

卸荷岩体锚固预应力损失的影响因素分析

李建林, 邓华锋, 黄建文, 王乐华, 杨学堂

(三峡大学 土木水电学院, 湖北 宜昌 443002)

摘 要: 讨论了影响卸荷岩体锚固预应力变化的岩体应力状态、岩体性质与流变、锚固时间、钢材松弛、施工质量、锚索结构与环境变化等因素, 得出了不同因素对卸荷岩体锚固预应力损失的影响效应, 并分析了各种影响因素与预应力损失的耦合作用, 得出了相关的结论。

关 键 词: 卸荷岩体; 预应力锚索; 预应力损失

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

Analysis of factors affected on prestress losses of unloading rock mass

LI Jian-lin, DENG Hua-feng, HUANG Jian-wen, WANG Le-hua, YANG Xue-tang

(College of Civil & Hydropower Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: The factors affected on prestress losses of unloading rock mass such as stress state of rock mass, rock mass property, rheology of rock mass, the time of prestress action, steel fiber relaxation, construction quality, anchor cable structure, environment change in long time are discussed; the mechanism of prestress losses with factors is put forward; and the coupling between different factors and prestress losses is discussed too. The relevant conclusions are drawn.

Key words: unloading rock mass; prestressed anchor cable; prestress losses

1 引 言

预应力锚索加固技术由于其经济合理、安全可靠, 在水利水电工程坝基、边坡、基坑等加固工程中被广泛应用。它在改善岩体的应力状态, 提高岩土体的承载力和稳定性等方面的作用已为大量工程实践所证实。预应力锚索加固岩体边坡的优越性在于能为具有边、断层、软弱带等的岩体边坡提供一种强有力的“主动”支护手段, 是所有传统的非预应力“被动”支护无法达到。预应力锚索的工作状态直接关系到边坡稳定与运行安全, 预应力锚索加固岩体的效果, 关键在于其预应力的大小及损失程度, 只有保持足够的预应力, 才能有最佳的锚固效果。

2 预应力损失的影响因素

预应力的损失直接影响到预应力锚索的效果,

而影响预应力损失的因素很多, 主要是岩体的蠕变和锚索的蠕变。锚索的蠕变又与锚索材料的性能、布锚方式、锚具性能、内锚固段长度和形式、固结材料性能、荷载等级、施工操作方法等有关。而岩体的蠕变则是一个十分复杂的问题, 它包括岩石和结构面的蠕变, 尤其是结构面的蠕变是非常复杂的, 并与岩体的受荷状态十分密切。这种受荷状态是指岩体处于受拉或受压应力状态, 不同的受荷状态下的岩体, 其岩石和结构面的蠕变不同^[1~4]。同时, 外部环境的变化, 如施工爆破、地下水及环境温度对预应力损失的影响也比较大。

2.1 岩体的应力状态对预应力损失的影响

预应力损失的估计是预应力锚索的作用机理一个很重要的方面, 而预应力损失与应力状态关系密切。岩体的受荷状态不同, 其预应力损失不同。自然状态下的岩体 (如自然边坡) 施加预应力后, 岩

体一般承受压应力。预应力锚索是与受压岩体作用的机理一致，岩体蠕变（包括岩石和结构面蠕变）产生的预应力损失是受压蠕变对预应力产生的损失，它导致预应力值的降低。对卸荷岩体来说，卸荷状态下岩体的应力状态很复杂，部分区域会产生拉应力，通过预应力锚索施加预应力后，这种作用不很明显，而且，岩体可能还有部分仍处在拉应力状态。岩体受拉时产生的蠕变不但不产生预应力损失，反而加大了预应力锚索的应力值，这种附加值可能造成预应力锚索的应力值增加而拉断，以往的研究对这个问题认识不足，这种情况在工程中时有发生，没有引起足够的注意。因此，对于卸荷状态下的岩体，预应力损失估计比较复杂^[1~3]。

2.2 岩体的性质对预应力损失的影响

从预应力锚索结构上分析，岩体的变形主要发生在应力集中区。不同的岩性，引起的预应力损失不同。分析表明，当锚索的张拉荷载传递到岩石表面后将沿锚索孔的深度方向扩展，同时向四周扩散，因此岩石性质越好，这种影响就越小，即使是在大吨位预应力的荷载作用下也是如此。次块状或断层破碎带岩体区，相应因岩体而引起的预应力损失值就大。锚索作用区自由段岩体跨度较大，容易受到风化等地质作用而松散破碎，在长期应力作用下，受荷区的岩体将产生塑性压缩或相对变位，变形除了瞬时变形外，还有一部分变形将随着时间变化而变化，造成荷载损失。锚索穿过天然的断层裂隙结构面上也会产生额外的压缩，预应力锚索因此而松弛，使其应力降低，但锚索的应力降低速度，随时间的推移而变缓，最终达到平衡状态。

2.3 岩体的流变对预应力损失的影响

在外荷载的作用下岩体发生流变，导致预应力的损失。岩体的流变包括岩石流变和结构面流变，它是应力状态的函数。岩体的流变所引起的预应力损失从应力状态上考虑，应包括两个方面：一是受压状态下的岩体；二是受拉状态下的岩体。前者流变一般会造成锚索的预应力降低，即预应力损失；后者流变可能造成锚索的预应力值增加，即预应力负损失。对于卸荷岩体来讲，这种损失更为复杂^[1]。下面分别加以讨论。

对于受压卸荷岩体，如图 1 所示， A 点为岩体初始应力状态， $\Delta\sigma$ 为开挖卸荷应力量，卸荷达曲线的 B 点。如果对岩体所施加的预应力值 $\Delta\sigma_0$ 小于岩体的卸荷应力值 $\Delta\sigma < \Delta\sigma_0$ ，施加预应力值到达如图 1 中的 C 点，此时，岩体仍然处于卸荷状态。研究表明^[1]，卸荷作用相当于在岩体中施加了一种反

向的拉应力作用，在这种作用下岩体质量会不断劣化，流变增加（类似于受拉流变），其预应力值属增加。如果对岩体所施加的预应力大于岩体的卸荷应力值，如图 1 中的 D 点，岩体处于加荷状态，即岩体受压，此时，岩体的流变引起预应力降低，称为预应力损失。

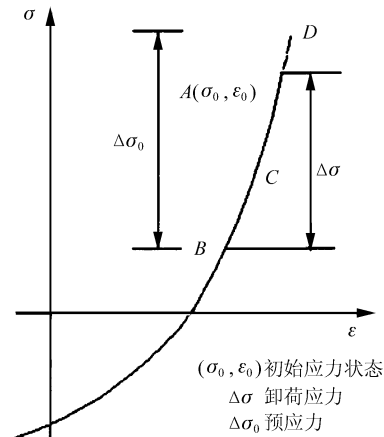


图 1 受压卸荷岩体预应力施加

Fig.1 Prestress loading in compressive unloading rock mass

对于受拉卸荷岩体，如图 2 所示， A 点为岩体初始应力状态，开挖卸荷 $\Delta\sigma$ 后应力达到 B 点，岩体受拉。如果对岩体所施加预应力值小于岩体的拉应力值，如图 2 中的 C 点，则岩体仍然受拉，此时质量因受拉而劣化迅速，流变增加较快，预应力值增加也快。如果对岩体所施加的预应力值大于岩体的拉应力值，达到 D 点，则卸荷岩体受压，出现的预应力损失情况类似于受压卸荷岩体。

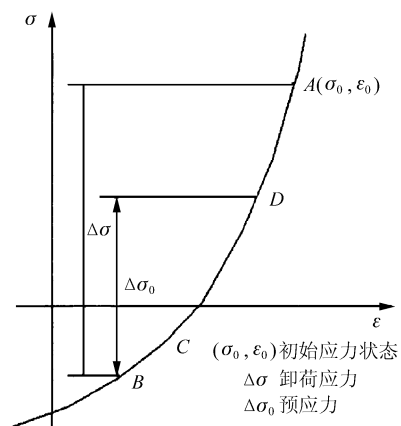


图 2 受拉卸荷岩体预应力施加

Fig.2 Prestress loading in tensile unloading rock mass

岩体受拉能力很弱，受拉流变破坏的能力更弱。受拉流变比受压流变发展要迅速，且研究表

明^[3]受拉流变破坏强度大约为岩体瞬时抗拉强度的 1/2,在这种情况下预应力增加的估计是十分复杂的。

总之,对于卸荷岩体而言,其预应力损失一般是一种负损失,即预应力增加,这种预应力的增加,如果超过锚索的极限强度,锚索则会断裂,从而失去效果,因此分析中应考虑这种影响。

2.4 预应力锚固时间对预应力损失的影响

就边坡工程而言,由于岩体开挖原有的地应力场因岩体的开挖卸荷而导致应力二次分布。应力的二次分布也导致变形的调整。岩体开挖卸荷中岩体的变形有 3 种情况:一种是弹性变形;另一种是塑性变形;第 3 种是流变变形。弹性变形在边坡开挖后一般会立即释放掉,不损伤岩体结构及质量,而塑性变形和流变变形一般是由于岩体卸荷损伤引起的,在开挖后会立即释放一些,后续流变变形随时间会逐渐发展,并且后者对于岩体的质量劣化以及岩体的稳定有直接影响。因此,对于卸荷岩体的加固,还与其预应力施加的时间有密切的联系,不同的加固时间引起的预应力损失不一样。一般来讲,卸荷岩体的加固时间分 3 种情况^[1]:

(1) 预锚。在岩体开挖前,先对岩体施加预应力进行加固。预锚可以有效地约束岩体开挖后的变形,并有效地降低岩体在开挖过程中岩体的卸荷质量劣化程度。但预锚时,预应力的应力值不易确定,因为预应力施加后,岩体开挖,应力释放,锚索的应力值会增加,可能导致预应力锚索应力值过大而失效。除非采用自由式可调节锚索,根据岩体开挖施工过程对预应力不断调整,以防止预应力锚索应力值过大而破坏。

(2) 速锚。在岩体开挖后,立即对岩体施加预应力进行加固,即加固紧跟开挖进程。速锚在岩体开挖展现部分弹性变形及少量流变变形前施工,有利于约束岩体的变形,减少岩体开挖对岩体质量的影响,预应力的损失相对要小一些。

(3) 滞锚。在岩体开挖一段时间后,再对岩体进行加固。滞锚可以有效地让岩体开挖后展现瞬时弹性变形及部分塑性变形,并且可由其发展部分流变变形。但滞锚可能由于岩体开挖卸荷而导致损伤,使岩体的质量劣化,降低岩体的自身承载能力,对约束后续流变变形不利,从而导致岩体变形过大。尤其是对卸荷岩体有变形控制要求的情况下,这种加固方式,如果时间掌握不好,可能后续的补救困难更大,也可能影响岩体的稳定问题。

2.5 锚索的结构及布置对预应力损失的影响

2.5.1 拉端锚具变形和钢筋松动引起的预应力损失

目前国内外生产的各系列锚具都存在拉端夹片回缩变形的问题,根据厂家的产品说明中的回缩量值可以计算出预应力损失的大小。预应力结构中由于钢绞线自身材料特性,在长度不变的情况下,随时间增长会产生屈服引起内部应力损失。一般认为^[5]:①长期受荷的钢绞线预应力损失量在 5%~10%,且集中在锁定后初期,至 24 h 后约完成 80%,大约 20 d 后已基本不再发展。②松弛损失的大小,与钢绞线张拉应力的大小有关。张拉应力越大,松弛损失就越大,当施加的力大于钢材极限强度的 50%时,应力松弛会明显加大。③锚索预应力松弛损失值大小与钢绞线材料性能、材料直径、环境温度及地下水的影响也有关系。

2.5.2 锚索类型对预应力损失的影响

在锚索孔的偏斜率接近的锚索中,自由式无粘结锚索的沿程损失较大,其原因是:无粘结锚索采用一次灌浆的方法,灌浆时锚索体在孔内呈弯曲状态,一旦浆液凝固后再进行张拉,其沿程摩阻损失就大。全长粘结式锚索,受粘结材料的保护,锚索体与锚索孔的接触点少,故沿程摩阻损失小。

2.5.3 群锚效应对预应力损失的影响^[4]

在群锚张拉过程中,理论上讲最合理的方式是同时同步张拉,但是由于实际条件的限制,其张拉往往是按照一定的顺序逐根张拉的。由于后张拉的锚索引起受荷区岩体的进一步压缩,从而使锚索影响半径范围内的已安装锚索的预应力降低。

2.6 施工操作方法对预应力损失的影响

2.6.1 锚索张拉方式对锚固力损失的影响

在内锚固段靠近上端的部分,锚索和胶结体之间的剪应力存在着严重的应力集中现象,在施工时,大多采用整索分级张拉的程序,通常按设计永久锚固力的一定比例,分级进行张拉。在锚索张拉过程中采用多级张拉方式可以使锚索体各钢绞线受力进行充分调整,其锁定损失小要小一些,如三峡工程永久船闸高边坡中的锚索锚固力损失大多在 10%以内^[6]。

2.6.2 封孔灌浆对锚固力的影响

锚索封孔灌浆的目的是对钢绞线进行保护,以减少永久锚固力的损失。但在封孔灌浆时,由于水化热温度使锚索体产生膨胀,将导致一定量的锚固力损失,现场锚索测力计测试结果表明^[4],3 000 kN 级锚索外锚段灌浆引起的锚固力损失率约为 1.7%,

1 000 kN 级锚索锚固力损失率约为 3 %。锚固力损失值的大小与岩体的裂隙率有关, 岩体裂隙发育, 灌浆时浆液充填了岩体中的裂隙, 使岩体产生膨胀变形, 则锚固力会有所增加。

3.6.3 锚索孔斜率对锚固力损失的影响

锚索孔一般较长, 由于钻具自身重力作用下悬臂下沉, 孔深越大下沉的幅度就越大, 在钻孔时难以钻成直孔, 而呈弯曲状态, 早期锚索张拉时, 自由段与岩壁间可能存在或多个接触点, 这种接触点的存在, 将导致摩擦力的增加, 从而使锚固力发生沿程损失。孔斜率越大, 锚索锚固力损失也越大。在相同的孔斜率条件下, 锚索张拉荷载越大, 锚固力损失也越大, 当孔斜率为 3 % 时, 最大锚固力损失值可达 11.5 %^[6]。

2.7 外部环境的影响对预应力损失的影响

2.7.1 施工爆破对预应力损失的影响

爆破、重型机械和地震力等发生的冲击也会引起预应力损失, 且该损失量较之长期静荷载作用引起的预应力损失量大得多。研究表明^[5], 当在距锚 3 m 以内进行爆炸时, 锚索预应力有明显损失, 其预应力损失量要比锚索在相似时间受静荷载作用发生的预应力损失量大 36 倍左右, 但在离锚索 5 m 以外, 普通爆破的影响就不显著了。冲击力作用是使岩层中锚索的预应力和承载力发生变化, 尤其对稳定性较差的松岩体会产生较大地影响。同时, 用机械方法固定的锚索受冲击的影响要比用锚固材料固定的锚索大得多。

2.7.2 地下水的水位变化对预应力损失的影响

地下水对锚固力有较为显著的影响, 这种影响集中反映在岩体裂隙较为发育, 渗透系数较大的部位, 由于地下水静水压力或动水压力的变化, 并且滑移面上遇水后岩体参数 c , φ 值降低, 滑裂面抗剪能力减弱导致锚固力的损失。

2.7.3 温度变化对预应力损失的影响

温度的变化主要反映在岩体的变形导致预应力锚索的锚固力变化上。岩石是热导体, 具有热胀性, 当温度升高时, 组成岩石的颗粒体积产生膨胀, 同时引起岩石内部应力状态发生变化, 变形特性发生改变。因此, 岩体温度升高会导致锚固力的增加, 降温则使岩体收缩而导致锚固力减小, 由于岩体的体膨胀系数较小, 由温度变化所引起的预应力损失很小, 工程中一般不考虑温度变化的影响^[5]。

3 影响预应力损失因素耦合作用分析

总的来说, 岩体的蠕变和锚索的蠕变对预应力的影响一般是比较缓慢的, 因而, 对岩体边坡长期稳定性影响较大。而施工爆破冲击荷载, 地下水静水压力或动水压力的力学作用则要迅速的多。以上这些作用就导致了预应力损失的增加, 而锚索预应力的变化反过来又影响水在岩体中的储藏和活动的条件, 地下水的化学作用不仅会腐蚀锚索, 有时还会沿着断裂构造向更深的部位延伸, 使岩体的破坏更严重。由此可知, 各个影响因素与锚索预应力之间存在相互作用的关系, 这样随着时间的推移, 作用的长期反复, 预应力锚索的作用效果可能越来越拉越差。

4 结 语

本文综合讨论了影响卸荷岩体锚固预应力损失的各种因素及各影响因素的耦合作用。分析表明, 岩体的性质和岩体的流变、锚固时间以及锚索本身的材料性质是引起预应力损失的主要因素, 而施工时锚索张拉的方式、钻孔质量和封孔灌浆等是造成预应力瞬时损失的主要因素, 同时, 施工爆破冲击荷载和地下水对预应力的损失也比较大。因此, 为保证预应力锚索的长期稳定性, 避免预应力损失造成锚固效果的减弱, 可以针对被加固岩体的性质, 选择合理的锚索类型、采取合理的施工操作方法与防护手段, 保证在锚索工作期限内的有效性。

参 考 文 献

- [1] 李建林. 卸荷岩体力学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003.
- [2] 李建林, 丁振明. 卸荷岩体加固若干问题的探讨[J]. 武汉水利电力大学学报(宜昌), 2000, 22(3): 191 - 195.
- [3] 李建林, 王乐华, 扬学堂. 卸荷岩体预应力锚索加固若干问题的探讨[A]. 第八次全国岩石力学与工程学术大会论文集[C]. [s.l.]: [s.n.], 2004.
- [4] Yazici S, kaiser P K. Bond strength of grouted cable bolts [J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Science*, 1992, 29 (3): 279 - 292.
- [5] 苏学贵, 李彦斌, 孟秀生. 锚索预应力损失影响因素分析[J]. 西安矿业学院学报, 1999, 19(增刊): 87 - 90.
- [6] 张发明, 刘宁, 陈祖煜, 等. 影响大吨位预应力长锚索

锚固力损失的因素分析[J]. 岩土力学, 2003, 24(2): 194
- 197.