

预应力岩体锚固体系的试验研究

苗凤山 庄丽辉 毕建国

摘要 本文在试验的基础上,提出一种介于传统拉力型及压力型之间的复合型锚固方式,推荐采用双层防腐保护的做法,同时对岩体锚索粗钢丝锚固体系的设计和施工提出一些改进意见。

关键词 预应力 岩锚 锚固方式

施加在锚索上的荷载可由锚固段的顶端向下(拉力型)或由下向上(压力型)传递,取决于锚索在锚固段内的锚固方式。本文通过试验,提出一种新的介于传统拉力型及压力型之间的复合型锚固方式。其目的是使锚固段上的应力分布趋于均匀,避免或减少灌浆体的拉伸裂缝,从而增加锚固效果及防腐的可靠性。同时,对岩锚锚固体系提出设计建议,以提高预应力锚索的锚固性能并尽可能方便施工,降低成本。

一、岩锚的基本概念

预应力岩体锚索简称岩锚,用以传递拉力进入岩体。就是利用高强钢丝束或钢绞线将结构物或不稳定岩体锚固在深层稳定的岩基内。有两种主要的用途:一是将外力传至深层岩体,以稳定岩体表面的结构物;二是加固一个本身不稳定的岩石区域,如边坡稳定等。将锚索穿入钻孔内,并用水泥浆或其他胶粘剂与岩石粘结。水泥浆作为固定介质将锚索荷载传到锚孔周围岩壁上。一般情况下,锚索锚固于离开岩体表面或结构物足够远并且有承载能力的岩层中。如图1所示,岩体锚索的总长度由两部分组成:锚固段(内锚根)及自由段(张拉段)。前者是离岩石表面最远的部分,它起着将锚固荷载传递给周围岩体的作用;后者在张拉时能够自由地弹性伸长,故称自由段。施加在锚索上的荷载可由锚固段的顶端向下传递,亦可由底部向上传递,这取决于锚索在锚固段内的锚固方式。比较传统的拉力型,是将锚索直接埋置在水泥浆体内,靠彼此间的粘结传递拉力。

锚固段的应力分布很不均匀,顶端最大,向下逐渐减小至很小值。锚索周围灌浆体处于受拉状态,因而拉伸裂缝和剥离现象首先在顶端出现,随着施加荷载的增加,顶端渐渐发生滑动并向下延伸。另一种是压力型。由于锚索与灌浆体完全脱开,荷载是通过锚索直接传至锚固段底部锚板上,然后由锚板向上推压灌浆体并传递给周围岩体。在这种情况下,虽然灌浆体受压,但锚根底部岩体受拉。锚固段内的应力分布仍不均匀,底部最大,向上逐渐减小。本文建议将上述两种锚固方式联合应用,称为复合型,以使锚固段的应力分布趋于均匀,并使最大剪应力值显著减小,因而在在使用荷载条件下,灌浆体内的裂缝或剥离现象有可能不出现或很少出现,增加锚固效果及防腐蚀的可靠性。在此基础上,对岩体锚索的整个锚固体系提出新的设计建议,以提高预应力锚索的锚固性能,并尽可能方便施工,降低成本。

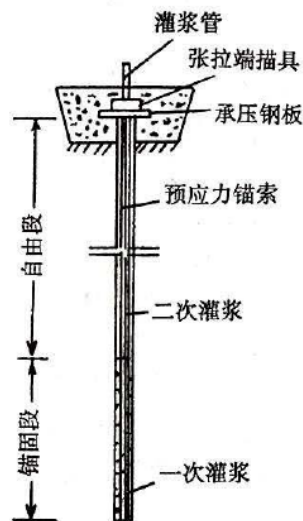


图1 岩体锚索的基本构造

苗凤山、庄丽辉 唐山市建设委员会
毕建国 唐山市建设集团公司。

二、荷载传递及新的锚固方式的研究

锚索周围环形灌浆柱体内的应力状态十分复杂。由于环形灌浆层很薄,可压缩性锚孔岩壁的性质千差万别,以及锚索之间非中心放置等,使问题更加复杂。通常钢丝或钢绞线都具有一定弯曲度,因而它们在锚固段内的形状,即使安置隔离对中架,锚索也并非平行布置。有时为了改善灌浆体与锚索间的粘结,用铅丝捆绑锚索使之形成收缩节形状。这些将影响灌浆体内的局部应力分布。本文目的在于研究锚索内的荷载如何通过灌浆体传递到锚孔周围岩体的。方法是进行模型试验,在人为控制的条件下通过改变特定的参数来观察模型的反应,从而获得解决实际问题的途径。

1. 荷载传递的模拟试验

1.1 锚固失效及裂缝的机理

当锚索承载后靠粘结力传给灌浆体,这是它们共同受力的基础。此时锚索与灌浆体变形相同不发生滑动,即它们之间具有足够的抗剪强度。但在一定的相对滑移下,或剪应力超过抗剪强度时,有效的粘结力就遭破坏,出现剥离现象。此时荷载传递靠摩擦作用。锚固段上部锚索受力较大,弹性伸长引起的相对位移亦大,该处的粘结作用破坏。随着荷载的增加,破坏范围向下延伸。当锚固段全长都发挥了最大粘结阻力时,就会发生相对灌浆体的锚索滑动,预应力锚固失效。

此外,水泥体脆性,抗裂性能差。由于极限拉伸值很小(约 $150\mu\epsilon$),在设计荷载作用下,高强锚索的应力大约是抗拉强度的 50—60%,相应的拉伸应变约为 $(15000\mu\epsilon)$,大大超过了水泥浆的极限拉伸值,所以灌浆体总会出现垂直于锚索的拉伸裂缝,而且这种裂缝相当宽。

1.2 荷载传递的模拟试验

必须定量描述设计的准确性。而在施工现场量测预应力锚索的实际荷载有许多困难,相对而言,室内模拟试验比较容易实现。例如,为量测 3000kN 预应力锚索沿锚固段长度上的实际荷载,取一根薄壁金属管,外径 12mm,从整体效果上模拟预应力锚索的作用。沿金属管长度粘贴电阻应变片,量测它们在荷载作用下的伸长。用石膏块体模拟岩层,几何比尺 1/10。在石膏块体内钻孔径为 16mm 的圆孔。将上述金属管插入孔内中心位置,然后浇灌适当高度的环氧树脂模拟水泥灌

浆。待固化后,即可施加荷载进行试验。

试验分三种类型:

(1)拉力型锚固方式,即金属管插入孔内,灌注环氧树脂将金属管与周围孔壁石膏完全胶结在一起;

(2)压力型锚固方式,即在金属管下端安装一锚板,压在环氧树脂管柱体上,而金属管与环氧管柱则完全脱开不受约束;

(3)复合型锚固方式,介于上述两种锚固方式之间,即金属管下端装有锚板,管外包裹一层油纸,置于孔中心位置,然后灌注环氧树脂,这样环氧树脂不与金属管粘结,但与孔壁周围石膏胶结在一起。

以上三种锚固方式,在相同预应力荷载作用下,锚索内荷载沿锚固段长度上的分布如图 2 所示。图 2(a)拉力型是锚固段顶部荷载最大,向下逐渐减小,至锚固段底部几乎为零。说明荷载通过锚索与灌浆体之间的粘结作用传给灌浆体再传给周围岩体,而且这种荷载传递主要是集中在锚固段的上部。图 2(b)压力型的锚索与灌浆体完全脱开,所以顶部和底部的荷载完全相同。表明预应力荷载通过锚索直接传至底部锚板上,然后由锚板推压灌浆体再传给周围岩体。与拉力型相反,荷载的传递主要集中在锚固段的下部。图 2(c)复合型则与上述两种锚固方式完全不同,首先是锚固段顶部荷载最大,向下逐渐减小,直至底部锚板仍有部分荷载。说明沿锚固段长度上锚索与灌浆体之间的摩擦作用使部分荷载传给灌浆体再传给周围岩体;然后是传至底部锚板上的部分荷载,由锚板推压灌浆体再传给岩体。由此可见,复合型锚固方式使荷分散作用于整个锚固段长度上,而不是集中作用于上部或下部,这样就改善了锚固段的应力状态。

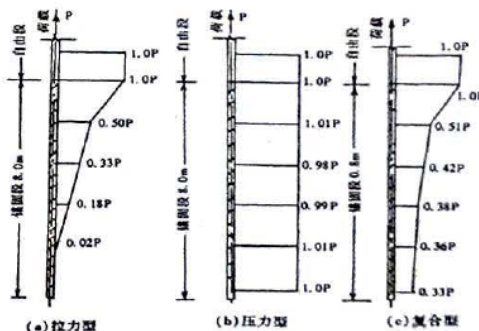


图2 锚索内荷载沿锚固段长度上的分布

2. 灌浆体和锚孔岩壁间的应力传递

2.1 相似模型试验

相似模型是对实际复杂问题的一种抽象和简化,抽象程度越低,模型离实际问题越近,结构也就越大、越复杂;抽象程度越高,模型离实际问题越远,所要考虑的因素也就越少。就单孔预应力锚索而言,它是一个轴对称问题,故沿直径方向切取单宽,作为平面问题来研究弹性介质(假定灌浆体与岩体为同一弹性均质材料)中理想锚索的特性。沿灌浆体与锚孔岩壁交界面布置应变片,这样就可以量测出界面上的应力分布及应力传递规律。但是,当结构超出弹性范围,甚至达到破坏程度时,则会形成非线性的破坏,锚固段的工作特性就取决于锚索和灌浆体以及锚孔岩壁的性能,也取决于它们彼此间的粘结。

简化试验模型如图3所示,几何比尺1/10,模型材料为石膏板。三面约束代表半无限大板,一面自由代表岩体表面。3000kN锚索,钻孔直径160mm。荷载施加用拉力传感器量测。对不同锚固方式分别进行了试验研究。

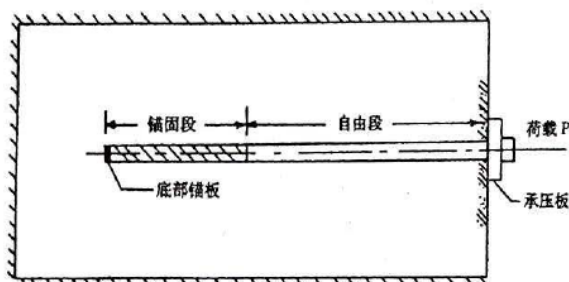


图3 简化试验模型

2.2 试验结果分析

(1) 拉力型

如图4所示,界面上的剪应力分布都不均匀呈倒三角形分布,顶端最大,向下则迅速减小。如果顶端交界面上的剪应力超过它的抗剪强度,就出现剪切破坏,最大剪应力则向下转移。试验结果表明,剪应力由锚孔壁向四周岩体逐渐扩散并减少。由图4还可以看到,锚固段锚孔壁沿孔中心方向受拉伸,也是由顶端向下逐渐减小。如果顶部出现剪切破坏,则孔壁由受拉伸变为受压。由于假定锚索沿孔中心方向平行布置,所以垂直孔壁的正应力较小。

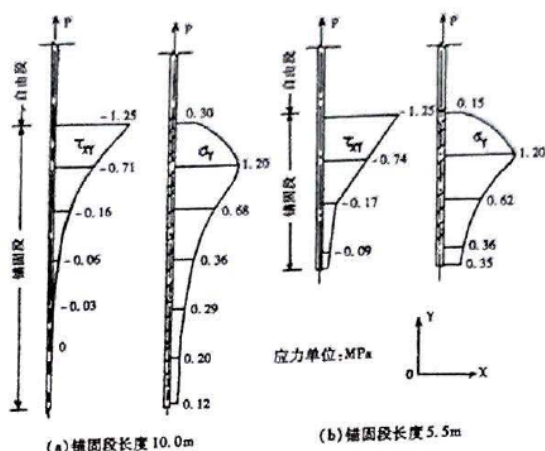


图4 拉力型锚固段的应力分布

试验结果表明,传统的拉力型锚固方式,当锚索承载后,从灌浆体到四周岩基的荷载转移是以拉剪方式传递的,主要承载部位在锚固段顶部以下几米内。不难看出,锚索受拉力,锚孔壁亦受拉伸,因而锚索周围灌浆体处于受拉状态进而出现拉伸裂缝,而且裂缝相当宽。因此会影响锚固效果,在腐蚀性岩体内,要求锚索具有永久性的功能,显然这种锚固方式是不利的。

(2) 压力型

由于荷载是由锚固段下端的锚板向上推压灌浆体传递给岩基的,所以锚固段孔壁的应力状态与拉力型相反。由图5可见,交界面上的剪应力是底部最大,向上迅速减小,呈正三角形分布。同时还可以看到,锚固段孔壁由底部向上受压,压应力数值较大,向上迅速减小。同样,由于假定锚索平行锚孔布置,所以垂直孔壁的实测压应力很小。

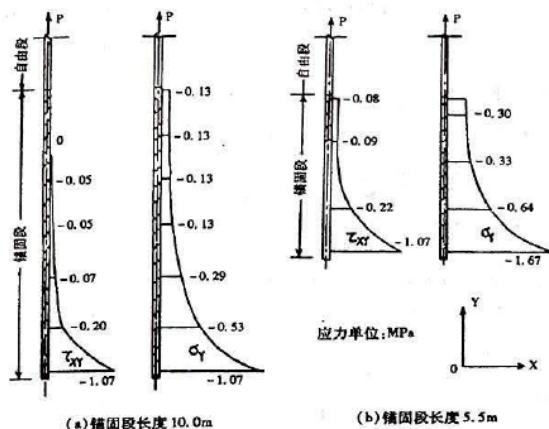


图5 压力型锚固段的应力分布

试验表明,压力型锚固方式,当锚索承载后,从灌浆体到四周岩基的荷载转移是以压剪方式传

递的,主要承载部位在底部以上几米内。锚索周围灌浆体受压缩,因而不会出现拉伸裂缝,对防腐系统是有好处的。

值得注意的是,在锚固段底部以下的岩体内出现了较大的拉应力区。由于底部锚孔内灌浆体受力很大,允许应力问题应认真对待,特别是在低强度岩体内。

(3) 复合型

由于上述两种锚固方式各有利弊,自然会提出将以上两种锚固方式联合使用,取长补短。将上述试验结果进行叠加,如图6所示,可以看到沿锚固段交界面上的剪应力分布均匀,尽管两端稍大,中间较小,但最大剪应力已大大减小。同时还可以看到,锚固段范围内的锚孔岩壁底部压应力最大,向上逐渐减小,并转为拉应力,其数值亦显著减小。

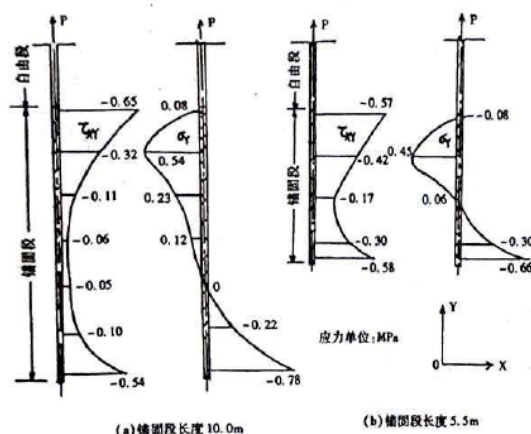


图6 复合型锚固段的应力分布

结果表明,拉压相结合的复合型锚固方式,当锚索承载后,从灌浆体到四周岩基的荷载转移底部是以压剪方式传递的,而上部仍以拉剪方式传递,主要承载部位大致均匀地分布在整個锚固段上。由上述分析可知,锚索的埋置长度越短,越能发挥其粘结阻力作用,因而可以缩短锚固段长度。同时,由于灌浆体受压缩,从而不出现或很少出现裂缝,因而增加了锚固效果和防腐的可靠性。

应当指出,在锚固段底部岩体内仍有局部拉应力存在,虽然拉应力数值较压力型可减小许多,但仍应给予足够的重视。

三、岩体锚索新锚固体系的设计建议

1. 问题的工程背景

目前预应力锚固技术已得到广泛的应用与发

展。锚固力从几百 kN 到一万 kN 以上的各种预应力锚索,或单独使用,或成组使用。既可用于临时性工程,也可用于永久性工程。尽管如此,但在岩体锚索设计和应用方面,有些问题还不明确。

锚索设计的关键在于锚索、灌浆体及锚孔岩壁间的粘结力。锚固段内荷载转移取决于锚固方式、材料性质以及施工工艺等因素。因此必须对施工操作的大多数细节要严格控制。

从锚索锈蚀的角度来看,目前使用较多的是用水泥浆胶结的锚固方式,并以此作为主要的或唯一的防腐蚀手段。如上所述,由于水泥浆极限拉伸值很小,与高强钢材的受力应变不匹配,必然会出现相当宽的拉伸裂缝。裂缝到达锚索表面,锈蚀就会发生。而且锚索又是受拉伸的高应力构件,在锚索表面总会有空穴或凹槽,其尖锐处就会有较高的应力集中,处于拉伸状态下的应力腐蚀将是一种潜在的主要危险,因此,对于永久性锚索,采用双重防腐蚀保护是十分必要的。

2. 新锚固体系的设计要点

2.1 全长双重防腐蚀保护

双重防腐蚀保护意味着至少有两种隔离物质在防止锈蚀。水泥浆通常作为介质将锚固荷载传递给岩基,同时又作为防腐蚀的屏障。它具有很小的渗透性以及碱性使钢材表面产生保护膜,但是水泥浆开裂、压碎是不可避免的。因此防护的目的是使锚索得到保护,而造价最低。例如,在锚索表面涂刷合成防腐层,既作为锚索插入钻孔之前的先期临时性防护措施,又可作为永久性防护。

2.2 预应力钢材的选择

选用钢丝而不用钢绞线的理由是每吨钢材单价要便宜 15% 左右。在相同条件下,选用 $\phi 7$ 钢丝比 $\phi 5$ 钢丝要好,因为承载能力大一倍。承载能力相同时,其锚固单元数目可减少一半,进一步又可以减小钻孔直径。虽说施工稍嫌麻烦,但其经济效益是明显的。

2.3 锚具选择

为适应钢丝锚固体系的需要,内锚头(锚固端)仍为墩头锚,而外锚头(张拉端)则用夹片锚具。对于岩体锚索选用钢丝锚固体系而言,两种锚具的结合,获得了取长补短的效果。在桥梁、预应力闸墩、边坡加固等工程中的实践表明,在钢丝锚固体系中同时采用两种锚具是经济而方便的。

2.4 新的锚固方式

建议采用新的复合型锚固方式,保留压力型底部锚板传递荷载的优点,利用摩擦力(不是粘结力)分散传递部分荷载,以使锚固段的应力分布趋于均匀,同时使最大剪应力减小。这样,就使锚固段内的灌浆体的裂缝宽度减小并使裂缝分布得到控制,充分保持了水泥浆层的防护作用。

2.5 张拉方法

理想的情况是千斤顶系统应向锚索的各锚固单元同时施加等量荷载,事实上很难实现。尽管整体张拉是一种常用的快而有效的方法,但对大吨位预应力锚索加荷时,常常比较困难。因此,建议采用手提式小千斤顶单独加荷的方式,比较经济而方便。采用循环张拉的主要优点是省去大型千斤顶设备,且无搬移、吊装之役。大大减轻了劳动强度,同时也加快了施工进度。

实施循环张拉时,只需对每一个锚固单元施加增量荷载到预定值,各锚固单元所承受的荷载就不会有很大波动。循环加荷过程中,最先加荷的那个锚固单元总会比最后加荷的单元荷载损失要大一些,但通过几次加荷循环,仍可使每个锚固单元的受力趋于均匀。值得指出的是,一般安装在锚具中的夹片、锁定荷载时总会产生夹片被拉入的预应力损失。而采用循环张拉法,可使这种夹片跟进的预应力损失达到最小或忽略不计的程度。此外,由于锚固段底部设有镦头锚具,实施循环张拉过程中就不会出现抽丝现象。而钢绞线锚固体系通常是不设固定端锚具的,因为锚固荷载靠粘结作用传给岩体。采用循环张拉时应持慎重态度。

2.6 长期监测方式

为了对永久性锚索的实际工作性能进行长期监测,可安装荷载传感器或位移传感器。常见的荷载传感器是圆筒式,它套在锚索外围,夹在锚板和承压板之间。这种传感器必须是刚性的,具有同样大的承载能力,因而加工制造比较困难。因此,建议采用柔性的并联在任一个锚固单元的钢

丝束或钢绞线上的位移传感器,比较经济方便。由于各锚固单元的受力基本上是均匀的,通过量测锚索的实际伸长值即可获得荷载沿锚索长度上的实际荷载分布。必要时可同时监测对称于中心的2—4个锚固单元荷载的变化,以便互相验证。

四、结论

本文所建议的新锚固方式兼收传统的锚固方式之长,尽量分散传递荷载,以使锚固段的应力分布趋于均匀,增加了锚固性能和防腐蚀系统的可靠性,提高了岩体锚索的使用性能和耐久性。

针对目前岩体锚索设计和应用中存在的一些问题,通过试验比较提出新锚固方式之后,又推荐采用双层防腐蚀保护代替目前所采用的靠水泥浆作为唯一防腐蚀屏障的做法。在此基础上,更进一步对岩体锚索粗钢丝锚固体系的设计和施工提出了一些改进意见,它是在以往设计、施工和科研经验的基础上加以归纳总结提出的,包括了高强度低松弛新钢材和锚夹具的最新成果。尽管这些建议可能不够全面,但会随着工程实践经验的积累而不断得到完善和发展。至于经济效果,通常还受技术之外的其他因素所控制,常因不同工程条件和施工管理人员而异。一般说来,采用新的锚固方式,可以缩短锚固段长度,选用钢丝会比钢绞线便宜;选用较粗的 $\Phi 7\text{mm}$ 钢丝较 $\Phi 5\text{mm}$ 钢丝要经济,因为可减少一半锚固单元,节省了锚具,工作量亦可减少,同时还可以减小钻孔直径,因而又可降低造孔费用。用小千斤顶代替笨重的大吨位千斤顶,不仅节省了设备投资,而更重要的是,在很大程度上简化了施工,加快了施工进度,同样会降低工程费用。

参考文献

- (1)[英]T. H. 汉纳著,胡定等译:锚固技术在岩土工程中的应用。中国建筑工业出版社,1987.10。
- (2)美国后张预应力混凝土学会著,华东预应力混凝土技术开发中心译:后张预应力混凝土手册,东南大学出版社,1990.5。