

DOI: 10.11779/CJGE201811018

地震作用下锚固参数对岩体边坡锚固界面剪应力分布影响分析

言志信^{1,2}, 屈文瑞¹, 龙哲¹, 董建华³, 江平^{*1}

(1. 兰州大学土木工程与力学学院, 甘肃 兰州 730000; 2. 河南城建学院土木与交通工程学院, 河南 平顶山 467036;

3. 西部土木工程防灾减灾教育部工程研究中心, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 基于FLAC^{3D}软件, 以含软弱层的锚固岩质边坡为研究对象, 通过修正的cable单元建模和改进剪应力提取方法, 利用数值模拟方法系统地分析研究了地震作用下锚固参数对含软弱层岩体边坡锚固界面剪应力分布的影响。研究发现: 随砂浆层厚度增加, 砂浆-岩体界面脱黏增长, 杆体-砂浆界面脱黏减小; 随锚杆横截面积增大, 锚固界面剪应力向锚头和锚根转移, 脱黏增长; 适当增加锚固段长度和减小锚杆间距均有利于边坡稳定; 一定的锚固段长度下宜适当增大锚杆倾角。揭示了地震作用下锚固参数对边坡锚固界面剪应力分布和锚固机理的影响, 对边坡锚固的设计施工具有重要参考价值。

关键词: 岩质边坡; 锚固; 杆体-砂浆界面; 砂浆-岩体界面; 峰值剪应力; 锚固参数

中图分类号: TU435 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2018)11-2110-10

作者简介: 言志信(1961-), 男, 湖南株洲人, 博士(后), 特聘教授, 博士生导师, 主要从事土木工程和地质工程方面的研究工作。E-mail: yzx10@163.com。

Influences of anchorage parameters on distribution of shear stress at anchorage interface of rock slopes under earthquakes

YAN Zhi-xin^{1,2}, QU Wen-rui¹, LONG Zhe¹, DONG Jian-hua³, JIANG Ping¹

(1. School of Civil Engineering and Mechanics, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 2. School of Civil and Traffic Engineering,

Henan University of Urban Construction, Pingdingshan 467000, China; 3. Western Engineering Research Center of Disaster Mitigation in

Civil Engineering of Ministry of Education, Lanzhou 730050, China)

Abstract: Based on the FLAC^{3D} software, by modifying the cable unit and improving the shear stress extraction method, a numerical model for anchored rock slopes with weak interlayer is established. The influences of anchorage parameters on the distribution of shear stress at the anchorage interface of rock slopes with weak interlayer under earthquakes are analyzed. The results show that the thickness of mortar layer increases, the debonding length of mortar-rock interface increases, and the debonding length of bolt-mortar interface decreases. The cross-sectional area of bolts increases, the shear stress at anchorage interface transfers towards the head and roots of bolts, and the debonding length increases. Properly increasing the length of anchorage section and reducing the spacing between the bolts are beneficial to slope stability. Under a certain anchorage length, the anchorage angle should be increased appropriately. The influences of anchorage parameters on the distribution of shear stress and the anchorage mechanism of the anchorage interface under seismic condition are revealed. It is of important reference value for the design and construction of slope anchorage.

Key words: rock slope; anchorage; bolt-mortar interface; mortar-rock interface; peak shear stress; anchorage parameter

0 引言

中国滑坡灾害频发, 尤以地震滑坡危害最为严重。锚固是边坡支护的常用方法, 它以其结构巧、施工易、造价低、性能好等独特优势在工程中获得越来越广泛的应用。通过锚固能有效提高边坡的抗震性能, 然而关于锚固边坡动力问题的研究较少, 地震作用下边坡

锚固机理的研究远落后于工程实践, 因此对其研究十分必要而迫切。

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41372307, 51478065); 甘肃省建设科技攻关项目(kjxm2014-42, JK2013-20)

收稿日期: 2017-09-12

***通讯作者** (E-mail: jp61@163.com)

诸多研究人员已对静力作用下锚固界面上剪应力进行了探索^[1-5], 而对动力作用下锚固问题的研究较少, 对锚固边坡进行动力响应研究的有: 叶海林等^[6]利用FLAC^{3D}探讨了锚杆在各种不同地震波作用下的抗震效果; Ali Mortazavi等^[7]利用FLAC^{3D}分析了动荷载作用下, 全长黏结锚杆的轴力和位移分布规律; 言志信等^[8]利用FLAC^{3D}研究了地震作用下锚杆支护的上覆红黏土岩体边坡的动力响应及锚杆轴力分布规律; 董建华等^[9]针对框架锚杆支护边坡的地震响应进行了研究, 等等。

迄今为止, 人们仍未对地震作用下边坡锚固界面上的剪切问题开展研究^[8], 而边坡锚固界面上的剪切作用与边坡动力稳定性的关系十分密切, 发挥着关键作用。本文利用FLAC^{3D}中的动力分析模块, 针对地震作用下含软弱层岩体边坡锚固界面上的剪应力分布及其影响因素进行深入系统的数值模拟分析研究, 以揭示地震作用下不同边坡锚固参数对锚固界面剪应力分布和锚固机理的影响, 并为边坡锚固的设计施工提供指导。

1 锚固边坡建模

1.1 剪应力提取方法

前人使用 FLAC^{3D} 研究锚杆锚固问题时, 仅用 cable 单元得到了锚杆-砂浆界面上的剪应力, 笔者在研究锚固界面的剪切作用时, 尝试修正, 或者说改造 cable 单元, 利用其建模并改进剪应力提取方法, 从而获得两个锚固界面上的剪应力。

方法如下: 求解锚杆-砂浆界面上的剪应力时, cable 单元的内层和外层分别采用锚杆杆体和砂浆的参数, 此时计算所得轴力为锚杆轴力, 将轴力带入式

(1) 得锚杆-砂浆界面上的剪应力; 求解砂浆-岩体界面上的剪应力时, 将锚杆杆体和砂浆构成的锚固体看作复合锚杆, 内层模量采用复合弹性模量, 外层采用岩体参数, 所得轴力为锚固体轴力, 将锚固体轴力带入式 (1) 得砂浆-岩体界面上的剪应力。

$$\tau_i = \frac{\Delta P}{\pi \cdot d \cdot \Delta x} \quad (1)$$

式中 τ_i 为界面两个监测点之间的平均剪应力值; ΔP 为两个监测点间的轴力值之差; d 为锚杆杆体直径; Δx 为两个监测点的间距。

为了贴近工程实际, 笔者利用 FLAC^{3D} 内置的 FISH 语言编程, 建立了 cable 单元水泥砂浆修正力学模型, 通过添加界面破坏时的砂浆应力软化功能, 即当某处 cable 单元的界面剪应力超过极限黏结强度时, 自动将其修正为残余黏结强度, 进而模拟该点界面的脱黏失效。

为了验证上述 cable 单元力学模型的合理性, 选取叶根飞的拉拔试验结果^[10]进行了对比分析。该试验施加了多级载荷, 前三级载荷分别为 20, 30, 40 kN, 结果界面未出现脱黏现象; 后三级载荷分别为 50, 60, 70 kN, 结果界面发生了脱黏, 由表 1, 2 可知, 数值计算结果与试验结果基本吻合, 说明本文模型是正确和可行性。

表 1 拉拔试验界面脱黏前结果对比

Table 1 Comparison of pull-out test and numerical modeling results before interface debonding

| 拉拔荷载/kN | 试验值/MPa | 计算值/MPa |
|---------|---------|---------|
| 20 | 6.28 | 5.42 |
| 30 | 8.24 | 8.12 |
| 40 | 11.73 | 10.83 |

表 2 拉拔试验锚杆界面脱黏后结果对比

Table 2 Comparison of pull-out test and numerical modeling results after interface debonding

| 拉拔荷载/kN | 试验值/mm | 计算值/mm |
|---------|--------|--------|
| 50 | 5 | 5 |
| 60 | 10 | 10 |
| 70 | 15 | 15 |

1.2 锚固边坡建模

如图 1 所示为一含软弱层锚固岩体边坡数值分析模型, 由基底和边坡构成, 基底长×宽×高=51 m×3 m×12 m, 边坡由软弱层(图 1 中深色部分)及其之前的危岩(图 1 中软弱层至坡面的部分)与之后的基岩构成, 坡高为 18 m, 坡角为 75°, 软弱层倾角为 40° 且厚 1 m。边坡自坡脚至坡顶布设 6 根 $\phi 30$ mm 全长黏结锚杆进行锚固, 分别命名为锚杆 1~6, 各锚杆在基岩中的锚固段长度均为 5 m, 间距为 3 m, 倾角为 20°, 锚孔直径为 100 mm, 注浆体为 M30 水泥砂浆, 取锚杆-砂浆界面的极限黏结强度为 2.4 MPa, 砂浆-岩体界面的极限黏结强度为 0.8 MPa, 残余黏结强度为极限黏结强度的 45%^[11]。每根锚杆的锚头和锚根处各设一个监测点, 其余监测点按 0.5 m 等间距布设在锚头和锚根之间, 各锚杆长度不一, 其监测点数量从 13~39 个不等。垂直于边坡走向为 XZ 平面, 坐标原点设在边坡坡脚, 可得锚杆坐标值如表 3。取岩体的物理力学参数如表 4, 锚杆和砂浆的物理力学参数如表 5。

表 3 锚杆坐标值

Table 3 Coordinate values of bolts (m, m)

| 编号 | 起点 | 终点 |
|------|-----------|-------------|
| 锚杆 1 | (1.75,2) | (8.25,-0.6) |
| 锚杆 2 | (2.5,5) | (11,1.6) |
| 锚杆 3 | (3.25,8) | (13.75,3.8) |
| 锚杆 4 | (4,11) | (16.5,6) |
| 锚杆 5 | (4.75,14) | (19.25,8.2) |
| 锚杆 6 | (5.5,17) | (22,10.4) |

表4 岩体的物理力学参数

Table 4 Physical and mechanical parameters of rock mass

| 类型 | 密度/(kg·m ⁻³) | 弹性模量/MPa | 泊松比 | 黏聚力/MPa | 内摩擦角/(°) | 体积模量/MPa | 剪切模量/MPa |
|-----|--------------------------|----------|------|---------|----------|----------|----------|
| 岩体 | 2600 | 1000 | 0.25 | 0.45 | 32 | 667 | 400 |
| 软弱层 | 1750 | 32 | 0.40 | 0.06 | 30 | 53.3 | 11.4 |

表5 锚杆和水泥砂浆的物理力学参数

Table 5 Physical and mechanical parameters of bolts and cement mortar

| 类别 | 密度/(kg·m ⁻³) | 弹性模量/GPa | 黏结强度/(MN·m ⁻¹) | 截面积/cm ² | 水泥浆摩擦角/(°) |
|------|--------------------------|----------|----------------------------|---------------------|------------|
| 杆体 | 7800 | 200 | — | 8.04 | — |
| 水泥砂浆 | — | 3.26 | 3 | — | 35 |

数值分析建模中, 锚杆采用 cable 单元建模, 而边坡采用实体单元建模并划分网格 14352 个, 底面采用黏滞边界, 四周采用自由场边界, 局部阻尼值为 0.157。岩体和砂浆体分别采用弹塑性和弹性软化本构模型, 服从 Mohr-Coulomb 屈服准则。选取 Kobe 地震波作为输入波型, 其卓越频率为 1.5 Hz, 主频率为 0.5~3 Hz, 持时为 10, 4.3 s 对应地震波的最大水平向加速度为 3.0 m/s², Kobe 地震波如图 2 所示。

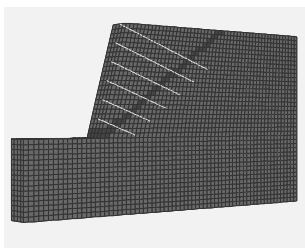


图1 边坡分析模型

Fig. 1 Slope analysis model

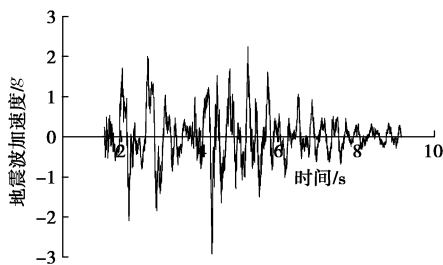


图2 Kobe 波加速度时程

Fig. 2 Time histories of acceleration of Kobe waves

锚杆 5 的起始坐标 (4.75, 14) 始终不变, 该锚杆处于边坡上部, 地震作用下响应强烈, 脱黏失效严重, 具有典型性, 因此通过研究锚杆 5 的地震响应, 揭示不同边坡锚固参数下的锚固界面剪应力分布规律和锚固机理。

2 各因素对锚固界面剪应力分布的影响分析

图 3 是锚固边坡 10 s 时的位移矢量图, 由图 3 可

知, 地震结束时, 边坡危岩的位移较大, 其最大位移为 6.764 cm, 出现在边坡坡脚处, 基岩部分位移很小。图 4 所示为地震波输入结束时 (10 s) 边坡塑性区分布图。

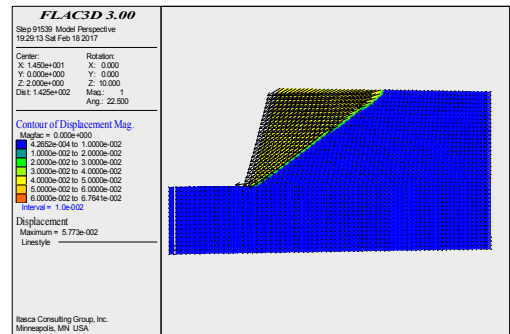


图3 10 s 时边坡位移矢量图

Fig. 3 Displacements of slope at 10 s

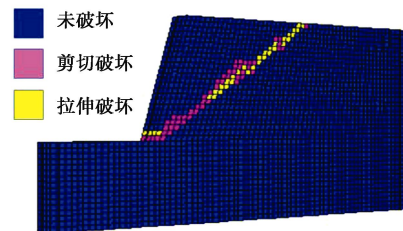


图4 10 s 时塑性区分布图

Fig. 4 Plastic zones at 10 s

地震作用下边坡软弱层之前的危岩与之后的基岩中的锚固界面剪应力方向相反, 剪应力方向转换点, 亦即剪应力为零而轴力最大的点, 定义为中性点, 该点处在软弱层中, 相应地锚杆上锚头到中性点称为拉拔段, 中性点到锚根称为锚固段。按照上述定义, 拉拔段上剪应力指向临空面, 为负值; 锚固段上正与之相反, 剪应力将锚杆锚固于基岩中, 为正值。

2.1 砂浆层厚度对锚固界面剪应力分布的影响分析

仅改变砂浆层的厚度, 将砂浆层的厚度分别设置为 35, 55, 75, 95 mm, 相应地, 对应的锚孔直径为 100, 140, 180, 220 mm, 分别记为方案 H1, H2, H3, H4。用这 4 种方案研究砂浆层厚度对锚固界面剪

应力分布的影响。

(1) 砂浆层厚度对砂浆-岩体界面剪应力分布的影响分析

图 5 是地震波输入 4.3, 10 s, 方案 H1, H2, H3, H4 下, 锚杆 5 的砂浆-岩体界面剪应力分布。

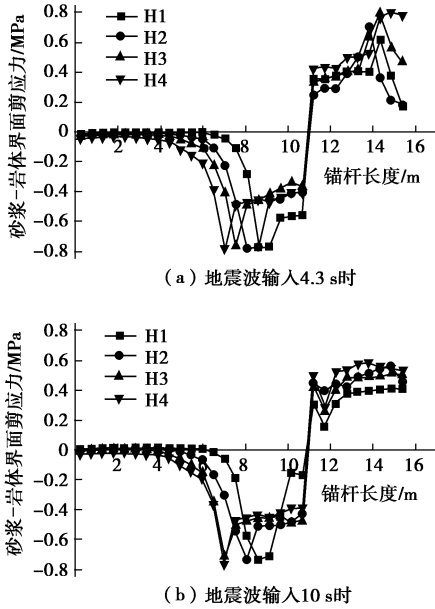


图 5 H1, H2, H3, H4 下砂浆-岩体界面剪应力分布
Fig. 5 Distribution of shear stress at mortar-rock interface under H1, H2, H3, H4

图 5 (a) 可见, 地震波输入 4.3 s 时, 4 种方案下砂浆-岩体界面均发生脱黏, 它们的界面剪应力分布也具有较好的一致性: 拉拔段上的砂浆-岩体界面剪应力从零增长到负向峰值, 再从负向峰值降到残余黏结强度, 最后突降为零, 剪应力为零的点即为中性点; 锚固段上的砂浆-岩体界面剪应力则从中性点的零值激增到残余黏结强度, 然后增长到正向峰值, 最后缓慢减小。当砂浆层厚为 35 mm 时, 砂浆-岩体界面正负剪应力峰值分别出现在距离软弱层 3.27 m 和 2.45 m 的位置, 拉拔段和锚固段上的脱黏长度分别为 1.41 m 和 2.75 m; 当砂浆层厚为 55 mm 时, 对应的正负剪应力峰值分别出现在距离软弱层 2.75 m 和 2.97 m 的位置, 拉拔段和锚固段上的脱黏长度分别为 1.93 m 和 1.71 m; 当砂浆层厚为 75 mm 时, 对应的正负剪应力峰值分别出现在距离软弱层 3.27 m 和 3.49 m 的位置, 拉拔段和锚固段上的脱黏长度分别为 2.97 m 和 2.23 m; 当砂浆层厚为 95 mm 时, 对应的正负剪应力峰值分别出现在距离软弱层 3.79 m 和 4.01 m 的位置, 拉拔段和锚固段上的脱黏长度分别为 3.49 m 和 2.75 m, 值得注意的是, 此时锚杆锚根处的剪应力最大, 即将达到极限黏结强度, 锚固即将整体失效。由此可见, 地震波输入 4.3 s 时, 4 种方案下砂浆-岩体界面脱黏长度为 $H1 < H2 < H3 < H4$, 即随着砂浆层厚度的增

加, 砂浆-岩体界面脱黏长度不断增加, 破坏现象越加严重。

图 5 (b) 是计算终态, 即地震波输入 10 s 时, 砂浆-岩体界面剪应力的分布。砂浆层厚度为 35 mm 时, 砂浆-岩体界面负剪应力峰值出现在距离软弱层 2.45 m 处, 拉拔段脱黏长度为 1.41 m; 砂浆层厚度为 55 mm 时, 对应的负剪应力峰值出现在距离软弱层 2.97 m 处, 拉拔段脱黏长度 2.45 m; 砂浆层厚度为 75 mm 时, 对应的负剪应力峰值出现在距离软弱层 4.01 m 处, 拉拔段脱黏长度为 3.49 m; 砂浆层厚度为 95 mm 时, 对应的负剪应力峰值出现的位置与地震波输入 4.3 s 时的一样, 脱黏长度也没有改变, 因为方案 4 中的锚杆在地震波输入 4.3 s 时即已发生整体失效。4 种方案下锚杆的锚固段砂浆-岩体界面剪应力已全部下降为残余黏结强度, 这说明在地震作用结束时, 即地震波输入 10 s 时, 锚固段上砂浆-岩体界面的黏结强度被调用完毕, 全部脱黏, 锚固已整体失效。

上述图 5 (a) 和图 5 (b) 可见, 拉拔段长度比锚固段长度长很多, 锚固段首先被调用完毕, 砂浆-岩体界面全部脱黏, 锚固整体失效。在发生整体失效前, 拉拔段的砂浆-岩体界面剪应力峰值仍在转移, 但砂浆-岩体界面脱黏长度增加较小, 仅为 0.5 m 左右。因而, 增加砂浆层厚度不能减小砂浆-岩体界面剪应力大小, 也不能改善剪应力分布和阻止砂浆-岩体界面脱黏破坏现象的发生。

(2) 砂浆层厚度对杆体-砂浆界面剪应力分布的影响分析

图 6 是地震波输入 4.3 s 和 10 s, 方案 H1, H2, H3, H4 下, 锚杆 5 的杆体-砂浆界面剪应力分布。

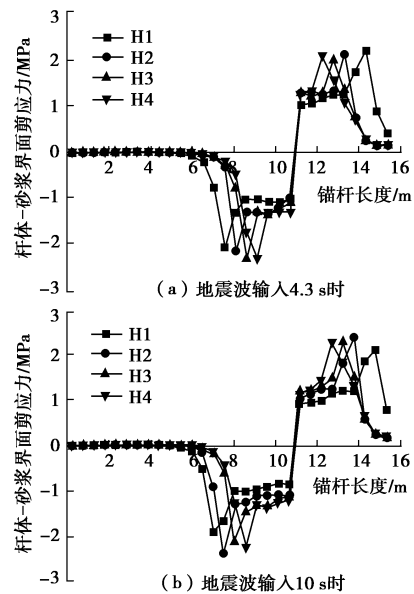


图 6 H1, H2, H3, H4 下杆体-砂浆界面剪应力分布
Fig. 6 Distribution of shear stress at bolt-mortar interface under H1, H2, H3, H4

图6(a)可见,地震波输入4.3 s时,锚杆5的杆体-砂浆界面在4种方案下均发生脱黏,它们的杆体-砂浆界面与砂浆-岩体界面的剪应力变化趋势具有一致性。砂浆层厚度为35 mm时,杆体-砂浆界面正负剪应力峰值分别出现在距离软弱层3.27 m和3.49 m的位置,拉拔段和锚固段上的脱黏长度分别为2.97 m和2.23 m;砂浆层厚度为55 mm时,对应的正负剪应力峰值分别出现在距离软弱层2.23 m和2.97 m的位置,拉拔段和锚固段上的脱黏长度分别为2.45 m和1.71 m;砂浆层厚度为75 mm时,对应的正负剪应力峰值分别出现在距离软弱层1.71 m和2.45 m的位置,拉拔段和锚固段上的脱黏长度分别为1.93 m和1.19 m;当砂浆层厚度为95 mm时,对应的正负剪应力峰值分别出现在距离软弱层1.19 m和1.93 m的位置,拉拔段和锚固段上的脱黏长度分别为1.41 m和0.67 m。由此可见,地震波输入4.3 s时,4种方案下杆体-砂浆界面的脱黏长度关系为 $H1 > H2 > H3 > H4$,即随着砂浆层厚度的增加,砂浆-岩体界面脱黏长度减小,破坏现象渐趋减弱。这说明增加砂浆层厚度对改善杆体-砂浆界面剪应力分布并减少脱黏现象具有一定的作用。

图6(b)是计算终态,即地震波输入10 s时,杆体-砂浆界面剪应力的分布。可见,4种方案下,锚杆拉拔段和锚固段的杆体-砂浆界面均未全部脱黏,没有出现锚固失效。与方案H1, H2, H3, H4对应的锚杆拉拔段和锚固段上的脱黏长度分别为3.49 m和2.75 m、2.97 m和1.71 m、2.45 m和1.71 m、1.93 m和1.19 m。与4.3 s时的情况相比,软弱层两边的正负剪应力峰值均发生转移,且脱黏长度的增加值大部分在0.5 m左右。

综上所述,砂浆-岩体界面和杆体-砂浆界面的脱黏破坏对砂浆层厚度增加的反应截然相反,砂浆-岩体界面的脱黏长度随着砂浆层厚度的增加而增加,而杆体-砂浆界面的脱黏长度随着砂浆层厚度的增加而减小。砂浆层厚度过大对砂浆-岩体界面不利,厚度过小则对杆体-砂浆界面不利。

2.2 锚杆横截面积对锚固界面剪应力分布的影响分析

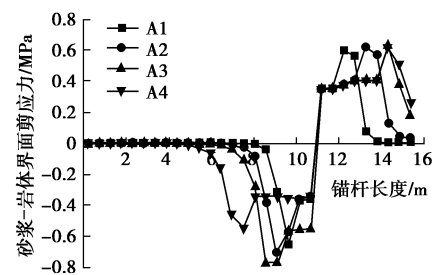
锚杆横截面积直接关系到锚杆与砂浆的接触面积,即杆体-砂浆界面面积的大小。仅改变锚杆的横截面积,设定4种方案,分别记为A1, A2, A3, A4,与之对应的锚杆横截面积分别为78.5, 380.1, 706.9, 962.1 mm²,通过这4种方案分析研究锚杆横截面积对锚固界面剪应力分布的影响。

(1) 锚杆横截面积对砂浆-岩体界面剪应力分布的影响分析

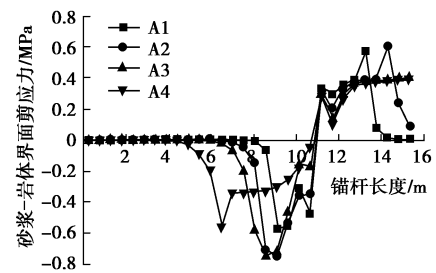
图7是地震波输入4.3, 10 s, 方案A1, A2, A3,

A4下,锚杆5的砂浆-岩体界面剪应力分布。

图7(a)可见,地震波输入4.3 s时,方案A1, A2, A3, A4下砂浆-岩体界面的正剪应力峰值分别位于#24, #26, #28, #28监测点,它的位置随着锚杆横截面积的增大逐渐向锚根方向发生转移。负剪应力峰值分别位于#19, #18, #18, #15监测点,它的位置随着锚杆横截面积的增大逐渐向锚头方向转移。图7(b)可见,地震作用结束时刻,即地震波输入10 s时,方案A1下锚固段的砂浆-岩体界面脱黏长度最小,方案A3、A4下因为锚固段的砂浆-岩体界面全部脱黏而整体失效。由此可知,锚杆横截面积的增大不能阻止砂浆-岩体界面正负剪应力峰值向锚根、锚头方向转移,也不能有效阻止脱黏长度的增大。



(a) 地震波输入4.3 s时



(b) 地震波输入10 s时

图7 A1, A2, A3, A4下砂浆-岩体界面剪应力分布

Fig. 7 Distribution of shear stress at mortar-rock interface under A1, A2, A3, A4

(2) 锚杆横截面积对杆体-砂浆界面剪应力分布的影响分析

图8是地震波输入4.3, 10 s, 方案A1, A2, A3, A4下,锚杆5的杆体-砂浆界面剪应力分布。

从图7, 8可见,锚杆横截面积对杆体-砂浆界面和砂浆-岩体界面剪应力分布的影响具有一致性。地震波输入4.3 s时,杆体-砂浆界面正剪应力峰值的位置随锚杆横截面积的增大向锚根转移,负剪应力峰值向锚头转移。地震作用结束时刻,即地震波输入10 s时,方案A1下锚固段的杆体-砂浆界面脱黏长度最小,方案A4下,锚固段全部脱黏,其锚固整体失效,而从图7可知,不仅方案A4,而且方案A3,锚固段全部脱黏,其锚固整体失效,因此砂浆-岩体界面受锚杆横截面积影响更大。

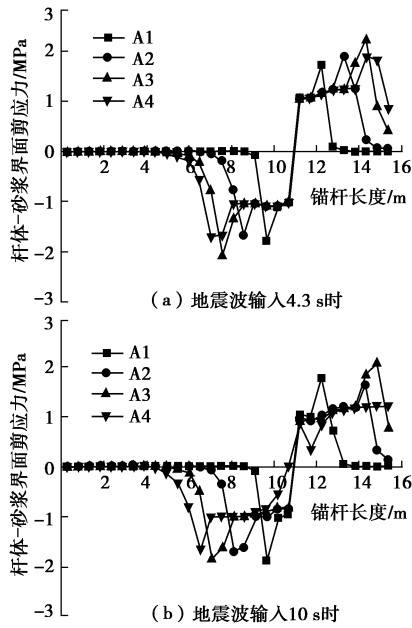


图 8 A1, A2, A3, A4 下杆体-砂浆界面剪应力分布

Fig. 8 Distribution of shear stress at bolt-mortar interface under

A1, A2, A3, A4

上述可见, 增大锚杆横截面积, 也就加大了杆体-砂浆界面的面积, 提高了锚杆的极限抗拔力。但是, 锚固边坡在地震荷载作用下, 两锚固界面的剪应力是由锚杆、砂浆、岩体三者协同作用决定的, 仅锚杆横截面积的增大不能阻止两锚固界面的正负剪应力峰值向锚杆两端转移和脱黏, 而且砂浆-岩体界面所受的影响比杆体-砂浆界面更甚。

2.3 锚固段长度对锚固界面剪应力分布的影响分析

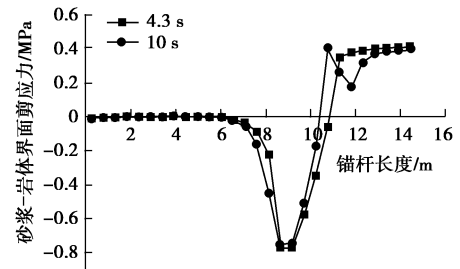
根据《GB 50330—2013 建筑边坡工程技术规范》^[12], 锚固段长度的取值范围应为 $4.2\text{ m} \leq L \leq 6.5\text{ m}$ 。因而基于之前所述分析模型和条件, 仅将原分析模型的各项锚杆锚固段长度均为 5 m 改为锚杆锚固段长度分别为 4, 5, 6, 7 m, 相应记为 L1, L2, L3, L4, 通过这 4 种方案分析研究锚固段长度对锚固界面剪应力分布的影响。

(1) 锚固段长度对砂浆-岩体界面剪应力分布的影响分析

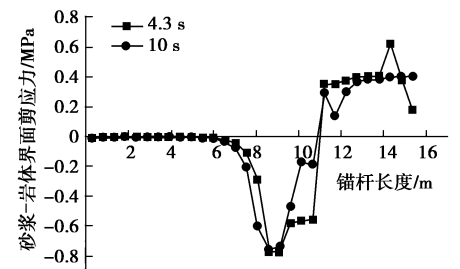
图 9 是地震波输入 4.3, 10 s, 方案 L1, L2, L3, L4 下, 锚杆 5 的砂浆-岩体界面剪应力分布。

图 9 可见, 方案 L1 中的锚固段长度小于规范要求, 地震波输入 4.3 s 时, 砂浆-岩体界面即全部脱黏, 锚固整体失效, 无法继续发挥作用。方案 L2 中的锚固段长度满足规范要求, 地震作用中期, 即地震波输入 4.3 s 时, 砂浆-岩体界面正剪应力峰值位置即接近锚根, 脱黏长度达到 4.16 m; 地震作用结束时, 即地震波输入 10 s 时, 砂浆-岩体界面剪应力全部下降为残余黏结强度, 5 m 的锚固段长度全部被调用完毕, 全部脱黏, 可见方案 L2 的 5 m 锚固段长度不足以维

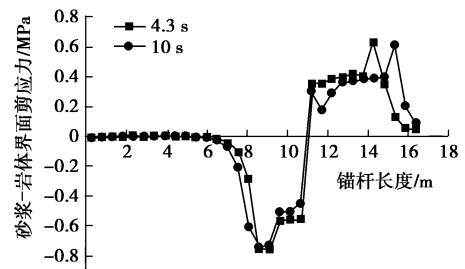
持边坡稳定; 方案 L3 满足规范要求, 锚固段长度有所增大, 该方案下砂浆-岩体界面最终的正负剪应力峰值没有到达锚根或锚头, 但锚根处的砂浆-岩体界面已获剪应力, 为 0.082 MPa, 整根锚杆被利用而未发生失效; 方案 L4 中的锚固段长度超出规范要求, 整个地震波输入过程中砂浆-岩体界面没有发生脱黏现象, 锚根附近的锚固段砂浆-岩体界面剪应力为 0, 这说明当锚固段超过一定长度后, 其黏结强度得不到调用, 因而锚固段长度应按规范取较大值。



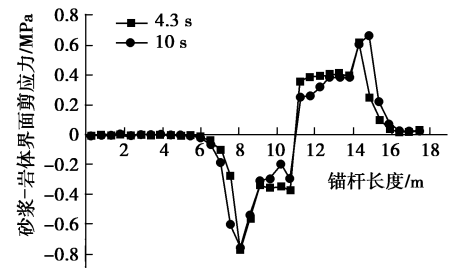
(a) 方案L1锚固段长度4 m



(b) 方案L2锚固段长度5 m



(c) 方案L3锚固段长度6 m



(d) 方案L4锚固段长度7 m

图 9 L1, L2, L3, L4 下砂浆-岩体界面剪应力分布

Fig. 9 Distribution of shear stress at mortar-rock interface under L1, L2, L3, L4

(2) 锚固段长度对杆体-砂浆界面剪应力分布的影响分析

图 10 是地震波输入 4.3, 10 s, 方案 L1, L2, L3, L4 下, 锚杆 5 的杆体-砂浆界面剪应力分布。

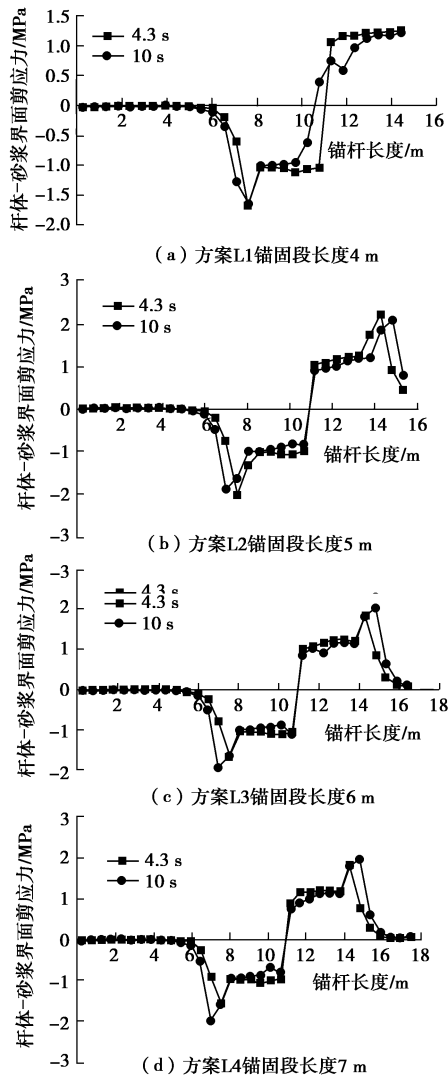


图 10 L1, L2, L3, L4 下杆体-砂浆界面剪应力分布

Fig. 10 Distribution of shear stress at bolt-mortar interface under L1, L2, L3, L4

图 10 可见, 方案 L1 中的锚固段长度小于规范要求, 地震作用下杆体-砂浆界面与砂浆-岩体界面的剪应力分布和脱黏失效具有相似规律, 即地震波输入 4.3 s 时, 杆体-砂浆界面就已全部脱黏, 锚固即已整体失效而无法继续工作。虽然方案 L2, L2, L3, L4 的锚固段长度增大, 计算终态时, 即地震波输入 10 s 时, 三方案下锚杆均能正常工作, 杆体-砂浆界面未全部脱黏, 但地震波输入 10 s 时, 方案 L2 的正剪应力峰值为 2.06 MPa, 接近极限黏结强度, 并且处在锚根附近, 锚根的剪应力也已达 0.755 MPa, 这说明锚固已接近失效, 不利于边坡的长期稳定。地震作用全过程, 方案 L3 的正负剪应力峰值均远离锚根和锚头, 锚根处的剪应力仅为 0.119 MPa, 该方案使得锚杆得到较充

分利用的同时, 能确保边坡长期稳定; 地震作用的始终, 方案 L4 中, 锚固段仅靠近软弱层 6 m 内的杆体-砂浆界面剪应力不为 0, 该范围内锚固界面的黏结强度得到调用, 而其余部分剪应力均为 0, 造成较大浪费。

上述分析可知, 锚固段长度对两锚固界面的剪应力分布具有相似影响和效果, 增加锚固段长度有利于边坡稳定, 但过长的锚固段并不能改善锚固效果和增加边坡的稳定性。

2.4 锚杆间距对锚固界面剪应力分布的影响分析

基于之前所述分析模型和条件, 仅改变锚杆间距, 设置 4 种四边形锚杆布置方案, 分别记为 J1, J2, J3, J4, 对应的锚杆间距分别为 1, 2, 3, 4 m, 锚杆 5 的起始坐标为 (4.75, 14) 始终不变, 其余锚杆的坐标根据 4 种方案分别调整, 分析锚杆间距对锚固界面剪应力分布的影响。

(1) 锚杆间距对砂浆-岩体界面剪应力分布的影响分析

图 11 是地震波输入 4.3 s 和 10 s, 方案 J1, J2, J3, J4 下, 锚杆 5 的砂浆-岩体界面剪应力分布。

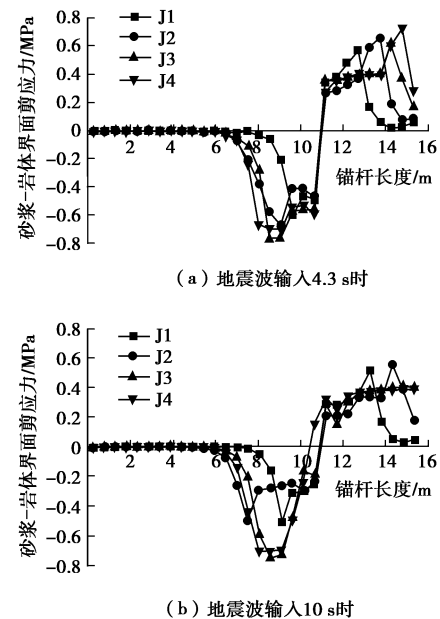


图 11 J1, J2, J3, J4 下砂浆-岩体界面剪应力分布

Fig. 11 Distribution of shear stress at mortar-rock interface under J1, J2, J3, J4

图 11 可见, 锚杆间距的改变对砂浆-岩体界面的剪应力分布以及脱黏状况均产生较大影响。地震波输入 4.3 s 时, 砂浆-岩体界面剪应力的大小以及脱黏长度均随锚杆间距减小而减小。地震作用结束时, 即地震波输入 10 s 时, 方案 J3 和 J4 的砂浆-岩体界面已经整体脱黏失效, 而方案 J1 和 J2 下的锚固仍然保持稳定。这说明, 随着锚杆间距的减小, 锚杆数量增多,

边坡荷载由更多的锚杆来承担, 锚杆加强了对边坡岩体的约束, 从而减小了边坡变形和位移, 也减小了砂浆与岩体间的相对位移。而且可以看出, 方案 J2 最为适宜, 既保证了砂浆-岩体界面的稳定, 且锚杆得到充分利用。

(2) 锚杆间距对杆体-砂浆界面剪应力分布的影响分析

图 12 是地震波输入 4.3 s 和 10 s, 方案 J1, J2, J3, J4 下, 锚杆 5 的杆体-砂浆界面剪应力分布。

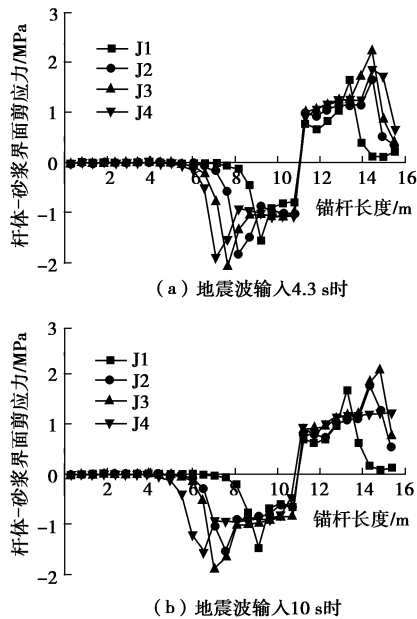


图 12 J1, J2, J3, J4 下杆体-砂浆界面剪应力分布

Fig. 12 Distribution of shear stress at bolt-mortar interface under J1, J2, J3, J4

比较图 11, 12 可见, 杆体-砂浆界面的剪应力分布以及脱黏均与砂浆-岩体界面的情况较为一致。地震波输入 4.3 s 时, 杆体-砂浆界面正负剪应力峰值随锚杆间距增大向锚根和锚头转移, 脱黏长度增加。地震波输入 10 s 时, 方案 J1, J2, J3, J4 杆体-砂浆界面均保持稳定, 方案 J4 杆体-砂浆界面全部脱黏, 整体失效。这是因为锚杆间距过大, 数量过少, 不足以抑制边坡变形的发展, 杆体与砂浆之间产生过大的相对位移, 导致其界面全部脱黏, 整体失效。锚杆间距在 3 m 以内均满足杆体-砂浆界面稳定要求。

由此可见, 在对含有软弱层的边坡加固时, 应合理安排锚杆间距, 适当减小锚杆间距有利于边坡的安全稳定。方案 J2, 即 2 m 的锚杆间距是本分析模型的最优间距方案。

2.5 锚杆倾角对锚固界面剪应力分布的影响分析

基于之前所述分析模型, 保持包括锚固段长度 (5 m) 在内的条件不变, 仅改变锚杆倾角, 设置 4 种方案, 分别记为 Q1, Q2, Q3, Q4, 对应的锚杆倾角分

别为 5° , 10° , 15° , 20° , 则与之相应的锚杆 5 长度分别为 18.67, 17.44, 16.37, 15.62 m, 分析锚杆倾角对锚固界面剪应力分布的影响。

(1) 锚杆倾角对砂浆-岩体界面剪应力分布的影响分析

图 13 是地震波输入 4.3 s 和 10 s, 方案 Q1, Q2, Q3, Q4 下, 锚杆 5 的砂浆-岩体界面剪应力分布。

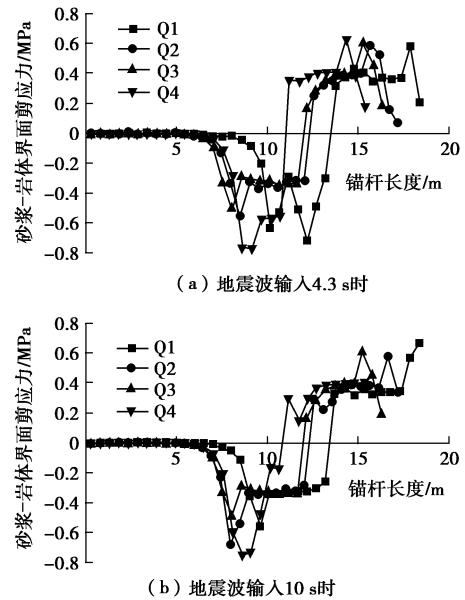


图 13 Q1, Q2, Q3, Q4 下砂浆-岩体界面剪应力分布

Fig. 13 Distribution of shear stress at mortar-rock interface under Q1, Q2, Q3, Q4

图 13 可见, 在锚固段长度 (5 m) 一定情况下, 增大锚杆倾角会减小锚杆拉拔段长度, 从而减小锚杆总长度, 同时对砂浆-岩体界面的剪应力分布以及脱黏状况产生较大影响。随锚杆倾角的增大, 拉拔段上砂浆-岩体界面剪应力峰值向锚头靠近, 而锚固段砂浆-岩体界面剪应力峰值远离锚根。这说明增大锚杆倾角会减小砂浆-岩体界面的脱黏长度。地震作用结束时, 即地震波输入 10 s 时, 方案 Q4 中锚杆锚固段砂浆-岩体界面已经全部脱黏失效; 方案 Q1 中锚杆正剪应力峰值已至锚根, 处于临界脱黏状态, 可认为失效; 方案 Q2 和 Q3 的锚固仍保持稳定, 但相比之下, 方案 Q3 的砂浆-岩体界面脱黏长度较短, 杆体总长度也较短, 因此, 方案 Q3 既可维持锚固稳定, 且锚杆得到充分利用。

(2) 锚杆倾角对杆体-砂浆界面剪应力分布的影响分析

图 14 是地震波输入 4.3 s 和 10 s, 方案 Q1, Q2, Q3, Q4 下, 锚杆 5 的杆体-砂浆界面剪应力分布。

比较图 13, 14 可见, 杆体-砂浆界面与砂浆-岩体界面的剪应力分布对锚杆倾角改变的反应较为一致。

自方案 Q1, Q2, Q3, Q4, 随着锚杆倾角的增大, 方案 Q4 中锚杆长度比 Q3 中的减小了 0.75 m, 方案 Q3 比 Q2 减小 1.07 m, Q2 比 Q1 减小 1.23 m, 拉拔段上杆体-砂浆界面剪应力峰值向锚头靠近, 其界面脱黏长度增加, 锚固段上剪应力峰值离锚根渐远, 其界面脱黏长度缩小, 但与砂浆-岩体界面不同, 地震作用结束时, 方案 Q1, Q2, Q3, Q4 下杆体-砂浆界面均未失效, 这说明增大锚杆倾角会减小锚杆总长度, 但倾角增大对杆体-砂浆界面脱黏的影响比其导致的锚杆长度减小的影响大, 方案 Q4, 即锚杆倾角为 20° , 对应的锚杆总长度最短, 杆体-砂浆界面仍稳定。

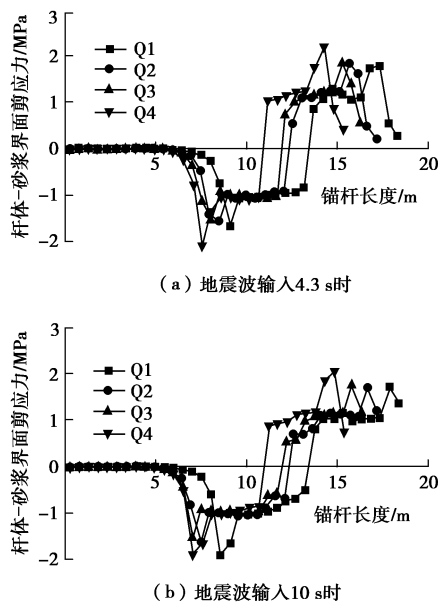


图 14 Q1, Q2, Q3, Q4 下杆体-砂浆界面剪应力分布

Fig. 14 Distribution of shear stress at bolt-mortar interface under Q1, Q2, Q3, Q4

上述可见, 两锚固界面剪应力分布和脱黏对锚杆倾角的改变表现出较为一致的规律。锚杆倾角增大对锚杆拉拔段锚固界面具有不利的影响, 但可有效减小锚固段两锚固界面的脱黏长度, 从而有利于锚固稳定。在锚固段长度一定的情况下适当增大锚杆倾角, 有利于两锚固界面稳定, 因此适当增大锚杆倾角是可行、经济的锚固优化方法。

3 结 论

本文通过修正的 cable 单元建模和改进剪应力提取方法, 研究分析了含软弱层边坡锚固参数对两锚固界面上剪应力分布的影响, 获得了地震作用下含软弱层岩体边坡锚固界面剪应力分布及其随锚固参数的变化规律, 揭示了地震锚固机理, 取得的主要结论如下:

(1) 砂浆-岩体界面的脱黏长度随砂浆层厚度增

加而增加, 而杆体-砂浆界面的脱黏长度随砂浆层厚度增加而减小。砂浆层厚度过大对砂浆-岩体界面不利, 厚度过小则不利于杆体-砂浆界面。

(2) 随锚杆横截面积的增大, 杆体-砂浆界面的面积加大, 锚杆能够承受的极限抗拔力提高, 但仅增大锚杆横截面积, 不能阻止两锚固界面的剪应力峰值向锚杆两端转移和脱黏的发展, 两锚固界面中砂浆-岩体界面的脱黏更甚。

(3) 锚固段长度对两锚固界面的剪应力分布具有相似影响, 增加锚固段长度有利于边坡稳定, 但锚固段达到一定长度后, 继续增加该长度对两锚固界面剪应力分布影响较小, 不能改善锚固效果和边坡的稳定性。

(4) 两锚固界面剪应力以及脱黏长度均随锚杆间距减小而减小, 适当减小锚杆间距有利于边坡的安全稳定, 2 m 是本分析模型的最优锚杆间距。

(5) 增大锚杆倾角可缩小锚固段两锚固界面的脱黏长度, 从而有利于锚固稳定。在锚固段长度一定的情况下适当增大锚杆倾角是可行的。

参考文献:

- [1] 尤春安. 全长黏结式锚杆的受力分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(3): 339 - 341. (YOU Chun-an. Mechanical analysis of the fully bonded anchor[J]. Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(3): 339 - 341. (in Chinese))
- [2] 程良奎, 范景伦, 韩 军, 等. 岩土锚固[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003. (CHENG Liang-kui, FAN Jing-lun, HAN Jun, et al. Anchoring in soil and rock[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2003. (in Chinese))
- [3] 雒亿平, 史 盛, 言志信. 抗拔荷载作用下锚固体与岩土体界面剪切作用[J]. 煤炭学报, 2015, 40(1): 58 - 64. (LUO Yi-ping, SHI Sheng, YAN Zhi-xin. Shear interaction of anchorage body and rock and soil interface under the action of uplift load[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(1): 58 - 64. (in Chinese))
- [4] 任非凡, 徐 超, 谌文武. 多界面复合锚杆荷载传递机制的数值模拟[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2011, 39(12): 1753 - 1759. (REN Fei-fan, XU Chao, CHEN Wen-wu. Numerical simulation on load transfer mechanism of multi-interface composite rockbolt[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2011, 39(12): 1753 - 1759. (in Chinese))
- [5] 张桂花. 全长锚固锚杆的剪应力分布规律研究[J]. 煤炭工程, 2012(10): 92 - 95. (ZHANG Gui-hua. Study on shear

- stress distribution law of full length anchor bolt[J]. Journal of Coal Engineering, 2012(10): 92 - 95. (in Chinese))
- [6] 叶海林, 郑颖人, 黄润秋, 等. 锚杆支护岩质边坡地震动力响应分析[J]. 后勤工程学院学报, 2010, 26(4): 1 - 7. (YE Hai-lin, ZHENG Ying-ren HUANG Run-qiu, et al. Analysis of dynamic response of rockbolt in rock slope under earthquake[J]. Journal of Logistical Engineering University, 2010, 26(4): 1 - 7. (in Chinese))
- [7] ALI Mortazavi, FATEMEH TabatabaeiAlavi. A numerical study of the behavior of fully mortared rockbolts under dynamic loading[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2013, 54: 66 - 72
- [8] 言志信, 张刘平, 江平, 等. 锚固上覆红黏土岩体边坡的地震动力响应[J]. 岩石力学, 2014, 35(3): 753 - 758. (YAN Zhi-xin, ZHANG Liu-ping, JIANG Ping, et al. Dynamic response of anchoring overlying red clay rock slope under earthquake action[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(3): 753 - 758. (in Chinese))
- [9] 董建华, 朱彦鹏. 框架锚杆支护边坡地震响应分析[J]. 兰州理工大学学报, 2008, 34(2): 118 - 124. (DONG Jian-hua, ZHU Yan-peng. Seismic behavior of a slope protected by a soil nailing retaining wall during an earthquake[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2008, 34(2): 118 - 124. (in Chinese))
- [10] 叶根飞. 岩土锚固荷载传递规律与锚固特性试验研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2012. (YE Gen-fei. Law of anchorage load transfer and experimental study on anchoring characteristics[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2012. (in Chinese))
- [11] 韩军, 陈强, 刘元坤, 等. 锚杆灌浆体与岩(土)体间的黏结强度[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(19): 84 - 88. (HAN Jun, CHEN Qiang, LIU Yuan-kun, et al. Bond strength between anchor mortar and rock or soil masses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(19): 84 - 88. (in Chinese))
- [12] GB50330—2013 建筑边坡工程技术规范[S]. 2013. (GB50330—2013 Technical code for building slope engineering[S]. 2013. (in Chinese))

《岩土工程学报》征订启事

《岩土工程学报》创办于 1979 年, 是我国水利、土木、力学、建筑、水电、振动等六个全国性学会联合主办的学术性科技期刊。由南京水利科学研究院承办, 国内外公开发行。主要刊登土力学、岩石力学领域中能代表当今先进理论和实践水平的科学研究和工程实践成果等。报道新理论、新技术、新仪器、新材料的研究和应用。欢迎国家自然科学基金项目及其他重要项目的研究成果向本刊投稿, 倡导和鼓励有实践经验的作者撰稿, 并优先刊用这些稿件。主要栏目有黄文熙讲座、综述、论文、短文、工程实录、焦点论坛、讨论和简讯等。

本刊被《中文核心期刊要目总览》连续多年确认为核心期刊, 并在建筑类核心期刊中位于前列; 本刊被科技部“中国科技论文统计源期刊”(中国科技核心期刊)及“中国科技论文与引文数据库”收录; 本刊被中国科学院“中国科学引文数据库”收录; 本刊被“中国知网”全文收录及“中国学术期刊综合评价数据库”收录; 本刊被“工程索引 Ei Compendex 数据

库”和“日本科学技术振兴机构数据库 JST”等国际数据库收录。本刊网址(www.cgejournal.com)全文发布本刊所有刊载文章。

本刊读者对象为土木建筑、水利电力、交通运输、矿山冶金、工程地质等领域中从事岩土工程及相关专业的科研人员、设计人员、施工人员、监理人员和大专院校师生。

本刊为月刊, A4 开, 双栏排版, 192 页, 每月中旬出版, 每期定价 40 元, 全年定价 480 元。

本刊国际标准刊号 ISSN 1000 - 4548, 国内统一刊号 CN 32 - 1124/TU, 国内发行代号 28 - 62, 国外发行代号 MO 0520。欢迎广大读者在全国各地邮局订购, 也可在编辑部订购(不另收邮费)。编辑部订购地址: 南京虎踞关 34 号《岩土工程学报》编辑部; 邮编: 210024; 联系电话: 025-85829534, 85829543, 85829553, 85829556; 传真: 025-85829555; E-mail: ge@nhri.cn。

(本刊编辑部)