

浅埋偏压小净距黄土隧道施工过程中围岩压力分析

曹小平¹, 张云鹏², 韦志凯¹, 李涛¹, 梁庆国¹

(1. 兰州交通大学 土木工程学院, 兰州 730000; 2. 中建国际建设有限公司, 北京 100020)

摘要:为解决在特殊地形条件下线、桥、隧的良好衔接和线路规划等问题,小净距隧道作为一种新型隧道结构能够适应比较复杂的地形,近些年来得到广泛应用。以某公路隧道为研究背景,通过建立浅埋偏压小净距隧道左、右洞相互扰动的围岩压力计算模型,结合相关规范推导了隧道施工过程中围岩压力计算公式以及适用条件,并对隧道各参数的变化对围岩压力的敏感性进行了研究。结果表明:(1)后行洞的开挖会使先行洞拱顶垂直压力变大,侧压力和水平压力减小;(2)双洞外侧围岩侧压力系数受围岩计算摩擦角、中间岩柱两侧摩擦角和偏压坡角的影响,而双洞内侧围岩的侧压力系数还受隧道埋深和净距的影响;(3)隧道拱顶垂直压力的分布受到隧道埋深、偏压角度和侧压力系数的影响,但是受到隧道埋深的影响最大;(4)隧道围岩水平压力的大小受到隧道侧压力系数和隧道埋深的共同影响,但是隧道埋深占主要作用,埋深越大,隧道受到的水平压力越大。

关键词:隧道工程;偏压小净距隧道;围岩压力;浅埋

中图分类号:U452

文献标识码:A

文章编号:1673-0836(2023)05-1422-11

Analysis on Surrounding Rock Pressure during Construction of Shallow Buried Bias Loess Tunnel with Small Clear Distance

Cao Xiaoping¹, Zhang Yunpeng², Wei Zhikai¹, Li Tao¹, Liang Qingguo¹

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, P. R. China;
2. CSCEC International, Beijing 100020, P. R. China)

Abstract: In order to solve the problem of good connection of line bridge tunnel and road planning under special terrain, a variety of special forms of tunnels have emerged. As a new type of tunnel structure, small spacing tunnel can adapt to complex terrain, and thus it has been widely used in recent years. Taking an expressway as the research background, by establishing the calculation model of surrounding rock pressure of the left and right tunnels of shallow unsymmetrical pressure small clear distance tunnel, the calculation formula and applicable conditions of surrounding rock pressure during tunnel construction are derived according to relevant codes, and the sensitivity of tunnel parameters to surrounding rock pressure is studied too. The results show that: (1) The vertical pressure will increase and the lateral pressure and horizontal pressure will decrease when the back tunnel is excavated. (2) The lateral pressure coefficient of the surrounding rock outside the double tunnel is affected by the calculated friction angle of the surrounding rock, the friction Angle on both sides of the middle rock pillar and the bias slope Angle, while the lateral pressure coefficient of the surrounding rock inside the double tunnel is also affected by the buried depth and the net distance of the tunnel. (3) The vertical pressure distribution of tunnel vault is affected by the buried depth, bias angle and lateral pressure coefficient, but it is mostly affected by the buried depth of tunnel. (4) The horizontal pressure of tunnel surrounding rock is affected by the lateral pressure coefficient

收稿日期:2023-02-11(修改稿)

作者简介:曹小平(1971—),男,甘肃定西人,博士,教授,主要从事岩土工程领域的教学和科研工作。

E-mail:caoxp@mail.lzjtu.cn

通讯作者:张云鹏(1995—),男,陕西韩城人,硕士,主要从事岩土工程领域的研究。

E-mail:zhang_yunpeng@chinaconstruction.com

基金项目:国家自然科学基金地区科学基金(52168070,52068044,51968041);甘肃省科技计划资助(18YF1GA055)

of tunnel and the buried depth of tunnel, but the buried depth of tunnel plays a major role, the greater the buried depth, the greater the horizontal pressure of tunnel.

Keywords: tunnel engineering; small clear distance bias tunnel; surrounding rock pressure; shallow buried

0 引言

大量的高速铁路公路的建设极大方便了地区之间经济交流发展和人们的出行。特别是在西部地区,山岭、高原分布多,地势起伏大,山岭隧道被广泛修建。当高速公路铁路向山区发展时,由于地形限制使得隧道左、右洞之间的距离过小,采用了连拱隧道^[1]或小净距隧道等特殊形式的隧道。

小净距隧道作为一种新型的隧道结构能够适应比较复杂的地形,节约土地资源,有较好的优化线形且方便与桥梁衔接,与连拱隧道造价相比有明显减少,而且与普通分离式隧道造价相比差别不大,近些年来得到大力提倡^[2-6]。许多学者对小净距隧道从多个方面展开了研究:于丽等^[7]结合黄土隧道的实际破坏模式,得出了围岩压力新的计算公式,与已有的围岩压力计算公式相比考虑了更多因素,并验证了新的计算公式计算结果的可靠性。扈世民^[8]采用模型实验和数值模拟的手段,针对黄土隧道的围岩压力拱效应进行了研究,总结了黄土隧道围岩压力分布规律。王明年等^[9-10]针对高速铁路大断面黄土隧道的深、浅埋分界问题进行了研究,并对深埋黄土隧道的围岩压力计算方法进行了阐述。孙振宇等^[11]针对小净距隧道的围岩压力与隧道开挖宽度、隧道埋深以及双洞净距之间的关系进行了分析研究,得出了小净距隧道围岩压力计算方法,表明垂直围岩压力与水平围岩压力发展基本一致,在施工过程中应选择合理的施工方法和支护方法并实时监测能较好地控制围岩的稳定性。钟祖良等^[12]针对浅埋双侧偏压小净距隧道,结合《公路隧道设计规范》^[13](以下简称《规范》),推导出双侧偏压下小净距隧道在左、右洞先后施工条件下围岩压力计算的理论公式,分析了隧道参数对围岩压力敏感性的影响规律。李桂江等^[14]对浅埋偏压小净距围岩压力影响因素进行了分析,推导出在复杂情况下的围岩压力计算公式,为施工和设计提供参考。滕俊洋等^[15]通过理论计算公式以及数值模拟研究了不同埋深及偏压角度下围岩压力分布规律,并将计算结果应用于实际工程,提出隧道开挖过程中围岩变形控制措施。舒志乐等^[16]研究了净距和偏压角度对偏压小净距隧道侧压力系数的

影响。

通过研究资料分析,普氏理论是在隧道开挖后形成自然平衡拱的基础上进行理论计算,隧道浅埋与深埋的判定原则为隧道顶部上覆土体能否形成自然拱,浅埋隧道垂直压力分布为全部上覆土产生的,在隧道拱顶没有形成自然拱,因此,普氏理论不适合计算浅埋隧道。采用太沙基理论计算隧道围岩压力,适用于一般的土体,对于计算隧道围岩松动压力可以得到较好的结果。太沙基理论假设滑动体任意水平单元所受上侧岩体压力和下侧岩体托力均匀分布且两侧所受侧压力相同,在计算微元体平衡的基础上得出隧道的围岩压力。偏压隧道由于同一水平面埋深不同,因此上侧土压力并不是均匀分布,水平侧压力左右也不相同,受力表达式就十分复杂,因此太沙基理论不适用于偏压隧道的计算。

本文主要采用公路隧道设计规范中采用的松散介质极限平衡理论进行研究。针对不同条件下浅埋单侧偏压小净距隧道围岩压力分布规律,在《规范》^[13]的基础上,建立浅埋偏压小净距隧道左、右洞相互扰动的围岩压力计算模型,对不同偏压角度、隧道埋深、净距下围岩压力大小及分布进行研究。

1 浅埋偏压小净距隧道围岩压力计算

围岩压力分布对于隧道设计十分重要,但由于岩体结构的复杂性,很难对具体工程中围岩压力进行精确计算,经过大量实际工程积累的经验和资料,工程技术人员对针对不同级别和类型的围岩压力计算进行经验总结,得到现在人们广泛应用的经验公式法。

1.1 围岩压力常用计算方法

国外主要是 Barton 等^[17]提出的基于 Q 系统围岩分级的围岩压力计算公式和 Bieniawski^[18]提出的基于 RMR 系统围岩分级体系的围岩压力计算公式。但是这两种方法所需要的参数比较多,参数选取上的困难造成计算结果差异很大,不易于工程技术人员掌握。我国采用较多的是普氏理论、太沙基理论和《规范》中提出的计算方法。

隧道开挖围岩级别和埋深对围岩压力的分布有着重要的影响,在围岩压力计算时,对于深、浅埋隧道需要分别采用不同的计算公式。根据《规范》的相关内容,深埋隧道的垂直均布压力计算公式为:

$$q = \gamma h \quad (1)$$

$$h = 0.45 \times 2^{S-1} \omega \quad (2)$$

式中: q 为隧道垂直均布压力, kN/m^2 ; γ 为围岩容重, kN/m^3 ; h 为围岩压力计算高度, m ; S 为围岩级别; ω 为宽度影响系数,按 $\omega = 1 + i(B - 5)$; B 为隧道宽度, m ; i 为隧道宽度增减 1 m 时围岩压力的增减率, $B < 5$ 时 $i = 0.2$, $5 \leq B \leq 14$ 时 $i = 0.1$ 。

深埋隧道围岩水平压力计算可按照表 1 计算。

表 1 围岩水平均布压力

Table 1 Horizontal distribution pressure of surrounding rock

围岩级别	I、II	III	IV	V	VI
水平均布压力 e	0	$< 0.15q$	$(0.15 \sim 0.3)q$	$(0.3 \sim 0.5)q$	$(0.5 \sim 1)q$

根据荷载等效高度可以判别深、浅埋隧道的分界线:

$$H_p = (2 \sim 2.5) h_q \quad (3)$$

$$h_q = \frac{q}{\gamma} \quad (4)$$

式中: H_p 为浅埋隧道分界深度, m ; h_q 为荷载等效

高度, m ; q 为公式(1)计算的深埋隧道垂直均布压力, kN/m^2 ; γ 为围岩重度, kN/m^3 。

1.2 浅埋偏压小净距黄土隧道围岩压力分析

参考《规范》中浅埋偏压小净距隧道围岩压力计算方法,建立左、右洞相互扰动围岩压力计算模型,如图 1 所示。

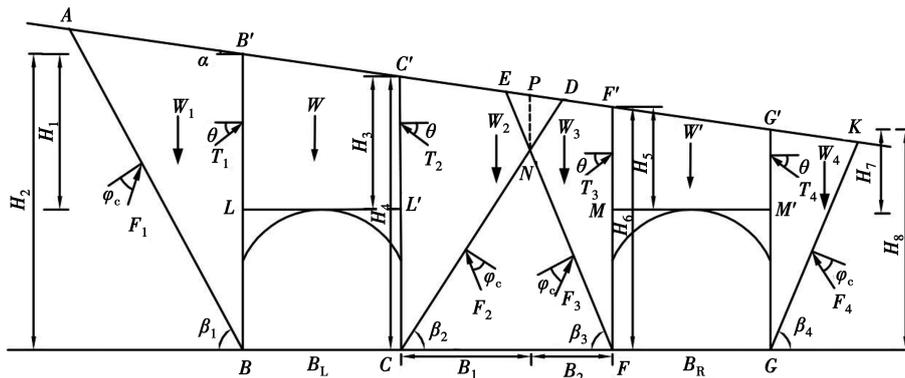


图 1 浅埋偏压小净距隧道荷载计算示意图

Fig. 1 Schematic diagram of load calculation of shallow buried bias tunnel with small clear distance

图 1 中 W_1 、 W_2 、 W_3 、 W_4 分别为土体 ABB' 、 $C'CNP$ 、 $PNFF'$ 、 $G'GK$ 的重力, W 、 W' 为左右洞拱顶上覆土 $B'LL'C'$ 、 $F'MM'G'$ 的重力, T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 为左右洞两侧土体对隧道上覆土的摩擦力。 ϕ_c 为围岩计算摩擦角, θ 为土柱两侧摩擦角, α 为坡面与水平面夹角。左洞左、右两侧的侧压力系数分别为 λ_1 、 λ_2 , 右洞左、右两侧的侧压力系数分别为 λ_3 、 λ_4 。 β_1 、 β_2 、 β_3 、 β_4 为侧向产生最大推力时的滑动破裂角。

1.2.1 基本假定

(1) 假定土体均匀且各向同性。

(2) 先行洞开挖与《规范》中偏压隧道单洞开挖围岩压力分布一致。左洞先开挖引起拱顶上覆

土沉降, 带动隧道两侧土体下沉, 形成滑动破裂面 BA 和 CD , 后行洞开挖形成滑动破裂面 FE 和 GK , 但由于先行洞开挖引起的滑动面黏聚力减弱, 不会形成 END 整体向下滑动。假定在岩体 END 中产生一个竖向破裂面 PN , 左右洞之间的岩体形成新的滑动破裂面 PNC 和 PNF , 外侧围岩压力不受影响。

(3) 由于后行洞开挖引起三角区域 END 产生张裂面 PN , 依据土力学原理, 垂直向张裂面的法向相互作用力小于静止土压力, 偏于安全, 因此假定该面上法向作用力为零。

1.2.2 先行洞开挖

先开挖左洞, 从前面的基本假设可以得出, 在

隧道开挖过程中先行洞的开挖与单洞偏压隧道围岩压力分布一致,其围岩压力分布简图如图 2 所示。右洞开挖会对左洞右侧围岩侧压力系数产生影响,将未产生影响之前左洞右侧侧压力系数用 λ'_2 表示。

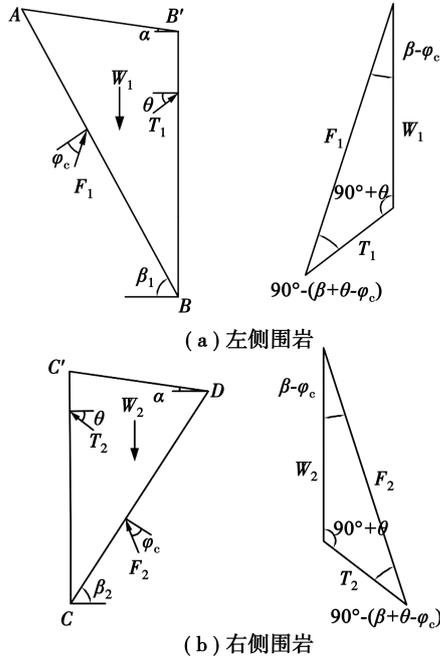


图 2 隧道先行洞开挖围岩侧压力分布简图

Fig.2 Schematic diagram of lateral pressure distribution of surrounding rock excavated by antecedent tunnel

隧道侧压力系数计算过程与《规范》中相似,只是偏压角度不同,计算公式如式(5)~(8):

$$\lambda_1 = \frac{1}{\tan\beta_1 - \tan\alpha} \times \frac{\tan\beta_1 - \tan\varphi_c}{1 + \tan\beta_1(\tan\varphi_c - \tan\theta) + \tan\varphi_c \tan\theta} \quad (5)$$

令 $\frac{d(\lambda_1)}{d(\tan\beta_1)} = 0$, 得出 $\tan\beta_1$ 最大值, $\tan\beta_1$ 的取值为下:

$$\tan\beta_1 = \tan\varphi_c + \sqrt{\frac{(\tan^2\varphi_c + 1)(\tan\varphi_c - \tan\alpha)}{\tan\varphi_c - \tan\theta}} \quad (6)$$

$$\lambda'_2 = \frac{1}{\tan\beta_2 + \tan\alpha} \times \frac{\tan\beta_2 - \tan\varphi_c}{1 + \tan\beta_2(\tan\varphi_c - \tan\theta) + \tan\varphi_c \tan\theta} \quad (7)$$

令 $\frac{d(\lambda'_2)}{d(\tan\beta'_2)} = 0$, 得出 $\tan\beta'_2$ 最大值, $\tan\beta'_2$ 的取值为:

$$\tan\beta'_2 = \tan\varphi_c + \sqrt{\frac{(\tan^2\varphi_c + 1)(\tan\varphi_c + \tan\alpha)}{\tan\varphi_c - \tan\theta}} \quad (8)$$

1.2.3 后行洞开挖

右洞开挖围岩压力分布如图 3 所示:

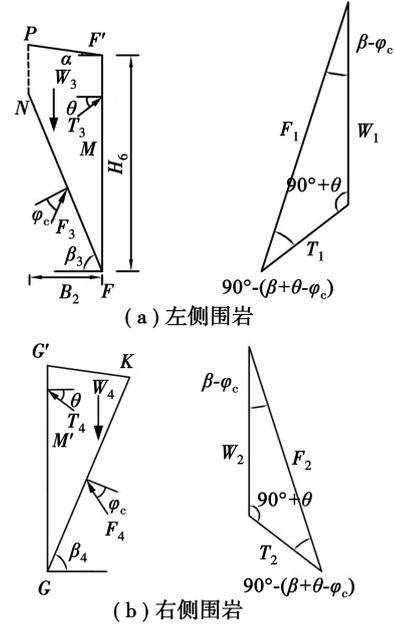


图 3 隧道后行洞开挖围岩侧压力分布简图

Fig.3 Schematic diagram of lateral pressure distribution of surrounding rock after tunnel excavation

由正弦定理可得:

$$T_3 = \frac{\sin(\beta_3 - \varphi_c)}{\sin(90^\circ - (\beta_3 + \theta - \varphi_c))} \quad (9)$$

$$W_3 = \frac{1}{2} \gamma H_6^2 \frac{\lambda_3}{\cos\theta}$$

土体 $PNFF'$ 的重力如下:

$$W_3 = \frac{1}{2} \gamma B_2 (2H_6 + \tan\beta_3 B_2 + \tan\alpha B_2) \quad (10)$$

(9)、(10) 联立求解可得侧压力系数 λ_3 :

$$\lambda_3 = \frac{B_2 (2H_6 - \tan\beta_3 B_2 + \tan\alpha B_2)}{H_6^2} \times \frac{\tan\beta_3 - \tan\varphi_c}{1 + \tan\beta_3(\tan\varphi_c - \tan\theta) + \tan\varphi_c \tan\theta} \quad (11)$$

令 $\frac{d(\lambda_3)}{d(\tan\beta_3)} = 0$, 得出 $\tan\beta_3$ 的最大值, $\tan\beta_3$ 的取值为:

$$\tan\beta_3 = -\frac{L}{M} + \frac{\sqrt{B_2^2 L^2 + B_2 M (NL + \tan\varphi_c B_2 L + \tan\varphi_c MN)}}{B_2 M} \quad (12)$$

式中: $M = \tan\varphi_c - \tan\theta$; $N = 2H_6 + \tan\alpha B_2$; $L = 1 +$

$\tan\varphi_c \tan\theta$ 。

外侧围岩的受力不受左、右洞开挖相互扰动,参考《公路隧道设计规范》可得:

$$\lambda_4 = \frac{1}{\tan\beta_4 + \tan\alpha} \times \frac{\tan\beta_4 - \tan\varphi_c}{1 + \tan\beta_4(\tan\varphi_c - \tan\theta) + \tan\varphi_c \tan\theta} \quad (13)$$

令 $\frac{d(\lambda_4)}{d(\tan\beta_4)} = 0$, 得出 $\tan\beta_4$ 的最大值, $\tan\beta_4$ 的

取值为:

$$\tan\beta_4 = \tan\varphi_c + \frac{\sqrt{(\tan^2\varphi_c + 1)(\tan\varphi_c + \tan\alpha)}}{\tan\varphi_c - \tan\theta} \quad (14)$$

1.2.4 先行洞内侧围岩压力变化

当右洞开挖后,由于隧道净距较小,对左洞左侧围岩压力分布产生了影响,新的围岩压力分布如图 4 所示。

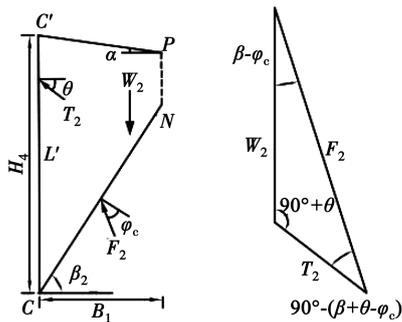


图 4 先行洞内侧围岩压力重新分布简图

Fig. 4 Schematic diagram of pressure redistribution of surrounding rock inside antecedent tunnel

由正弦定理可得:

$$T_2 = \frac{\sin(\beta_2 - \varphi_c)}{\sin(90^\circ - (\beta_2 + \theta - \varphi_c))} W_2 = \frac{1}{2} \gamma H_4^2 \frac{\lambda_2}{\cos\theta} \quad (15)$$

土体 $PNCC'$ 的重力如下:

$$W_2 = \frac{1}{2} \gamma B_1 (2H_4 + \tan\beta_2 B_1 + \tan\alpha B_1) \quad (16)$$

(15)、(16) 联立求解可得侧压力系数 λ_2 :

$$\lambda_2 = \frac{B_1 (2H_4 - \tan\beta_2 B_1 - \tan\alpha B_1)}{H_4^2} \times \frac{\tan\beta_2 - \tan\varphi_c}{1 + \tan\beta_2(\tan\varphi_c - \tan\theta) + \tan\varphi_c \tan\theta} \quad (17)$$

令 $\frac{d(\lambda_2)}{d(\tan\beta_2)} = 0$, 得出 $\tan\beta_2$ 的最大值, $\tan\beta_2$ 的

取值为:

$$\tan\beta_2 = -\frac{L}{M} + \frac{\sqrt{B_1^2 L^2 + B_1 M (NL + \tan\varphi_c B_1 L + \tan\varphi_c MN)}}{B_1 M} \quad (18)$$

式中: $M = \tan\varphi_c - \tan\theta$; $N = 2H_4 - \tan\alpha B_1$; $L = 1 + \tan\varphi_c \tan\theta$ 。

1.2.5 围岩水平压力

隧道围岩水平侧向压力分布如图 5 所示:

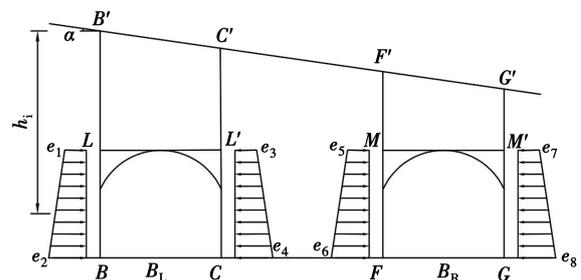


图 5 围岩水平压力分布图

Fig. 5 Horizontal pressure distribution diagram of surrounding rock

隧道围岩水平侧压力与围岩的重度、埋深以及侧压力系数有关,因此左洞左侧拱顶水平压力计算公式为:

$$e_1 = \gamma H_1 \lambda_1 \quad (19)$$

图 5 中 h_i 为计算点到地表的距离,同理可以算出任意计算位置的围岩水平压力。

1.2.6 围岩垂直压力

隧道围岩拱顶垂直压力分布如图 6 所示:

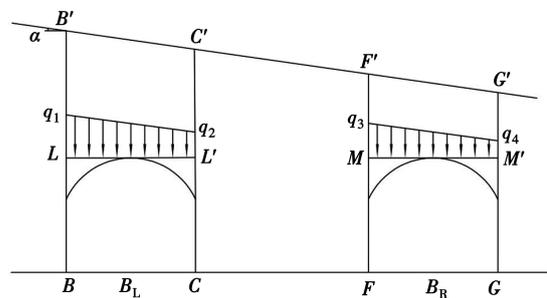


图 6 围岩垂直压力分布图

Fig. 6 Vertical pressure distribution diagram of surrounding rock

图 6 中左洞拱顶 LL' 面上垂直压力总和为:

$$Q_{左} = W - (T_1 + T_2) \sin\theta = \frac{(H_1 + H_3) \times \gamma B_L}{2}$$

$$\frac{1}{2}\gamma(H_2^2\tan\theta\lambda_1+H_4^2\tan\theta\lambda_2) \quad (20)$$

换算成均布荷载得:

$$q_1=H_1\gamma-\frac{\gamma(H_2^2\tan\theta\lambda_1+H_4^2\tan\theta\lambda_2)}{2B_L} \quad (21)$$

$$q_2=H_3\gamma-\frac{\gamma(H_2^2\tan\theta\lambda_1+H_4^2\tan\theta\lambda_2)}{2B_L} \quad (22)$$

右洞拱顶 MM' 面上垂直压力总和为:

$$Q_{左}=W'-(T_3+T_4)\sin\theta=\frac{(H_5+H_7)\times B_R}{2}$$

$$\frac{1}{2}\gamma(H_6^2\tan\theta\lambda_3+H_8^2\tan\theta\lambda_4) \quad (23)$$

换算成均布荷载得:

$$q_3=H_5\gamma-\frac{\gamma(H_6^2\tan\theta\lambda_3+H_8^2\tan\theta\lambda_4)}{2B_R} \quad (24)$$

$$q_4=H_7\gamma-\frac{\gamma(H_6^2\tan\theta\lambda_3+H_8^2\tan\theta\lambda_4)}{2B_R} \quad (25)$$

1.3 结果分析

从隧道荷载计算简图可以得出,若左、右洞滑动破裂面没有相交,则后行洞的开挖对先行洞的围岩压力没有影响,左、右洞围岩压力计算可以分别按照单洞隧道计算公式,由此可知适用小净距隧道围岩压力计算公式左、右洞内侧围岩滑动破裂面必须相交于地面以下。图 7 适用于上述计算公式的最大净距。

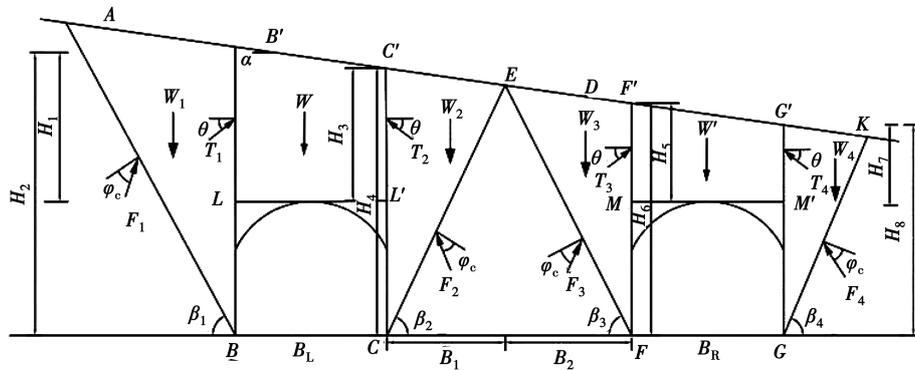


图 7 适用于计算公式的最大净距示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the maximum net distance applicable to calculation formula

根据图 7 所示,分别对 B_1 、 B_2 的大小进行计算,得出:

$$B_1 \leq \frac{H_4}{\tan\beta_2 + \tan\alpha} \quad (26)$$

将 $\tan\beta_2$ 取值代入式(26)可得:

$$B_1 \leq \frac{H_4}{\tan\varphi_c + \sqrt{\frac{(\tan^2\varphi_c + 1)(\tan\varphi_c - \tan\alpha)}{\tan\varphi_c - \tan\theta}} + \tan\alpha} \quad (27)$$

同理可得:

$$B_2 \leq \frac{H_6}{\tan\beta_3 + \tan\alpha} \quad (28)$$

将 $\tan\beta_3$ 取值代入式(28)可得:

$$B_2 \leq \frac{H_6}{\tan\varphi_c + \sqrt{\frac{(\tan^2\varphi_c + 1)(\tan\varphi_c + \tan\alpha)}{\tan\varphi_c - \tan\theta}} + \tan\alpha} \quad (29)$$

所以只有当净距满足式(30),才适用于以上计算条件。

$$B_{和} \leq \frac{H_4}{\tan\varphi_c + \sqrt{\frac{(\tan^2\varphi_c + 1)(\tan\varphi_c + \tan\alpha)}{\tan\varphi_c - \tan\theta}} + \tan\alpha} + \frac{H_6}{\tan\varphi_c + \sqrt{\frac{(\tan^2\varphi_c + 1)(\tan\varphi_c - \tan\alpha)}{\tan\varphi_c - \tan\theta}} + \tan\alpha} \quad (30)$$

在计算过程中, B_1 可以取 0.4 ~ 0.5 倍净距^[19]。

由于 $\frac{\lambda'_2}{\lambda_2} \geq 1$, 可以得出 $\lambda'_2 \geq \lambda_2$, 因此后行洞的

开挖对先行洞的围岩压力分布造成影响,使先行洞内侧围岩侧压力系数减小,水平压力减小,也使得拱顶垂直压力变大。由于隧道存在偏压,受力不对称,而且左、右洞净距很小,开挖造成相互围岩扰动,使得隧道受力更加复杂,所以施工过程中应加

强对中间岩柱稳定性的监控。

2 算例分析

为了研究不同因素对偏压小净距隧道围岩压力的影响规律,采用上面计算结果的理论公式,对比不同偏压角度、不同净距、不同埋深情况下隧道开挖后围岩的竖向压力和水平压力。

以陇漳高速乌梁隧道为实际工程背景,隧道跨径 $B=12.38\text{ m}$,高 $H=10.15\text{ m}$,围岩为 V 级围岩,容重 $\gamma=18.47\text{ kN/m}^3$,内摩擦角 $\varphi=25^\circ$ 。根据《规范》公式中采用计算摩擦角,在计算过程中可以不考虑黏聚力的作用,计算摩擦角 $\varphi_c=45^\circ$,滑动面摩擦角可以取 $(0.5\sim 0.7)\varphi_c$,则滑动面摩擦角 $\theta=27^\circ$ 。

2.1 不同偏压角度下围岩压力

图 8—10 为不同偏压角度下的围岩侧压力系数以及围岩拱顶垂直压力和水平侧向压力的变化曲线。在偏压角度变化过程中保持浅埋侧隧道(右洞)拱顶到地面的距离保持不变,左、右洞净距保持不变,即保证浅埋侧隧道埋深 9.5 m ,隧道净距为 9 m 在计算过程中保持不变。

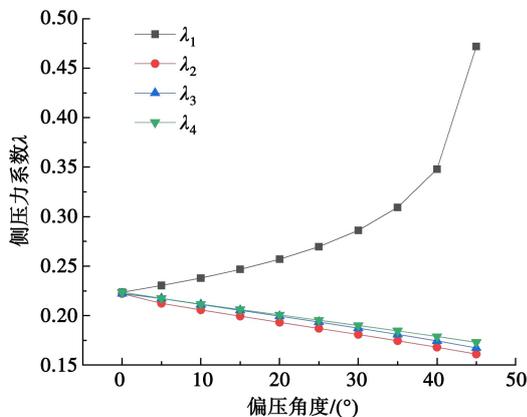


图 8 不同偏压角度下侧压力系数

Fig. 8 Lateral pressure coefficient with different bias angles

从图 8 可以看出,随着偏压角度的增加侧压力系数 λ_1 逐渐增大,且增加速率随着角度的增大而增大。当偏压角度 α 无限接近计算摩擦角 φ_c 时, λ_1 可以趋于无限大,当偏压角度大于计算摩擦角时上述公式无法计算出 λ_1 。所以由于计算方式的原因,在偏压角度大于 30° 时上述公式计出来的侧压力系数误差会越来越大,在计算过程中为了保证侧压力系数 λ_1 的准确性,尽可能避免计算摩擦角

和偏压角度数值接近。随着偏压角度的增大, λ_2 、 λ_3 、 λ_4 逐渐减小,且变化速率稳定。若在隧道开挖过程中净距足够大,左、右洞相互不扰动,则 $\lambda_1 > \lambda_2, \lambda_3 > \lambda_4$ 。但从曲线中可以看出 λ_4 大于 λ_2 和 λ_3 ,这是因为小净距隧道左右洞相互扰动使得内侧侧压力系数减小,因此会出现 $\lambda_4 > \lambda_3$,这与上面公式分析的结果一致。

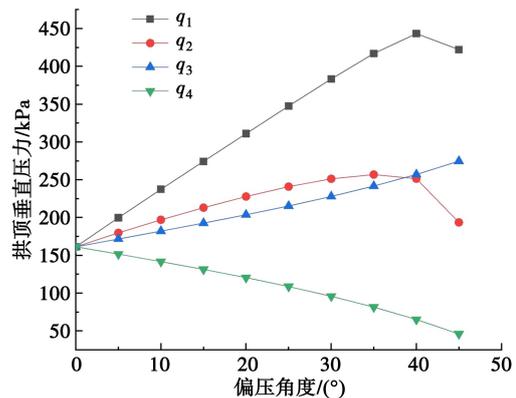


图 9 不同偏压角度下拱顶垂直压力

Fig. 9 Vertical pressure of vault with different bias angles

从图 9 可以看出,随着偏压角度的增大, q_1 、 q_2 、 q_3 逐渐增大, q_4 逐渐减小,这是因为在偏压角度的增加过程中 H_1 、 H_3 、 H_5 都逐渐增大, H_7 逐渐减小。在偏压角度超过 40° 时,虽然对应的埋深在增大,但是 q_1 、 q_2 开始减小,这与实际情况不符合。这是因为侧压力系数 λ_1 变化不合理造成的,因此当偏压角度 α 接近或者大于围岩计算摩擦角 φ_c 时会造成侧压力系数以及拱顶垂直压力计算错误。整体上 $q_1 > q_2 > q_3 > q_4$,影响拱顶垂直压力的主要因素是隧道埋深。

从图 10(a) 可以得出随着偏压角度的增加,左洞两侧水平压力都在逐渐增加,其中左侧水平压力随着偏压角度的增加变化速率很快,受侧压力系数影响较大,增长速率基本同侧压力系数 λ_1 一致。虽然左洞右侧侧压力系数随着偏压角度的增大在减小,但是埋深随着偏压角度的增大在增大,总体表现为水平压力缓慢增大,变化比较平稳。

从图 10(b) 可以看出虽然右洞左侧随着偏压角度增加而埋深增大,但是侧压力系数随着偏压角度的增大逐渐减小,导致左侧拱脚和拱肩水平压力保持不变,右洞右侧随着偏压角度的增大,埋深与偏压角度都在减小,所以水平侧压力随着偏压角度的增加快速减小。

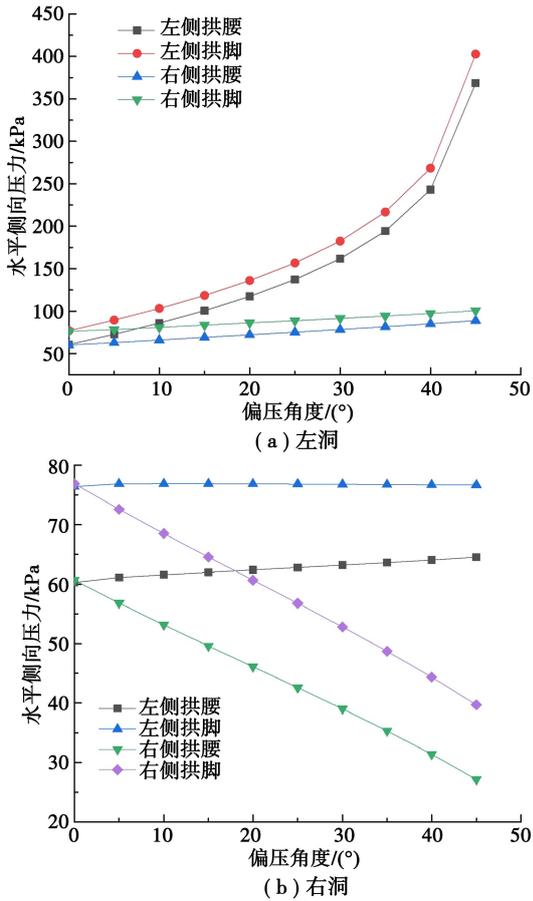


图 10 不同偏压角度下隧道水平侧向压力

Fig. 10 Tunnel horizontal lateral pressure with different bias angles

2.2 不同埋深下围岩压力

图 11—13 为不同埋深引起的围岩侧压力系数以及围岩拱顶垂直压力和水平侧向压力的变化曲线。在隧道埋深变化过程中保持偏压角度不变,坡度为 1/3,即偏压角度为 18.43°,以及净距保持不变为 9 m。由于隧道存在偏压,左右洞埋深不一样,图中隧道埋深变化是指浅埋侧隧道拱顶到坡面的距离的变化。通过公式(3)可以计算得出浅埋隧道的临界埋深,带入相关参数,得出适用于以下分析时隧道最大埋深为 31.28 m。

从图 11 中可以看出,随着埋深的增加, λ_1 和 λ_4 随着埋深没有变化,从侧压力系数计算公式中可以看出影响 λ_1 和 λ_4 的因素为隧道偏压角度 α 以及围岩计算摩擦角 φ_c ,只改变埋深的情况下 λ_1 和 λ_4 保持不变。影响 λ_2 、 λ_3 的因素有 B_1 、 B_2 、 H_4 、 H_6 ,由于隧道净距不变, B_1 、 B_2 保持不变,所以影响的主要因素就是隧道拱顶到地面的埋深,当偏压角

度增大时 H_4 、 H_6 逐渐增大, λ_2 、 λ_3 随着埋深的增大而减小,其中侧压力系数 λ_2 最小。

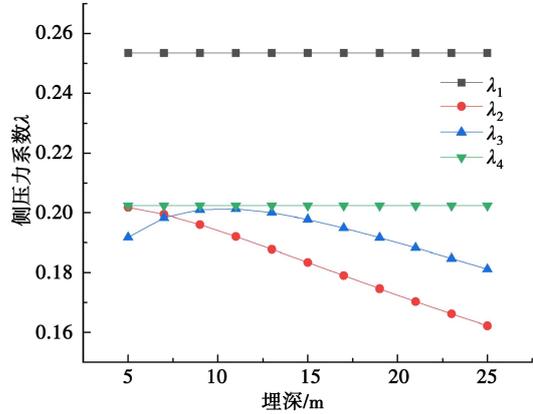


图 11 不同埋深下侧压力系数

Fig. 11 Lateral pressure coefficients with different buried depths

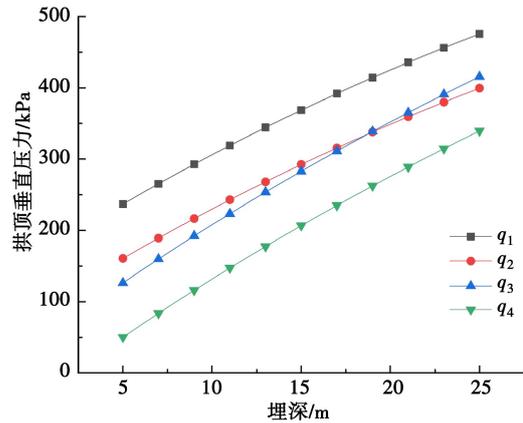


图 12 不同埋深下拱顶垂直压力

Fig. 12 Vertical pressure of vault with different buried depth

从图 12 中可以看出随着埋深的增加,拱顶垂直压力也逐渐增加,基本成线性关系,影响拱顶垂直压力分布的因素还有侧压力系数,虽然 λ_1 、 λ_4 随着埋深增加不变, λ_2 、 λ_3 随着埋深增加而减小,但是从拱顶垂直压力变化曲线看,拱顶垂直压力受到侧压力系数变化的影响很小,影响拱顶垂直压力的主要因素是隧道埋深。

水平压力计算点与埋深和侧压力系数有关,左洞两侧水平压力与 λ_1 、 λ_2 有关,右洞两侧水平压力与 λ_3 、 λ_4 有关。从图 13 可以看出,拱脚水平侧向压力大于拱肩水平侧向压力,是因为拱脚的埋深大于拱肩,左、右洞侧向水平压力都随着埋深的增大而增大,会因侧压力系数大小不同而增长速率不同。

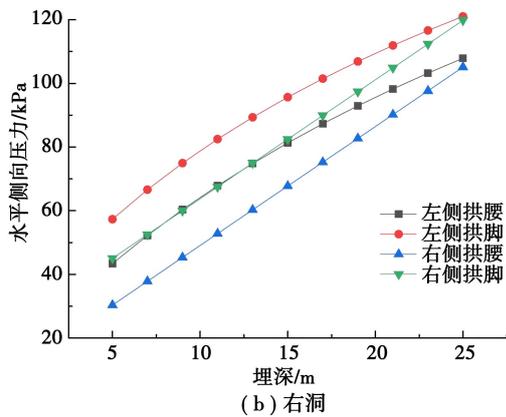
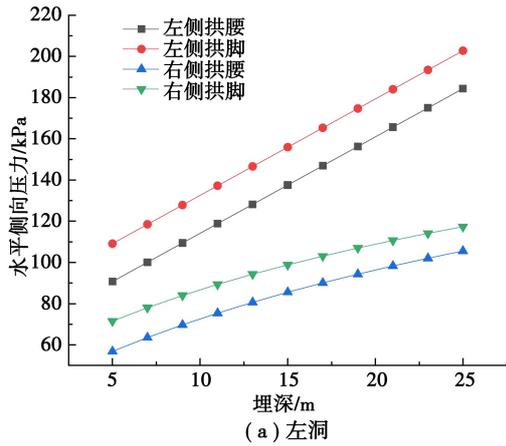


图 13 不同埋深下隧道水平侧向压力

Fig. 13 Horizontal lateral pressure of tunnel with different buried depths

2.3 不同净距下围岩压力

图 14—16 为不同净距下的围岩侧压力系数变化以及围岩拱顶垂直压力和水平侧向压力的变化曲线。在隧道净距变化过程中保持偏压角度不变,坡度为 1/3,即偏压角度为 18.43°,以及隧道埋深不变,浅埋侧隧道拱顶到地表的距离为 9.5 m。本节中所有计算公式只适用于小净距隧道,在公式(30)中可以算出适用于公式的最大净距,代入围岩及隧道相关参数可以得出净距须满足小于 13.4 m 时才适用于上述计算公式。

从图 14 中可以看出,由于只改变左、右洞之间的距离,隧道所受偏压角度并没有改变,所以 λ_1 、 λ_4 并没有变化。净距比较小时 λ_2 和 λ_3 随着净距增大而增大,当净距达到 9 m 时, λ_3 随着净距的增大而减小,当净距达到 13 m 时, λ_2 随着净距的增大而减小。侧压力变化曲线只适用于净距小于 13.4 m 时,当净距大于 13.4 m 时, λ_2 、 λ_3 的数值不再如曲线所示,应该按照左、右洞未相互扰动的情

况计算。

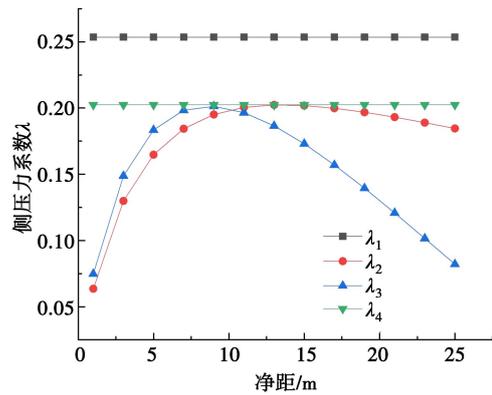


图 14 不同净距下侧压力系数

Fig. 14 Lateral pressure coefficient with different net distances

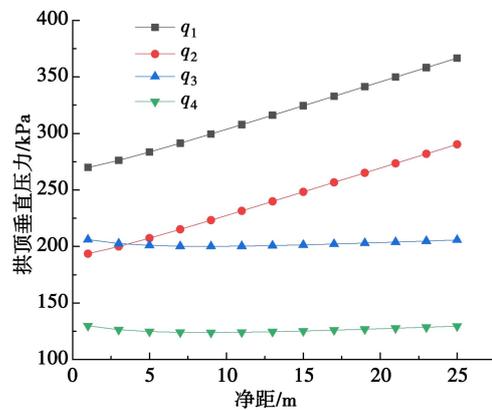


图 15 不同净距下拱顶垂直压力

Fig. 15 Vertical pressure of vault with different clearance

从图 15 可以看出,左洞拱顶垂直压力 q_1 、 q_2 随着净距的增大而逐渐增大,右洞拱顶垂直压力 q_3 、 q_4 基本保持不变。这是因为在讨论不同净距对围岩压力影响过程中控制浅埋侧隧道埋深不变以及左右洞所受偏压角度不变,当随着净距的增大,左洞埋深逐渐增大,右洞埋深不变。因此可以看出影响拱顶垂直压力大小的主要因素是隧道埋深。

从图 16(a) 可以看出,左洞左侧水平侧压力随着净距的增加而逐渐增大,右侧水平侧压力随着埋深的增大逐渐趋于平稳,虽然埋深逐渐增大,但是右侧侧压力系数逐渐减小,所以水平侧压力趋于稳定。

从图 16(b) 可以看出,右洞右侧围岩水平侧向压力随埋深和侧压力系数没有变化,右侧水平压力保持不变。左侧围岩压力及埋深没有变化,其水平侧压力变化趋势和侧压力系数 λ_3 保持一致,随着

净距的增大,左侧水平侧向压力先增大后减小。

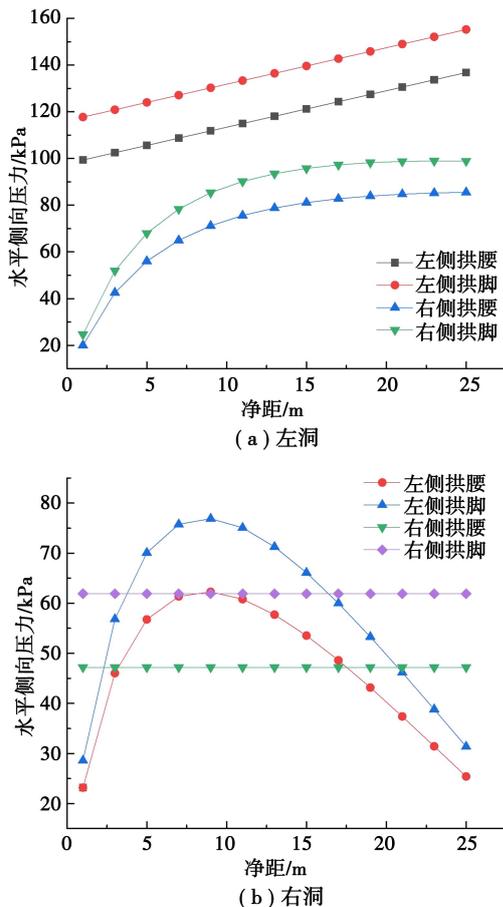


图 16 不同净距下水平侧向压力

Fig. 16 Horizontal lateral pressure with different clear distances

3 讨论

(1)对比扰动前和扰动后围岩压力的计算公式,可以得出由于后行洞的开挖对先行洞的围岩压力分布造成影响,使先行洞内侧侧压力系数减小,水平压力减小,也使得拱顶垂直压力变大。

(2)当保持偏压角度和浅埋侧隧道埋深不变的情况下,随着偏压角度的增加侧压力系数 λ_1 逐渐增大, λ_2 、 λ_3 、 λ_4 逐渐减小,公式适用范围为坡面水平夹角小于围岩计算摩擦角,且两者数值不能过于接近。从公式上看 λ_1 、 λ_4 的大小只与坡面与水平面的夹角 α ,围岩计算摩擦角 φ_c 有关,当只改变隧道的净距或者埋深的情况下 λ_1 、 λ_4 保持不变。只改隧道埋深的情况下,侧压力系数 λ_2 、 λ_3 随着埋深的增大而减小,只改变隧道净距的情况下,侧压力系数 λ_2 、 λ_3 随着净距的增大先增大后减小,在净

距近 10 m 时, λ_2 、 λ_3 达到最大。

(3)影响拱顶垂直分布压力大小的因素有很多,但主要影响因素为埋深。当控制浅埋侧隧道埋深不变以及净距不变的情况下改变隧道的偏压角度,会使右洞右侧埋深减小,左侧埋深增大,造成 q_1 、 q_2 、 q_3 增大, q_4 减小。当只增加隧道埋深的情况下,使 q_1 、 q_2 、 q_3 、 q_4 都增大。在保持浅埋侧隧道埋深和偏压角度不变的情况下增大两洞之间的净距,造成左洞埋深增大,右洞埋深不变,造成 q_1 、 q_2 增大, q_3 、 q_4 不变。

4 结论

(1)对比扰动前和扰动后围岩压力的计算公式,可以得出由于后行洞的开挖对先行洞的围岩压力分布造成影响,使先行洞侧压力系数减小,水平压力减小,拱顶垂直压力变大。

(2)外侧围岩(左洞左侧和右洞右侧)侧压力系数只与围岩计算摩擦角、土柱两侧摩擦角、坡面与水平面的夹角有关,内侧(左洞右侧和右洞左侧)侧压力系数还与隧道埋深以及双洞净距有关。

(3)影响拱顶垂直压力分布的因素有:偏压角度、埋深、侧压力系数。影响拱顶垂直压力分布的主要因素为埋深,埋深越大拱顶垂直压力越大,不同偏压角度和净距引起的变化本质上也是改变了隧道的埋深。影响围岩水平压力的因素为侧压力系数和隧道埋深,其中隧道埋深为主要影响因素。

(4)隧道水平侧压力的大小受围岩容重、隧道埋深和侧压力系数的影响,随着埋深和侧压力系数的增大,隧道水平侧压力相应增大。

参考文献(References)

- [1] 李鹏飞,王帆,聂雄,等.深埋非对称连拱隧道围岩压力计算方法研究[J].岩土工程学报,2016,38(9):1625-1629. (Li Pengfei, Wang Fan, Nie Xiong, et al. Methods for calculating rock pressure of symmetrical multi-arch deep tunnels [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(9): 1625-1629. (in Chinese))
- [2] 季相臣,傅洪贤,孔恒,等.大跨小间距隧道微振钻爆施工及中夹岩振动特性研究[J].中国公路学报,2021,34(4):220-230. (Ji Xiangchen, Fu Hongxian,

- Kong Heng, et al. Study on micro-vibration drilling and blasting of large span tunnel using small spacing and vibration characteristics of intermediate rock wall [J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(4): 220-230. (in Chinese))
- [3] 王浩, 杨新安, 王斌, 等. 3 洞小净距隧道围岩压力计算方法 [J]. 中国铁道科学, 2020, 41(3): 68-75. (Wang Hao, Yang Xinan, Wang Bin, et al. Calculation method for surrounding rock pressure of closely spaced triple tunnels [J]. China Railway Science, 2020, 41(3): 68-75. (in Chinese))
- [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. (in Chinese))
- [5] 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 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(Supp. 2): 4139-4145. (in Chinese))
- [6] 易小明, 张顶立, 逢铁铮, 等. 城市隧道上覆地层整体下沉的力学机制分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增 1): 2860-2867. (Yi Xiaoming, Zhang Dingli, Pang Tiezheng, et al. Analysis of the mechanical mechanism of the overall subsidence of the overlying strat on of an urban tunnel [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(Supp. 1): 2860-2867. (in Chinese))
- [7] 于丽, 吕城, 段儒禹, 等. 浅埋黄土隧道围岩压力计算方法 [J]. 中国铁道科学, 2019, 40(4): 69-76. (Yu Li, Lü Cheng, Duan Ruyu, et al. Calculation method for surrounding rock pressure of shallow buried loess tunnel [J]. China Railway Science, 2019, 40(4): 69-76. (in Chinese))
- [8] 扈世民. 黄土隧道围岩压力拱效应分析 [J]. 铁道学报, 2014, 36(3): 94-99. (Hu Shiming. Analysis on pressure-arch effect of surrounding rock in loess tunnel [J]. Journal of the China Railway Society, 2014, 36(3): 94-99. (in Chinese))
- [9] 王明年, 郭军, 罗禄森, 等. 高速铁路大断面黄土隧道深浅埋分界深度研究 [J]. 岩土力学, 2010, 31(4): 1157-1162. (Wang Mingnian, Guo Jun, Luo Lusen, et al. Study of critical buried depth of large cross-section loess tunnel for high speed railway [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(4): 1157-1162. (in Chinese))
- [10] 王明年, 郭军, 罗禄森, 等. 高速铁路大断面深埋黄土隧道围岩压力计算方法 [J]. 中国铁道科学, 2009, 30(5): 53-58. (Wang Mingnain, Guo Jun, Luo Lusen, et al. Calculation method for the surrounding rock pressure of deep buried large sectional loess tunnel of high speed railway [J]. China Railway Science, 2009, 30(5): 53-58. (in Chinese))
- [11] 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. (in Chinese))
- [12] 钟祖良, 刘新荣, 刘元雪, 等. 浅埋双侧偏压小净距隧道围岩压力计算与监测分析 [J]. 重庆大学学报, 2013, 36(2): 63-68. (Zhong Zuliang, Liu Xinrong, Liu Yuanxue, et al. Theoretical calculation and monitoring on rock pressure of shallow-buried bilateral bias neighborhood tunnel [J]. Journal of Chongqing University, 2013, 36(2): 63-68. (in Chinese))
- [13] 中华人民共和国交通部. 公路隧道设计规范 (JTG 3370.1-2018) [S]. 北京: 人民交通出版社, 2018. (Ministry of Communications of the People's Republic of China. Code for design of road tunnel (JTG 3370.1-2018) [S]. Beijing: China Communications Press, 2018. (in Chinese))
- [14] 李桂江, 瞿瑶, 卢国胜, 等. 复杂偏压小净距隧道围岩压力计算及参数影响性研究 [J]. 长江科学院院报, 2020, 37(12): 133-138. (Li Guijiang, Qu Yao, Lu Guosheng, et al. Surrounding rock pressure of tunnel with small clear distance under complex unsymmetrical loading: calculation and parameter impacts [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2020, 37(12): 133-138. (in Chinese))

- Geotechnical Engineering, 2019, 41 (7): 1200-1207. (in Chinese))
- [18] Yu J, Zhang C, Huang M. Soil-pipe interaction due to tunnelling: assessment of winkler modulus for underground pipelines [J]. Computers and Geotechnics, 2013, 50: 17-28.
- [19] Tanahashi H. Formulas for an infinitely long Bernoulli-Euler beam on the Pasternak model [J]. Soils and foundations, 2004, 44(5): 109-118.
- [20] Selvadurai A P S, Gladwell G M L. Elastic analysis of soil-foundation interaction [M]. New York: Elsevier Scientific Publishing Company, 1979.
- [21] 张桓, 张子新. 盾构隧道开挖引起既有管道的竖向变形[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2013, 41(8): 1172-1178. (Zhang Huan, Zhang Zixin. Vertical deflection of existing pipeline due to shield tunnelling [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2013, 41(8): 1172-1178. (in Chinese))
- [22] 龙驭球. 弹性地基梁的计算[M]. 北京: 人民教育出版社, 1981. (Long Yuqiu. Calculation of elastic foundation beam [M]. Beijing: Public Education Press, 1981. (in Chinese))
- [23] 车敬珂. 穿越施工影响下管线变形理论分析与有限差分分解[D]. 北京: 北京交通大学, 2018. (Che Jingke. Theoretical analysis and finite difference solution on pipeline deformation due to traversing excavation [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018. (in Chinese))
- [24] Lin C, Huang M, Nadim F, et al. Tunnelling-induced response of buried pipelines and their effects on ground settlements [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2020, 96: 103193.1-103193.17.
- [25] 龙驭球, 包世华, 袁驷. 结构力学 II——专题教程(第4版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2018. (Long Yuqiu, Bao Shihua, Yuan Si. Structural mechanics II — advanced course (4th edition) [M]. Beijing: Higher Education Press, 2018. (in Chinese))
- [26] Ma S, Shao Y, Liu Y, et al. Responses of pipeline to side-by-side twin tunnelling at different depths: 3D centrifuge tests and numerical modelling [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2017, 66: 157-173.
- [27] Franza A, Dejong M J. Elastoplastic solutions to predict tunnelling-induced load redistribution and deformation of surface structures [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2019, 145(4):1-14.

(上接第 1432 页)

- [15] 腾俊洋, 唐建新, 张闯, 等. 浅埋偏压小净距隧道围岩压力分布与围岩控制[J]. 地下空间与工程学报, 2018, 14(3): 761-769. (Teng Junyang, Tang Jianxin, Zhang Chuang, et al. Distribution and control of surrounding rock pressure of shallow buried tunnel under the condition of terrain bias [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2018, 14(3): 761-769. (in Chinese))
- [16] 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, 3(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, 3(3): 430-433. (in Chinese))
- [17] Barton N, Lien R, Lunde J. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1974, 6(4): 189-236.
- [18] Bieniawski Z T. Engineering rock mass classification [M]. Znc: John Wiley & Sons, 1989.
- [19] 中华人民共和国交通部. 公路隧道设计细则(JTG D70-2010) [S]. 北京: 人民交通出版社, 2010. (Ministry of Communications of the People's Republic of China. Guidelines for design of highway tunnel (JTG D70-2010) [S]. Beijing: China Communications Press, 2010. (in Chinese))