

陈丽俊, 张家瑞, 陈建勋, 等. 软弱围岩隧道初期支护承载力计算方法与参数综合比选[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2025, 45(4): 68-80.
CHEN Li-jun, ZHANG Jia-rui, CHEN Jian-xun, et al. Calculation method of bearing capacity and parameter comprehensive comparison for initial support of weak rock tunnels[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2025, 45(4): 68-80.

DOI:10.19721/j.cnki.1671-8879.2025.04.006

软弱围岩隧道初期支护承载力计算方法与 参数综合比选

陈丽俊¹, 张家瑞¹, 陈建勋¹, 刘瑞辉², 罗彦斌¹, 王传武¹

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 中交第一公路勘察设计研究院有限公司, 陕西 西安 710075)

摘要:针对型钢钢架-喷射混凝土是软弱围岩隧道初期支护的主要组成部分,但尚缺乏统一、完善的结构计算方法,造成支护设计存在盲目性的状况,给出型钢钢架-喷射混凝土初期支护的材料等效弹性模量和结构承载力计算方法;结合算例进行型钢钢架-喷射混凝土初期支护不同结构承载力计算方法的对比分析,并对不同支护方案的初期支护结构承载力与工程经济性进行综合对比。研究表明:3种方法(截面抗弯刚度等效、截面抗压刚度等效和同时考虑截面抗弯刚度与抗压刚度等效)所得型钢钢架-喷射混凝土初期支护等效弹性模量的最大相对误差约为6%;考虑型钢钢架翼缘对喷射混凝土的加强作用,将初期支护视为钢筋混凝土结构,或将型钢钢架-喷射混凝土初期支护完全视为型钢混凝土结构,该2种方法计算所得结构承载力相差约为9%;鉴于安全考虑,推荐采用将型钢钢架-喷射混凝土初期支护视为钢筋混凝土结构的承载力计算方法;若不考虑喷射混凝土强度增长过程,视型钢钢架与具有极限强度的喷射混凝土同步受荷,不同支护方案的初期支护承载力由大到小排序为 I25a、HW200、I22a、HW175、I20b、I20a、HW150;所需工程费用由大到小排序为 HW200、I25a、HW175、I22a、I20b、I20a、HW150;综合考虑结构承载力和工程经济性, I20a/b 钢架优于 HW175 钢架, I22a 钢架优于 HW200 钢架;对初期支护早期强度和刚度要求高的情况, HW175 钢架优于 I22a 钢架, HW200 钢架优于 I25a 钢架。

关键词:隧道工程;型钢钢架;承载力计算;喷射混凝土;初期支护

中图分类号:U452 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-8879(2025)04-0068-13

Calculation method of bearing capacity and comprehensive comparison of parameters for initial support of weak rock tunnels

CHEN Li-jun¹, ZHANG Jia-rui¹, CHEN Jian-xun¹, LIU Rui-hui²,
LUO Yan-bin¹, WANG Chuan-wu¹

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. China Communications Construction Company First Highway Consultants Co., Ltd., Xi'an 710075, Shaanxi, China)

Abstract: In view of the fact that the steel rib and shotcrete are the main components of the initial

收稿日期:2024-12-17

基金项目:国家重点研发计划项目(2024YFB2606100);国家自然科学基金重点项目(41831286)

作者简介:陈丽俊(1986-),男,山西运城人,副教授,工学博士,E-mail:chenlijun2004@126.com.

通信作者:陈建勋(1969-),男,陕西韩城人,教授,工学博士,E-mail:chenjx1969@chd.edu.cn.

support of weak surrounding rock tunnels, but there is still a lack of unified and perfect structural calculation methods, resulting in blind support design, this paper provided the calculation methods for the material equivalent elastic modulus and structural bearing capacity of the steel rib and shotcrete initial support. Combined with the calculation examples, the comparative analysis of different structural bearing capacity calculation methods for steel rib and shotcrete initial support was carried out. The bearing capacity and engineering economy of the initial support structure with different support schemes were comprehensively compared. The results show that the maximum relative error of the equivalent elastic modulus of the initial support of the steel rib and shotcrete obtained by three methods (equivalent bending stiffness of the section, equivalent compressive stiffness of the section, and both equivalent bending stiffness and compressive stiffness of the section) is about 6%. Considering the reinforcement effect of steel rib flanges on shotcrete, the initial support is considered as a reinforced concrete structure, or considering the steel rib and shotcrete initial support as a steel reinforced concrete structure, the difference in the calculated structural bearing capacity between these two methods is about 9%. In view of safety considerations, it is recommended to use the bearing capacity calculation method of steel rib shotcrete initial support as reinforced concrete structure. If the strength growth process of shotcrete is not considered, the steel frame and shotcrete with ultimate strength are considered to be loaded synchronously, the bearing capacity of initial supports with different support schemes is ranked as I25a, HW200, I22a, HW175, I20b, I20a, and HW150. The order of required engineering costs is HW200, I25a, HW175, I22a, I20b, I20a, and HW150. Considering the structural bearing capacity and engineering economy, I20a/b steel rib is superior to HW175 steel rib and I22a steel rib is superior to HW200 steel rib. However, HW175 steel rib is superior to I22 steel rib and HW200 steel rib is superior to I25 steel rib for the tunnels with high requirements for early strength and stiffness. 10 tabs, 5 figs, 32 refs.

Key words: tunnel engineering; steel rib; bearing capacity calculation; shotcrete; initial support

0 引言

型钢钢架-喷射混凝土是软弱围岩隧道初期支护的主要组成部分^[1-4],其承担大部分甚至全部围岩压力,对于确保软弱围岩隧道施工安全与围岩稳定具有重要意义^[5-6]。以往隧道初期支护设计以工程类比法为主、结构计算为辅,但随着隧道工程持续发展,极端复杂地质情况不断涌现,依赖工程类比法进行隧道设计越来越不适当当前形势的需要。结构计算作为隧道结构设计的重要部分,其重要性不断凸显。

关于隧道型钢钢架-喷射混凝土初期支护结构的设计计算方法及安全性评价,国内外学者开展了大量研究^[7-12],提出了初期支护截面安全系数的多种计算方法,如将初期支护视为均质等强材料(素混凝土)时的截面安全系数计算方法^[13]、视为钢筋混凝土时的截面安全系数计算方法^[14]和视为型钢混凝土时的截面安全系数计算方法^[15-16]等。在安全

系数计算前,需首先计算得到初期支护结构内力。为便于计算,一般不对型钢钢架和喷射混凝土进行单独建模,而是基于截面刚度等效的原则,在计算得到型钢钢架-喷射混凝土初期支护材料等效弹性模量后,按单一均质材料进行初期支护结构内力计算。在计算等效弹性模量时,现有方法大多按截面抗弯刚度等效^[17-22]或截面抗压刚度等效^[15-16,23-28]得到型钢-喷射混凝土初期支护的等效弹性模量,未能同时考虑型钢钢架-喷射混凝土初期支护截面的抗压刚度等效和抗弯刚度等效,且不同等效方法的计算结果差异尚不知晓。

在计算得到初期支护结构内力后,到底按哪种方法计算型钢钢架-喷射混凝土初期支护结构的安全系数,目前还不统一;不同安全系数计算方法在计算结果上有何差异,尚缺乏对比研究,导致初期支护结构安全性评价主观性很大,由此造成初期支护设计存在盲目性。此外,在初期支护结构安全性评价时,目前普遍的做法是将设计给定荷载作用下初期

支护最不利截面是否满足规范要求的最小安全系数作为安全评价标准,而对“设计的初期支护承载力有多大、不同支护方案的初期支护承载力与工程经济性分别是怎样的”缺乏综合对比,如钢架采用 I20、I22、I25 与 HW150×150、HW175×175、HW200×200 时的初期支护承载力分别有多大、不同钢架支护方案的初期支护承载力及经济性如何,钢架选取哪种型号更为合理等尚不明确。

针对型钢钢架-喷射混凝土初期支护结构在设计计算分析和安全性评价方面存在的不足,本文首先介绍 3 种型钢钢架-喷射混凝土等效弹性模量的计算方法,用于后续对比研究;然后,将型钢钢架-喷射混凝土初期支护分别视为 3 种结构(素混凝土、钢筋混凝土和型钢混凝土)时的截面安全系数计算方法进行总结,并以此给出型钢钢架-喷射混凝土初期支护结构承载力的不同计算方法;最后,结合算例对比分析将型钢钢架-喷射混凝土初期支护分别视为 3 种结构的承载力,在此基础上对不同支护方案的初期支护结构承载力与工程经济性进行综合对比,以期对软弱围岩隧道初期支护结构设计提供参考。

1 初期支护等效弹性模量计算方法

假定隧道初期支护结构处于平面应变状态,分别推导基于抗弯刚度等效、抗压刚度等效、抗弯与抗压刚度均等效 3 种等效原则下的型钢钢架-喷射混凝土初期支护材料等效弹性模量。

1.1 方法 1:抗弯刚度等效

以每榀型钢钢架两侧各一半纵向间距范围内初期支护作为 1 个计算单元(图 1,单元长度 $d=1/n$, n 为单位宽度初期支护中钢架的数量),按照型钢钢架-喷射混凝土初期支护截面抗弯刚度等效的原则,将型钢钢架的弹性模量折算给喷射混凝土,同时假定初期支护为截面高度(厚度 t) 不变的矩形截面(图 2),钢筋网视为安全储备,不予考虑。可列如下初期支护抗弯刚度等效公式

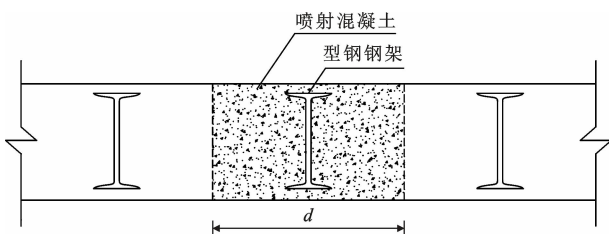


图 1 型钢-喷射混凝土初期支护计算单元

Fig. 1 Calculation unit of shape steel-shotcrete initial support

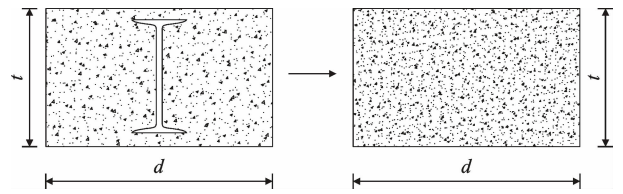


图 2 单刚度等效前、后的初期支护计算单元

Fig. 2 Calculation elements for initial support before and after single stiffness equivalence

$$K_e = K_s + K_c \quad (1)$$

$$K_s = \frac{E_s I_s}{1 - \nu_s^2}, K_c = \frac{E_c I_c}{1 - \nu_c^2}, K_e = \frac{E_e I}{1 - \nu^2} \quad (2)$$

式中: K_s 、 K_c 、 K_e 分别为平面应变条件下初期支护等效计算单元中型钢钢架截面抗弯刚度、喷射混凝土截面抗弯刚度和型钢钢架-喷射混凝土组合截面等效抗弯刚度; E_s 、 E_c 、 E_e 分别为初期支护等效计算单元中型钢钢架弹性模量、喷射混凝土弹性模量和型钢钢架-喷射混凝土等效弹性模量; I_s 、 I_c 、 I 分别为初期支护等效计算单元中型钢钢架截面抗弯惯性矩、喷射混凝土截面抗弯惯性矩和型钢钢架-喷射混凝土组合截面抗弯惯性矩,有 $I = I_s + I_c$; ν_s 、 ν_c 、 ν 分别为型钢钢架材料的泊松比、喷射混凝土材料的泊松比和型钢钢架-喷射混凝土组合材料的泊松比,一般可不考虑钢架材料的泊松比,直接取 $\nu = 0.2$ ^[14]。

由式(1)、(2)可得型钢钢架-喷射混凝土初期支护材料等效弹性模量 E_e 。计算公式为

$$E_e = \frac{(K_s + K_c)(1 - \nu^2)}{I} \quad (3)$$

1.2 方法 2:抗压刚度等效

同样以每榀型钢钢架两侧各一半间距范围内的初期支护作为 1 个计算单元,按照型钢钢架-喷射混凝土初期支护截面抗压刚度等效的原则,将型钢钢架的弹性模量折算给喷射混凝土,同时假定初期支护为截面高度(厚度 t) 不变的矩形截面,钢筋网视为安全储备,不予考虑。可列如下初期支护抗压刚度等效公式

$$D_e = D_s + D_c \quad (4)$$

$$D_s = \frac{E_s A_s}{1 - \nu_s^2}, D_c = \frac{E_c A_c}{1 - \nu_c^2}, D_e = \frac{E_e A}{1 - \nu^2} \quad (5)$$

式中: D_s 、 D_c 、 D_e 分别为平面应变条件下初期支护等效计算单元中型钢钢架截面抗压刚度、喷射混凝土截面抗压刚度和型钢钢架-喷射混凝土组合截面等效抗压刚度; A_s 、 A_c 、 A 分别为初期支护等效计算单元中型钢钢架截面积、喷射混凝土截面积和型钢钢架-喷射混凝土总截面积,有 $A = A_s + A_c$ 。

由式(4)、(5)可得型钢钢架-喷射混凝土初期支护材料等效弹性模量 E_e 。计算公式为

$$E_e = \frac{(D_s + D_c)(1 - \nu^2)}{A} \quad (6)$$

1.3 方法3:抗压与抗弯刚度等效

同样以每榀型钢钢架两侧各一半间距范围内的初期支护作为1个计算单元,同时考虑型钢钢架-喷射混凝土初期支护截面抗压刚度等效和抗弯刚度等效(图3)。

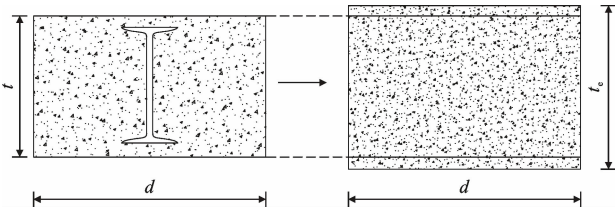


图3 双刚度等效前、后的初期支护计算单元

Fig. 3 Calculation elements for initial support before and after double stiffness equivalence

设初期支护等效厚度为 t_e ,首先根据初期支护抗压刚度等效,有

$$D_e = D_s + D_c \quad (7)$$

且同时有

$$D_e = E_e t_e d \quad (8)$$

由式(7)、(8)可得

$$E_e = \frac{D_s + D_c}{t_e d} \quad (9)$$

然后,根据初期支护抗弯刚度等效,有

$$K_e = K_s + K_c \quad (10)$$

且同时有

$$K_e = E_e \frac{t_e^3 d}{12} \quad (11)$$

由式(9)~(11)可得初期支护等效厚度 t_e 为

$$t_e = \sqrt{\frac{12(K_s + K_c)}{D_s + D_c}} \quad (12)$$

将式(9)代入式(12),最终可得型钢钢架-喷射混凝土初期支护材料等效弹性模量 E_e 。计算公式为

$$E_e = (D_s + D_c) \left[d \sqrt{\frac{12(K_s + K_c)}{D_s + D_c}} \right]^{-1} \quad (13)$$

2 初期支护截面安全系数计算方法

截面安全系数通常针对结构或构件的某个截面而言,具体指截面承载能力与截面内力的比值。其中,截面承载能力主要取决于材料的强度,属于强度问题,不涉及整个结构的刚度和稳定性问题,故又称截面强度。目前,有学者将隧道初期支护视为均质

等强材料进行截面强度验算,也有学者则将其视为钢筋混凝土或型钢混凝土进行截面强度验算,使得在初期支护截面安全系数计算方法上存在较大区别。

2.1 方法1:按素混凝土结构进行计算

在计算得到结构内力后,仍将型钢钢架-喷射混凝土初期支护视为单一材料,采用素混凝土的极限强度进行安全性验算,可根据《公路隧道设计规范》(JTG 3370.1—2018)计算初期支护结构的安全系数,计算方法如下:

(1)首先算出轴力作用点至截面重心的距离(偏心距) e_0 ,有

$$e_0 = M/N \quad (14)$$

式中: M 为初期支护截面弯矩计算值; N 为初期支护截面轴力计算值。

(2)当 $e_0 \leq 0.2h$ 时,由混凝土抗压强度控制承载能力可得

$$K = \frac{\varphi \alpha R_s b h}{N} \quad (15)$$

式中: K 为结构安全系数; h 为截面高度; b 为截面宽度; R_s 为混凝土的极限抗压强度; φ 为构件纵向弯曲系数,可取 $\varphi=1$; α 为轴向力的偏心影响系数,计算公式如下

$$\alpha = 1 + 0.648(e_0/h) - 12.569(e_0/h)^2 + 15.444(e_0/h)^3 \quad (16)$$

(3)当 $e_0 > 0.2h$ 时,由混凝土抗拉强度控制承载能力可得

$$K = 1.75 \varphi R_1 b h \left[\left(\frac{6e_0}{h} - 1 \right) N \right]^{-1} \quad (17)$$

式中: R_1 为混凝土抗拉极限强度。

2.2 方法2:将内力分配后按两种材料分别计算

在计算得到初期支护结构内力后,将内力对型钢钢架和喷射混凝土分别进行分配,然后计算初期支护中型钢钢架和喷射混凝土各自的安全系数。根据弯矩叠加和变形协调条件有

$$\begin{cases} M = M_s + M_c \\ \frac{M}{K_e} = \frac{M_s}{K_s} = \frac{M_c}{K_c} \end{cases} \quad (18)$$

式中: M_s 、 M_c 为型钢钢架及喷射混凝土分别承担的弯矩。

根据式(18),可得型钢钢架和喷射混凝土分担的弯矩分别为

$$M_s = \frac{MK_s}{K_s + K_c} \quad (19)$$

$$M_c = \frac{MK_c}{K_s + K_c} \quad (20)$$

同理,可得型钢钢架和喷射混凝土分担的轴力分别为

$$N_s = \frac{ND_s}{D_s + D_c} \quad (21)$$

$$N_c = \frac{ND_c}{D_s + D_c} \quad (22)$$

式中: N_s 、 N_c 为型钢钢架及喷射混凝土分别承担的轴力。

《公路隧道设计细则》(JTG/T D70—2010)在进行型钢钢架-喷射混凝土初期支护强度校核时,令弯矩仅由钢架承担,喷射混凝土不承担弯矩,有

$$M_s = M \quad (23)$$

$$M_c = 0 \quad (24)$$

且有

$$\begin{cases} K_c = \frac{\alpha R_{cy} A_c}{N_c} \\ K_{sy} = R_{sy} / \left(\frac{N_s}{A_s} + \frac{M_s}{W_s} \right) \\ K_{sl} = R_{sl} / \left(\frac{N_s}{A_s} + \frac{M_s}{W_s} \right) \end{cases} \quad (25)$$

式中: K_c 为喷射混凝土的抗压安全系数; K_{sy} 、 K_{sl} 分别为钢架钢材的抗压安全系数和抗拉安全系数; R_{cy} 为喷射混凝土极限抗压强度; R_{sy} 、 R_{sl} 分别为钢架钢材的抗压极限强度和抗拉极限强度; W_s 为型钢钢架截面抗弯系数。

2.3 方法3:按钢筋混凝土结构进行计算

在计算得到初期支护结构内力后,将型钢钢架视为对喷射混凝土的配筋,即将型钢钢架喷射混凝土组合结构看作钢筋混凝土结构。计算时可将型钢翼缘作为有效配筋面积,而腹板作为安全储备。本文参考《公路隧道设计规范》(JTJ 3370.1—2018)中混凝土矩形截面对称配筋的相关公式,进行初期支护截面安全系数的计算。

首先按以下公式计算

$$K = \begin{cases} \frac{A'_g R_g (h_0 - a') + 0.5 R_w b h_0^2}{N e} & x = \frac{KN}{bR_w} > 0.55h_0 \\ bR_w \left[\sqrt{(e-h_0)^2 + \frac{2A'_g R_g}{bR_w} (h_0 - a')} - (e-h_0) \right] & 2a' < x = \frac{KN}{bR_w} \leq 0.55h_0 \\ \frac{A_g R_g (h_0 - a')}{N e'} & x = \frac{KN}{bR_w} \leq 2a' \end{cases} \quad (26)$$

式中: A_g 、 A'_g 分别为纵向受拉及纵向受压钢筋(对应于型钢受拉、受压翼缘)的截面积,有 $A_g = A'_g$; R_g 为钢筋(型钢)的抗拉或抗压计算强度; h_0 为截面有效高度; a' 为自钢筋(型钢翼缘) A_g 、 A'_g 的重心分别至截面最近边缘的距离; R_a 为混凝土的极限抗压强度; e 、 e' 分别为轴力作用点至 A_g 、 A'_g 重心的距离; R_w 为混凝土的弯曲抗压极限强度; x 为截面受压区高度; e 为轴向力作用点至型钢受拉翼缘力的作用点之间的距离。

2.4 方法4:按型钢混凝土结构进行计算

在计算得到初期支护结构内力后,视型钢钢架-喷射混凝土初期支护为型钢混凝土组合结构,参考《组合结构设计规范》(JGJ 138—2016)进行初期支护截面安全系数的计算。

根据截面极限平衡条件可知,极限状态下初期支护截面的轴力 N_u 为

$$N_u = \alpha_1 f_c b x + f'_a A'_{af} - \sigma_a A_{af} + N_{aw} \quad (27)$$

式中: α_1 为受压区混凝土压应力影响系数,当混凝土强度等级不超过C50时取1.00; f_c 为混凝土轴心抗压强度设计值; f'_a 为型钢抗压强度设计值; A'_{af} 为型钢受压翼缘截面面积; σ_a 为受拉边或受压较小边的型钢翼缘应力; A_{af} 为型钢受拉翼缘截面面积; N_{aw} 为型钢腹板承受的轴向合力。

极限状态下初期支护截面的弯矩 M_u 为

$$M_u = N_u e = \alpha_1 f_c b x (h_0 - x/2) + f'_a A'_{af} (h_0 - a'_a) + M_{aw} \quad (28)$$

式中: h_0 为型钢受拉翼缘力的作用点至混凝土受压边缘的距离; a'_a 为型钢受压翼缘截面重心至混凝土截面近边的距离; M_{aw} 为型钢腹板承受的轴向合力对型钢受拉翼缘的力矩。

$$e = \eta e_i + \frac{h}{2} - a \quad (29)$$

$$e_i = e_0 + e_a \quad (30)$$

式中: e_i 为初始偏心距; e_0 为轴向力对截面重心的偏心距,有 $e_0 = M/N$; e_a 为考虑荷载位置不定性、材料不均匀,施工偏差等引起的附加偏心距; η 为偏心受压构件考虑挠曲影响的轴向力偏心距增大系数。

$$N_{aw} = \begin{cases} [2.5\xi - (\delta_1 + \delta_2)] t_w h_0 f_a \\ \delta_1 h_0 < 1.25x, \delta_2 h_0 > 1.25x \\ [\delta_2 - \delta_1] t_w h_0 f_a \\ \delta_1 h_0 < 1.25x, \delta_2 h_0 \leq 1.25x \end{cases} \quad (31)$$

$$M_{aw} = \begin{cases} \left[\frac{1}{2}(\delta_1^2 + \delta_2^2) - (\delta_1 + \delta_2) + 2.5\xi - (1.25\xi)^2 \right] t_w h_0^2 f_a & \delta_1 h_0 < 1.25x, \delta_2 h_0 > 1.25x \\ \left[\frac{1}{2}(\delta_1^2 + \delta_2^2) - (\delta_2 - \delta_1) \right] t_w h_0^2 f_a & \delta_1 h_0 < 1.25x, \delta_2 h_0 \leq 1.25x \end{cases} \quad (32)$$

式中: ξ 为相对受压区高度, $\xi = x/h$; δ_1 为型钢腹板上端至截面上边距离与 h_0 的比值; δ_2 为型钢腹板下端至截面上边距离与 h_0 的比值; t_w 为型钢腹板厚度。

受拉边或受压较小边的型钢翼缘应力 σ_a 可按下面条件计算:

$$\sigma_a = \begin{cases} f_a & x \leq \xi_b h_0, \text{大偏心} \\ \frac{f_a}{\xi_b - 0.8} \left(\frac{x}{h_0} - 0.8 \right) & x > \xi_b h_0, \text{小偏心} \end{cases} \quad (33)$$

$$\xi_b = 0.8 \left(1 + \frac{f_a}{2 \times 0.003 E_s} \right)^{-1} \quad (34)$$

初期支护截面强度验算时, δ_1 、 δ_2 、 A_{af} 、 A_{af} 等参数可根据型钢骨架截面几何尺寸求得, 根据规范设计值选取。首先, 假设 $\delta_1 h_0 < 1.25x$ 、 $\delta_2 h_0 > 1.25x$ 及大偏心受压, 即 $\sigma_a = f_a$, 将式(31)、(32)分别代入式(27)、(28), 联立求解截面受压区高度 x , 若求得的 x 满足 $\delta_1 h_0 < 1.25x$ 、 $\delta_2 h_0 > 1.25x$ 且满足 $x \leq \xi_b h_0$, 则说明假设成立, 将 x 重新代入式(27)、(28), 求得初期支护截面在极限状态下的轴力 N_u 和弯矩 M_u , 将其与截面所受内力相比较, 若大于截面所受内力, 则说明截面强度符合要求; 若求得的 x 不满足 $\delta_1 h_0 < 1.25x$ 、 $\delta_2 h_0 > 1.25x$ 及大偏心受压假设, 则初期支护为小偏心受压, 将式(31)、(32)分别代入式(27)、(28), 联立求解 x , 将求得的 x 重新代入式(27)、(28), 得到初期支护截面在极限状态下的轴力 N_u 和弯矩 M_u , 进而由式(35)、(36)求得初期支护截面轴力与弯矩的安全系数, 即

$$K_N = \frac{N_u}{N} \quad (35)$$

$$K_M = \frac{N_u e}{M} \quad (36)$$

式中: N 、 M 分别为初期支护任意截面的轴力和弯矩。

3 初期支护结构承载力计算方法

对于某个构件而言, 通常关注构件最危险截面的承载能力(或称截面强度)是否满足要求, 而对于

某个工程结构而言, 其结构承载力除了与截面强度有关外, 与结构所受约束条件(会影响结构整体刚度、稳定性)也存在密切关系。因此, 在结构设计时, 除了需关注结构在给定荷载作用下最危险截面的安全系数外, 结构所能承受的最大外荷载也是设计关注的重要内容。

对于隧道初期支护, 其结构承载力可定义为: 最危险截面安全系数(即最小安全系数)等于 1 时相应的外荷载。计算时可通过不断调整作用在初期支护上的外荷载, 使其最危险截面的安全系数接近于 1, 此时初期支护最危险截面受力接近于强度极限状态, 所受外荷载即为初期支护的结构承载力。对此, 本文建立隧道初期支护的荷载-结构分析模型, 同时考虑周围地层介质对初期支护结构的弹性抗力作用(图 4), 建立外荷载与初期支护结构内力及安全系数的定量关系。图 4 中: q 为每延米初期支护上作用的垂直荷载; e_1 、 e_2 为每延米初期支护上作用的水平荷载, 且有

$$\begin{cases} q_{\max} = q(K_{\min}) |_{K_{\min}=1} \\ e_{1\max} = \lambda q_{\max} \\ e_{2\max} = e_{1\max} + \lambda \gamma f \end{cases} \quad (37)$$

式中: q_{\max} 为极限状态下每延米初期支护上作用的垂直荷载; K_{\min} 为初期支护最危险截面的安全系数; $e_{1\max}$ 、 $e_{2\max}$ 为极限状态下每延米初期支护上作用的水平荷载; f 为初期支护的高度; γ 为围岩重度; λ 为侧压力系数。

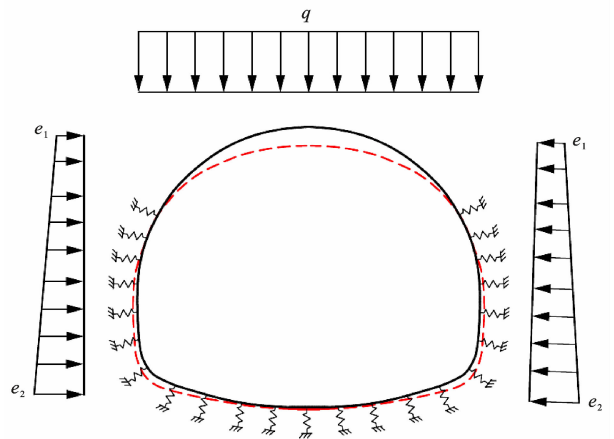


图 4 初期支护荷载-结构模型

Fig. 4 Load-structure model of initial support

按照上述思路, 对应于第 2 节所述 4 种初期支护截面安全系数计算方法, 得到 4 种初期支护结构承载力计算方法。

方法 1: 首先, 进行初期支护建模、加载, 计算初

期支护轴力、弯矩;然后,将初期支护视为素混凝土,根据偏心距大小分别选用相应的安全系数计算公式;最后,不断调整作用荷载,直至初期支护截面最小安全系数趋近于1,确定初期支护所能承受的最大荷载。

方法2:首先,进行初期支护建模、加载,计算初期支护轴力、弯矩;然后,假定轴力由型钢钢架和喷射混凝土共同承担,弯矩全部由钢架承担,分别计算安全系数;最后,不断调整作用荷载,直至初期支护截面最小安全系数趋近于1,确定初期支护所能承受的最大荷载。

方法3:首先,进行初期支护建模、加载,计算初期支护轴力、弯矩;然后,将初期支护视为钢筋混凝土,考虑型钢钢架翼缘对喷射混凝土的加强作用,计算初期支护安全系数;最后,不断调整作用荷载,直至初期支护截面最小安全系数趋近于1,确定初期支护所能承受的最大荷载。

方法4:首先,进行初期支护建模、加载,计算初期支护轴力、弯矩;然后,将初期支护视为型钢混凝土,考虑型钢钢架翼缘和腹板对喷射混凝土的加强作用,计算初期支护安全系数;最后,不断调整作用荷载,直至初期支护截面最小安全系数趋近于1,确定初期支护所能承受的最大荷载。

以上初期支护建模和结构内力计算借助常用的有限元分析软件均可轻松完成。

4 初期支护承载力计算方法比较

4.1 典型算例(软岩隧道)

以某两车道软岩隧道为例,断面内轮廓尺寸如图5所示,围岩级别为V级,主要初期支护参数如下:I20a钢架,纵向间距50cm;C25喷射混凝土,厚28cm;二次衬砌厚50cm。隧道围岩及初期支护材料基本力学参数分别见表1、2所列。

4.1.1 等效弹性模量计算结果对比

采用式(3)、(6)和(13)分别计算软岩隧道型钢钢架-喷射混凝土初期支护截面的等效弹性模量,见表3。

由表3可知:按截面抗弯刚度等效和按抗压刚度等效计算所得型钢钢架-喷射混凝土初期支护材料等效弹性模量较为接近,两者相差约0.1GPa;同时考虑截面抗弯和抗压刚度等效时,所得初期支护材料等效弹性模量略大,大于按截面抗弯刚度或抗压刚度等效所得等效弹性模量1.75~1.84GPa;仅考虑抗弯刚度等效或仅考虑抗压刚度等效,与同时

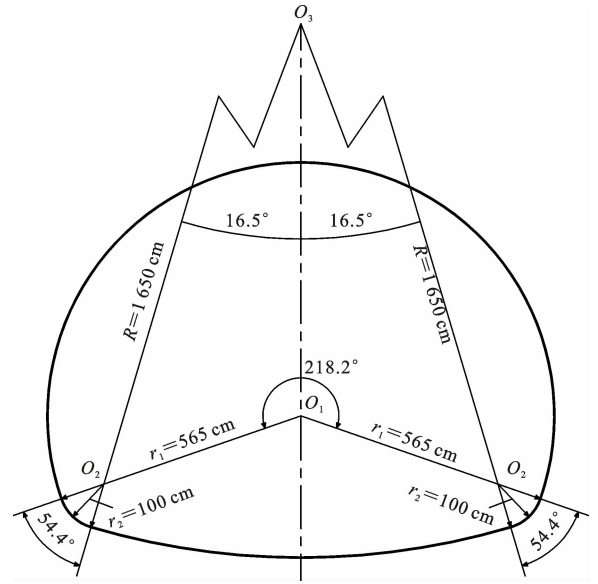


图5 隧道内轮廓尺寸

Fig. 5 Inner contour dimensions of tunnel

考虑抗弯刚度和抗压刚度等效的理论误差约6%,在工程可接受范围内。可见,3种初期支护等效弹

表1 软岩隧道围岩计算参数

Table 1 Calculation parameters of surrounding rock of soft rock tunnel

围岩	重度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	侧压力系数	弹性抗力系数/ ($\text{MPa} \cdot \text{m}^{-1}$)
V级 (炭质千枚岩)	25	0.5	120

表2 初期支护材料力学参数

Table 2 Material mechanical parameters of initial support

材料	弹性模量/ GPa	泊松比	抗拉极限 强度/MPa	抗压极限 强度/MPa
C25喷射混凝土	23	0.2	2	19
Q235钢架	210	0.3	235	

表3 软岩隧道初期支护材料等效弹性模量计算结果对比

Table 3 Comparison of equivalent elastic modulus calculation results for initial support of soft rock tunnel

等效方法	抗弯刚度 等效	抗压刚度 等效	抗弯+抗压 刚度等效
等效弹性模量/GPa	28.01	27.92	29.76
理论误差/%	5.9	6.2	

性模量计算方法无论选择哪种均可行;相较而言,仅考虑抗弯刚度等效或抗压刚度等效的计算方法更为简便,同时考虑抗弯刚度等效和抗压刚度等效在理论上更加科学、合理。

4.1.2 初期支护承载力计算结果比较

在计算得到初期支护材料等效弹性模量后,以每延米初期支护为对象,根据隧道几何参数和支护

材料参数,建立初期支护荷载-结构分析模型。首先,假定某垂直均布荷载,同时按设定的侧压力系数计算作用于初期支护上的水平荷载,计算初期支护结构内力,确定初期支护最危险截面;然后,不断调整作用于初期支护上的荷载,使最危险截面的安全系数趋近于1,取此时作用于初期支护上的荷载即为初期支护结构的极限承载力。

按照第3节所述4种方法,分别计算型钢钢架-喷射混凝土初期支护的结构承载力,由于方法4相对而言更偏于理想化,承载力计算值最大,为方便比较各方法在计算结果上的差异,同时计算方法1~3均相对于方法4计算结果的占比,计算结果见表4。

表4 软岩隧道初期支护结构承载力对比

Table 4 Comparison of structural bearing capacities of initial support of soft rock tunnel

方法	1	2	3	4
承载力/(kN·m ⁻¹)	192.69	304.25	322.41	353.84
占比/%	54	86	91	
最危险截面位置	墙脚	墙脚	墙脚	墙脚

方法1~4在现有初期支护结构安全性验算中均有应用,但各方法的计算结果差异尚缺乏相关比较。由表4可知:方法1将型钢钢架-喷射混凝土初期支护视为素混凝土进行计算,结构承载力仅为方法4所得承载力的54%,计算结果过于保守,不建议采用;方法2将初期支护弯矩视为仅由型钢钢架承担,没有考虑受压区喷射混凝土对弯矩的抵抗作用,其结构承载力计算值为方法4所得承载力的86%,由于初期支护为压弯构件,采用方法2计算结果显示初期支护结构承载力由钢架截面压应力控制,与发挥钢材抗拉强度的初衷相悖;方法3将初期支护视为钢筋混凝土结构,考虑钢架翼缘对喷射混凝土的加强作用,其结构承载力计算值为方法4所得承载力的91%,与方法4计算结果最为接近,该方法同时考虑了钢材抗拉性能和混凝土抗压性能,且保留了型钢钢架腹板的安全储备作用;方法4将型钢钢架-喷射混凝土完全视为型钢混凝土结构,同时考虑了钢架翼缘和腹板对结构承载力的贡献,所得结构承载力最大。

4.2 典型算例(黄土隧道)

以某两车道黄土隧道为例,断面内轮廓尺寸与图5一致,围岩级别为V级,主要初期支护参数为^[29]:I22a钢架,纵向间距为60cm;C25喷射混凝土,厚为28cm;二次衬砌厚为50cm。隧道围岩计算参数见表5。初期支护材料基本力学参数与表2

表5 黄土隧道围岩计算参数

Table 5 Calculation parameters of surrounding rock of loess tunnel

围岩	重度/(kN·m ⁻³)	侧压力系数	弹性抗力系数/(MPa·m ⁻¹)
V级	14	0.5	80

一致。

4.2.1 等效弹性模量计算结果对比

采用式(3)、(6)、(13)分别计算隧道型钢钢架-喷射混凝土初期支护截面的等效弹性模量,见表6。

表6 黄土隧道初期支护材料等效弹性模量计算结果对比

Table 6 Comparison of equivalent elastic modulus calculation results for initial support of loess tunnel

等效方法	抗弯刚度等效	抗压刚度等效	抗弯+抗压刚度等效
等效弹性模量/GPa	28.97	27.86	29.09
理论误差/%	4.1	4.2	

由表6可知:尽管同时考虑抗弯与抗压刚度等效在理论上更加科学、合理,但3种初期支护等效弹性模量计算方法的计算结果相差很小,在实际应用中均可行。此外,结合软岩隧道算例可知,在相同喷射混凝土厚度条件下,钢架型号、间距是影响相对误差的主要因素。

4.2.2 初期支护承载力计算结果比较

同样按照第3节所述4种方法,分别计算型钢钢架-喷射混凝土初期支护的结构承载力,计算结果见表7。

表7 黄土隧道初期支护结构承载力对比

Table 7 Comparison of structural bearing capacities of initial support of loess tunnel

方法	1	2	3	4
承载力/(kN·m ⁻¹)	168.53	247.52	330.65	363.25
占比/%	46	68	91	
最危险截面位置	墙脚	墙脚	墙脚	墙脚

由表7可知:方法1、2计算结果与方法3、4相差较大,不建议采用;方法3考虑型钢钢架翼缘对喷射混凝土的配筋作用,其结构承载力计算值同样与方法4所得承载力的91%,与方法4计算结果最为接近,相差仅9%;③方法4将型钢钢架-喷射混凝土完全视为型钢混凝土结构,所得结构承载力最大,相对于方法3更偏于理想化。以上结果与软岩隧道算例所得规律一致。

综上所述,方法1、2计算结果过于保守,且存在明显缺陷,不宜用于型钢钢架-喷射混凝土初期支护结构承载力的计算;采用方法3、4进行型钢钢架-喷

射混凝土初期支护结构承载力计算均可行。其中,方法3同时考虑了钢材的抗拉性能和混凝土的抗压性能,且保留了型钢钢架腹板的安全储备作用,计算结果相对偏安全;方法4全面考虑了型钢钢架-喷射混凝土各部分对结构承载力的贡献,所得结构承载力最大。有必要说明的是,隧道型钢钢架-喷射混凝土初期支护是先立钢架,再进行喷射混凝土作业,在施工工艺上与传统型钢-混凝土模筑施工工艺存在较大区别,将型钢钢架-喷射混凝土初期支护完全视为标准化的型钢混凝土结构,难免过于理想化。基于上述原因,从安全角度考虑,本文优先推荐采用方法3。

5 推荐计算方法的工程应用实例

本文方法3由田志宇等^[30]提出,将隧道初期支护喷射混凝土中的型钢钢架视为对喷射混凝土的配筋,从而将喷射混凝土+钢架的联合承载体看作钢筋混凝土结构进行承载力计算。只将型钢钢架翼缘部分作为有效配筋面积计算时偏于安全,并将初期支护最危险部位的安全系数等于1.0时的外荷载定义为初期支护结构的承载力。

该方法在软弱围岩隧道支护结构设计中已得到较多应用,并取得了良好效果。具体应用实例如下:

(1)应用于四川雅安至康定高速公路紫石隧道右线出口穿越巨厚覆盖层段(围岩极其松散破碎)支护结构承载力的确定,该隧道已于2017年10月20日贯通;

(2)应用于四川甘孜至白玉公路阿色隧道塌方段(断层破碎带)支护结构承载力的确定,该隧道已于2016年11月14日贯通;

(3)应用于云南香格里拉至丽江高速公路杨给隧道右线出口变形开裂段衬砌安全性评价,该隧道已于2017年顺利贯通;

(4)应用于云南香格里拉至丽江高速公路冷都坡隧道下穿老G214段支护参数的确定,该隧道掌子面于2016年11月1日顺利通过了下穿老G214段,初期支护变形在设计允许范围内;

(5)应用于枫木界隧道围岩较差段(掌子面节理裂隙较发育,拱部存在掉块现象)支护参数的确定,该隧道施工进展顺利,已于2017年7月贯通;

(6)应用于广西梧州至柳州高速公路百丈隧道穿越流塑状富水破碎带的支护结构安全性评价,该隧道已于2016年9月顺利贯通。

更多应用实例细节可参见《公路隧道结构计算改进探索与工程实践》^[30],本文不再赘述。

6 不同初期支护方案综合比较

6.1 不同初期支护方案承载力比较

隧道型钢钢架-喷射混凝土初期支护设计通常先按工程类比法,确定钢架型号,然后根据钢架型号确定喷射混凝土厚度,与以往地面结构配筋设计中先确定截面尺寸再进行配筋有明显区别。即初期支护喷射混凝土的设计厚度随钢架型号(主要为钢架截面高度)的变化而变化。因此,钢架型号不同,伴随着喷射混凝土厚度不同,初期支护结构承载力并不完全取决于钢架,而由钢架和喷射混凝土共同决定,有必要进行不同初期支护方案(钢架型号与喷射混凝土厚度的不同组合)承载力的比较,以便给初期支护设计参数的选取提供参考。

以第4.1节初期支护参数作为基本工况,对分析软弱围岩隧道在不同初期支护方案下的结构承载力。软弱围岩隧道常用的钢架型号有I20a、I20b、I22a、I25a、HW150、HW175、HW200,根据隧道初期支护设计惯例,初期支护喷射混凝土厚度按型钢钢架截面高度加6cm进行确定,以上不同型号钢架对应的初期支护厚度分别取26、26、28、31、21、24、26cm。选取方法3对初期支护结构承载力进行计算,计算结果见表8。

表8 不同初期支护方案的结构承载力对比

Table 8 Comparison of structural bearing capacities of different initial support schemes

钢架型号	喷射混凝土厚度/cm	结构承载力/(kN·m ⁻¹)
I20a	26	293.2
I20b	26	293.8
I22a	28	315.7
I25a	31	347.2
HW150	21	259.8
HW175	24	293.8
HW200	26	321.8

由表8可知:

(1)软弱围岩隧道在不同支护方案下初期支护结构承载力由大到小排序为I25a、HW200、I22a、HW175、I20b、I20a、HW150。

(2)设有HW175钢架的初期支护承载力与设有I20b、I20a钢架的初期支护承载力非常接近,但设有HW175钢架的初期支护在厚度上相对占优,有利于减少隧道开挖量。

(3)设有HW175钢架的初期支护承载力比设

有 I22a 钢架的初期支护承载力仅小 6.9%,但在隧道开挖量和喷射混凝土用量上优势相对明显。

(4)设有 HW200 钢架的初期支护承载力与设有 I22a 钢架的初期支护承载力非常接近,仅相差不到 2%。

(5)设有 I25a 钢架的初期支护承载力最大,相比设有 HW200 钢架的初期支护承载力增大了 7.9%,但隧道开挖量及喷射混凝土厚度具有明显增大。

6.2 不同初期支护方案经济性比较

除考虑结构承载力外,工程经济性也是初期支护结构设计考虑的重要方面。对不同支护方案下的初期支护工程量和工程费用进行计算,结果分别见表 9、10。其中,初期支护施工所需工程费用计算参考了陕西省目前隧道型钢钢架和 C25 喷射混凝土施工的综合单价,这里仅用于不同支护方案的经济性比较,隧道设计时应以各地区实际单价为准。

表 9 不同支护方案下初期支护工程量对比

Table 9 Comparison of engineering quantities of different initial support schemes

钢架型号	钢架用量/t	喷射混凝土厚度/cm	喷射混凝土用量/m ³
I20a	1.028	26	9.6
I20b	1.143	26	9.6
I22a	1.219	28	10.3
I25a	1.408	31	11.5
HW150	1.140	21	7.7
HW175	1.484	24	8.8
HW200	1.836	26	9.6

表 10 不同支护方案下初期支护工程费用对比

Table 10 Comparison of engineering costs of different initial support schemes

钢架型号	钢架费用/万元	喷射混凝土厚度/cm	喷射混凝土费用/万元	总费用/万元
I20a	0.779 0	26	1.038 9	1.817 9
I20b	0.866 5	26	1.038 9	1.905 4
I22a	0.924 1	28	1.120 7	2.044 8
I25a	1.067 1	31	1.243 9	2.311 0
HW150	0.863 9	21	0.835 5	1.699 4
HW175	1.125 0	24	0.957 2	2.082 2
HW200	1.391 8	26	1.038 9	2.430 7

由表 9、10 可知:

(1)初期支护的工程经济性主要取决于钢材的用量大小;软弱围岩隧道在不同支护方案下初期支护施工所需工程费用由大到小排序为:HW200、I25a、HW175、I22a、I20b、I20a、HW150。

(2)设有 HW175 钢架的初期支护所需费用与设有 I22a 钢架的初期支护所需费用非常接近,但是两者初期支护承载力相差仅 6.9%,综合对比结构承载力和工程经济性,I22a 钢架优于 HW175 钢架。

(3)设有 I20a/b 钢架的初期支护所需费用少于设有 HW175 钢架的初期支护所需费用,但是两者初期支护承载力非常接近,综合对比结构承载力和工程经济性,I20a/b 钢架也优于 HW175 钢架。

(4)设有 I25a 钢架的初期支护所需费用少于 HW200 钢架的初期支护所需费用,但是承载力却是前者大于后者,综合对比结构承载力和工程经济性,I25a 钢架优于 HW200 钢架。

(5)设有 I22a 钢架的初期支护所需费用明显少于设有 HW200 钢架的初期支护所需费用,但是两者初期支护承载力仅相差不到 2%,综合对比结构承载力和工程经济性,I22a 钢架也优于 HW200 钢架。

(6)以上初期支护结构承载力的计算未考虑喷射混凝土强度增长过程,采用了型钢钢架与具有极限强度的喷射混凝土同步受荷的假定。对于隧道开挖后围岩易发生离散甚至坍塌的情况,通常要求初期支护具备足够的早期强度和刚度,而喷射混凝土早期尚未形成有效强度,初期支护结构承载力由钢架支护强度决定,此时应加强钢架,显然 HW175 钢架优于 I22a 钢架,HW200 钢架优于 I25a 钢架。

7 结 语

(1)分别按截面抗弯刚度等效和按抗压刚度等效计算所得型钢钢架-喷射混凝土初期支护材料等效弹性模量较为接近,两者相差约 0.1 GPa,与同时考虑抗压刚度等效和抗弯刚度等效所得等效弹性模量相差约 1.0 GPa;3 种方法计算结果最大相对误差约 6%,在实际应用中 3 种计算方法均可行。

(2)若将初期支护弯矩视为由型钢钢架和喷射混凝土共同承担,结构承载力由混凝土抗拉强度控制,由于没有考虑受拉区型钢钢架对结构承载力的贡献,该计算方法过于保守,不建议采用。

(3)若将初期支护弯矩视为仅由型钢钢架承担,由于没有考虑受压区喷射混凝土对弯矩的抵抗作用,造成初期支护结构承载力由钢架截面压应力控制,与发挥钢材抗拉强度的初衷相悖,该计算方法也不建议采用。

(4)考虑型钢钢架翼缘对喷射混凝土的配筋作用,将初期支护视为钢筋混凝土结构进行承载力计

算,或将型钢钢架-喷射混凝土完全视为型钢混凝土结构,同时考虑型钢钢架翼缘和腹板对结构承载力的贡献进行承载力计算,该2种方法计算结果相差仅9%,用于初期支护结构承载力计算均可行。

(5)相较而言,考虑型钢钢架翼缘对喷射混凝土的配筋作用,且保留钢架腹板的安全储备作用,将型钢钢架-喷射混凝土视为钢筋混凝土结构进行承载力计算,计算结果偏安全,而将型钢钢架-喷射混凝土完全视为型钢-混凝土结构偏于理想化。鉴于安全考虑,推荐采用将型钢钢架-喷射混凝土初期支护视为钢筋混凝土结构的承载力计算方法。

(6)在不考虑喷射混凝土强度增长过程,视型钢钢架与具有极限强度的喷射混凝土同步受荷的情况下,不同支护方案的初期支护结构承载力由大到小排序为:I25a、HW200、I22a、HW175、I20b、I20a、HW150;所需工程费用由大到小排序为:HW200、I25a、HW175、I22a、I20b、I20a、HW150;综合考虑结构承载力和工程经济性,I20a/b钢架优于HW175钢架;I22a钢架优于HW200钢架;而对初期支护早期强度和刚度要求高的情况,则HW175钢架优于I22a钢架,HW200钢架优于I25a钢架。

(7)本文基于4种现有截面安全系数计算方法,给出了推荐的型钢-喷射混凝土初期支护承载力计算方法,实质是给出了推荐的型钢钢架-喷射混凝土初期支护结构安全系数计算方法。后续有必要开展型钢-喷射混凝土压弯构件或型钢钢架-喷射混凝土初期支护的加载试验,对型钢钢架-喷射混凝土初期支护结构承载力计算方法进一步研究。

参考文献:

References:

[1] 陈建勋,刘伟伟,陈丽俊,等.绿泥石片岩地层大跨度公路隧道大变形控制及合理支护形式现场试验[J].中国公路学报,2020,33(12):212-223.
CHEN Jian-xun, LIU Wei-wei, CHEN Li-jun, et al. In-situ experimental study on large-deformation control and reasonable support forms for a large-span highway tunnel in chlorite schist[J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(12): 212-223.

[2] 陈丽俊,陈建勋,罗彦斌,等.深埋大跨度绿泥石片岩隧道变形规律及合理预留变形量[J].中国公路学报,2021,34(6):147-157.
CHEN Li-jun, CHEN Jian-xun, LUO Yan-bin, et al. Deformation law and reasonable reserved deformation of deep large-span chlorite schist tunnel[J]. China

Journal of Highway and Transport, 2021, 34(6): 147-157.

[3] 仇文革,孙克国,王立川,等.基于围岩稳定性的大断面隧道初期支护优化[J].土木工程学报,2017,50(增2):8-13.
QIU Wen-ge, SUN Ke-guo, WANG Li-chuan, et al. Primary support optimization of large section tunnel based on surrounding rock stability[J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(S2): 8-13.

[4] 张德华,刘士海,任少强.基于围岩-支护特征理论的高地应力软岩隧道初期支护选型研究[J].土木工程学报,2015,48(1):139-148.
ZHANG De-hua, LIU Shi-hai, REN Shao-qiang. Research on selection of preliminary support for tunnel in high ground-stress soft rock based on surrounding rock-support characteristic curve theory[J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(1): 139-148.

[5] 张顶立,陈峰宾,房倩.隧道初期支护结构受力特性及适用性研究[J].工程力学,2014,31(7):78-84.
ZHANG Ding-Li, CHEN Feng-Bin, FANG Qian. Study on mechanical characteristics and applicability of primary lining used in tunnel[J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(7): 78-84.

[6] 陈秋南,曾奥,罗鹏,等.圆宝山隧道炭质板岩大变形段初期支护结构受力特性研究[J].应用力学学报,2020,37(2):810-817,944-945.
CHEN Qiu-nan, ZENG Ao, LUO Peng, et al. Study on stress characteristics of primary support structure in large deformation section of carbonaceous slate in Yuanbaoshan tunnel[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2020, 37(2): 810-817, 944-945.

[7] 杨成永,欧阳杰,陆景慧.隧道型钢钢架初期支护安全性评价[J].西南交通大学学报,2014,49(2):254-259.
YANG Cheng-yong, OUYANG Jie, LU Jing-hui. Assessment on safety of steel reinforced shotcrete support for tunnels[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2014, 49(2): 254-259.

[8] 扈世民.基于收敛-约束法地铁区间隧道初期支护安全性研究[J].铁道学报,2015,37(10):117-121.
HU Shi-min. Research on safety of initial support in metro regional tunnel based on convergence-confinement method[J]. Journal of the China Railway Society, 2015, 37(10): 117-121.

[9] 伍毅敏,蔡直言,傅鹤林,等.基于精细化模型的初期支护安全性评价[J].中国安全科学学报,2019,29(增1):168-172.

- WU Yi-min, CAI Zhi-yan, FU He-lin, et al. Safety evaluation of initial support based on refined model[J]. China Safety Science Journal, 2019, 29 (S1): 168-172.
- [10] 田志宇,田尚志,杨枫,等.百丈隧道穿越流塑状富水破碎带施工措施及其安全性评价[J].现代隧道技术,2020,57(2):176-183.
- TIAN Zhi-yu, TIAN Shang-zhi, YANG Feng, et al. Engineering measures and safety evaluation of Baizhang tunnel passing through flow plastic water-rich fracture zone [J]. Modern Tunnelling Technology, 2020, 57(2): 176-183.
- [11] 肖明清,徐晨.复合式衬砌隧道总安全系数设计法修正与应用研究[J].隧道建设,2019,39(3):421-429.
- XIAO Ming-qing, XU Chen. Modification and application of design method for total safety factor of composite lining tunnel [J]. Tunnel Construction, 2019, 39(3): 421-429.
- [12] WONG L, FANG Q, ZHANG D. Mechanical analysis of circular tunnels supported by steel sets embedded in primary linings[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2013, 37(8): 80-88.
- [13] 肖明清,王少锋,陈立保,等.基于荷载结构法的隧道初期支护设计方法研究[J].铁道工程学报,2018,35(4):60-64.
- XIAO Ming-qing, WANG Shao-feng, CHEN Li-bao, et al. Research on the design method of primary support of tunnel based on the load-structure method[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2018, 35(4): 60-64.
- [14] 田志宇,曹长斌,吴庆发,等.基于承载能力量化分析的隧道支护体系设计方法在枫木界隧道Ⅲ级围岩较差段的应用[C]//中国公路学会.2015年全国公路隧道学术交流会议论文集.重庆:重庆大学出版社,2015:43-49.
- TIAN Zhi-yu, CAO Chang-bin, WU Qing-fa, et al. The application of tunnel support system design method based on quantitative analysis of bearing capacity in the poor section of grade III surrounding rock of Fengmujie tunnel[C]// China Highway & Transportation Society. Proceeding of 2015 National Highway Tunnel Symposium. Chongqing: Chongqing University Press, 2015: 43-49.
- [15] 李志清,丁春林,王科元,等.浅埋大断面黄土隧道初期支护安全性分析[J].地下空间与工程学报,2014,10(5):1151-1157.
- LI Zhi-qing, DING Chun-lin, WANG Ke-yuan, et al. Mechanical characteristics and safety analysis of initial support in large section shallow loess tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014, 10(5): 1151-1157.
- [16] 徐帮树,杨为民,王者超,等.公路隧道型钢喷射混凝土初期支护安全评价研究[J].岩土力学,2012,33(1):248-254.
- XU Bang-shu, YANG Wei-ming, WANG Zhe-chao, et al. Study of initial support safety evaluation about shape steel reinforced shotcrete in highway tunnel [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(1): 248-254.
- [17] 李建敦,肖靖,江鸿,等.浅埋软岩隧道大变形特征及控制措施[J].科学技术与工程,2022,22(3):1243-1249.
- LI Jian-dun, XIAO Jing, JIANG Hong, et al. Large deformation characteristics and control measures of shallow buried soft rock tunnel[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(3): 1243-1249.
- [18] 马振旺,郭新新,喻炜,等.V级围岩条件下超大断面隧道的适宜喷层厚度研究[J].公路交通科技,2020,37(7):103-110.
- MA Zhen-wang, GUO Xin-xin, YU Wei, et al. Study on suitable shotcrete layer thickness of ultra-large section tunnel under grade v surrounding rock condition[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2020, 37(7): 103-110.
- [19] 孙振宇,张顶立,房倩,等.隧道初期支护与围岩相互作用的时空演化特性[J].岩石力学与工程学报,2017,36(增2):3943-3956.
- SUN Zhen-yu, ZHANG Ding-li, FANG Qian, et al. Spatial and temporal evolution characteristics of interaction between primary support and tunnel surrounding rock [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36 (S2): 3943-3956.
- [20] 徐飞,李术才,石少帅,等.千枚岩隧道传统与新型支护结构现场对比试验研究[J].岩石力学与工程学报,2017,36(3):609-621.
- XU Fei, LI Shu-cai, SHI Shao-shuai, et al. Field test comparison of traditional and new type supporting structures in a phyllite tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(3): 609-621.
- [21] 朱正国,李文江,刘志春,等.软弱围岩隧道掌子面挤出变形特征分析[J].地下空间与工程学报,2017,13(3):711-716,736.
- ZHU Zheng-guo, LI Wen-jiang, LIU Zhi-chun, et al. Characteristics analysis of tunnel face extrusion

- deformation in weak surrounding rock[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2017, 13(3): 711-716, 736.
- [22] 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.
ZHANG De-hua, LIU Shi-hai, REN Shao-qiang. Research on selection of preliminary support for tunnel in high ground-stress soft rock based on surrounding rock-support characteristic curve theory[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(11): 2258-2266.
- [23] 周鹏飞,申玉生,赵建洋,等.基于改进遍布节理模型的陡倾千枚岩隧道灾变机制研究[J].岩石力学与工程学报,2019,38(9):1870-1883.
ZHOU Peng-fa, SHEN Yu-sheng, ZHAO Jian-feng, et al. Research on disaster-induced mechanism of tunnels with steeply dipping phyllite strata based on an improved ubiquitous-joint constitutive model[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(9): 1870-1883.
- [24] 何昌国.软弱围岩大跨隧道合理预留变形量分析及初期支护刚度优化[J].隧道建设,2018,38(增2):227-231.
HE Chang-guo. Analysis of reasonable reserved deformation amount of large-span tunnel in soft surrounding rock and preliminary optimization of initial support stiffness [J]. Tunnel Construction, 2018, 38(S2): 227-231.
- [25] 周平,王志杰,徐海岩,等.昔格达地层隧道变形特性曲线及变形机理研究[J].土木工程学报,2018,51(10):107-121.
ZHOU Ping, WANG Zhi-jie, XU Hai-yan, et al. Study on the deformation characteristic curve and deformation mechanism of the Xigeda strata tunnel[J]. China Civil Engineering Journal, 2018, 51(10): 107-121.
- [26] 陈京贤,曾德荣,王俊召,等.基于应力释放率的大跨径回填土隧道的围岩稳定性研究[J].中外公路,2018,38(6):173-177.
CHEN Jing-xian, ZENG De-rong, WANG Jun-zhao, et al. Study on the stability of surrounding rock of long-span backfill tunnel based on stress release rate[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2018, 38(6): 173-177.
- [27] 王志杰,杨跃.含水率对昔格达地层大断面隧道初期支护安全性影响研究[J].铁道标准设计,2017,61(11):100-105.
WANG Zhi-jie, YANG Yue. Research on effect of moisture content on initial support safety of large cross-section tunnel in Xigeda fm strata[J]. Railway Standard Design, 2017, 61(11): 100-105.
- [28] 贾晓旭,赵玉成.软弱围岩隧道CD法和台阶法施工力学行为分析[J].铁道标准设计,2016,60(7):121-125.
JIA Xiao-xu, ZHAO Yu-cheng. Analysis of mechanical behavior of tunneling in weak surrounding rock by CD method and benching method [J]. Railway Standard Design, 2016, 60(7): 121-125.
- [29] JTG/T 3372—2024,公路黄土隧道设计与施工技术规范[S].
JTG/T 3372—2024, Technical Specifications for Design and Construction of Highway Tunnels in Loess[S].
- [30] 田志宇,汪波.公路隧道结构计算改进探索与工程实践[M].北京:人民交通出版社股份有限公司,2018.
TIAN Zhi-yu, WANG Bo. Improvement exploration and engineering practice of highway tunnel structure calculation [M]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2018.