the Arberg Expressway Tunnel Tube-3[J]. Tunnels and Tunneling International, 1980, 12(5): 42.
- [7] JOHN M. Construction of the Arberg Expressway Tunnel Tube-4[J]. Tunnels and Tunneling International, 1980, 12(6): 66.
- [8] NAGATOMO Shgeki, KOBAYASHI Kazuo, YANO Toshiaki, et al. Completion of Enasan Tunnel[J]. Journal of the Japan Society of Civil Engineering, 1975, 60(3): 9.
- [9] 张祉道. 家竹箐隧道施工中支护大变形的整治[J]. 世界隧道, 1997(1): 7.  
ZHANG Zhidao. Renovation of large deformation in support of Jiazhuqing Tunnel construction [J]. World Tunnelling, 1997(1): 7.
- [10] 符华兴. 强挤压围岩隧道施工支护技术的商榷[J]. 隧道建设, 2003, 23(1): 19.  
FU Huaxing. Discussion on construction support technology of strong squeeze of surrounding rock tunnel [J]. Tunnel Construction, 2003, 23(1): 19.
- [11] 柴瑞峰,王才高. 乌鞘岭特长隧道大变形围岩段施工技术[J]. 铁道建筑, 2005(12): 38.  
CHAI Ruifeng, WANG Caigao. Construction technique in large-deformed surrounding rock section of Wushaoling ultra-long tunnel [J]. Railway Engineering, 2005(12): 38.
- [12] 赖金星,牛方园,樊浩博,等. 浅埋黄土隧道三层支护结构力学特性现场测试[J]. 岩土力学, 2015, 36(6): 1769.  
LAI Jinxing, NIU Fangyuan, FAN Haobo, et al. Field test of mechanical characteristics of three-layer support structure of shallow loess tunnel [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(6): 1769.
- [13] 时常悦. 软弱围岩隧道大变形控制技术研究[D]. 西安:长安大学,2014.  
SHI Changyue. Study of large deformation control of weak surrounding rock in tunnel [D]. Xi'an: Chang'an University, 2014.
- [14] 覃维. 隧道支护侵限机理分析及换拱方案优化研究[D]. 西安:长安大学,2013.  
QIN Wei. Analysis of intrusion mechanism of tunnel support and optimized scheme for exchanging tunnel arch [D]. Xi'an: Chang'an University, 2013.