文章编号:1008-1542(2024)04-0434-09

基于压力拱理论的深埋节理岩体隧道围岩压力研究

丁　祥[1],刘　勇[2],韩智铭[2],张杰达[2],樊浩博[2],田　野[2],马凯蒙[2]

(1.中铁第五勘察设计院集团有限公司,北京　102600;
2.石家庄铁道大学土木工程学院,河北石家庄　050043)

摘　要:为研究节理岩体隧道围岩压力计算方法,以隧道压力拱理论为基础,通过离散元数值模拟分析了岩体的坚硬程度、完整程度和结构面的抗剪强度对隧道压力拱的影响,应用多元线性回归拟合了多因素围岩压力公式,并结合依托工程对拟合公式进行了适用性分析。结果表明:节理岩体隧道压力拱范围为拱顶到最大主应力方向的偏转点,隧道压力拱高度随着节理间距和结构面的抗剪强度的增大而减小,岩体力学参数对压力拱高度的影响较小;与现场实测的围岩压力相比,计算误差在15%以内。所提围岩压力公式适用性良好,为节理岩体的围岩压力计算提供了新的思路。

关键词:隧道工程;节理岩体;围岩压力;压力拱;离散元;多元线性回归

中图分类号:U25　　**文献标识码**:A　　**DOI**:10.7535/hbkd.2024yx04010

Study on surrounding rock pressure of deep jointed rock tunnel based on pressure arch theory

DING Xiang[1], LIU Yong[2], HAN Zhiming[2], ZHANG Jieda[2], FAN Haobo[2], TIAN Ye[2], MA Kaimeng[2]

(1. China Railway Fifth Survey and Design Institute Group Company Limited, Beijing 102600, China;
2. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang, Hebei 050043, China)

Abstract: To study the calculation method of rock pressure in jointed rock tunnels, based on the theory of tunnel pressure arch, the influence of rock hardness, integrity, and shear strength of structural planes on tunnel pressure arch was analyzed through discrete element numerical simulation. Multiple linear regression was applied to fit the multi factor rock pressure formula, and the applicability of the fitting formula was analyzed in combination with engineering support. The results indicate that the range of pressure arch in jointed rock tunnels is the deflection point from the arch crown to the direction of maximum principal stress; The height of tunnel pressure arch decreases with the increase of joint spacing and shear strength of structural planes, and the influence of rock mechanics parameters on the height of pressure arch is relatively small; Compared with the measured rock pressure on site, the calculation error is within 15%. The proposed formula for surrounding rock pressure has

收稿日期:2024-01-22;修回日期:2024-03-05;责任编辑:冯民
基金项目:国家自然科学基金(52108378);青年人才托举工程(2021QNRC001)
第一作者简介:丁祥(1979—),男,安徽池州人,高级工程师,主要从事隧道工程设计和施工技术方面的研究。
通信作者:刘勇,教授。E-mail:1366050542@qq.com

丁祥,刘勇,韩智铭,等.基于压力拱理论的深埋节理岩体隧道围岩压力研究[J].河北科技大学学报,2024,45(4):434-442.
DING Xiang, LIU Yong, HAN Zhiming, et al. Study on surrounding rock pressure of deep jointed rock tunnel based on pressure arch theory [J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2024, 45(4): 434-442.

good applicability and provides a new approach for calculating the surrounding rock pressure of jointed rock.

Keywords：tunneling；jointed rock；surrounding rock pressure；pressure arch；discrete element；multiple linear regression

随着中国隧道施工技术的发展，复杂地质环境中修建了越来越多的隧道工程，其中不乏大量的裂隙和节理围岩[1-2]。为确保此类隧道的安全施工及运营，准确的围岩压力对结构设计至关重要。

压力拱理论能够很好地解释围岩的受力及变形过程，因此被广泛用于确定隧道支护结构上的围岩压力，包括著名的普式拱理论[3]、太沙基理论[4]等，《铁路隧道设计规范》[5]中推荐的围岩压力计算公式，同样是考虑了隧道开挖后形成的拱效应提出的半经验半理论公式。这些计算方法均认为承载地应力的主体是围岩本身，隧道开挖后形成的压力拱才是隧道工程中需要优先考虑支护的对象，这就是著名的压力拱理论。1989年，中国学者邹熹正[6]从应力场的角度提出隧道围岩压力拱的新概念，揭开了中国对压力拱的研究热潮。李春柳[7]结合应变能熵指标，分析了围岩侧压力系数、隧道断面尺寸、开挖工序对连拱隧道压力拱动态发展的影响。孙振宇等[8]以有限元手段研究了不同锚固体系下压力拱效应。戚伟等[9]通过敏感性分析，研究了埋深对压力拱的影响，发现超过临界埋深后，埋深对压力拱几乎没有影响。宋玉香等[10]通过有限元数值模拟分析了围岩力学参数对压力拱的影响，得到了均质岩体中围岩压力的计算公式。

压力拱理论被广泛应用于围岩压力的研究中[11-12]，但现有研究大多假设围岩为均质、各向同性的连续介质，隧道工程在连续岩体和裂隙、节理等结构特征明显的岩体中受力变形特征存在明显的差异。李奎[13]分析了水平层状围岩中压力拱的相关问题，同时在一些特殊的隧道中也存在压力拱现象[14-16]。梁晓丹等[17-18]和王贵君等[19]也指出节理间距、节理面抗剪强度等因素对隧道开挖后的压力拱有明显的影响，因此在研究节理岩体中的隧道围岩压力时有必要考虑结构性质的影响。

本文以隧道压力拱理论为基础，通过建立含有节理围岩的离散元模型，分析节理岩体的坚硬程度、完整程度和节理面抗剪强度对节理围岩压力拱的影响，拟合并提出考虑岩体结构性质的围岩压力公式，以期为类似围岩隧道的围岩压力计算提供新思路。

1　压力拱的判定

压力拱现象在深埋隧道开挖过程中是普遍存在的。隧道开挖前，岩体受到自重应力与构造应力，达到一个平衡状态，处于初始地应力平衡状态；隧道开挖后，岩体初始应力状态遭到破坏，岩体产生不均匀的变形，围岩为了抵抗不均匀的变形进行自我应力调整，最大主应力方向发生偏转，由竖直偏转为水平，形成二次应力场。在二次应力场中，隧道周边发生应力偏转的岩体，主要用来承载自身重力和其上的岩体的压力，这就是压力拱。它将作用在拱顶的荷载传递到拱脚和周围稳定的围岩中，而支护结构仅承受位于压力拱范围内围岩的作用。

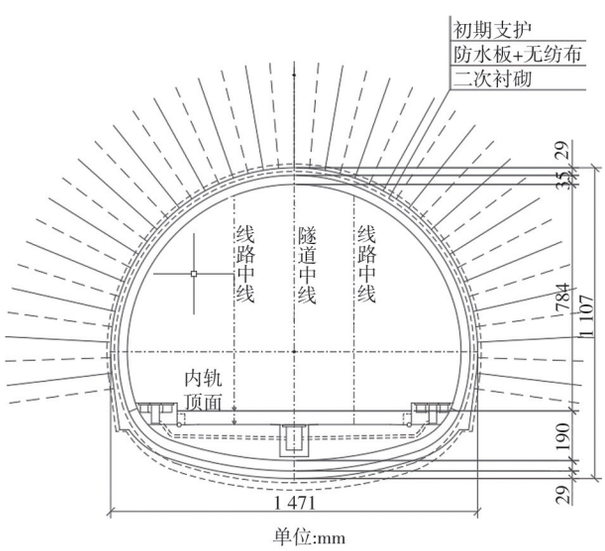


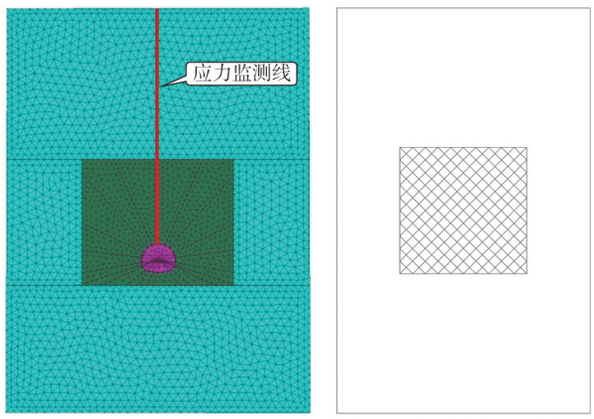
图 1　隧道断面示意图

Fig. 1　Schematic diagram of tunnel cross-section

围岩的压力拱是围岩应力的增高区，也就是围岩的承载区。因此，可以根据围岩中的主应力分布来确定围岩压力拱的区域和范围。具体结合一个算例来对压力拱范围进行确定。以250 km/h双线铁路隧道为例进行研究，衬砌断面如图1所示，隧道开挖宽度为14.71 m，高度为11.07 m。

计算采用大型三维离散元模拟软件3DEC，非常适用于模拟岩块（连续体）和地质结构面（非连续特征）组合的岩土模型，在外力作用下，岩块可以表现为连续介质力学行为，岩块之间则通过结构面实现相互作用，可表现出剪切错动、脱开等现象[20]。建立离散元模型如图2 a）所示，隧道埋深为120 m，模型水平方向取

6倍隧道跨度，模型整体尺寸为100 m(宽)×160 m(高)×10 m(纵向)，其中隧道周围50 m×50 m的范围为离散体，设置2组交叉节理，节理角度±45°，间距根据不同工况进行设定，节理设置情况如图2 b)所示。岩体参数按照《工程岩体分级标准》[21](以下简称“岩体分级标准”)取较为破碎的软岩，如表1所示。上边界为自由面，其余边界施加法向位移约束。采用结构面模拟节理，地层按理想弹塑性材料考虑，均服从摩尔库伦屈服准则。模拟过程采用全断面开挖，不考虑支护结构，即裸洞的最不利情况，纵向上每次开挖长度1 m，分10部开挖。在拱顶正上方$Z=2$ $(0\leqslant Z\leqslant 10)$的位置应力测线，测试拱顶正上方的水平应力、竖向应力、最大/最小主应力等。



a) 数值模型 b) 节理示意图

图2 离散元数值模型图

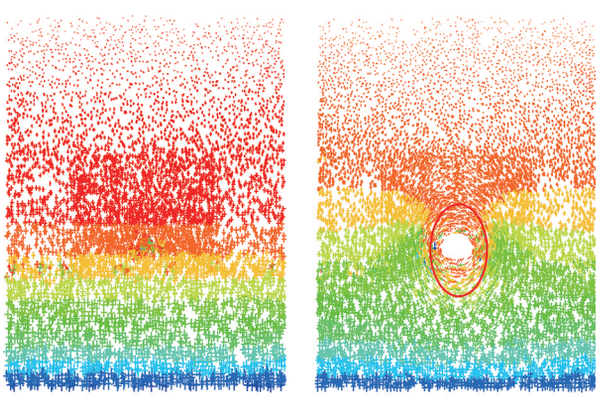
Fig. 2 Discrete element numerical model diagram

表1 岩体的力学参数

Tab. 1 Mechanical parameters of rock mass

单轴抗压强度/MPa	体积模量/MPa	剪切模量/MPa	黏聚力/MPa	摩擦角/(°)	抗拉强度/MPa	杨氏模量/GPa	泊松比
10	18.3×10^3	3.93×10^3	2.7	34	0.1	34	0.4

洞室开挖之前，在忽略构造应力的自重应力场中，竖直应力大于水平应力，如图3 a)所示，围岩中的最大主应力为竖直应力。洞室开挖后，围岩的自重应力平衡被打破，洞室周边围岩主应力方向发生偏转，且最大主应力的流线分布方向呈现出环流状，如图3 b)椭圆形框内的最大主应力所示，说明洞室四周存在压力拱现象。以拱顶的正上方为例，靠近洞壁处由于开挖引起径向应力释放，切向应力集中，导致最大主应力由竖直方向转为水平方向。



a) 开挖前 b) 开挖后

图3 隧道开挖前后的主应力张量图

Fig. 3 Principal stress tensor diagram before and after tunnel excavation

为进一步对拱顶正上方的压力拱现象进行分析，提取隧道拱顶应力监测线的水平应力和竖直应力，绘制应力变化曲线如图4所示。可以看到，在隧道拱顶洞壁处，最大主应力由开挖前的垂直应力转为水平应力，随着离洞壁距离的增加，水平应力逐渐减小，竖直应力逐渐增加，最后竖直应力重新恢复为最大主应力，这部分即为隧道开挖后形成的压力拱，这种判断压力拱的方法在如今应用较为成熟[22-23]。处于压力拱范围内的围岩把作用于拱上或拱后的荷载传递到拱脚和周围稳定的围岩中，而支护结构仅仅承受位于压力拱范围内围岩的作用。最大主应力方向发生偏转的点即为压力拱的边界，隧道衬砌的围岩压力计算仅需要考虑压力拱厚度内围岩的自重即可。

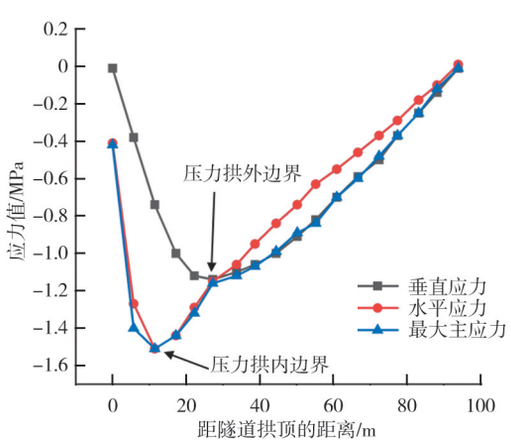


图4 隧道开挖后应力随深度变化曲线

Fig. 4 Stress variation curve with depth after tunnel excavation

2 节理岩体中压力拱高度的影响因素分析

考虑到节理岩体的特性，在对节理岩体的压力拱进行研究时，主要考虑岩体的坚硬程度、完整程度和结构面的抗剪强度3个影响因素进行分析。根据岩体分级

标准，岩体的坚硬程度分为软岩、较软岩、较硬岩和硬岩，通过改变力学参数体现，主要包括单轴抗压强度、岩块摩擦角和黏聚力。节理裂隙的间距、隙宽、迹长等影响了岩体的完整程度，节理的填充物与隙宽影响了节理节间的抗剪强度，在工程应用中，为实用性及可操作性考虑，节理的细部参数采用了完整程度与节理间抗剪强度两个指标来进行控制。完整程度包括完整、较完整、较破碎和破碎，主要通过结构面平均间距来体现；结构面抗剪强度包括结构面的内摩擦角和黏聚力。由于结构面参数较难取得，因此采用《工程岩体分级》中的结构面抗剪强度参数，如表 2 所示。

表 2　结构面抗剪强度参数表

Tab. 2　Table of shear strength parameters for structural planes

两侧岩体的坚硬程度及结构面的结合程度	内摩擦角/(°)	黏聚力/MPa
坚硬岩，结合好	＞37(40)	＞0.22(0.25)
坚硬-较坚硬岩，结合一般；较软岩，结合好	37～29(33)	0.22～0.12(0.17)
坚硬-较坚硬岩，结合差；较软岩-软岩，结合一般	29～19(24)	0.12～0.08(0.10)
较坚硬-较软岩，结合差-结合很差；软岩，结合差；软质岩的泥化面	19～13(16)	0.08～0.05(0.065)
较坚硬岩及全部软质岩，结合很差；软质岩泥化层本身	＜13(10)	＜0.05(0.045)

2.1　岩体的坚硬程度

根据岩体分级标准，岩体的坚硬程度按照软岩到坚硬岩拟定计算工况共 7 种，具体如表 3 所示。其中单轴抗压强度为 10～80 MPa，摩擦角为 34～55°，黏聚力为 2.7～12.6 MPa。岩体完整程度为较完整，结构面间距取为 1.0 m，结构面摩擦角、黏聚力分别取 24°和 0.1 MPa。

表 3　岩体力学参数计算工况

Tab. 3　Calculation working conditions of rock mechanics parameters

工况编号	岩体的力学参数			完整程度	结构面抗剪强度	
	单轴抗压强度/MPa	摩擦角/(°)	黏聚力/MPa	(节理间距)/m	摩擦角/(°)	黏聚力/MPa
M1	10	34	2.7			
M2	18	36.5	4.5			
M3	26	38.9	6.3			
M4	36	42	7.8	1.0	24	0.1
M5	45	44	9.2			
M6	60	49	10.9			
M7	80	55	12.6			

按照拟定工况计算完成后，根据图 4 所述方法对各工况的压力拱高度进行确定，统计如表 4 所示。

表 4　不同岩块强度下的压力拱计算结果

Tab. 4　Calculation results of pressure arch under different rock block strengths

工况编号	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7
压力拱高度/m	6.3	6.3	6.3	6.3	6.3	6.3	5.75

由表 3 可知，随着岩体由软岩到坚硬岩的变化，围岩物理力学参数增大，压力拱有所减小，但整体变化较小，不同工况压力拱高度变化在 0.1 m 以内，显然岩块参数对压力拱的影响较小，规范公式[5]对节理岩体的压力拱进行计算时，过大考虑了岩体力学参数对于压力拱的影响。

2.2　岩体完整程度

根据岩体分级标准，岩体的完整程度按照完整到破碎取平均间距为 0.2～3.5 m，共计 13 种工况，其他参数同工况 M3，即岩块的单轴抗压强度取 26 MPa，摩擦角为 38.9°，黏聚力为 6.3 MPa，结构面摩擦角、黏聚力分别取 24°和 0.1 MPa。根据图 4 所述方法对各工况的压力拱高度进行确定，统计如表 5 所示。同时绘制压力拱高度随岩体完整程度的变化曲线，如图 5 所示。

由图 5 可知，随着岩体节理间距增大，岩体由碎裂状往整体状发展，岩体完整程度从到破碎到完整，相应的围岩等级减小，压力拱的高度随之减小；节理间距有 2 个节点，节理间距大于 2.5 m 时，围岩完整程度较好，节理间距对压力拱的影响较小，此时拟合曲线的斜率最小；节理间距小于 0.4 m 时，围岩完整程度极差，节理对压力拱的高度影响极大。拟合曲线为分段的线性关系，具体如式(1)所示。

表5 不同节理间距下的压力拱高度

Tab. 5 Pressure arch height under different joint spacing

工况	节理间距/m	压力拱高度/m
L1	0.2	10.47
L2	0.3	7.3
L3	0.4	6.63
L4	0.5	6.55
L5	0.7	6.26
L6	1	5.74
L7	1.2	5.63
L8	1.5	4.7
L9	1.8	4.6
L10	2	4.19
L11	2.5	3.68
L12	3	3.5
L13	3.5	3.33

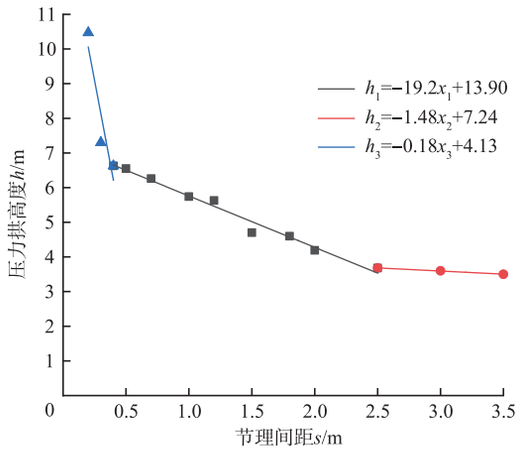


图5 考虑节理间距的压力拱拟合曲线

Fig. 5 Pressure arch fitting curve considering joint spacing

$$h=\begin{cases}-19.2s+13.90, & s<0.4,\\ -1.48s+7.24, & 0.4\leqslant s\leqslant 2.5,\\ -0.18s+4.13, & s>2.5,\end{cases} \tag{1}$$

式中 s 为节理间距。

2.3 结构面的抗剪强度

2.3.1 结构面黏聚力的影响

根据岩体分级标准，岩体的结构面抗剪强度主要考虑黏聚力和内摩擦角。这里先考虑黏聚力变化，取黏聚力范围0.045～0.25 MPa，拟定计算工况共计5种，其余参数同M3工况，即岩块的单轴抗压强度取26 MPa，摩擦角为38.9°，黏聚力为6.3 MPa，结构面摩擦角为24°，节理间距为1.0 m。对各工况的压力拱高度进行确定，统计如表6所示。同时绘制压力拱高度随结构面黏聚力的变化曲线，如图6所示。

表6 不同结构面黏聚力下的压力拱工况

Tab. 6 Pressure arch working conditions under different structural plane cohesion

工况编号	结构面抗剪强度		压力拱高度 h/m
	黏聚力/MPa	摩擦角/(°)	
Sf1	0.045	24	6.26
Sf2	0.065		5.74
Sf3	0.100		5.22
Sf4	0.170		4.70
Sf5	0.250		3.67

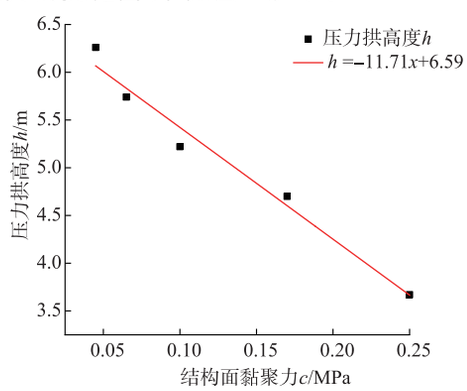


图6 考虑结构面黏聚力的压力拱拟合曲线

Fig. 6 Pressure arch fitting curve considering structural plane cohesion

由表5及图6可知，随着结构面黏聚力的增大，围岩条件变好，近似降低了围岩等级，压力拱高度明显减小，拟合曲线为线性关系，如式(2)所示。

$$h=-11.71c+6.59, \tag{2}$$

式中 c 为结构面黏聚力。

2.3.2 结构面摩擦角的影响

根据岩体分级标准，取摩擦角范围10～40°，拟定计算工况共计5种，其余参数同M3工况，即岩块的单轴抗压强度取26 MPa，摩擦角为38.9°，黏聚力为6.3 MPa，结构面黏聚力为0.1 MPa，节理间距为1.0 m。对各工况的压力拱高度进行确定，统计如表7所示。同时绘制压力拱高度随结构面摩擦角正切值的变化曲线，如图7所示。

表 7　不同结构面摩擦角下的压力拱工况

Tab. 7　Pressure arch working conditions under different friction angles of structural surfaces

工况编号	结构面抗剪强度		tan φ	压力拱高度/m
	黏聚力/MPa	摩擦角 φ/(°)		
Sc1	0.1	10	0.18	28.02
Sc2		16	0.29	10.83
Sc3		24	0.45	5.22
Sc4		33	0.65	3.67
Sc5		40	0.84	3.10

由表 6 及图 7 分析可知，随着节理内摩擦角及其正切值的增大，压力拱高度随之减小，在 0.18～0.4 之间压力拱高度变化明显，当摩擦角大于 24°即正切值大于 0.4 以后，压力拱高度趋于定值，变化较小。且压力拱高度与摩擦角正切值呈明显的指数函数关系，因此拟合曲线为

$$h = 263 \times \exp(-\tan\varphi/0.07) + 3.69\ , \tag{3}$$

式中 tan φ 为结构面摩擦角的正切值。

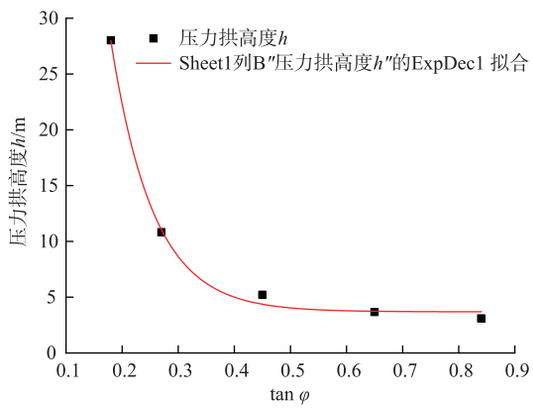


图 7　考虑结构面内摩擦角正切值的压力拱拟合曲线

Fig. 7　Pressure arch fitting curve considering the tangent value of the friction angle within the structural plane

3　节理岩体围岩压力多因素拟合公式及适用性分析

3.1　节理岩体围岩压力拟合公式

通过数值模拟改变岩体力学参数、结构面间距、结构面抗剪强度指标，得到了单因素对压力拱高度的影响，由于岩体力学参数变化对压力拱高度影响较小，只选取主要影响因素节理间距 s、节理黏聚力 c、节理内摩擦角的正切值 tan φ 共 3 个因素建立多元回归方程，如式(4)所示。

$$h = a_0 + a_1 s^2 + a_2 s + a_3 c + a_4 \cdot a_5^{(a_6 \tan\varphi)}\ 。 \tag{4}$$

结合上述相关结果，进行多元线性回归分析，求解式(4)中的 a_0、a_1、a_2、a_3、a_4、a_5 和 a_6，最终解得如式(5)所示。

$$h = \begin{cases} 15.554\,0 + 22.491\,3s^2 - 33.189\,6s - 11.799\,1c + 149.331\,4 \times 12.618\,3^{(-4.011\,3\tan\varphi)}\ , & s < 0.4\ , \\ 6.521\,7 - 1.434\,8s - 11.799\,1c + 149.331\,4 \times 12.618\,3^{(-4.011\,3\tan\varphi)}\ , & 0.4 \leqslant s \leqslant 2.5\ , \\ 5.849\,2 - 1.040\,0s - 11.799\,1c + 149.331\,4 \times 12.618\,3^{(-4.011\,3\tan\varphi)}\ , & s > 2.5\ 。 \end{cases} \tag{5}$$

因此，基于压力拱理论的深埋节理岩体隧道围岩压力计算公式如下：

$$p = \gamma h\ , \tag{6}$$

式中：p 为围岩压力，kPa；γ 为岩体的重度，kN/m^3；h 为压力拱高度，m。

3.2　围岩压力现场测试

以银兰高铁中卫至兰州段香山隧道为依托工程，隧道位于宁夏中卫市沙坡头区附近，穿越香山山脉，洞身通过地层主要为砂岩夹板岩、砂岩夹千枚岩、砂岩夹泥岩等复合地层。为应用式(5)及式(6)依托工程竖向围岩压力进行计算，使用三维地质罗盘以及地质罗盘对掌子面进行测量，得到节理组倾角倾向，使用米尺等对节理间距进行测量，使用地质锤对岩块强度进行测量，如图 8 所示。

同时取Ⅲ级、Ⅳ级、Ⅴ级围岩各 1 个试验段面，采用振弦式双膜压力传感器对隧道拱顶围岩压力进行监测。

1)Ⅲ级围岩

Ⅲ级围岩掌子面地质素描如图 9 所示，岩层以第三纪中统砂岩为主，岩体成岩作用好，掌子面岩体较为完整，节理组平均间距为 0.7 m，岩块单轴抗压强度大于 80 MPa，结合程度好，结构面黏聚力取 0.25 MPa，

图8 现场地质素描

Fig. 8 Site geological sketch

内摩擦角取45°。代入式(6)可得压力拱高度 h 为2.58 m。根据现场资料,隧址围岩重度取平均值为25 kN/m^3,因此围岩压力 p 为64.42 kPa。

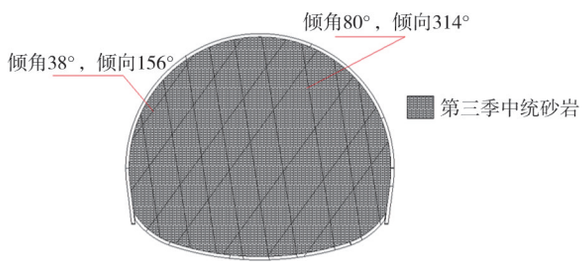


图9 Ⅲ级围岩掌子面地质素描

Fig. 9 Geological sketch of grade Ⅲ surrounding rock face

2)Ⅳ级围岩

Ⅳ级围岩掌子面地质素描如图10所示,岩层以第三季中统板岩和千枚岩为主,岩体成岩作用较差,节理组平均间距为0.5 m,岩块强度取为较坚硬,单轴抗压强度为30～60 MPa,结合程度较好,结构面黏聚力为0.2 MPa,内摩擦角为40°。代入式(6)可得压力拱高度 h 为3.47 m,因此围岩压力 p 为86.8 kPa。

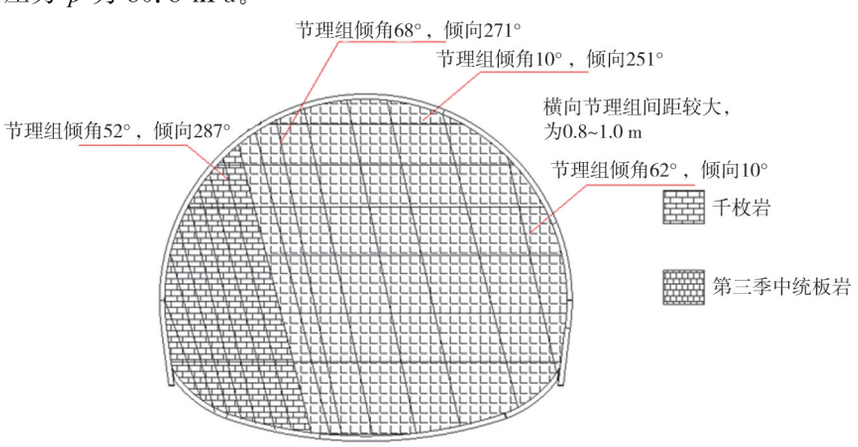


图10 Ⅳ级围岩掌子面地质素描

Fig. 10 Geological sketch of grade Ⅳ surrounding rock face

3)Ⅴ级围岩

Ⅴ级围岩掌子面地质素描如图11所示,岩层以第三季中统砂岩和寒武纪砂岩为主,夹杂少量泥岩,岩体成岩作用差,节理组平均间距为0.2 m,岩块强度为较坚硬,单轴抗压强度为30～60 MPa,结合程度较好,结构面黏聚力为0.17 MPa,内摩擦角为33°。代入式(6)可得压力拱高度 h 为8.01 m,因此围岩压力 p 为200.3 kPa。

3.3 公式适用性分析

将拟合公式计算得到的围岩压力与现场实际监测得到的围岩压力进行对比,如表8所示。随着围岩等级的增大,按多因素拟合式(6)计算的围岩压力也随之增大,与现场检测结果比对较为符合。随着围岩压力的增大,计算误差越来越小,但均控制在15%以内。尤其是Ⅳ级和Ⅴ级围岩,岩体结构面作用明显,考虑结构作用的拟合公式计算结果与监测结果误差均小于8%,因此采用式(6)对节理岩体隧道拱顶围岩压力进行

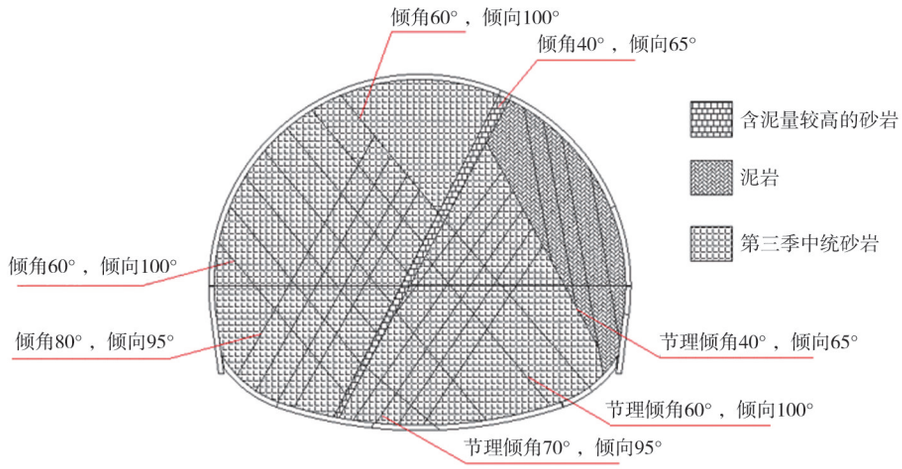


图 11　Ⅴ级围岩掌子面地质素描

Fig. 11　Geological sketch of grade Ⅴ surrounding rock face

表 8　计算围岩压力与实测围岩压力对比表

Tab. 8　Comparison of surrounding rock pressure

围岩等级	拟合公式计算/kPa	现场监测/kPa	误差/%
Ⅲ级围岩	64.42	75	14.10
Ⅳ级围岩	86.80	94	7.66
Ⅴ级围岩	200.30	188	6.54

计算是可行的。通过上述分析与验证，节理岩体围岩压力公式适用于围岩中存在 2 组交叉节理且具有一定黏结强度的深埋隧道。针对显著的单向节理岩体，需进一步依托实际案例进行分析研究。

4　结　语

本文以压力拱理论为基础，考虑多因素对节理岩体深埋隧道的围岩压力计算公式进行了拟合，并依托实际工程进行了应用，主要结论如下。

1）基于离散元数值模拟，从隧道周围应力分析的角度确定了压力拱内外边界，即最大主应力方向发生偏转的点为压力拱的边界。

2）对节理岩体压力拱随节理间距、结构面黏聚力及摩擦角的增大而减小，而岩块力学参数对围岩压力拱高度的影响较小，可以忽略。采用多元线性回归分析，得到了考虑多因素的节理围岩深埋隧道围岩压力公式。

3）结合现场实测，拟合公式的计算结果与实测围岩压力大小较为符合，误差均控制在 15%以内，为节理围岩的围岩压力计算提供了新的思路。

未来应采集更多的现场数据，对围岩压力公式进行校对与修正，进一步提高围岩压力公式的适用范围，为隧道设计提供依据。

参考文献/References：

[1]　张涛，徐卫亚，孟庆祥，等. 基于 3D 打印技术的柱状节理岩体试样力学特性试验研究[J]. 岩土力学，2022，43(sup2)：245-254.
ZHANG Tao，XU Weiya，MENG Qingxiang，et al. Experimental investigation on the mechanical characteristics of columnar jointed rock mass samples based on 3D printing technology[J]. Rock and Soil Mechanics，2022，43(sup2)：245-254.

[2]　张杰达. 香山隧道围岩力学参数及支护参数优化研究[D]. 石家庄：石家庄铁道大学，2023.
ZHANG Jieda. Research on Optimization of Surrounding Rock Mechanics Parameters and Support Parameters of Xiangshan Tunne[D]. Shijiazhuang：Shijiazhuang Tiedao University，2023.

[3]　朱永全，宋玉香. 隧道工程[M]. 2 版. 北京：中国铁道出版社，2010.

[4]　徐强，刘勇，宋玉香，等. 基于松动圈理论深埋黄土隧道围岩压力计算方法[J]. 科学技术与工程，2021，21(23)：10054-10060.

XU Qiang,LIU Yong,SONG Yuxiang,et al. A method for calculating surrounding rock pressure of deep loess tunnel based on loose broken rock zone theory[J]. Science Technology and Engineering,2021,21(23):10054-10060.

[5] TB 10003—2016,铁路隧道设计规范[S].

[6] 邹熹正. 对压力拱假说的新解释[J]. 矿山压力,1989(1):67-68.

[7] 李春柳. 连拱隧道分步开挖围岩压力演化特征及偏态效应分析[D]. 秦皇岛:燕山大学,2016.
LI Chunliu. Analysis of the Evolution Characteristics and Skewness Effects of Surrounding Rock Pressure During Step-by-Step Excavation of A Multi Arch Tunnel[D]. Qinhuangdao:Yanshan University,2016.

[8] 孙振宇,皇甫楠琦,张顶立,等. 大跨度隧道预应力锚固体系协同承载的压力拱效应[J]. 铁道标准设计,2023,67(1):10-16.
SUN Zhenyu, HUANGFU Nanqi, ZHANG Dingli, et al. Pressure arch effect of the synergetic bearing of pre-stressed anchorage system in large-span tunnel[J] Railway Standard Design,2023,67(1):10-16.

[9] 戚伟,付建新,李腾. 考虑节理劣化效应的深部围岩应力演化规律及敏感性分析[J]. 采矿与安全工程学报,2020,37(2):327-337.
QI Wei,FU Jianxin,LI Teng. Stress evolution law and sensitivity analysis of surrounding rock in deep mine considering deterioration effect caused by joint[J]. Journal of Mining and Safety Engineering,2020,37(2):327-337.

[10] 宋玉香,张亚辉,刘勇. 基于压力拱理论的围岩压力计算研究[J]. 防灾减灾学报,2017,33(3):21-27.
SONG Yuxiang,ZHANG Yahui,LIU Yong. Calculation of the surrounding rock pressure based on pressure arch theory[J]. Seismological Research of Northeast China,2017,33(3):21-27.

[11] MA Kaimeng,ZHANG Junru,DAI Yi,et al. The calculation for ultimate surrounding earth pressure on deep-buried tunnels in aeolian sand stratum to prevent surface collapse[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment,2022. DOI: 10.1007/s10064-022-02894-7.

[12] ZHOU Ping,JIANG Yifan,ZHOU Feicong,et al. Study on pressure arch effect of Xigeda strata tunnel based on experiment and discrete element simulation[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment,2022. DOI: 10.1007/s10064-022-02700-4.

[13] 李奎. 水平层状隧道围岩压力拱理论研究[D]. 成都:西南交通大学,2010.
LI Kui. Pressure Arch Theory Study of Horizontal Bedded Tunnel Surrounding Rock[D]. Chengdu:Southwest Jiaotong University,2010.

[14] 王文谦. 大跨度隧道围岩压力拱效应研究[D]. 北京:北京交通大学,2018.
WANG Wenqian. Research on the Pressure Arch Effect of Surrounding Rock in Large-Span Tunnels[D]. Beijing:Beijing Jiaotong University,2018.

[15] 昝文博,赖金星,邱军领,等. 松散堆积体隧道压力拱效应试验与数值模拟[J]. 岩土工程学报,2021,43(9):1666-1674.
ZAN Wenbo,LAI Jinxing,QIU Junling,et al. Experiments and numerical simulations on pressure-arch effect for a tunnel in loose deposits [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2021,43(9):1666-1674.

[16] WANG X,KANG H,GAO F. Numerical study on the formation of pressure arch in bolted gravel plate[J]. Computers and Geotechnics, 2021. DOI: 10.1016/j.compgeo.2020.103933.

[17] 梁晓丹,宋宏伟,赵坚. 隧道压力拱与围岩变形关系[J]. 西安科技大学学报,2008,28(4):647-650.
LIANG Xiaodan,SONG Hongwei,ZHAO Jian. Relationship between tunnel pressure arch and surrounding rock deformation[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology,2008,28(4):647-650.

[18] 梁晓丹,刘刚,赵坚. 地下工程压力拱拱体的确定与成拱分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2005,33(3):314-317.
LIANG Xiaodan,LIU Gang,ZHAO Jian. Definition and analysis of arching action in underground rock engineering[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2005,33(3):314-317.

[19] 王贵君,任杨茹. 节理特性对隧道围岩稳定性影响的研究[J]. 河北工业大学学报,2017,46(1):103-107.
WANG Guijun,REN Yangru. Influence of joint characteristics on the stability of the tunnel surrounding rock[J]. Journal of Hebei University of Technology,2017,46(1):103-107.

[20] 蒋水华,陈佳栋,邹宗毅,等. 基于通用椭圆盘模型及 3DEC 实现的节理岩质边坡稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报,2023,42(7):1610-1622.
JIANG Shuihua,CHEN Jiadong,ZOU Zongyi,et al. Stability analysis of jointed rock slopes based on a universal elliptical disc model and its realization in 3DEC[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2023,42(7):1610-1622.

[21] GB/T 50218—2014,工程岩体分级标准[S].

[22] 燕波. 基于大型机械施工的双线高铁隧道围岩稳定性分析及支护优化研究[D]. 成都:西南交通大学,2021.
YAN Bo. Research on Stability Analysis and Support Optimization of Surrounding Rock of Double Track High Speed Railway Tunnel Based on Large Machinery Construction[D]. Chengdu:Southwest Jiaotong University,2021.

[23] 韩宽. 基于 DEM 的黄土隧道围岩变形与应力特征及围岩压力计算方法研究[D]. 西安:长安大学,2023.
HAN Kuan. Research on Deformation and Stress Characteristics of Loess Tunnel Surrounding Rock and Calculation Method of Surrounding Rock Pressure Based on DEM[D]. Xi'an:Chang'an University,2023.