

DOI: 10.16285/j.rsm.2019.2160

# 基于简化力学模型的隧道锚极限承载力估值公式

王东英<sup>1,2,3,4</sup>, 汤华<sup>3</sup>, 尹小涛<sup>3</sup>, 杨光华<sup>1,2,4</sup>, 姜燕<sup>1,2</sup>

(1. 广东省水利水电科学研究院, 广东 广州 510610; 2. 广东省岩土工程技术研究中心, 广东 广州 510640; 3. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071; 4. 华南理工大学 土木与交通学院, 广东 广州 510640)

**摘要:** 悬索桥隧道式锚碇的设计理念为锚碇夹持岩体协同承载, 因而承载能力远超同体积的重力式锚碇。但因目前对围岩协同作用认识尚不充分, 在当前隧道式锚碇设计中仍保守地忽略锚碇和岩体间的挤压效应。为弄清锚碇-岩体协同承载的机制, 揭示隧道锚承载能力提高的本质, 通过分析隧道式锚碇建设至成桥全过程受力, 建立隧道锚的简化力学模型, 并引用 Mindlin 应力解分析了荷载沿锚碇轴向的传递规律以及荷载产生的作用于锚碇-岩体间的挤压应力分布, 最终给出了隧道式锚碇极限承载力的简化估算方法, 并通过伍家岗大桥隧道锚工程实例分析了结果的合理性。所得结论主要有: 锚碇-岩体界面力主要由锚碇自重和锚碇-岩体相互挤压产生; 锚碇-岩体界面附加应力自后锚面向前锚面呈先增后减的变化趋势, 在距后锚面约  $1/3L$  处达到应力峰值; 以容许抗剪强度为破坏判据解得的伍家岗长江大桥隧道式锚碇的极限承载力为 3 504 MN, 约为 16 倍的设计荷载, 与室内试验值基本吻合。

**关键词:** 隧道式锚碇; 协同承载机制; Mindlin 应力解; 附加挤压应力; 极限承载力

中图分类号: TU 457

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2020)10-3405-10

## Estimation method of ultimate bearing capacity of tunnel-type anchorage based on simplified mechanical model

WANG Dong-ying<sup>1,2,3,4</sup>, TANG Hua<sup>3</sup>, YIN Xiao-tao<sup>3</sup>, YANG Guang-hua<sup>1,2,4</sup>, JIANG Yan<sup>1,2</sup>

(1. Guangdong Research Institute of Water Resources and Hydropower, Guangzhou, Guangdong 510610, China; 2. Guangdong Technical Research Center of Geotechnical Engineering, Guangzhou, Guangdong 510640, China; 3. State Key Laboratory of Geo-mechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 4. School of Civil Engineering & Transportation, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510640, China)

**Abstract:** The design philosophy of suspension bridge tunnel-type anchorage is that anchorage and rock bear the bridge load together. As the cooperative bearing mechanism of anchorage and rock, its bearing capacity is much higher than that of gravity anchorage with the same volume. However, due to the insufficient understanding of the synergy of surrounding rock, the squeezing effect between the anchorage and rock mass is still conservatively ignored in the design of tunnel anchorage. In order to understand the mechanism of coordinated bearing between anchorage and rock mass, and reveal the essence of improving the bearing capacity of tunnel anchor, a simplified mechanical model of tunnel anchor was established by analyzing the whole process from construction to completion of the bridge. Mindlin stress solution was used to analyze the law of load transmission along the anchorage axis and the distribution of compressive stress between anchorage and rock mass caused by load. A simplified method for estimating the ultimate bearing capacity of tunnel type anchorage was proposed. Then the recommend estimation method was successfully applied to Wujiagang suspension bridge project. The main conclusions are as follows: the interface force between anchorage and rock mass is mainly produced by the self weight of anchorage and the mutual extrusion of anchorage and rock mass; the additional stress at the interface between anchorage and rock mass increases first and then decreases from the rear anchor face to the front, and reaches the peak stress at about  $1/3L$  away from the rear anchor surface; the ultimate bearing capacity of the tunnel anchorage of Wujiagang Yangtze River Bridge calculated by the allowable shear strength is 3 504 MN, about 16 times of the design load, which is basically consistent with the laboratory model test value.

**Keywords:** tunnel-type anchorage; cooperative bearing mechanism; Mindlin stress solution; additional compressive stress; ultimate

收稿日期: 2019-12-24

修回日期: 2020-05-12

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 51778609, No. 5177082703); 中国博士后科学基金 (No. 2019M662827)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51778609, 5177082703) and the China Postdoctoral Science Foundation (2019M662827).

第一作者简介: 王东英, 女, 1991年生, 博士, 工程师, 主要从事悬索桥锚碇承载力方面的研究工作。E-mail: wangdongying910309@163.com

通讯作者: 尹小涛, 男, 1974年生, 博士, 副研究员, 主要从事悬索桥锚碇承载力方面的研究工作。E-mail: 278205456@qq.com

bearing capacity

## 1 引言

随着西南山区交通建设的快速发展,大跨桥梁,尤其是悬索桥的建设迅猛。作为悬索桥受力终端的锚碇,其承载安全性受到广泛重视。

根据传力和承载机制的不同,悬索桥锚碇主要分为重力式锚碇和隧道式锚碇两类。重力式锚碇依靠自身的重量和锚碇-基础界面的摩阻力平衡主缆荷载<sup>[1-2]</sup>。而隧道式锚碇不仅锚块自身可以承载,周围岩体的夹持也提供了部分承载力,因此,其承载能力较重力式锚碇要大,但承载机制却相对复杂。隧道式锚碇的体积仅为重力式锚碇的 20%~25%<sup>[3]</sup>,且建设时无需大开挖,经济和环保优势突出<sup>[4-6]</sup>,是山区锚固结构的首选型式。

隧道式锚碇的设计理念是依赖锚碇和围岩协同承载,通过调动围岩的承载能力提高整个锚碇结构的承载力<sup>[7-8]</sup>。但是周围岩体如何夹裹锚碇共同承载,如何准确地估算因岩体夹裹对隧道式锚碇承载力的提高作用,目前的研究尚不充分。为保险起见,我国公路悬索桥设计规范中仍借鉴重力承载理念对隧道式锚碇进行设计<sup>[9]</sup>,围岩的承载能力得不到有效发挥,隧道锚的承载潜能被埋藏。广东虎门大桥<sup>[10]</sup>、鹅公岩大桥<sup>[11]</sup>、四渡河大桥<sup>[12]</sup>、坝陵河大桥<sup>[13]</sup>、普立特大桥<sup>[14]</sup>、伍家岗大桥<sup>[15]</sup>等开展的现场模型试验,均证实了这一论点。

事实上,隧道式锚碇是否能调动洞周岩体协同承载,有几点充分条件:①锚碇是下大上小的倒塞形块体;②洞周岩体较坚硬,能够为锚碇提供反作用力;③倒塞形锚块承受垂直向上的荷载,能够使锚碇和岩体相互嵌挤,形成挤压应力。在王东英等<sup>[16]</sup>开展的室内模型试验中发现,只有当施加于后锚面的荷载增大到一定程度,锚碇和岩体界面才会产生挤压应力,周围岩体才会有应力变形响应,这一现象论证了这些条件。

因此,准确估算隧道式锚碇承载能力、揭示锚碇和岩体间联合承载机制的关键是分析锚碇和岩体间挤压应力的产生及分布特征。本文通过分析隧道式锚碇建造至承载全过程的受力,研究锚碇承载力的构成及求解方式。引入容许剪应力判据提出隧道式锚碇极限承载力的解析估算方法,并将其应用于伍家岗大桥隧道锚承载力估算中。以上工作期望能为隧道式锚碇设计体系的完善工作提供理论借鉴。

## 2 隧道式锚碇承载的简化力学模型

### 2.1 隧道式锚碇传力过程及受力机制

隧道式锚碇是由散索鞍、索股连接器、预应力锚固系统、锚碇体构成的复杂体系<sup>[17]</sup>,主缆荷载在整个体系中的传力过程为主缆-索股连接器-预应力锚固系统-锚碇体。荷载传至锚碇体后,促使锚碇体与周围岩体相互挤压从而将荷载向周围岩体传递。锚碇体和围岩是两种不同的介质,通过锚碇-岩体接触界面这一媒介,构成联合承载体系。

虽然拉拔荷载作用下锚碇和岩体的协同受力机制复杂,但其受力构成比较简单,难点在于各力的量化计算。

以锚碇-岩体界面为分界点,将锚碇体隔离出来,其受力仅包含 3 部分,分别为锚碇-岩体界面法向应力、界面摩阻力与拉拔荷载(如图 1 所示)。界面法向应力和界面摩阻力不仅包含锚碇体挤压岩体产生的部分,还应包括锚碇体自重产生的部分。因此,锚碇底滑移面法向应力、摩阻力要大于顶滑移面。

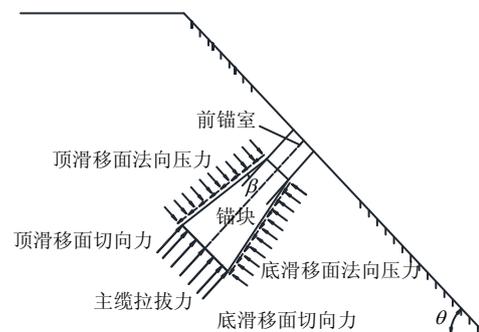


图 1 隧道式锚碇承载的简化力学模型

Fig.1 Simplified mechanical model of tunnel-type anchorage

基于上述原因,估算隧道式锚碇承载能力的关键在于正确估算锚碇-岩体界面的法向应力和摩阻力。

### 2.2 锚碇-岩体界面力的构成分析

锚碇-岩体界面力的构成与其建设过程相关。隧道式锚碇的整个建设过程包括洞室开挖、锚碇体浇筑及散索挂缆成桥 3 个阶段。①洞室开挖打破了山体原有的平衡状态,洞周岩体应力释放并发生重分布<sup>[18]</sup>;②锚碇体自重作用在底部接触界面产生部分压应力和摩阻力;③散索挂缆成桥后桥梁荷载被传递到锚碇体后锚面上,若荷载足够大,会使锚碇

和岩体相互嵌挤，在各接触面产生附加的压应力和摩阻力。

由此可见，锚碇-岩体界面力包含锚碇体自重产生的应力和锚碇-岩体挤压产生的界面力两部分。

锚碇体自重产生的界面力是现行规范中考虑的唯一因素，并为简化计算将其视为均布力。但是，锚碇体是下部大、上部小且倾斜放置的楔形体，这一几何特征决定了自重产生的沿底滑面的应力不可能为均匀分布。可通过条分法较准确地分析该应力分布。所谓的条分法是仿照边坡稳定性分析的极限平衡法，将锚碇自后锚面向前锚面等宽竖条分。因锚碇为存在一定倾角的城门洞型几何体，条分后各条块间存在一定的几何相似性，通过几何相似性逐个确定每一条块的重量，进而确定各条块自重应力。

锚碇-岩体界面的挤压应力是荷载作用下锚碇和洞周围岩相互嵌挤而产生，相对于锚碇自重产生的应力，该挤压力是一种附加应力，产生机制类似于扩底抗拔桩。有关附加应力的计算，在抗拔桩<sup>[19]</sup>、锚杆<sup>[20]</sup>和预应力锚索<sup>[21]</sup>等工程中已做过大量值得借鉴的研究，*Boussinesq* 解和 *Mindlin* 解是常用的附加应力计算理论方法，*Mindlin* 解更适用于荷载作用于地面以下的附加应力计算。因此，本文引用 *Mindlin* 经典应力解分析锚碇-岩体界面的附加应力，具体方法详述如下。

### 2.3 锚碇-岩体界面挤压应力求解

附加应力是区别于原岩应力和锚碇自重应力之外的应力，单纯因荷载产生的。也就是说，计算时其他应力清零(另算)，因为荷载与锚碇轴线平行，那么锚碇是否倾斜、倾角大小对附加应力的数值及其分布方式影响不大。因此，在分析锚碇附加应力问题时，假定锚碇垂直放置，拉拔荷载下(注：该荷载是平衡锚块重力分量后的附加荷载，能够保证锚碇和岩体相互挤压)，锚碇及围岩受力模式如图 2 所示。对系统而言，外力体系仅有作用于锚碇后锚面的拉拔荷载，锚碇和岩体间的相互作用作为内力不予标记。

图 2 可视为半无限空间内受圆形均布荷载作用问题。锚碇与岩体属于不同的介质，与 *Mindlin* 应力解的适用条件不完全相符，因此，不能直接应用圆形均布荷载作用下的 *Mindlin* 应力解表征锚碇-岩体界面的附加应力，而应引用 *Mindlin* 应力解分析锚碇的轴向应力，而后将锚碇隔离出来，通过建立锚碇的微段平衡方程分析锚碇与岩体界面的附加

应力。在分析时，为简化计算，仿照张奇华等<sup>[7]</sup>的做法，将锚碇按体积等效原则等效为圆台状。

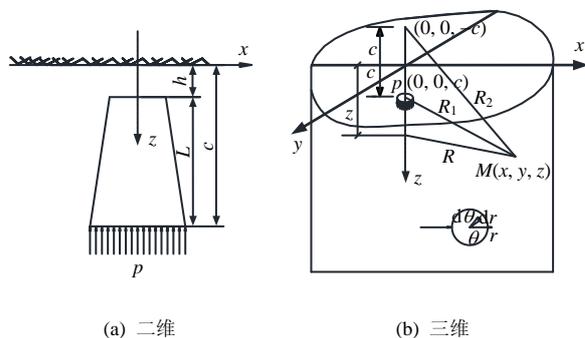


图 2 隧道式锚碇-围岩系统受力示意图  
Fig.2 Stress diagram of tunnel-type anchorage and surrounding rock system

假定锚碇埋深为  $h$ ，锚碇长度为  $L$ ，荷载作用位置距地表为  $c$ ，拉拔荷载对应的均布力为  $p$ ，荷载作用半径为  $R'$ ，则通过对半无限空间内一点受集中荷载作用的 *Mindlin* 应力解<sup>[22]</sup>积分，得圆形均布荷载作用下锚碇的轴向应力  $\sigma_z(z)$  为

$$\sigma_z(z) = \frac{p}{4(1-\mu)} \left\{ -2(1-\mu) - \frac{(1-2\mu)(z-c)}{|z-c|} - \frac{(z-c)^3}{|z-c|^3} + \frac{(1-2\mu)(z-c)}{\sqrt{R'^2+(z-c)^2}} - \frac{(1-2\mu)(z-c)}{\sqrt{R'^2+(z+c)^2}} + \frac{(z-c)^3}{[R'^2+(z-c)^2]^{\frac{3}{2}}} + \frac{(3-4\mu)z(z+c)^2}{[R'^2+(z+c)^2]^{\frac{3}{2}}} - \frac{c(z+c)(5z-c)}{[R'^2+(z+c)^2]^{\frac{3}{2}}} + \frac{6cz(z+c)^3}{[R'^2+(z+c)^2]^{\frac{5}{2}}} \right\} \quad (1)$$

式中： $z$  为锚碇各截面  $z$  向坐标； $\mu$  为泊松比。

据江南<sup>[5]</sup>的试验结果，因锚碇刚度很大，在轴向荷载作用下，同一截面各位置处轴向应力基本相同。在此，假定锚碇每一截面上的轴向应力均匀分布，则每一截面的轴力  $N(z)$  为

$$N(z) = \sigma_z(z)A(z) \quad (2)$$

式中： $A(z)$  为  $z$  处的锚碇截面面积。

锚碇为下大上小的楔形体，距后锚面不同位置处各截面的面积不同，假设前锚面距地表埋深为  $h$ ，前锚面等效半径为  $r'$ ，后锚面等效半径为  $R'$ ，则锚碇各截面的等效半径和面积分别为

$$r'(z) = r' + \frac{(z-h)(R'-r')}{2(c-h)} \quad (3)$$

$$A(z) = \pi \left[ r' + \frac{(z-h)(R'-r')}{2(c-h)} \right]^2 \quad (4)$$

如图3所示，附加荷载作用下，对于锚碇的任一微段，其轴力、锚碇-岩体界面的应力和摩擦力构成平衡力系，若记锚碇的夹持角为 $\beta$ ，则有

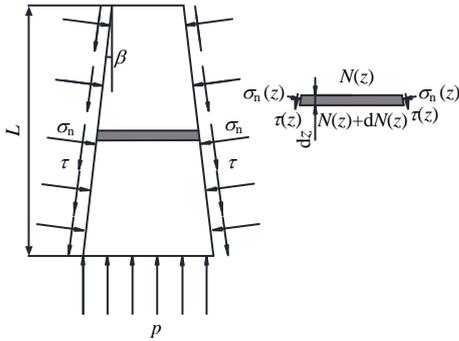


图3 锚碇体在附加荷载下的受力示意图

Fig.3 Stress diagram of anchor plug under additional load

$$-dN(z) = \sigma_n(z)U(z)dz \cdot \sin \beta + \tau_n(z)U(z)dz \cdot \cos \beta$$

$$(5)$$

$$(\sigma_z(z))' = \frac{p}{4(1-\mu)} \left\{ (1-2\mu) \left( \frac{1}{\sqrt{R'^2+(z-c)^2}} - \frac{1}{\sqrt{R'^2+(z+c)^2}} \right) + \frac{3(z-c) - (1-2\mu)(z-c)^2}{[R'^2+(z-c)^2]^{\frac{3}{2}}} - \frac{3(z-c)^4}{[R'^2+(z-c)^2]^{\frac{5}{2}}} + \frac{(1-2\mu)(z^2-c^2) + (3-4\mu)[(z+c)^2+2z(z+c)] - 10cz+4c^2}{[R'^2+(z+c)^2]^{\frac{3}{2}}} + \frac{3c(z+c)(5z-c) - 3(3-4\mu)z(z+c)^3 + 6c(z+c)^3 + 18cz(z+c)^2}{[R'^2+(z+c)^2]^{\frac{5}{2}}} - \frac{30cz(z+c)^4}{[R'^2+(z+c)^2]^{\frac{7}{2}}} \right\}$$

纵观众多隧道式锚碇室内或现场缩尺模型试验，仅有丽香铁路金沙江大桥<sup>[5]</sup>成功测得了荷载作用下锚碇轴向应力的分布情况。所以在此以丽香铁路金沙江大桥为例，分析采用上述理论解表征锚碇轴向应力和锚碇-岩体界面附加应力的合理性。

丽香铁路金沙江大桥隧道锚长45 m，前锚面宽12 m、高12.5 m，后锚面宽16 m、高17 m。室内试验采用的模型与原型的相似比尺为1:100，不考虑上覆土体作用，锚碇体垂直放置，采用后锚室加载方式，其受力和边界条件均满足半无限空间内受均布荷载作用的模型要求。试验中，应力测点埋置于锚体内部，测点间距为0.05 m，第1个测点距前锚面垂向距离为0.05 m。根据面积等效原则换算得，模型锚的前锚面等效半径为0.06 m，后锚面等效半径为0.17 m。将模型锚长度、等效半径、应力测点

式中： $dN(z)$ 为微段轴力增量； $\sigma_n(z)$ 为锚碇-岩体界面附加应力； $U(z)$ 为微段对应周长； $dz$ 为微段长度； $\beta$ 为锚碇夹持角； $\tau_n(z)$ 为锚碇-岩体界面附加摩擦力。

假定锚碇-岩体界面的强度参数服从Mohr-Coulomb屈服准则，界面摩擦系数 $f$ 为 $\tan \varphi$ ，则界面附加摩擦力为

$$\tau_n(z) = \sigma_n(z) \tan \varphi \quad (6)$$

将式(6)代入式(5)，则锚碇-岩体界面附加应力可表达为

$$\sigma_n(z) = \frac{-dN(z)}{(\sin \beta + \tan \varphi \cos \beta)U(z)} \quad (7)$$

将式(1)~(4)代入式(7)，则锚碇-岩体界面的附加应力为

$$\sigma_n(z) = \frac{-1}{2(\sin \beta + \tan \varphi \cos \beta)}$$

$$(8)$$

$$\left[ r'(z)(\sigma_z(z))' + \sigma_z(z) \frac{R'-r'}{c-h} \right]$$

式中： $(\sigma_z(z))'$ 为 $\sigma_z(z)$ 的一阶导数，其表达式为

位置及试验中加载数据等信息代入式(1)，基于式(7)表征的锚碇轴向应力分布如图4所示，而江南<sup>[5]</sup>开展的室内模型试验测量结果绘制于图5。

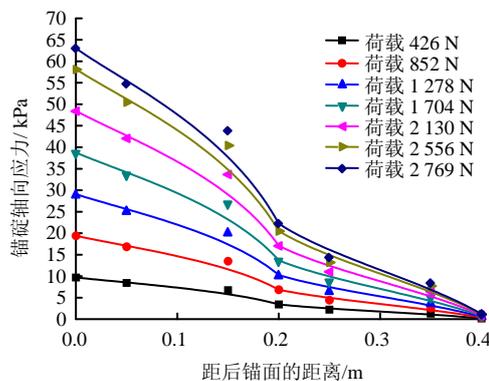


图4 基于Mindlin应力解表征的锚碇轴向应力分布

Fig.4 Distribution of axial stress of anchor plug based on Mindlin stress solution

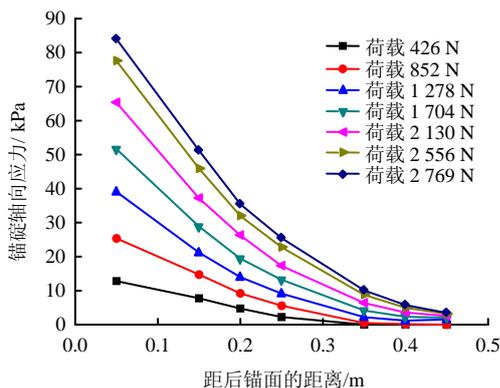


图 5 室内试验<sup>[5]</sup>揭示的锚锭轴向应力分布

Fig.5 Distribution of axial stress of anchor plug obtained by laboratory model test<sup>[5]</sup>

对比解析结果和室内试验结果可以发现，式(7)表征的锚锭轴向应力分布规律与试验结果基本一致。不同荷载作用下，锚锭轴向应力随距后锚面（也即加载位置）距离的增长呈非线性衰减，后锚面处应力值较大，前锚面处则基本为 0。从数值上看，基于式(7)求得的锚锭轴向应力低于室内试验所得结果，误差介于 5%~15%之间，个别点误差达到 25%。这也符合试验值一般高于弹性解的实际情况。

总之，基于 Mindlin 应力解所得锚锭轴向应力值比实际值偏保守，由此估算的极限承载力应低于锚锭的实际承载力，在锚锭设计中偏于安全。

对照试验方案，设  $h=0$ ，锚锭-岩体界面的内摩擦角为  $35^\circ$ <sup>[5]</sup>，其他参数同上。不同试验荷载下，锚-岩界面附加应力沿锚锭轴向分布如图 6 所示。

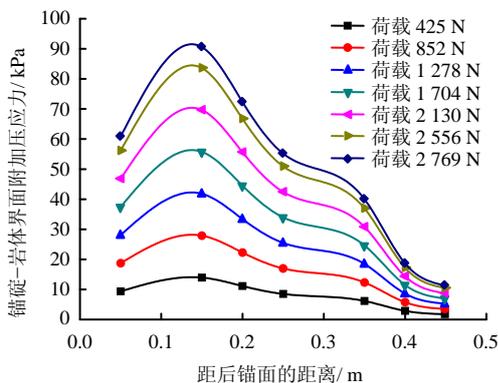


图 6 锚锭-岩体界面附加应力分布

Fig.6 Distribution of additional stress on the interface of anchor plug and rock mass

从锚锭-岩体界面附加应力分布图可知，在拉拔荷载作用下，锚锭-岩体界面附加应力自后锚面向前锚面呈先增后减的变化趋势。且在任意荷载下，

应力峰值均在距后锚面约  $1/3L$  的位置，在前锚面处附加应力基本为 0。

在以往锚锭极限承载力求解中，锚锭-岩体界面附加的挤压应力的贡献是一直被忽略的。而上述结果表明，因拉拔荷载产生的附加挤压应力数值较大，其对锚锭极限承载力的提高作用较显著，不容忽视。

因此，在分析了锚锭-岩体界面附加挤压应力估算方法的基础上，将其纳入锚锭极限承载力的估算中，能在一定程度上改善当前锚锭设计承载力远低于实际承载力的问题，为锚锭工程的优化设计提供理论依据。

### 3 隧道锚的极限承载力计算

#### 3.1 隧道锚的破坏判据

在当前科技条件下，隧道式锚锭最可能发生的破坏类型为沿锚锭-岩体界面的剪切滑移破坏和岩体剪切破坏两种。这两种破坏的本质为岩土体或界面材料自身能提供的抗剪强度小于平衡工程荷载所需的强度，用数学形式表示为

$$\tau_f \geq \tau_{f \max} \tag{10}$$

式中： $\tau_f$  为岩土体的抗剪强度； $\tau_{f \max}$  为岩土体极摩阻力。

岩土材料的法向应力-抗剪强度曲线如图 7 实线所示，抗剪强度与其所处的应力状态有关，但存在极大值，也即极摩阻力，可根据试验获得的  $\sigma-\tau_f$  曲线取值。

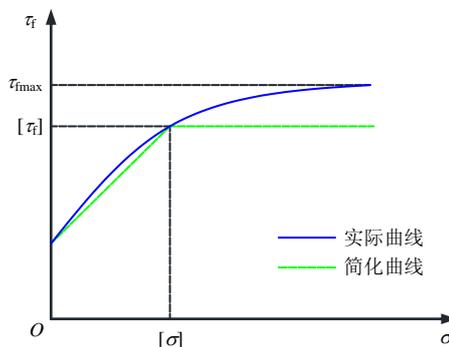


图 7 岩土体的典型  $\sigma-\tau_f$  曲线

Fig.7 Typical stress-shear strength curve of soil and rock

真实的法向应力-抗剪强度曲线表达式较复杂，根据 Mohr-Coulomb 屈服准则对其进行简化，假定其满足图 7 中虚线所示的简化曲线，其对应的表达式为

$$\begin{cases} \tau_f = c + \sigma \tan \varphi, & \sigma \leq [\sigma] \\ \tau_f = [\tau_f] & , \sigma > [\sigma] \end{cases} \quad (11)$$

式中： $[\tau_f]$  为岩土体的容许强度； $[\sigma]$  为容许强度对应的法向应力。

隧道式锚碇的破坏是渐进的，由点及面逐步发生，但只有当破坏区域达到某一比例，系统才会产生不可控的变形并迅速破坏。目前这一破坏区域比例尚无法确定。为保证计算结果的安全性，在此保守地以锚碇抗剪强度最大处达到极摩阻力作为整个锚碇系统破坏的判据。也即，本文认为隧道式锚碇的破坏判据为界面应力达到 $[\sigma]$ 。

### 3.2 隧道式锚碇的极限承载力

前已述及，隧道式锚碇的界面应力主要为锚碇自重产生的应力 $\sigma_G$ 和锚碇-岩体界面挤压产生的附加应力 $\sigma_p$ 两部分，对应的摩阻力为

$$\tau_f = c + (\sigma_G + \sigma_p) \tan \varphi \quad (12)$$

式中： $c$  为锚碇-岩体界面的内聚力； $\varphi$  为锚碇-岩体界面的内摩擦角。

锚碇浇筑后其自重产生的界面法向应力 $\sigma_G$ 即为定值，而附加应力 $\sigma_p$ 则随拉拔荷载的增长而增加直至达到容许应力。根据破坏判据，附加应力的上限值应为

$$[\sigma_p] = \frac{[\tau_f] - c - \sigma_G \tan \varphi}{\tan \varphi} \quad (13)$$

将式(13)代入式(1)、(8)、(9)，即可反推得锚碇-岩体界面各处均达到容许应力 $[\sigma]$ 时，拉拔荷载 $p$ 与坐标 $z$ 的关系，而后代入距后锚面 $1/3L$ 处对应的 $z$ 坐标，即可获得峰值点处满足破坏判据时的拉拔荷载，也即隧道式锚碇的极限承载力。

但因锚碇-岩体界面附加应力的表达式过于复杂，为方便工程设计应用，现根据附加应力分布规律对其进行简化。

图6中揭示的锚碇-岩体界面附加应力在距后锚面 $1/3L$ 处达到峰值，而后呈近线性逐渐降低。因此，假定锚碇-岩体界面附加应力沿锚碇轴向呈如图8所示的单峰三角形分布。

记前锚面中心为计算原点，则锚碇-岩体界面各处的附加应力表达式为

$$\sigma_p(z) = \begin{cases} \frac{3[\sigma_p]}{2L}z, & z \leq \frac{2L}{3} \\ 3[\sigma_p] - \frac{3[\sigma_p]}{L}z, & z > \frac{2L}{3} \end{cases} \quad (14)$$

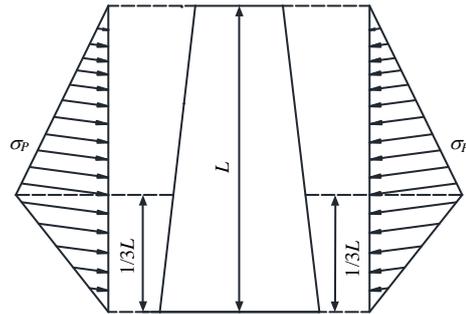


图8 附加应力简化分布模型  
Fig.8 Simplified distribution model of additional interfacial stress

变截面锚碇的等效周长为

$$U(z) = 2 \left( r' + \frac{R' - r'}{L} z \right) \quad (15)$$

则整个锚碇-岩体界面因附加应力产生的挤压力和摩阻力为

$$\left. \begin{aligned} N &= \int_0^L \sigma_p(z) U(z) dz \\ T &= N \tan \varphi \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

在锚碇和岩体相互挤压过程中，锚碇的附加压力、附加摩阻力和附加的拉拔荷载构成平衡力系。也即附加荷载 $P_a$ 、附加挤压力 $N$ 、附加摩阻力 $T$ 满足：

$$P_a = N \sin \beta + T \cos \beta \quad (17)$$

则通过将式(13)代入式(14)，并将式(14)、(15)代入式(16)可得锚碇-岩体界面因附加应力产生的挤压力和摩阻力的表达式，再将结果代入式(17)，并进行恰当的合并化简，可以得出附加应力所能提供的最大抗拔承载力为

$$P_a = (\sin \beta + \tan \varphi \cos \beta) \frac{[\sigma_p] L (280R' - 98r')}{27} \quad (18)$$

而附加应力产生前，锚碇自重能提供的抗拔力 $P_G$ 为

$$P_G = G \sin \alpha + \int (\sigma_G \sin \beta + \sigma_G \tan \varphi \cos \beta + c) ds \quad (19)$$

式中： $G$  为锚碇自重； $\alpha$  为锚碇倾角； $s$  为锚碇-岩体接触面面积。

由此，隧道式锚碇的极限承载力 $P_{ult}$ 为

$$P_{ult} = P_G + P_a \quad (20)$$

需要说明的是，上述隧道式锚碇极限承载力的求解以隧道式锚碇发生沿锚碇-岩体界面破坏为前

提。若锚碇发生围岩内的剪切破坏，且破坏面位置已知，则应将式（14）表征的附加应力的表达式替换为破坏面处附加应力的表达式，此时应考虑重分布应力的贡献。

### 3.3 计算方法的假定条件、影响及定性比较

本文计算方法的破坏判据是假定锚碇-岩体界面抗剪强度最大处达到极摩阻力。这样仍会低估隧道锚的极限承载力，但因为已经将附加挤压应力的贡献考虑进来，是符合隧道锚承载力提高本质的，因此计算的承载力比较接近其真值。附加应力求解所遵从的“地表与锚碇垂直”偏保守地以过散索鞍角点与前锚面平行的平面作为坡面（地表），因而计算深度比真实深度略小，所求得附加应力略小于真实值。

对于锚碇极限承载力的理论推导，目前主要有规范法[9]、考虑围岩压力的极限承载力法[5]和考虑初始应力状态的极限承载力法[8]3种。其中规范法[9]仅考虑锚碇自重产生的抗力，且认为锚碇自重产生的压应力在底滑移面各处相等，严重低估锚碇的极限承载力；文献[5]和文献[8]的两种方法均在规范法的基础上做了改进，但两者也未考虑因锚碇特殊的几何形状会产生附加挤压应力问题。江南[5]侧重于考虑拱效应范围内上覆岩土体产生的对锚碇的压力，并采用围岩压力的计算公式代替该压力值，但

考虑到围岩的自承能力及锚碇浇筑前的岩体稳定条件，采用围岩压力代替该压力值会高估上覆岩体对锚碇的挤压力效应。廖明进等<sup>[8]</sup>则以洞室开挖前的天然应力场估算锚碇极限承载力，忽略了锚碇所处的应力状态对应开挖后重分布后的应力场，这就导致对隧道锚极限承载力提高本质的认识偏差。本文方法考虑了附加应力对承载力的贡献，在前人基础上进一步揭示了隧道锚承载力提高的本质。

## 4 极限承载力计算方法的工程应用

### 4.1 依托工程概况

伍家岗长江大桥<sup>[15]</sup>位于宜昌长江公路大桥上游约 6.3 km，是一座主跨 1 160 m 的钢箱梁悬索桥，建设总里程约 2.6 km。该桥江南侧采用重力式锚碇，江北侧则采用隧道式锚碇，锚固处单锚设计荷载为 220 MN。大桥总体立面布置如图 9 所示。隧道式锚碇工程范围内岩土体按岩性组合情况自下而上可分为 3 段：第 1 段( $K_2^1$ )、第 2 段( $K_2^2$ )、第 3 段( $K_2^3$ )，其中第 2 段( $K_2^2$ )分为 5 层，工程地质剖面图详见图 10。第 3 段主要以砂砾岩和疏松砂岩为主，分布于隧道锚所处山体顶部，与隧道锚工程无直接关系；第 2 段以砂砾岩、砾岩和粉细砂岩为主，为隧道锚鞍室和散索段所处位置；第 1 段以砾岩夹少量粉细砂岩为主，为隧道锚锚固段所处位置<sup>[23]</sup>。

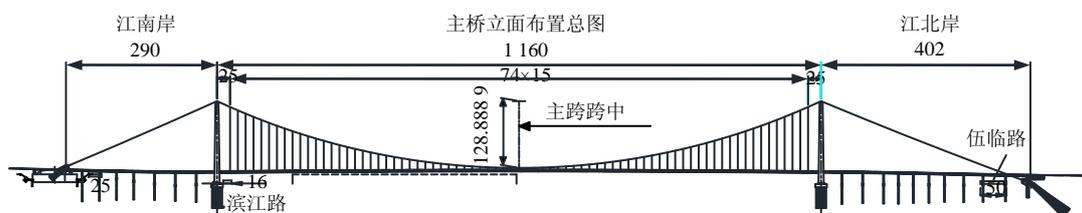


图 9 伍家岗长江大桥总体布置图 (单位: m)  
Fig.9 General layout of Wujiagang Bridge (unit: m)

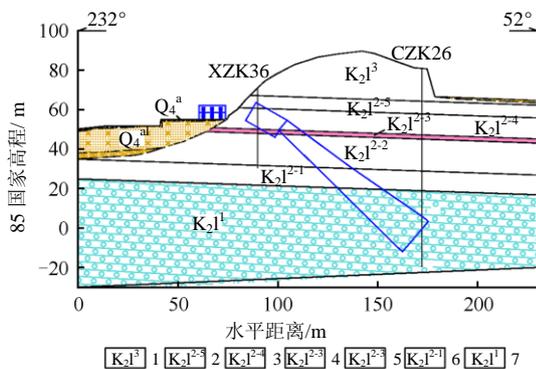


图 10 伍家岗长江大桥工程地质剖面图  
Fig.10 Geological section map of tunnel-type anchorage of Wujiagang Bridge engineering

根据设计及现场平硐试验资料，锚塞体前锚面拱顶直径  $D_1=11.5$  m，直线高度为 12 m，后锚面拱顶直径  $D_2=16$  m，直线高度为 20 m，锚体长度  $L=45$  m，锚塞体轴线与水平面的夹角  $\theta=40^\circ$ 。混凝土重度  $\gamma=25$  kN/m<sup>3</sup>；锚碇-岩体接触面黏聚力  $c=350$  kPa，抗剪摩擦系数  $f=0.6$ ，容许抗剪强度  $[\tau_r]=0.8$  MPa<sup>[23]</sup>。

### 4.2 极限承载力分析

由式（13）~（19）可知，锚碇极限承载力的求解需先确定锚碇自重  $G$  及锚碇各处的自重应力  $\sigma_G$ 。

将锚碇几何尺寸及混凝土重度代入圆台和棱台

体积公式, 容易求得锚碇的总体重力为 328 MN。

采用条分法理念计算锚碇自重应力。以前锚面最高点为界将底滑移面分为 2 部分, 后锚面最低点至分界位置剖分为 10 条, 分界处至底滑移面最高点之间分为 5 条, 则自后锚面最低点至底滑移面最高点间各条块对应的应力分布如图 11 所示。附加挤压应力峰值对应的自重应力为 436 kPa。

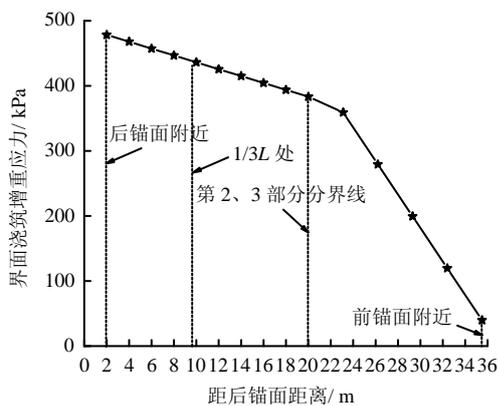


图 11 伍家岗大桥隧道锚自重应力沿锚碇分布  
Fig.11 Distribution of gravity stress of tunnel-type anchorage of Wujiagang Bridge

经等效换算, 前、后锚面的等效半径分别为  $r' = 6$  和  $R' = 17$ 。

将锚碇设计参数及上述数值代入式(13)~(18)得容许附加应力  $[\sigma_p] = 314$  kPa, 则附加应力能提供的最大抗拔承载力为 3 398 MN, 对条分法求得的锚碇各处自重应力求和得锚碇自重能提供的抗力  $P_G$  为 106 MN, 因而伍家岗长江大桥隧道式锚碇的极限承载力为 3 504 MN, 约为 16 倍的设计缆力。若采用规范法<sup>[9]</sup>, 隧道式锚碇的极限承载力为 578 MN, 远低于考虑附加荷载贡献的承载力。

蒋昱州等<sup>[15]</sup>开展的伍家岗大桥 1:40 室内模型试验 4~6 测点的荷载-位移曲线如图 12 所示。

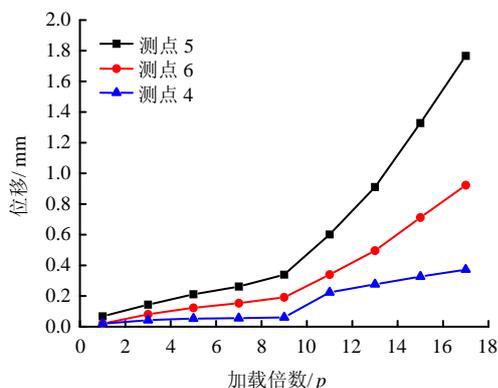


图 12 伍家岗大桥隧道式锚碇荷载-位移曲线<sup>[15]</sup>  
Fig.12 Load-deformation curve<sup>[15]</sup> of tunnel-type anchorage of Wujiagang Bridge

由图 12 可以看出, 伍家岗大桥隧道式锚碇的位移发展分为 1~9 倍设计荷载、9~13 倍设计荷载和 13~17 倍设计荷载 3 个阶段。1~9 倍设计荷载下, 锚碇位移匀速发展; 9~13 倍设计荷载下, 锚碇以更大的增长速率发展; 荷载超过 13 倍设计荷载时, 锚碇增长速率显著增加, 直至 17 倍设计荷载时, 锚碇脱离岩体束缚整体拔出破坏。

也就是说, 室内试验揭示的伍家岗大桥隧道式锚碇的极限承载力在 13~17 倍设计荷载之间, 而推荐公式计算结果为 16 倍的设计荷载, 与试验值基本吻合。

## 5 结论和展望

本文针对当前隧道式锚碇-岩体联合承载机制研究不充分的问题, 从锚碇的传力过程和受力机制入手, 着重分析了锚碇-岩体界面力的构成和锚碇-岩体界面挤压应力的求解方法, 引用 Mindlin 应力解分析了荷载作用下锚碇轴力的分布规律; 通过建立锚块微段平衡方程求解了锚碇-岩体界面附加应力的理论解; 并引入岩土体容许抗剪强度判据推演了隧道式锚碇极限承载力合理简化估算公式, 并应用于伍家岗长江大桥隧道锚工程承载力确定中。所得主要结论有:

(1) 锚碇-岩体界面力主要包括锚碇自重产生和锚碇-岩体相互挤压产生两部分。

(2) 经丽香铁路金沙江大桥试验验证, 荷载作用下锚碇轴力分布可用 Mindlin 应力解表征。

(3) 锚碇-岩体界面附加应力自后锚面向前锚面呈先增后减的变化趋势, 在距后锚面  $1/3L$  处达到应力峰值。

(4) 以容许抗剪强度为破坏判据求得的伍家岗大桥隧道式锚碇的极限承载力为 3 504 MN, 约为 16 倍的设计缆力。室内模型试验揭示的极限承载力介于 13 倍设计荷载和 17 倍设计荷载之间, 理论值与试验值基本吻合。

## 参考文献

- [1] 周孟波. 悬索桥手册[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003.  
ZHOU Meng-bo. Suspension bridge handbook[M]. Beijing: China Communications Press, 2003.
- [2] 雷俊卿. 悬索桥设计[M]. 北京: 人民交通出版社, 2002.  
LEI Jun-qing. Suspension bridge design[M]. Beijing: China Communications Press, 2002.

- [3] 张宜虎, 邬爱清, 周火明, 等. 悬索桥隧道锚承载能力和变形特征研究综述[J]. 岩土力学, 2019, 40(9): 3576-3584.  
ZHANG Yi-hu, WU Ai-qing, ZHOU Huo-ming, et al. Review of bearing capacity and deformation characteristics of tunnel type anchorage for suspension bridge[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2019, 40(9): 3576-3584.
- [4] 张奇华, 余美万, 喻正富, 等. 普立特大桥隧道锚现场模型试验研究——抗拔能力试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(1): 93-103.  
ZHANG Qi-hua, YU Mei-wan, YU Zheng-fu, et al. Field model tests on pull-out capacity of tunnel-type anchorages of Puli bridge[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2015, 34(1): 93-103.
- [5] 江南. 铁路悬索桥隧道式锚碇承载机理及计算方法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2014.  
JIANG Nan. Research on bearing mechanism of tunnel anchorage of railway suspension bridge and its calculation method[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014.
- [6] 汪海滨. 悬索桥隧道式复合锚碇系统作用机理研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2006.  
WANG Hai-bin. Mechanism research on compound tunnel anchorage of suspension bridge[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2006.
- [7] 张奇华, 李玉婕, 余美万, 等. 隧道锚围岩抗拔机制及抗拔力计算模式初步研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(3): 810-820.  
ZHANG Qi-hua, LI Yu-jie, YU Mei-wan, et al. Preliminary study of pullout mechanisms and computational model of pull out force for rocks surrounding tunnel-type anchorage[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(3): 810-820.
- [8] 廖明进, 王全才, 袁从华, 等. 基于楔形效应的隧道锚抗拔承载能力研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(1): 185-192.  
LIAO Ming-jin, WANG Quan-cai, YUAN Cong-hua, et al. Research on the pull-out capacity of the tunnel-type anchorage based on wedge-effect[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(1): 185-192.
- [9] 中交公路规划设计院有限公司. JTG/T D65—05—2015 公路悬索桥设计规范[M]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2015.  
CCCC Highway Consultants Co., Ltd. JTG/T D65—05—2015. Specifications for design of highway suspension bridge[M]. Beijing: China Communication Press Co., Ltd., 2015.
- [10] 夏才初, 程鸿鑫, 李荣强. 广东虎门大桥东锚碇现场结构模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1997, 16(6): 571-576.  
XIA Cai-chu, CHENG Hong-xin, LI Rong-qiang. Testing study on field structure model of the east anchorage of Guangdong Humen Bridge[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1997, 16(6): 571-576.
- [11] 肖本职, 吴相超, 彭朝全. 重庆鹅公岩大桥隧道锚碇围岩稳定性[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(增刊 2): 5591-5597.  
XIAO Ben-zhi, WU Xiang-chao, PENG Chao-quan. Stability of the anchorage wall rock of tunnel for Chongqing Egongyan bridge[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(Suppl. 2): 5591-5597.
- [12] 朱杰兵, 邬爱清, 黄正加, 等. 四渡河特大悬索桥隧道锚模型拉拔试验研究[J]. 长江科学院院报, 2006, 23(4): 51-55.  
ZHU Jie-bing, WU Ai-qing, HUANG Zheng-jia, et al. Pulling test of anchorage model of Siduhe suspension bridge[J]. **Journal of Yangtze River Scientific Research Institute**, 2006, 23(4): 51-55.
- [13] 胡波, 曾钱帮, 饶旦, 等. 锚碇-围岩系统在拉剪复合应力条件下的变形规律及破坏机制研究——以坝陵河特大岩锚悬索桥为例[J]. 岩石力学工程学报, 2007, 26(4): 712-719.  
HU Bo, ZENG Qian-bang, RAO Dan, et al. Study of deformation law and failure mechanism of anchorage-surrounding rock system under tensile-shear complex stresses: taking super-large suspension bridge on Baling river for example[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(4): 712-719.
- [14] 余美万, 张奇华, 喻正富, 等. 基于夹持效应的普立特大桥隧道锚现场模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(2): 261-270.  
YU Mei-wan, ZHANG Qi-hua, YU Zheng-fu, et al. Field model experiment on clamping effect of tunnel-type anchorage at Pu-li bridge[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2015, 34(2): 261-270.
- [15] 蒋昱州, 王瑞红, 朱杰兵, 等. 伍家岗大桥隧道锚三维地质力学模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(增刊 2): 4103-4113.  
JIANG Yu-zhou, WANG Rui-hong, ZHU Jie-bing, et al. Geomechanical model test on global stability for Wujiagang bridge tunnel-type anchorages[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2016, 35(Suppl. 2): 4103-4113.
- [16] 王东英, 汤华, 尹小涛, 等. 隧道式锚碇承载机制的室内模型试验探究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(增刊 2): 4103-4113.

- 刊 1): 2690-2703.  
WANG Dong-ying, TANG Hua, YIN Xiao-tao, et al. Study on the bearing mechanism of tunnel-type anchorage based on laboratory model test[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2019, 38(Suppl. 1): 2690-2703.
- [17] 姚玲森. 桥梁工程(公路与城市道路工程专业用)[M]. 北京: 人民交通出版社, 1990.  
YAO Ling-sen. Bridge engineering (apply to engineering of highway and urban road construction)[M]. Beijing: China Communications Press, 1990.
- [18] 刘佑荣, 唐辉明. 岩体力学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010.  
LIU You-rong, TANG Hui-ming. Rock mechanics[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2010.
- [19] 何春保, 王林彬, 李高扬. 基于 Mindlin 解的矩形均布荷载作用下的附加应力[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(3): 533-539.  
HE Chun-bao, WANG Lin-bin, LI Gao-yang. Stresses induced by vertical rectangular uniform loads within ground based on Mindlin solution[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2018, 40(3): 533-539.
- [20] 何思明, 王成华. 预应力锚索破坏特性及极限抗拔力研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(17): 2966-2971.  
HE Si-ming, WANG Cheng-hua. Study on failure characteristics and ultimate pullout force of prestressed cable[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(17): 2966-2971.
- [21] 汪海滨, 高波, 陈凯. 基于 Mindlin 解的预应力锚索荷载-变位关系[J]. 西南交通大学学报, 2005, 40(4): 462-466.  
WANG Hai-bin, GAO Bo, CHEN Kai. Load-deformation relation of prestressed anchor cable based on mindlin solution[J]. **Journal of Southwest Jiaotong University**, 2005, 40(4): 462-466.
- [22] MINDLIN R D. Force at a point in the interior of a semi-infinite solid[J]. **Physics**, 1936, 7(5): 195-202.
- [23] 王东英, 汤华, 尹小涛, 等. 隧道锚抗拔承载力及安全评估方法[J]. 中国公路学报, 2018, 31(9): 95-103.  
WANG Dong-ying, TANG Hua, YIN Xiao-tao, et al. Uplift bearing capacity and safety assessment method of tunnel-type anchorage[J]. **China Journal of Highway and Transport**, 2018, 31(9): 95-103.

#### 上接第 3404 页

- [12] YIN Z Y, JIN Y F, SHEN S L, et al. An efficient optimization method for identifying parameters of soft structured clay by an enhanced genetic algorithm and elastic-viscoplastic model[J]. **Acta Geotechnica**, 2017, 12: 849-867.
- [13] JIN Y F, YIN Z Y, SHEN S L, et al. Selection of sand models and identification of parameters using an enhanced genetic algorithm[J]. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, 2016, 40(8): 1219-1240.
- [14] JIN Y F, YIN Z Y. Enhancement of backtracking search algorithm for identifying soil parameters[J]. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, 2020, 44(9): 1-23.
- [15] CROSTA G B, AGLIARDI F. Failure forecast for large rock slides by surface displacement measurements[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2003, 40(1): 176-191.
- [16] CAO Y, YIN K L, ALEXANDER D E, et al. Using an extreme learning machine to predict the displacement of step-like landslides in relation to controlling factors[J]. **Landslides**, 2016, 13(4): 725-736.
- [17] YAO Y P, HUANG J, WANG N D, et al. Prediction method of creep settlement considering abrupt factors[J]. **Transportation Geotechnics**, 2020, 22(3): 1-8.
- [18] 姚仰平, 祁生钧, 车力文. 高填方地基工后沉降计算[J]. 水力发电学报, 2016, 35(3): 1-10.  
YAO Yang-ping, QI Sheng-jun, CHE Li-wen. Computational method of post-construction settlement for high-fill embankments[J]. **Journal of Hydroelectric Engineering**, 2016, 35(3): 1-10.
- [19] 曹光栩, 宋二祥, 徐明. 碎石料干湿循环变形试验及计算方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2011, 43(10): 98-104.  
CAO Guang-xu, SONG Er-xiang, XU Ming. Study on experiment and calculation method of dry-wet cycle characteristics of rockfills[J]. **Journal of Harbin Institute of Technology**, 2011, 43(10): 98-104.
- [20] 施建刚, 李俊明. 数字地价模型建立过程中的插值方法研究——以上海内环线地区为例[J]. 土木工程学报, 2007, 40(1): 90-94.  
SHI Jian-gang, LI Jun-ming. A study on interpolation techniques in the Digital Land Price Model——the case of Shanghai inner belt-way district[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2007, 40(1): 90-94.