

## 动荷载作用下隧道锚承载性能及影响因素敏感性分析

杨国俊<sup>1,2†</sup>, 张树涛<sup>1</sup>, 吕明航<sup>1</sup>, 杜永峰<sup>1</sup>, 唐光武<sup>2</sup>

[1. 兰州理工大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730050;

2. 桥梁工程结构动力学国家重点实验室(招商局重庆交通科研设计院有限公司, 重庆 400060)]

**摘要:**为了更加合理地评价悬索桥隧道式锚碇的承载能力,探究隧道锚在动荷载作用下的失效过程,借助有限差分软件建立数值模型,提取并分析接触面应力应变分布形式,并与静力作用下结果进行对比,建立不同工况研究锚塞体参数与动荷载参数对承载力的影响。研究结果表明,动荷载作用下,锚岩接触面应力与位移分布形式与静载类似,但幅值与增长速率明显大于静载状态,拱顶方向和右拱脚向位移增加幅度分别达到36%和112%,且二者在7倍静力荷载幅值作用下,达到其位移差异变化的“门槛值”0.30 mm;动荷载作用下,隧道锚的极限承载力随着锚塞体扩展角、长度以及间距的增加均有所增加,其几何参数敏感性排序由高到低为锚塞体长度、锚塞体扩展角、锚塞体间距,动荷载频率对承载力的影响较小,动荷载作用下隧道锚极限承载力出现明显降低,平均降低幅度约为21%。动荷载作用下隧道锚承载性能及影响因素的敏感性分析为实际工程中隧道锚极限承载力的优化设计提供了参考。

**关键词:**桥梁工程;隧道锚;极限承载力;Mindlin 应力解;动荷载

**中图分类号:**U448.25      **文献标志码:**A

## Analysis of Tunnel-type Anchorage Bearing Performance and Sensitivity of Influencing Factors under Dynamic Load

YANG Guojun<sup>1,2†</sup>, ZHANG Shutao<sup>1</sup>, LÜ Minghang<sup>1</sup>, DU Yongfeng<sup>1</sup>, TANG Guangwu<sup>2</sup>

[1. School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;

2. State Key Laboratory of Bridge Engineering Structural Dynamic (China Merchants Chongqing Communications Technology Research & Design Institute Co., Ltd.), Chongqing 400060, China]

**Abstract:** To more reasonably evaluate the bearing capacity of the suspension bridge tunnel-type anchorage (TTA) and explore the failure process of these TTAs under dynamic loads, a numerical model is established using finite difference software. This involves extracting and analyzing the forms of stress and strain distribution on the contact surfaces and comparing them with results obtained under static loads. The research is further extended to establish the impact of various working conditions, examining the anchoring mass and dynamic load parameters that

\* 收稿日期:2023-11-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51808274, 52168042), National Natural Science Foundation of China (51808274, 52168042); 甘肃省科技计划资助项目(22JR5RA250), Science and Technology Program of Gansu Province (22JR5RA250); 中国博士后科学基金资助项目(2019M653897XB), China Postdoctoral Science Foundation (2019M653897XB)

作者简介:杨国俊(1988—),男,甘肃临夏人,兰州理工大学副教授,硕士生导师,工学博士

† 通信联系人,E-mail: yanggj403@163.com

affect the bearing capacity. The results indicate that under dynamic load, the stress and displacement distribution patterns on the rock-anchor contact surface are similar to those under static loads. However, both the amplitude and the rate of increase are significantly higher than in the static load condition. The increase in displacement in the direction of the arch crown and the right arch foot reach 36% and 112%, respectively. At 7 times the amplitude of the static load, the displacement difference between the two reaches a “threshold value” of 0.30 mm. Under dynamic loading, the ultimate bearing capacity of TTA increases with the expansion angle, length, and spacing of the anchor plug. The sensitivity ranking of these geometric parameters from high to low is anchor plug length, anchor plug expansion angle, and anchor plug spacing. The impact of dynamic load frequency on bearing capacity is relatively small. Under dynamic loading, the ultimate bearing capacity of TTA significantly decreases, with an average reduction of about 21%. The sensitivity analysis of TTA bearing performance and influencing factors under dynamic loads provides a reference for the optimal design of TTA ultimate bearing capacity in practical engineering.

**Key words:** bridge engineering; tunnel-type anchorage; ultimate bearing capacity; Mindlin stress solution; dynamic loads

悬索桥在面对复杂山谷河流地形时具有显著优势,而作为承载的关键构件之一的隧道锚因其较高的性价比与环境扰动较小等特点,受到了众多设计者的青睐<sup>[1-2]</sup>.隧道锚的结构形式呈现为上窄下宽的锥形体,这种独特的结构形式给隧道锚带来巨大承载力的同时也决定了其承载特性复杂.尽管近年来诸多学者在静力条件下进行了大量的现场试验<sup>[3-6]</sup>与室内试验<sup>[7-8]</sup>,对隧道锚从工作至破坏的过程进行了充分的论述,对其承载力进行了一系列的公式推导<sup>[9-13]</sup>,实际工程中,主缆缆力受到桥面行车、风雨等荷载的影响,无时无刻不在变化,这种变化传递至锚碇后的影响是不可忽略的,因此对于隧道锚动力荷载下的研究具有一定的现实意义.

因为夹持效应的存在,悬索桥隧道锚动力研究的核心问题与静力类似,在于明确锚岩的相互作用过程,重点揭示动荷载作用下接触面应力的分布及变化过程,掌握接触面岩体状态变化情况.刘新荣等<sup>[14]</sup>通过运用数字图像技术,研究了隧道锚承载过程中的岩体裂纹萌发开展过程,对隧道锚的渐进破坏全过程进行了详细的阐述.王东英等<sup>[15]</sup>则通过有限差分软件,借助边坡滑面搜索方法,对锚岩破坏面的产生进行了追踪.李明等<sup>[16]</sup>模拟了地震作用下锚塞体对于主缆动张拉荷载的响应.颜冠峰等<sup>[17]</sup>对隧道锚在地震荷载下各处的大小主应力以及隧道锚与隧道的力学响应异同进行了研究分析.抗拔桩作为

结构形式和受力与隧道锚相近的构件,其理论与研究方法具有重要的借鉴意义,范书立等<sup>[18]</sup>建立了循环荷载下斜向抗拔桩的计算模型,并最终确定了循环荷载作用下的承载力.乔东生等<sup>[19]</sup>则通过建立拖曳锚有限元模型,并引入循环强度模型概念,揭示了循环次数对极限抗拔力的影响规律.

现阶段隧道锚仍具有巨大的承载潜力待挖掘,能实现在满足工程要求的条件下尽可能地降低成本这一目的.以往研究已经表明,影响隧道锚承载力的因素一方面在于桥址的地质条件,这部分因素在选定地点后就无法改变,另一方面则在于隧道锚本身的几何参数<sup>[20-22]</sup>,这些参数是可以择优选取的,因此根据不同因素的影响程度来选取适合参数是降低造价的合理手段.但目前众多学者对于锚塞体参数的研究集中在静力破坏阶段,且没有在统一标准的情况下衡量其影响程度.

以上研究分析表明,现阶段对隧道锚在动力荷载作用下破坏模式研究较少.因此本文将动荷载的施加作为研究的基础,以锚岩接触面应力的产生与变化作为研究的出发点,探究动荷载作用下,与静载相比隧道锚位移等响应的异同点;提取并分析承载后各阶段的状态变化,得到隧道锚动荷载作用下的工作过程与破坏形态;在此基础上,进一步建立各种工况来分析锚塞体长度、间距、扩展角等几何因素以及动荷载参数对承载能力的影响.

## 1 隧道锚动荷载作用下的应力解答

隧道锚所受载荷主要从主缆传递而来,而主缆力又由静载和动载组成,主缆静载可直接采用设计荷载代表,因此将静力荷载 $P_0$ 取为101 202 kN,并在此基础上逐步变化.但主缆所传递的动荷载值近年很少有人研究,要想合理准确地获得隧道锚在动载作用下的响应情况,就必须选取适合的动荷载时程曲线.目前对于隧道锚所受主缆动荷载并无明确表示方法,主要存在以下两种人工合成的方式,分别为正弦函数振动形式与随机振动分布形式<sup>[16]</sup>.本文主要采用第一条动荷载人工合成方式,具体动荷载求解推导过程如下.

悬索桥正常使用过程中,主缆传递至锚碇的荷载是变化的,在受到风雨荷载、桥上行车等荷载作用时,主缆缆力会产生随时间变化并在一定均值范围内的波动.因此隧道锚接触面应力不会仅仅包括上述两种,本文在前人研究基础上,对隧道锚应力分布情况进行进一步延伸,考虑到锚塞体所受动荷载影响,对其动荷载形式以及动荷载作用下的应力分布进行理论与模型研究.主缆缆力是随时间变化的波动函数,但由于悬索桥自重及二期铺装等恒载作用,且在一定时间内,桥上车辆所带来的静载都是定值,因此缆力波动的中值应与主缆缆力的静载部分保持一致,波动部分则是随时间变化的动荷载.因此本文采用正弦函数形式模拟缆力波动,由此可知动荷载不是一定值,如式(1)所示.

$$P(t) = P_d \sin(\omega t) + P_0 \quad (1)$$

$$P_d = P_k + P_g \quad (2)$$

式中: $P_0$ 为缆力静载; $\omega = 2\pi f$ ,为主缆原频率, $f$ 为主缆频率,因为缆索为柔性结构,振动频率较小,本文取2 Hz; $P_d$ 为缆力动荷载幅值,动荷载主要来源为桥面行车荷载 $P_k$ 和缆索及桥塔所受静风荷载 $P_g$ .

根据《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015)以及《公路桥梁抗风设计规范》(JTG/T 3360—2018)<sup>[23-24]</sup>,桥面行车荷载幅值及静风荷载幅值可以分别由式(3)、式(4)得到:

$$P_k = \mu(p_k + q_k L) \quad (3)$$

$$P_g = \sum_{i=1}^3 \frac{1}{2} \rho U_{gi}^2 C_{Di} A_{ni} L_{ni} \quad (4)$$

式中: $\mu = 0.45$ ,为汽车冲击系数; $p_k = 360$  kN, $q_k =$

10.50 kN/m,分别为集中荷载和均布荷载标准值; $L = 1 040$  m,为桥梁全长; $\rho = 1.25$  kg/m<sup>3</sup>,为空气密度; $i = 1, 2, 3$ ,分别代表吊索、桥塔、主缆各参数值; $U_g$ 为等效静阵风风速,分别为30.38 m/s、34.79 m/s、34.79 m/s; $C_D$ 为构件阻力系数,分别为0.70、1.60、0.70; $A_n$ 为构件单位长度顺风向投影面积,分别为0.37 m<sup>2</sup>/m、5 m<sup>2</sup>/m、0.52 m<sup>2</sup>/m; $L_n$ 为各构件受载总长度,分别为2 720 m、612 m、1 320 m.由于篇幅原因,上述参数计算过程省略,具体计算过程可以参考相应规范.

将上述参数代入式(1)~式(4),可以得到正弦函数缆力波动,即为动荷载表达式,是随时间波动的周期函数:

$$P(t) = 15 667.2 \sin(\omega t) + 101 202 \quad (5)$$

若将静载部分 $P_0$ 去掉,剩余缆力会以0为中值进行正弦形式的波动,这一波动可以看成一种循环荷载,对锚岩接触面产生的应力也可以通过Mindlin应力解进行解答,因此在此循环荷载作用下,隧道锚静载状态下所受自重应力、附加应力不会变,而会使锚岩截面增加一个动应力,这个应力大小应与锚岩界面位置、动荷载频率和幅值有关.

图1为式(6)概化示意图, $N_j$ 、 $N_d$ 、 $G$ 分别为静力荷载、动力荷载及锚塞体自重, $\beta$ 为锚塞体的倾角.

$$\sigma_s = \sigma_G + \sigma_j + \sigma_d \quad (6)$$

式中: $\sigma_s$ 为锚岩接触面接触应力; $\sigma_G$ 为重力产生的接触应力分量; $\sigma_j$ 为静载产生的接触应力分量; $\sigma_d$ 为动载产生的接触应力分量.

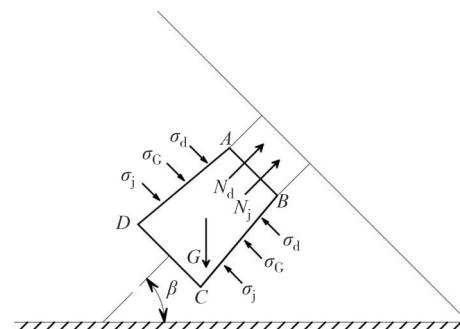


图1 接触应力示意图

Fig.1 Schematic diagram of contact stress

动荷载对于隧道锚承载能力的影响表现为两个方面,首先,动荷载的施加,使锚岩接触部位的岩体在卸荷过程中存在残余应力,在长时间经历循环荷载的过程中,岩体中的残余应力不断叠加至后续的循环过程响应中,其残余应力与应变不断累积,使得

其容许强度降低,最终导致其承载能力的下降;其二,在动荷载的作用过程中,虽然动荷载作用是长时问不断变化的,但由于动荷载幅值仅约为静载幅值的15%,因此动荷载对于岩体性质影响不大,对承载力的影响是通过在原有应力基础上增加一部分动应力,而使得在较低静载作用下即达到岩体的容许强度值,进而导致隧道锚的承载失效.以上两种情况可以看作动荷载对于隧道锚承载能力影响的两种极端情况,实际承载过程中,隧道锚受动荷载影响应介于两种情况之间.因此通过有限差分软件建立模型,提取隧道锚在动荷载作用下锚岩接触面的应力等响应分布,以验证上述情况的合理性.

## 2 动荷载作用下锚岩系统承载特性分析

本模型依托云南普立特大桥隧道锚工程,根据表1普立特大桥隧道锚锚区岩体主要物理力学参数

表1 普立特大桥岩体物理力学参数建议值

Tab. 1 Suggested values for the physical and mechanical parameters of the rock mass of the Puli Bridge

岩体类别	岩体名称	天然重度/ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	单轴饱和抗压强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	容许承载 力/MPa	抗剪强度/MPa	泊松比	混凝土与基 岩摩擦系数
V	灰岩(强风化溶蚀带)	26.00	55	0.40	2	0.70	0.24	0.57
IV	灰岩(中风化溶蚀带)	26.50	60	0.70	3	0.85	0.22	0.60
III	灰岩(微风化溶蚀带)	27.50	112	1.50	5	1.00	0.20	0.65
V	白云岩(强风化溶蚀带)	25.50	50	0.50	2	0.60	0.25	0.55
IV	白云岩(中风化溶蚀带)	26.50	55	0.80	3	0.75	0.23	0.60
III	白云岩(微风化溶蚀带)	27.00	88	1.50	4	0.95	0.22	0.65

表2 模型计算参数

Tab. 2 Model calculation parameters

材料	重度/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	体积模量/MPa	剪切模量/MPa	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)	抗拉强度/MPa
围岩	28	20 000	14 500	1.05	37	0.53
锚塞体	26	18 100	13 500	—	—	—

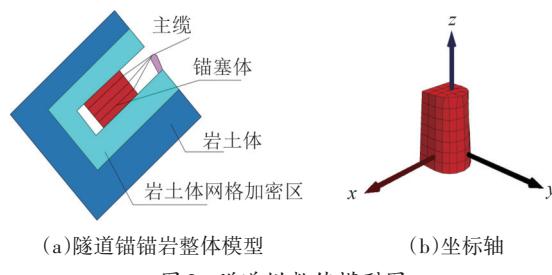


图2 隧道锚数值模型图

Fig.2 Numerical model of tunnel-type anchorage

图3(b)为接触面数值模型图,表3为接触面模型具体参数值,模型因锚塞体产生的附加应力仅受

表,将模型中岩体看作理想弹塑性材料,进行参数等一化处理,主要反映主体岩体的性质,所得数值模型的计算参数见表2.图2(a)为所建模型图.

采用有限差分软件建立锚岩数值模型时,周围岩体采用莫尔-库仑模型,锚塞体采用弹性模型,模型计算中需设置边界条件和接触面模型,故应力边界条件采用四周自由场边界条件,底部为静态边界,实际工程中锚塞体与岩体之间的胶结面可以通过有限差分软件中的interface单元进行模拟,如图3(a)所示,为接触面的力学模型图.图中S为滑块,T为抗拉刚度,L<sub>m</sub>与L<sub>n</sub>分别为与相应节点的连接长度,k<sub>s</sub>与k<sub>n</sub>分别为接触面的剪切刚度与法向刚度,可由式(7)计算得到.

$$k_n = k_s = 10 \max \left[ \frac{\left( K + \frac{4}{3} G \right)}{\Delta z_{\min}} \right] \quad (7)$$

式中:K为体积模量;G为剪切模量,Δz<sub>min</sub>为接触面法向方向上连接区域上最小尺寸.

表1 普立特大桥岩体物理力学参数建议值

Tab. 1 Suggested values for the physical and mechanical parameters of the rock mass of the Puli Bridge

到荷载本身影响,因此本节仅探究动荷载对于隧道锚的影响不考虑其他因素来建立模型,其余按照普立特大桥边坡实际工程地质条件及锚岩参数设置.

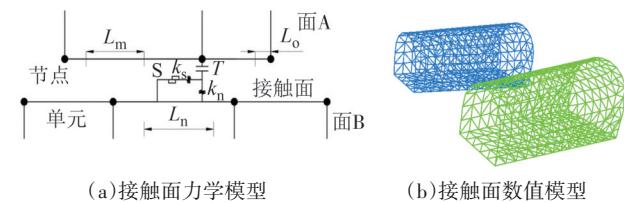


图3 接触面力学与数值模型图

Fig.3 Contact surface mechanics and numerical model diagram

表3 接触面模型参数

Tab.3 Contact surface model parameters

黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)	法向刚度/(N·m <sup>-1</sup> )	剪切刚度/(N·m <sup>-1</sup> )
3	37	5×10 <sup>8</sup>	5×10 <sup>8</sup>

## 2.1 动荷载作用下锚岩接触面响应分析

缆索在外部荷载影响下会产生各个方向的振动,但可以分解到x,y,z三个坐标方向进行研究,如图2(b)所示,z方向对应主缆拉力方向,x方向对应垂直于主缆指向侧壁方向,y方向对应垂直于主缆指向拱顶方向,其中z方向为拉力方向,即为主要振动方向,其余两方向动荷载幅值会进行相应的折减,加载方式采用静载与动荷载分别施加的方式,即在静载基础上施加动载,由此可以看出动荷载施加后的应力增量情况。

图4为动静荷载作用下锚岩接触面应力分布情况。在施加低幅值的荷载时,动荷载施加后的拱顶接触面处应力分布与仅施加静载相比较小,直到荷载幅值施加至7P<sub>0</sub>时,动静荷载应力分布开始出现差异,距前锚面25 m处,动荷载施加后的应力值开始大于静载时该处的应力值,通过提取隧道锚拱顶围岩塑性区发展情况,可知部分围岩此时已经进入了塑性状态,说明在动荷载作用下产生了较为明显的残余应力。继续增大荷载施加幅值,动荷载作用下产生的残余应力也随之增大,并且可以看出应力的差异由锚塞体5/6处逐渐向前锚面处扩大,说明此时的塑性区也由后锚面附近逐渐向前锚面处延伸。

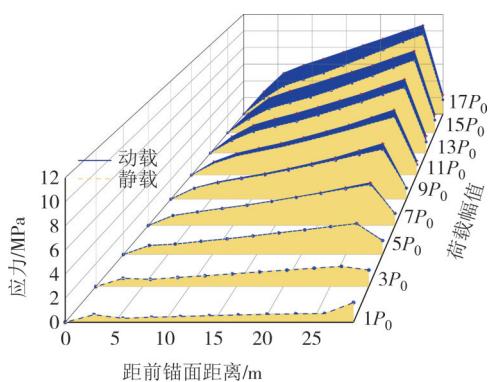


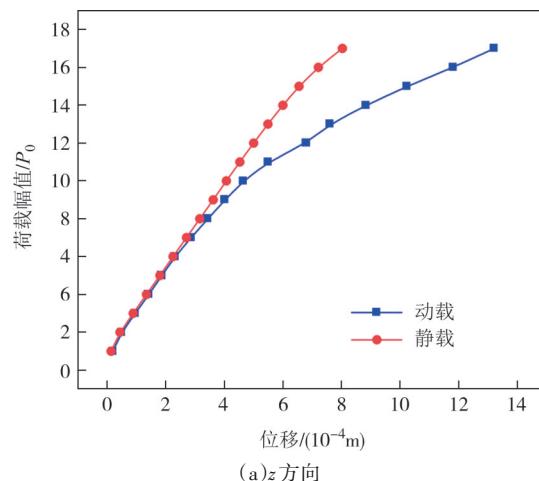
图4 动静荷载作用下拱顶应力图

Fig.4 Stress diagram of the arch crown under dynamic and static loads

通过接触面应力分布对比图,可以得到锚岩接触面的塑性区分布及开展情况,但隧道锚整体变形情况无法得到直观的体现,因此采用有限差分软件

切片功能,提取出锚岩接触部位在各幅值作用下的位移极大值点,绘制动静荷载作用下位移对比图,如图5所示。图4和图5中所表示的动荷载其实表示的是考虑汽车和风荷载与静力荷载( $P_0$ )相复合的一种荷载,具体表示为复合荷载(图中动载)=静力荷载 $P_0+0.15P_0$ ,这种复合荷载其实是静力荷载与推导的动力荷载叠加的一种荷载,为方便表述称该荷载为动载。但在大跨度悬索桥的实际工程中的运营阶段,隧道锚的受力不只是会受到缆力的静力作用,更多的是受汽车及风荷载共同作用下与缆力叠加的作用,故此图中动载表示的是一种复合作用。由于隧道锚自身结构特性及相关规范要求,需保证隧道锚在各种极端荷载作用下留有足够的安全冗余度,因此对于其计算范围选择较为广泛。根据图4和图5的分析,动载曲线在荷载幅值达到一定程度后开始偏离静载曲线。在低幅值荷载作用下,动荷载后的拱顶接触面应力分布较静载时小,导致两者位移差异不明显。然而,当荷载幅值增至7P<sub>0</sub>时,动静荷载的应力位移分布开始显现差异。在距离前锚面25 m处,动荷载后的应力值超过静载时的值,引起动荷载位移与静载位移的逐渐偏离。分析隧道锚拱顶围岩的塑性区发展情况显示,部分围岩已进入塑性状态,表明动荷载作用下产生了显著的残余应力。在7P<sub>0</sub>幅值下,动荷载的应力位移与静载作用下的应力位移出现差距,塑性区也从后锚面附近逐渐向前锚面处扩展。这一现象解释了静载与动载之间显著差异的产生,而这一差异在7P<sub>0</sub>幅值处尤为明显。其差异出现值在7P<sub>0</sub>幅值处。

因为荷载沿z轴施加,因此z方向位移要显著大于x和y方向,低荷载幅值阶段,静载位移与荷载基



(a) z方向

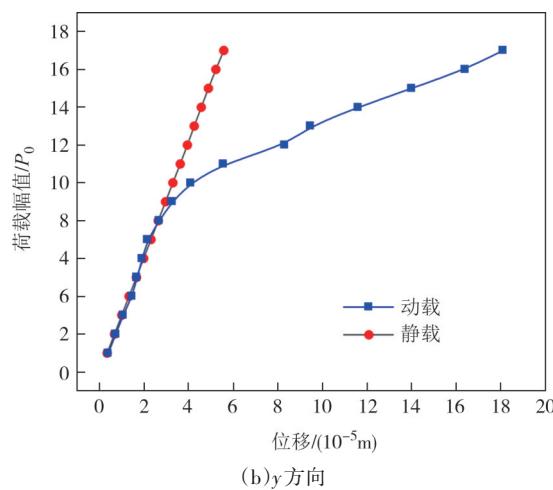


图5 动静荷载作用下最大位移图

Fig.5 Diagram of the maximum displacement under dynamic and static loads

本保持线性关系,直至 $11P_0$ 左右,曲线出现拐点,并开始出现非线性发展趋势,说明此时已经进入塑性状态;相较于静载作用,动荷载位移曲线在 $7P_0$ 处出现明显拐点, $7P_0$ 之后位移随荷载幅值的增加而迅速增加,在 $11P_0$ 时,动荷载 $z$ 方向位移相比于静载时增加了36%, $y$ 方向位移则增加了112%,说明隧道锚在 $y$ 方向上的动荷载敏感程度更大。

位移沿拱顶分布情况如图6所示,在各级荷载幅值作用下,拱顶接触面位移存在较大差异,为了更好地分析位移沿拱顶分布的规律,对接触面的竖向位移 $w(x)$ 与距前锚面的距离 $x$ 进行了归一化处理,得到 $w(x)/w_m$ 与 $x/L$ 的关系曲线,其中, $w_m$ 为拱顶处竖向位移最大值, $L$ 为锚塞体轴向长度。

由图6可知,在各荷载幅值作用下,拱顶处竖向位移分布特征基本一致,整体位移呈现三段式分布,

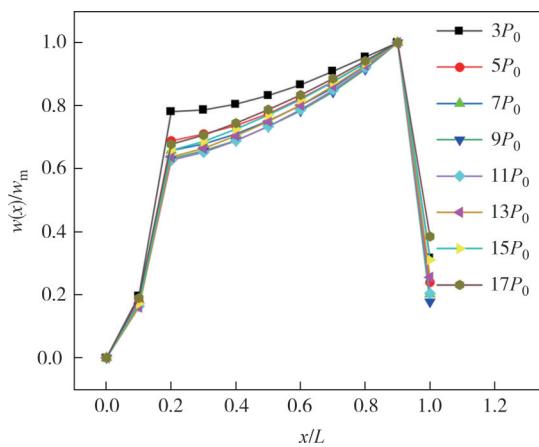


图6 动荷载作用下拱顶处位移分布图

Fig.6 Displacement distribution map of the arch crown under dynamic load

从前锚面至后锚面位移幅度先增加后减小,第一个拐点出现在锚塞体 $1/5$ 处,峰值点则出现在锚塞体 $9/10$ 处。动荷载作用下位移分布和应力分布形式上存在一致性,且与静载作用下的位移分布基本相同。

## 2.2 锚岩接触面阶段状态分析

上文分析得到锚岩接触面应力及位移分布情况,可以明显看出, $7P_0$ 幅值动荷载作用下,动静荷载响应出现较大差别,说明锚岩接触部位开始进入塑性状态,但无法判断这一状态产生的原因,如果在 $7P_0$ 静载作用下塑性区就已经产生,那么动荷载的作用仅仅就是加快残余应力的积累,这种改变是由于“荷载”本身引起的;另一种原因则是由于“动力”这一因素引起隧道锚提前进入塑性状态,因此要想准确了解动荷载对于隧道锚的影响方式,就要对隧道锚每一阶段的状态进行分析。

由莫尔-库仑强度准则可以知道,在岩土体内部某一面的剪应力超过其本身最大抗剪强度时,岩土体就会发生剪切破坏,同时会产生较大的塑性变形,这一种岩土体状态的改变在有限差分软件中可以采用最大剪应变增量来衡量,增量较大且连成条带状区域的可以视为进入塑性状态。提取锚岩接触面处在各级荷载作用下的剪应变增量最大值点,得到动静荷载作用下荷载幅值与最大剪应变增量的曲线,如图7所示。

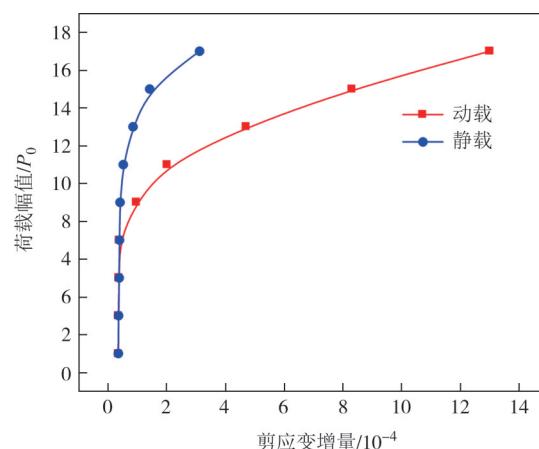


图7 动静荷载作用下剪应变增量图

Fig.7 Shear strain increment diagram under dynamic and static loads

图7中,随着荷载幅值的增加,锚岩接触面的最大剪应变增量也是随之增加的,但较低荷载幅值(约 $1P_0$ 至 $7P_0$ )时期,最大剪应变增量基本不变,且动荷载与静荷载作用效果一致,此外通过图4所示在 $7P_0$ 荷载作用之前并无残余应力产生这一现象,也可以

充分说明在此之前,无论静载还是动荷载作用下,隧道锚锚岩接触面一直处于弹性阶段;当荷载幅值大于 $7P_0$ 之后,静载作用下,增量变化仍较小,但动荷载作用下的应变增量出现了较大变化, $8P_0$ 荷载较 $7P_0$ 荷载,增量增加达到了156%,同时通过剪应变增量云图可得,增量大值区域发生了转变,由后锚室围岩处转移到了后锚面锚岩接触面处,说明此时这一区域率先出现了塑性,而接触面其他部位尚未出现。

图8为同一荷载幅值下动静荷载作用下的塑性区发展程度对比图。静载作用下,荷载幅值达到 $11P_0$ 时,右侧接触面才开始出现塑性区,而动荷载作用下 $7P_0$ 时就已经产生塑性,两种情况下荷载幅值相差 $4P_0$ ,而本文施加设计动荷载幅值约为静载幅值的0.1倍,因此此时动荷载幅值仅为 $0.70P_0$ ,远达不到 $4P_0$ 这一限值。同时,从刚产生塑性区的发展程度可得,静载作用下,第一次出现塑性区的范围分别为距后锚面0.30 m和4.30 m,而动荷载作用下第一次出现塑性区则已经达到距后锚面8.20 m和8.50 m处,说明即便在静载基础上增加了动荷载,整体荷载的幅值相较于静载有所增加;塑性区贯通整个接触面时,静载的荷载幅值为 $20P_0$ ,而动荷载仅为 $14P_0$ ,此时动荷载幅值为 $2P_0$ 。

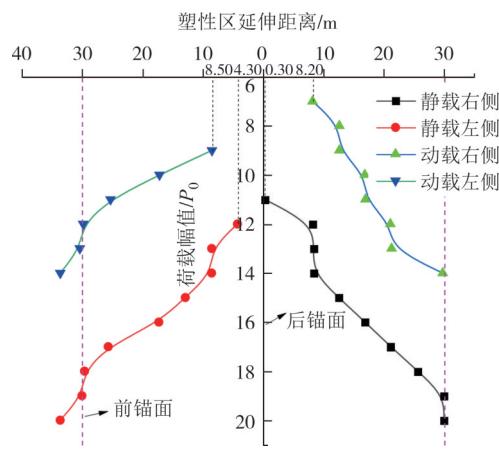


图8 动静荷载作用下塑性区发展程度对比图

Fig.8 Comparison of the degree of development of the plastic zone under dynamic and static loading

以上结果表明,在动荷载作用下,隧道锚围岩的容许承载力已经发生了改变。由于围岩内部本身存在着一些初始裂纹与空隙,而这些裂纹和空隙存在着在动荷载作用下发生屈服破坏的“门槛值”<sup>[25]</sup>,在动荷载的循环往复作用下,围岩内部部分较低“门槛

值”的初始裂纹与空隙率先发生屈服,而在相同幅值静载作用下尚未达到岩体的抗压强度,因此在动荷载作用下塑性区的产生和发展较静载会更加明显,进而呈现出承载能力降低这一现象。

### 3 动荷载承载力影响因素分析

上述内容阐述了动静载作用下锚岩响应的异同点,为进一步研究动荷载对隧道锚的影响程度,从锚碇几何特征与动荷载参数两方面分别进行探讨。

首先动荷载作用下隧道锚的几何参数对承载力的影响,从锚塞体扩展角、锚塞体长度以及锚塞体间距三个方面共6个工况进行建模分析,如表4所示。

表4 工况参数

Tab. 4 Working parameters

工况	锚塞体扩展角/(°)	锚塞体长度/m	锚塞体间距/m
初始工况	2.86	35	21
工况1	1.50	35	21
工况2	4.00	35	21
工况3	2.86	25	21
工况4	2.86	45	21
工况5	2.86	35	16
工况6	2.86	35	26

#### 3.1 锚塞体扩展角对承载力的影响

计算得到不同扩展角影响下静力与动力加载对比曲线,如图9所示。当锚塞体扩展角 $\alpha$ 分别为 $1.80^\circ$ 、 $2.86^\circ$ 和 $4.00^\circ$ 时,静力加载下的极限承载力分别为 $1720.50\text{ MN}$ 、 $1922.80\text{ MN}$ 和 $2024\text{ MN}$ ,动力加载下的极限承载力分别为 $1365\text{ MN}$ 、 $1516.80\text{ MN}$ 和 $1567\text{ MN}$ 。动荷载作用下的极限承载力与静载作用下类似,会随着锚塞体扩展角的增加而增加。对比动静加载下的极限承载力可以发现,与静载极限承载力相比,动荷载承载力分别降低了 $20.66\%$ 、 $21.12\%$ 、 $22.58\%$ ,平均降低了 $21.45\%$ ,说明由于动荷载的循环往复作用,锚岩接触面岩体自身容许承载力降低,且在锚塞体扩展角较小的时候降低幅度更大,达到了 $20.66\%$ 。

从图10可得,动力加载下,锚岩接触面位移随着荷载的增加是不断增大的,在荷载一定的情况下,接触面位移随着扩展角的增加而减小,说明承载力随着扩展角的增加是增大的。随着动荷载的增大,z方向位移增加速率随之增大,x方向虽然整体位移小于z方向,但速度增加比率更大。

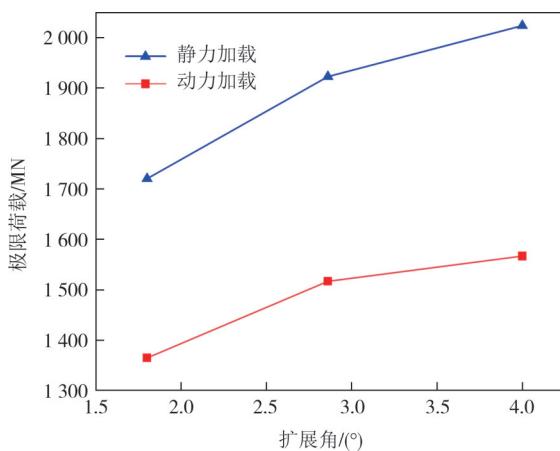
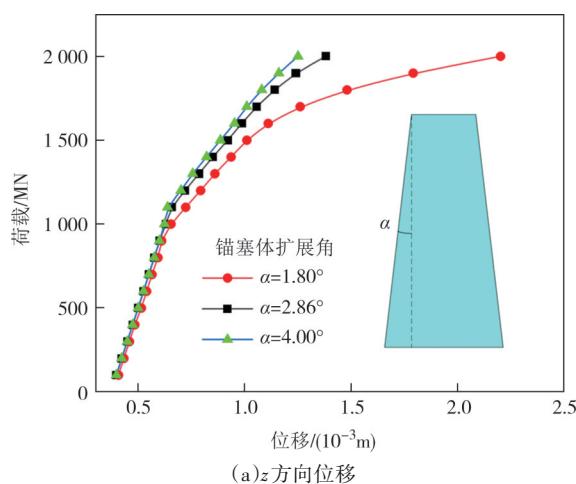
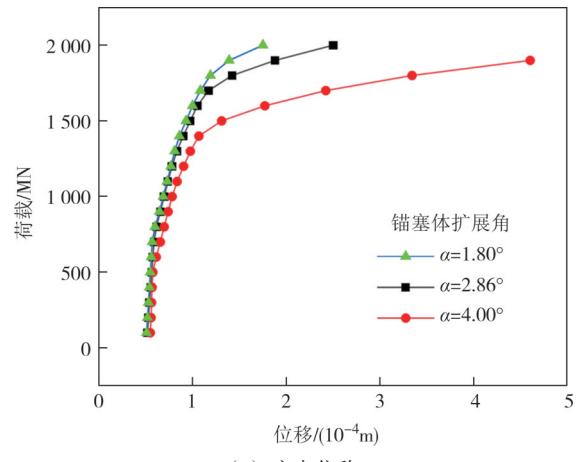


图9 扩展角与隧道锚极限承载力的关系图

Fig.9 Relationship between extension angle and ultimate bearing capacity of the TTA



(a) z方向位移



(b) x方向位移

图10 扩展角对动荷载承载力影响曲线图

Fig.10 Influence of extension angle on dynamic load bearing capacity curve

### 3.2 锚塞体长度对承载力的影响

选择锚塞体长度分别为 25 m、35 m、45 m 三种工况, 进行长度对动荷载极限承载力影响的研究。如

图 11 所示, 三种不同工况下, 静力加载下的极限承载力分别为 1 518 MN、1 922.80 MN、2 327 MN, 动力加载下的极限承载力分别为 1 315 MN、1 516.80 MN、2 226 MN。随着锚塞体长度的增加, 无论是静力加载还是动力加载情况下的隧道锚极限承载力都是增加的, 静力加载下, 锚塞体承载力与长度的关系曲线近似线性, 而动力加载下, 承载力增加的幅度更大, 最大幅度出现在长度由 35 m 增加至 45 m 这一阶段, 承载力增加幅度达到 46.76%。同时也可得, 动荷载承载力相比静载有所降低, 三种工况下分别降低了 13.37%、21.12% 和 4.30%。

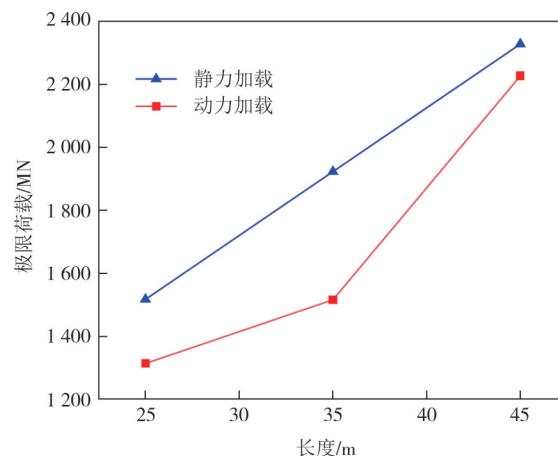


图11 长度与隧道锚极限承载力的关系图

Fig.11 Relationship between length and ultimate bearing capacity of the TTA

由图 12 可知, 动力加载下, 与扩展角类似, 锚岩接触面位移随着荷载的增加而增加, 同时在荷载一定的情况下, 承载力随着锚塞体长度的增加而增大。随着荷载的增加, z 方向位移增加速率逐渐减缓。

### 3.3 锚塞体间距对承载力的影响

图 13 为不同间距下动力与静力加载对比曲线, 共三种不同工况, 锚塞体间距分别为 16 m、21 m、26 m, 计算得到静力加载极限承载力分别为 1 904 MN、1 922.80 MN、1 973 MN, 动力加载条件下分别为 1 500 MN、1 516.80 MN、1 619 MN。改变锚塞体间距对于承载力的影响较小, 静力和动力平均承载力增加分别为 1% 和 4%, 这是因为相比于锚塞体本身桩径, 两锚塞体之间间距过大, 由中部围岩传递的应力较小, 因此群桩效应并不明显。同时可得, 动静加载下极限承载力差距依旧明显, 三种工况下分别降低了 21.22%、21.12% 和 17.94%。

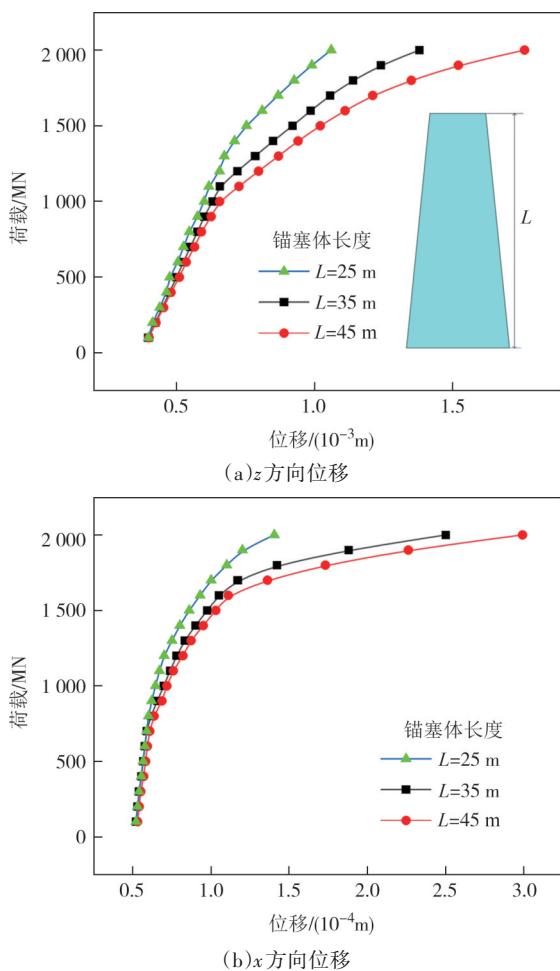


图 12 长度对动荷载承载力影响曲线图

Fig.12 Influence of length on dynamic load carrying capacity curve

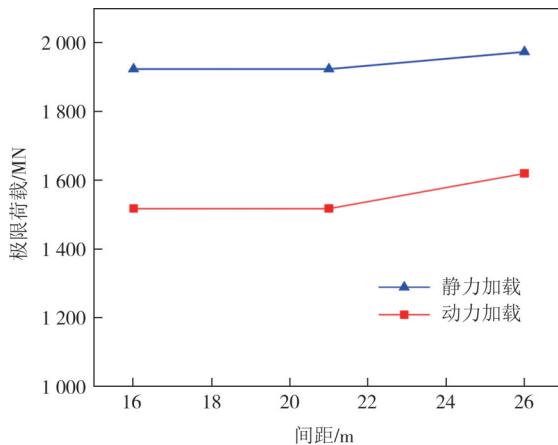


图 13 间距与隧道锚极限承载力的关系图

Fig.13 Relationship between spacing and ultimate bearing capacity of the TTA

从图14可知,与前两种因素类似,动力加载下锚岩接触面位移随着荷载的增加而增加,在荷载一定的情况下,承载力随着锚塞体长度的增加而增大。三种工况下z方向位移差距不大,但x方向位移差异

明显,这是因为锚塞体中部围岩的应力是水平传递的,因此间距对于水平方向应力影响较大。

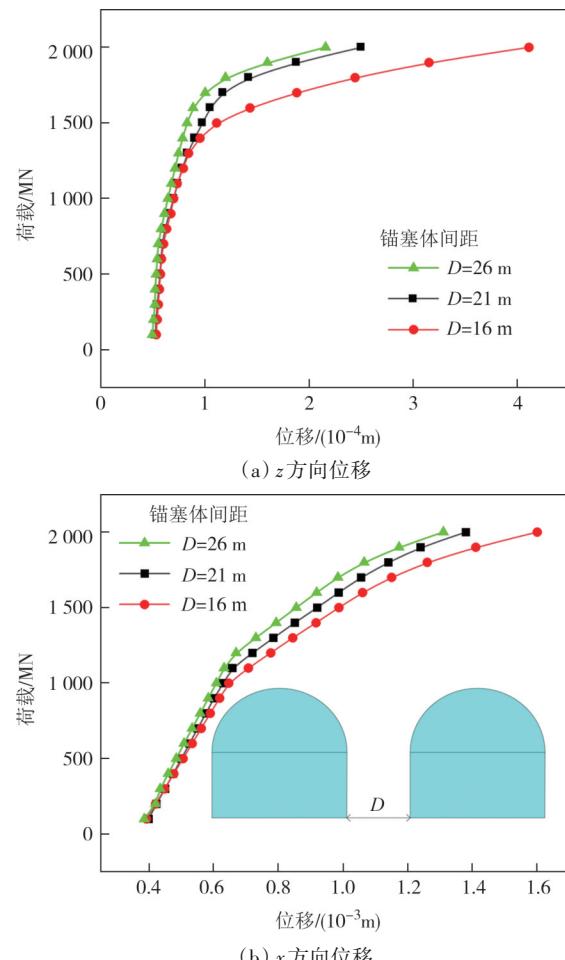


图 14 间距对动荷载承载力影响曲线图

Fig.14 Influence of spacing on dynamic load carrying capacity curve

### 3.4 几何参数归一化处理

如图15所示,为了更好地分析各因素对隧道锚承载能力的影响程度,对各工况下锚塞体的几何参数 $I_i$ 和围岩位移 $w_i$ 进行了归一化处理,经过线性拟合后得到了 $I_i/I_0$ 与 $w_i/w_0$ 的关系曲线,其中, $I_i$ 为各工况变化参数值, $i = 1, 2, 3; I_0$ 为初始工况各参数值. $w_i$ 为各工况下围岩位移值, $i = 1, 2, 3; w_0$ 为初始工况围岩位移值.各几何参数对于隧道锚承载能力影响存在差异,拟合后得到三条曲线的斜率值分别为 $k_1 = -0.76, k_2 = -0.89, k_3 = -0.44$ ,说明锚塞体长度对承载能力的影响最大,其次为锚塞体扩展角,锚塞体间距对承载能力的影响最小.

### 3.5 动荷载参数对承载力的影响

在考虑动荷载参数对承载力的影响之前,首先要明确有哪些动荷载参数,本文将由主缆传递的动

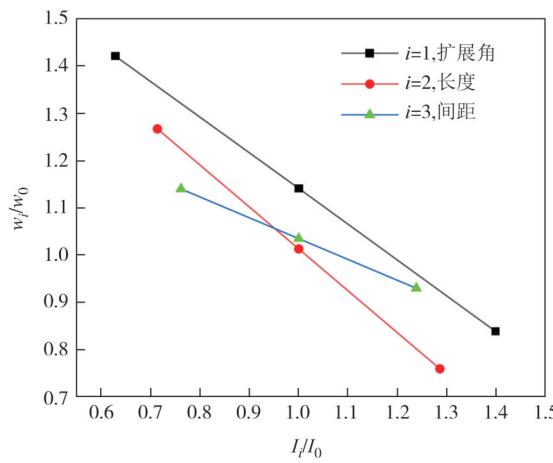


图 15 几何参数影响归一化拟合曲线图

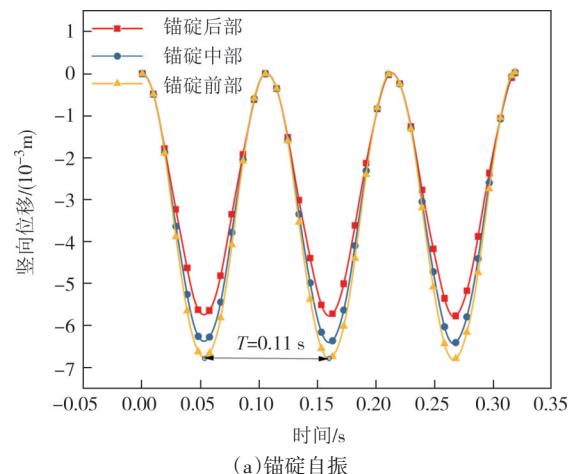
Fig.15 Geometric parameters affect the normalised fitted curve

荷载简化为正弦荷载,如式(5)所示,因此主要考虑的动荷载参数为主缆振动频率 $f$ ,主缆振动频率会影响单位时间内锚岩接触面受到的循环加载次数,从而影响到围岩的容许承载力,因此研究主缆振动频率的变化影响是有必要的。

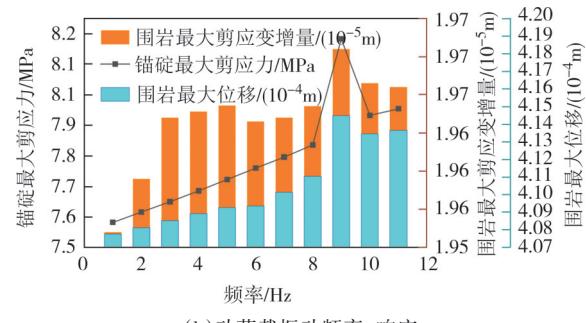
如图 16(a)所示,首先通过设置边界与模型本构参数,使其在仅受重力条件下自由振动,得到锚碇自振频率约为 9 Hz,之后设置频率增加梯度,计算并分别提取主缆振动频率为 1~11 Hz 下,振动幅值为  $7P_0$ (从图 5 中可以看出使围岩产生损伤破坏的“门槛值”约为  $7P_0$ )的锚碇振动响应,得到不同频率下隧道锚各响应随频率增加的变化曲线。

从图 16(b)可得,随着动荷载振动频率的增大,围岩的最大剪应变增量及最大位移也随之增大,且基本呈线性变化,但总体来说变化量很小。这是因为围岩内部的初始裂纹与缝隙,在动荷载的循环往复作用下,初始裂缝会逐渐闭合,产生塑性的变形,且这一过程往往与加载幅值和加载时间有关,本文设置加载时间为 4 s,因此在幅值一定的情况下,频率越大,产生的塑性变形就越多。同时可得,在频率达到 9 Hz 左右时,三种响应都发生了不同程度的突升,这说明在荷载频率接近锚碇自有频率时,会出现“共振现象”,在此频率下,隧道锚的各响应会有一定突变。

岩体受到动荷载循环作用下的损伤破坏一般分为三个阶段<sup>[26]</sup>,从图 16(b)中的响应随振动次数(频率与设置时间的乘积)基本呈现线性发展的趋势可以看出,隧道锚围岩基本仍处于损伤破坏的初始阶段,随着动荷载的持续施加,围岩将会在某一时间发生迅速且大规模的破坏。在实际工程中,虽然主缆引起的振动荷载基本不会达到模拟试验的频率值,但



(a) 锚碇自振



(b) 动荷载振动频率-响应

Fig.16 Anchor response curve with dynamic load frequency

其振动时间会一直持续,因此当振动荷载由于外界因素超过“门槛值”时,振动产生的损伤破坏就会随时间积累下来,此时振动频率增大就会因持续的振动而产生较大影响,所以实际工程中防止发生围岩疲劳损伤破坏的关键在于防止动荷载超过“门槛值”,即尽可能防止超载、偏载等事件的发生<sup>[27]</sup>,其次需要采取适当措施减小锚碇所受动荷载的频率值。

#### 4 动荷载承载力分析

上文第 2.2 节和第 3 节中已经简单分析了动荷载作用对承载力的影响,为了定量分析隧道锚承载力的降低程度,在本研究中定义承载力的降低系数 $\eta$ 为:

$$\eta = 1 - \frac{P_d + kP_d}{P_0} \quad (8)$$

式中: $P_d$  为动荷载施加后达到与  $P_0$  相同状态时的静载幅值,隧道锚所处的状态可以通过位移、应力以及塑性区分布来划分,以塑性区分布的面积作为所处状态的衡量指标,但塑性区面积通常难以准确测量,而塑性区沿垂直于锚碇轴线方向的发展随荷载增加基本不变,因此以塑性区高度代替面积作为隧道锚

状态的衡量指标; $k$ 为动荷载幅值与设计荷载的比值.

降低系数 $\eta$ 为考虑到荷载幅值影响后,动荷载作用下,隧道锚的承载力降低情况,其变化曲线如图17所示,锚塞体左右两侧承载力降低系数曲线起点并不在后锚面,起始塑性区高度分别为8.50 m和8.25 m,这是因为在此之前的动力加载并未产生塑性区,当动荷载分别达到 $7P_0$ 和 $9P_0$ 时(由图8可以得到),左右两侧围岩状态开始发生转变,并在短时间内延伸至一定高度.随着动荷载幅值的增加,承载力降低系数持续增加,岩体塑性区进一步发展,直至塑性区高度达到11.30 m(锚塞体1/3处),此时左右两侧承载力降低系数均达到最大值,分别为0.31和0.43,在此之后,降低系数开始显著下降,这说明从后锚面至锚塞体1/3处的围岩所受动荷载影响更大,与隧道锚夹持作用下所产生的应力分布规律是一致的.当塑性区贯穿整个接触面时,降低系数稳定在0.22附近,左右两侧承载力降低系数平均值分别为0.28和0.26.

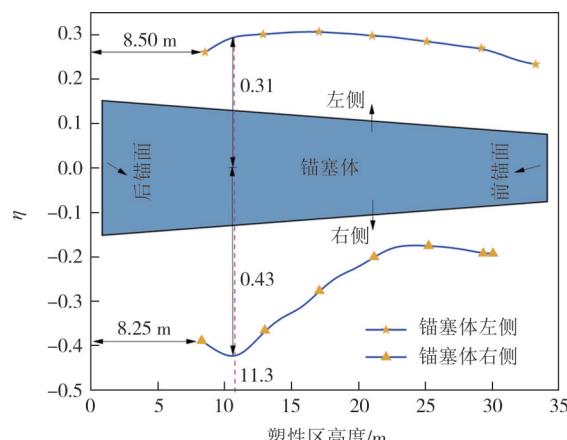


图17 隧道锚承载力降低系数变化曲线图

Fig.17 Variation curve of the TTA bearing capacity reduction factor

## 5 结论

本文通过理论分析和有限差分软件相结合,量化研究了动荷载对锚岩接触面位移、应力、应变增量和塑性区的影响,及其对隧道锚围岩的破坏过程,以及各参数对隧道锚承载力的影响程度,并从塑性区发展状态出发,得到了动荷载承载力降低系数 $\eta$ ,主要结论如下:

1)锚岩接触面应力是静应力和动应力的叠加,

动荷载的循环作用促进了残余应力的积累,并随荷载幅值的增加而增加,其与静动应力差异界限值为 $7P_0$ .

2)动荷载作用下,锚岩接触面应力位移等响应沿锚碇轴向分布形式与静力类似,围岩夹持效应仍存在,动应力分布峰值点同样位于距后锚面1/3总长的范围内,但各响应幅值大小存在差异,随着荷载幅值的增加,静动载的差异随之增加.

3)动荷载承载力的几何参数影响程度排序为:锚塞体长度>锚塞体扩展角>锚塞体间距,且 $z$ 方向总体响应较大;频率是动荷载影响最大的参数,相同加载时间条件下,随着频率增加,围岩最大位移、剪应变最大增量和锚碇最大剪应力都线性增长.在频率达到锚碇自振频率时,出现“共振现象”.

4)静载是围岩产生塑性破坏的主因,动荷载“门槛值”为7倍静力荷载,超过此值会影响围岩承载能力,加速塑性区发展,降低隧道锚极限承载力,相较于静载,动荷载作用下承载力的平均降低幅度约为21%.

下一步工作将通过缩尺试验对动荷载作用下隧道锚承载性能和其影响因素进行对比分析,为优化隧道锚极限承载能力提供参考.

## 参考文献

- [1] 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 Y H, WU A Q, ZHOU H M, 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. (in Chinese)
- [2] ZHANG Q H, LI Y J, YU M W, et al. Study of the rock foundation stability of the Aizhai suspension bridge over a deep canyon area in China [J]. Engineering Geology, 2015, 198: 65–77.
- [3] HAN Y F, LIU X R, LI D L, et al. Model test on the bearing behaviors of the tunnel-type anchorage in soft rock with underlying weak interlayers [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2020, 79(4): 1023–1040.
- [4] WEN L N, CHENG Q G, CHENG Q, et al. Stabilization research of the tunnel-type anchorage of Dadu River bridge in Luding in Yaan to Kangding expressway [J]. American Journal of Civil Engineering, 2017, 5(4): 196–204.
- [5] 王中豪,马健,武文祥,等. 虎跳峡金沙江大桥隧道锚现场模型试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2018, 14(5):1179–1184.  
WANG Z H, MA J, WU W X, et al. Tunnel-type anchorage field model test of Hutiaoxia Jinsha River bridge [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2018, 14 (5) : 1179–1184. (in Chinese)
- [6] 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 M W, ZHANG Q H, YU Z F, et al. Field model experiment on clamping effect of tunnel-type anchorage at Puli Bridge [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(2): 261–270. (in Chinese)
- [7] 王东英, 尹小涛, 杨光华. 悬索桥隧道式锚碇夹持效应的试验研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(4): 1003–1011.
- WANG D Y, YIN X T, YANG G H. Experimental study of the clamping effect of the suspension bridge tunnel-type anchorage [J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(4): 1003–1011. (in Chinese)
- [8] LI Y J, LUO R, ZHANG Q H, et al. Model test and numerical simulation on the bearing mechanism of tunnel-type anchorage [J]. Geomechanics and Engineering, 2017, 12(1): 139–160.
- [9] 张奇华, 李玉婕, 余美万, 等. 隧道锚固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 Q H, LI Y J, YU M W, et al. Preliminary study of pullout mechanisms and computational mode of pullout force for rocks surrounding tunnel-type anchorage [J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(3): 810–820. (in Chinese)
- [10] 江南, 冯君. 铁路悬索桥隧道式锚碇受载破裂力学行为研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(7): 1659–1670.
- JIANG N, FENG J. Damage behavior of tunnel-type anchorages of railway suspension bridges under loading [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(7): 1659–1670. (in Chinese)
- [11] 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 M J, WANG Q C, YUAN C H, 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. (in Chinese)
- [12] 王东英, 汤华, 尹小涛, 等. 基于简化力学模型的隧道锚极限承载力估值公式[J]. 岩土力学, 2020, 41(10): 3405–3414.
- WANG D Y, TANG H, YIN X T, et al. Estimation method of ultimate bearing capacity of tunnel-type anchorage based on simplified mechanical model [J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(10): 3405–3414. (in Chinese)
- [13] JIANG N, WANG D, FENG J, et al. Bearing mechanism of a tunnel-type anchorage in a railway suspension bridge [J]. Journal of Mountain Science, 2021, 18(8): 2143–2158.
- [14] 刘新荣, 韩亚峰, 周小涵, 等. 软岩隧道锚渐进破坏演化特征的模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(9): 1760–1770.
- LIU X R, HAN Y F, ZHOU X H, et al. Model test on the progressive failure characteristics of tunnel-type anchorage in soft rock [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(9): 1760–1770. (in Chinese)
- [15] 王东英, 汤华, 尹小涛, 等. 基于应变软化的隧道锚渐进破坏过程探究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(增刊2): 3448–3459.
- WANG D Y, TANG H, YIN X T, et al. Preliminary study on the progressive failure of tunnel-type anchorage based on strain-softening theory [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(Sup.2): 3448–3459. (in Chinese)
- [16] 李明, 袁晓伟, 陈奇, 等. 隧道式锚碇动张拉荷载响应分析[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2015, 34(2): 24–27.
- LI M, YUAN X W, CHEN Q, et al. Analysis of mechanics response for tunnel anchorage to dynamic tension force from main cable [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2015, 34(2): 24–27. (in Chinese)
- [17] 颜冠峰, 王明年, 范宇, 等. 地震波作用下悬索桥隧道锚力学响应研究[J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15(增刊2): 590–597.
- YAN G F, WANG M N, FAN Y, et al. Research on mechanical behavior of tunnel-type anchorages system under seismic load [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019, 15(Sup.2): 590–597. (in Chinese)
- [18] 范书立, 陈健云, 张俊清. 波浪荷载作用下斜向抗拔桩的承载特性分析[J]. 岩土力学, 2012, 33(1): 301–306.
- FAN S L, CHEN J Y, ZHANG J Q. Research on bearing capacity of inclined uplift pile under wave cyclic loading [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(1): 301–306. (in Chinese)
- [19] 乔东生, 欧进萍. 循环荷载作用下拖曳锚极限抗拔承载力分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2012, 44(12): 112–117.
- QIAO D S, OU J P. Analysis on ultimate pullout bearing capacity of drag embedment anchor under cyclic loading [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2012, 44(12): 112–117. (in Chinese)
- [20] LIU X R, HAN Y F, LI D L, et al. Anti-pull mechanisms and weak interlayer parameter sensitivity analysis of tunnel-type anchorages in soft rock with underlying weak interlayers [J]. Engineering Geology, 2019, 253: 123–136.
- [21] 刘新荣, 李栋梁, 吴相超, 等. 泥岩隧道锚承载特性现场模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(1): 161–169.
- LIU X R, LI D L, WU X C, et al. Filed model tests on bearing behavior of mudstone tunnel anchorage [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(1): 161–169. (in Chinese)
- [22] 杨忠平, 刘树林, 柯炜, 等. 隧道锚尺寸对其承载特性的影响及破坏机理[J]. 地下空间与工程学报, 2017, 13(5): 1234–1241.
- YANG Z P, LIU S L, KE W, et al. Influence of the size of tunnel anchorage on bearing behavior and its failure mechanism [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2017, 13(5): 1234–1241. (in Chinese)
- [23] 公路桥涵设计通用规范: JTG D60—2015[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
- General specifications for design of highway bridges and culverts: JTG D60—2015[S]. Beijing: People's Communications Press, 2015. (in Chinese)
- [24] 公路桥梁抗风设计规范: JTG/T 3360—01—2018[S]. 北京: 人民交通出版社, 2019.
- Wind-resistant design specification for highway bridges: JTG/T 3360—01—2018[S]. Beijing: People's Communications Press, 2019. (in Chinese)
- [25] 葛修润, 卢应发. 循环荷载作用下岩石疲劳破坏和不可逆变形问题的探讨[J]. 岩土工程学报, 1992, 14(3): 56–60.
- GE X R, LU Y F. Discussion about coal's fatigue failure and irreversible problem under cyclic loads [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1992, 14(3): 56–60. (in Chinese)
- [26] 杨永杰, 宋扬, 楚俊. 循环荷载作用下煤岩强度及变形特征试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(1): 201–205.
- YANG Y J, SONG Y, CHU J. Experimental study on characteristics of strength and deformation of coal under cyclic loading [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(1): 201–205. (in Chinese)
- [27] 周德泉, 张杨龙, 曹勇, 等. 溶洞高度影响嵌岩桩轴力传递及桩侧超载响应试验[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2022, 49(7): 83–93.
- ZHOU D Q, ZHANG Y L, CAO Y, et al. Test on influence law of karst cave height on axial force transfer and lateral overload response of rock-socketed pile [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2022, 49(7): 83–93. (in Chinese)