

DOI: 10.11779/CJGE202001009

深埋隧道围岩形变压力计算方法研究

王明年^{1,2}, 王志龙^{1,2}, 张霄^{1,2}, 赵思光^{1,2}, 刘大刚^{1,2}, 童建军^{*1,3}

(1. 西南交通大学隧道工程教育部重点实验室, 四川 成都 610031; 2. 西南交通大学土木工程学院, 四川 成都 610031;

3. 西南交通大学峨眉校区土木工程系, 四川 峨眉山 614202)

摘要: 通过大量的深埋隧道围岩形变压力现场实测数据, 采用数理统计方法, 分析了围岩级别、隧道跨度、隧道埋深对围岩形变压力的影响及其变化规律。通过多元非线性回归分析方法, 推导建立了竖向形变压力计算公式。通过分析可知, 形变压力约为《铁路隧道设计规范》计算荷载的 84%~92%, 且围岩级别越高两者比值越小。形变压力侧压力系数近似服从正态分布, 与《铁路隧道设计规范》中侧压力系数相比, 各围岩条件下侧压力系数均有一定的增大。研究成果对我国隧道及地下工程支护结构设计具有一定的参考指导作用。

关键词: 深埋隧道; 现场实测; 形变压力; 隧道埋深; 隧道跨度; 围岩级别

中图分类号: TU456; U25

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2020)01-0081-10

作者简介: 王明年(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事地下工程方面的教学与科研工作。E-mail: wangmingnian@swjtu.edu.cn。

Method for calculating deformation pressure of surrounding rock of deep-buried tunnels

WANG Ming-nian^{1,2}, WANG Zhi-long^{1,2}, ZHANG Xiao^{1,2}, ZHAO Si-guang^{1,2}, LIU Da-gang^{1,2}, TONG Jian-jun^{1,3}

(1. Key Laboratory of Transportation Tunnel Engineering, Ministry of Education, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 3. Department of Civil Engineering, Emei Branch,

Southwest Jiaotong University, E'meishan 614202, China)

Abstract: The pressure of surrounding rock is an important research content of tunnel engineering, and it includes deformation pressure. The study on the deformation pressure is of great significance to ensure the safety and economic construction of tunnels and underground engineering. The method of mathematical statistics is used to analyze the influence degrees and variation laws of grade of surrounding rock, tunnel span and tunnel depth on the deformation pressure through a large number of filed measured data. The formula for calculating the vertical deformation pressure is established by using the multivariate nonlinear regression analysis method. The deformation pressure is about 84%~92% times the value by the "Code for design of railway Tunnels" according to the analysis. As the grade of the surrounding rock increases, the ratio decreases continuously. The lateral pressure coefficient of deformation loads obeys the normal distribution. The lateral pressure coefficient of each surrounding rock condition has a certain increase compared with that in the "Code for design of railway tunnels". The research achievements have certain reference guidance for the design of tunnels and underground supporting structures in China.

Key words: deep-buried tunnel; field measurement; deformation pressure; tunnel depth; tunnel span; grade of surrounding rock

0 引言

围岩压力是指引起地下开挖空间周围岩体和支护变形或破坏的作用力。它包括由地应力引起的围岩应力以及围岩变形受阻而作用在支护结构上的作用力^[1]。依照其产生作用力的机理不同, 被划分为冲击压力、形变压力、松动压力和膨胀压力 4 种类型, 其中最为重要的是形变压力和松动压力。松动压力即由于开挖而松动或坍塌的岩体以重力的形式直接作用在支护结构上的压力; 形变压力即由于围岩变形受到与之密切

的支护如锚杆支护等的抑制, 而使围岩与支护结构在共同变形过程中, 围岩对支护结构施加的接触压力^[2]。松动压力与形变压力经常是同时出现的, 但是由于支护类型、地质条件、施工方法及水平等的不同常常以某一种围岩压力为主, 如在松散的土层中使用现浇混

基金项目: 国家自然科学基金项目(51878567, 51878568, 51578458); 中国铁路总公司科技研究开发计划课题(2017G007-F, 2017G007-H)

收稿日期: 2019-01-07

*通信作者(E-mail: jjtong@163.com)

凝土衬砌出现回填不密实的情况时,常常以松动压力为主,如果及时做柔性的锚喷支护就会以形变压力为主^[3]。

目前中国铁深埋路隧道支护结构的设计主要采用《铁路隧道设计规范》(TB10003)^[4](以下简称《隧规》)中深埋隧道围岩压力计算方法,该方法综合了基于样本统计及围岩分级经验公式的优点,物理概念明确,便于工程技术人员应用^[5],是基于塌方统计资料建立起来的松动压力经验公式。近年来,随着中国隧道施工水平的日渐提高,长大隧道数量日渐增多,塌方事故越来越少,且目前中国较多的隧道已从人工小机械时代逐渐过渡到标准机械化施工,施工水平施工大大提高,初期支护封闭及时、回填注浆密实,支护结构的安全性得到了保证,极大地提升了围岩自承能力,支护结构所受压力为形变压力。因此,采用《隧规》中松动压力计算方法进行中国隧道支护结构的设计,难免会造成安全储备较大,资源浪费等现象^[6]。因此,结合目前中国隧道的施工技术,为实现中国隧道修建的安全性及经济性,需要开展形变压力计算方法来指导隧道的修建。

现阶段形变压力的确定有较多的方法,如理论计算方法、数值模拟法、实时监测法等。理论计算方法主要有基于 Mohr-Coulomb 屈服准则的芬纳(Fenner)公式与卡斯特耐尔(Kastner)^[7]公式,但其计算得出的理想弹塑性围岩塑性形变压力与工程实际不相符。曾钱帮等^[8]以广义 Hoek-Brown 经验准则为屈服准则推导了深埋圆形洞室理想弹塑性围岩的塑性形变压力闭合解。随后较多学者采用不同的岩体本构关系^[9]和强度准则^[10-12]对脆性和应变软化围岩弹塑性应力场和位移进行了深入的研究,但其成果未得到进一步的应用推广。《公路隧道设计规范》^[13]中深埋隧道 I—IV 级围岩的形变压力主要采用数值计算方法,同时也给

出了释放荷载的计算方法。但对于受力状态无法采用解析方法求出,边界条件较为复杂,没有长期经验积累的工程来说具有一定的适用性,但其准确性难以保证。伍冬^[14]、刘学增等^[15]对现场实测形变压力数据进行了分析,并对其影响因素进行了研究,相关研究成果对于工程的建设具有重要参考意义,但未给出一种定量的形变压力计算方法来指导实际工程。

本文基于国内大量形变压力现场监测数据,考虑围岩级别、隧道埋深、隧道跨度因素,通过多元非线性回归分析方法,推导建立了一种深埋隧道形变压力的计算方法。研究成果可为隧道及地下工程支护设计提供参考。

1 隧道围岩稳定性分析

1.1 围岩失稳破坏过程分析

隧道开挖前,地下岩体在特定地应力场中处于三轴压力的平衡状态,隧道一旦开挖,这个平衡系统就会被破坏,围岩应力会重新调整。洞周围岩应力的重新调整导致围岩出现了4个区,自空区向外依次为塑性流动区、塑性软化区、塑性硬化区、弹性区^[16-17]。弹性区、塑性硬化区、塑性软化区和塑性流动区的力学行为与岩石的全应力-应变曲线中的相应段是对应的,其中弹性区对应于弹性变形阶段,塑性硬化区对应于塑性硬化阶段,塑性软化区对应于岩石的峰后软化阶段,塑性流动区对应于岩石的松动破坏阶段^[18],如图1所示。

1.2 围岩压力类型分析

支护力与围岩所处状态关系密切,且支护力受支护时机、支护刚度等因素的影响,不同的支护力,对应不同的围岩状态,进而形成不同的围岩压力类型。

何满潮等^[18]在假定围岩处于静水压力状态下,大埋深巷道围岩处于各力学分区时,所需支护力进行了

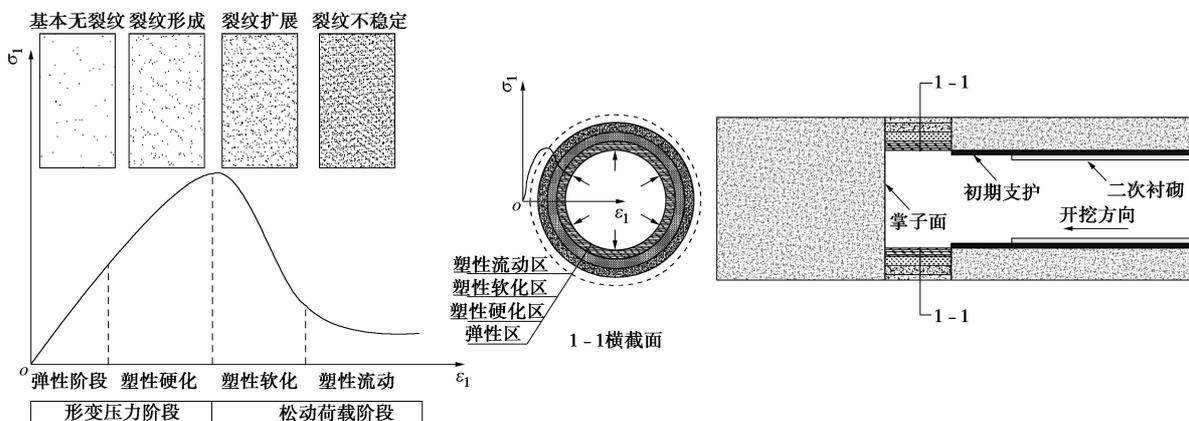


图1 岩石应力-应变曲线及围岩破坏过程

Fig. 1 Stress-strain curve of rock and failure process of surrounding rock

相关研究。

(1) 当巷道只有稳定的弹性区时, 岩石变形满足胡克定律, 其应力 - 应变关系为线性, 这种状态岩石可以自稳, 无需支护, 支护力为

$$P_1 = 0$$

(2) 当巷道有稳定的弹性区和塑性硬化区时, 表明巷道围岩所受的围岩应力增大, 但巷道仍然可以自稳, 无需支护, 支护力为

$$P_2 = 0$$

(3) 当巷道开挖后达到最佳支护时间时, 巷道存在弹性区、塑性硬化区、塑性软化区, 且各区的变形趋于稳定, 不随时间发生变化, 在忽略塑性软化区承载力的条件下支护力为

$$P_3 = \int_0^{V_L} \gamma dV$$

(4) 当巷道开挖后达到最佳支护时间时, 巷道存在弹性区、塑性硬化区、塑性软化区和塑性流动区, 且各区变形随时间发生变化, 所需支护力为

$$P_4 = \int_0^{V_L} \gamma dV + \int_{V_L}^{V_S} \gamma dV + P_0$$

式中 P_0 为维持塑性流动区短期内不再发展的临界支护力 (kPa); P_i 为维持巷道稳定的支护力 (kPa), $i=1, 2, 3, 4$; V_s 为塑性软化区和流动区岩体的体积 (m^3); V_L 为塑性流动区岩体的体积 (m^3)。

根据上述描述可知, 当围岩处于各力学分区时, 所需的支护力不同。那么如果在隧道开挖且及时支护的条件下, 为了保持围岩处于相应的力学分区, 所需支护力恰好与上述分析相反。为保持围岩处于弹性区或弹性区、塑性硬化区, 所需支护力为 P_4 ; 为保持围岩处于弹性区、塑性硬化区、塑性软化区所需支护力为 P_3 ; 如不加以支护, 即当支护力 P_1 、 P_2 为 0 时, 围岩处于弹性区、塑性硬化区、塑性软化区、塑性流动区。

本文将围岩所处力学分区与其所产生的荷载效应结合分析, 将围岩状态分为形变压力围岩状态和松动压力围岩状态。

(1) 形变压力围岩状态

隧道开挖后, 加以支护, 若支护力 P_0 为 P_4 时, 围岩包含单一区域或两类区域, 即围岩处于弹性区或围岩处于弹性区、塑性硬化区, 此时支护结构承受的压力为形变压力, 如图 2 (a), (b) 所示。

(2) 松动压力围岩状态

a) 隧道开挖后, 加以支护, 若支护力 P_0 为 P_3 时, 围岩包含三类区域, 即围岩处于弹性区、塑性硬化区、塑性软化区, 此时支护结构承受的压力为松动压力, 如图 2 (c) 所示。

b) 隧道开挖以后, 加以支护, 若支护力 P_0 为 P_1

(P_2) 时, 围岩包含四类区域, 即围岩处于弹性区、塑性硬化区、塑性软化区、塑性流动区, 此时支护结构承受的压力为松动压力, 如图 2 (d) 所示。

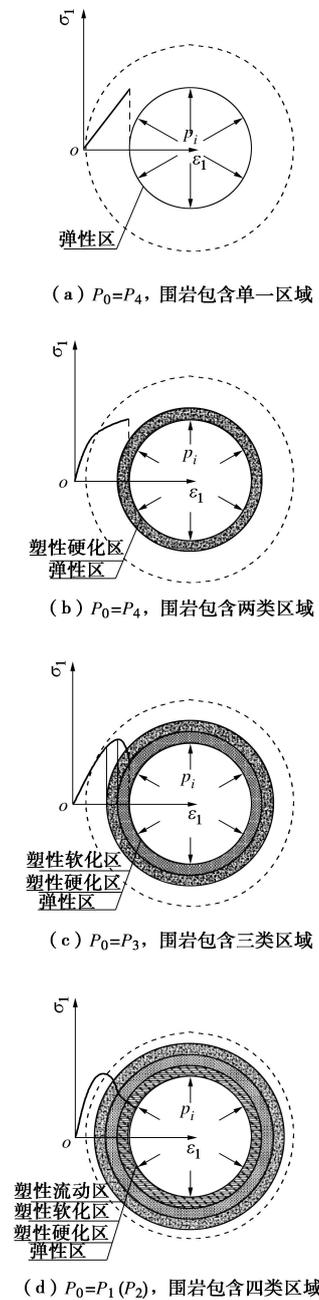


图 2 支护力与围岩特性关系分析图

Fig. 2 Relationship between supporting force and characteristics of surrounding rock

围岩的松弛与施工技术有很大的关系, 现代隧道施工的一个重要发展就是把围岩的破坏控制在最小限度^[1], 即围岩处于变形阶段。目前中国高速铁路隧道采用大型机械化大断面施工, 对隧道围岩扰动小, 且支护及时, 对围岩变形控制较好, 故围岩多数情况下处于形变压力阶段, 支护结构所受荷载为形变压力。

为了证明大型机械化施工隧道支护所受围岩压力为形变压力, 课题组在郑万高铁隧道采用多点位移计,

对IV、V级围岩松动区进行了监测，测点布置如图3所示。

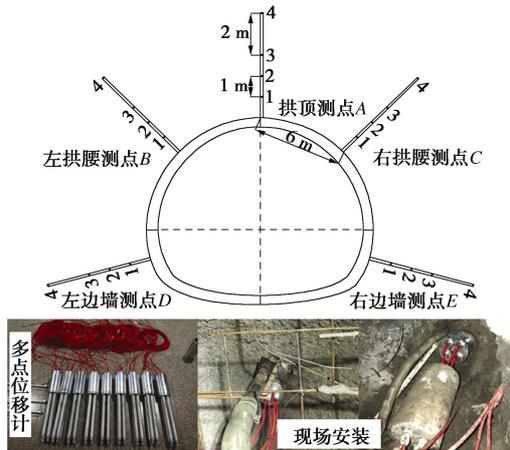


图3 多点位移计布置及现场安装图

Fig. 3 Layout of multi-point displacement meter and field installation

根据围岩松动圈判定方法^[19-21]，对监测数据进行了分析，通过分析发现，所有监测断面均未出现松动现象，而是出现了不同程度的塑性区，但塑性区范围较小，各级围岩塑性区范围包络线如图4所示。

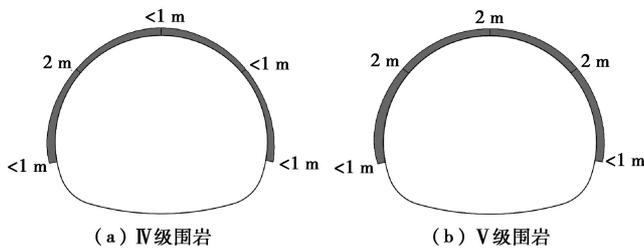


图4 塑性区范围

Fig. 4 Range of plastic zone

由图4可知，IV、V级围岩条件下，围岩塑性区范围小于2m，也就是说浅层围岩^[22]没有出现松动的迹象，不会由于其松动垮落引起深层围岩应力的转移和变形的传递，导致围岩压力的增大^[23]。故有效的支护对围岩变形进行约束，将围岩控制在变形阶段，可有效控制围岩及支护结构的安全性。

2 样本数据采集及特征分析

2.1 样本数据

形变压力主要体现在喷射混凝土、喷锚支护的接触压力上。因此，采用国内在喷射混凝土、喷锚支护结构上进行的围岩接触压力现场监测成果作为分析形变压力的依据。各监测点形变压力监测值分别通过土压力传感器进行监测，最终选取稳定值作为形变压力，用于后续的研究。

通过现场实测及文献调研方法，共获取国内2000—2018年间修建的54座隧道、205个形变压力监测断

面样本数据，主要分布在华北、华中、华东、华南以及西南地区。根据样本统计数据，将样本按照不同围岩级别、隧道跨度、施工工法进行分类，分析其特征，具体数据如图5~9所示。

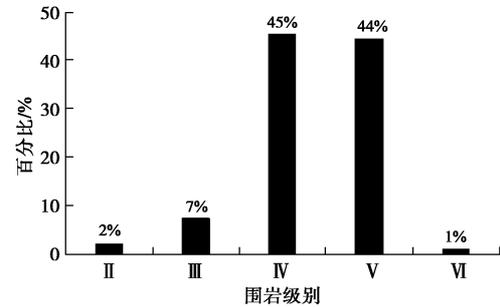


图5 各围岩级别样本占比

Fig. 5 Percentage of grades of surrounding rock

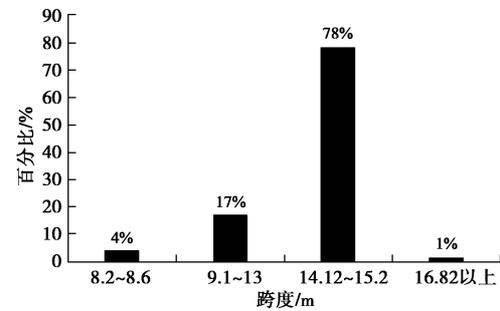


图6 各隧道跨度样本占比

Fig. 6 Percentage of tunnel spans

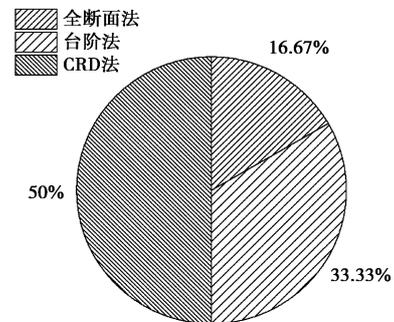


图7 各施工工法样本占比

Fig. 7 Percentage of construction methods

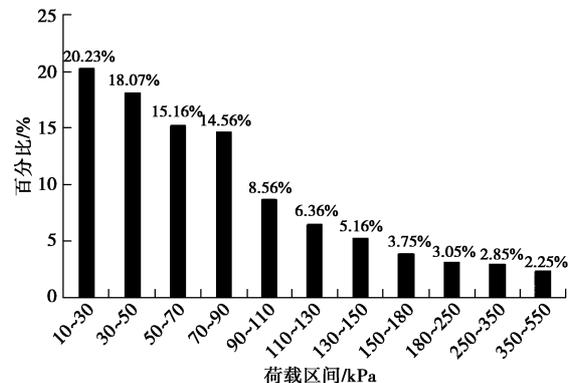


图8 IV级围岩形变压力分布图

Fig. 8 Deformation load distribution of surrounding rock Grade IV

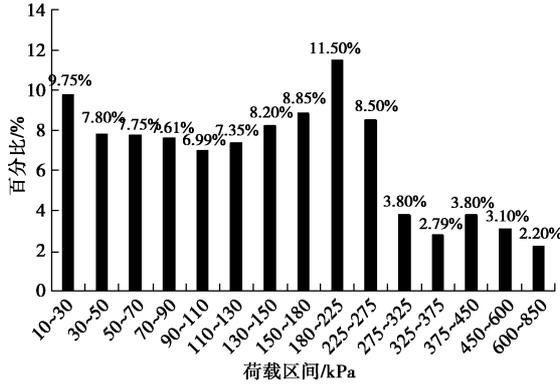


图 9 V 级围岩形变压力分布图

Fig. 9 Deformation load distribution of Grade V surrounding rock

通过对上述数据分析可知：①样本数据中绝大部分为IV、V级围岩，IV级围岩占比45%，V级围岩占比44%；②样本数据中隧道跨度绝大部分为8~16 m，其中9~15.2 m占比95%；③IV级围岩形变压力实测值130 kPa以下占比91.5%，V级围岩形变压力实测值275 kPa以下占比84.31%。

2.2 数据样本处理方法

将现场实测数据按照面积等效原则分解为竖向、水平均布荷载进行计算，并按均布等效荷载模式进行分布。其中 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_4, \sigma_5$ 为实测径向围岩压力值， θ 为径向荷载方向与竖向的夹角， h 为隧道高度， B 为隧道跨度， λ 为侧压力系数，如图 10 所示。

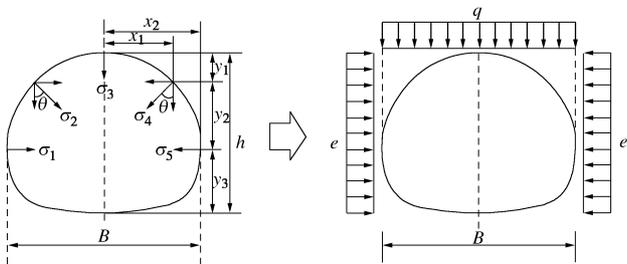


图 10 形变压力测点布置及荷载模式分布图

Fig. 10 Arrangement of measuring points for deformation load and loading mode

竖向形变压力：

$$q = \frac{(\theta_2 - \theta_1)\alpha_1 + x_1\alpha_2}{2B} \quad (3)$$

式中， $\alpha_1 = \sigma_2 \sin \theta + \sigma_4 \sin \theta$ ， $\alpha_2 = 2\sigma_3 + \sigma_2 \sin \theta + \sigma_4 \sin \theta$ 。

水平向形变压力为

$$e = \frac{y_1\beta_1 + y_2\beta_2 + y_3\beta_3}{4h} \quad (4)$$

式中， $\beta_1 = \sigma_2 \cos \theta + \sigma_4 \cos \theta$ ， $\beta_2 = \sigma_1 + \sigma_5 + \sigma_2 \cos \theta + \sigma_4 \cos \theta$ ， $\beta_3 = \sigma_1 + \sigma_5$ 。

侧压力系数为

$$\lambda = e/q \quad (5)$$

3 影响因素分析

根据对样本数据的分析可知，统计数据中主要包括围岩级别、隧道跨度及隧道埋深等因素，因此本文通过数理统计方法，分析形变压力与各因素之间的相互关系及变化规律。

3.1 围岩级别 s

为了消除隧道跨度对围岩形变压力值的影响，现将样本中各级围岩形变压力平均值作为分析对象，分析两者之间的关系，如图 11，表 1 所示。

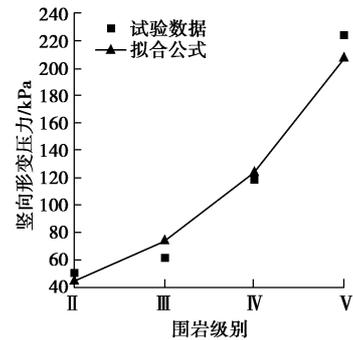


图 11 竖向形变压力变化曲线

Fig. 11 Curve of vertical deformation loads

表 1 形变压力随围岩级别拟合公式

Table 1 Fitting formula for deformation loads with grade of surrounding rock

形变压力	拟合公式	相关系数
竖向形变压力	$q = 15.86e^{0.51s}$	0.961

根据图 9，表 1 分析可知，形变压力值随隧道围岩级别呈指数增长趋势，且相关系数为 0.961。

3.2 隧道跨度 B

为了消除隧道围岩级别对形变压力的影响，按照《铁路隧道设计规范》中对小跨度、中等跨度、大跨度、特大跨度的分类标准，对样本中的形变压力监测样本进行分类，并取其平均值作为分析对象。分析其对形变压力的影响，如图 12，13，表 2 所示。

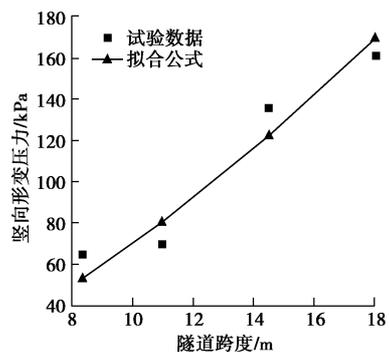


图 12 竖向形变压力变化曲线（幂函数）

Fig. 12 Curve of vertical deformation loads (power function)

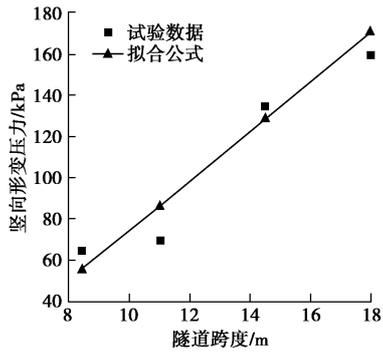


图 13 竖向形变压力变化曲线(线性函数)

Fig. 13 Curve of vertical deformation loads (linear function)

表 2 形变压力随隧道跨度拟合公式

Table 2 Fitting formula for deformation loads with tunnel span

形变压力拟合公式	拟合公式	相关系数
幂函数	$q = 3.0B^{1.40}$	0.91
线性函数	$q = 12.0B - 45.25$	0.94

根据图 12, 13, 表 2 分析可知, 形变压力值随隧道跨度呈两种函数增长趋势: 线性函数, 相关系数为 0.94; 幂函数, 相关系数为 0.91。

3.3 隧道埋深 H

由于样本中 IV、V 级围岩形变压力数据占比较大, 现将样本中 IV、V 级围岩形变压力值 q 与埋深 H 关系进行分析, 如图 14, 15 所示。

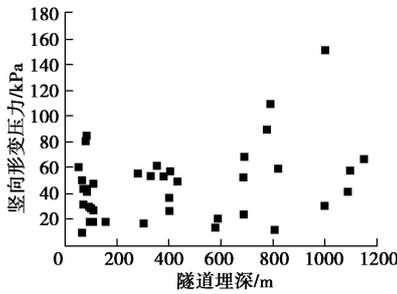


图 14 竖向形变压力变化曲线(IV)

Fig. 14 Curve of vertical deformation loads (IV)

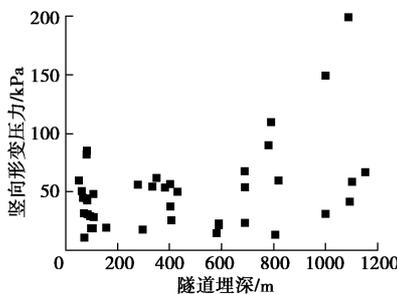


图 15 竖向形变压力变化曲线(V)

Fig. 15 Curve of vertical deformation loads (V)

根据图 14, 15 分析可知, 直接将形变压力值 q 与埋深 H 建立关系时, 两者之间无明显变化规律。故须将竖向形变压力值与埋深进行形式转化, 进而分析

两者之间的关系, 数据转化方式为: ①将隧道的埋深分为不同的深度区间, 分别为小于 100 m, 100~200 m, 200~300 m, 300~400 m, 400~500 m, 大于 500 m。②将各区间的形变压力值与隧道跨度比值的平均值作为该区间的一个数据, 那么对应的隧道埋深为该区间的中间值。例如 IV 级围岩其原始数据的一个点坐标为 (7.9, 250), 7.9 代表埋深为 200~300 m 区间所有形变压力与对应隧道跨度比值的平均值, 250 代表该区间隧道埋深的中值。③按照相同的原理将各深度区间的坐标进行整理, 并对其进行拟合, 得到相应的拟合公式。

(1) 为了消除隧道跨度、围岩级别对围岩形变压力值的影响, 现将样本中竖向形变压力值 q 与隧道跨度 B 比值 q/B 为纵坐标, 埋深 H 为横坐标进行分析, 如图 16, 17, 表 3 所示。

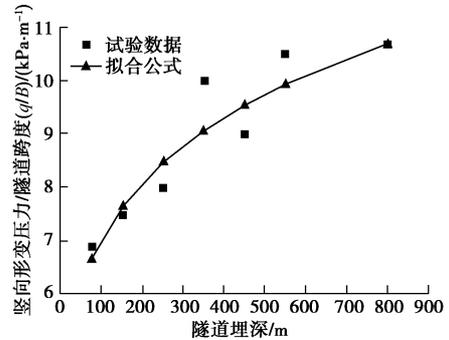


图 16 竖向形变压力变化曲线(IV)

Fig. 16 Curve of vertical deformation loads (IV)

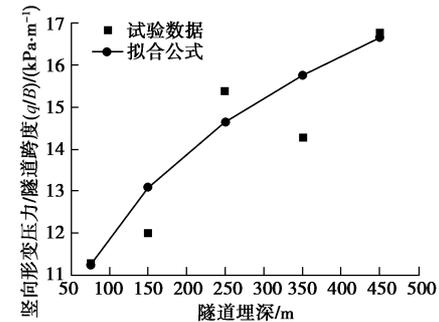


图 17 竖向形变压力变化曲线(V)

Fig. 17 Curve of vertical deformation loads (V)

表 3 形变压力随隧道埋深拟合公式

Table 3 Fitting formula for deformation loads with tunnel depth

形变压力	拟合公式	相关系数
(IV) 竖向形变压力	$q/B = 2.81 \cdot H^{0.20}$	0.89
(V) 竖向形变压力	$q/B = 4.35 \cdot H^{0.22}$	0.86

根据图 16, 17, 表 3 分析可知, q/B , H 两者之间呈幂函数关系, 且 IV、V 级围岩形变压力随埋深变化趋势相同。

(2) 为了消除隧道跨度、围岩级别对围岩形变压

力值的影响, 现将样本中竖向形变压力值 q 与隧道跨度 B 比值 q/B 为纵坐标, 埋深的负倒数 $-1/H$ 为横坐标进行分析, 如图 18, 19, 表 4 所示。

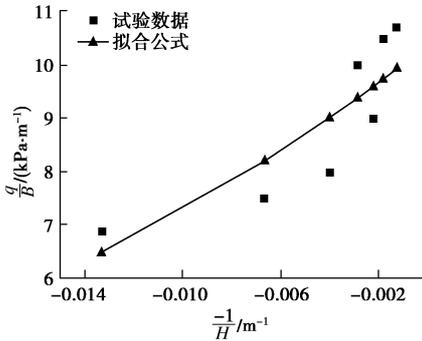


图 18 竖向形变压力变化曲线 (IV)

Fig. 18 Curve of vertical deformation loads (IV)

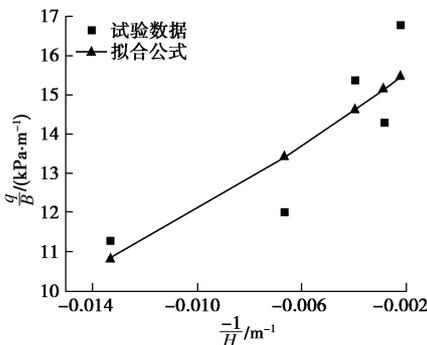


图 19 竖向形变压力变化曲线 (V)

Fig. 19 Curve of vertical deformation loads (V)

表 4 形变压力随隧道埋深拟合公式

Table 4 Fitting formula for deformation loads with tunnel depth

形变压力	拟合公式	相关系数
(IV) 竖向形变压力	$q/B = 10.38 \cdot e^{\frac{-35.2}{H}}$	0.80
(V) 竖向形变压力	$q/B = 16.63 \cdot e^{\frac{-32.03}{H}}$	0.83

根据图 18, 19, 表 4 分析可知, q/B 与 $-1/H$ 两者之间呈指数函数关系, 且 IV、V 级围岩形变压力随埋深变化趋势相同。

4 侧压力系数分析

为了得到围岩水平向形变压力, 现通过侧压力系数来进行分析。根据分析可知, 围岩形变压力侧压力

系数近似服从正态分布, 概率密度函数如表 5 所示。

表 5 各围岩级别正态分布函数表

Table 5 Normal distribution function for various grades of surrounding rock

围岩级别	数学期望值	标准差	概率密度函数
IV	0.47	0.10	$f(x) = \frac{1}{\sqrt{0.2\pi}} \exp\left(-\frac{(\lambda-0.47)}{0.02}\right)$
V	0.71	0.12	$f(x) = \frac{1}{\sqrt{0.24\pi}} \exp\left(-\frac{(\lambda-0.71)}{0.0288}\right)$

根据概率密度函数, 最终求得各概率条件下的侧压力系数分布值, 如表 6 所示。

现场实测形变压力值往往存在一定的不均匀性, 结构受力处于不利状态, 故偏于结构安全性考虑, 对上述侧压力系数范围进行修正。考虑到上述测压系数的取值范围较大, 在实际工程中的选取, 会造成荷载相差较大情况, 给设计带来不便, 故对其进行修正, 最终通过概率密度函数, 确定了个围岩条件下的侧压力系数范围, 如图 20, 21, 表 7 所示。

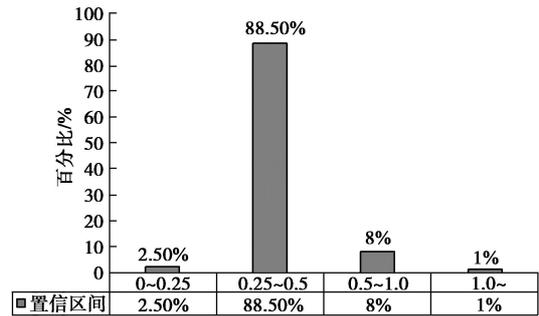


图 20 IV 级围岩侧压力系数分布图

Fig. 20 Lateral pressure coefficient of surrounding rock Grade IV

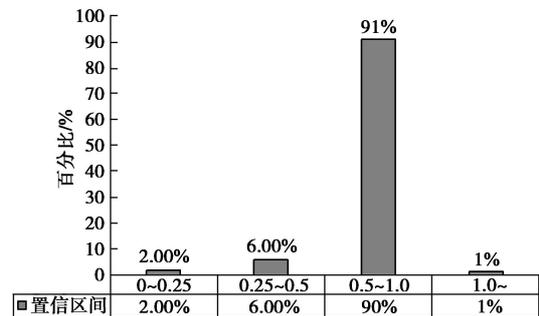


图 21 V 级围岩侧压力系数分布图

Fig. 21 Lateral pressure coefficient of surrounding rock Grade V

表 6 侧压力系数分布区间

Table 6 Distribution intervals of lateral pressure coefficient

数据区间	侧压力系数 (λ) (IV 级围岩)	概率/%	侧压力系数 (λ) (V 级围岩)	概率/%
$(\mu - \sigma, \mu + \sigma)$	(0.37, 0.57)	68.26	(0.59, 0.83)	68.26
$(\mu - 1.96\sigma, \mu + 1.96\sigma)$	(0.27, 0.67)	95.44	(0.47, 0.95)	95.44
$(\mu - 1.96\sigma, \mu + 1.96\sigma)$	(0.21, 0.73)	99.73	(0.40, 1.02)	99.73

表7 侧压力系数表

Table 7 List of lateral pressure coefficient

围岩级别	侧压力系数	置信区间 /%	《隧规》侧压力 系数
III	<0.25	—	<0.15
IV	0.25~0.5	88.5	0.15~0.30
V	0.5~1.0	91.0	0.30~0.50

根据表7可知，与《隧规》中侧压力系数相比，各围岩条件下侧压力系数均有一定的增大。

5 形变压力计算公式

5.1 计算公式

通过多因素分析方法，考虑隧道围岩级别、隧道跨度、隧道埋深影响因素，推导建立了6种围岩竖向形变压力计算公式，如表8所示。

表8 竖向形变压力计算公式

Table 8 Formulas for calculating vertical deformation loads

序号	公式	考虑因素	修正系数 α	相关系数
1	$q = \alpha \cdot B^{1.25} \cdot H^{0.1} \cdot e^{0.5s}$	s, B, H	$\alpha = 0.35$	0.897
2	$q = \alpha \cdot B^{1.25} \cdot e^{(0.5s - 15/H)}$	s, B, H	$\alpha = 0.71$	0.920
3	$q = \alpha \cdot B^{1.25} \cdot e^{0.45s}$	s, B	$\alpha = 0.81$	0.920
4	$q = \alpha \cdot B \cdot H^{0.1} \cdot e^{0.5s}$	s, B, H	$\alpha = 0.69$	0.907
5	$q = \alpha \cdot B \cdot e^{(0.5s - 15/H)}$	s, B, H	$\alpha = 1.38$	0.935
6	$q = \alpha \cdot B \cdot e^{0.45s}$	s, B	$\alpha = 1.55$	0.915

注： s 为围岩级别， B 为隧道跨度， H 为隧道埋深。

选取表8中相关系数最高的形变压力计算公式作为最终计算公式，如下：

竖向形变压力计算公式：

$$q = \alpha \cdot B \cdot e^{0.5s - \frac{15}{H}}, \quad (6)$$

式中， s 为围岩级别， B 为隧道跨度， H 为隧道埋深， α 为修正系数， $\alpha = 1.38$ 。

水平向形变压力计算公式：

$$e = \lambda q, \quad (7)$$

式中， λ 为侧压力系数，如表9所示，其他符号意义同前。

表9 侧压力系数表

Table 9 List of lateral pressure coefficient

围岩级别	III	IV	V
侧压力系数	<0.25	0.25~0.5	0.5~1.0

由于样本数据的限制，在分析形变压力计算公式时，为了更具有说服力，采用了数据较多的IV、V级围岩进行了相关的分析。但在单因素分析时，也采用了相对较少的III级围岩数据，综合分析之后，给出了本文拟合的形变压力计算公式的适用条件，即本公式目前仅适用于一般深埋隧道III—V级围岩，隧道跨度

为8~16m的隧道围岩形变压力计算。由于本文研究均采用的是施工阶段采集的围岩形变压力数据，虽在施工阶段各断面数据均趋于收敛状态，但对于支护结构上的长期压力值，本文未作进一步的分析，故在使用本文提出的围岩形变压力进行支护结构设计时，应考虑隧道施工中的各项条件，并结合隧道超前支护、二次衬砌等支护结构进行综合设计。

5.2 影响因素敏感性分析

根据得到的形变压力计算公式，采用控制变量法，分析各影响因素对形变压力值的影响规律。

控制隧道跨度不变（本次计算选取隧道跨度为15m），隧道埋深不变（本次计算选取隧道埋深为200m），改变围岩级别，分析围岩压力随围岩级别的变化规律，计算结果如图22所示。

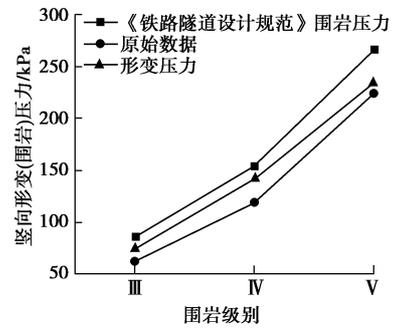


图22 形变压力随围岩级别变化曲线

Fig. 22 Curves of deformation loads with grades of surrounding rock

根据图22可知，围岩压力随隧道围岩级别的增大而增大；随着围岩级别的增大，形变压力与《隧规》计算荷载的比值越来越小，约为《隧规》计算荷载的84%~92%。笔者认为是由于现代机械化施工支护施作及时，且软弱围岩超前支护的施作，提高了围岩的自承能力，围岩状态控制在弹性或弹性、塑性硬化阶段，故围岩压力是由围岩变形产生的形变压力。

控制隧道跨度不变（本次计算选取隧道跨度为15m），围岩级别不变（本次计算选取IV级围岩），改变隧道埋深，分析围岩压力随隧道埋深的变化规律，计算结果如图23所示。

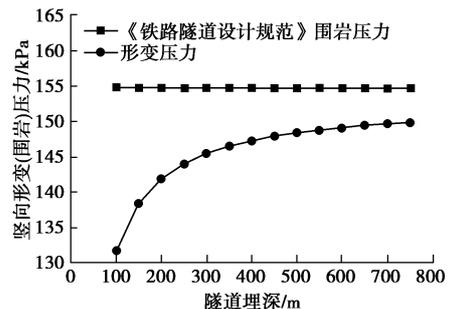


图23 形变压力随隧道埋深变化曲线

Fig. 23 Curves of deformation loads with tunnel depth

根据图 23 可知,《隧规》计算荷载不随隧道埋深的变化而变化,而形变压力随隧道埋深的增大而增大,且随着隧道埋深的不断增大,形变压力增长率在不断地减小。根据图 23 显示,当隧道埋深达到一定的深度后形变压力与《隧规》计算荷载相近。

控制隧道埋深不变(本次计算选取隧道埋深为 200 m),围岩级别不变(本次计算选取 IV 级围岩),改变隧道跨度,分析围岩压力随隧道埋深的变化规律,计算结果如图 24 所示。

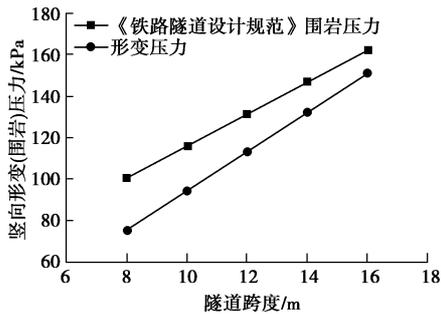


图 24 形变压力随隧道跨度变化曲线

Fig. 24 Curves of deformation loads with tunnel span

根据图 24 可知,围岩压力随隧道埋深的增大而增大,当隧道跨度达到一定值后形变压力与《隧规》计算荷载相近。

6 结 论

通过大量的现场实测数据,通过多元非线性回归分析方法,考虑围岩级别、隧道跨度、隧道埋深对形变压力的影响,建立了围岩变形条件下的形变压力计算公式。主要研究结论如下:

(1) 围岩压力随隧道围岩级别的增大而增大;随着围岩级别的增大,形变压力与《隧规》计算荷载的比值越来越小,约为《隧规》计算荷载的 84%~92%;形变压力随隧道埋深的增大而增大,且随着隧道埋深的不断增大,形变压力增长率在不断地减小,当隧道埋深达到一定的深度后形变压力与《隧规》计算荷载相近;围岩压力随隧道跨度的增大而增大,当隧道跨度达到一定值后形变压力与《隧规》计算荷载相近。

(2) 通过多因素数理统计分析方法,推导建立了 6 种形变压力计算公式,根据各推导公式相关系数,最终选取其中相关系数最高的计算公式作为竖向形变压力计算公式: $q = a \cdot B \cdot e^{(0.5s-15/H)}$ 。

(3) 形变压力侧压力系数,近似服从正态分布,根据概率密度函数确定了不同围岩级别条件下的侧压力系数范围。与《隧规》中侧压力系数相比,各围岩条件下侧压力系数均有一定的增大。

参考文献:

- [1] 关宝树. 隧道工程设计要点集[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003. (GUAN Bao-shu. Gist of tunnel engineering design[M]. Beijing: China Communications Press, 2003. (in Chinese))
- [2] 王毅才. 隧道工程[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003. (WANG Yi-cai. Tunnel Engineering[M]. Beijing: China Communications Press, 2003. (in Chinese))
- [3] 吴海科, 刘远明. 围岩压力中形变压力的影响因素[J]. 建筑技术开发, 2016, 43(1): 163 - 164. (WU Hai-ke, LIU Yuan-ming. Factors rock pressure in deformation pressure[J]. Building Technology Development, 2016, 43(1): 163 - 164. (in Chinese))
- [4] 铁路隧道设计规范: TB10003—2016 [S]. 北京: 中国铁道出版社, 2016. (Code for Design of Railway Tunnel: TB10003—2016[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2016. (in Chinese))
- [5] 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 Peng-fei, ZHAO Yong, ZHANG Ding-li, 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))
- [6] 李鹏飞, 周 焯, 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 Peng-fei, ZHOU Ye, WU Dong. Calculation methods for surrounding rock pressure and application scopes[J]. China Railway Science, 2013, 34(6): 22 - 60. (in Chinese))
- [7] GOODMAN R E. Introduction to rock mechanics[M]. New York: Wiley, 1978.
- [8] 曾钱帮, 王恩志, 王思敬. 深埋圆形洞室围岩塑性形变压力的广义 Hoek-Brown 破坏准则解及其三元非线性回归模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增刊 2): 3543 - 3549. (ZENG Qian-bang, WANG En-zhi, WANG Si-jing. Analytical solution for plastic deformation pressure around a deep circular opening based on generalized Hoek-Brown failure criterion and its ternary nonlinear regression model[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(S2): 3543 - 3549. (in Chinese))
- [9] 付国彬. 巷道围岩破裂范围与位移的新研究[J]. 煤炭学报, 1995, 20(3): 304 - 310. (FU Guo-bin. Recent investigation of extent of fractured zone and displacement of rocks around the roadways[J]. Journal of China Coal Society, 1995, 20(3): 304 - 310. (in Chinese))

- [10] PARK K H, KIM Y J. Analytical solution for a circular opening in an elastic-brittle-plastic rock[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2006, **43**(4): 616 - 622.
- [11] GUAN Z, JIANG Y, TANABASI Y. Ground reaction analyses in conventional tunnelling excavation[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2007, **22**(2): 230 - 237.
- [12] LEE Y K, PIETRUSZCZAK S. A new numerical procedure for elasto-plastic analysis of a circular opening excavated in a strain-softening rock mass[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2008, **23**(5): 588 - 599.
- [13] 公路隧道设计规范: JTG D70—2004 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2004. (Code for Design of Road Tunnel: JTG D70—2004[S]. Beijing: China Communications Press, 2004. (in Chinese))
- [14] 伍冬. 山岭隧道围岩压力计算方法及其适用性研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2012. (WU Dong. Study on Surrounding Rock Pressure Calculation Method and Application of Mountain Tunnel[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012(in Chinese))
- [15] 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 Xue-zeng, 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))
- [16] 陈进. 岩体结构渐进破坏的理论与实践[D]. 徐州: 中国矿业大学, 1988. (CHEN Jin. Theory and Practice of Progressive Failure of Rock Mass Structure[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 1988. (in Chinese))
- [17] JIANG Yu-jing. Theoretical and Experimental Study on the Stability of Deep Undergrounding[D]. Fukuoka-ken: Kyushu University, 1993.
- [18] 何满潮, 景海河, 孙晓明. 软岩工程力学[M]. 北京: 科学出版社, 2002. (HE Man-chao, JING Hai-he, SUN Xiao-ming. *Soft Rock Engineering Mechanics*[M]. Beijing: Science Press, 2002. (in Chinese))
- [19] 柳厚祥, 方风华. 预埋式多点位移计现场确定围岩松动圈的方法研究[J]. *矿冶工程*, 2006, **26**(1): 1 - 4. (LIU Hou-xiang, FANG Feng-hua. Study on the method to Define the wall rock loose zone with embedded displacement meter[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2006, **26**(1): 1 - 4. (in Chinese))
- [20] 乔春生, 张清. 锚杆轴力分布与软弱岩体中隧道塑性区的关系[J]. *铁道学报*, 1999, **21**(2): 72 - 75. (QIAO Chun-sheng, ZHANG Qing. Study on the method to define the wall rocks loose zone with embedded displacement mete[J]. *Journal of the China Railway Society*, 1999, **21**(2): 72 - 75. (in Chinese))
- [21] 杜国文. 小浪底工程多点位移计测值突变原因分析[J]. *东北水利水电*, 1998(6): 26 - 29. (DU Guo-wen. Study on the method to define the wall rocks loose zone with embedded displacement meter[J]. *Water Resource & Hydropower of Northeast*, 1998(6): 26 - 29. (in Chinese))
- [22] 张顶立, 陈立平. 隧道围岩的复合结构特性及其荷载效应[J]. *岩石力学与工程学报*, 2016, **35**(3): 456 - 469. (ZHANG Ding-li, CHEN Li-ping. Compound structural characteristics and load effect of tunnel surrounding rock[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, **35**(3): 456 - 469. (in Chinese))
- [23] 张顶立, 孙振宇. 复杂隧道围岩结构稳定性及其控制[J]. *水力发电学报*, 2018, **37**(2): 1 - 11. (ZHANF Ding-li, SUN Zhen-yu. Structural stability of complex tunnel surrounding rock and its control[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2018, **37**(2): 1 - 11. (in Chinese))