

# 多界面复合锚杆荷载传递机制的数值模拟

任非凡<sup>1,2</sup>, 徐超<sup>1,2</sup>, 谌文武<sup>3</sup>

(1. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092;  
3. 兰州大学 西部灾害与环境力学教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

**摘要:** 采用 Abaqus 对复合锚杆拉拔试验进行模拟, 针对复合锚杆的破坏形式多为界面破坏, 应用改进的 Cohesive 单元对复合锚杆 4 种界面材料进行模拟, 并建立轴对称弹塑性有限元模型对复合锚杆的拉拔试验进行分析. 研究成果主要包括: ①钢绞线轴向应力及界面剪应力均服从指数分布, 且随着荷载的增大, 锚杆近端的握裹力被克服, 剪应力峰值向后转移. ②南竹-复合材料、南竹-水泥砂浆界面剪应力峰值随着主控面剪应力峰值的转移而转移. ③南竹管材受周围刚度较大的复合材料及水泥砂浆的约束, 其轴向应力峰值分布在南竹的中部. ④水泥砂浆-土体界面因边界条件不同于其他界面, 其剪应力沿锚杆轴向从近端至远端不断增大. 数值模拟结果与现场试验测量结果符合较好, 验证了该数值方法的有效性.

**关键词:** 复合锚杆; 锚固机理; 界面破坏; Cohesive 单元; 数值模拟

中图分类号: TU 413

文献标识码: A

## Numerical Simulation on Load Transfer Mechanism of Multi-interface Composite Rockbolt

REN Feifan<sup>1,2</sup>, XU Chao<sup>1,2</sup>, CHEN Wenwu<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Key Laboratory of Mechanics on Disaster and Environment in Western China, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** Based on the Abaqus program, a pullout test of the composite rockbolt was simulated. Considering the main failure mode of the rockbolt, i. e. interface failure, an improved cohesive element was employed to simulate the four interface materials, and an axisymmetric elasto-plastical finite element model was built to analyze the pullout test. It is concluded that

the axial stress and the shear stress distribute along the steel strand exponentially. The bond strength will be overcome with the increase of the load, and the peak of shear stress will move to the far end of the bolt. The peak shear stress along the bamboo-composite material interface and the bamboo-mortar interface will move accordingly with that of the master interface. Under the constraint of the composite material and cement mortar with higher stiffness, the peak axial stress is located on the middle of the bamboo. The shear stress along the mortar-soil interface increases from the near end to the far end due to the different boundary condition. A comparative study shows the numerical simulation agrees well with the measured data, so the numerical method is certificated to be effective.

**Key words:** composite rockbolt; anchorage mechanism; interface failure; Cohesive element; numerical simulation

近年来,随着国家对交通、能源、水利和城市基础设施建设力度的加大,岩土锚固已突显其广阔的应用前景. 为满足日益多样性的工程要求,锚杆种类也在不断增多,以应对复杂多样的围岩地质与工程条件. 复合锚杆作为一种新型的锚杆已被成功地应用于西北土遗址抢险加固领域中. 本文以近年在文物保护界广泛使用的南竹加筋复合锚杆为研究对象,对其荷载传递机理进行数值模拟研究. 此锚杆内部为  $\phi 15.2$  mm 钢绞线,向外依次为复合材料、南竹、水泥砂浆,详细介绍可参见文献[1]. 该新型锚杆的特殊结构决定了该锚杆的锚固性能主要取决于各材料之间的界面行为,因此对该锚杆的研究主要是对其界面材料性状的研究. 此研究结果不但可以完善多界面复合锚杆的锚固机理,而且对其他类似的多界面构筑物的机理研究具有一定的借鉴意义.

收稿日期: 2010-10-11

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划(2006BAK30B02); 光华同济土木学院基金; 同济大学青年优秀人才培养行动计划(2010KJ046)

第一作者: 任非凡(1980—),男,讲师,工学博士,主要研究方向为岩土加固与新材料. E-mail: renff03@hotmail.com

锚固系统由多种介质构成,且具有复杂的力学特性:材料非线性、几何非线性、非均质性和非连续性,尤其是在两种介质的界面上,表现出更为复杂的力学性质.钢筋-灌浆和岩土体-灌浆间的粘结作用对于锚固的极限承载力有很大的影响,尤其是当锚固系统发生界面粘结滑移破坏时,界面问题的不连续性,使计算和分析都有比较大的困难,其高度非线性,历来是数值模拟的难点.

早在 1970 年,Coates 和 Yu<sup>[2]</sup>用有限单元法分析了弹性介质中的理想弹性锚杆特性. Mcvay 和 Cook<sup>[3]</sup>采用有限元方法对胶结锚杆的拉拔试验进行了模拟,预测了锚固系统的极限承载力. Li 和 Eligehausen<sup>[4]</sup>采用微平面模型模拟混凝土基体,用一种特殊的界面模型模拟胶结材料,对化学胶结锚杆的破坏机理进行研究. James 等人<sup>[5]</sup>分别采用线性和非线性有限元模型模拟粘结式锚杆的拉拔试验,预测了锚固系统的极限承载力. 国内学者高永涛等<sup>[6]</sup>、崔政权和李宁<sup>[7]</sup>采用数值模拟方法探讨了锚固段的应力分布规律. 王连捷<sup>[8]</sup>、徐波<sup>[9]</sup>、贾新等<sup>[10]</sup>也对锚杆锚固段的受力状态进行了有限元分析. 但已有研究表明,锚固系统界面的处理方法主要为嵌入锚杆单元法、弹簧单元法及界面摩擦单元法,仅能对锚杆的界面行为进行弹塑性分析,且处理的界面单元一般不大于 2 个,对多界面锚固系统的弹性→塑性→断裂的全过程分析研究较少. 本文拟采用一种改进的 Cohesive 单元来模拟复合锚杆的界面行为,对其锚固机理及传力机制进行全过程分析. 该单

元不但可考虑界面的断裂破坏,而且还可以考虑界面断裂后的摩阻作用,使模拟条件更加符合现实.

### 1 复合锚杆拉拔试验简介

拉拔试验在复合锚杆安设养护 28 d 后进行. 采用空心千斤顶施加拉拔荷载,使用大量程数显百分表测量锚杆位移(图 1). 另在复合锚杆各组成材料之间布设电阻应变计,利用静态应变仪、锚杆拉力计进行拉拔试验的数据测量,定量获取在锚杆拉拔过程中,复合锚杆锚固系统各个界面之间的应力应变分布传递状况,其结果可对本次数值模拟的结果进行验证. 试验锚杆设计参数如表 1 所示. 本次试验依据设计要求,按《土层锚杆设计与施工规范》CECS 22:89<sup>[11]</sup>和《建筑边坡工程技术规范》GB50330—2002<sup>[12]</sup>的规定执行.



图 1 复合锚杆拉拔装置  
Fig.1 Pullout device of the composite rockbolt

表 1 试验锚杆的设计参数  
Tab.1 Design parameters for the composite rockbolt

锚孔直径/mm	安装倾角/(°)	锚杆直径/mm	锚杆长度/m	锚固段长度/m	灌浆浆液	配比
180	15	88	5	5	42.5R 水泥砂浆	$m(\text{水泥}):m(\text{砂}):m(\text{水})=1:1:0.43$

## 2 复合锚杆的数值模拟

### 2.1 有限元模型的建立

本文主要分析复合锚杆在轴向荷载作用下的性状.因荷载与锚杆模型具有轴对称性,所以将其简化为轴对称有限元模型进行分析,物理模型和有限元模型分别见图 2、图 3. 其中,各种材料均采用弹塑性材料模拟,并使用 4 节点轴对称减缩单元 CAX4R 模拟,材料之间界面使用 Cohesive 单元模拟,单元类型为 COHAX4. 模型的边界条件按照实际的锚杆约束

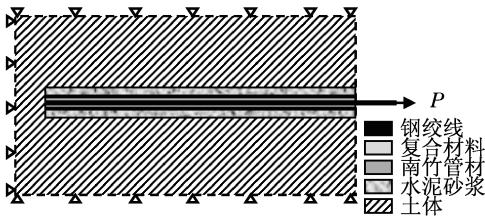


图 2 复合锚杆拉拔试验物理模型  
Fig.2 Physical model of the composite rockbolt pull-out test

条件,除临空面外其余方向均使用垂直约束.模型共划分单元 2 584 个,其中 CAX4R 单元 2 084 个,

COHAX4 单元 500 个,节点共计 2 711 个.相关材料物理力学参数与几何参数如表 2 所示.

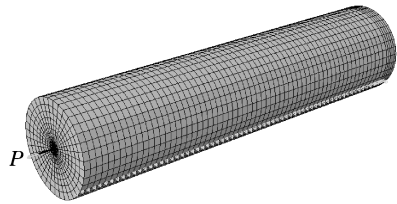


图 3 复合锚杆拉拔试验有限元模型  
Fig.3 The finite element model of the composite rockbolt pull-out test

## 2.2 Cohesive 单元的本构模型

Cohesive 单元由 Barenblatt,Dugdale 等人提出,

它假设在断裂面上存在法向拉压力  $t_n$  以及切向拉伸力(即剪切作用)  $t_s$ ,可以用来模拟断裂区域内材料之间的握裹力、咬合力以及界面摩擦力.本文拟采用 Cohesive 单元来模拟复合锚杆材料之间的界面断裂破坏,获悉锚杆的锚固机理.由于锚杆界面的破坏模式属剪切滑移破坏,且界面破坏后由于围岩的约束作用界面仍存在一定界面摩擦力,而传统的 Cohesive 单元并未考虑界面破坏后的摩擦作用,因此本文对其本构关系进行了改进(图 4),考虑了界面破坏后的摩阻作用,使模拟条件更加接近现实受力情况.该本构模型已在文献[13]中得到了理论验证,且与试验监测结果符合较好.

表 2 模拟试验数值分析参数

Tab.2 The parameters for the numerical simulation

材料类型	重度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	弹性模量/GPa	泊松比	抗拉强度/MPa	抗压强度/MPa	几何参数 <sup>1)</sup> /mm	锚杆长度/m
钢绞线	7 800	200.00	0.28	1 820.00	—	$r = 7.63$	5
复合材料	1 290	4.30	0.23	0.90	7.21	$r = 37.00$	5
南竹管材	1 490	2.00	0.30	130.50	83.08	$t = 7.00$	5
水泥砂浆	2 060	12.00	0.18	4.00	60.00	$r = 90.00$	5
土体	1 930	0.08	0.30	0.15	1.50	$r = 600.00$	5

1)  $r$  为半径; $t$  为管壁厚度.

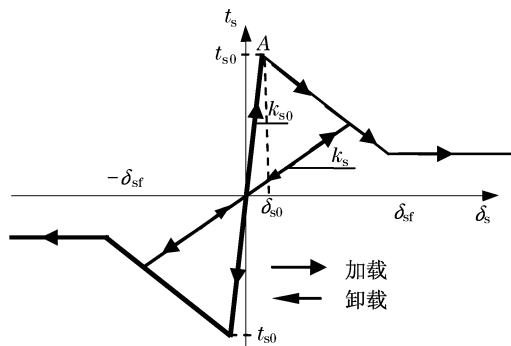


图 4 改进后的 Cohesive 单元线性软化本构关系  
Fig.4 Improved linear-softening constitutive relation of the Cohesive element

图 4 中  $k_{s0}$  为粘结材料的剪切刚度,  $t_{s0}$  为最大剪应力,  $\delta_{s0}$  为剪应力达到  $t_{s0}$  时的相对位移,  $\delta_{sf}$  为界面破坏时所对应的相对位移,  $k_s$  所对应的直线可用来模拟非完全破裂的材料加载与卸载情况<sup>[14]</sup>.

Cohesive 单元在弹性阶段的应力应变服从线性关系,当材料受力达到屈服强度后,界面即进入应变软化阶段,其损伤程度用标量  $D$  来表示,值域为  $[0, 1)$ .它是断裂面在外力作用下损伤程度的总的体现,初始值为 0,当外力达到屈服强度  $t_{s0}$  后,将随着相对位移的增大逐渐逼近至一个最大值  $D_{\max}$ ,其值可依据文献[13]中峰值剪切强度  $\tau_f$  与残余剪切强度  $\tau_r$

间接获得.损伤因子  $D$  值是一个关于有效相对位移  $\delta_m$  的函数,可表示为

$$D = \frac{\delta_{mf}(\delta_{m,\max} - \delta_{m0})}{\delta_{m,\max}(\delta_{mf} - \delta_{m0})} \quad (1)$$

式中:  $\delta_{m,\max}$  为材料受力历史中最大的有效相对位移;  $\delta_{m0}$ ,  $\delta_{mf}$  分别对应于  $\delta_{n0}$ ,  $\delta_{s0}$  以及  $\delta_{nf}$ ,  $\delta_{sf}$  的有效相对位移;  $\delta_{n0}$ ,  $\delta_{nf}$  分别为对应最大法向应力及界面破坏时垂直界面方向的相对位移.另外,  $\delta_m$  具有以下的特性:

$$\delta_m = \sqrt{\langle \delta_n \rangle^2 + \delta_s^2} \quad (2)$$

式中:  $\langle \rangle$  是麦考利符号,表示

$$\langle \delta_n \rangle = \begin{cases} \delta_n, & \delta_n \geq 0 (\text{受拉}) \\ 0, & \delta_n < 0 (\text{受压}) \end{cases} \quad (3)$$

本文所使用的 Cohesive 单元的损伤启动准则采用最大公称应变准则,即当最大公称应变比达到 1 时,界面开始发生损伤.其表达式为:

$$\max \left\{ \frac{\langle \epsilon_n \rangle}{\epsilon_n^0}, \frac{\epsilon_s}{\epsilon_s^0}, \frac{\epsilon_t}{\epsilon_t^0} \right\} = 1 \quad (4)$$

## 3 结果分析与讨论

为了探讨复合锚杆的锚固机理及锚杆各种材料的受力及传递规律,分别从锚杆拉拔试验的荷载-位

移曲线、轴向应力、界面剪应力及传递规律等方面进行数值分析,着重分析了锚杆轴向应力及界面剪应力的分布情况。

### 3.1 复合锚杆荷载-位移曲线

图 5 是本次数值模拟所获取的荷载-位移曲线。由图 5 可知,当荷载小于 100 kN 时,锚杆处于线弹性变形阶段,随着荷载增大,锚杆界面发生屈服,进入软化阶段,最终将发生界面的相互滑移进而产生破坏。本次数值模拟获取的最大拉拔荷载为 190 kN。

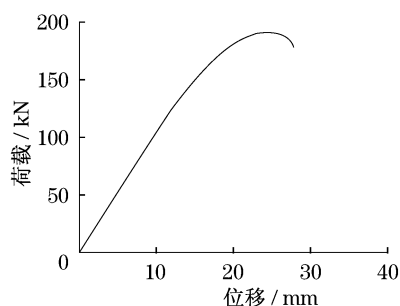


图 5 南竹加筋复合锚杆荷载-位移关系曲线  
Fig.5 The load-displacement curve of the bamboo-steel composite rockbolt

### 3.2 复合锚杆杆件轴向应力分析

#### 3.2.1 钢绞线轴向应力分析

图 6 为钢绞线在不同拉拔力条件下的轴向应力分布。由图 6 可知,当荷载较小、界面未解耦时,杆端轴力最大,其值等于拉拔力,轴力沿锚杆轴向长度分布呈负指数状分布。随着荷载的增大,轴向应力不断增大。当拉拔力达到一定程度后,杆端附近的界面开始解耦,呈现出最大轴力范围增大的现象。例如,当荷载  $P = 190$  kN 时,可以看出钢绞线端部附近的最大轴力范围明显增大。同时,由该曲线可以得出,当  $P \leq 102$  kN 时,锚杆轴向应力分布呈明显的负指数状分布,随着荷载的增大,靠近锚杆受力端的应力分布曲线呈现下凹,这是由于前端的界面出现解耦现象,

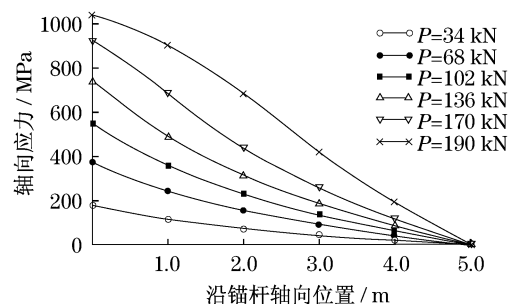


图 6 钢绞线轴力的发展过程和分布规律  
Fig.6 Developing and distribution of the axial stress along the steel strand

象,界面开始发生破坏,解耦后的界面仅通过摩擦力和咬合力抵抗拉拔力。

#### 3.2.2 南竹管材轴向应力分析

南竹管材的轴向应力分布较钢绞线稍有不同,如图 7 所示。轴向应力峰值处于锚杆的中部位置,而钢绞线的轴向应力峰值处于杆体的近端,这主要是由于拉拔力是直接施加在钢绞线上的,而南竹的轴向应力是由钢绞线通过复合材料应力传递至南竹管材,由材料间的协调变形所引起的。管材前端的变形受到边界处周围刚度较大的复合材料及水泥砂浆的约束,从而导致近端变形较小,轴力较低。另外,由图可知,当  $P \leq 102$  kN 时,南竹的轴向应力随着拉拔力的增大而增大;当  $P \geq 136$  kN 时,锚杆近端的部分发生了屈服,从而导致峰值轴向应力向后转移。

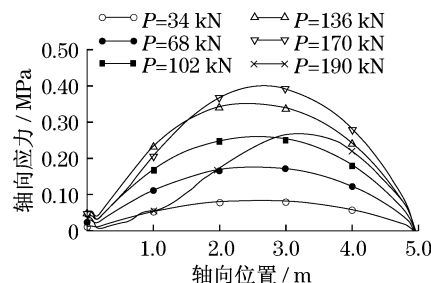


图 7 南竹管材轴力的发展过程和分布规律  
Fig.7 Developing and distribution of the axial stress along the bamboo

### 3.3 复合锚杆界面剪应力分析

#### 3.3.1 钢绞线-复合材料界面剪应力分析

图 8 为不同荷载条件下钢绞线-复合材料界面剪应力的分布图。由图 8 可知,当拉拔力较小时,随着荷载的增大,界面剪应力不断增大,且沿着锚杆的轴向不断向远端递减;当拉拔力超过一定数值时,锚杆近端的粘着力首先被克服而产生相对滑动,仅能通过界面咬合力与摩擦力来抵抗拉拔力,从而钢绞线与复合材料剪应力的最大值逐渐向远端移动,锚杆界面不断被克服,直至破坏。另外,由图可知,当拉拔力  $P \leq 102$  kN 时,界面处于弹性变形状态,并未发生破坏,剪应力沿锚杆轴向呈负指数状分布。当拉拔力继续增大至 136 kN 时,近端的界面发生屈服,呈现出剪应力下降的现象,峰值剪应力向远端转移。当拉拔力增大至 190 kN 时,锚杆拉拔力达到最大值,近端的界面已发生相对滑动,界面仅存在摩擦力与咬合力。此后,随着锚杆界面不断被克服,锚杆的拉拔力将开始减小,整个界面逐渐进入软化-滑移阶段。

#### 3.3.2 复合材料-南竹管材界面剪应力分析

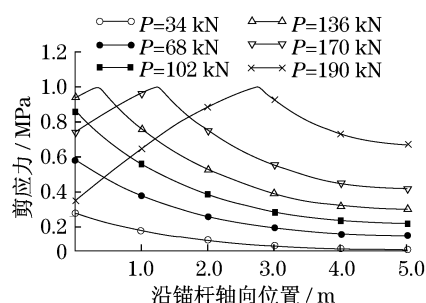


图 8 钢绞线-复合材料界面剪应力的  
发展过程和分布规律

Fig. 8 Developing and distribution of the shear stress  
along the steel strand-bamboo interface

图 9 展示了复合材料-南竹管材界面剪应力的发展规律. 由图可知, 该界面剪应力的发展规律与钢绞线-复合材料界面的发展极为相似, 唯一不同之处在于: 该界面的剪应力虽然也随着荷载的增大, 最大剪应力不断向锚杆远端移动, 但是界面并未发生软化, 最大剪应力仅 0.20 MPa, 远远小于该界面的粘结强度 1.60 MPa<sup>[15]</sup>. 该界面仅随着拉拔荷载的增大与相接触的复合材料产生协调变形, 即随着主控面——钢绞线-复合材料界面剪应力的分布而变化, 当主控面的最大剪应力向后转移时, 该界面的剪应力也相应向后转移. 当拉拔力  $P \leq 102$  kN 时, 主控面仍然处于弹性变形阶段, 因此复合材料-南竹管材界面随着拉拔力的增大而增大, 且沿轴向呈现出负指数状分布. 当拉拔力  $P = 136$  kN 时, 由于主控面近端发生软化, 最大剪应力向远端转移, 复合材料-南竹管材界面的剪应力峰值相应地向远端移动.

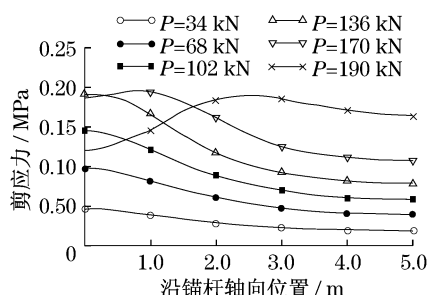


图 9 复合材料-南竹管材界面剪应力的  
发展过程和分布规律

Fig. 9 Developing and distribution of the shear stress  
along the bamboo-composite material interface

### 3.3.3 南竹管材-水泥砂浆界面剪应力分析

图 10 展示了南竹管材-水泥砂浆界面的剪应力的发展及分布规律. 由图 10 可知, 该界面的剪应力分布同样受到主控面发展进程的控制, 即随着主控

面剪应力的发展趋势而不断变化, 随着拉拔荷载的增大, 剪应力峰值逐渐向远端移动. 同样, 该界面未发生软化, 最大剪应力仅 0.16 MPa, 远小于该界面的粘结强度 2.00 MPa<sup>[15]</sup>, 仍然处于与南竹管材、水泥砂浆协调变形阶段. 当拉拔力  $P \leq 102$  kN 时, 主控面处于弹性变形阶段, 因此南竹管材-水泥砂浆界面随着拉拔力的增大而增大, 且沿轴向呈现出负指数状分布. 当拉拔力  $P = 136$  kN 时, 主控面近端发生软化, 最大剪应力向远端转移, 南竹管材-水泥砂浆界面的剪应力峰值相应地向远端移动.

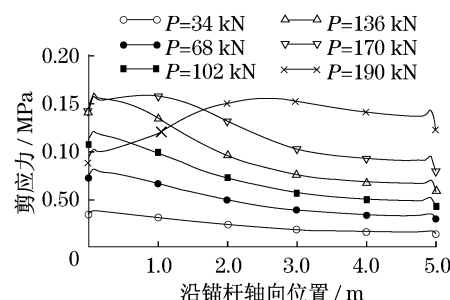


图 10 南竹管材-水泥砂浆界面剪应力的  
发展过程和分布规律

Fig. 10 Developing and distribution of the shear stress  
along the bamboo-mortar interface

### 3.3.4 水泥砂浆-土体界面剪应力分析

水泥砂浆-土体界面的剪应力发展分布图如图 11 所示. 由图 11 可知, 该界面的剪应力分布明显不同于其他界面, 其剪应力分布呈正指数状分布, 即剪应力沿锚杆轴向从近端向远端有递增的趋势. 究其原因, 主要是由于边界条件改变所致, 前述的几种界面材料远端均处于自由状态, 而该界面的土体受到后端土体的约束, 阻止其向外变形. 同样, 该界面也并未发生软化, 最大剪应力仅 0.14 MPa, 未达到该界面的粘结强度 1.20 MPa<sup>[15]</sup>. 另外, 可以看出, 该界

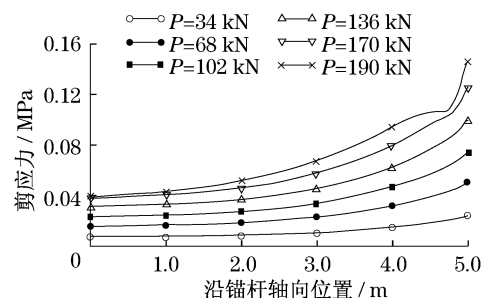


图 11 水泥砂浆-土体界面剪应力的  
发展过程和分布规律

Fig. 11 Developing and distribution of the shear stress  
along the mortar-soil interface

面并未随着主控面剪应力的分布变化而出现峰值剪应力运移的现象,仅随着拉拔荷载的增大而增大。

通过对复合锚杆 4 个界面进行分析可知,复合锚杆的锚固机理受主控面剪应力影响较大,且主控面应力与普通钢筋锚杆分布规律大体一致。另外,除主控面外其余界面均未软化,仅随主控面的软化、破坏进行相应的协调变形与调整。水泥砂浆-土体界面由于其边界条件与其他界面不同,受后部土体约束,其剪应力分布呈正指数分布,而其他界面剪应力服从负指数分布。

### 3.4 数值计算与现场监测结果对比

为了检验数值模拟的可靠性,从荷载-位移曲线、轴向应变两方面进行了数值计算与现场监测对比。

#### 3.4.1 荷载-位移曲线对比

数值模拟与现场实测所获取的荷载-位移曲线对比如图 12 所示。两条曲线的走向趋势较为接近,数值模拟所得的最大荷载值稍小于实测结果,两者相差 6%。这一方面是由于现场试验条件较复杂,数值计算无法考虑众多的条件;另一方面,施加荷载方式也有所不同,拉拔试验是通过设定荷载来控制拉拔进程,且采用循环加荷法,存在材料疲劳破坏的现象,故造成塑性阶段内荷载值所对应的位移较数值结果大,而数值模拟采用位移控制法,采取单调递增加载法。另外,从数值模拟曲线可知,在界面完全发生破坏后,承载力发生了突降,并维持在一定的荷载水平上,反映了界面断裂后存在的摩擦作用。

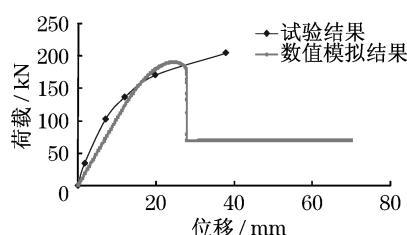


图 12 复合锚杆拉拔试验与数值模拟荷载位移曲线对比

Fig. 12 Comparison of the load-displacement curves between the pullout test and the numerical simulation

#### 3.4.2 轴向应变对比

图 13、图 14 分别对比了钢绞线、南竹管材的轴向应变。由图 13 可见,在钢绞线后段轴向应变的分布,数值结果与测量结果符合较好;仅在锚杆端部及尾部附近相差较大,出现应力异常。其原因在于现场试验条件较难控制,锚杆端部及尾部受拉拔作用影

响,应力集中现象明显,造成应变计测量值波动很大。图 14 同样表明,除南竹管材端部及尾部受应力集中作用影响造成应变片数据溢出或异常外,其余各处数值结果与试验测量值符合较好。综上所述,拉拔试验的荷载-位移曲线以及钢绞线与南竹管材的轴向应变,数值模拟结果与试验测量结果符合程度较高,说明本次数值模拟结果是可靠的,同时验证了以上规律性是可信的。

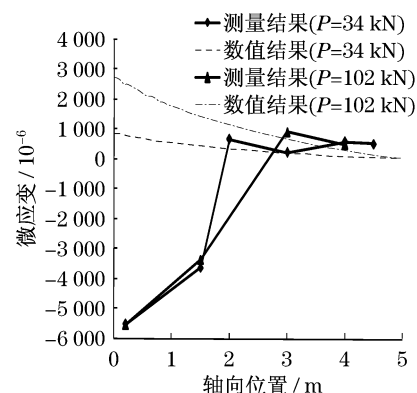


图 13 现场试验与数值模拟钢绞线轴向应变分布对比

Fig. 13 Comparison of the axial stress along the steel strand between the pullout test and the numerical simulation

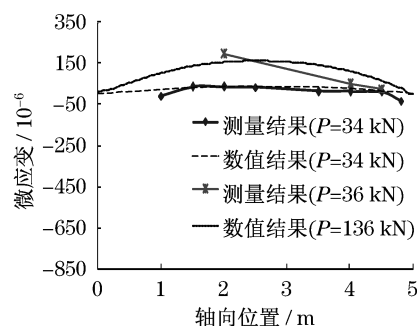


图 14 现场试验与数值模拟南竹管材轴向应变分布对比

Fig. 14 Comparison of the axial stress along the bamboo between the pullout test and the numerical simulation

## 4 结论

使用改进后的 Cohesive 单元考虑了界面破坏后的摩擦力,对南竹加筋复合锚杆的荷载传递机制进行了数值分析。该方法的优点在于,可全过程分析复合锚杆界面的弹性、塑性以及断裂行为,并且考虑了界面破坏后的摩擦作用。

(1) 钢绞线轴向应力分布呈指数分布,随着荷

载的增大而增大.剪应力在荷载较小时服从指数分布,随后由于拉拔力越来越大,靠近锚杆端部的钢绞线-复合材料界面的握裹力被克服,剪应力峰值向后转移.

(2) 南竹-复合材料、南竹-水泥砂浆界面的剪应力同样遵从指数分布的规律,且界面剪应力峰值随着主控面——钢绞线-复合材料界面的剪应力峰值的转移而转移.南竹管材上的峰值轴向应力分布在南竹的中部.

(3) 水泥砂浆-土体界面剪应力分布正好相反,即剪应力沿锚杆轴向从近端至远端不断增大.

(4) 除主控面外,其他界面均未发生软化、破坏,轴向应力、界面剪应力仅随主控面的软化、破坏进行相应的调整.

(5) 钢绞线的轴向应力明显高于南竹的轴向应力.

(6) 数值模拟结果与现场试验测量结果符合较好,因此,本次数值模拟是可靠的,规律性是可信的.研究结果不但可以进一步完善复合锚杆的锚固机理,而且可为其他相似的研究提供参照.

**致谢** 本次研究工作得到敦煌研究院李最雄研究员、王旭东研究员等人的鼎力支持与帮助,在此对他们表示由衷的感谢.

#### 参考文献:

- [1] 任非凡, 谌文武, 张景科, 等. 南竹加筋复合锚杆施工工艺优化研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009(S2): 3789.  
REN Feifan, CHEN Wenwu, ZHANG Jingke, et al. Study on construction techniques of a novel bamboo-steel composite rock-bolt[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009(S2): 3789.
- [2] Coates D F, Yu Y S. Three dimensional stress distribution around a cylindrical hole and anchor[C]// Proceedings of the 2nd International Conference on Rock Mechanics. Belgrad: Privredni Pregled, 1970: 175 - 182.
- [3] Mcvay M, Cook R A, Krishnamurthy K. Pullout simulation of postinstalled chemically bonded anchors [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1996, 122(9): 1016.
- [4] Li Y J, Eligehausen R, Ozbolt J, et al. Numerical analysis of quadruple fastenings with bonded anchors[J]. ACI Structural Journal, 2002, 99(2): 149.
- [5] James R W, Delaguardia C, McCreary C R. Strength of epoxy-grouted anchor bolts in concrete [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1987, 113(12): 2365.
- [6] 高永涛, 吴顺川, 孙金海. 预应力锚杆锚固段应力分布规律及应用[J]. 北京科技大学学报, 2002(4): 340.  
GAO Yongtao, WU Shunchuan, SUN Jinhai. Application of the pre-stress bolt stress distributing principle [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2002(4): 340.
- [7] 崔政权, 李宁. 边坡工程理论与实践最新发展[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.  
CUI Zhengquan, LI Ning. Recent developments in theory and practice of slope engineering [M]. Beijing: China Waterpower Press, 1999.
- [8] 王连捷, 王薇. 岩土锚固工程中锚固体应力分布的有限元分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1998, 9(增刊): 14.  
WANG Lianjie, WANG Wei. Numerical analysis of stress distribution in anchorage body of geotechnical anchorage engineering[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 1998, 9(S): 14.
- [9] 徐波. 粘结型锚杆锚固理论与试验研究[D]. 大连: 大连理工大学土木工程学院, 2006.  
XU Bo. Experimental and analytical study on pull-out resistance of adhesive anchors [D]. Dalian: Dalian University of Technology. School of Civil Engineering, 2006.
- [10] 贾新. 玻璃纤维增强塑料锚杆锚固机理研究[D]. 上海: 同济大学土木工程学院, 2005.  
JIA Xin. Research on bond mechanism of GFRP bolt [D]. Shanghai: Tongji University. College of Civil Engineering, 2005.
- [11] 冶金部建筑研究总院. 土层锚杆设计与施工规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1991.  
Central Research Institute of Building and Construction, Ministry of Metallurgical Industry. The standard of design and construction of soil bolt [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1991.
- [12] 重庆市建设委员会. 建筑边坡工程技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.  
The Construction Committee of Chongqing City. The technical standard of architectural slope engineering [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2002.
- [13] Ren F F, Yang Z J, Chen J F, et al. An analytical analysis of the full-range behaviour of grouted rockbolts based on a tri-linear bond-slip model[J]. Construction and Building Materials. 2010, 24(3): 361.
- [14] Abaqus. User documentation[J]. Providence: Dassault Systmes Simulia Corp., 2007.
- [15] 王旭东, 谌文武, 任非凡. 锚杆施工技术与质量评价[R]. 敦煌: 敦煌研究院 & 兰州大学文物保护中心, 2008.  
WANG Xudong, CHEN Wenwu, REN Feifan. Construction technology and quality evaluation of rockbolts [R]. Dunhuang: Dunhuang Academy & Cultural Relics Protection Center of Lanzhou University, 2008.