

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2023.05.031

# 国标和欧标工字钢在隧道初期支护结构中的可替代性案例研究

林波,谢文博,许修亮,刘磊

(保利长大海外工程有限公司,广东 广州 510623)

**摘要:**在不同标准体系下寻找可供替代的钢材以保证工程项目的有序推进,是海外土木工程施工领域需要面临的工程问题。为了评估欧标 IPE 200 工字钢和国标 I20a 工字钢在隧道初期支护结构中的可替代性,首先建立了隧道初期支护结构力学模型,利用实测的试验数据对模型参数进行标定,从而获取两种工字钢对应的初期支护结构内力的解析解。进一步地,将弯矩、轴力和剪应力作为评价指标,对比分析两种工字钢在隧道初期支护结构中的可替代性。研究结果表明:将两种工字钢互换之后,初期支护结构内力的分布规律并未发生改变,只是在数值上产生了可接受的倍数关系。将国标 I20a 工字钢替换为欧标 IPE200 工字钢时,需要保证拱顶和拱脚处的施工质量,必要时可辅助一定的加强措施。

**关键词:**隧道工程;可替代性;对比研究;工字钢;力学模型

**中图分类号:**U455

**文献标志码:**A

## 0 引言

随着“一带一路”倡议的稳步推进,中国施工企业凭借自身优势在共建国家开展了大量的交通基础设施建设,一批具有代表性的铁路、公路、港口、机场和跨境桥梁等项目的建设为促进区域互联互通注入了强劲动力,采用中国标准进行建设的土木工程设施也在共建国家多点开花。中国过剩的产能和低廉的价格以及快速的供应能力使得承包商更倾向于在中国完成建筑钢材的采购,再通过海运的方式发运至项目所在国的项目部。这一供应链通常需要跨越不同的经济制度和气候区域,极易受到供货周

期、海运途径、清关方式以及天气等不确定因素的影响。在这一背景下,采用中国标准设计的建筑材料能否正常供应至项目所在国,或者在项目所在国寻求可以替换国标的建筑材料,将成为制约工程建设进度的关键因素。因此,在不同标准体系下寻找可互相替代的钢材成为工程师的研究课题,也是保证项目顺利实施的安全储备。

一些学者根据海外施工经验,对不同体系下钢材的可替代性进行了研究。卢家森<sup>[1]</sup>对国标 Q345GJ-B 钢材替换欧共体标准 S355JR 钢材的技术可行性进行了探讨;沈擎<sup>[2]</sup>系统地对比了中标、美标和欧标体系下钢结构柱脚材料的选用、设计要求以及计算公式的不同;何彦舫等<sup>[3]</sup>对比分析了国标和美

[14] 沈向前,陈道云,郑超.隧道掌子面预应力锚杆支护作用效果研究[J].中外公路,2023,43(2):150-156.

[15] 赵立财.山岭隧道注浆锚杆布置规律研究[J].中外公路,2023,43(1):173-177.

[16] 王小林,黄彦波.中外高地应力软岩隧道大变形工程技术措施对比分析:以兰渝铁路木寨岭隧道与瑞士圣哥达基线隧道为例[J].隧道建设(中英文),2018,38(10):1621-1629.

[17] 祁宝贵.软弱围岩隧道变形特性及控制措施[J].铁道建筑,2019,59(10):80-83.

[18] 肖红武.隧道玻璃纤维锚杆全断面预加固机理与应用[J].现代隧道技术,2019,56(5):163-169.

[19] 田佳,李金鹏.软弱围岩地层隧道大断面机械化施工工法应用[J].隧道建设(中英文),2018,38(8):1350-1360.

[20] 展宏跃.重载铁路隧道穿越富水砂层综合施工技术研究[J].铁道标准设计,2017,61(4):111-116.

收稿日期:2023-01-13

作者简介:林波,男,博士,工程师.E-mail:linboyhit@163.com

标工字钢在化学成分、屈服强度、抗拉强度、延伸率和冷弯性能等物理、力学性能方面的差异,提出了替代性建议;赵建国等<sup>[4]</sup>介绍了采用国标钢材替换欧标钢材的原则、方案及相关设计要点,认为替换后的结构验算工作是必要的,且需注意欧标与国标在设计上的差异。总体而言,采用化学成分和材料基本力学参数作为评价指标,对不同标准的钢材进行横向对比,从而判断二者是否具有可替代性,是目前常用的研究思路。由于未能将钢材纳入到混凝土结构体系中进行综合考虑,这种研究思路仅实现了钢材可替代性的初步性验证。要进一步判定钢材在隧道工程中的可替代性,需要以钢材-混凝土复合结构的力学性能为依据进行综合判定。

一批研究成果报道了隧道初期支护结构与围岩的力学关系。文竞舟等<sup>[5]</sup>基于地基曲梁力学模型,利用推导的隧道复合初期支护内力解析式和现场实测数据,系统地研究了隧道支护结构的内力分布;孙闯等<sup>[6]</sup>基于Mohr-Coulomb应变软化模型,将收敛-约束法应用于高应力软岩巷道围岩-支护相互作用分析中,构建典型支护结构特征曲线;张德华等<sup>[7]</sup>系统开展了型钢钢架与格栅钢架在高地应力软岩隧道支护中的适应性研究;赖金星等<sup>[8]</sup>从支护受力的空间分布、时间分布、计算方法以及对比验证等方面,对软弱黄土隧道围岩与初支接触压力进行了系统的研究;李磊等<sup>[9]</sup>利用现场试验监测了钢架的内力时程曲线,从而确定了初期支护中钢架的支护形式;谷拴成等<sup>[10]</sup>推导了复合衬砌应力与变形表达式,分析了隧道围岩蠕变过程中支护结构受力特点及不同初期支护强度下二次衬砌的受力变化规律;Luo等<sup>[11]</sup>的研究表明,陕北某隧道的初期支护结构以受压为主,应力分布基本呈双侧对称性,拱部的应力分布比较均匀且较大,而仰拱处的应力相对较小。总体而言,上述研究成果对于认识隧道开挖过程中初期支护结构的力学特征大有裨益,但这些研究的对象仍然局限于同一个标准体系,目前尚未见文献报道来评估不同标准体系下钢材在隧道工程中的可替代性。

本文以某隧道初期支护结构为研究对象,以隧道初期支护结构力学模型作为分析手段,研究了国标和欧标体系下两种工字钢在初期支护结构中的力学表现,从而评估二者的可替代性。

## 1 隧道初期支护结构力学模型

对于围岩条件较差的隧道,初期支护结构是隧道开挖之后围岩应力重分布的主要承载结构。据孙明社等<sup>[12]</sup>的研究,某Ⅳ级围岩隧道的二次衬砌结构在拱顶和拱肩位置上承担了13%~15%的围岩压力,说明初期支护结构和围岩松动圈共同承担了85%~87%的围岩压力。可见,初支结构是保证开挖隧道稳定性、控制围岩松动变形的重要构筑物。初期支护结构通常由喷射混凝土、钢筋网、钢拱架和锚杆等组成,其中钢拱架是隧道初期支护结构中的主要受力构件,通常由工字钢或者钢格栅搭建而成。

考虑到隧道围岩开挖之后很短的时间内初期支护结构即被施作,可认为隧道围岩和初期支护结构的变形具有同步性。在仰拱未施作之前,初期支护结构的脚部位被固定,但未封闭成环,同时承担着围岩的松动压力。这一受力状态可用弹性地基曲梁理论<sup>[13]</sup>进行解释,即将初期支护结构假设为弹性地基曲梁,围岩假定为弹性地基,二者之间的相互作用假定为地基反力,且方向垂直于曲梁表面。运用该假设即可建立隧道初期支护结构的力学分析模型。

### 1.1 初期支护结构的微分方程

本文研究的目的是在边界输入条件一致的前提下评估两种工字钢的可替代性。因此,为了简化计算过程,暂不将钢筋网、系统锚杆纳入考察范畴,将初期支护结构假定为喷射混凝土和工字钢的复合结构,且各段工字钢之间为无缝搭接,简化示意图如图1(a)所示。初期支护结构近似为圆弧,内径和外径分别为 $r_0$ 和 $r_1$ ,则支护结构的中心半径为 $r_i=(r_0+r_1)/2$ 。

利用图1(b)所示的微分单元进行受力分析。 $p$ 为围岩地基反力, $M$ 为弯矩, $N$ 为轴力, $Q$ 为剪力, $d\varphi$ 为圆心角。各力的方向以图示方向为准。

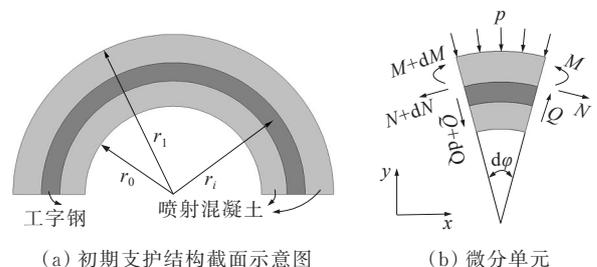


图1 初期支护结构计算简图

根据静力平衡条件,微分单元在径向上的平衡方程为:

$$\begin{aligned} Q - (Q + dQ) \cos d\varphi + p dx - \\ (N + dN) \sin d\varphi = 0 \end{aligned} \quad (1)$$

在切向上的平衡方程为:

$$N - (N + dN) \cos d\varphi - (Q + dQ) \sin d\varphi = 0 \quad (2)$$

力矩平衡方程为:

$$M - (M + dM) + (Q + dQ) dx - \frac{1}{2} p dx \cdot dx = 0 \quad (3)$$

本文采用 Winkle 假设,认为围岩的抗力系数为  $c$ ,则围岩地基反力  $p$  与隧道初期支护结构在垂直平面内的径向位移  $y$  成正比,即:

$$p = 2r_1cy \quad (4)$$

考虑到  $\cos d\varphi \approx 1$ ,  $\sin d\varphi \approx d\varphi$ ,  $dx = r_i d\varphi$ , 将式(1)、(2)和式(4)联立消去  $d\varphi$ , 简化为:

$$2r_1cy - \frac{N}{R} = \frac{d^2M}{dx^2} \quad (5)$$

同理,联立式(2)、(3),消去  $d\varphi$ , 简化为:

$$\frac{dN}{dx} = \frac{1}{r_i} \frac{dM}{dx} \quad (6)$$

将式(5)对  $x$  求导,再联合式(6)得到:

$$2r_1c \frac{dy}{dx} - \frac{1}{r_i^2} \frac{dM}{dx} = \frac{d^3M}{dx^3} \quad (7)$$

考虑到工字钢和喷射混凝土的弹性模量相差较大,一些研究<sup>[5,14]</sup>将初期支护结构的截面内力拆分为压力和拉力两个部分。本文根据研究的需要,暂不做这种区分,将初期支护结构的径向变形与力之间的关系写成<sup>[15]</sup>:

$$\frac{d^2y}{dx^2} + y = \frac{Mr_i^2}{EI} + \frac{Nr_i}{EA} \quad (8)$$

式中: $E$ 和 $I$ 分别为初期支护结构的弹性模量和惯性矩; $A$ 为单位长度初期支护结构的纵截面面积。

将式(8)对  $x$  求三阶导数,并联合式(7)得到:

$$\frac{d^5y}{dx^5} + \frac{d^3y}{dx^3} - \frac{2r_i^2r_1c}{EI} \frac{dy}{dx} = -\frac{1}{EI} \frac{dM}{dx} + \frac{r_i}{EA} \frac{d^3N}{dx^3} \quad (9)$$

将式(8)对  $x$  求一阶导数,代入式(9)得到:

$$\begin{aligned} \frac{d^5y}{dx^5} + 2 \frac{d^3y}{dx^3} + \left(1 - \frac{2r_i^2r_1c}{EI}\right) \frac{dy}{dx} = \\ \frac{(r_i^2 - 1)}{EI} \frac{dM}{dx} + \frac{r_i}{EA} \left(\frac{d^3N}{dx^3} + \frac{dN}{dx}\right) \end{aligned} \quad (10)$$

利用  $x = \varphi r_i$  及式(1)、(2)、(3),式(10)转换成:

$$\frac{d^5y}{d\varphi^5} + 2 \frac{d^3y}{d\varphi^3} + \eta^2 \frac{dy}{d\varphi} = 0 \quad (11)$$

式中: $\eta^2 = 1 + Kr_1 \left( \frac{r_i^3}{E_c I} + \frac{r_i}{E_c A} \right)$ 。

式(11)即为隧道初期支护结构径向位移  $y$  的微分方程。

## 1.2 微分方程的解析解

求解式(11)的五阶常系数微分方程。令  $y = e^{\lambda\varphi}$ , 则其特征方程为:

$$\lambda^5 + 2\lambda^3 + \eta^2\lambda = 0 \quad (12)$$

式(12)的根为:

$\lambda_1 = 0$ ,  $\lambda_{2,3} = \alpha \pm \beta i$ ,  $\lambda_{4,5} = -(\alpha \pm \beta i)$ 。其中  $\alpha = \sqrt{(\eta - 1)/2}$ ,  $\beta = \sqrt{(\eta + 1)/2}$ ,  $i^2 = -1$ 。则式(11)的通解可写成:

$$y = C_0 + C_1 \text{ch}(\alpha\varphi) \cos(\beta\varphi) + C_2 \text{sh}(\alpha\varphi) \cos(\beta\varphi) + C_3 \text{ch}(\alpha\varphi) \sin(\beta\varphi) + C_4 \text{sh}(\alpha\varphi) \sin(\beta\varphi) \quad (13)$$

式中: $C_0, C_1, C_2, C_3, C_4$ 为积分常数。

考虑到初期支护结构沿着  $\varphi = 0$  的竖直轴具有对称性,可假设其承受的荷载也具有对称性,即有  $C_2 = C_3 = 0$ ,式(13)可简化为:

$$y = C_0 + C_1 \text{ch}(\alpha\varphi) \cos(\beta\varphi) + C_4 \text{sh}(\alpha\varphi) \sin(\beta\varphi) \quad (14)$$

联立式(2)、(5)、(8)以及式(14)可得到弯矩  $M$ 、轴力  $N$ 、剪力  $Q$  的表达式为:

$$M = -Kr_1C_0 - C_1D \text{sh}(\alpha\varphi) \sin(\beta\varphi) + C_4D \text{ch}(\alpha\varphi) \cos(\beta\varphi) \quad (15)$$

$$N = [(Kr_1B_1 + 1)C_0 + C_1(B_1D - 2\alpha\beta) \text{sh}(\alpha\varphi) \cdot \sin(\beta\varphi) + C_4(B_1D - 2\alpha\beta) \text{ch}(\alpha\varphi) \cos(\beta\varphi)] / B_2 \quad (16)$$

$$Q = T \{ C_1 [ A_1 \text{sh}(\alpha\varphi) \cos(\beta\varphi) + A_2 \text{ch}(\alpha\varphi) \cdot \sin(\beta\varphi) ] + C_4 [ A_1 \text{ch}(\alpha\varphi) \sin(\beta\varphi) - A_2 \text{sh}(\alpha\varphi) \cos(\beta\varphi) ] \} \quad (17)$$

式中: $A_1 = \alpha^3 - 3\alpha\beta^2 + \alpha$ ;  $A_2 = \beta^3 - 3\alpha^2\beta - \beta$ ;  $B_1 = r_i/(EA)$ ;  $B_2 = r_i^2/(EI)$ ;  $D = T(A_2\alpha - A_1\beta)$ ;  $T = 1/[r_i^3/(EI) + r_i/(EA)]$ ;  $C_0, C_1, C_4$ 是与支护结构有关的材料参数。

式(15)~(17)即为初期支护结构上任意一点的弯矩、轴力和剪力的解析解。当支护结构形式确定

时,其任意点上的内力也是明确的。

## 2 工程应用及分析

### 2.1 工程背景

某海外隧道项目的设计和建造均采用中国标准,其中初期支护的钢拱架型号为国产 I20a 工字钢。通过在项目所在地进行地材调查发现,I20a 工字钢很难在项目所在国找到稳定货源,如从中国采购不仅增加供货周期,而且会增加运输成本,使得项目工期变得不可控。经调查发现,与国标 I20a 型号工字钢在化学成分含量、形状和强度上均近似的工字钢型号为欧标 IPE 200。两种工字钢的参数如图 2 和表 1 所示。总体而言,IPE 200 工字钢的高度和腿宽度与

I20a 工字钢完全一致,说明二者外轮廓相同,具有初步可替代性。进一步地,在腰宽度、平均宽度、内弧半径、截面面积以及理论质量等参数上,IPE 200 工字钢均比 I20a 工字钢略小,但是 IPE 200 工字钢的屈服强度达到 327 MPa,是 I20a 工字钢的 1.4 倍,使得以力学参数作为隧道结构设计的重要指标时,两种工字钢的可替代性值得进一步研究。

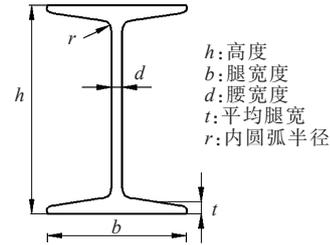


图 2 工字钢尺寸规格

表 1 两种工字钢参数对比

型号	尺寸/mm					材质	截面面积/cm <sup>2</sup>	理论质量/(kg·m <sup>-1</sup> )	屈服强度/MPa
	<i>h</i>	<i>b</i>	<i>d</i>	<i>t</i>	<i>r</i>				
I20a	200	100	7.0	11.4	9	Q235B	35.55	27.91	235
IPE 200	200	100	5.6	8.5	12	S355JR	28.50	22.40	327

本文以隧道初期支护结构上的内力作为研究对象,通过建立初期支护结构解析解方程,利用实测数据对方程参数进行标定,再采用弯矩、轴力和剪力作为力学评价指标,进一步考察 IPE 200 工字钢和 I20a 工字钢的可替代性。

### 2.2 材料参数的确定

本项目隧道为浅埋隧道,围岩为 V 级。采用三台阶法开挖,初期支护结构厚度 26 cm,为喷射混凝土、锚杆、钢筋网和工字钢的复合结构。将上台阶近似看成半圆(图 1),则隧道中心半径  $r_0$  为 530 cm,开挖半径  $r_1$  为 556 cm。V 级围岩抗力系数  $c$  可取为 70 MPa/m。

计算过程中,考虑到安全储备,本文暂不考虑钢筋网和锚杆,将初期支护结构简化成喷射混凝土和工字钢的复合结构。按照等效原理,该复合结构的弹性模量理应由混凝土和工字钢按照一定的比例累加而成。假设等效之后初期支护结构的弹性模量为  $E$ ,喷射混凝土的弹性模量为  $E_0$ ,工字钢的弹性模量为  $E_s$ 。 $E$  的计算式为:

$$E = E_0 + \frac{S_s E_s}{S_c} \quad (18)$$

式中: $S_c$ 为混凝土面积; $S_s$ 为工字钢的面积。

考虑到相邻钢拱架间距为 80 cm,取初期支护结构单元的长度为 80 cm,厚度为 26 cm,如图 3 所示。C25 混凝土弹性模量为 28 GPa。两种工字钢弹性模量均取为 206 GPa。代入式(18)即可得到两种工字钢对应的初期支护结构的弹性模量取值。

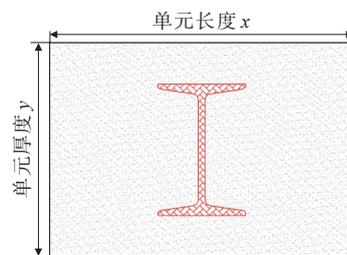


图 3 支护结构简图

利用式(15)、(16)、(17)求解支护结构的内力评价指标,需要对材料参数  $C_0$ 、 $C_1$ 、 $C_4$  进行标定。考虑到支护结构中喷射混凝土和钢拱架共同承担围岩压力,二者的变形也具有同步性,即有:

$$\frac{\sigma_c}{E_c} = \frac{\sigma_s}{E_s} \quad (19)$$

式中: $\sigma_c$ 、 $\sigma_s$ 分别为混凝土和钢拱架的应力; $E_c$ 、 $E_s$ 分

别为混凝土和钢拱架的弹性模量。

将初期支护结构作为考察对象,其轴力  $N$  的表达式可写成:

$$N = \sigma_c S_c + \sigma_s S_s \quad (20)$$

将式(19)代入,可得初期支护结构上轴力  $N$  的计算式为:

$$N = \sigma_s \left( A_s + \frac{E_c}{E_s} A_c \right) \quad (21)$$

利用式(21)由钢拱架上的切向应力即可反算得到支护结构的轴力,而钢拱架上切向应力可由应力计测得。通过在钢拱架上不同位置埋设应力计,可监测开挖过程中钢拱架不同位置上的应力值,将其代入式(21)即可获得初期支护结构在不同位置上的切向应力,联立式(15)、(16)、(17)即可确定材料参数  $C_0$ 、 $C_1$ 、 $C_4$  的取值,继而得到初期支护结构上任意一点的弯矩、轴力和剪力的解析解。

为了安装方便,应力计预先利用钢筋搭接并焊接于工字钢顶面,工字钢完成拼装之后,将数据线沿着工字钢引至上台阶脚部,方便后期数据采集。将应力计安装点和隧道中心点之间连线,读取该线与隧道中心线之间的夹角记为  $\varphi_1$ 、 $\varphi_2$ 、 $\varphi_3$ 。应力计的分布如图4所示。

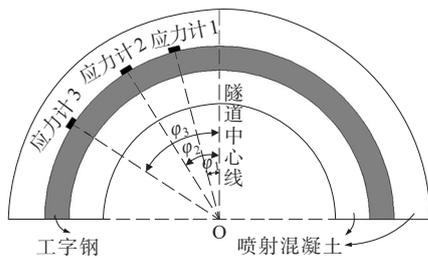


图 4 应力计的分布图

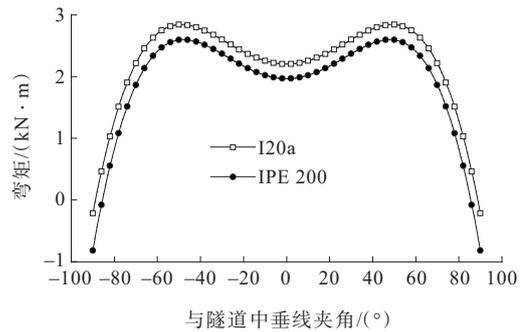
初期支护喷射混凝土施工后 6 h,混凝土初期强度形成,测取各个应力计的读数。本文为标定采用 I20a 工字钢和 IPE 200 工字钢作为支护结构的材料参数,分别针对两种情况埋设了相应的应力计。两种工况下测得的钢拱架应力以及计算得到的材料参数取值如表 2 所示。

2.3 计算结果及分析

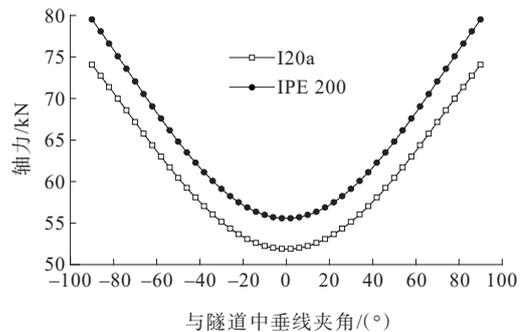
将相关参数代入上文建立的隧道初期支护力学模型进行求解,得到支护结构上各点弯矩、轴力和剪力的取值,结果如图5所示。

表 2 实测钢拱架应力及材料参数

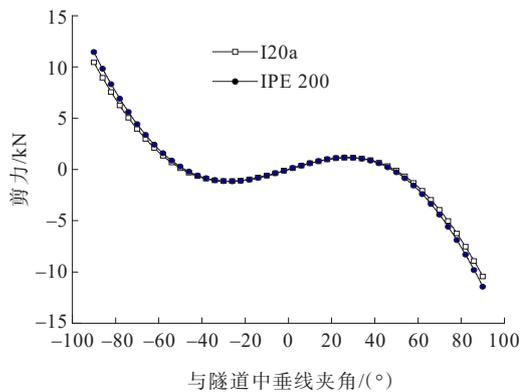
工字钢型号	与隧道中垂线夹角/(°)	钢拱架应力实测值/kPa	材料参数/ $10^{-4}$
I20a	11.4	-93.1	$C_0 = -4.8$
	39.4	-113.1	$C_1 = 6.3$
	78.6	-59.2	$C_4 = -2.2$
IPE 200	12.5	-86.3	$C_0 = -5.3$
	40.2	-107.1	$C_1 = 6.8$
	76.3	-53.7	$C_4 = -2.4$



(a) 弯矩分布图



(b) 轴力分布图



(c) 剪力分布图

图 5 隧道初期支护结构的内力分布图

由图5可知:

(1) 作为初期支护结构中的重要组成部分,两种

工字钢对应的初期支护结构内力分布规律基本相同,但随着与隧道中垂线之间夹角逐渐增大,支护结构的弯矩、轴力和剪力的变化呈现出各自的趋势。

(2) 如图5(a)所示,两种工字钢对应的初期支护结构弯矩随着与隧道中垂线之间夹角逐渐增大,均表现出先增大随后迅速减小,转折点出现在 $50^\circ$ 夹角对应的拱肩区域。采用I20a工字钢时初期支护结构在拱顶处的弯矩约为IPE 200工字钢的1.09倍,这是一个相对较小的倍数关系。

(3) 如图5(b)所示,两种工字钢对应的支护结构轴力均随着夹角的增大而增大,表明如将两种工字钢进行互换,初期支护结构轴力的分布规律并未改变。进一步地,IPE 200工字钢对应的初期支护结构轴力约是I20a工字钢的1.07倍,是一个相对较小的倍数关系。这种现象表明:采用IPE 200工字钢时,初期支护结构将承担更多的围岩压力。为了保险起见,采用IPE 200工字钢替换I20a工字钢时,应该保证拱顶和拱脚处的施工质量,尤其是锁脚锚杆的施工质量,确保二衬支护结构具备足够的抗弯性能。

(4) 如图5(c)所示,剪力的演化趋势与角度和方向有关。随着与隧道中垂线之间夹角的逐渐增大,初期支护结构的剪力也经历了先增大随后快速减小的过程。以中垂线为参考,隧道两侧的剪力方向相反。采用IPE 200工字钢的初期支护结构,其剪力水平整体与I20a工字钢相当,在拱脚处存在可以忽略不计的差异。

### 3 结论

以某隧道初期支护结构为对象,研究国标和欧标体系下两种工字钢在二衬支护结构中的力学表现,从而评估二者的可替代性。得到以下结论:

(1) 建立的隧道初期支护结构力学模型,能够快速估算出不同位置上的结构内力分布情况,研究结论可供隧道工程的施工安全、质量和进度决策提供参考。

(2) 国标I20a工字钢和欧标IPE 200工字钢在截面面积和强度指标上各有优势,当以结构内力作为评价指标时,两种工字钢对应的初期支护结构内力分布规律相同,只是在数值上存在可接受的倍数关

系。后续可在更为具体的工况下进一步挖掘二者力学参数的差异性。

(3) 在隧道初期支护结构中,国标I20a工字钢可替换为欧标IPE 200工字钢,但需要保证拱顶和拱脚处的施工质量,必要时可增加拱顶处的剪力钢筋,增加拱脚处的锁脚锚杆,确保初期支护结构的拱顶具备足够的抗剪能力,拱脚处具备足够的抗弯性能。

### 参考文献:

- [1] 卢家森.一种可行的欧标钢材和国标钢材的替换方案[J].钢结构,2010,25(1):40-42.
- [2] 沈擎.中、美、欧钢结构柱脚连接构造及计算分析对比[D].郑州:河南工业大学,2014.
- [3] 何彦舫,陶自成.国际工程项目中美标准型钢产品替代研究[J].建筑钢结构进展,2016,18(3):74-80.
- [4] 赵建国,张海军,金凤诚.国标钢材替换欧标钢材的原则、方案及设计要点[J].钢结构,2013,28(10):31-35,38.
- [5] 文竞舟,张永兴,王成,等.钢拱架应力反分析隧道初期支护力学性能的研究[J].土木工程学报,2012,45(2):170-175.
- [6] 孙闯,张向东,李永靖.高应力软岩巷道围岩与支护结构相互作用分析[J].岩土力学,2013,34(9):2601-2607,2614.
- [7] 张德华,刘士海,任少强.高地应力软岩隧道中型钢与格栅支护适应性现场对比试验研究[J].岩石力学与工程学报,2014,33(11):2258-2266.
- [8] 赖金星,王开运,来弘鹏,等.软弱黄土隧道支护结构力学特性测试[J].交通运输工程学报,2015,15(3):41-51.
- [9] 李磊,谭忠盛,喻渝,等.成兰铁路千枚岩隧道初期支护形式试验研究[J].土木工程学报,2017,50(S1):19-24.
- [10] 谷拴成,黄荣宾,苏培莉.考虑隧道围岩蠕变的复合式衬砌受力规律[J].交通运输工程学报,2018,18(2):53-60.
- [11] LUO Y B, CHEN J X, SHI Z, et al. Mechanical characteristics of primary support of large span loess highway tunnel: A case study in Shanxi Province, Loess Plateau, NW China primary[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2020, 104: 103532.
- [12] 孙明社,马涛,申志军,等.复合式衬砌结构中衬砌分担围岩压力比例的研究[J].岩土力学,2018,39(S1):437-445.
- [13] 梁政.埋地管道对称水平弯头的弹性地基曲梁解[J].西南石油学院学报,1989,11(3):65-74.
- [14] 谢继安.大跨隧道初期支护机理及近接隧道施工对其力学特征的影响[D].重庆:重庆大学,2017.
- [15] 蔡晓鸿,蔡勇平.水工压力隧洞结构应力计算[M].北京:中国水利水电出版社,2004.