

言志信,龙哲,周小亮,等. 锚固参数对地震作用下岩质边坡锚固界面剪切作用影响的数值分析[J]. 煤炭学报,2017,42(10):2537-2544. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2017.0318

YAN Zhixin, LONG Zhe, ZHOU Xiaoliang, et al. Numeral analysis of anchoring parameters for bolt in rock slope anchored interface shear action under earthquake[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(10): 2537-2544. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2017.0318

锚固参数对地震作用下岩质边坡锚固界面剪切作用影响的数值分析

言志信^{1,2}, 龙哲¹, 周小亮¹, 屈文瑞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 467000)

摘要:基于FLAC^{3D}建立锚固岩质边坡数值分析模型,并用优化的cable单元建模分别模拟分析锚杆-砂浆界面上和砂浆-岩体界面上的剪切作用,通过改变全长黏结锚杆的锚固参数(锚固角、锚固段长度、锚杆竖向间距、锚杆直径、锚孔直径),对地震作用下锚固岩质边坡锚固界面上的剪应力及动力响应规律进行研究。研究发现:在地震作用下,随着锚固角的增大,锚固界面上的峰值剪应力减小,边坡永久位移增大;当锚杆在结构面两侧的长度相等时锚杆界面的锚固作用最大化;当锚杆竖向间距减小,峰值剪应力和边坡永久位移均减小;随锚杆和锚孔直径的增大,峰值剪应力和边坡永久位移总体呈减小的趋势。在考虑安全性、经济性的前提下,建议适当减小锚固角和锚杆竖向间距,保持锚杆拉拔段与锚固段长度相等,锚杆和锚孔直径保持合理的比值。该研究可为相关理论、试验研究和锚固边坡抗震设计提供参考。

关键词:锚固岩质边坡;锚固参数;锚杆-砂浆界面;砂浆-岩体界面;界面剪应力;永久位移

中图分类号:TU435 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-9993(2017)10-2537-08

Numeral analysis of anchoring parameters for bolt in rock slope anchored interface shear action under earthquake

YAN Zhixin^{1,2}, LONG Zhe¹, ZHOU Xiaoliang¹, QU Wenrui¹

(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)

Abstract: Based on FLAC^{3D}, building an anchored rock slope numerical model. The shear interaction on cable-grout interface and grout-rock interface were simulated separately by modified cable element, to study the regularities of wholly grouted anchor bar anchored interface shear stress in anchored slope and slope dynamic response under different support parameters (anchorage angle, anchoring section length, bolt spacing, diameter of anchor bar and anchor drill hole). The results of the study include the following: With the increase of anchorage angle, the anchored interface peak shear stress value decreases while the permanent displacement of slope increase. The effect of interface anchoring was optimized with the same length of bolt between both side of structural surface. With the decrease of bolt vertical spacing, the peak shear stress value and peak displacement decrease, and they decrease with the addition of diameter of anchor bar and anchor drill hole. On the premise of safety and economy, the authors suggest to decrease anchorage angle and bolt vertical spacing properly, keep the same length between drawing section and anchoring section of bolt,

收稿日期:2017-03-13 修回日期:2017-05-31 责任编辑:毕永华

基金项目:国家自然科学基金面上资助项目(41372307,51478065);甘肃省建设科技攻关资助项目(kjxm2014-42)

作者简介:言志信(1961—),男,湖南株洲人,特聘教授,博士生导师,博士(后)。E-mail:yzx10@163.com。通讯作者:龙哲(1990—),男,湖南株洲人,博士研究生。E-mail:longzh08@lzu.edu.cn

maintain a proper ratio between the diameter of anchor bar and anchor drill hole. The study can provide references for theoretical and experimental study on relevant aspects, and earthquake resistant design of anchored slope.

Key words: anchored rock slope; anchoring parameters; bolt-grout interface; grout-rock interface; interface shear stress; permanent displacement

锚固是边坡治理的常用方法,其结构巧、施工易、造价低、效果好。通过调研汶川地震边坡的破坏现象,还发现锚杆锚固边坡也具有较好的抗震性能,而目前锚固边坡动力稳定性研究远落后于工程实践,因此急需针对锚杆锚固的核心问题——锚固界面剪切作用进行研究。

前人对静力荷载下的锚固问题进行了探索^[1-4]。对动力荷载下的锚固问题也取得了一定的研究成果,文献[5-7]对动力荷载下锚杆的动力响应进行了研究。ZOU等^[8]研究了爆炸波对锚固软岩边坡的影响。朱宏伟^[9]、叶海林等^[10]研究了动力边坡锚杆锚固参数的敏感性。言志信等^[11]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的分布规律。

文献调研和工程勘察均显示,锚固边坡动力稳定性与锚杆的锚固参数(锚固角、锚固段长度、锚杆竖向间距、锚杆直径和锚孔直径等)密切相关。然而,至今仍鲜有人对地震作用下边坡锚固界面上的剪切作用与锚杆锚固参数之间的关系进行研究,本文利用FLAC^{3D}建立了锚固边坡数值分析模型,针对该问题进行深入系统的数值模拟分析,揭示锚固界面上的剪切作用及其与边坡地震响应的关系,无疑对地震作用下锚固边坡稳定机理的研究和对边坡抗震设计都是很有意义的。

1 建模方式的选取

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,本文在研究锚固界面的剪切作用时,尝试改进剪应力提取方法,从而首次获得两个锚固界面上的剪应力。

改进方法如下:求解锚杆-砂浆界面上的剪应力时建模如图1(a)所示,cable单元的内层和外层分别采用锚杆杆体和砂浆的参数,计算所得轴力为锚杆杆体上各点的轴力,将各点的轴力代入式(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建模如图1(b)所示,将锚杆杆体和砂浆构成的锚固体看作复合锚杆杆体,内层参数采用复合锚杆参数,外层采用岩体参数,由式(1)即可获得砂浆-岩体界面上的剪应力。

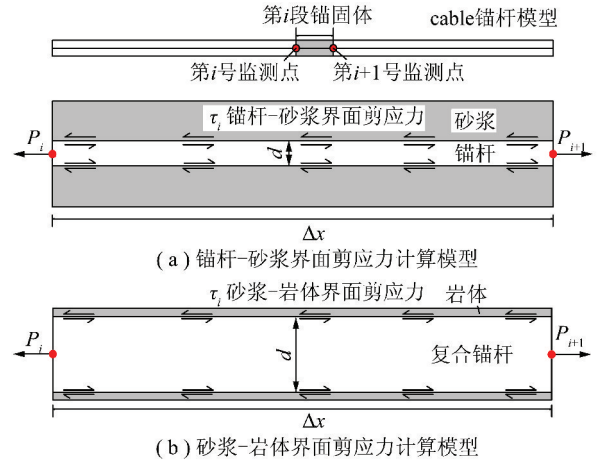


图1 求解不同界面剪应力时 cable 单元的建模方式

Fig. 1 Calculation model for different interface shear stress of cable element

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

式中, τ_i 为锚杆上第*i*号和第*i+1*号监测点间第*i*段锚固体的界面剪应力平均值,Pa; ΔP 为两个监测点间的轴力差值,N; d 为杆体直径,m; Δx 为第*i*段锚固体长度,m,计算时各段锚固体的长度相同,均为0.5 m。

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,添加了界面破坏时的砂浆应力软化功能。如图2所示,即当某处cable单元的界面剪应力超过极限黏结强度时,将其对应的剪应力自动修正为残余黏结强度,进而模拟该点界面的脱黏破坏。

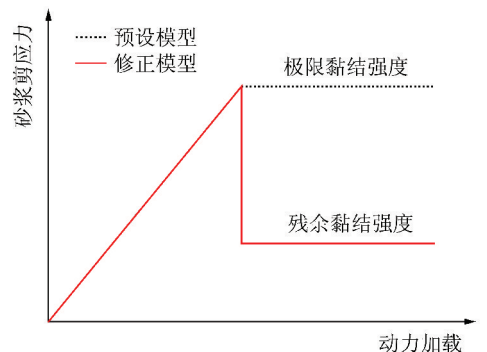


图2 cable 单元界面剪应力软化修正模型

Fig. 2 Interface shear stress-softening modified model of cable element

2 边坡建模及动力加载

2.1 边坡参数

一个含软弱结构面的岩质边坡模型如图 3 所示,坡高为 20 m,坡角为 75°,边坡长度为 40 m,宽度为 3 m,岩体密度为 2 500 kg/m³;软弱结构面的倾角即与水平面的夹角为 55°,结构面厚度为 1 m;边坡岩体和软弱结构面的物理力学参数见表 1。

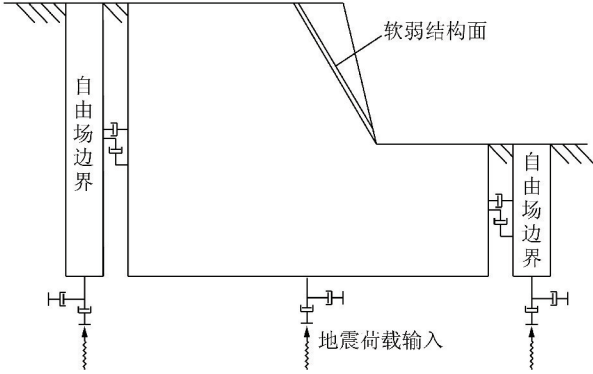


图 3 锚固边坡模型
Fig. 3 Anchored slope model

表 1 边坡材料参数

Table 1 Material parameter of slope

类别	弹性模量/GPa	泊松比	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)	抗拉强度/MPa
边坡岩体	10.0	0.25	1.00	35	6.00
软弱结构面	0.5	0.25	0.06	30	0.03

2.2 锚杆锚固参数

边坡采用全长黏结锚杆锚固,注浆采用 M30 水泥砂浆,锚杆弹性模量为 210 GPa,密度为 7 800 kg/m³。根据文献调研^[13-14],取锚杆-砂浆界面和砂浆-岩体界面上的极限黏结强度分别为 8 和 2.4 MPa,残余黏结强度为极限黏结强度的 45%。

边坡锚固方案如图 4 所示,锚杆锚固角为 15°,锚固段长度为 4 m,锚杆竖向间距为 3 m,锚杆直径为 30 mm,锚孔直径为 120 mm。沿边坡坡面从下往上依次编号,编号分别为 1,2,3,4,5。

本文以该锚固方案为基本工况,依据《建筑边坡工程技术规范 GB50330—2013》^[14]改变锚杆锚固角、锚固段长度、锚杆竖向间距、锚杆直径和锚孔直径,研究锚固参数对锚固界面上的剪切作用及边坡地震响应的影响。

2.3 动力加载

本文选取滤波和基线校正后的 Kobe 折减波作为输入地震波,波形如图 5 所示。对边坡施加不同幅值

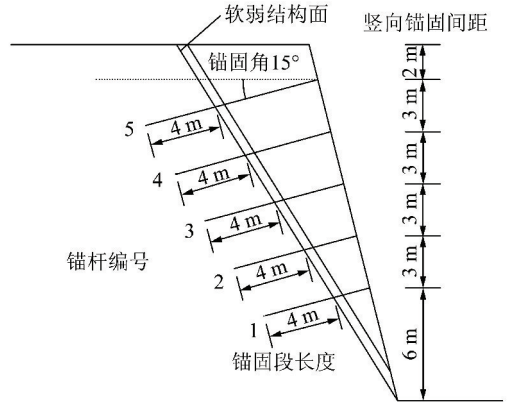


图 4 边坡基本锚固方案示意
Fig. 4 Anchor bolt scheme of slope

的输入地震波进行计算,其中幅值为 0.2g 的输入地震波作为基本输入地震波。

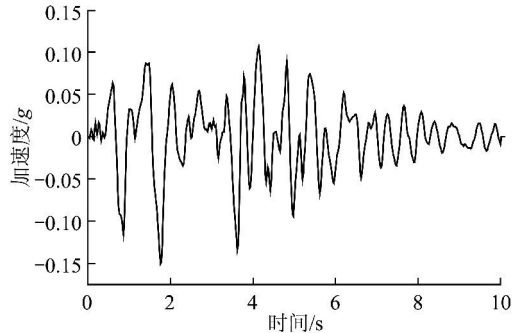


图 5 计算输入的地震波加速度时程曲线
Fig. 5 Input acceleration time history curve

3 数值模拟结果分析

3.1 锚固前后边坡动力响应分析

为了检验边坡锚固效果,对锚固前的边坡和按基本工况完成锚固的边坡均施加具有相同幅值的输入地震波进行对比计算,设定的地震波幅值分别为:0.1g,0.15g,0.2g,0.3g,0.4g,对应的计算结果如图 6 所示。

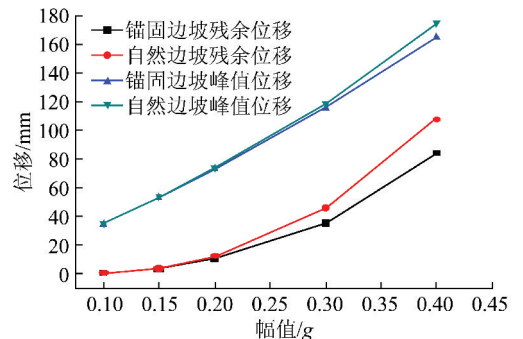


图 6 边坡锚固前后位移与幅值关系曲线
Fig. 6 Relation curve of slope displacement before and after anchor along amplitude

幅值为 $0.2g$ 时,边坡锚固后的峰值位移,即地震过程中边坡位移的最大值较未锚固时减小了 0.62 mm ,减小幅度仅为 0.84% ;边坡锚固后的永久位移,即地震结束时边坡位移的最大值较未锚固时减小了 2.19 mm ,减小幅度为 17.59% 。当幅值达到 $0.4g$ 时,峰值位移减小了 9 mm ,减小幅度仅为 5.17% ;永久位移减小了 22.8 mm ,减小幅度为 21.15% 。

边坡的峰值位移和永久位移最大值均出现在坡顶处,说明边坡发生倾倒-滑动破坏。边坡锚固后峰值位移的减小幅度均远小于永久位移的减小幅度,说明边坡的峰值位移的大小主要由地震波幅值控制,与是否锚固关系较小。而在地震震动峰值过后,地震波能量逐渐衰减,基岩趋于稳定,由于软弱结构面出现破坏,危岩仍呈向临空面方向移动之势,基岩和危岩间的相对位移增大,而锚固系统能有效遏制边坡的变形破坏,减小边坡永久位移。

图 7,8 为在基本输入地震波作用下,动力计算结束时按基本工况锚固边坡的两锚固界面上剪应力分布情况。两个锚固界面上的剪应力随杆长的分布规律相似,剪应力在软弱结构面两侧分别达到正负峰值,并向锚杆两端递减,从坡脚到坡顶剪应力的峰值逐渐增大。为了便于说明,以锚头处为锚杆长度 0 点,参考锚杆中性点理论^[15]将锚固界面上剪应力为 0 且两侧剪应力正负发生改变的点定义为中性点,将锚杆中性点到锚根这段锚固在基岩内的部分定为锚固段,将中性点到锚头这段受到危岩拉拔力的部分定为拉拔段。

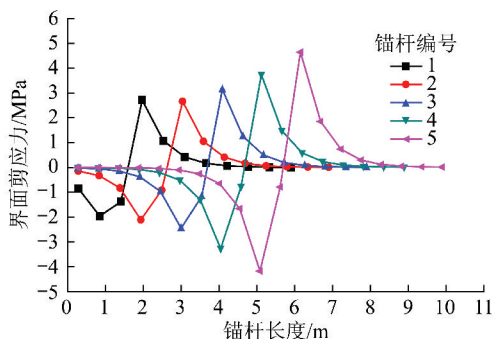


图 7 锚杆-砂浆界面上的剪应力分布曲线

Fig. 7 Distribution curve of bolt-grout interface shear stress

研究锚固界面上的剪切作用时,常用的物理量是锚固界面上的峰值剪应力,即各段锚固体中 $|\tau_i|$ 的最大值。而边坡锚固对边坡动力响应相关物理量中的边坡永久位移影响最大。故本文以锚固界面上的峰值剪应力和边坡永久位移作为主要分析对象。

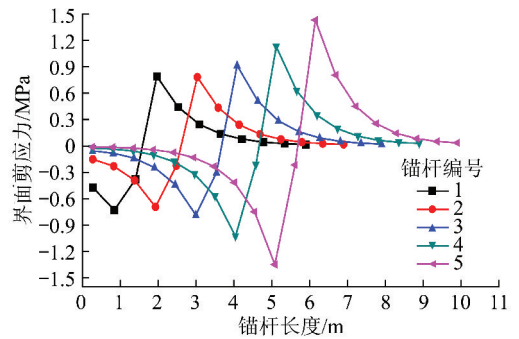


图 8 砂浆-岩体界面上的剪应力分布曲线

Fig. 8 Distribution curve of grout-rock interface shear stress

3.2 锚固角的影响

根据规范,安装锚杆时锚固角的确定范围宜为 $10^\circ \sim 35^\circ$,故保持基本工况的其他锚固参数不变,仅改变其锚固角,即针对锚固角分别为 $10^\circ, 15^\circ, 20^\circ, 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ$ 的情况,对锚固边坡施加基本输入地震波开展研究。

如图 9 所示,随着锚固角从 10° 增大至 35° ,两锚固界面上的峰值剪应力均减小了 55% 左右。这是由于随着锚固角的增大,锚杆轴向与边坡运动方向之间的夹角增大,锚固界面上的剪应力减小,亦即锚固界面抗剪作用减弱。

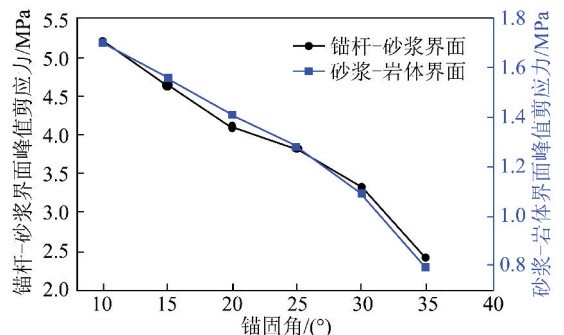


图 9 峰值剪应力与锚固角关系曲线

Fig. 9 Relation curve between peak shear stress value and anchorage angle

如图 10 所示,边坡永久位移随着锚固角的增大呈线性增大。当锚固角为 10° 时,锚固边坡永久位移为 10.02 mm ,比未锚固边坡降低了 19.5% 。当锚固角达到 35° 时,锚固边坡永久位移为 12.27 mm ,已经接近未锚固边坡 12.45 mm 的永久位移,基本失去锚固效果。说明在满足施工要求的前提下,应当减小锚固角。

3.3 锚杆竖向间距的影响

保持基本工况中边坡最底层和最顶层锚杆位置不变(竖向总间距为 12 m),将中间锚杆的竖向间距分别设定为 $1, 2, 3, 4\text{ m}$,对应的锚杆总数分别为 13

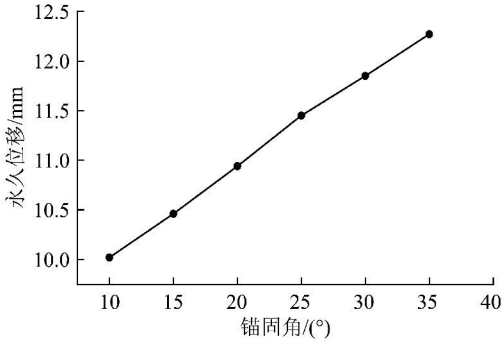


图 10 边坡永久位移与锚固角关系曲线

Fig. 10 Relation curve between slope permanent displacement and anchorage angle

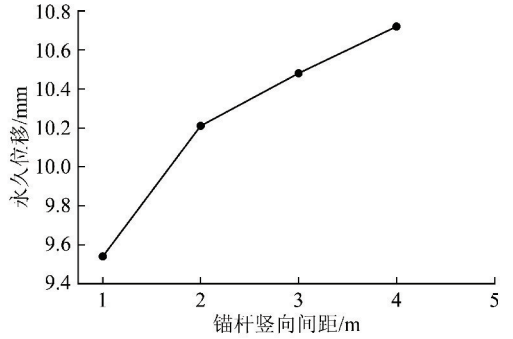


图 12 边坡永久位移与锚杆竖向间距关系曲线

Fig. 12 Relation curve between slope permanent displacement and bolt vertical spacing

根、7 根、5 根、4 根,对锚固边坡施加基本输入地震波研究锚杆竖向间距对锚固的影响。

由图 11 和 12 可知,随着锚杆竖向间距的减小,峰值剪应力和边坡永久位移逐渐减小。间距 1 m 相比间距 4 m 时,两锚固界面上的峰值剪应力均减小了 20% 左右。这是因为随着锚杆竖向间距减小,相同高程范围内铺设的锚杆数增加,锚固力由更多的锚杆承担,整体锚固效果得到改善,边坡永久位移减小。但永久位移的减小幅度相比锚杆数量的增幅逐渐降低,这是由于锚杆铺设过密导致相邻锚杆作用影响范围的过度重叠,不利于各锚杆锚固作用的充分发挥,降低了单根锚杆的性价比,所以在抗震设计时需综合考虑经济性,合理设置锚杆竖向间距。

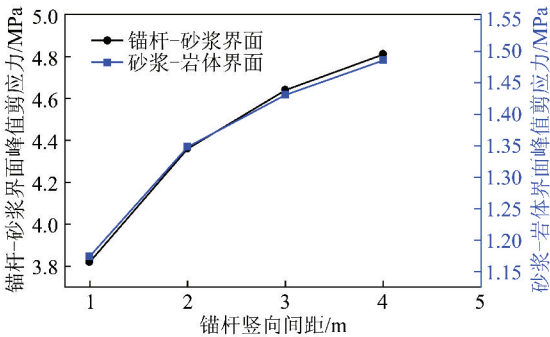


图 11 峰值剪应力与锚杆间距关系曲线

Fig. 11 Relation curve between peak shear stress value and bolt spacing

3.4 锚固段长度的影响

根据规范,岩石锚杆锚固段长度应在 3 ~ 6.5 m 之间,故保持基本工况的其他锚固参数不变,仅改变锚杆的锚固段长度,即设锚杆的锚固段长度分别为 3,4,5,6 m,研究地震作用下锚固岩质边坡锚固段长度对锚固的影响。

地震波加速度幅值为 0.2g 时,所有锚固界面上的峰值剪应力均未达到极限黏结强度,此时锚固段长度对峰值剪应力的影响很小。当地震波加速度幅值

达到 0.4g 时,5 根锚杆的峰值剪应力均超过极限黏结强度,锚固界面发生脱黏破坏,以先出现破坏的砂浆-岩体界面为对象,对比不同锚固段长度时锚固界面的脱黏情况,分析其对锚固界面上剪切作用的影响。

如图 13 所示,当锚固段的长度为 3 m 时,最接近坡脚的 1 号锚杆由于拉拔段的长度较短,所以拉拔段的锚固界面完全脱黏。2 号、3 号锚杆的锚固段和拉拔段长度相近,当一端完全脱黏时,另一端也接近完全脱黏。而 4 号、5 号锚杆锚固段上的锚固界面均完全脱黏,说明需要增加这两根锚杆的锚固段长度,使拉拔段上锚固界面的锚固作用得以发挥。

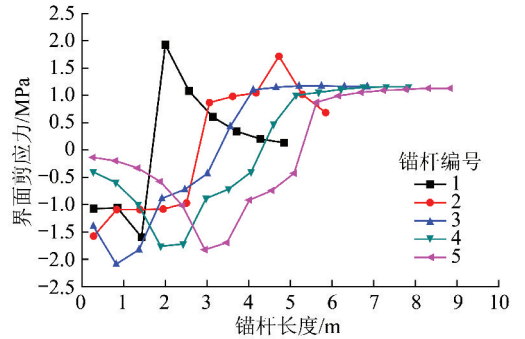


图 13 砂浆-岩体界面上剪应力分布曲线(锚固段长度 3 m)

Fig. 13 Distribution curve of grout-rock interface shear stress(anchoring section length 3 m)

如图 14 所示,当锚固段的长度为 6 m 时,1 号锚杆的剪应力分布对比锚固段长度 3 m 时没有变化,说明当锚杆沿拉拔段锚固界面完全脱黏时,增加锚固段的长度无法减小锚杆脱黏长度。2 号锚杆和 3 号锚杆锚固段上的峰值剪应力对应位置更加接近中性点,但由于拉拔段的长度有限,对这两根锚杆总体锚固效果的改善不大。4 号锚杆和 5 号锚杆拉拔段的峰值剪应力比锚固段长度为 3 m 时更接近锚头,说明随着这两根锚杆锚固段长度增加,拉拔段上锚固界面的锚固作用得以发挥。

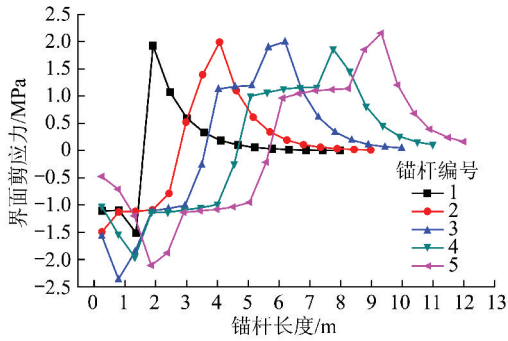


图 14 砂浆-岩体界面上剪应力分布曲线(锚固段长度 6 m)

Fig. 14 Distribution curve of grout-rock interface shear stress(anchoring section length 6 m)

将每根锚杆的脱黏段长度除以锚杆总长,得到脱黏段长度百分比。分析图 15 可以发现,锚固段长 3 m 时 1~5 号锚杆的脱黏段长度百分比呈现先增大后减小的规律,说明锚杆拉拔段与锚固段长度越接近,锚固界面在完全脱黏前的利用率越高。对比锚固段长度为 5 m 和 6 m 时的脱黏段长度百分比,百分比随高程的变化规律一致,而他们的脱黏段长度完全相同。对比在锚固段长度为 3 m 和 6 m 时均出现完全脱黏的 1~3 号锚杆,完全脱黏时的脱黏段百分比随锚杆从下往上的编号顺序,亦即随拉拔段长度的增加而有不同程度的下降。这都说明当锚固段长度超过拉拔段长度时,继续增加锚固段长度反而会降低锚固界面的利用率。所以在满足设计要求的前提下,保持锚杆拉拔段与锚固段的长度相同,是性价比较高的选择。

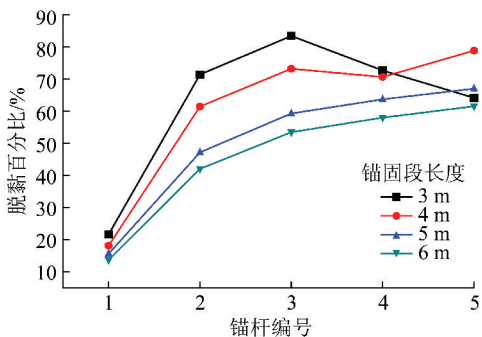


图 15 锚杆脱黏段百分比与锚固段长度的关系曲线

Fig. 15 Relation curves between debonding length percentage and anchoring section length

3.5 锚杆直径的影响

根据规范,锚杆杆体面积应该小于锚孔面积的 20%,换算得锚杆直径应小于锚孔直径的 44.7%。故保持基本工况的其他锚固参数不变,仅改变锚杆杆体直径,即设定锚杆杆体直径分别为 10, 20, 30, 40, 50 mm 进行边坡锚固,对锚固边坡施加基本输入地震波研究锚杆直径对锚固的影响。

由图 16 可知,随着锚杆直径的增大,锚杆-砂浆界面的面积增大,由于力被更大的面积分担,锚杆-砂浆界面上的峰值剪应力逐渐减小。与此同时,锚固体整体刚度提升,砂浆-岩体界面上的峰值剪应力逐渐增大,两个锚固界面上的峰值剪应力逐渐接近。

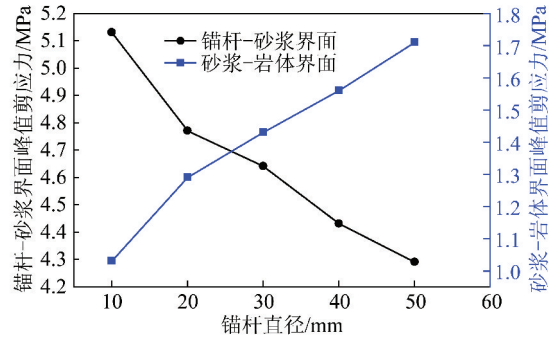


图 16 峰值剪应力与锚杆直径关系曲线

Fig. 16 Relation curves between peak shear stress value and anchor bar diameter

图 17 中,随着锚杆直径由 10 mm 增大至 50 mm,边坡永久位移从 11.88 mm 减小为 9.52 mm,减小幅度为 19.82%。增加锚杆直径可有效的遏制边坡的变形破坏。

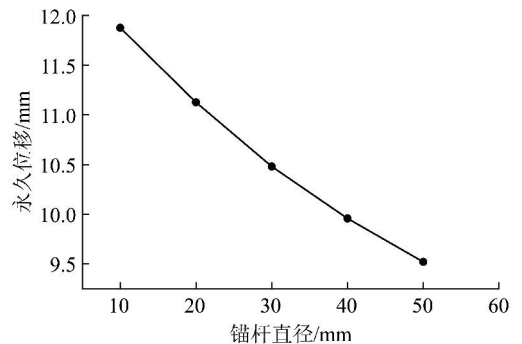


图 17 边坡永久位移与锚杆直径关系曲线

Fig. 17 Relation curve between slope permanent displacement and anchor bar diameter

3.6 锚孔直径的影响

为了研究锚孔直径对锚固的影响,保持基本工况的其他锚固参数不变,仅改变锚孔直径,即设定锚孔直径分别为 80, 100, 120, 140, 160 mm 进行边坡锚固,对锚固边坡施加基本输入地震波开展研究。

如图 18, 19 所示,当锚杆直径不变时,随着锚孔直径的增大,砂浆层的厚度增加,锚固体整体刚度下降,两个锚固界面上的峰值剪应力均逐渐减小。随着锚孔直径由 80 mm 增大至 160 mm,边坡永久位移从 10.92 mm 减小到 9.99 mm,减小幅度为 8.47%。

对比锚杆和锚孔直径对峰值剪应力及永久位移的影响,增大锚杆直径能更有效的遏制边坡变形破坏,但也会造成砂浆-岩体界面上的峰值剪应力增

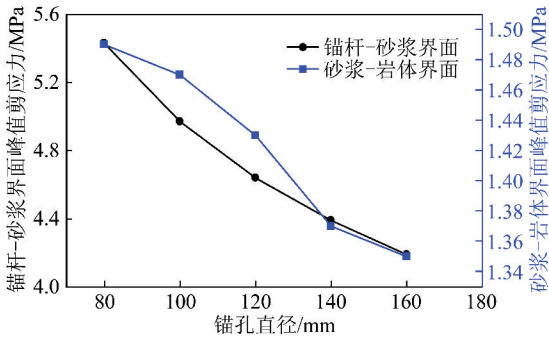


图18 峰值剪应力与锚孔直径关系曲线

Fig. 18 Relation curves between peak shear stress value and anchor drill hole diameter

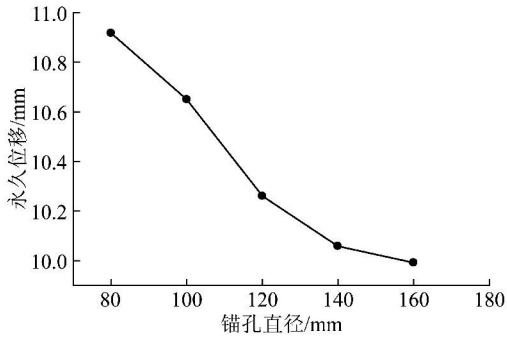


图19 边坡永久位移与锚孔直径关系曲线

Fig. 19 Relation curve between slope permanent displacement and anchor drill hole diameter

大,导致该锚固界面提前出现脱黏破坏。所以锚杆和锚孔直径在设计时应保持一个合理的比值,使两个锚固界面均能充分发挥锚固作用。

4 结 论

(1)地震作用下的锚固边坡相比未锚固边坡,永久位移平均减小幅度达到了20%左右,说明锚固能有效地抑制地震作用下边坡危岩向外滑移的趋势。所以通过锚固界面上的峰值剪应力和边坡的永久位移来研究锚固界面剪切作用问题是科学合理的。

(2)随着锚固角的减小,峰值剪应力逐渐增大,永久位移逐渐减小,所以在满足施工条件的前提下,应适当减小锚固角。

(3)当地震作用不足以使锚固界面发生脱黏破坏时,改变锚固段长度对锚固界面剪切作用影响很小。而在满足设计要求的前提下,使锚杆锚固段与拉拔段的长度相同,能使拉拔段和锚固段界面的锚固作用均得到充分发挥。

(4)随着锚杆间距的减小,剪应力峰值和永久位移均减小,但锚杆过密不利于锚固作用的充分发挥,降低性价比,应综合考虑经济性,合理设置锚杆竖向间距。

(5)随着锚杆和锚孔直径的增大,峰值剪应力和永久位移总体呈减小之势,其中改变锚杆直径能更有效的遏制边坡变形破坏。锚杆和锚孔直径应保持合理的比值,使两个锚固界面均能充分发挥锚固作用。

参考文献 (References):

- [1] 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,2003:8-11.
CHENG Liangkui, FAN Jinglun, HAN Jun, et al. Anchoring in soil and rock [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2003.
- [2] 朱焕春,荣冠,肖明,等. 张拉荷载下全长黏结锚杆工作机理试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2002,21(3):379-384.
ZHU Huanchun, RONG Guan, XIAO Ming, et al. Test on working mechanism of wholly grouted anchor bar under tensile load[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(3): 379-384.
- [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 Yiping, SHI Sheng, YAN Zhixin. 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.
- [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 Feifan, XU Chao, CHEN Wenwu. Numerical simulation on load transfer mechanism of multi-interface composite rockbolt [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2011, 39(12): 1753-1759.
- [5] SHEN Dejian, JI Yong, YIN Fenfang, et al. Dynamic bond stress-slip relationship between basalt FRP sheet and concrete under initial static loading [J]. Journal of Composites for Construction, 2015, 19(6):04015012.
- [6] YAN Z, DUAN J, JIANG P, et al. Finite difference method for dynamic response analysis of anchorage system [J]. Journal of Central South University, 2014, 21(3):1098-1106.
- [7] ALI Mortazavi, FATEMEH Tabatabaei Alavi. A numerical study of the behavior of fully grouted rockbolts under dynamic loading [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2013, 54:66-72.
- [8] ZOU Xinkuan, ZHANG Jichun, SHI Hongchao, et al. Effect analysis of soft rock slope reinforced by bolts under blasting dynamic load [A]. IACGE 2013: Challenges and Recent Advances in Geotechnical and Seismic Research and Practices-Proceedings of the 2nd International Conference on Geotechnical and Earthquake Engineering [C]. 2013:438-446.
- [9] 朱宏伟,姚令侃,项琴. 锚固长度对加锚边坡地震动力特性的影响[J]. 水文地质工程地质,2012,39(3):54-59.
ZHU Hongwei, YAO Lingkan, XIANG Qin. Influence of anchoring section length on seismic dynamic characteristics of jointed slope [J]. Hydrogeology & Engineering Geology 2012, 39(3): 54-59.
- [10] 叶海林,黄润秋,郑颖人,等. 岩质边坡锚杆支护参数地震敏感性分析[J]. 岩土工程学报,2010,31(9):1374-1379.
YE Hailin, HUANG Runqiu, ZHENG Yingren, et al. Sensitivity a-

- analysis of parameters for bolts in rock slopes under earthquakes [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 31(9): 1374-1379.
- [11] 言志信, 张刘平, 江平, 等. 锚固上覆红黏土岩体边坡的地震动响应[J]. 岩土力学, 2014, 35(3): 753-758.
YAN Zhixin, ZHANG Liuping, 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.
- [12] Itasca Consulting Group, Inc. FLAC (Fast Lagrangian Analysis of Continua 3D) user's manual Version 5.0[M]. Minneapolis: Itasca Consulting Group, Inc, 2014.
- [13] 谈一评, 曾镇强. 简谐动力波作用下锚杆拉拔试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(3): 409-414.
TAN Yiping, ZENG Zhenqiang. Pull-out tests on anchor bolts under simple harmonic waves[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(3): 409-414.
- [14] GB50330—2013. 建筑边坡工程技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
GB50330—2013. Technical code for building slope engineering [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2013.
- [15] 姚显春, 李宁, 陈蕴生. 隧洞中全长黏结式锚杆的受力分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(17): 2272-2276.
YAO Xianchun, LI Ning, CHEN Yunsheng. Theoretical solution for shear stresses on interface of fully grouted bolt in tunnels[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(17): 2272-2276.