

预应力锚索长期有效性研究与检验

汪彦枢¹ 姜昭群¹

(1 中国地质科学院探矿工艺研究所 成都 611734)

2 中国地质调查局地质灾害防治技术中心 成都 611734)

摘要: 预应力锚索曾在我国重大水电工程中得到广泛应用, 针对这些用作永久支护的锚索工程使用寿命的问题, 通过现场开挖一根在漫湾水电站左岸边坡服役20年的锚索, 对这一问题进行讨论分析。结合开挖试验成果, 从锚头锈蚀特征、钢绞线缩进量、水泥砂浆防锈效果、内锚固段特征以及钢绞线化学和力学性质变化、水泥注浆体固结等方面, 对该锚索进行综合评价。评价结论认为: 锚索的工作是有效的, 锚索应该是安全的。

关键词: 岩土工程 预应力锚索 欠固结注浆体 服役20a锚索 现场开挖试验

近20年, 预应力锚索在建筑、路桥、水利水电、特种结构及地质灾害防治工程中得到大量应用, 锚索的使用寿命直接关系到工程的安全, 锚索在工作期间的安全性受到高度关注。各种各样的模拟实验、理论研究、观测检查常见于有关期刊。为了直观地研究和分析锚索实际工作中锚固力的衰减、钢绞线的腐蚀及长期运行的可靠性, 中国水利电力研究院决定委托中国地质科学院探矿工艺研究所直接挖取一根已经运行20年、并正在工作的锚索进行研究。在挖取前作了各种方案对比, 为了能直接观察并记录外锚头的锈蚀情况以及自由段砂浆的包裹情况, 能直接仔细观察内锚头受集中拉力后砂浆有无裂纹, 是否锈蚀等等大家普遍关心且多有争论的实况, 也能直观的察看锚索孔的钻孔弯曲、孔内沉渣对锚索的影响等等。鉴于从未有人直接观察过内锚段的情况, 最终采用在锚索周边掏槽, 沿着锚索轴向掘进隧道直接观察的方案。为了消除爆破震动对锚索砂浆包裹体的影响, 整个隧道采用取芯钻的方法掘进。整根锚索取出后对所挖出的锚索进行物理和化学的检测, 根据检测数据判定锚索的安全性。

这是首次完整的取出已经连续工作20年且正在工作的锚索。挖取工作从2009年11月17日开始, 至2010年1月23日结束, 历时68天。

1 挖取及现场记录观察

所挖取的锚索位于漫湾水电站左侧坝肩, 编号: 左坝前IVT5。锚索总长25米, 内锚固段约为7米, 张拉段18米, 由8束15mm, 强度级别

150kg/mm²的钢绞线组成。采用yc20D型千斤顶单根张拉, 采用中原预应力工艺设备厂的XM型锚具, 超张拉锁定锚固力110吨, 采用二次注浆, 属于拉力集中型全粘结预应力锚索。

在锚索周边掏槽, 采用打取芯钻的方法沿着锚索轴向掘进隧道, 目的是不破坏锚索的砂浆包裹体, 也可直接观察原锚孔的情况。开挖实景图如图1所示。



图1 沿着锚孔轴向掘进隧道并直接观察原锚索的情况

(1) 开挖过程中观察到的一些现象:

刚开始挖时, 锚索未松动, 水泥包裹体完整的包裹在钢绞线外; 随着锚头放松, 钢绞线内的预应力释放, 在螺旋状的槽面产生直线回弹, 使水泥包裹体开裂, 从钢绞线上脱落, 如图2和图3所示。因此, 要将整根锚索连同注浆包裹体完整地取出已是不可能的了。

在锚索孔口部位, 由于二次注浆量大, 水泥浆收缩, 补浆量不足, 导致孔口管及孔深1米处锚孔上部存在20毫米的空洞, 由于锚索与锚孔环状空间大, 锚索还是被水泥浆完全包裹。但若水泥浆太薄, 孔口又位于与大气相通的位置, 注浆不饱满会引起锚索锈蚀, 锚头失效。水泥浆收缩形成空洞情况如图4所示。

(2) 虽然做了防止松开锚索时应对锚索突然回弹的措施,但是实际上锚索的回弹是随着开挖的进度缓慢回弹的;锚索回弹情况见图5。



图2 水泥浆包裹体开裂



图3 水泥包裹体从钢绞线上脱落



图4 水泥浆收缩形成空洞



图5 缓慢回弹

(3) 组成锚索的单根钢绞线受力不均,回弹变形差别较大,如图6所示。

(4) 锚索孔钻孔弯曲,锚索张拉后在某点与弯曲的钻孔相切,形成折线,预应力损失大,此点砂浆保护最差,如图7所示。

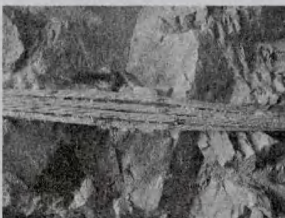


图6 单根钢绞线受力不均



图7 钻孔弯曲

(5) 自由段砂浆包裹体沿锚索轴线有分层现象,如图8所示;在某些段砂浆甚至还未完全凝固,强度非常低,用手指都能按出坑,如图9所示。锚固段砂浆包裹很好,强度高,无裂纹及分层现象,如图10所示。



图8 砂浆沿锚索轴线有分层现象



图9 二十年的砂浆未完全凝固



图10 锚固段砂浆包裹很好

(6) 自由段砂浆包裹体虽然有分层现象,甚至有个别部位还未完全凝固,但并不影响对钢绞线的保护,钢绞线无明显锈蚀。

(7) 在内锚固段,由于锚头插入孔底沉渣,没有受到碱性砂浆的保护,锈蚀严重,并且在发展。若是压力集中型锚索,锚头严重锈蚀将使锚索失效;如图11所示。



图11 锚头插入孔底沉渣,没有受到碱性砂浆的保护,锈蚀严重



(8) 外锚头部位,尽管有混凝土保护,敲开混凝土后发现钢绞线、锚夹片有锈蚀,但未失效,如图12所示。



图12 外锚头部位解剖

2 实验室检验

挖取的锚索整根取出后,分段在实验室检测钢绞线的力学参数和分析材料的化学成分。

力学参数检测实验分别在北京国家建筑工程质量监督检验中心和成都西南交通大学两个实验室进行,化学成分检测实验在国家钢铁材料测试中心进行,水泥包裹体检测实验在成都理工大学实验室进行。

2.1 钢绞线力学性能试验

在西南交大进行锚索力学性能试验用编号为J1的钢绞线,如图13。

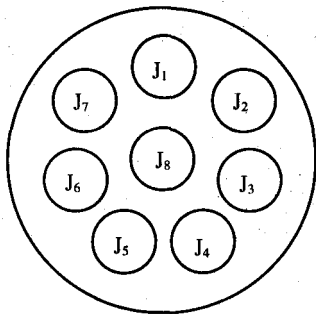


图13 钢绞线编号

从外锚具算起, 1号从1.2米到2.35米, 以后每段长1.15米, 1到6号取张拉段部位, 即已经持续受拉20年之久的钢绞线。7到9号取锚固段的钢绞线, 位置从19.6米到23米。锚固段钢绞线是在无拉力的环境中被灌入水泥浆与孔壁粘接, 可认为保持了原来的力学性能。因此, 同一根钢绞线由于所处的环境不同, 性能上应该是有差异的, 作对比试验可以得到一些有用的数据。五组钢绞线的力学性能试验数据见表1。

从表1可以看出, 在弹性模量方面, 张拉段(第一、二组)平均弹模为186GPa, 而锚固段平均弹模为193GPa, 损失3.7%; 非比例延伸强度, 张拉段为1244.86MPa, 锚固段为1303MPa, 下降4.5%。而钢绞线的抗拉强度基本无变化。可以认为在长期拉伸荷载的作用下, 钢绞线产生松弛, 弹性模量下降。由于松弛产生的应力变化, 对锚固力是

有影响的, 但是对钢绞线的强度影响不大。

从表1也可以看出, 与孔壁紧贴的8.1-9.25米段, 非比例延伸强度最小, 而在与孔壁摩擦以后张拉段(9.25-15)锚索的平均弹模为189.67GPa, 稍高于孔口段的186GPa, 低于锚固段的193GPa。说明受力越大松弛也大。

化学试验在国家钢铁材料测试中心进行, 试验方法为: ICP-AES法、红外线吸收法和热导法。根据原始资料, 该钢绞线是由天津预应力钢丝二厂生产, 钢材成分符合相应优质碳素结构钢的规范要求。试验分别对钢绞线中C, Si, Mn, P, S, Cr, Ni, N等化学成分进行了检测, 并与同牌号钢的化学成分要求进行了比较, 检测结果发现化学成分的变化仍然在规范要求的范围内。

钢绞线的力学性能试验数据分析如下:

钻孔弯曲使得锚索与孔壁接触产生摩擦力, 此摩擦力产生在自由段, 在张拉时由于锚索与孔壁接触有摩擦阻力损失, 孔口仪表上反映的不是锚固端的锚固力, 也就是说预应力锚索的效果没有充分发挥, 距张拉端越远, 钻孔弯曲的幅度和次数越多, 预应力的损失越大。

钻孔弯曲对锚索预应力损失的计算利用机械工程中皮带与皮带轮之间摩擦力的公式计算, 只是将皮带轮的角速度定为0, 最终公式为:

表1 钢绞线的力学性能试验数据表

所处位段	编号	破断负荷 (kN)[\geq]	抗拉强度 (N/mm ²) [≥ 1470]	规定非比例 延伸力 (kN)[\geq]	规定非比例 延伸强度 (N/mm ²)	弹性模量 (GPa)	伸长率 (%) [≥ 3.5]	平均规定非比 例延伸强度 (N/mm ²)	平均弹 性模量 (GPa)
张拉段一组	J1-1-1.2	213.06	1520	172.88	1234.87	194	5.91		
	J1-2-2.35	215.12	1540	173.52	1239.40	183	7.29		
	J1-3-3.5	215.51	1540	174.73	1248.10	188	7.21	1244.86	186
张拉段二组	J1-4-4.65	214.22	1530	173.54	1239.54	191	6.69		
	J1-5-5.8	215.97	1540	174.83	1248.79	186	7.07		
	J1-6-6.95	215.69	1540	176.20	1258.55	174	7.00		
张拉段三组	J1-B1-8.1	215.35	1540	172.64	1233.14	192	7.03		
	J1-B2-9.25	213.60	1530	173.87	1241.90	187	6.19		
	J1-B3-10.4	215.91	1540	174.86	1248.99	189	7.62	1243.03	189.67
	J1-B4-11.55	216.49	1550	173.52	1239.43	204	7.2		
张拉段四组	J1-B5-12.7	216.58	1550	174.52	1246.60	183	7.84		
	J1-B6-13.85	215.58	1540	174.74	1248.11	183	7.51		
锚固段	J1-7-19.6	216.55	1550	182.96	1306.82	195	7.20		
	J1-8-20.75	215.75	1540	181.97	1299.77	193	7.36	1303	193
	J1-9-21.85	215.97	1540	182.35	1302.52	191	7.47		

$$\Delta N = N_0 - N = N_0 (e^{\mu\theta} - 1)$$

式中： ΔN —钻孔弯曲前后锚索张力下降值

N_0 —钻孔弯曲前拉力

N —钻孔弯曲后拉力

e —自然对数底数

μ —摩擦系数

θ —钻孔弯曲弧度

对于本研究项目的锚索，由于未能检测锚索在钻孔弯曲前后切点的力，不能给出由于钻孔弯曲使得预应力减小的数值。我们假设在锚索工作的20年中，由于切点前后所受应力不同，钢绞线的蠕变导致的弹性模量损失不同，从而推导锚固力由于钻孔弯曲带来的损失。

根据胡克定律， $N = \Delta LEF/L$

式中， N 为单根钢绞线所受锚固力

ΔL —相应长度的钢绞线伸长量

E —弹性模量

F —钢绞线截面积

L —钢绞线相应长度

代入公式

$$\Delta N = N_0 - N$$

$$= \Delta L_0 E_0 F/L - \Delta LEF/L$$

$$= N_0 (e^{\mu\theta} - 1)$$

$$= (e^{\mu\theta} - 1) \Delta L_0 E_0 F/L$$

有

$$\Delta L_0 E_0 F/L - \Delta LEF/L = e^{\mu\theta} \Delta L_0 E_0 F/L - \Delta L_0 E_0 F/L$$

由于同一根钢绞线截面积 F 相同，所取切点前后长度 L 相同且认为受张拉时单位长度的变形相差很小，有

$$E_0 - E = e^{\mu\theta} E_0 - E_0$$

$$2E_0 = e^{\mu\theta} E_0 + E$$

$$E_0 (2 - e^{\mu\theta}) = E$$

$$2 - e^{\mu\theta} = E/E_0$$

$$e^{\mu\theta} = 2 - E/E_0$$

$$\text{即 } \Delta N = N_0 (e^{\mu\theta} - 1) = N_0 (1 - E/E_0)$$

ΔN 取绝对值

钻孔弯曲导致的拉力损失与长期作用时弹性模量的损失之比呈正相关。

由挖出的锚索分段测得的钢绞线现存弹性模量得知：

$$E = 189.67 \quad E_0 = 186$$

$$e^{\mu\theta} = 2 - E/E_0 = 2 - 1.019732 = 0.98026$$

代入公式

$$\Delta N = N_0 (e^{\mu\theta} - 1) = -0.0197N_0$$

从该钢绞线的实验分析来看，在孔斜1度时，锚索张力减小约2%。事实上从我们现场测量的锚索回弹值来看，锚索张力的下降值还要大些。

2.2 包裹体水泥浆成分与性能试验

针对已挖出的锚索水泥包裹体局部注浆体强度低、凝固差、分层明显等现象，在成都理工大学作了模拟不同条件下水泥凝固后及取出的20年前的水泥包裹体的点载荷实验和电镜分析，试图寻找出注浆体欠固结的原因，并评价注浆体对锚固效果及锚固结构耐久性的影响。

以此为目标，主要进行了如下几方面工作：

(1) 养护条件和密闭条件下水泥物理力学性能实验及微观结构研究；

(2) 取出的预应力锚索注浆体物理力学性能实验及微观结构研究；

(3) 预应力锚索欠固结原因初步分析。

养护条件和密闭条件下水泥物理力学性能测试结果见表2。

由表2可以看出，水泥石在养护条件和密闭条件下不同龄期的抗压强度有较为明显的差别，养护条件下3d、7d、14d和28d抗压强度分别为24.7MPa、28.7MPa、34.4MPa和36.4MPa，而在密闭条件下相同龄期抗压强度分别为18.3MPa、23.7MPa、27MPa和31.2MPa。相对于养护条件而言，密闭条件下水泥石3d、7d、14d和28d抗压强度值分别降低6.4MPa、5.0MPa、7.4MPa和5.2MPa。初步分析认为，这主要是因为养护条件下水泥具有水化、凝结硬化所需的合适温度和湿

表2 42.5R普通水泥物理力学性能测试结果表

条件	水灰比	相对密度	泌水率 (%)	流动度 (cm)	结实率 (%)	凝结时间 (h)		抗压强度 (MPa)			
						初凝	终凝	3d	7d	14d	28d
养护	0.5 : 1	1.73	2	20	98	5.5	13	24.7	28.7	34.4	36.4
密闭								18.3	23.7	27	31.2

度,而密闭条件下土体内温度相对要低,减缓了水泥正常的水化、凝结硬化过程,于是体现在不同条件下水泥石的强度存在一定的差异。

2.2.1 水化过程的影响

通过对养护条件和密闭条件下水泥石的微观结构分析,可以发现,养护条件对水泥的水化、凝结硬化过程产生了一定的影响。养护箱里的水泥浆体因为具有合适的温度和湿度,水化反应得以顺利进行,随着龄期的增加,浆体逐渐转化为凝聚-结晶网结构,具有较高的强度。而相对密闭的土体中,温度相对较低,亦或湿度不够,一定程度上减缓了水化反应的正常进行,从抗压强度测试及微观结构分析也表明了合适的温度和湿度对水泥的水化、凝结硬化过程具有一定的影响。但是,这种影响会持续多久,最终养护箱与浅埋土体里的水泥石的水化结果有无区别等需要进一步分析研究。

2.2.2 自由段与锚固段注浆体的区别

(1) 锚固段注浆体经过20年后总体性能较好,晶体成分以 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 为主,钙矾石次之,另有少量的 CaCO_3 晶体。晶体之间联结较好,大量的水化硅酸钙凝胶较为充实的填充于凝聚-结晶网状结构内,结构较为密实。

(2) 总体而言,自由段与锚固段注浆体微观结构相差不大。自由段1.5m、9.0m、16.0m、18.0m处注浆体晶体基本上都以氢氧化钙($\text{Ca}(\text{OH})_2$)为主,钙矾石次之,另外有少量的 CaCO_3 及未水化的硅酸二钙($\text{Ca}_2(\text{SiO}_4)$)。

2.2.3 注浆体中间层与外层的区别

12.5m处(中间层)自由段注浆体所含晶体为氢氧化钙、钙矾石、未水化的硅酸三钙及硅酸二钙。相对于1.5m、9.0m、16.0m、18.0m处注浆体而言,多了硅酸三钙晶体成分,而少了 CaCO_3 成分。相邻位置的13.0m处(外层)注浆体却未检测出硅酸三钙及硅酸二钙。从扫描电镜结果来看,注浆体内层与外层结构也有较为明显的区别。为何自由段注浆体中间层含有未水化的硅酸三钙,而自由段外层以及锚固段注浆体均未检测出该种成分?未水化的硅酸三钙是否成为局部自由段注浆体强度低、凝固性差的根本原因?如果是,什么原因导致了自由段内层注浆体还含有未水化的硅酸三钙?关于这个问题需要进一步分析。

2.3 欠固结注浆体的分析

通过对养护条件和密闭条件下水泥石及锚固段和自由段注浆体进行物理力学性能实验及微观结构分析研究,针对局部自由段注浆体20年后依然强度低、凝固性差及分层明显的现象,提出以下几点认识:

(1) 未水化的硅酸三钙可能是造成局部自由段注浆体凝固性差的原因。硅酸三钙是硅酸盐水泥熟料中的主要矿物,其含量通常在50%以上,具有水化快、水化放热量大、强度发展较快、早期强度高的特点。理论上讲,经过20多年的水化反应,硅酸三钙应该大体反应完毕。但是,通过X射线衍射分析,在12.5m处自由段注浆体中间层(开挖时揭露该处注浆体松软、凝固性差)检测到了硅酸三钙晶体成分。值得注意的是,在所进行的其它试样(包括自由段及锚固段注浆体)的微观分析中均未检测出该种矿物成分。那么,是什么原因导致这样的结果呢?

锚索的施工过程是一个复杂的过程,本项目研究的锚索为全长粘结拉力集中型锚索,需要进行二次注浆。锚固段采用纯水泥浆进行灌浆(一次注浆)。锚固段灌浆完毕后,待其凝固和外锚墩施工结束后对自由段锚索张拉锁定并进行二次注浆,其间的间隔大概需要7~15天(有可能更长)。推测可能是由于在二次注浆施工过程中某些环节操作不当所致。

(2) 注浆过程中水泥浆中掺杂的岩屑、浆液、粘土等可能影响水泥的水化、凝结硬化过程。粘土矿物主要包括高岭石族、伊利石族、蒙脱石族、蛭石族以及海泡石族等矿物,粘土矿物的粒度细小,其大小和形态需用电子显微镜才能测定。但是项目研究过程中通过专门对样品进行X射线衍射分析和电镜扫描,没有检测到粘土矿物成分,表明注浆体欠固结与掺杂土关系不大。

(3) 合适的外加剂加量能改善水泥浆液的性能,但是如果加量过多,相反会对注浆体的性能带来负面影响。在本项目研究锚索的灌浆施工过程中,掺加了外加剂—三乙醇胺,三乙醇胺如果掺量过多,会影响水泥浆液的正常凝固。

(4) 关于自由段注浆体明显的分层现象和局部凝结强度低的现象,分析认为除了前述的原

因,与注浆体受到锚索钢绞线的扰动关系最大。从开挖时监测钢绞线的回弹数据可推论,既然整束锚索在放松时回弹是缓慢的、不均匀的,在张拉时应力也不应该是马上就均匀分布,应该有个过程。我们认为,正是这个缓慢分布应力的过程使钢绞线发生蠕变,该蠕变作用于注浆体上,导致注浆体离钢绞线较近的部位受到长期轻微的扰动,使得水泥浆液在初凝时受到影响,而初凝是水泥浆水化过程中很重要的一个阶段,完全可以影响注浆体的终凝强度,也有可能造成注浆体沿锚索轴线的分层现象。

3 结论

(1) 未见拉力集中型锚索在拉力集中部位的水泥有裂纹;

(2) 在预应力段尽管部分水泥浆水化凝固不好,但对锚索的包裹还是有效的,未见明显锈蚀;

(3) 长期受拉的钢绞线在弹性模量方面有所减弱,预应力有所下降,但是抗拉强度基本不变;

(4) 开挖锚索的钢绞线在长期运行20年后,化学性质基本无变化。

(5) 尽管内锚头端和外锚头都有程度不同的锈蚀,而内锚头端的锈蚀是由施工质量引起

的,外锚头部位的锈蚀无进一步扩大的趋势,锚索的工作是有效的,锚索应该是安全的。

4 建议

(1) 由于单根张拉,导致整束锚索受力不均匀,使锚固力较设计值小。单根张拉应特别注意复拉,以使各锚索受力均匀,避免各条钢绞线受力相差太大。

(2) 锚索孔时应注意控制孔斜,孔斜可使实际锚固力与读数锚固力相差很多。

(3) 在用砂浆封锚头时,应清除锚头上的油脂,使锚头能直接得到碱性环境的保护。

(4) 建议使用内外锚固段都用全粘结注浆,整束锚索可在中部某个部位用一段聚乙烯管套住,形成无粘结段。此种锚索两端防锈蚀,中部为弹性段,可以缓冲突加荷载。

参考文献

- [1] 任爱武,汪彦枢,王玉杰,陈祖煜,姜昭群. 拉力集中全长黏结型锚索长期耐久性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 36(1): 18-27.
- [2] 刘玉堂,翟金明,张勇. 锚索的锈蚀、防锈及永久锚索的合理结构[J]. 预应力技术, 2005, (1): 18-27.
- [3] 王胜,陈礼仪. 锚索注浆体成分与性能测试报告[R].
- [4] 张发明,刘宁,陈祖煜,赵维炳. 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.
- [5] 蔡伟. 锚索预应力损失计算及防治措施[J]. 四川建筑, 第25卷2期, 2005.4

信息视窗

OVM公司3个项目荣获自治区 新产品优秀成果奖

近日,柳州欧维姆机械股份有限公司的3个项目荣获自治区新产品优秀成果奖。其中,“750型液压推拉千斤顶系统”荣获二等奖,“M15DHS型钢绞线低回缩量锚固体系”和“粘滞流体阻尼器”两个项目荣获三等奖。

“750型液压推拉千斤顶系统”可应用于沉船打捞、大型构件提升等领域,曾成功应用于应用于亚洲最大的导管架——番禺PY30-1导管架(重17000吨)滑移装船及卸船、困绕国家应急打捞两年多的“畅通”轮艏段打捞和国防部1101号打捞等工程。“M15DHS型钢绞线低回缩量锚固体系”解决了建筑结构中短预应力束张拉放松回缩量过大而导致其有效永久预应力损失大的工程技术难题,研究开发成功的低回缩、高效率的

钢绞线预应力锚固体系广泛应用于大跨度预应力混凝土连续梁、连续钢构等桥梁竖向预应力结构,铁路梁横向预应力结构,桥塔身周向、横向预应力结构,边坡锚固预应力结构及其它各种较短预应力束结构中。“粘滞流体阻尼器”凭借先进的技术优势,特别是智能化粘滞流体阻尼器能实时采集力和位移数据,为桥梁和大型建筑结构的可靠性、安全性和耐久性提供了一种有效的监测和分析手段,已成功应用于广西南宁大桥、天津永定新河特大桥、陕西十天高速公路、四川雅泸高速公路、广西柳州市双拥大桥、江苏宿迁至新沂高速公路、陕西宝汉高速公路、内蒙古东胜景观大桥等多项工程中。

(陆明俊)