

文章编号:1672-3961(2024)03-0081-13 DOI:10.6040/j.issn.1672-3961.0.2023.043

# 考虑中夹岩柱安全储备的深埋小净距隧道围岩压力计算方法

罗彦斌,王思涵,陈建勋,王传武\*

(长安大学公路学院,陕西 西安 710064)

**摘要:**针对深埋小净距隧道围岩压力计算存在中夹岩柱安全系数取值不准确的问题,从隧道施工过程中先行隧道开挖支护完成,后行隧道开挖但支护结构尚未闭合的状态出发,计算中夹岩柱极限承载力,采用强度折减法计算中夹岩柱安全储备系数,推导中夹岩柱对小净距隧道围岩压力分担作用表达式,建立考虑中夹岩柱安全储备的深埋小净距隧道围岩压力计算方法,通过算例验证该方法的合理性,分析净距对隧道围岩压力的影响。研究表明:本研究提出的围岩压力计算方法考虑了岩体参数、隧道跨度、工法等因素对中夹岩柱安全储备系数的影响,能更准确反映中夹岩柱对小净距隧道围岩压力的分担作用,某单洞四车道公路隧道IV级围岩段修正的中夹岩柱承载力为10324 kN/m,拱顶竖向围岩压力为264 kPa;某两车道公路隧道V级围岩段修正的中夹岩柱承载力为2430 kN/m,拱顶竖向围岩压力为251 kPa。修正算法均实现了对实测围岩压力的包络,并且较规范值分别减小了6%和29%。根据本研究提出的算法,III级围岩段四车道、三车道、两车道隧道围岩压力不受小净距影响的临界净距分别为 $0.6B_{4lanes}$ 、 $0.7B_{3lanes}$ 、 $0.7B_{2lanes}$ ,IV级围岩段分别为 $1.2B_{4lanes}$ 、 $0.9B_{3lanes}$ 、 $0.9B_{2lanes}$ ,V级围岩段三车道和两车道隧道临界净距分别为 $1.8B_{3lanes}$ 和 $1.2B_{2lanes}$ 。

**关键词:**隧道工程;深埋小净距隧道;围岩压力;中夹岩柱;强度折减法

中图分类号:U452.2 文献标志码:A

引用格式:罗彦斌,王思涵,陈建勋,等.考虑中夹岩柱安全储备的深埋小净距隧道围岩压力计算方法[J].山东大学学报(工学版),2024,54(3):81-93.

LUO Yanbin, WANG Sihan, CHEN Jianxun, et al. Calculation method of surrounding rock pressure in deep buried neighborhood tunnels considering safety reserve of middle rock pillar[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2024, 54(3):81-93.

## Calculation method of surrounding rock pressure in deep buried neighborhood tunnels considering safety reserve of middle rock pillar

LUO Yanbin, WANG Sihan, CHEN Jianxun, WANG Chuanwu\*

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

**Abstract:** For the problem of inaccurate value of the safety factor of the middle rock pillar in the calculation of the surrounding rock pressure in deep buried neighborhood tunnels, this paper calculated the ultimate bearing capacity of the middle rock pillar from the state that the excavation and support of the first tunnel was completed while the later one was not supported integrality yet, and the strength reduction method was used to calculate the safety reserve factor of the middle rock pillar, deduced the expression of the sharing effect of the middle rock pillar on the surrounding rock pressure of the neighborhood tunnels, and the method of calculating the surrounding rock pressure in deep buried neighborhood tunnels considering the safety reserve of the middle rock pillar was established. The reasonableness of the calculation method of the surrounding rock pressure in this paper was verified by examples, and the influence of the distance on the surrounding rock pressure of the tunnel was analyzed with the calculation method. The results showed that the proposed method of calculating the surrounding rock pressure took into account the influence of rock parameters, tunnel span, excavation method and other factors on the safety reserve factor of the middle rock pillar, which could more accurately reflect the sharing effect of the middle rock pillar on the surrounding rock pressure of neighborhood tunnel than the calculation

收稿日期:2023-03-07

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51978065,52278394);陕西省杰出青年科学基金资助项目(2020JC-28)

第一作者简介:罗彦斌(1980—),男,陕西千阳人,教授,博士生导师,博士,主要研究方向为隧道结构稳定性和耐久性。

E-mail:lyb@chd.edu.cn

\* 通信作者简介:王传武(1990—),男,山东夏津人,副教授,博士,主要研究方向为软弱围岩超大跨度公路隧道设计施工关键技术。

E-mail:wangcwl7@163.com

method of determining the safety factor of the middle rock pillar based on the experience of the current specification; the corrected load capacity of the middle rock pillar in the four-lane tunnel with grade IV surrounding rock was 10 324 kN/m, the maximum vertical surrounding rock pressure of the vault was 264 kPa, the corrected load capacity of the middle rock pillar in the two-lane tunnel with grade V surrounding rock was 2 430 kN/m, the maximum vertical surrounding rock pressure of the vault was 251 kPa, achieving the envelope of the measured value and reducing 6% and 29% respectively compared with the specifications value. The critical distance for the four-lane, three-lane and two-lane tunnel in the grade-III section were  $0.6B_{4lanes}$ ,  $0.7B_{3lanes}$  and  $0.7B_{2lanes}$  respectively, in the grade-IV section were  $1.2B_{4lanes}$ ,  $0.9B_{3lanes}$  and  $0.9B_{2lanes}$  respectively. The critical distance for the three-lane and two-lane tunnel in the grade-V section were  $1.8B_{3lanes}$  and  $1.2B_{2lanes}$ .

**Keywords:** tunnel engineering; deep buried neighborhood tunnel; surrounding rock pressure; middle rock pillar; strength reduction method

## 0 引言

受地形和展线控制,常需在小范围内布置并行隧道,这时往往采用连拱或小净距隧道的形式,相较于连拱隧道,小净距隧道具有施工简单、造价低、施工质量易于控制、有利于公路线型优化的特点<sup>[1-3]</sup>,因此在工程实践中的应用越来越多。小净距隧道施工中经历了原始地应力、先行洞开挖、先行洞支护、后行洞开挖、后行洞支护5次应力场变化,围岩压力大小和作用模式与单洞大跨度隧道、普通分离式隧道明显不同。两隧道间的岩体即中夹岩柱,可以进行力的传递,分担围岩作用于支护结构的竖向荷载<sup>[4-5]</sup>,因此,厘清中夹岩柱承载状态是小净距隧道围岩压力计算的必要条件。

现有小净距隧道围岩压力研究大都依靠现场监测和理论推导<sup>[6-13]</sup>,刘继国等<sup>[14]</sup>基于普氏拱理论,将小净距隧道围岩荷载分为基本松散荷载和附加松散荷载两部分,考虑中夹岩柱有效宽度内的岩体强度与支护结构主动抗力作用计算深埋小净距隧道围岩压力;喻军<sup>[15]</sup>等基于《公路隧道设计规范》(JTG D70 2004)单洞围岩压力计算公式,通过附加荷载折减系数考虑中夹岩柱支撑作用,提出了深埋小净距隧道围岩压力分布模式及计算方法;肖明清等<sup>[16]</sup>基于复合式衬砌总安全系数法,结合数值计算,采用平衡塑性区范围内岩体重力的最小支护抗力计算围岩压力代表值。可见,定量表示中夹岩柱的支撑作用是深埋小净距隧道围岩压力理论计算的关键,相关研究可分为中夹岩柱受力特点、破坏模式与安全性评价3个方面。文献<sup>[17-18]</sup>建立有限差分模型研究了开挖过程对中夹岩柱应力、变形发展规律的影响;文献<sup>[19-22]</sup>结合工程实例研究了隧道净距的影响,以上研究得到了中夹岩柱受力特点;针对中夹岩柱失稳破坏模式,Mortazavi等<sup>[23]</sup>通过数值模拟总结岩柱受荷增加直到失稳破坏的

历程,章慧健等<sup>[24]</sup>综合数值模拟与模型试验,以屈服接近度和应力为指标研究中夹岩柱各部位稳定性;在中夹岩柱安全性评价方面,Esterhuizen等<sup>[25]</sup>统计分析矿柱失稳案例,提出了一种估算矿柱强度和选择设计安全系数的方法;文献<sup>[26-28]</sup>分别建立了浅埋土质隧道中夹岩柱承载模型、连拱隧道混凝土中墙和小净距隧道的岩体中墙承载模型、深埋小净距隧道中夹岩柱承载模型,给出了中夹岩柱安全性评价方法。文献<sup>[28]</sup>通过分析不同围岩级别、埋深情况下中夹岩柱破坏案例,建立了中夹岩柱力学分析模型,将中夹岩柱上覆荷载作为已知条件推导滑块下滑力,根据中夹岩柱岩体参数计算最大抗滑力,进而计算中夹岩柱安全储备系数。相应地,若能求得最大抗滑力和安全储备系数,则可据此研究中夹岩柱的支撑作用,进一步提出深埋小净距隧道围岩压力计算方法。

考虑中夹岩柱安全储备的深埋小净距隧道围岩压力计算方法,借鉴中夹岩柱剪切破坏力学模型,从小净距隧道施工中先行隧道支护完成而后行隧道开挖但支护结构尚未闭合的状态出发,计算中夹岩柱极限承载力,基于强度折减法计算中夹岩柱安全储备系数,推导中夹岩柱对小净距隧道围岩压力分担作用表达式,建立考虑中夹岩柱安全储备的深埋小净距隧道围岩压力计算方法,给出计算实例,分析围岩压力随双洞净距变化规律。本研究提出了基于强度折减确定中夹岩柱安全系数的方法,考虑了岩体质量、隧道净距、跨度等因素影响,更接近于中夹岩柱在受力最不利时的实际工作状态,理论上可使隧道围岩压力计算结果更加准确。

## 1 现行规范小净距隧道围岩压力计算方法及存在的问题

小净距隧道竖向围岩压力分为基本松散压力

$q_1$  和附加松散压力  $q_2$  两部分,如图 1 所示, $q_1$  为单洞稳定平衡拱内的围岩重力; $q_2$  为中夹岩柱不发挥承载作用时两洞室形成平衡拱内的围岩重力减去基本松散压力和中夹岩柱分担的压力,计算公式为:

$$q_1 = \gamma h_{q1} = 0.45 \times 2^{S-1} \gamma [1 + i(B_t - 5)], \quad (1)$$

$$q'_2 = \gamma h'_{q2} = \gamma \left[ \frac{4}{3} (h_1^w - h_{q1}) - \frac{P_z}{\gamma B_m} \right] \frac{B_{wp} + B_t}{B_m}, \quad (2)$$

$$q_2 = \gamma h_{q2} = \gamma \left[ \frac{4}{3} (h_1^w - h_{q1}) - \frac{P_z}{\gamma B_m} \right] \frac{B_{wp}}{B_m}, \quad (3)$$

式中: $\gamma$  为围岩重度,  $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ ;  $h_{q1}$  为基本围岩压力的等效荷载高度,  $\text{m}$ ;  $i$  为开挖宽度每增减 1  $\text{m}$  时的围岩压力增减率;  $h'_{q2}$  为隧道内侧附加围岩压力的等效荷载高度,  $\text{m}$ ;  $h_1^w$  为不考虑中夹岩柱作用,以整个小净距隧道开挖宽度计算所得塌落拱高度,  $\text{m}$ ;  $B_{wp}$  为外侧边破裂面在水平方向的投影长度,  $B_{wp} = (H_t - H_w) \tan\left(45^\circ - \frac{1}{2}\varphi_c\right)$ ,  $\text{m}$ ;  $B_{np}$  为内侧边破裂面在水平方向的投影长度,  $B_{np} = \min\left[\frac{1}{2}B_z, (H_t - H_n) \tan\left(45^\circ - \frac{\varphi_c}{2}\right)\right]$ ,  $\text{m}$ ;  $H_t$  为隧道开挖高度,  $\text{m}$ ;  $H_w$  为洞室外侧破裂面在边墙上起始的高度,  $\text{m}$ ;  $H_n$  为洞室内侧破裂面在边墙上起始的高度,  $\text{m}$ ;  $\varphi_c$  为岩体计算摩擦角, ( $^\circ$ );  $B_t$  为单侧隧道的开挖宽度,  $\text{m}$ ;  $B_m$  为小净距隧道单侧洞室可能坍塌的宽度,  $B_m = B_t + B_{wp} + B_{np}$ ,  $\text{m}$ ,  $h_{q2}$  为隧道外侧附加围岩压力的等效荷载高度,  $\text{m}$ 。中夹岩柱对上部岩体的支撑力

$$P_z = \frac{R_s^T B_{zp}}{K_z}, \quad (4)$$

式中: $R_s^T$  为中夹岩柱岩体的换算强度,由岩体单轴抗压设计强度和支护结构主动抗力组成,  $\text{kPa}$ ;  $B_{zp}$  为中夹岩柱有效承载宽度,  $B_{zp} = B_z - 2B_{np}$ ,  $\text{m}$ ;  $K_z$  为中夹岩柱的支撑能力的安全系数,一般地,  $K_z = 2$ 。

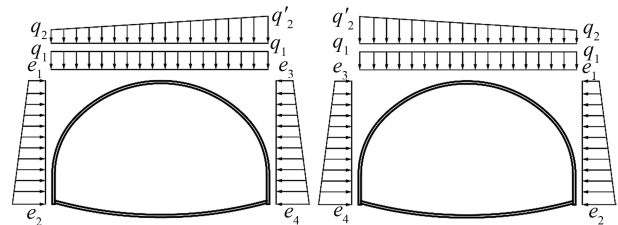


图 1 小净距隧道荷载分布示意图

Fig.1 Small spacing tunnel load distribution diagram

以上深埋小净距隧道围岩压力计算结果受中夹岩柱对上部岩体支撑作用影响,可见明确中夹岩柱承载状态是计算小净距隧道围岩压力的前提。由式(4)可知,现行规范以岩体自身强度和支护结

构主动抗力全部发挥作用为基础,考虑安全储备计算得到中夹岩柱支撑力。该式未能考虑施工过程中中夹岩柱的受力状态,安全系数  $K_z$  凭经验取值,未综合考虑岩体质量、隧道净距、跨度等因素,极易导致中夹岩柱支撑力计算结果不准确,进而影响小净距隧道围岩压力计算结果。

## 2 中夹岩柱承载作用修正及围岩压力计算新方法

### 2.1 中夹岩柱支撑力修正

针对中夹岩柱支撑力计算未能考虑施工过程中不利状态的问题,可通过分析中夹岩柱荷载及约束情况变化确定中夹岩柱承载最不利状态,建立该状态下中夹岩柱岩体抗剪强度、隧道支护作用和上覆围岩荷载的力学分析模型,推导中夹岩柱极限承载力表达式。针对中夹岩柱安全系数凭经验取值导致围岩压力计算结果不准确的问题,本研究综合考虑岩体质量、开挖方法、隧道净距、跨度等因素,建立中夹岩柱承载状态数值模型,采用强度折减法计算中夹岩柱安全储备系数。基于中夹岩柱极限承载力和工作状态下安全储备系数即可得中夹岩柱支撑力。

基于极限承载力和安全储备系数的中夹岩柱支撑力

$$P'_z = P_{z,limit} / K, \quad (5)$$

式中: $P_{z,limit}$  为岩柱极限承载力,  $\text{kPa}$ ;  $K$  为岩柱安全储备系数。

### 2.2 中夹岩柱极限承载力

深埋小净距隧道施工应力场经历了初始地应力—先行隧道开挖—先行隧道支护—后行隧道开挖—后行隧道支护 5 个阶段,如图 2 所示。中夹岩柱承受上覆围岩荷载,同时受到未开挖岩体和支护结构的约束作用,其中约束作用有利于中夹岩柱保持稳定。根据塌落拱理论,后行隧道开挖完成,受施工扰动围岩的范围不再扩大,上覆围岩荷载不再增长,即后行隧道开挖支护时,上覆围岩荷载最大;小净距隧道先行隧道开挖并支护完成,后行隧道开挖但未支护时,中夹岩柱侧向仅受先行隧道支护结构约束,甚至受后行隧道开挖造成的围岩松弛影响,中夹岩柱与先行隧道支护结构间可能处于接触但无相互作用力的状态<sup>[28]</sup>。当分台阶施工,开挖面积达到最大时,中夹岩柱后行隧道一侧还受到上台阶支护结构约束,但此时支护拱脚悬空,难以为中夹岩柱提供有效支撑。可见,中夹岩柱承载最不利状态为后行隧道开挖阶段,韦彬等<sup>[29]</sup>的研究结果也证实了这一点。

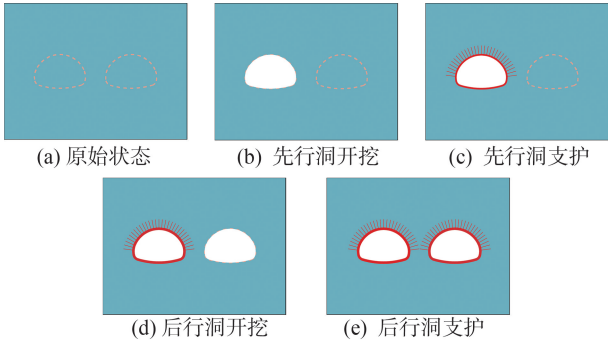


图2 小净距隧道施工示意

Fig.2 Construction drawing of small clearance tunnel

2.2.1 直线形滑动破坏面

假设中夹岩柱在上覆荷载作用下发生剪切破坏,产生直线形剪切滑动面。中夹岩柱力学模型如图3所示,塌落拱内松散岩体的作用简化为均布荷载,左侧滑动铰支座代表先行隧道支护结构,后行隧道开挖使中夹岩柱临空,从而形成潜在滑动面,α为潜在滑面与竖直方向所成角,当d/H < tan α,产生梯形滑块;当d/H > tan α,产生三角形滑块<sup>[28]</sup>。由于公路隧道多采用曲墙式衬砌,结构较为扁平,产生三角形滑块的情形较为多见。

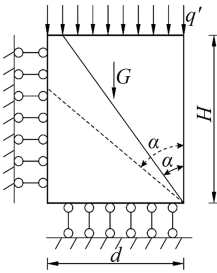


图3 中夹岩柱计算模型(直线滑动面)<sup>[28]</sup>

Fig.3 Calculation model of middle rock pillar (Straight sliding surface)<sup>[28]</sup>

考虑到滑动面强度和穿过潜在滑动面的先行隧道锚杆抗剪作用,滑面最大抗滑力<sup>[28]</sup>

$$R = cd(1 + \sin \varphi) \csc \left( 45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) + \frac{nf_v S}{d_m}, \quad (6)$$

式中:c为岩体黏聚力,kPa;φ为岩体内摩擦角,°;α = 45° - φ/2,°;d为中夹岩柱宽度,即先行隧道与后行隧道的间距,m;n为穿过滑面的锚杆数量;f<sub>v</sub>为锚杆抗剪强度,kPa;S为锚杆截面积,m<sup>2</sup>;d<sub>m</sub>为锚杆纵向间距,m。

三角形滑块下滑力为

$$T_\Delta = q'H \sin \alpha + \frac{1}{2} \gamma H^2 \sin \alpha, \quad (7)$$

式中:q'为中夹岩柱顶作用的均布荷载,kPa;H为滑体高度,m。

滑块处于极限平衡状态时滑面最大抗滑力与

滑块的下滑力相等,令式(6)与式(7)相等,可得滑块为三角形时中夹岩柱顶作用的均布荷载。出于安全考虑,也可以忽略锚杆的作用。

$$q' = \frac{cH(1 + \sin \varphi) \sec(45^\circ - \varphi/2) + nf_v S/d_m}{H \sin \alpha} = \frac{1}{2} \gamma H. \quad (8)$$

式(8)中的q'是在中夹岩柱处于极限平衡的状态下得到的,中夹岩柱的极限承载力

$$P_{z,limit} = dq'.$$

2.2.2 曲线形滑动破坏面

在软岩或土质隧道中,破坏可能沿弯曲滑动面发生<sup>[7,30]</sup>,本研究建立曲面滑动计算模型,以适应在岩质隧道V级围岩及土质隧道的破坏模式,并借鉴边坡稳定性计算方法,采用条分法开展中夹岩柱稳定性分析<sup>[31-33]</sup>。计算模型如图4所示,滑动面AB为圆弧,且总经过A点。根据Fellenius条分法,将圆弧以上的土体划分为若干竖条,对每一竖条做受力分析,可以求得岩柱的安全系数

$$K = \frac{c \sum_{i=1}^n l_i + \tan \varphi \sum_{i=1}^n (\gamma b_i h_i + q' b_i) \cos \theta_i}{\sum_{i=1}^n (\gamma b_i h_i + q' b_i) \sin \theta_i}, \quad (10)$$

式(10)中的几何参数如图5所示,l<sub>i</sub>为分条i的底面长度,m;b<sub>i</sub>为分条i的宽度,m;h<sub>i</sub>为分条i的高度,m;W<sub>i</sub>为分条i所受重力,kPa;θ<sub>i</sub>为分条i底面倾角。

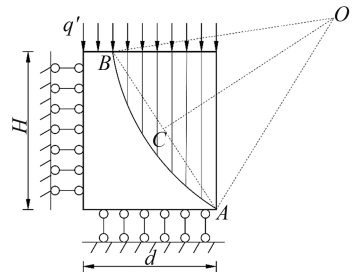


图4 中夹岩柱计算模型(曲线滑动面)

Fig.4 Calculation model of middle rock pillar (curved sliding surface)

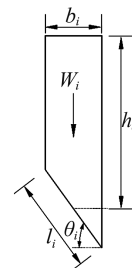


图5 分条计算参数

Fig.5 Calculation parameters for slices

令  $K=1$ , 可求得岩柱顶部承受的极限荷载

$$q' = \frac{c \sum_{i=1}^n l_i + \gamma \tan \varphi \sum_{i=1}^n b_i h_i \cos \theta_i - \gamma \sum_{i=1}^n b_i h_i \sin \theta_i}{\sum_{i=1}^n b_i \sin \theta_i - \tan \varphi \sum_{i=1}^n b_i \cos \theta_i} \quad (11)$$

应该注意到条分法要求不断变换圆心位置与半径进行试算, 以确定滑动面位置。对此本研究根据中夹岩柱的破坏特点, 编制程序搜索滑动面。搜索滑动面的过程如下:

① 变动  $B$  点位置  $B_{n-1} \rightarrow B_n$ , 求  $CO$  所在直线方程, 圆心必定位于该直线上;

② 改变圆半径  $R_{n-1} \rightarrow R_n$ , 求相应的圆心  $O_n$ , 按式(11)求  $q'$ ;

③ 计算弦心距与半径的比值  $OC/R$ , 当  $OC/R < \varepsilon$  ( $0 < \varepsilon < 1$ ), 重复②~③;

④ 当  $n < d/b_i$  时, 重复①~④;

⑤  $\min(q')$  即为岩柱顶部承受的极限荷载,  $\min(q')$  对应的滑动面即为潜在滑动面。

### 2.3 中夹岩柱安全储备系数

深埋小净距隧道中夹岩柱在实际工作中一般未达到极限承载状态, 具有一定的安全储备, 考虑先行隧道支护结构, 不考虑后行隧道中夹岩柱一侧边墙支护结构, 建立中夹岩柱承载状态数值模型, 采用强度折减法<sup>[34-38]</sup>, 保持上覆荷载和边界条件不变, 不断降低中夹岩柱抗剪强度使其达到极限平衡状态, 以此确定中夹岩柱的安全储备系数。

基于强度折减法的中夹岩柱安全储备系数为

$$K = \frac{\tau_s}{\tau_{s, \text{limit}}} \quad (12)$$

式中:  $\tau_s$  为中夹岩柱岩体实际抗剪强度,  $\tau_{s, \text{limit}}$  为折减至极限平衡状态时中夹岩柱岩体抗剪强度。摩尔-库伦强度准则条件下, 强度参数  $c, \tan \varphi$  按式(13)进行折减

$$\begin{cases} c' = \frac{c}{K_i} \\ \varphi' = \arctan\left(\frac{\tan \varphi}{K_i}\right) \end{cases} \quad (13)$$

式中  $K_i$  为第  $i$  次折减的折减系数。将折减后的参数  $c', \varphi'$  代入数值模型试算, 直到中夹岩柱失稳破坏, 此时的  $K_i$  即为中夹岩柱安全储备系数  $K$ 。本研究以中夹岩柱最大剪切应变增量  $\zeta$  为失稳判据指标<sup>[39-40]</sup>, 以  $5 \times 10^{-3}$  为限值, 判断围岩塑性变形发展状况, 从先行隧道施工开始, 最大剪切应变增量在

中夹岩柱中逐渐累积, 并在达到最不利状态时进一步发展, 最大剪切应变增量的分布体现了岩体质量、工法、净距、跨度等因素的综合影响, 将最终反映到中夹岩柱安全储备系数中。

相较于人为给定的方法, 本研究基于强度折减确定安全储备系数的方法中, 中夹岩柱承载数值计算模型包含岩体质量、隧道净距、跨度等因素, 计算更接近于中夹岩柱在受力最不利时的实际工作状态, 得到的中夹岩柱安全储备系数更加准确。

### 2.4 考虑中夹岩柱安全储备的深埋小净距隧道围岩压力计算方法

基于以上研究, 提出考虑中夹岩柱安全储备的深埋小净距隧道围岩压力计算方法, 其具体的实现过程是:

(1) 根据现场实际建立中夹岩柱计算模型, 岩质隧道 III、IV 级围岩潜在破坏面采用直线形, V 级围岩采用曲线形; 土质隧道均按曲线形滑动面建立计算模型。依据式(8)或式(11)计算极限平衡状态下中夹岩柱顶部均布荷载  $q'$ , 利用式(9)计算中夹岩柱极限承载力  $P_{z, \text{limit}}$ 。

(2) 建立中夹岩柱承载数值模型, 采用强度折减法, 依据式(13)不断调整折减系数  $K_i$  进行中夹岩柱岩体强度折减, 得到中夹岩柱安全储备系数  $K$ 。

(3) 根据中夹岩柱极限承载力  $P_z$  和中夹岩柱安全储备系数  $K$ , 由式(5)计算得到修正的中夹岩柱支撑力  $P'_z$ 。

(4) 深埋小净距隧道附加松散压力采用本研究修正后的中夹岩柱支撑力  $P'_z$  进行确定。基本松散压力、浅埋隧道围岩压力和水平围岩压力参考现行规范计算。

## 3 工程算例

### 3.1 算例 1

以某单洞四车道公路隧道为例, 给出考虑中夹岩柱实际承载安全储备的深埋小净距隧道围岩压力计算过程, 并将计算结果与实测值相比较。

#### 3.1.1 工程概况

该隧道采用分离式双向八车道设计, 最大开挖跨度 21.5 m, 最大开挖高度 14.3 m, 扁平率 0.665, 隧道左右线相距约 17.6~20.3 m, 属小净距扁平超大跨度隧道。计算断面围岩主要是页岩、灰岩夹泥灰岩薄层, 岩体较破碎, 结构面发育, 层

间结合一般,为破碎状结构或块状结构,岩芯呈少量短柱状及碎块状,属IV级围岩,现场掌子面如图6所示,围岩物理力学参数见表1所列。计算时中夹岩柱潜在滑动面按照直线形计算。该断面开挖跨度21.3 m,埋深76 m,两洞净距19 m,拱部120°范围内打设小导管作为超前支护,采用中隔壁法(center diaphragm, CD)施工。初期支护参数见表2所列。



图6 IV级围岩段掌子面

Fig.6 Tunnel face of grade-IV surrounding rock

表1 IV级围岩段围岩计算参数  
Table 1 Calculation Parameter for grade-IV surrounding Rock

围岩	$E/\text{GPa}$	$c/\text{MPa}$	$\varphi/(\text{°})$	$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	$\mu$	地基容许承载力/ $\text{kPa}$
IV级围岩	4.5	560	39	23.5	0.3	750
IV级围岩超前加固区	4.5	728	51	23.5	0.3	/

表2 IV级围岩段初期支护参数  
Table 2 Initial support parameters for grade-IV surrounding rock

支护结构	超前支护			钢架		喷射混凝土		锚杆			钢筋网	
	型号/ mm	长度/ m	间距/cm (环×纵)	型号	间距/ cm	标号	厚度/ cm	型号/ mm	长度/ m	间距/cm (环×纵)	型号	间距/cm (环×纵)
主洞初期支护	Φ50 超前小导管	4.5	@ 40×300	I20b	100	C25	28	Φ25 中空注浆锚杆	4	@ 100×100	Φ8	@ 20×20
临时支护	Φ42 超前小导管	4.0	@ 40×300	I18	100	C25	20	Φ22 早强砂浆锁脚锚杆	3	@ 100×100	Φ8	@ 20×20

为了解围岩压力的量值及分布状态,在初期支护与围岩间布设钢弦式压力盒,开展围岩压力现场量测工作,测点布置如图7所示,现场埋设如图8所示。

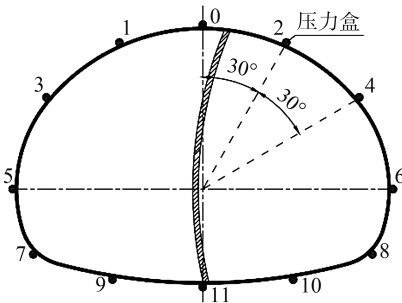


图7 围岩压力测点布置示意

Fig.7 Illustration of the arrangement of pressure measurement points in the surrounding rock

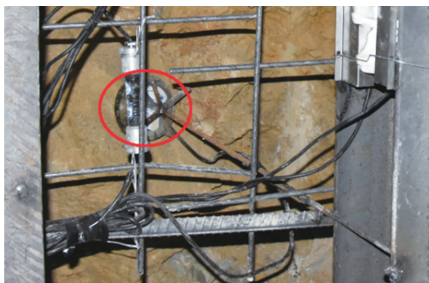


图8 压力盒现场埋设

Fig.8 Pressure box buried on site

### 3.1.2 围岩压力计算

#### 3.1.2.1 极限承载力求解

根据第2.2节和式(4)分别计算中夹岩柱极限

承载力,中夹岩柱单轴抗压设计强度采用饱和单轴抗压强度标准值,根据《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011)<sup>[41]</sup>,按式(14)计算,计算结果见表3所示。

$$f_{rk} = \frac{f_a}{\psi_r} \quad (14)$$

式中: $f_a$ 为岩石地基承载力特征值, $\text{kPa}$ ; $\psi_r$ 为根据岩体完整程度及结构面发育状况确定的折减系数,对较完整岩体可取0.2~0.5,本文中 $\psi_r = 0.5$ ; $f_{rk}$ 为岩石饱和单轴标准抗压强度, $\text{kPa}$ 。

表3 深埋小净距隧道中夹岩柱极限承载力  
Table 3 Ultimate bearing capacity of middle rock pillar in deep buried small clearances tunnel

计算断面	修正算法		规范算法	
	上覆荷载/ $\text{kPa}$	极限承载力/ $(\text{kN}\cdot\text{m}^{-1})$	上覆荷载/ $\text{kPa}$	极限承载力/ $(\text{kN}\cdot\text{m}^{-1})$
四车道, IV级围岩	2 228	42 332	1 800	34 200

#### 3.1.2.2 数值模型的建立

采用FLAC<sup>3D</sup>有限差分程序建立数值模型<sup>[42-44]</sup>,模拟小净距隧道施工过程。围岩计算参数见表1所列,超前支护的作用简化为拱顶120°范围内,厚度1 m的围岩强化区, $c$ 、 $\varphi$ 提升30%。初期支护结构采用Liner单元模拟,采用等效刚度法按式(15)(16)将型钢混凝土结构等效为匀质材料:

$$E = E_c + \frac{S_g E_g}{S}, \quad (15)$$

式中,  $E$  为折算后的弹性模量, GPa;  $E_c$  为折算前混凝土的弹性模量, GPa;  $E_g$  为钢架的弹性模量, GPa;  $S_g$  为钢架的截面面积,  $m^2$ ;  $S$  为支护结构的截面面积,  $m^2$ 。

$$\gamma' = \gamma'_c + \frac{S_g}{S}(\gamma'_g - \gamma'_c), \quad (16)$$

式中,  $\gamma'$  为折算后的混凝土重度,  $kN \cdot m^{-3}$ ;  $\gamma'_c$  为折算前的混凝土重度,  $kN \cdot m^{-3}$ ;  $\gamma'_g$  为钢架的重度,  $kN \cdot m^{-3}$ 。Liner 单元建模参数见表 4 所列。

表 4 IV 级围岩段 Liner 单元参数

Table 4 Calculation parameter of liner unit

支护类型	$E/GPa$	$\mu$	$\gamma'/(kN \cdot m^{-3})$	$t/m$
初期支护	28.97	0.22	22.80	0.28
中隔壁	29.23	0.22	22.87	0.20

### 3.1.2.3 强度折减法计算结果分析

考虑施工工法对中夹岩柱的影响, 数值模型

左洞为先行隧道, 采用 CD 法施工, 各导洞依次开挖支护, 直至后行隧道开挖但未完整施作支护结构时, 求解模型。按场地实际参数求解的结果分析中夹岩柱安全性, 塑性变形发展幅度不大, 则折减中夹岩柱强度参数后重新求解, 直到最大剪切应变增量达到  $5 \times 10^{-3}$  的区域贯穿岩柱, 则认为中夹岩柱失稳破坏。

岩体参数未折减, 后行隧道开挖完成而支护结构未闭合时最大剪切应变增量分布如图 9(a) 所示, 可见仅有较小变形集中在隧道两侧边墙处, 说明中夹岩柱安全储备充足。如图 9(b)~(d) 所示, 随着折减系数增大, 最大剪应变增量  $\zeta$  较大的区域呈现“X”分布, 最大变形集中在未支护边墙处, 波及中夹岩柱后行隧道一侧上部围岩, 随着强度参数的减小, 岩柱顶部产生较大变形, 当折减系数达到 4.2 时, 岩柱上下两个较大变形集中分布的区域相互连通, 出现连续的塑性变形带, 岩柱失稳。强度折减法计算得到的该断面中夹岩柱安全系数为 4.1。

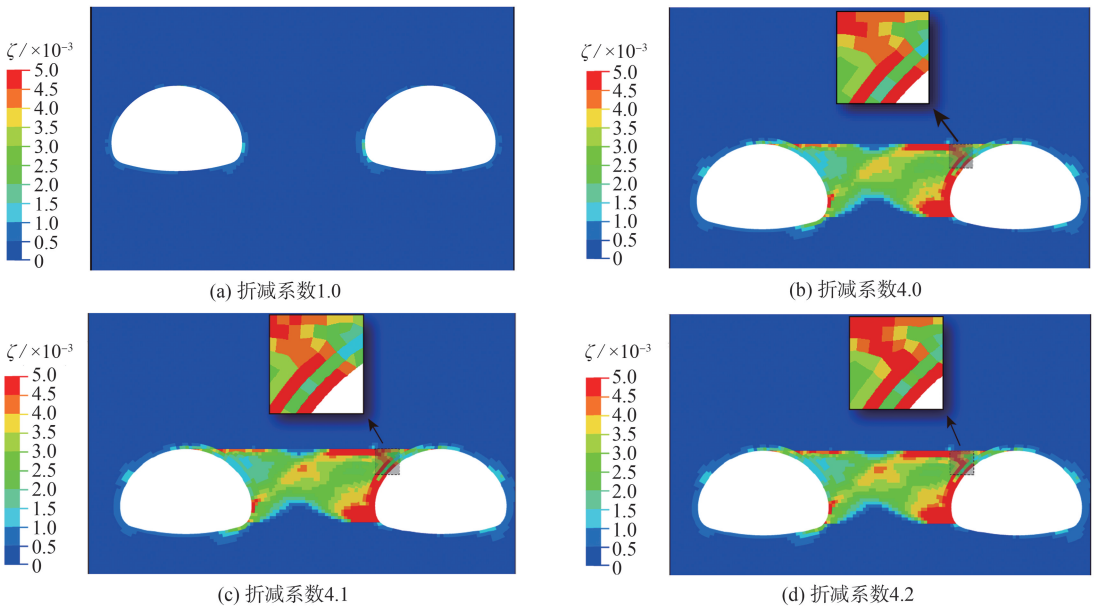


图 9 不同折减系数下最大剪切应变增量云图(案例 1)

Fig.9 Cloud map of maximum shear strain increment under different discount factors(example 1)

### 3.1.2.4 围岩压力计算结果对比

将第(2)节计算的中夹岩柱极限承载力与第(3)节计算的中夹岩柱安全系数代入式(5)计算出中夹岩柱支撑力为 10 324 kN/m, 再将该支撑力代

入式(1)~(3)计算出拱顶竖向围岩压力为 264 kPa。同时给出围岩压力实测值、文献[14]计算值、规范值, 见表 5 所示。

表 5 案例 1 围岩压力计算值与实测值

Table 5 Calculated and measured values of example 1 surrounding rock pressure

单位: kPa

断面	实测值				文献[14]计算值				规范值			修正值		
	拱顶 竖向	内侧 竖向	外侧 竖向	拱顶 竖向	内侧 竖向	外侧 竖向	拱顶 竖向	内侧 竖向	外侧 竖向	拱顶 竖向	内侧 竖向	外侧 竖向	拱顶 竖向	
四车道, IV 级围岩	77	285	257	271	301	261	281	271	257	264				

由表5可见,该单洞四车道公路隧道IV级围岩段围岩压力,规范值>文献[14]计算值>修正值>实测值,本研究提出的修正算法计算结果实现了实测围岩压力值的包络,且对于最大竖向围岩压力(内侧)和拱顶竖向围岩压力,修正值较规范值分别减小了10%和6%。

### 3.2 算例2

以某单洞两车道公路隧道<sup>[45]</sup>为例,给出围岩压力计算结果。隧道埋深55 m,隧道开挖高度9 m,开挖宽度11 m,左右两洞净距6 m。围岩岩性差,属V级围岩,按圆弧形考虑潜在滑动面。

编写程序自动搜索潜在滑动面位置,设置破裂点B调整步距与圆心调整步距为0.5 m,计算终

止条件为 $OC/R < 0.997$ ,计算得到最不利工况即极限荷载 $q'$ 最小的工况为破裂点B距后行隧道一侧中夹岩柱边界5 m,滑动面圆弧半径67 m,该工况下 $q' = 620 \text{ kPa}$ ,  $P_{z,limit} = 3\,720 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-1}$ 。采用强度折减法得到的最大剪切应变分布如图10所示,中夹岩柱安全系数为1.4,那么中夹岩柱支撑力为 $2\,657 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-1}$ 。

由表6可见,该单洞两车道公路隧道V级围岩段围岩压力,规范值>文献[14]计算值>修正值>实测值,本研究提出的修正算法计算结果实现了实测围岩压力值的包络,且对于最大竖向围岩压力(内侧)和拱顶竖向围岩压力,修正值较规范值分别减小了38%和29%。

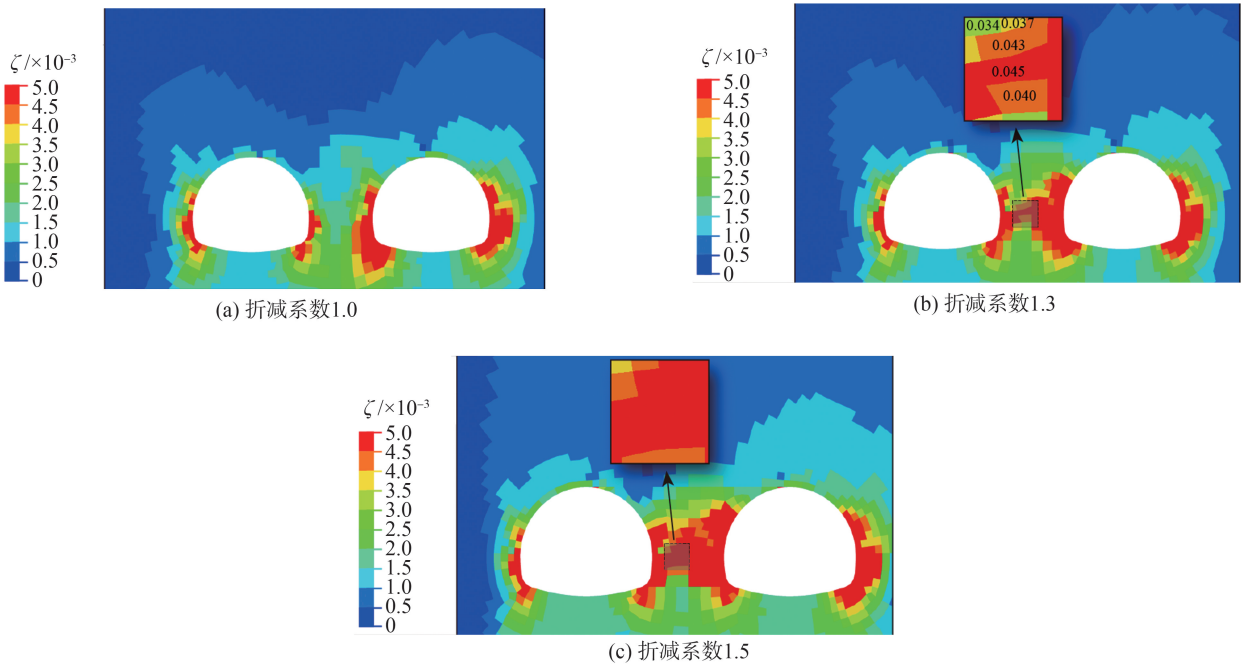


图10 不同折减系数下最大剪切应变增量云图(案例2)

Fig.10 Cloud map of maximum shear strain increment under different discount factors(example 2)

表6 案例2围岩计算压力与实测压力

Table 6 Calculated and measured values of example 2 surrounding rock pressure

单位:kPa

断面	实测值									
	文献[14]计算值				规范值			修正值		
	拱顶 竖向	内侧 竖向	外侧 竖向	拱顶 竖向	内侧 竖向	外侧 竖向	拱顶 竖向	内侧 竖向	外侧 竖向	拱顶 竖向
两车道,IV级围岩	240	389	241	315	436	270	353	276	226	248

## 4 工程应用

根据提出的修正深埋小净距隧道围岩压力计算方法,以III、IV、V级围岩为例研究深埋小净距隧道竖向围岩压力随净距的变化情况。共设置以下几种工况:工况1,III级围岩四车道隧道;工况2,III级围岩三车道隧道;工况3,III级围岩两车道隧道;

工况4,IV级围岩四车道隧道;工况5,IV级围岩三车道隧道;工况6,IV级围岩两车道隧道;工况7,V级围岩三车道隧道;工况8,V级围岩两车道隧道。III级围岩工况埋深36 m,IV、V级围岩工况埋深70 m,按本研究提出的围岩压力计算方法算得的等效荷载高度判断,以上工况均属深埋断面。III、IV级围岩工况破坏面按直线形考虑,V级围岩工况破坏面按曲线形考虑,支护参数如表7所列。

表7 工况1~8初期支护参数  
Table 7 Initial support parameters for working conditions 1-8

计算断面	钢架		喷射混凝土		锚杆 (型号采用 $\Phi 22$ 水泥砂浆锚杆)		钢筋网	
	型号	间距/cm	标号	厚度/cm	长度/m	间距/cm (环×纵)	型号/mm	间距/cm (环×纵)
工况1 (Ⅲ级4车道)	I18	80	C25	24	3.0	@ 100×80	$\Phi 8$	@ 25×25
工况2 (Ⅲ级3车道)	I18	100	C25	24	3.0	@ 100×100	$\Phi 8$	@ 25×25
工况3 (Ⅲ级2车道)			C25	12	2.5	@ 100×120	$\Phi 8$	@ 25×25
工况4 (Ⅳ级4车道)	I20b	100	C25	28	4.5	@ 100×100	$\Phi 8$	@ 20×20
工况5 (Ⅳ级3车道)	I18	75	C25	25	3.5	@ 100×75	$\Phi 8$	@ 20×20
工况6 (Ⅳ级2车道)	H14×16 格栅拱架	120	C25	20	3.5	@ 120×120	$\Phi 8$	@ 20×20
工况7 (Ⅴ级3车道)	I22b	60	C25	28	3.5	@ 100×60	$\Phi 8$	@ 20×20
工况8 (Ⅴ级2车道)	I20	60	C25	26	3.5	@ 100×60	$\Phi 8$	@ 20×20

Ⅲ级围岩条件下的四车道深埋小净距隧道围岩压力计算结果如图11~13所示。

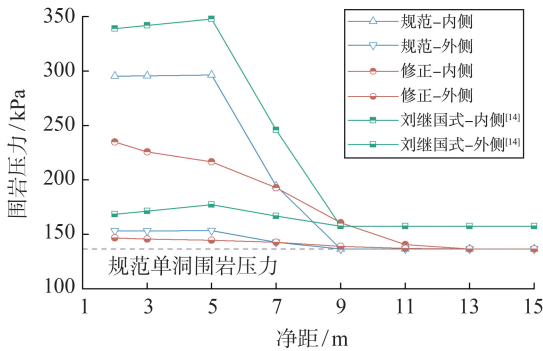


图11 Ⅲ级围岩四车道隧道围岩压力随净距变化分布  
Fig.11 The distribution of the surrounding rock pressure with the distance in grade-III surrounding rock four-lane tunnel

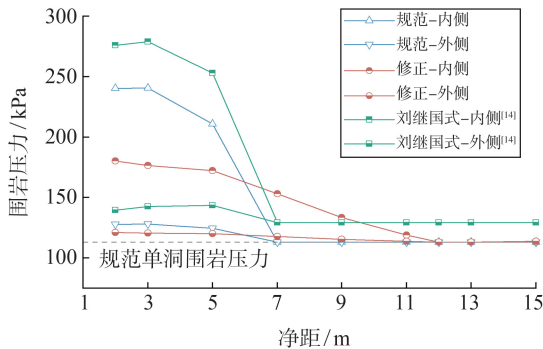


图12 Ⅲ级围岩三车道隧道围岩压力随净距变化分布  
Fig.12 The distribution of the surrounding rock pressure with the distance in grade-III surrounding rock three-lane tunnel

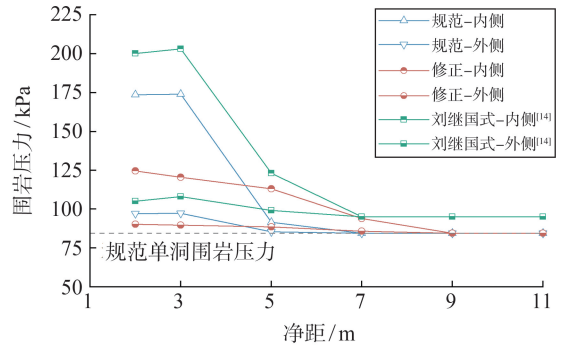


图13 Ⅲ级围岩两车道隧道围岩压力随净距变化分布  
Fig.13 The distribution of the surrounding rock pressure with the distance in grade-III surrounding rock two-lane tunnel

计算值随净距收敛较快,四车道、三车道、两车道隧道分别在净距13 ( $0.6B_{4lanes}$ )、12 ( $0.7B_{3lanes}$ )、9 m ( $0.7B_{2lanes}$ )时,修正算法计算结果已不受小净距影响。四车道隧道临界净距稍小是由于支护参数较强造成的,3种工况的临界净距差别不大,显示出岩体性质较好时,临界净距对隧道跨度不敏感。规范算法和文献[14]计算结果均收敛更快,且在净距较小时围岩压力值远大于修正算法。

Ⅳ级围岩条件下,不同跨度围岩压力计算结果如图14~16所示,修正算法计算结果整体小于规范值与文献[14]计算值,对于四车道隧道,净距达到21 m时,修正算法与规范算法计算结果相差不大,净距达到26 m ( $1.2B_{4lanes}$ )时,修正算法计算结果显示隧道内外侧竖向围岩压力相等,均等于单洞围岩

压力。对于三车道和两车道隧道,围岩压力不受小净距影响的临界净距分别是 15 m ( $0.9B_{3lanes}$ ) 和 11 m ( $0.9B_{2lanes}$ )。

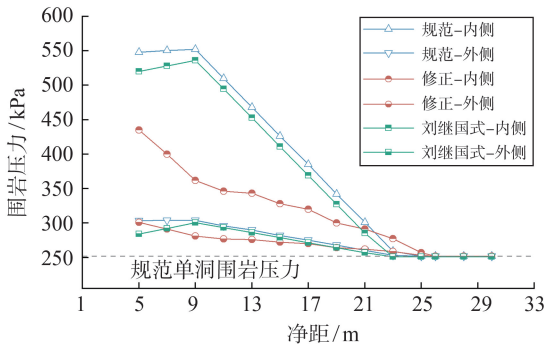


图 14 IV级围岩四车道隧道围岩压力随净距变化分布  
Fig.14 The distribution of the surrounding rock pressure with the distance in grade-IV surrounding rock four-lane tunnel

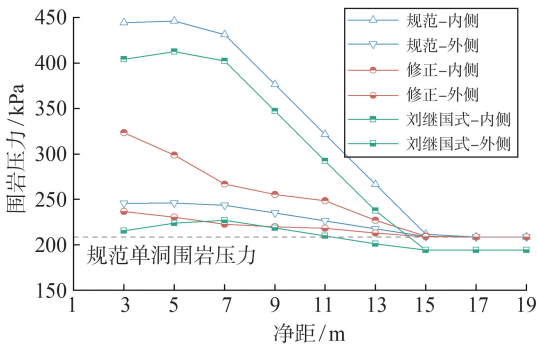


图 15 IV级围岩三车道隧道围岩压力随净距变化分布  
Fig.15 The distribution of the surrounding rock pressure with the distance in grade-IV surrounding rock three-lane tunnel

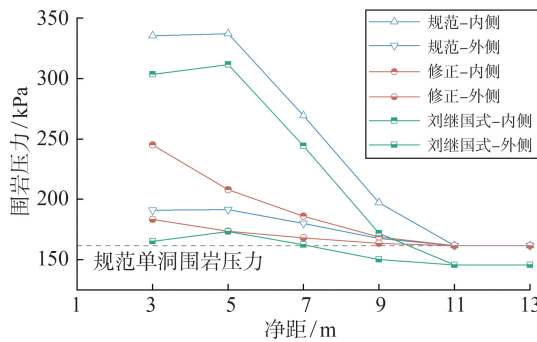


图 16 IV级围岩两车道隧道围岩压力随净距变化分布  
Fig.16 The distribution of the surrounding rock pressure with the distance in grade-IV surrounding rock two-lane tunnel

V级围岩条件下的三车道与两车道深埋小净距隧道围岩压力计算结果如图 17~18 所示,围岩压力随净距的收敛较慢,修正算法的结果显著小于另两种方法。当净距分别达到大于 30 m ( $1.8B_{3lanes}$ )、14 m ( $1.2B_{2lanes}$ ) 时,修正算法显示隧道已不受小净距影响。

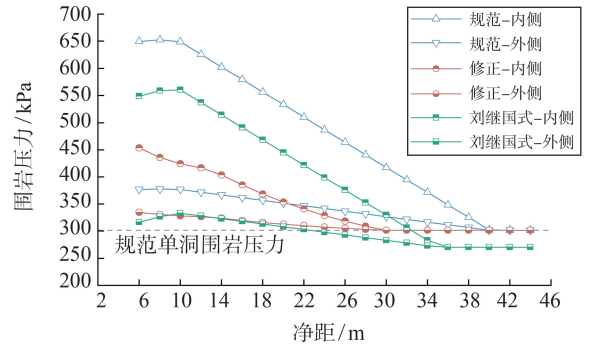


图 17 V级围岩三车道隧道围岩压力随净距变化分布  
Fig.17 The distribution of the surrounding rock pressure with the distance in grade-V surrounding rock three-lane tunnel

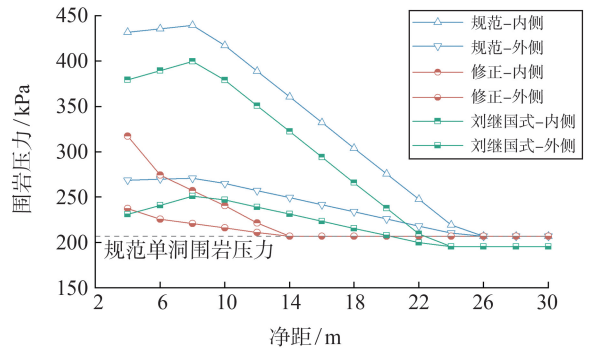


图 18 V级围岩两车道隧道围岩压力随净距变化分布  
Fig.18 The distribution of the surrounding rock pressure with the distance in grade-V surrounding rock two-lane tunnel

## 5 结论

(1) 本研究提出考虑中夹岩柱安全储备的深埋小净距隧道围岩压力计算方法,该方法充分考虑小净距隧道先后施工特点,从中夹岩柱承载最不利状态出发计算岩柱极限承载力,再以强度折减法计算得到中夹岩柱安全储备系数,可准确反映中夹岩柱对小净距隧道围岩压力分担作用,避免凭借经验确定中夹岩柱安全系数导致的围岩压力计算不准的问题。

(2) 本研究分析了中夹岩柱潜在滑动面分别为直线和曲线的情况,给出了潜在滑动面按圆弧考虑时中夹岩柱极限荷载计算公式,并编制程序实现了滑动面搜索。

(3) 按本研究提出的计算方法,某单洞四车道公路隧道IV级围岩段修正的中夹岩柱承载力为  $10\ 324\ \text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$ ,拱顶竖向围岩压力为 264 kPa;某两车道公路隧道V级围岩段修正的中夹岩柱承载力为  $2\ 657\ \text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$ ,拱顶竖向围岩压力为 248 kPa。均实现了对实测围岩压力值的包络,并且较规范值分

别减小了6%和29%。

(4) 根据本研究提出的算法,Ⅲ级围岩段四车道、三车道、两车道隧道围岩压力不受小净距影响的临界净距分别为 $0.6B_{4lanes}$ 、 $0.7B_{3lanes}$ 、 $0.7B_{2lanes}$ ;Ⅳ级围岩段分别为 $1.2B_{4lanes}$ 、 $0.9B_{3lanes}$ 、 $0.9B_{2lanes}$ ;Ⅴ级围岩段三车道和两车道隧道临界净距分别为 $1.8B_{3lanes}$ 和 $1.2B_{2lanes}$ 。

#### 参考文献:

[1] 夏才初, 龚建伍, 唐颖, 等. 大断面小净距公路隧道现场监测分析研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 180(1): 44-50.

XIA Caichu, GONG Jianwu, TANG Yin, et al. Study on site monitoring of large-section highway tunnels with small clear spacing [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 180(1): 44-50.

[2] 姚勇, 何川, 谢卓雄. 双线小净距隧道中岩墙力学特征及加固措施研究[J]. 岩土力学, 2007, 140(9): 1883-1888.

YAO Yong, HE Chuan, XIE Zhuoxiong. Study of mechanical behavior and reinforcing measures of middle rock wall of parallel tunnel with small interval[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 140(9): 1883-1888.

[3] 刘明才. 大断面小净距公路隧道施工影响分析[J]. 山东大学学报(工学版), 2019, 49(4): 78-85.

LIU Mingcai. Impact analysis on construction of large section and small spacing road tunnel [J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2019, 49(4): 78-85.

[4] 李然, 张顶立, 房倩, 等. 深埋3孔小净距隧道围岩压力计算方法及其工程应用[J]. 中国铁道科学, 2020, 41(2): 81-90.

LI Ran, ZHANG Dingli, FANG Qian, et al. Calculation method for surrounding rock pressure of deeply buried closely spaced triple tunnels and its engineering application [J]. China Railway Science, 2020, 41(2): 81-90.

[5] 李然, 王圣涛, 张顶立, 等. 小净距隧道中夹岩对拉锚杆控制机制与工程应用[J]. 岩土力学, 2022, 43(7): 1865-1876.

LI Ran, WANG Shengtao, ZHANG Dingli, et al. Control mechanism and engineering application of pillar-reinforcing bolt in closely spaced tunnels [J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(7): 1865-1876.

[6] 龚建伍, 夏才初, 雷学文. 浅埋小净距隧道围岩压力计算与监测分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增刊2): 4139-4145.

GONG Jianwu, XIA Caichu, LEI Xuewen. Analysis of field measurement and theoretical calculation on rock pressure in shallow-buried twin tunnels with small spacing

[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(Suppl.2): 4139-4145.

[7] 孙振宇, 张顶立, 房倩, 等. 浅埋小净距公路隧道围岩压力分布规律[J]. 中国公路学报, 2018, 31(9): 84-94.

SUN Zhenyu, ZHANG Dingli, FANG Qian, et al. Distribution of surrounding rock pressure of shallow highway tunnels with small spacing[J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(9): 84-94.

[8] 肖明清. 小间距浅埋隧道围岩压力的探讨[J]. 现代隧道技术, 2004, 41(3): 7-10.

XIAO Mingqing. Study on the rock pressure acting on shallow tunnels with small spacing[J]. Modern Tunnelling Technology, 2004, 41(3): 7-10.

[9] 舒志乐, 刘保县, 李月. 偏压小净距隧道围岩压力分析[J]. 地下空间与工程学报, 2007, 18(3): 430-433.

SHU Zhile, LIU Baoxian, LI Yue. Surrounding rock pressure analysis of neighbourhood tunnel under unsymmetrical pressure [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007, 18(3): 430-433.

[10] LYU H M, SHEN S L, ZHOU A N, et al. Calculation of pressure on the shallow-buried twin-tunnel in layered strata[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2020, 103(12): 103465.

[11] 罗彬, 杨晖, 刘宁, 等. 超大断面隧道预留中岩柱围岩应力及其支撑控制技术[J]. 隧道与地下工程灾害防治, 2021, 3(1): 48-57.

LUO Bin, YANG Hui, LIU Ning, et al. Surrounding rock stress of rock pillar and its support control technology in super-large cross-section tunnel[J]. Hazard Control in Tunnelling and Underground Engineering, 2021, 3(1): 48-57.

[12] HAN L, YE G L, CHEN J J, et al. Pressures on the lining of a large shield tunnel with a small overburden; a case study [J]. Tunnelling Underground and Space Technology, 2017, 64: 1-9.

[13] 安永林, 谭格宇, 李佳豪, 等. 非线性破坏准则下深埋小净距隧道围岩压力研究[J]. 灾害学, 2023, 38(1): 18-24.

AN Yonglin, TAN Geyu, LI Jiahao, et al. Study on surrounding rock pressure of deep buried tunnel with small clear distance under nonlinear failure criterion[J]. Journal of Catastrophology, 2023, 38(1): 18-24.

[14] 刘继国, 郭小红. 深埋小净距隧道围岩压力计算方法研究[J]. 公路, 2009(3): 200-205.

LIU Jiguo, GUO Xiaohong. A study on calculation method of surrounding rock pressure about deep-buried tunnel with small spacing [J]. Highway, 2009(3): 200-205.

[15] 喻军, 刘松玉, 童立元. 小净距隧道设计荷载的确定

- [J]. 东南大学学报(自然科学版), 2008, 35(5): 856-860.
- YU Jun, LIU Songyu, TONG Liyuan. Determination of designing load of small clear space tunnel[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2008, 35(5): 856-860.
- [16] 肖明清, 徐晨. 深埋小净距隧道围岩压力代表值探讨[J]. 铁道工程学报, 2020, 37(10): 83-89.
- XIAO Mingqing, XU Chen. Discussion on representative value of surrounding rock pressure in deep buried neighborhood tunnel[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2020, 37(10): 83-89.
- [17] ZHANG W G, GOH Anthony T C. Numerical study of pillar stresses and interaction effects for twin rock caverns [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2015, 39(2): 193-206.
- [18] 王春国. 偏压大跨小净距公路隧道施工力学行为[J]. 山东大学学报(工学版), 2020, 50(4): 85-89.
- WANG Chunguo. Mechanical behavior of large-span and small spacing road tunnel with biased pressure [J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2020, 50(4): 85-89.
- [19] 唐陶文, 傅鹤林, 张加兵, 等. 分岔隧道中夹岩柱围岩应力及最小厚度研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2016, 13(8): 1578-1584.
- TANG Taowen, FU Helin, ZHANG Jiabing, et al. Research on surrounding rock pressure and minimum thickness of middle rocky column in the branched tunnel [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2016, 13(8): 1578-1584.
- [20] MOJTAHEDI A S, Nabizadeh A. A numerical approach to evaluating the asymmetric ground settlement response to twin-tunnel asynchronous excavation [J]. Soils and Rocks, 2022, 45: 1-9.
- [21] 陈皓, 鲁聪, 李小青. 小净距隧道中夹岩柱应力、应变特性及合理净距数值模拟分析[J]. 交通科技, 2021(2): 114-119.
- CHEN Hao, LU Cong, LI Xiaoqing. Numerical simulation and analysis of stress and strain characteristics and reasonable clear distance in small clear distance tunnels[J]. Transportation Science & Technology, 2021(2): 114-119.
- [22] TYAGI A, LEE F H. Influence of tunnel failure on the existing large-diameter tunnel in improved soil surround [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2022, 120: 104276-104282.
- [23] MORTAZAVI A, HASSANI F P, SHABANI M. A numerical investigation of rock pillar failure mechanism in underground openings [J]. Computers and Geotechnics, 2009, 36(5): 691-697.
- [24] 章慧健, 仇文革, 冯冀蒙. 小净距隧道夹岩力学特征分析[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(3): 434-439.
- ZHANG Huijian, QIU Wenge, FENG Jimeng. Mechanical performance of shared rock of neighborhood tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(3): 434-439.
- [25] ESTERHUIZEN G S, DOLINAR D R, ELLENBERGER J L. Pillar strength in underground stone mines in the united states [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2011, 48(1): 42-50.
- [26] 夏梦然. 小净距隧道围岩稳定性的影响因素[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2021, 43(5): 73-80.
- XIA Mengran. Influence factors of surrounding rock stability of neighborhood tunnel[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering (in Chinese and English), 2021, 43(5): 73-80.
- [27] 王汉鹏, 郑学芬, 李术才, 等. 隧道中墙承载模型与稳定性判据研究及其应用[J]. 山东大学学报(工学版), 2008, 171(5): 14-18.
- WANG Hanpeng, ZHENG Xuefen, LI Shucan, et al. Tunnel middle wall bearing weight model and stability criterion and its application [J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2008, 171(5): 14-18.
- [28] 王明年, 杨恒洪, 张艺腾, 等. 水平小净距隧道中夹岩安全系数法研究与应用[J]. 现代隧道技术, 2022, 59(2): 11-19.
- WANG Mingnian, YANG Henghong, ZHANG Yiteng, et al. Research and application of the safety coefficient method for the middle rock pillar of parallel tunnels with small clear distance[J]. Modern Tunnelling Technology, 2022, 59(2): 11-19.
- [29] 韦彬, 戴智颖, 唐皓, 等. 大跨小净距隧道双侧壁导坑进洞施工力学特征分析[J]. 现代隧道技术, 2022, 59(增刊1): 276-283.
- WEI Bin, DAI Zhiying, TANG Hao, et al. Study on construction mechanical characteristics of tunnel entrance with large span and small clear distance [J]. Modern Tunnelling Technology, 2022, 59(Suppl.1): 276-283.
- [30] 李广信. 高等土力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2016.
- [31] ZHAI Q, TIAN G, YE W, et al. Evaluation of unsaturated soil slope stability by incorporating soil-water characteristic curve[J]. Geomechanics and Engineering, 2022, 28(6): 637-644.
- [32] LI D Q, XIAO T, CAO Z J, et al. Efficient and consistent reliability analysis of soil slope stability using both limit equilibrium analysis and finite element analysis [J]. Applied Mathematical Modelling, 2016,

- 40(9/10): 5216-5229.
- [33] 王春燕,洪宝宁,单浩,等. 斜坡软弱路基稳定性分析的修正瑞典条分法[J]. 防灾减灾工程学报, 2021, 41(6): 1358-1365.  
WANG Chunyan, HONG Baoning, SHAN Hao, et al. Modified swedish slice method for stability analysis of weak subgrade on slope[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2021, 41(6): 1358-1365.
- [34] MA K, FENG B, ZHUANG D Y, et al. Distance effects of the fault on the surrounding rock mass stability of the main powerhouse at the Huanggou pumped-storage power station[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2020, 106: 103568.
- [35] 江权,冯夏庭,向天兵. 基于强度折减原理的地下洞室群整体安全系数计算方法探讨[J]. 岩土力学, 2009, 30(8): 2483-2488.  
JIANG Quan, FENG Xiating, XIANG Tianbing. Discussion on method for calculating general safety factor of underground caverns based on strength reduction theory[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(8): 2483-2488.
- [36] 郑颖人,王永甫. 隧洞围岩稳定分析及其设计方法[J]. 隧道与地下工程灾害防治, 2019, 1(4): 1-12.  
ZHENG Yingren, WANG Yongfu. Stability analysis and design method of tunnel surrounding rock[J]. Tunnels and Underground Engineering Disaster Prevention, 2019, 1(4): 1-12.
- [37] LIANG Z, GONG B, LI W. Instability analysis of a deep tunnel under triaxial loads using a three-dimensional numerical method with strength reduction method[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 86: 51-62.
- [38] 刘金,李勤昌,马秀媛. 有限元强度折减法在边坡稳定分析中的应用[J]. 山东大学学报(工学版), 2016, 46(4): 83-88.  
LIU Jin, LI Qinchang, MA Xiuyuan. Application of strength reduction FEM method in slope stability analysis[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2016, 46(4): 83-88.
- [39] 李剑,陈善雄,余飞. 基于最大剪应变增量的边坡潜在滑动面搜索[J]. 岩土力学, 2013, 34(增刊1): 371-378.  
LI Jian, CHEN Shanxiong, YU Fei. A method for searching potential failure surface of slope based on maximum shear strain increment[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(Suppl.1): 371-378.
- [40] 吴家耀,曹爱武,刘加进,等. 地下洞室群整体安全系数计算方法与工程应用[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(增刊1): 433-438.  
WU Jiayao, CAO Aiwu, LIU Jiabin, et al. Method for calculation overall safety of factor of underground cavern complex and its application[J]. Journal of Underground Space and Engineering, 2021, 17(Suppl.1): 433-438.
- [41] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑地基基础设计规范: GB 50007—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [42] 徐前卫,程盼盼,朱合华,等. 深埋隧道软弱围岩渐进性破坏及其锚固效应试验与模拟[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(4): 617-625.  
XU Qianwei, CHENG Panpan, ZHU Hehua, et al. Experimental and numerical studies on progressive failure characteristics of weak surrounding rock mass of tunnel and its anchoring effect[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(4): 617-625.
- [43] 张红军,李术才,李海燕,等. 大变形软岩巷道2次耦合支护参数优化[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47(4): 1262-1271.  
ZHANG Hongjun, LI Shucai, LI Haiyan, et al. Secondary coupling support parameter optimization and research on the large deformation of soft rock roadways[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2016, 47(4): 1262-1271.
- [44] 刘夏冰,王雨,王文谦,等. 浅埋超大跨四线隧道V级围岩开挖关键参数研究[J/OL]. 铁道标准设计(2023-04-19) [2023-05-01]. <https://doi.org/10.13238/j.issn.1004-2954.202211160007>.  
LIU Xiabing, WANG Yu, WANG Wenqian, et al. Study on key excavation parameters of shallow super-large-span four-track tunnel under grade-V surrounding rockmass[J/OL]. Railway Standard Design (2023-04-19) [2023-05-01]. <https://doi.org/10.13238/j.issn.1004-2954.202211160007>.
- [45] 文胜. 小净距隧道围岩压力计算及参数敏感性分析[D]. 长沙:长沙理工大学, 2021.  
WEN Sheng. Calculation of surrounding rock pressure and parameter sensitivity analysis of neighborhood tunnel[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2021.