

DOI: 10.11779/CJGE20240041

黄土隧道围岩压力计算方法研究

罗彦斌, 陈 浩, 陈建勋*, 王传武

(长安大学公路学院, 陕西 西安 710064)

摘 要: 为了提出一种适用于黄土隧道的围岩压力计算方法, 分析了黄土隧道围岩压力形成机理, 依托大量围岩压力现场测试数据, 提取了隧道围岩压力影响因子, 探究了不同影响因子对黄土隧道围岩压力的影响敏感性及其变化规律, 基于多因子耦合回归分析方法构造了围岩压力计算公式, 采用样本包络度法结合试算法提出了考虑多影响因素的黄土隧道围岩压力计算方法。结果表明: 黄土隧道围岩压力主要为形变压力, 目前常用的基于松动理论的围岩压力计算方法不能真实反映黄土隧道的荷载情况; 黄土隧道围岩压力受围岩级别影响明显, 与隧道埋深、跨度和开挖高跨比具有较好的指数函数关系; 与现有常用的太沙基公式、隧规公式以及卡柯公式对比, 本文提出的计算公式对于黄土隧道围岩压力具有较好的包络度, 且计算结果更接近于现场实测值。

关键词: 隧道工程; 黄土隧道; 围岩压力; 影响因子; 计算方法

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2025)06-1210-09

作者简介: 罗彦斌(1980—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 2003 年毕业于长安大学隧道及地下工程专业, 主要从事隧道与地下工程方面的教学与研究工作。E-mail: lyb@chd.edu.cn。

Method for calculating pressure of surrounding rock in loess tunnels

LUO Yanbin, CHEN Hao, CHEN Jianxun, WANG Chuanwu

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

Abstract: To propose a calculation method for surrounding rock pressure applicable to loess tunnels, analyzed the formation mechanism of surrounding rock pressure in loess tunnels, based on a large amount of field test data of surrounding rock pressure, extracted the impact factors, explored the sensitivity and variation patterns of different impact factors on the surrounding rock pressure of loess tunnels, a calculation formula for surrounding rock pressure was constructed based on the multi-factor coupled regression analysis method, then, the method for calculating the surrounding rock pressure of loess tunnels considering multiple influencing factors was proposed by using the sample enveloped method combined with the trial algorithm. The results show that: The surrounding rock pressure in loess tunnels is the deformation pressure mainly, the methods used commonly for calculating the surrounding rock pressure based on the loosening theory cannot truly reflect the load situation of loess tunnels; The surrounding rock pressure in loess tunnels is affected significantly by the grade of surrounding rock, which has a good exponential function correlation with the burial depth, the span and the height-span ratio of excavation; Compared with the commonly used Terzaghi's formula, the formula of Code for Design of Tunnels, and the Caquot's formula, the formula proposed in this paper has a better envelope for the surrounding rock pressure of loess tunnels, and the calculation results are closer to the measured values.

Key words: tunnel engineering; loess tunnel; pressure of surrounding rock; impact factor; calculation method

0 引 言

随着“一带一路”倡议的深入实施和“交通强国”战略的持续推进, 中国在黄土地区修建了大量的黄土隧道。由于黄土隧道相对岩石隧道建设起步晚, 国内外无系统的支理论设计与施工技术, 主要采用岩石隧道的相关理论和技术进行修建, 导致隧道修建过程中极易出现地表裂缝、衬砌开裂和坍塌等严重的工程问题和事故^[1]。究其主要原因, 是对作用在隧道支护

结构上的荷载, 即围岩压力的作用机制认识不清, 缺乏适用于黄土隧道的围岩压力计算方法。因此, 为了满足黄土隧道工程设计与施工需求, 亟需对黄土隧道围岩压力计算方法进行系统研究。

基金项目: 国家自然科学基金项目(52278394); 教育部长江学者奖励计划项目(Q2018209); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(300102213402)

收稿日期: 2024-01-11

*通信作者 (E-mail: chenjx1969@chd.edu.cn)

围岩压力是指地下洞室开挖后,由于围岩变形或松散等原因,作用于支护或衬砌结构上的压力^[2-3],其合理确定是隧道设计的前提,也是隧道工程领域的基础科学问题。长期以来,国内外学者基于不同理论,结合大量工程资料得到了一系列计算方法^[4-9],如普氏、太沙基、芬纳等理论公式和广泛应用于工程的《公路隧道设计规范》《铁路隧道设计规范》围岩压力计算公式(以下简称隧规公式)等。此外,方正昌^[10]、王明年等^[11]、刘学增等^[12]通过对围岩压力进行统计分析,研究了隧道围岩压力的分布特征和影响因素间的变化规律。

然而,黄土特有的工程性质导致其基于理论推导得到的围岩压力计算公式和根据塌方资料总结的经验公式不能完全适用于黄土隧道^[14]。因此,陈建勋等^[15]、Luo 等^[16-17]依托黄土隧道工程进行现场测试,分析了黄土隧道围岩压力分布规律和量值大小;王明年等^[18]、赵勇等^[19]通过对黄土隧道深浅埋的分界深度进行研究,推荐浅埋隧道围岩压力采用隧规公式,深埋隧道采用太沙基理论公式;韩兴博等^[20]考虑黄土强度的弱化,引入结构性参数,在芬纳公式的基础上推导了适用于黄土盾构隧道的围岩压力解析公式,并讨论了围岩增湿对围岩压力的影响。上述对黄土隧道围岩压力的研究主要是针对某一具体隧道工程,并且黄土作为一种特殊性质的围岩,其围岩压力的大小及变化规律与普通岩质隧道不同,目前的研究成果缺乏黄土隧道围岩压力实测值与理论结合的系统性分析,结果往往具有一定的局限性,难以对黄土隧道设计起到普适性的指导。

本文通过分析黄土隧道围岩压力形成机理,依托大量围岩压力现场实测数据,考虑围岩级别、隧道埋深、跨度、开挖高度对围岩压力的影响规律,基于多因子耦合回归分析方法构造了围岩压力计算公式,采用样本包络度法结合试算法提出了一种新的黄土隧道围岩压力计算方法,成果以期作为黄土隧道结构设计与施工的理论依据。

1 黄土隧道围岩压力形成机理与实测值分析

1.1 隧道围岩压力形成机理

隧道开挖后,岩体初始应力平衡状态被打破,发生应力重分布,围岩向洞室产生变形,在对隧道进行支护后,支护结构要阻止围岩变形。根据弹塑性理论可知,围岩与支护的相互作用关系如图1所示。图1中I、II、III、IV代表支护特性曲线。

由图1可知,围岩位移支护特性曲线由形变压力

区和松动压力区两部分组成,可分为以下3段:直线段 ab 为隧道开挖后洞周围岩的弹性变形;曲线段 bc 为隧道开挖后初始地应力释放到一定阶段时,围岩径向出现塑性或黏塑性变形;翘曲段 cd 是由于围岩塑性或黏塑性变形的不断发展,洞周部分围岩发生破坏,丧失了自承与自稳能力^[22]。而且,不同支护时机下的围岩压力形式不同,如支护较早,且在 ac 段与围岩达到受力平衡,围岩压力为形变压力;若支护施作较晚,围岩进入松动变形阶段,则围岩压力为松动压力。

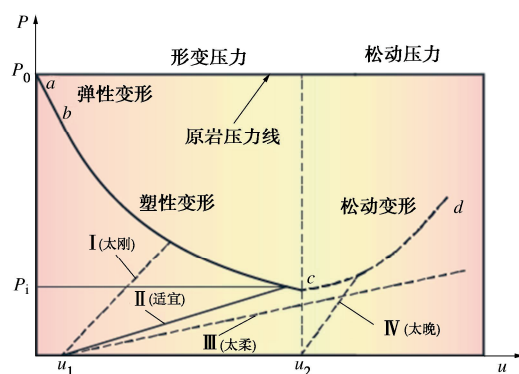


图1 围岩位移支护特性曲线

Fig. 1 Characteristic curve of support for surrounding rock displacement

1.2 黄土隧道围岩压力实测值分析

通过在吴子高速黄土隧道群、神府高速墩梁隧道、哈尔滨绕城高速天恒山隧道、隰吉高速丰收岭隧道、黄延高速扩能工程剪子岔2号隧道和大西客运专线马家庄隧道进行围岩压力现场测试,采用振弦式压力盒进行监测,现场埋设情况如图2所示。并对郑西客运专线、宝兰客运专线和西宝高速改扩建工程等黄土隧道的围岩压力测试数据进行文献调研^[23-25],获取了9条线路共计52个黄土隧道监测断面围岩压力样本数据,具体包括了两车道公路隧道、三车道公路隧道和高速铁路隧道。



图2 压力盒现场埋设情况

Fig. 2 Site installation of pressure box

选取拱部围岩压力最终稳定值，与隧规公式、太沙基公式以及普氏公式等围岩压力公式计算值进行对比，求得实测值与计算值的相对误差，为避免奇异值对围岩压力相对误差分析的干扰，利用统计学中格拉布斯检验法对表中相对误差结果进行修正，将现场竖向实测围岩压力、围岩压力计算值与相对误差的最大值与最小值进行列表，结果如表 1 所示。

由表 1 可知，不同围岩压力计算方法的计算值差异较大。对比计算值和实测值可以发现，围岩压力计算值大于现场实测值。由相对误差可知，隧规公式、太沙基公式、普氏公式、比尔鲍曼公式和全土柱公式的计算值与实测值的相对误差范围分别为 0.01~3.47、0.02~6.95，0.02~5.49，0.02~10.06，0.16~11.57，平均值分别为 0.74，1.79，1.63，3.38，5.16。根据相对误差分析结果，隧规公式计算值最接近现场实测值，太沙基公式和普氏公式计算值较为接近，比尔鲍曼公式和全土柱公式计算值远大于实测值。

综上可知，常用围岩压力公式计算值与现场实测值存在较大差异，这是由于围岩压力计算公式以松动理论为基础，认为隧道主要承受松动压力，但是当前隧道工程主要采用新奥法设计与施工，大量的工程实践表明，及时施作的初期支护有效控制了围岩变形，抑制了围岩松动区的产生，作用在支护结构上的压力主要为形变压力^[10]。因此，现有围岩压力计算方法不能真实反映黄土隧道的荷载情况。

2 围岩压力影响因子分析

2.1 常用围岩压力计算方法中影响因子统计分析

对国内外常用的 12 种隧道围岩压力计算方法进行汇总，统计围岩压力计算公式涉及的影响因子、计算形式、适用条件以及围岩压力类型，统计结果如表 2 所示^[26-29]。

由表 2 可知，围岩压力计算方法的影响因子包括围岩重度 γ 、黏聚力 c 、内摩擦角 φ 等围岩参数，以及隧道跨度 B 、埋深 H 、开挖高度 H_t 等隧道结构参数，计算形式包括理论解析、经验公式以及理论与经验结合的 3 种形式，适用条件包括仅适用于深埋、仅适用于浅埋和同时适用于深浅埋的 3 种不同条件，围岩压力类型有松动压力和形变压力两种类型。通过上述分析不难看出，由于隧道结构设计与施工的复杂性，目前国内外对于围岩压力计算方法中的影响因子尚没有形成统一认知。

2.2 影响因子确定

通过围岩压力计算方法中影响因子分析可知，围岩压力的大小受诸多因素影响，归纳可以分为两大类：地质因素，包括围岩级别 S 、围岩重度 γ 、围岩黏聚力 c 、围岩内摩擦角 φ 、初始地应力 P_0 及反映围岩质量综合指标的 Q 值、RMR 值等；工程因素，包括隧道埋深 H 、跨度 B 、开挖高度 H_t 、支护强度和施工方法等。

表 1 围岩压力计算值与实测值对比

Table 1 Comparison between monitoring and calculated values of pressure of surrounding rock											单位: MPa	
线路名称	监测断面数量	实测竖向围岩压力	隧规公式		太沙基公式		普氏公式		比尔鲍曼公式		全土柱公式	
			计算值	相对误差	计算值	相对误差	计算值	相对误差	计算值	相对误差	计算值	相对误差
吴子高速	11 个	0.045	0.105	0.06	0.098	0.02	0.228	0.02	0.119	0.02	0.135	0.16
		0.493	0.275	0.98	0.317	3.47	0.253	4.53	0.484	4.98	0.735	6.02
神府高速	3 个	0.021	0.216	—	0.175	5.06	0.324	—	0.199	6.63	0.216	8.12
		0.051	0.350	—	0.322	6.95	0.331	5.49	0.411	8.05	0.465	8.82
哈尔滨绕城高速	4 个	0.091	0.367	1.31	0.090	0.13	0.202	0.27	0.423	1.66	0.499	2.14
		0.159	0.417	2.53	0.328	2.47	0.336	2.69	0.451	3.96	0.588	5.03
隰吉高速	3 个	0.026	0.046	0.11	0.350	1.02	0.156	0.16	0.575	2.11	0.888	—
		0.189	0.059	0.81	0.451	5.83	0.182	5.03	0.665	9.08	1.824	3.70
大西高铁	2 个	0.030	—	1.16	0.208	2.35	0.241	2.89	0.686	10.06	1.309	—
		0.062	0.134	3.47	—	5.93	—	—	—	—	—	—
黄延扩能高速	2 个	0.015	0.406	—	0.386	5.13	0.338	4.37	0.519	7.24	0.668	9.60
		0.063	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
西宝高速	5 个	0.094	0.316	0.01	0.449	0.58	0.201	0.05	0.608	1.17	0.808	1.96
		0.320	0.479	2.36	0.570	4.65	0.21	1.15	0.808	7.02	1.477	11.57
郑西高铁	19 个	0.055	0.117	0.02	0.147	0.08	0.204	0.11	0.146	0.51	0.155	0.60
		0.247	0.309	2.59	0.453	3.63	0.4	5.15	0.789	8.96	1.995	8.89
宝兰客专	3 个	0.061	0.135	0.07	0.302	0.24	—	—	0.368	0.88	1.393	2.72
		0.395	0.138	1.21	0.533	3.95	—	—	0.826	5.03	1.470	8.41

表 2 国内外隧道围岩压力计算方法
Table 2 Existing methods for pressure of surrounding rock of tunnel

序号	计算方法	影响因子	计算形式	适用条件	围岩压力类型
1	公路/铁路隧规	γ, B, S, H_t	理论与经验结合	深埋, 浅埋	松动压力
2	水工隧规	γ, B, H_t	经验公式	深埋, 浅埋	
3	全土柱理论公式	γ, H	理论解析	浅埋	
4	普氏理论公式	$\gamma, B, H_t, \varphi_0$	理论解析	深埋	
5	比尔鲍曼公式	$\gamma, B, H_t, H, \varphi$	理论解析	深埋	
6	太沙基理论公式	$\gamma, B, H_t, H, \varphi_0, \lambda$	理论解析	深埋, 浅埋	
7	卡柯公式	$r, c, \varphi, R_p, \gamma$	理论解析	深埋, 浅埋	
8	芬纳公式	r, c, φ, P_0, R_p	理论解析	深埋, 浅埋	形变压力
9	卡斯特纳公式	r, c, φ, P_0, R_p	理论解析	深埋, 浅埋	
10	Barton Q 值法	Q, J_r	经验公式	深埋, 浅埋	
11	RMR 值法	RMR, H, B	经验公式	深埋	
12	综合经验公式	N_0, K_D, γ	理论解析	深埋	

注: 表中 γ 为围岩重度, B 为隧道跨度, S 为围岩级别, H_t 为隧道开挖高度, φ_0 为围岩计算摩擦角, H 为隧道埋深, λ 为侧压力系数, r 为隧道半径, c 为围岩黏聚力, φ 为围岩内摩擦角, P_0 为初始地应力, R_p 为围岩塑性区半径, Q 、RMR 为围岩综合指标, J_r 为节理粗糙度系数, N_0 为围岩压力基本值, K_D 跨度修正系数。

(1) 地质因素

围岩压力的大小与围岩的初始应力状态、结构特征及物理、力学性质有着密切关系。土体中的破碎带、节理裂隙的发育和胶结程度、层理面的走向都影响着围岩压力。一般来说, 构造单一、弱面结合良好、结构密实、强度高的土体, 围岩压力就小, 反之就大^[30]。

(2) 工程因素

隧道跨度 B 与开挖高度 H_t 是影响围岩压力大小的重要因素, 不同形状隧道的围岩压力特征不同, 圆形断面的围岩压力相对均匀, 支护结构力学响应最佳。隧道开挖断面的大小直接影响围岩扰动范围和扰动深度。隧道埋深 H 的影响表现在围岩的初始应力状态与深度有关, 导致作用在支护结构上的荷载形式不同。实际工程中, 支护强度和施工方法对围岩压力的影响较大。但是受地层条件和人为主观性影响, 很难将支护强度和施工方法纳入围岩压力计算中。

综上, 围岩压力计算方法考虑的影响因子主要为围岩质量 (围岩级别 S 、黏聚力 c 、内摩擦角 φ 等)、隧道埋深 H 、跨度 B 和开挖高度 H_t 。国内对于围岩质量的描述主要采用围岩分级体系的指标围岩级别 S , 因此, 分析 S, H, B 和 H_t 4 种影响因子对黄土隧道围岩压力的影响。

3 样本数据分析

3.1 样本统计分析

根据现场测试的围岩压力样本数据, 按照围岩级别 S 、隧道埋深 H 、跨度 B 和开挖高度 H_t 分别统计, 分析样本特征, 具体数据如图 3~6 所示。

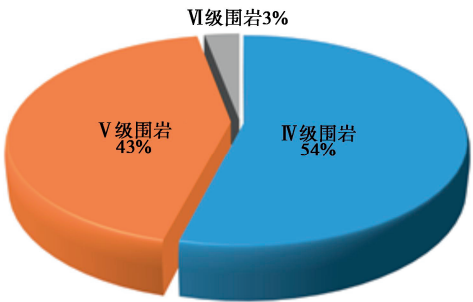


图 3 围岩级别占比
Fig. 3 Percentages of grades of surrounding rock

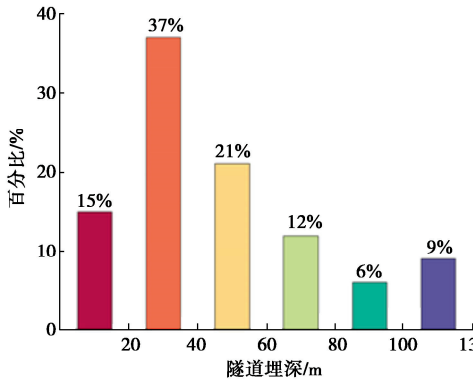


图 4 隧道埋深占比
Fig. 4 Percentages of tunnel depth

由图 3~6 可知: 样本数据中主要为 IV 级、V 级围岩, IV 级围岩样本占比为 54%, V 级围岩样本占比为 43%, VI 级围岩样本占比最小, 仅为 3%; 按照《公路隧道施工技术规范》中对隧道跨度的分类标准^[31], 一般跨度隧道样本占比为 41%, 中等跨度隧道样本占比为 59%, 其中 14~15 m 样本占比为 33%; 黄土隧

道埋深主要集中在 0~60 m, 占比为 73%, 其中, 隧道埋深在 20~40 m 和 40~60 m 的样本占比分别为 37%, 21%, 隧道埋深在 60~80 m 的样本占比为 12%, 其余埋深范围的样本量接近; 黄土隧道开挖高度主要为 13~14 m, 样本占比为 36%, 其次为 9~10 m, 占比为 21%, 其余高度范围的样本量接近。

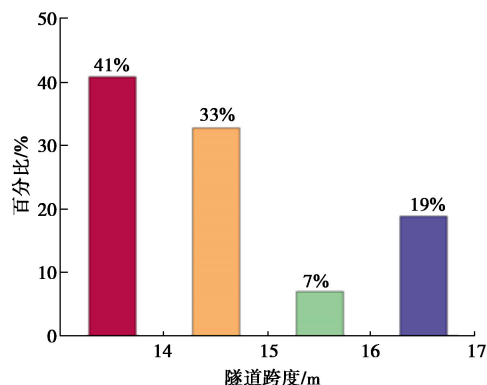


图 5 隧道跨度占比

Fig. 5 Percentages of tunnel span

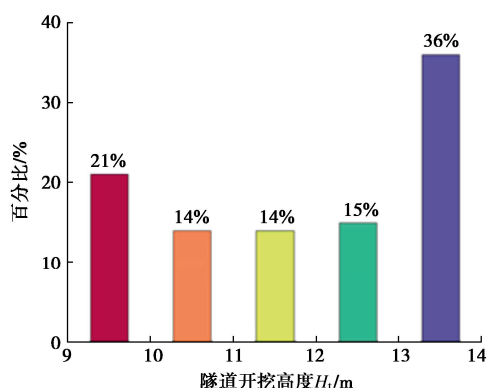


图 6 隧道开挖高度占比

Fig. 6 Percentages of excavation height

3.2 数据处理方法

将现场测试的围岩压力样本数据按照等效原则分解为竖向和水平均布荷载进行计算, 并按均布等效荷载模式进行分布, 如图 7 所示。其中 $\sigma_1 \sim \sigma_7$ 为实测径向围岩压力值, θ 为径向荷载方向与竖向的夹角, B 为隧道跨度, H_t 为隧道开挖高度, q 为竖向围岩压力, e 为水平围岩压力。

根据力学分析可得, 竖向围岩压力为

$$q = \frac{x_1 \alpha_1 + x_2 \alpha_2 + x_3 \alpha_3}{2B} \quad (1)$$

式中: $\alpha_1 = 2\sigma_1 + \sigma_2 \cos\theta_1 + \sigma_3 \cos\theta_1$, $\alpha_2 = \sigma_2 \cos\theta_1 + \sigma_3 \cos\theta_1 + \sigma_4 \cos\theta_2 + \sigma_5 \cos\theta_2$, $\alpha_3 = \sigma_4 \cos\theta_2 + \sigma_5 \cos\theta_2$ 。

水平围岩压力为

$$e = \frac{y_1 \beta_1 + y_2 \beta_2 + y_3 \beta_3 + y_4 \beta_4}{4H_t} \quad (2)$$

式中: $\beta_1 = \sigma_2 \sin\theta_1 + \sigma_3 \sin\theta_1$, $\beta_2 = \sigma_2 \sin\theta_1 + \sigma_3 \sin\theta_1 + \sigma_4 \sin\theta_2 + \sigma_5 \sin\theta_2$, $\beta_3 = \sigma_4 \sin\theta_2 + \sigma_5 \sin\theta_2 + \sigma_6 + \sigma_7$, $\beta_4 =$

$\sigma_6 + \sigma_7$ 。

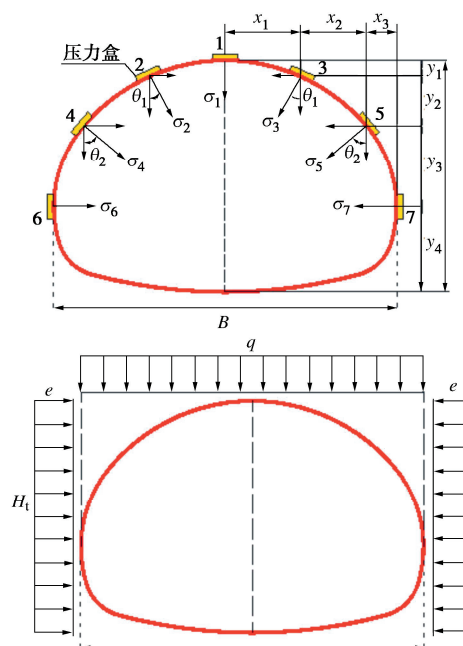


图 7 围岩压力测点布置及荷载模式分布

Fig. 7 Arrangement of measuring points for pressure of surrounding rock and distribution of loading mode

3.3 单影响因子敏感性分析

由样本数据可知, 黄土隧道围岩级别主要为 IV 级和 V 级, VI 级围岩数据较少, 本文只对 IV 级和 V 级围岩进行分析。

(1) 隧道埋深 H

为了分析隧道埋深对围岩压力的影响, 按照不同的区间对埋深 H 进行划分, 将隧道埋深的负倒数 $-1/H$ 作为横坐标, 样本数据中不同区间内的竖向围岩压力 q 的平均值作为纵坐标进行曲线拟合, 拟合函数如图 8, 9 所示, 拟合函数如表 3 所示。

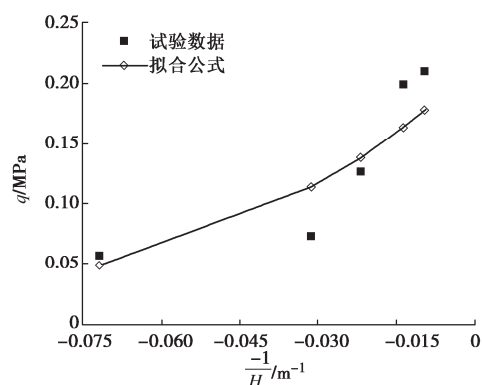


图 8 竖向围岩压力变化曲线 (指数函数)

Fig. 8 Curve of vertical pressure of surrounding rock with depth (exponential function)

由图 8, 9 和表 3 可知, 黄土隧道围岩压力与隧道埋深负倒数呈两种递增函数关系, 分别为指数函数和

多项式函数, 相关系数分别为 0.99, 0.98。

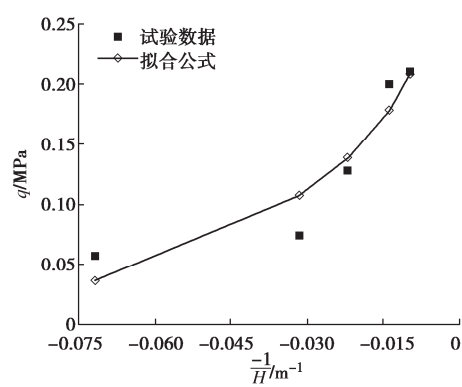


图 9 竖向围岩压力变化曲线 (多项式函数)

Fig. 9 Curve of vertical pressure of surrounding rock with depth (polynomial function)

表 3 竖向围岩压力随埋深拟合公式

Table 3 Fitting formulae for vertical pressure of surrounding rock with depth

拟合函数	拟合公式	相关系数
指数函数	$q=0.2192e^{-20.776/H}$	0.99
多项式函数	$q=98.746/H^2+10.697H+0.3159$	0.98

(2) 围岩级别 S

为消除埋深 H 对围岩压力的影响, 取竖向围岩压力 q 与埋深 H 的比值 q/H 进行分析, 不同围岩级别黄土隧道围岩压力分布如图 10 所示。

由图 10 可知, IV 级围岩 q/H 值小于 3 的占比为 85.1%, V 级围岩占比为 72.7%; IV 级围岩最大值为 4.96, V 级围岩为 7.25, 最大值相差 1.46 倍; IV 级围岩 q/H 平均值为 1.67, V 级围岩为 2.29, 平均值相差 1.37 倍。由此可知, 围岩级别 S 对黄土隧道围岩压力的影响明显。

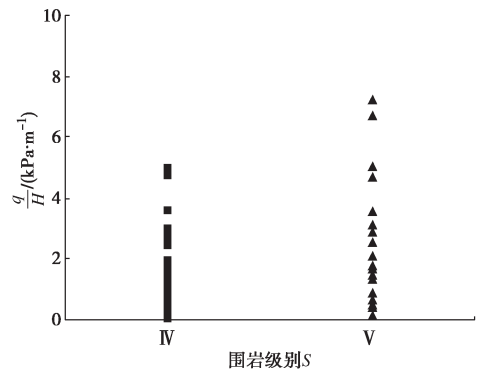


图 10 q/H 与围岩级别关系

Fig.10 Relationship between q/H and rock grades

(3) 隧道跨度 B

为了分析隧道跨度对围岩压力的影响, 将小于 13 m、13~15 m、15~17 m 和大于 17 m 等 4 个区间的跨度 B 作为横坐标, 样本数据中不同区间内的竖向围岩压力 q 的平均值作为纵坐标进行曲线拟合, 拟合曲

线如图 11, 12 所示, 拟合函数如表 4 所示。

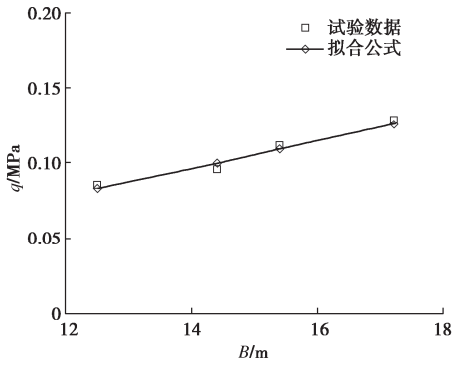


图 11 竖向围岩压力随跨度变化曲线 (幂函数)

Fig. 11 Curve of vertical pressure of surrounding rock with span (power function)

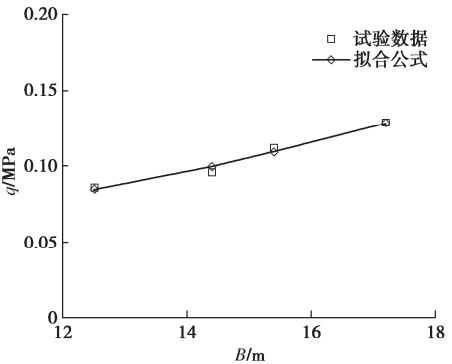


图 12 竖向围岩压力随跨度变化曲线 (指数函数)

Fig. 12 Curve of vertical pressure of surrounding rock with span (exponential function)

表 4 竖向围岩压力随跨度拟合公式

Table 4 Fitting formulae for vertical pressure of surrounding rock with span

拟合函数	拟合公式	相关系数
幂函数	$q=0.0031B^{1.303}$	0.96
指数函数	$q=0.0278e^{0.089B}$	0.97

由图 11, 12 和表 4 可知, 黄土隧道竖向围岩压力与跨度呈两种递增函数关系, 分别为幂函数和指数函数, 相关系数分别为 0.96, 0.97。

(4) 隧道开挖高度 H_t

为了分析隧道开挖高度对围岩压力的影响, 通过将隧道开挖高度 H_t 与跨度 B 的比值 H_t/B 作为横坐标, 按照小于 0.75, 0.75~0.80, 0.80~0.85, 大于 0.85 等 4 个区间对开挖高跨比进行划分, 样本数据中不同区间内的竖向围岩压力 q 的平均值作为纵坐标进行曲线拟合, 拟合曲线如图 13, 14 所示, 拟合函数如表 5 所示。

由图 13, 14 和表 5 可知, 黄土隧道竖向围岩压力与隧道开挖高跨比呈两种递增函数关系, 分别为指数函数和线性函数, 相关系数分别为 0.83, 0.85。

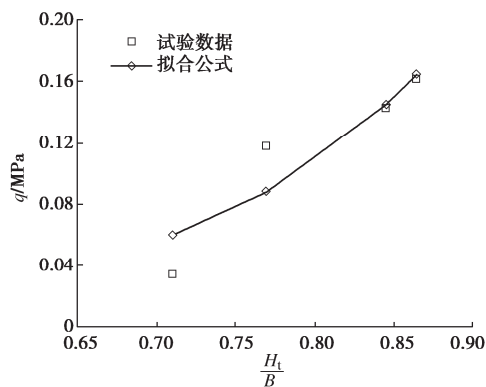


图 13 竖向围岩压力随开挖高跨比变化曲线（指数函数）
Fig. 13 Curve of vertical pressure of surrounding rock with height-span ratio of excavation (exponential function)

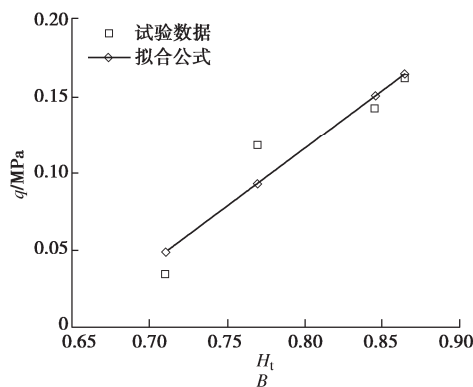


图 14 竖向围岩压力随开挖高跨比变化曲线（线性函数）
Fig. 14 Curve of vertical pressure of surrounding rock with height-span ratio of excavation (linear function)

表 5 竖向围岩压力随开挖高跨比拟合公式

Table 5 Fitting formulae for vertical pressure of surrounding rock with height-span ratio of excavation		
拟合函数	拟合公式	相关系数
指数函数	$q=5.7\times10^{-4}e^{6.56H_t/B}$	0.83

4 围岩压力计算公式

4.1 计算公式

基于围岩压力单影响因子的敏感性分析结果及拟合函数表达式,构造黄土隧道围岩形变压力计算公式。由于围岩压力与初始地应力有关^[30],因此,在构

造计算公式的过程中,参考太沙基公式和隧规浅埋围岩压力计算公式的形式,构造了 4 种黄土隧道围岩压力计算公式。根据黄土隧道围岩压力现场测试数据,采用样本包络度法结合试算法确定计算公式中的系数。结果如表 6 所示。

由表 6 可知,Ⅳ级围岩压力计算公式中,式①,④样本值和计算值的比值 0~1 区间内的比例为 96%,大于 1 的则有 4%,说明公式计算值可以较好包络样本值,式②,③的样本值与计算值的比值全部小于 1,说明公式计算值可以完全包络样本值;由比值的平均值可知,式①比值的平均值为 0.17,说明计算值的平均值远大于样本值平均值,式③,④比值的平均值分别为 0.33, 0.38, 相差不大;同理分析Ⅴ级围岩压力计算公式,式③可以较好包络样本值,并且计算值更接近样本值。

综上分析,选取表 6 中式③作为黄土隧道竖向围岩压力计算公式,并对系数 α 进行转化,如下:

$$q=\gamma H(1-e^{-0.76\times1.35^{S-4}\times\frac{B}{H_t}\times\frac{B}{H}}) \quad (3)$$

同理,采用相同的分析方法,得到黄土隧道水平围岩压力计算公式:

$$e=\gamma H(1-e^{-0.76\times1.49^{S-4}\times\frac{B}{H_t}\times\frac{B}{H}}) \quad (4)$$

式中: γ 为围岩重度; S 为围岩级别; H 为隧道埋深; B 为跨度; H_t 为开挖高度。

4.2 计算公式对比

采用本文公式和表 2 中的围岩压力计算公式进行样本断面竖向围岩压力计算,对与本文公式计算结果相近的太沙基公式、隧规公式和卡柯公式进行对比,分析不同围岩压力计算方法的计算结果,如图 15 所示。

由图 15 可知,本文公式、太沙基公式、隧规公式和卡柯公式分别有 1, 1, 7, 和 17 组数据位于 $y=x$ 分界线上方,则 4 种计算方法对样本值的包络度分别为 98%, 98%, 85%, 60%,表明本文公式和太沙基公式可以较好的包络样本值。由包络度较好的本文公式计算结果与太沙基公式计算结果的分布情况可知,本文公式计算结果更接近于样本值。

表 6 黄土隧道围岩压力计算值与样本值对比

Table 6 Comparison between calculated and sample values of deformation pressure of surrounding rock of loess tunnels								
序号	公式	样本值/计算值 (Ⅳ级围岩)			样本值/计算值 (Ⅴ级围岩)			
		系数 α	<1	>1	平均值	系数 α	<1	>1
①	$q=\gamma H(1-e^{-\alpha\times(\frac{B}{H_t}\times\frac{B}{H})})$		96%	4%	0.17		100%	0
②	$q=\frac{b\gamma-c}{\lambda\tan\varphi}(1-e^{-\alpha\times(\frac{B}{H_t}\times\frac{B}{H})})$		100%	0	0.19		90%	10%
③	$q=\gamma H(1-e^{-\alpha\times\frac{B}{H_t}\times\frac{B}{H}})$	0.76	100%	0	0.33	1.026	96%	4%
④	$q=\frac{b\gamma-c}{\lambda\tan\varphi}(1-e^{-\alpha\times\frac{B}{H_t}\times\frac{B}{H}})$		96%	4%	0.38		56%	44%

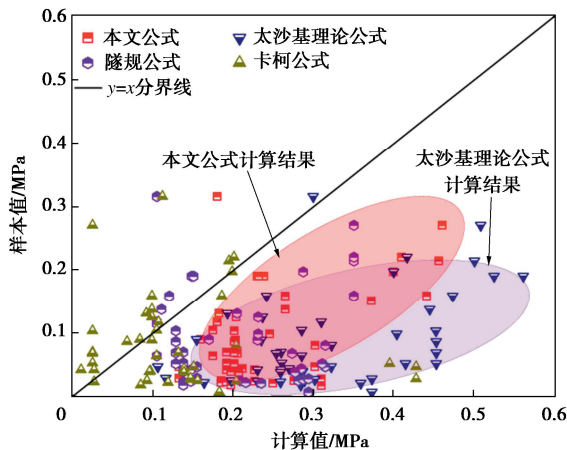


图 15 计算值与样本值对比

Fig. 15 Comparison between calculated and sample values

5 结 论

(1) 黄土隧道围岩压力主要为形变压力, 目前常用的基于松动理论的围岩压力计算方法不能真实反映黄土隧道的荷载情况。

(2) 影响因子敏感性分析结果表明, 黄土隧道围岩压力受围岩级别影响明显, 与隧道埋深、跨度和道开挖高跨比有较好的指数函数关系。

(3) 采用多因子耦合回归分析方法构造了 4 种黄土隧道围岩压力计算公式, 基于黄土隧道围岩压力现场测试数据, 采用样本包络度法结合试算法确定计算公式中的系数, 得到了黄土隧道竖向围岩压力计算公:

$$q = \gamma H (1 - e^{-0.76 \times 1.35^{5-4} \times \frac{B}{H_1} \times \frac{B}{H}})$$

(4) 通过样本值与本文公式、太沙基公式、隧规公式以及卡柯公式的计算结果对比可知, 本文提出的计算方法对于黄土隧道围岩压力现场实测结果具有较好的包络度, 且计算结果更接近于现场实测值。

参考文献:

[1] 陈建勋, 罗彦斌, 陈丽俊. 改写黄土隧道建设的历史[J]. 中国公路, 2019(11): 30-35. (CHEN Jianxun, LUO Yanbin, CHEN Lijun. Rewriting the history of loess tunnel construction[J]. China Highway, 2019(11): 30-35. (in Chinese))

[2] 王梦恕. 地下工程浅埋暗挖技术通论[M]. 合肥: 安徽教育出版社, 2005. (WANG Mengshu. General Discussion on Shallow Buried and Underground Excavation Technology in Underground Engineering[M]. Hefei: Anhui Education Press, 2005. (in Chinese))

[3] 关宝树. 隧道工程设计要点集[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003. (GUAN Baoshu. Key Points of Tunnel Engineering

Design[M]. Beijing: China Communications Press, 2003. (in Chinese))

[4] 谷兆祺, 彭守拙, 李仲奎. 地下洞室工程[M]. 北京: 清华大学出版社, 1994. (GU Zhaoqi. Underground Cavern Engineering[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1994. (in Chinese))

[5] KIM H J. Estimation for Tunnel Lining Loads[D]. Canada: University of Alberta, 1997.

[6] TERZAGHI K. Theoretical Soil Mechanics[M]. J Wiley and Sons, inc., 1943: 195-202.

[7] 铁路隧道设计规范: TB 10003—2016[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2017. (Code for Design of Railway Tunnel: TB 10003—2016[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2017. (in Chinese))

[8] 公路隧道设计规范: JTG 3370.1—2018[S]. 北京: 人民交通出版社, 2018. (Code for Design of Highway Tunnels: JTG 3370.1—2018[S]. Beijing: China Communications Press, 2018. (in Chinese))

[9] 谢家杰. 浅埋隧道的地层压力[J]. 土木工程学报, 1964(6): 58-70. (XIE Jiaxiao. Formation pressure of shallow tunnel[J]. China Civil Engineering Journal, 1964(6): 58-70. (in Chinese))

[10] 方正昌. 黄土洞室地层压力的统计分析[J]. 岩土工程学报, 1981, 3(1): 28-35. (FANG Zhengchang. Statistical analysis of earth pressure on tunnel in loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1981, 3(1): 28-35. (in Chinese))

[11] 王明年, 王志龙, 张 霄, 等. 深埋隧道围岩压力计算方法研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(1): 81-90. (WANG Mingnian, WANG Zhilong, ZHANG Xiao, et al. Method for calculating deformation pressure of surrounding rock of deep-buried tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(1): 81-90. (in Chinese))

[12] 刘学增, 叶 康. 山岭公路隧道围岩压力统计规律分析[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(6): 890-895. (LIU Xuezheng, YE Kang. Statistical analysis of surrounding rock pressure of mountain road tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(6): 890-895. (in Chinese))

[13] 李鹏飞, 赵 勇, 张顶立, 等. 基于现场实测数据统计的隧道围岩压力分布规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(7): 1392-1399. (LI Pengfei, ZHAO Yong, ZHANG Dingli, et al. Study of distribution laws of tunnel surrounding rock pressure based on field measured data statistics[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(7): 1392-1399. (in Chinese))

[14] 李鹏飞, 周 烨, 伍 冬. 隧道围岩压力计算方法及其适用范围[J]. 中国铁道科学, 2013, 34(6): 55-60. (LI Pengfei, ZHOU Ye, WU Dong. Calculation methods for surrounding

- rock pressure and application scopes[J]. China Railway Science, 2013, **34**(6): 55-60. (in Chinese))
- [15] 陈建勋, 姜久纯, 罗彦斌, 等. 黄土隧道洞口段支护结构的力学特性分析[J]. 中国公路学报, 2008, **21**(5): 75-80. (CHEN Jianxun, JIANG Jiuchun, LUO Yanbin, et al. Mechanics characteristic analysis of support structure of loess tunnel entrance[J]. China Journal of Highway and Transport, 2008, **21**(5): 75-80. (in Chinese))
- [16] LUO Y B, CHEN J X, SHI Z, et al. Mechanical characteristics of primary support of large span loess highway tunnel: a case study in Shaanxi Province, Loess Plateau, NW China primary[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2020, **104**: 103532.
- [17] LUO Y B, CHEN J X, GAO S T, et al. Stability analysis of super-large-section tunnel in loess ground considering water infiltration caused by irrigation[J]. Environment Earth Science, 2020, **76**(22): 763.
- [18] 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))
- [19] 赵勇, 李国良, 喻渝. 黄土隧道工程[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2011. (ZHAO Yong, LI Guoliang, YU Yu. Loess Tunnel Engineering[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2011. (in Chinese))
- [20] 韩兴博, 叶飞, 冯浩岚, 等. 深埋黄土盾构隧道围岩压力解析[J]. 岩土工程学报, 2021, **43**(7): 1271-1278, 后插5. (HAN Xingbo, YE Fei, FENG Haolan, et al. Pressure of surrounding rock of deep-buried loess shield tunnel[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, **43**(7): 1271-1278, 后插5. (in Chinese))
- [21] 朱汉华, 周小涵, 王葵, 等. 隧道围岩与支护结构变形协调控制机理及工程应用[J]. 地下空间与工程学报, 2023, **19**(1): 79-86, 94. (ZHU Hanhua, ZHOU Xiaohan, WANG Yan, et al. Investigation on control mechanism of balanced and coordinated deformation of tunnel surrounding rock and application in engineering[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2023, **19**(1): 79-86, 94. (in Chinese))
- [22] 孙钧. 岩石流变力学及其工程应用研究的若干进展[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, **26**(6): 1081-1106. (SUN Jun. Rock rheological mechanics and its advance in engineering applications[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, **26**(6): 1081-1106. (in Chinese))
- [23] 张爱军, 白明洲, 许兆义, 等. 郑西客运专线铁路张茅隧道近饱和黄土体初期支护应力变形特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, **30**(增刊2): 3714-3720. (ZHANG Aijun, BAI Mingzhou, XU Zhaoyi, et al. Study of stress and deformation characteristics of Zhangmao nearly saturated loess tunnel initial support of Zhengzhou—Xi'an passenger railway[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, **30**(S2): 3714-3720. (in Chinese))
- [24] 谭忠盛, 喻渝, 王明年, 等. 大断面黄土隧道中型钢与格栅适应性的对比试验[J]. 岩土工程学报, 2009, **31**(4): 628-633. (TAN Zhongsheng, YU Yu, WANG Mingnian, et al. Comparative tests on section steel and steel grid for loess tunnels with large section[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, **31**(4): 628-633. (in Chinese))
- [25] 杨建民, 喻渝, 谭忠盛, 等. 大断面深浅埋黄土隧道围岩压力试验研究[J]. 铁道工程学报, 2009, **125**(2): 76-79. (YANG Jianmin, YU Yu, TAN Zhongsheng, et al. Experimental research on the surrounding rock pressure of large sectional loess tunnel under deep and shallow submersion[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2009, **125**(2): 76-79. (in Chinese))
- [26] 水工隧洞设计规范: NB/T 10391—2020[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2020. (Code for Design of Hydraulic Tunnel: NB/T 10391—2020[S]. Beijing: China Water & Power Press, 2020. (in Chinese))
- [27] 重庆建筑工程学院. 岩石地下建筑结构[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1982. (Chongqing College of Construction Engineering. Rock Underground Building Structures[M]. Beijing: China Construction Industry Press, 1982. (in Chinese))
- [28] JIANG Y, YONEDA H, TANABASHI Y. Theoretical Estimation of loosening pressure on tunnels in soft rocks[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2001(16): 99-105.
- [29] BHAWNI Singh, GOEL R K, JETHWA J L. Support pressure assessment in arched underground openings through poor rock masses[J]. Engineering Geology, 1997(48): 59-81.
- [30] 刘祖典. 黄土力学与工程[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1997. (LIU Zudian. Loess Mechanics and Engineering[M]. Xi'an: Shaanxi Science & Technology Press, 1997. (in Chinese))
- [31] 公路隧道施工技术规范: JTG/T 3660—2020[S]. 北京: 人民交通出版社, 2020. (Technical Specifications for Construction of Highway Tunnel: JTG/T 3660—2020[S]. Beijing: China Communications Press, 2020. (in Chinese))