

ICS 27. 140

P 55

SL

中华人民共和国水利行业标准

SL 212—2012

替代 SL 212—98

水工预应力锚固设计规范

Design specification for hydraulic prestressed anchorage

2012-08-06 发布

2012-11-06 实施

中华人民共和国水利部 发布

中华人民共和国水利部
关于批准发布水利行业标准的公告

2012 年第 37 号

中华人民共和国水利部批准《水工预应力锚固设计规范》
(SL 212—2012) 标准为水利行业标准，现予以公布。

序号	标准名称	标准编号	替代标准号	发布日期	实施日期
1	水工预应力锚固设计规范	SL 212—2012	SL 212—98	2012.8.6	2012.11.6

水利部

2012 年 8 月 6 日

前 言

根据水利部水利行业标准制修订计划，按照《水利技术标准编写规定》（SL 1—2002）的要求，对《水工预应力锚固设计规范》（SL 212—98）进行修订。

本标准共 8 章 19 节 153 条和 1 个附录，主要包括以下内容：

- 总则；
- 术语和符号；
- 一般规定；
- 锚固体系设计；
- 边坡锚固设计；
- 地下洞室锚固设计；
- 水工建筑物锚固设计；
- 安全监测设计与试验。

对原标准修订的主要内容如下：

- 增加了压力分散型和拉压复合型锚索等新型锚索的内容；
- 增加了土质边坡锚固设计的内容；
- 增加了岩壁吊车梁锚固设计的内容；
- 将原标准水工建筑物锚固设计中的“水工建筑物的补强加固”修订为“混凝土坝锚固”；
- 增加了水工隧洞混凝土衬砌环形预应力锚索等内容；
- 取消原标准附录 B 监测内容与项目，将原标准附录 A “预应力锚杆锚固试验规定”修订为“锚索承载能力试验”。

本标准与原标准相比，保留了 12 条，修改了 71 条，新增加 70 条。体现了预应力锚固技术的新进展。

本标准为全文推荐。

本标准所替代标准的历次版本为：

——SL 212—98。

本标准批准部门：中华人民共和国水利部

本标准主持机构：水利部水利水电规划设计总院

本标准解释单位：水利部水利水电规划设计总院

本标准主编单位：中水东北勘测设计研究有限责任公司

本标准出版、发行单位：中国水利水电出版社

本标准主要起草人：赵长海 苏加林 苏 萍 高 垠
杜国文 陈 雷 陈立秋 景健伟
郑奕芳

本标准审查会议技术负责人：温续余

本标准体例格式审查人：陈登毅

目 次

1	总则	1
2	术语和符号	2
2.1	术语	2
2.2	符号	4
3	一般规定	6
3.1	基本资料	6
3.2	材料	6
3.3	锚固设计的基本要求	7
4	锚固体系设计	10
4.1	锚索体的选择	10
4.2	锚索体设计	11
4.3	锚固段的结构设计	11
4.4	锚头的结构设计	13
4.5	预应力锚索的防护设计	13
4.6	张拉程序设计	15
5	边坡锚固设计	16
5.1	岩质边坡锚固	16
5.2	土质边坡锚固	16
6	地下洞室锚固设计	18
6.1	地下洞室锚固	18
6.2	岩壁吊车梁锚固	19
7	水工建筑物锚固设计	20
7.1	混凝土坝锚固	20
7.2	预应力混凝土闸墩锚固	20
7.3	闸室、消力池（塘）和挡墙锚固	21

7.4 水工隧洞混凝土衬砌环形预应力锚索	22
8 安全监测设计与试验	24
附录 A 锚索承载能力试验	26
标准用词说明	27
条文说明	29

1 总 则

1.0.1 为适应预应力锚固技术的发展，规范预应力锚固设计，使预应力锚固设计做到安全适用、经济合理、技术先进，制订本标准。

1.0.2 本标准适用于水利水电工程中的地基、边坡、地下洞室及水工混凝土结构的预应力锚固设计。

1.0.3 预应力锚固设计应积极采用新技术、新工艺、新设备和新材料。

1.0.4 本标准引用标准主要有：

《通用硅酸盐水泥》(GB 175)

《碳素结构钢》(GB/T 700)

《预应力混凝土用钢丝》(GB/T 5223)

《预应力混凝土用钢绞线》(GB/T 5224)

《预应力筋用锚具、夹具和连接器》(GB/T 14370)

《预应力混凝土用螺纹钢筋》(GB/T 20065)

《岩土工程勘察规范》(GB 50021)

《水利水电工程地质勘察规范》(GB 50487)

《水工金属结构防腐蚀规范》(SL 105)

《水工混凝土结构设计规范》(SL 191)

《水工建筑物抗冰冻设计规范》(SL 211)

《溢洪道设计规范》(SL 253)

《水闸设计规范》(SL 265)

《水工隧洞设计规范》(SL 279)

《水工挡土墙设计规范》(SL 379)

《水利水电工程边坡设计规范》(SL 386—2007)

1.0.5 水工预应力锚固设计除应符合本标准的规定外，尚应符合国家现行有关标准的规定。

2 术语和符号

2.1 术语

2.1.1 预应力锚固 prestressed anchorage

在岩体或混凝土结构物中，设置预应力锚索并施加张拉力，使岩体或混凝土结构物达到稳定或改善内部应力状态的技术措施。

2.1.2 锚索 tensile reinforcing

由数股钢丝、钢绞线按一定规律编排成束的构件。

2.1.3 锚杆 anchor, anchorage

用金属材料或树脂材料制成的用于工程加固的杆件。

2.1.4 预应力锚索 prestressed tendon

施加预应力后的锚索。本标准将预应力锚索、预应力锚杆统称为预应力锚索。

2.1.5 永久性预应力锚索 permanent prestressed tendon

在永久性建筑物中布置的长期使用的预应力锚索。

2.1.6 临时性预应力锚索 temporary prestressed tendon

在永久性或临时性建筑物中布置的，设计使用年限不超过 2 年的预应力锚索。

2.1.7 张拉锚杆 tensile anchors

施加拉力后的锚杆。

2.1.8 锚索体 body of anchors

预应力锚索整体，包括锚固段、自由段、锚头及相连接的所有部件。

2.1.9 锚固段 anchor fixed length

通过胶结材料或机械装置将锚索和被锚固介质粘结成整体，承受锚索拉力的区段，是预应力锚索体的内部持力端。

2.1.10 自由段 anchor free length

对预应力锚索施加张拉力时，可以自由伸长的区段。

2.1.11 锚头 anchor head

对锚索实施张拉和锁定的支撑装置。

2.1.12 有粘结预应力锚索 bonded prestressing tendon

锚索锁定灌浆后，自由段钢绞线与被锚固介质之间不能产生相对滑动的预应力锚索。

2.1.13 无粘结预应力锚索 unbonded prestressing tendon

锚索锁定灌浆后，自由段钢绞线与被锚固介质之间可以相对滑动的预应力锚索。

2.1.14 预应力钢材强度利用系数 utilization factor of the strength of prestressed anchors

当预应力锚索的张拉力达到设计值时，锚索材料的平均应力值与锚索材料抗拉强度标准值的比值。

2.1.15 设计张拉力 design tensile

根据锚固设计需要，并考虑一定的安全裕度和岩石流变、混凝土徐变及钢材松弛可能引起的预应力损失后，确定的每根锚索应施加的张拉荷载。

2.1.16 设计锚固力 design anchoring force

由各种因素造成的预应力损失均完成后，锚索中永久保存的荷载。

2.1.17 超张拉力 extra design tensile

为消除由于锚索与孔壁的摩擦、锚具的压缩和锚索的回缩而引起的预应力损失，施工时将设计张拉力提高后的张拉荷载。

2.1.18 预张拉 pretension

预应力锚索张拉作业前，为使锚索中各股钢丝或钢绞线受力均匀，所进行的初期张拉作业。

2.1.19 补偿张拉 compensatory tension

预应力锚索锁定后，为补偿预应力损失而进行的再次张拉作业。

2.1.20 拉力型锚索 tensioned grout tendon

锚索受力时，锚固段注浆体处于受拉状态的预应力锚索。

2.1.21 压力型锚索 pressured grout tendon

锚索受力时，锚固段注浆体处于受压状态的预应力锚索。

2.1.22 拉力分散型锚索 tensioned multiple-head tendon

在同一根锚索的锚固段中，若干组不等长的钢绞线在不同位置与孔壁粘结，将拉力分散的预应力锚索。

2.1.23 压力分散型锚索 pressured multiple-head tendon

在同一根锚索的锚固段中，采用若干组承载体将锚固段注浆体的压力分散的预应力锚索。

2.1.24 拉压复合型锚索 tension-compression combined anchors

同一根锚索锚固段，由若干组拉力型和压力型锚索组成的预应力锚索。

2.1.25 回缩量 retraction range

预应力锚索锁定时，自由段钢丝或钢绞线回缩的量值。

2.2 符 号

L ——预应力锚索长度；

L_1 ——锚固段长度；

L_2 ——自由段长度；

L_3 ——锚头部位钢绞线长度；

P_m ——单根预应力锚索超张拉力；

P ——单根预应力锚索设计张拉力；

C ——胶结材料与孔壁的粘结强度；

D ——锚索孔直径；

n ——同根锚索预应力钢丝或预应力钢绞线股数；

A ——单根预应力锚索所控制的面积；

q ——引起围岩失去稳定的下滑力；

P_1 ——需要预应力锚索提供的支护抗力；

P_2 ——由砂浆锚杆提供的支护抗力；

- P_3 ——由钢筋网喷射混凝土提供的支护抗力；
- P_0 ——围岩具有的支护抗力；
- β ——锚固角（预应力锚索轴线与水平面的夹角）；
- α ——滑动面（软弱结构面）与水平面的夹角；
- ϕ ——内摩擦角；
- σ_x ——计算截面处的张拉应力；
- σ_k ——锚索张拉应力控制值；
- σ_1 ——考虑偏转器摩阻损失后剩余的张拉应力；
- a ——偏转器的摩阻损失系数；
- σ ——有效应力；
- k ——钢绞线的摆动系数；
- μ ——钢绞线与套管的摩擦系数；
- θ ——张拉端至计算截面曲线孔道的切线夹角；
- f_{ptk} ——钢绞线抗拉强度标准值。

3 一般规定

3.1 基本资料

3.1.1 预应力锚固设计应具备以下基本资料：

- 1 建筑物级别及工程布置图。
- 2 水工建筑物的基本参数，荷载组合和运行特性。
- 3 锚固区域地形地质条件。
- 4 施工条件。
- 5 有关材料的物理力学指标。

3.1.2 布置预应力锚索区域的地质勘察应按 GB 50487 的规定进行。锚固设计时应具备以下地质资料：

- 1 锚固工程部位的地质平面、剖面图。
- 2 锚固区岩（土）体的范围和边界条件。
- 3 围岩质量、主要构造的产状、各种结构面的组合关系、地应力及地下水的资料。
- 4 锚固工程所涉及部位的岩（土）体物理力学性质及参数和可能失稳结构面的 c 值和 ϕ 值等。
- 5 被锚固区域的地下水水质腐蚀性离子指标等。

3.1.3 重要部位的锚固，应经原位试验获取必要的物理力学试验参数。

3.2 材 料

3.2.1 锚索材料可根据工程性质、工程规模、锚固部位等情况，选择高强度、低松弛的预应力钢丝、钢绞线、无粘结预应力筋、螺旋钢筋或高强材料制成的中空预应力锚杆。

3.2.2 采用高强预应力钢绞线或高强预应力钢丝作为锚索材料时，其力学性质应分别符合 GB/T 5224 和 GB/T 5223 的规定。

3.2.3 采用无粘结预应力筋做锚索时，所用材料性质应符合以

下规定：

1 制作无粘结预应力筋的钢材，其材料性能应符合 GB/T 5224 或 GB/T 5223 的规定。

2 无粘结预应力筋涂料层应采用专用防腐油脂，其性能应满足以下要求：

- 1) 在 $-20\sim+70^{\circ}\text{C}$ 温度范围内，不流淌、不裂缝变脆，并有一定韧性。
- 2) 使用期内化学性能稳定。
- 3) 对周围材料无侵蚀作用。
- 4) 不透水、不吸湿，防水性能好。
- 5) 防腐性能好。
- 6) 润滑性能好，摩阻力小。

3 无粘结预应力筋外包层应采用聚乙烯或聚丙烯，严禁使用聚氯乙烯。外包层材料性能应符合以下要求：

- 1) 在 $-20\sim+70^{\circ}\text{C}$ 温度范围内，低温不脆化，高温化学稳定性好。
- 2) 应具有足够的韧性、抗破损性。
- 3) 对周围材料无侵蚀作用。
- 4) 防水性能好。

3.2.4 采用高强螺纹钢筋做预应力锚杆材料时，其材料性能应符合 GB/T 20065 的规定。

3.2.5 预应力锚索的锚头和预应力钢筋连接器的性能和质量应符合 GB/T 14370 的有关规定。

3.2.6 锚固段和预应力锚索封孔灌浆应采用硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥，其质量应符合 GB 175 的规定。当地下水有腐蚀性时，应采用特种水泥。

3.2.7 锚墩混凝土材料应满足 SL 191 的规定，钢垫板材质应符合 GB 700 的相关规定。

3.3 锚固设计的基本要求

3.3.1 锚固设计应包括以下内容：

- 1 确定锚固范围和锚固深度。
 - 2 选择锚固方式。
 - 3 计算锚固力。
 - 4 确定预应力锚索数量，选择布置方式。
 - 5 确定锚索结构型式及各项参数。
 - 6 绘制工程锚固设计布置图和结构图，并编制技术要求。
 - 7 提出处于复杂地质条件下的锚固段处理措施。
 - 8 进行锚固监测设计。
- 3.3.2 预应力锚索的锚固范围和施加的锚固力应根据工程地质勘察资料、软弱结构面的位置、产状和力学性质或结构物的受力状况等，按稳定分析结果确定。
- 3.3.3 单根预应力锚索的设计张拉力及超张拉力，应根据以下因素确定：
- 1 保证被锚固结构物安全运行需要的总锚固力。
 - 2 围岩流变或混凝土徐变及钢材松弛可能产生的应力损失。
 - 3 锚固介质和胶结材料力学指标。
 - 4 预应力锚索材料力学指标。
 - 5 锚夹具的类型、张拉设备出力和施工场地条件。
- 3.3.4 预应力锚索的数量，应根据总锚固力和单根预应力锚索设计锚固力确定。
- 3.3.5 对边坡、地下洞室和基础锚固所采用的预应力锚索，其长度应根据潜在破坏面的位置和稳定的介质中的安全胶结长度等条件确定。
- 3.3.6 对于水工建筑物加固采用的预应力锚索，其长度应根据结构物尺寸和应力分析结果确定。
- 3.3.7 岩体锚固中的预应力锚索应按以下原则布置：
- 1 锚索的布置应能提供均匀的锚固力。应根据锚索的数量、施工条件、工艺要求，选用方形、梅花形、矩形或菱形布置。
 - 2 预应力锚索的轴线方向，宜按最优锚固角布置。
 - 3 当采用群锚时，相邻预应力锚索的锚固段宜错开布置，

必要时可调整锚索角度。

3.3.8 水工建筑物中的预应力锚索应按以下原则布置：

1 闸墩中的预应力锚索，应根据闸墩的结构形式、锚块形式、闸墩的应力分布和施工条件，经综合比较确定。

2 混凝土预应力衬砌中的环形锚索，应根据应力分析的结果、采用的锚索材料种类和施工条件确定。

3 混凝土坝体和坝基、闸室、消力池（塘）和挡墙等其他水工建筑物中的预应力锚索，应根据稳定分析和应力分析结果布置。

3.3.9 永久性预应力锚索，应根据工程的重要性、周围介质和渗透水的化学性质等条件，对预应力锚索进行防腐、防锈保护设计。

3.3.10 在重要工程或工程的重要部位，应布置一定数量的试验性锚索，以合理确定设计张拉力、超张拉力及可能产生的预应力损失，还应测定被锚固介质可能产生的压缩变形等，并复核设计选定参数的合理性。

4 锚固体系设计

4.1 锚索体的选择

4.1.1 应根据锚固工程的使用年限、单根预应力锚索的设计锚固力、锚索的布置及施工条件，经综合比较选择锚索体的形式。

4.1.2 预应力锚索的锚固段、自由段、锚头及各种连接部件，应按等强度的原则进行结构设计。

4.1.3 预应力锚索的长度由被加固岩（土）体的位置决定，伸入稳定岩（土）体的长度不应小于锚固段的设计长度。预应力锚索的总长度为锚固段、自由段和锚头及外露段长度之和。

4.1.4 拉力型、压力型和拉压复合型预应力锚索的各股钢丝或钢绞线的长度应一致，拉力分散型和压力分散型锚索的各股钢绞线的长度应根据分散单元的数量进行专门设计。

4.1.5 永久性锚固工程应选用胶结式预应力锚索。当单根预应力锚索的设计锚固力小于 1000kN，锚固区岩石抗压强度大于 60MPa，需要迅速实现张拉的锚固工程或难以使用胶结式锚固段时，可选择机械式锚固方式。

4.1.6 当计算的锚固段长度大于 10m 时，宜选择拉力分散型、压力分散型或拉压复合型锚固方式。

4.1.7 预应力锚索的材料选择，应遵守以下规定：

1 永久性预应力锚索宜选择高强度、低松弛的钢绞线或钢丝。

2 一般情况下，应优先采用有粘结预应力锚索；承担观测任务和有补偿张拉要求的预应力锚索，应采用无粘结钢绞线作为锚索材料。

3 当要求预应力锚索具有一定的刚度，或对于预应力锚索安装有特殊需要时，可采用高强螺纹钢筋。

4 当锚固区域岩体较为破碎，成孔困难时，也可选用自钻

式预应力锚杆。

4.2 锚索体设计

4.2.1 锚索体设计应包括：选择锚索体材料，确定设计锚固力、设计张拉力、锚索根数、锚索体结构（隔离架、对中支架位置，排气管、灌浆管、止浆环等布置）、锚索孔径及锚索体防护措施等。

4.2.2 采用预应力钢丝或钢绞线做锚索体时，钢材强度利用系数不宜大于材料抗拉强度标准值的 60%；采用高强螺纹钢筋或高强中空自钻式杆材时，钢材强度利用系数不宜大于材料抗拉强度标准值的 65%。

4.2.3 根据地质勘察资料分析，当岩（土）体加固后还可能产生较大变形或位移时，应降低预应力钢材的强度利用系数。

4.2.4 沿锚索长度方向，应安设隔离架。对于陡倾角方向布置的锚索，隔离架间距不宜大于 4.0m；对于缓倾角方向布置的锚索，隔离架间距不宜大于 2.0m。

4.2.5 隔离架的外径应小于锚索孔直径 20mm。隔离架的穿索孔数应与该根锚索钢绞线股数一致，应保证每股钢绞线顺直。隔离架中还应有安装灌浆管和排气管的通道。

4.2.6 隔离架可采用钢板或代用材料制作，其材质应符合相应规范的规定，厚度不宜小于 10mm。

4.2.7 封孔灌浆后 锚索的水泥浆或水泥砂浆保护层厚度应大于 20mm。

4.3 锚固段的结构设计

4.3.1 胶结式锚固段提供的锚固力，应大于预应力锚索的超张拉力。锚固段长度可按式（4.3.1-1）确定，并按式（4.3.1-2）复核。胶结长度的安全系数可按表 4.3.1-1 选取。对于重要工程或岩石条件复杂的锚固工程，还应通过现场拉拔试验进行验证。

$$L_1 = k \frac{P_m}{\pi DC} \quad (4.3.1-1)$$

$$L_1 = k \frac{P_m}{\pi dc_1 n} \quad (4.3.1-2)$$

- 式中 L_1 ——锚固段长度，mm；
 P_m ——单根预应力锚索（杆）超张拉力，N；
 k ——锚固段长度的安全系数，按表 4.3.1-1 选取；
 D ——锚索孔直径，mm；
 C ——胶结材料同孔壁的粘结强度，MPa，无试验材料时，可按表 4.3.1-2 分析选取；
 c_1 ——胶结材料与预应力钢丝或钢绞线的握裹力，可取 2.0MPa；
 d ——单股预应力钢丝或预应力钢绞线直径，mm；
 n ——同根锚索预应力钢丝或预应力钢绞线股数。

表 4.3.1-1 胶结式锚固段抗拔安全系数

工程性质与锚索孔方向	永久性锚索		临时性锚索	
	仰孔	俯孔	仰孔	俯孔
安全系数 k	2.0	1.5	1.6	1.2

表 4.3.1-2 水泥浆（砂浆）与围岩粘结强度

围岩类别	I	II	III	IV	V
粘结强度 (MPa)	1.5	1.5~1.2	1.2~0.8	0.8~0.3	≤0.3

4.3.2 锚固段长度不宜大于 10m。当计算的锚固段长度大于 10m 时，宜采取改善锚固段岩体质量、扩大锚固段孔径或采取拉力分散型或压力分散型锚索等措施，并对锚固段结构进行专项设计。

4.3.3 应根据锚固工程的需要和锚固段的岩体强度、锚固段结构等因素，选择水泥浆、水泥砂浆或树脂作为胶结材料。水泥浆及水泥砂浆胶结材料的抗压强度不宜低于 35MPa，树脂胶结材料的抗压强度不宜低于 50MPa。

4.3.4 拉力分散型或压力分散型锚索的锚固段单元分级数量及各单元钢绞线长度，应根据锚索总长度、锚固段地质条件、钻孔直径、注浆体抗压强度等因素综合确定。每个单元的锚固力应分别计算。各锚固单元锚固力之和应大于单根锚索设计的总锚固力。

4.3.5 压力型或压力分散型锚索的各锚固单元承载体或承压板应采用专门厂家制造的定型产品，其制作质量应满足设计要求。

4.4 锚头的结构设计

4.4.1 锚头应由锚墩、孔口承压板、工作锚及封孔保护等部件组成。观测锚索还应包括监测锚固力的测力装置。

4.4.2 锚头部位钢绞线的长度应由锚墩和承压板厚度，工作锚、工具锚和张拉设备的高度另加 0.3~0.5m 裕量之和确定，对于观测锚索还应加上测力传感器的高度。

4.4.3 锚头各部件的承载能力，应与单根锚索的最大张拉力相匹配，其材料性能应符合 GB/T 14370 的规定。

4.4.4 锚索锁定时，钢丝或钢绞线长度的回缩量不应大于 5mm。

4.4.5 孔口锚墩形式和结构尺寸应根据预应力锚索的设计张拉力和孔口地质条件确定。锚墩的承压面应与预应力锚索张拉方向相垂直。锚墩混凝土强度等级不宜低于 C30，其抗冻性应满足 SL 211 的要求。锚墩中还应预留灌浆孔和排气孔。

4.4.6 混凝土锚墩顶面应铺设钢垫板，钢垫板与混凝土面应紧密接触，与工作锚接触面应平整、光洁。钢垫板厚度可根据锚索的张拉荷载确定，但不宜小于 20mm。

4.5 预应力锚索的防护设计

4.5.1 应根据工程的重要程度、被锚固区域的地下水性质、设计锚固力等因素对预应力锚索进行防化学腐蚀、防应力腐蚀、防静电腐蚀等专项防护设计。

4.5.2 锚固区域环境对预应力锚索的腐蚀程度可划分为无腐蚀或弱腐蚀、中等腐蚀和强腐蚀。各种腐蚀程度可参照 GB 50021 判定，并根据腐蚀程度按表 4.5.2 的规定进行防护设计。

表 4.5.2 预应力锚索防护设计标准

环境对锚索的腐蚀程度	临时性预应力锚索	永久性预应力锚索
无腐蚀或弱腐蚀	A 级	C 级
中等腐蚀	B 级	C 级
强腐蚀	C 级	D 级
注：A 级：液态防护，如石灰水、防腐油。 B 级：塑态防护，如凝胶、树脂、防锈油脂等。 C 级：刚性防护，如水泥砂浆、水泥浆，无粘结预应力锚索加设波纹管等。 D 级：双层防护，全孔进行固结灌浆，加设波纹管并灌注特种水泥浆或水泥砂浆。		

4.5.3 当锚固区域地下水发育，且具有腐蚀性时，锚固前可采取固结灌浆措施。

4.5.4 当锚固区域的地层中含有易产生腐蚀的化学物质时，应优先采用无粘结预应力钢绞线做为锚索材料，并应加设波纹管，管内充填水泥砂浆或水泥浆，管外水泥浆包裹厚度不宜小于 10mm。水泥砂浆或水泥浆应具有抗化学腐蚀性能。

4.5.5 锚索体防腐、防锈处理时，所使用的材料及其附剂中，不应含有硝酸盐、亚硫酸盐、硫氰酸盐。水泥中氯离子含量不应超过水泥重量的 0.02%。

4.5.6 预应力锚索采用水泥浆或水泥砂浆做为封孔灌浆或胶结材料时，水泥的质量应符合 GB 175 的规定。

4.5.7 无粘结预应力锚索的防腐性能应满足 3.2.3 条的规定。

4.5.8 预应力锚固区域内存在杂散电流时，应采取绝缘隔离防护或阴极防护措施。

4.5.9 预应力锚索安装前应对锚索体做防锈处理。锚索安装后，应及时做好锚头的防锈处理。锚索张拉锁定并完成二次注浆后，应及时封闭锚头。预应力锚索（杆）防锈处理应遵守 SL 105 的

相关规定。

4.5.10 无粘结锚索锚头部位的防护应遵守以下规定：

1 当永久性预应力锚索张拉锁定后，应及时对锚头涂以防腐材料，再用混凝土封闭，封闭厚度不应小于 100mm。

2 采用盒具保护时，盒内应填充防腐材料。

4.6 张拉程序设计

4.6.1 预应力锚索张拉之前，应对每股钢绞线实行预张拉，预张拉后逐股锁定钢绞线。预张拉施加的张拉力可按设计张拉力的 10% 控制。

4.6.2 为保证预应力锚索锁定后能保存设计需要的设计张拉力，可进行超张拉。一般情况下超张拉力的数值宜为设计张拉力的 110%，特殊情况不宜超过设计张拉力的 115%。

4.6.3 预应力锚索张拉程序设计应遵守以下规定：

1 张拉力应分级施加，逐级增加至超张拉荷载，一般情况下可分四~五级施加。

2 每级张拉荷载下应持荷 5min，并测定预应力锚索的实际伸长值。

3 达到超张拉力时，应持荷 5min 测定伸长值后锁定。锁定完成后应测定钢丝或钢绞线实际回缩量。

4.6.4 以下工程部位布置的预应力锚索，应通过试验或原位监测结果对预应力锚索的张拉程序进行专门设计：

1 大型地下洞室群锚区域的预应力锚索。

2 膨胀性岩（土）层中布置的预应力锚索。

3 高地应力岩层中布置的预应力锚索。

5 边坡锚固设计

5.1 岩质边坡锚固

5.1.1 采用预应力锚索加固的岩质边坡，其稳定性应满足 SL 386—2007 第 3.4.2 条的规定。对边坡失稳后可能造成重大损失的重要锚固工程，经论证，其稳定安全系数应大于 1.5。

5.1.2 预应力锚索的布置应根据可能失稳的软弱结构面位置、产状、需要加固的范围和单根锚索的锚固力确定。

5.1.3 预应力锚索应均匀布置，间、排距宜为 3~6m。

5.1.4 预应力锚索的锚固角度，宜按以下原则确定：

1 宜按式 (5.1.4) 确定锚固角度：

$$\beta = \alpha - \left(45^\circ + \frac{\phi}{2} \right) \quad (5.1.4)$$

式中 β ——最优锚固角（同水平面的夹角）；

α ——滑动面倾角；

ϕ ——内摩擦角。

2 当确定的最优锚固角度为 $-10^\circ < \beta < +10^\circ$ 时，锚固角度宜调整至 $\beta \leq -10^\circ$ 或 $\beta \geq +10^\circ$ 。

3 难以按最优锚固角布置时，应通过技术、经济比较确定调整幅度。

5.1.5 当锚头部位岩体质量不满足锚索承载力要求时，可采取加大锚墩尺寸、浇筑混凝土格梁等措施。

5.1.6 岩质边坡锚固区域的截水、排水设计，应遵守 SL 386—2007 的规定。

5.2 土质边坡锚固

5.2.1 土质边坡采用预应力锚索加固措施后，边坡的稳定性应满足 SL 386—2007 第 3.4.2 条的规定。

5.2.2 滑动面为土层与岩层的结合面时，锚固段应设置在稳定的岩层中。

5.2.3 滑动面在土体中时，锚固段应设置在稳定的土体中，锚固段的长度应满足施加的超张拉力需要。不满足需要时，应采取扩大锚固段孔径或采用拉力分散型、压力分散型锚索结构的措施。

5.2.4 预应力锚索的锚固角应按 5.1.4 条的确定。

5.2.5 土体中预应力锚索自由段的隔离架间距不宜大于 2.0m。

5.2.6 土体中锚索的锚墩应与混凝土格梁、挡墙等支挡结构形成整体。

5.2.7 土质边坡锚固区域的截水、排水设计，应遵守 SL 386—2007 的规定。

6 地下洞室锚固设计

6.1 地下洞室锚固

6.1.1 经稳定分析,对地下洞室中范围较大的压剪破坏区、塑性区和不稳定块体,可采用预应力锚索加固。

6.1.2 预应力锚索提供的单位面积支护抗力可按式(6.1.2)确定:

$$P_1 = \frac{q_1}{A} \quad (6.1.2)$$

式中 P_1 ——由预应力锚索提供的单位面积上的支护抗力, MPa;

q_1 ——单根锚索的设计锚固力, N;

A ——单根锚索的控制面积, mm^2 。

6.1.3 当采用预应力锚索和普通张拉锚杆、钢筋网喷射混凝土综合措施进行系统加固后,其围岩稳定安全系数应满足式(6.1.3)要求:

$$K \geq \frac{P_1 + P_2 + P_3 + P_4}{P_i} \quad (6.1.3)$$

式中 K ——围岩稳定性安全系数,按工程重要程度取 $K=1.5 \sim 1.8$;

P_i ——围岩稳定所需要的最小单位面积上的支护抗力, MPa;

P_1 ——由预应力锚索提供的单位面积上的支护抗力, MPa;

P_2 ——由普通张拉锚杆提供的单位面积上的支护抗力, MPa;

P_3 ——钢筋网喷射混凝土提供的单位面积上的支护抗力, MPa;

P_4 ——围岩本身具有的单位面积上的抗力, MPa。

- 6.1.4 预应力锚索应穿过压剪破裂区或塑性区，锚固段应布置在没有扰动的弹性区内，锚固段长度应满足 4.3.1 条的规定。
- 6.1.5 预应力锚索的间距不宜大于预应力锚索自由段长度的 1/2，但最小间距不宜小于 4m。
- 6.1.6 拱部预应力锚索应按承担全部塌滑体重量确定锚固力。
- 6.1.7 边墙部位的锚索，应根据节理裂隙的组合关系，考虑塌滑体周围岩体的嵌固作用后，按岩质边坡的规定，确定预应力锚索的锚固力。
- 6.1.8 两相邻大型地下洞室间的岩墙，宜优先采用对穿式预应力锚索。

6.2 岩壁吊车梁锚固

- 6.2.1 岩壁吊车梁可采用预应力锚索（杆）进行加固。
- 6.2.2 应通过刚体静力平衡法或弹塑性有限元法分析确定预应力锚索（杆）的设计锚固力。采用刚体平衡法计算时，单位梁长预应力锚索（杆）的数量可按式（6.2.2）确定：

$$KF = A_s f_y \quad (6.2.2)$$

其中

$$f_y = 0.8 f_{ptk}$$

式中 K ——安全系数，1 级建筑物取 $K=2.0$ ，2 级建筑物取 $K=1.8$ ，3 级建筑物取 $K=1.5$ ；

F ——预应力锚索（杆）设计锚固力，N；

A_s ——预应力锚索或锚杆截面积， mm^2 ；

f_{ptk} ——钢绞线抗拉强度标准值， N/mm^2 。

- 6.2.3 预应力锚索（杆）宜选用高强螺纹钢。
- 6.2.4 岩壁吊车梁中布置的预应力锚索（杆）的锚固深度，应根据预应力锚索（杆）承受的最大拉力，按式（4.3.1-1）计算，并加上围岩松弛区的影响深度 1.0m。
- 6.2.5 预应力锚索（杆）与水平面的夹角宜为 $15^\circ \sim 25^\circ$ ，特殊情况可根据需要布置。
- 6.2.6 对预应力锚索（杆）的受力情况应进行监测。

7 水工建筑物锚固设计

7.1 混凝土坝锚固

7.1.1 对混凝土坝的基础和坝体采用预应力锚索加固时，应针对不同的工程对象，按相应的规范进行抗滑稳定、抗倾覆稳定和应力分析计算，确定加固范围和施加的设计锚固力。

7.1.2 加固坝基的预应力锚索轴线方向，应根据场地和施工条件，经过技术经济比较确定。

7.1.3 当坝基存在缓倾角软弱结构面，应根据其位置和产状、结构物的布置和施工条件确定锚索长度和布置。当单根预应力锚索的设计锚固力大于 3000kN 时，可考虑采用拉力分散型或压力分散型锚索体系。

7.1.4 加固坝基的预应力锚索，应遵守 4.5.2 条的规定，按 C 级进行防护；当地下水有腐蚀时，按 D 级进行防护。

7.1.5 对于岩体裂隙发育或较为软弱破碎的坝基，应在锚固之前对锚固区域的岩体进行固结灌浆，固结灌浆的设计应符合相应规范的规定。

7.1.6 对坝体裂缝等缺陷采用预应力锚索加固时，应选择适合于原建筑物强度要求的锚固力。其锚固段应布置在坝体的不同高程。

7.1.7 对坝体裂缝实施预应力锚固后，需要灌浆时，还应控制灌浆压力。

7.2 预应力混凝土闸墩锚固

7.2.1 当弧形闸门承受的总推力设计值达到 25000kN 以上时，可考虑采用预应力混凝土闸墩。预应力混凝土闸墩结构设计应遵守 SL 191 的有关规定。

7.2.2 预应力混凝土闸墩可用结构力学法计算，并采用三维有

限元法进行复核。必要时，可采用结构模型试验加以验证。

7.2.3 预应力混凝土闸墩的锚固设计应包括以下内容：

- 1 主锚索的设计锚固力及其布置。
- 2 次锚索的设计锚固力及其布置。

7.2.4 闸墩中预应力主锚索的布置应符合以下规定：

1 预应力锚索合力应通过支铰中心，主锚索在闸墩立面上的布置，应沿弧门推力方向呈辐射状扩散，与弧门推力方向的夹角宜为 $-10^{\circ}\sim+10^{\circ}$ 。主锚索宜长、短相间布置。

2 中墩主锚索在平面上宜对称布置，边墩和缝墩为非对称布置。主锚索在闸墩平面上的投影，宜平行于闸墩侧立面或与闸墩侧立面成 $1^{\circ}\sim 3^{\circ}$ 的夹角。主锚索宜靠近闸墩外侧面，但不宜小于500mm。主锚索间距不宜小于400mm。

7.2.5 闸墩的支撑结构中，应设置一定数量的次锚索。

7.2.6 应根据锚索的直径和保护层厚度确定锚索的穿索孔直径。采用有粘结钢绞线时，保护层厚度不宜小于20mm；采用无粘结钢绞线时，保护层厚度不宜小于10mm。穿索孔道宜采用预埋波纹管或钢管等。

7.2.7 锚固区域的混凝土强度等级不应低于闸墩本身混凝土强度等级，且不应低于C30。混凝土锚块和颈部等部位的混凝土强度等级不宜低于C40。

7.3 闸室、消力池（塘）和挡墙锚固

7.3.1 当闸室、消力池（塘）和挡墙的稳定性不满足要求时，可采用预应力锚索进行加固。

7.3.2 对闸室、消力池（塘）采取锚固措施时，其稳定性应满足SL 253和SL 265的规定。

7.3.3 对挡墙采取锚固措施时，其稳定应满足SL 379的规定，并应符合以下要求：

1 挡墙承受的荷载，由预应力锚索施加的阻滑力和挡墙的自重共同承担。

2 根据挡墙稳定分析结果，确定锚索的数量和单根锚索的锚固力。

3 根据挡墙的用途、结构和可能破坏方式，选择最优的锚固角度。

7.4 水工隧洞混凝土衬砌环形预应力锚索

7.4.1 对承受较高内水压力的水工隧洞，经过技术经济比较可采用沿混凝土衬砌外缘环形布置的预应力锚索，承担全部或部分内水压力。

7.4.2 环形锚索式预应力混凝土衬砌隧洞的结构设计，应符合 SL 279 的有关规定。

7.4.3 环形锚索式预应力混凝土衬砌，应将锚索施加的环向应力作为荷载之一，按弹性理论进行结构应力分析。必要时，还应通过有限元计算或模型试验加以复核。

7.4.4 环形预应力锚索的设计张拉力，应按需要环形锚索提供的径向预压应力，并考虑锚索张拉过程中张拉端偏转器的摩擦损失后由以下各式确定：

1 张拉应力控制值：

$$\sigma_k = 0.75 f_{ptk} \quad (7.4.4-1)$$

式中 σ_k ——张拉时钢绞线应力控制值， N/mm^2 ；

f_{ptk} ——钢绞线抗拉强度标准值， N/mm^2 。

2 张拉过程中，考虑偏转器摩擦损失后的剩余张拉应力：

$$\sigma_1 = (1 - a)\sigma_k \quad (7.4.4-2)$$

式中 σ_1 ——考虑偏转器摩擦损失后的剩余张拉应力， N/mm^2 ；

a ——偏转器的摩擦损失系数，不大于钢绞线应力控制值的 8%。

3 钢绞线沿程的有效张拉应力：

$$\sigma = \sigma_1 e^{-(kx + \mu\theta)} \quad (7.4.4-3)$$

式中 σ ——钢绞线沿程的有效张拉应力， N/mm^2 ；

k ——钢绞线的摆动系数，有粘结钢绞线 $k=0.0015$ ，无

粘结钢绞线 $k=0.0007$;

x ——从张拉端至计算断面的钢绞线长度 (m);

μ ——钢绞线与套管的摩擦系数, 有粘结钢绞线 $\mu=0.2$,
无粘结钢绞线 $\mu=0.032$;

θ ——从张拉端至计算截面曲线孔道的切线夹角, rad。

7.4.5 环形锚索宜均匀布置在混凝土衬砌的外缘。锚索间距宜为 400~500mm。

7.4.6 环形锚索预应力混凝土衬砌, 混凝土的强度等级不宜低于 C30。当衬砌混凝土达到设计强度时, 方可进行环形锚索的张拉。

7.4.7 锚具槽的布置应以便于施工为原则, 其左右两侧宜交错布置。

7.4.8 采用无粘结钢绞线时, 钢绞线宜布置在外层钢筋的外侧。采用有粘结钢绞线时, 应在锚索位置预埋环形波纹管, 其衬砌混凝土达到设计强度后方允许进行环形锚索的穿索、张拉。

7.4.9 张拉完成后, 应对穿索孔道及锚具槽进行回填灌浆, 回填灌浆材料应采用无收缩水泥砂浆或水泥浆, 其抗压强度等级不应低于 30MPa。

8 安全监测设计与试验

8.0.1 预应力锚固工程安全监测设计应遵守以下原则：

- 1 安全监测应以监控工程施工期及运行期的安全为主，并兼顾指导施工和验证设计。
- 2 施工期安全监测项目宜与运行期安全监测项目相结合。
- 3 监测仪器应布置在有代表性的地段或部位。
- 4 选定的各种监测仪器宜在施工初期安装。
- 5 每个监测断面的监测仪器数量不宜少于 3 支（组）。

8.0.2 预应力锚固工程监测仪器选型应遵守以下原则：

- 1 监测仪器应耐久、实用、适应工程环境，仪器精度满足工程需要。
- 2 仪器类型宜与监测工程类型相协调。
- 3 仪器选型时应考虑便于实现监测自动化，并具有人工测量功能。

8.0.3 安全监测设计应对仪器的安装、保护、监测等提出相应的技术要求。

8.0.4 安全监测设计应包括锚索体工作状态和被锚固对象的锚固效果，监测结果应是工程安全评价的依据之一。

8.0.5 锚索体工作状态监测应包括以下内容：

- 1 张拉过程中，每根锚索体的实际伸长值和锁定时的回缩值。
- 2 在有代表性锚索中安装测力传感器，监测锚固力变化值。
- 3 设计需要的其他监测项目。

8.0.6 应根据加固对象和设计需要，对被锚固介质可选择以下监测项目：

- 1 位移或变形。
- 2 应力或应变。

- 3 裂缝变化。
- 4 声波波速变化。
- 5 地下水位及水质变化。

8.0.7 监测仪器数量可根据建筑物类型、建筑物级别，按表 8.0.7 确定，并应遵守以下规定：

- 1 每个锚固区或每个监测断面的监测锚索数量不宜少于 3 支（组）。
- 2 锚索体和被锚固介质的监测仪器宜布置在同一监测断面。

表 8.0.7 各建筑物安全监测锚索根数百分比

锚固工程类型	边坡锚固			地下建筑物锚固			水工建筑物锚固		
	1	2	3	1	2	3	坝基、 坝体	闸墩	闸室、 挡墙
监测锚索根数的 百分比（%）	≥10	≥8	≥5	≥10	≥8	≥5	≥15	≥10	≥5
注：监测锚索根数的百分比为 $\left(\frac{\text{监测锚索根数}}{\text{锚索总根数}}\right) \times 100$ 。									

8.0.8 特殊的预应力锚固工程，应根据需要进行专项监测设计。

8.0.9 锚索监测应按设计要求及时布置实施，并优先安排监测锚索施工。

8.0.10 当实测锚索拉力值超过设计张拉值的 20% 或小于 10% 时，应及时分析原因。

8.0.11 当布置的预应力锚索数量较多，被锚固介质的地质条件较为复杂，在锚索施工前，应安排现场承载能力试验，以此确定锚固段结构和长度。锚索承载能力试验要求和办法见附录 A。

附录 A 锚索承载能力试验

A.0.1 锚索承载能力的试验，应在有代表性地质地段，选择非破坏性试验或破坏性试验。

A.0.2 锚固段的非破坏性试验应遵守以下规定：

1 试验锚索应有代表性。

2 锚固段的胶结材料达到设计强度后，方可进行试验。施加张拉力不少于 5 级，每级持荷 5min，并进行相应的观测。当张拉力达到设计张拉力的 120% 时，即认为锚固段的锚固力满足设计要求。

A.0.3 锚固段的破坏性试验，应遵守以下规定：

1 破坏性试验不应在工作锚索中进行。

2 用于破坏性试验的锚索可比工作锚索短，但锚固段的长度应满足设计要求。

3 按设计拟定的张拉程序，逐级施加张拉力。每级荷载持荷 5min，并进行相应观测。当锚固段产生连续位移，或有 30% 的钢丝或钢绞线断裂，即认为预应力锚索已达到破坏状态。

4 当锚索体应力已达到钢材极限抗拉强度，锚索并没有出现本条第 3 款的情况时，可根据实测的荷载与变形关系曲线确定锚固段的锚固力。

5 应根据试验结果，核算锚固段的安全程度，并据此调整锚固段的结构和长度。

6 进行破坏性试验时，应防止发生人身伤害和设备损坏等事故。

标准用词说明

标准用词	在特殊情况下的等效表述	要求严格程度
应	有必要、要求、要、只有……才允许	要 求
不应	不允许、不许可、不要	
宜	推荐、建议	推 荐
不宜	不推荐、不建议	
可	允许、许可、准许	允 许
不必	不需要、不要求	

中华人民共和国水利行业标准

水工预应力锚固设计规范

SL 212—2012

条 文 说 明

目 次

1	总则	31
3	一般规定	32
4	锚固体系设计	39
5	边坡锚固设计	55
6	地下洞室锚固设计	60
7	水工建筑物锚固设计	64
8	安全监测设计与试验	81

1 总 则

1.0.1 20世纪90年代以来，特别是《水工预应力锚固设计规范》(SL 212—98)颁布实施之后，我国水工预应力锚固技术有了很大的发展，采用预应力锚索加固边坡、地下洞室、坝基、坝体和其他各种水工建筑物的工程非常普遍，应用预应力锚索数量之多，是世界水工建筑中少有的，目前我国预应力锚索最大张拉力已达10000kN，最长的锚索长度已越过120m。预应力锚索所用钢材抗拉强度标准值已达到和超过1860MPa，无粘结钢绞线已大量生产，锚夹具和张拉设备产品质量大幅度提高。随着预应力锚固技术的发展，压力分散型、拉力分散型、拉压复合型，以及可除式预应力锚索不断被工程所采用，更值得关注的是预应力锚索的防护已得到所有锚固工程的高度重视，预应力锚固工程的安全监测已在许多工程中实施并用于工程的安全评价。为了更加有效地推进预应力锚固技术的发展，规范应用条件，合理地利用预应力锚固技术，保证工程安全，特对SL 212—98进行修订。

1.0.2 本标准的适用范围：采用预应力锚索对坝基、岩质边坡、土质边坡、地下工程的围岩，以及水工混凝土结构的加固、补强等工程的设计和工程预应力结构设计。

1.0.3 预应力锚固技术是一种发展中的技术，工序比较复杂，种类繁多，应用广泛，而且制约因素较多，又多用于隐蔽工程。在工程设计时必须详尽地掌握工程的运用要求和锚固对象的各种基础资料，根据不同的条件，积极采用新技术、新工艺、新设备和新材料，因地制宜地进行设计工作。不断地促进预应力锚固技术的发展，充分发挥预应力锚固的加固作用，以做到投资节省和工程安全。

3 一般规定

3.1 基本资料

3.1.1、3.1.2 预应力锚索的吨位、长度、方位与被锚固体有直接关系，因此必须详尽地掌握锚固部位的相关资料。对地下洞室，主要了解围岩的稳定状态和可能发生塑性变形的深度、范围；对局部破坏部位，主要了解和掌握滑动面或破坏面的位置、产状和不利结构面的组合关系；对水工建筑物本身，主要掌握影响稳定和内部应力恶化的各种荷载和运行方式；对锚固介质，主要掌握所处的环境条件及物理和化学特性。从而确定设计参数，优化结构布置和施工方法。

原位监测资料对地下工程的围岩稳定、边坡稳定的评价有非常重要的价值，原位监测的结果可直观地反映结构物及岩体的稳定状况。为此，许多工程特别是一些重要工程，在施工初期就布置了一定数量的收敛计、多点位移计或测斜仪，监测边坡或地下结构物的稳定状况，而且直接用于工程稳定评价。

3.2 材 料

3.2.1 在大多数的预应力锚固工程中，应用的锚索材料主要有两种：一种是高强度、低松弛的预应力钢丝；另一种是高强度、低松弛的预应力钢绞线。目前我国生产的由7股 $\phi 5\text{mm}$ 钢丝构成的钢绞线是按《预应力混凝土用钢绞线》(GB/T 5224—2003)生产的，其标准强度为1860MPa，延伸率为4%，这一标准与美国ASTMA 416—98标准基本一致。目前我国预应力锚固工程中应用最为普遍的是1860级预应力钢绞线。

随着预应力锚固技术的发展，有些工程还使用了高强度的螺纹钢，以满足锚索安装中的刚度要求。高强螺纹钢的极限抗拉强度可达到1230MPa，松弛率为1.5%，其螺纹可直接用标准

的连接器对接。我国丰满大坝的加固工程中，部分锚索采用了由 4 根高强螺纹钢筋组成的锚索，每束锚索的总张拉力达到了 2400kN，效果很好。

为了加强预应力钢材的防腐、防锈功能和适应特殊部位的预应力锚固需要，近年来在国际上和国内又将预应力钢绞线在生产厂家以特殊的工艺喷涂一层包裹材料，再敷涂润滑油脂，外加 PE 塑料外包保护层。这种预应力筋可以自由伸缩，称为无粘结预应力筋。无粘结预应力筋目前已广泛应用于各种锚固工程。小浪底边坡锚固、地下厂房锚固和排沙洞的环形预应力锚索，几乎全部是采用这种类型的锚索。本标准将《无粘结预应力混凝土结构技术规程》(JGJ/T 92—93) 相应的质量标准列入本标准，便于工程采用。

为解决塌孔地段的锚索安装的难题，近几年又开发了中空自钻式预应力锚杆。自钻式预应力锚杆集造孔、锚杆安装、锚杆注浆于一体，施工方法简便，易于保证安装质量，其施加的张拉力可达 1500kN。当预应力锚索设计张拉力小于 300kN 时，有些工程还采用了普通螺纹钢筋做锚杆材料。

3.2.2 我国生产的预应力钢丝、预应力钢绞线和高强螺纹钢筋均为定型产品，并制定了《预应力混凝土用钢丝》(GB/T 5223—2002)、《预应力混凝土用螺纹钢筋》(GB/T 20065—2006) 和 GB/T 5224—2003，预应力锚索设计、施工、试验及验收均应以此为标准。

3.2.3 无粘结预应力筋是由钢绞线经特殊工艺制成的，其防腐涂层及外包材料尚无国家标准，目前仍以 1994 年建设部颁布实施的 JBJ/T 92—93 为质量标准，本标准将 JBJ/T 92—93 的第 2.2.1 条、第 2.2.2 条和第 2.2.3 条无粘结钢绞线的防腐和外包材料的质量要求做为本标准的质量要求予以规定。外包材料严禁使用聚氯乙烯是防止氯离子对锚索的腐蚀

3.2.4 GB/T 20065—2006 系由国家建筑钢材质量监督检验中心等单位编制，国家钢材标准化技术委员会归口管理，于 2006

年实施的国家标准，该标准对应于国际标准《预应力钢筋混凝土用钢筋》第5部分（ISO 6934—5：1991）。钢材主要级别有PSB500、PSB785、PSB830、PSB930和PSB1080，其抗拉强度可达1230MPa，松弛率不大于1.5%。这种高强度螺纹钢筋在预应力锚固工程中有较大的利用空间。

3.2.5 预应力锚索的锚头主要包括锚夹片、锚板、锚垫板等部件。这些部件分别承担着传递、保持预应力锚索张拉力的任务，是预应力锚索实际施加预应力的重要部件。加工这些部件的材质也应符合国家标准，它们的加工质量和性能应符合《预应力筋用锚具、夹具和连接器》（GB/T 14370—2007）的规定。

3.2.6 因矿渣水泥、火山灰水泥含有较多的硫化物和氯化物，对锚索有腐蚀作用。故锚固段的胶结材料和封孔灌浆的材料应使用硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥。

3.3 锚固设计的基本要求

3.3.1 在锚固设计中，除确定锚固范围和锚索长度、选择锚固方式、计算锚固力、确定预应力锚索数量、确定锚索结构型式及各项参数，以及绘制工程布置图、结构图，编制技术要求和提出复杂地质条件处理措施外，锚固效果的监测也十分重要，所以监测设计的有关内容应列入设计文件中。

3.3.2 在预应力锚固设计中，需研究岩体或水工建筑物可能失稳的条件和失稳破坏的形式。以便确定预应力锚索的锚固范围和锚固深度。

一般情况下，边坡和水工建筑物基础的破坏形式主要是滑动。引起边坡滑动的主要因素是顺坡节理或软弱结构面的存在。查清滑动面的位置，以及其结构面的组合情况与力学性质就可确定滑动范围、滑动力的大小，进而计算施加的阻滑力和锚固位置。

地下洞室围岩失稳主要有两种方式。一种是由于洞室开挖引起应力的重新调整，使某些部位应力超限，出现较大范围的塑性

区。为抑制有害变形的发展和限制塑性区的扩大，应采用系统加固的方法。根据洞室的开挖程序，通过有限元分析计算，确定塑性区范围、需要施加的锚固力和锚固深度。另一种是由于软弱结构面的不利组合，使局部岩体滑动或塌落，此时可按块体理论分析失稳条件，确定锚固力和锚固深度。

对于水工建筑物，主要是以预应力锚索所施加的预压应力，改善结构物内部应力状态或保持建筑物的整体稳定。因此，需要根据水工建筑物的稳定、应力分析结果，确定施加的预应力大小和锚固的部位。

3.3.3 单根锚索锚固力的大小，主要由锚固介质的力学强度、锚索体采用的材料和张拉设备的张拉能力决定。

当被锚固介质力学强度较低、质量不好、岩体破碎、软弱时，只能采用胶结式锚固段型式的锚索。必要时，还需进行固结灌浆或增设其他结构措施，以增大锚固段的锚固力。

锚索体的材料是制约单根锚索锚固力的一个重要因素。确定材料数量时，应考虑一定安全余度，再根据需要确定钻孔直径。一般情况下，当采用 1860 级钢绞线时，单根锚索的锚固力、钢绞线股数和钻孔直径的关系见表 1。

表 1 单根锚索的锚固力、钢绞线股数和钻孔直径关系

单根锚索锚固力 (kN)	1000	2000	3000	6000
单束锚索钢绞线股数	6	12	19	40
钻孔最小直径 (mm)	110	140	160	220

单根锚索的锚固力还受到施工设备的限制。例如钻孔机具必须满足可造锚固力需要的最小孔径的要求；张拉锚索的千斤顶，最大出力应大于单根锚索的超张拉力。目前我国生产的张拉千斤顶的最大出力为 6000kN。在锚固设计时，单根锚索锚固力应综合上述条件选取。张拉设备可参照《水工预应力锚固施工规范》(SL 46) 的规定选取。

此外，在设计单根预应力锚索的设计张拉力时，还应考虑可

能发生的预应力损失。影响预应力损失的主要因素有：锚索材料的徐变性质、被锚固介质的流变特性、锚索张拉锁定后钢绞线回缩量的大小、锚索与孔壁的摩擦和锚夹具之间的接触情况等。在上述预应力损失中，锚索的回缩量大小、锚索与孔壁摩擦以及锚夹具的接触变形可利用超张拉来克服，而锚索材料的徐变和锚固介质的流变是属时间效应，应在设计时予以考虑。其中，钢材的徐变影响仅占预应力值的1%，对于混凝土建筑物中的预应力锚索，由于混凝土的徐变引起的预应力损失为5%~6%，此值变幅不大。而对于岩体或土体中的预应力锚索，大部分预应力损失则来源于岩（土）体的流变特性，所以应着重考虑岩体锚固介质的质量。在预应力锚固设计时，关于应力损失量的考虑，对于一般性工程，可根据经验或工程类比法确定；对于重要工程，应通过试验确定。

3.3.4 预应力锚索的数量与需要提供的总锚固力和单根锚索的设计张拉力有关。各根锚索提供的阻滑力的总和应满足该区域被锚固介质的稳定要求。

3.3.5、3.3.6 采用预应力锚索进行加固，锚固段的位置需置于稳定的介质中。对于由软弱结构面引起的塌滑，预应力锚索需穿过软弱结构面，锚固段需置于不能滑动的完整岩层中；对由塑性变形引起的塑性区或拉力区，锚固段需置于围岩的弹性区内；对水工建筑物，锚固段应置于压应力区内。

3.3.7 为了向被锚固介质提供最佳的锚固效果，力求锚固力分布均匀。在一般情况下，锚索应均匀、等距离布置。布置型式可以是方形或矩形，也可以是梅花形或菱形。

从锚索的受力条件分析，当锚索受到较大拉力时，在锚固段和锚头附近的一定范围内，被锚固介质将出现拉应力区，所以锚索的布置应力求缩小锚固段和锚头附近拉应力区的范围，拉应力值也要控制在允许的范围之内。

锚索的方位应以提供最大阻滑力和最有效支护抗力为目的进行布置。一般情况下，最有效的布置为逆滑动方向布置。这样锚

索可能很长，有时还受施工条件、滑动体边界条件的限制，只能以一定的角度布置，所以必须经过综合比较，选择最优的锚固方向，以达到最有效的加固效果。

由于稳定需要，设计中布置的预应力锚索数量多，锚固段在被锚固的介质中比较集中，在锚固介质的某个高程或某个平面内应力状况比较复杂，或由于施加的张拉力比较大而造成锚固段区域产生局部拉应力过大。为改善锚固段区域锚固介质的应力条件，锚固段最好分布在不同高程或不同平面内，这样可以减小局部拉应力的数值，改善锚固段区域的应力分布。由于锚固技术的发展，为改善锚固段区域的应力状况，对锚固段的结构形式做了改进，将锚固段做成拉力分散型或压力分散型。由此，锚固段区域的拉应力将大幅度降低，并可控制在允许范围之内，因此大大改善了锚固段的应力状态，扩展了预应力锚索的应用范围，并为发展高荷载预应力锚索创造了条件。

3.3.8 由于混凝土预应力闸墩结构的尺寸较小，且又承受了巨大的水推力，应力状态比较复杂。计算结果表明，在巨大的水推力作用下，闸墩内侧表面和闸墩与大梁连结部位都有较大的拉应力，有些工程上述部位的主拉应力达 8.0MPa。为了改变这种状况，预应力锚索在立面上应沿水平推力的合力方向呈扇形扩散布置，使闸墩中应力分布均匀；此外，预应力锚索在平面内的布置，除应考虑应力条件外，还应考虑施工简便的要求。

我国已建环形锚索式预应力混凝土衬砌中布置的锚索，使用的材料主要有两种：一种为有粘结预应力钢绞线；另一种为无粘结预应力钢绞线。由于使用的材料不同，锚索的布置是有区别的，施工中采用的锚具型式对锚索的布置也有影响，所以在锚索的布置设计时，应针对锚索材料、锚具的型式，采用相应的布置方式。

在坝体、坝基以及其他水工建筑物中布置锚索，应主要根据结构物的稳定及应力分析结果确定其布置。

3.3.9 由于预应力锚索工作的环境千差万别，锚索材料内部应

力较大，再加上各股钢丝或钢绞线受力的不均匀性，决定了对锚索的防腐和防锈蚀处理的重要性。因此，在预应力锚固设计时一定要注意锚索的防腐、防锈处理的设计。锚索的防护设计，一定要根据锚索的使用年限、工作环境和地下水的性质等条件进行。

3.3.10 锚固工程多为隐蔽工程，地质条件和地质参数很难选取得非常准确，再加上一些不可预见因素的影响，给工程的锚固设计带来困难。为了优化设计，保证锚固工程经济、合理、运行安全，应安排一定数量的试验锚索，以确定或验证主要设计参数的合理性和可靠性。

4 锚固体系设计

4.1 锚索体的选择

4.1.1 预应力锚索基本上是按锚固段的锚固方式进行分类的，可分为胶结式和机械式两类。胶结式预应力锚索应用最为普遍；而机械式由于锚固段较为复杂，安装也不方便，很少采用。在预应力锚索迅猛发展的今天，除特定情况外，机械式已基本不再采用。

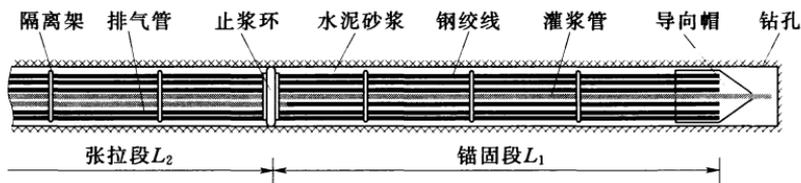
由于预应力锚固技术的迅猛发展，胶结式的锚固方式由过去单一的拉力型，发展为拉力分散型、压力型、压力分散型和拉压复合型等多种锚固方式。按胶结式锚固段使用的胶结材料划分，可分为水泥浆或水泥砂浆锚固段和树脂式锚固段。但经常采用的仍为水泥浆或水泥砂浆，只有特殊情况才考虑使用树脂材料。

20 世纪以来无粘结钢绞线大量用于锚固工程，采用无粘结钢绞线的锚索称之为无粘结预应力锚索，无粘结预应力锚索主要用于腐蚀地层的加固，观测性锚索或有补偿张拉要求的锚索也采用了该类型。

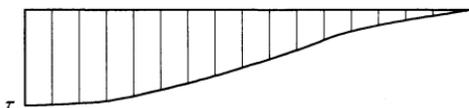
为了方便选择锚索形式，将目前我国经常采用的锚索型式的构造和特点简单介绍如下，以便根据需要进行选择：

(1) 拉力型。拉力型锚索是我国应用最早，也是应用最多的一种锚索，1964 年安徽省梅山水库坝基加固首先使用了拉力型预应力锚索。这种锚索在施工时，先对锚固段注浆，待浆体达到设计强度后，对锚索施加张拉力，锚索受力时锚固段注浆体受拉，这种锚索的结构及锚固段的剪应力分布见图 1。

(2) 拉力分散型。拉力分散型锚索与拉力型锚索工作原理是一致的，不同的是，锚固段部位锚索长短不一，不同长度的钢绞线在不同部位与水泥砂浆胶结，使锚固段剪应力峰值降低并分散到整个锚固段，使剪力分布趋于均匀。拉力分散型锚索结构及锚固段的剪应力分布见图 2。

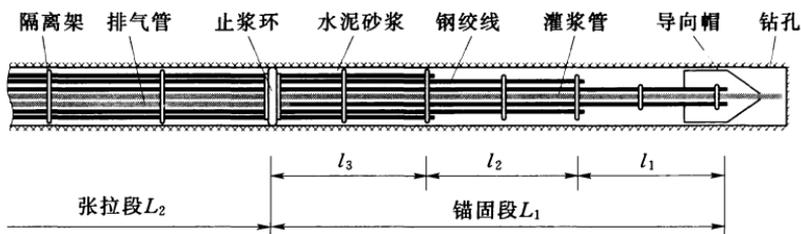


a) 拉力型锚索结构示意图

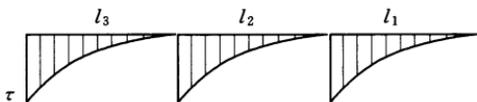


b) 拉力型锚索锚固段剪应力分布示意图

图 1 拉力型锚索锚固段示意图



a) 拉力分散型锚索结构示意图



第3级剪应力分布 第2级剪应力分布 第1级剪应力分布

b) 拉力分散型锚索锚固段剪应力分布示意图

图 2 拉力分散型锚索构造示意图

(3) 压力型。压力型锚索与拉力型锚索主要区别在于通过锚固段孔底端部的承压板或挤压套的作用，将锚固段注浆体由受拉改变为受压，因此改善了锚固段的受力状况，有利于防止锚固段因拉力过大而开裂，从而加强了预应力锚索的防护。压力型锚索结构及锚固段的剪应力分布见图 3。

(4) 压力分散型。压力分散型与压力型的区别是，在锚固段

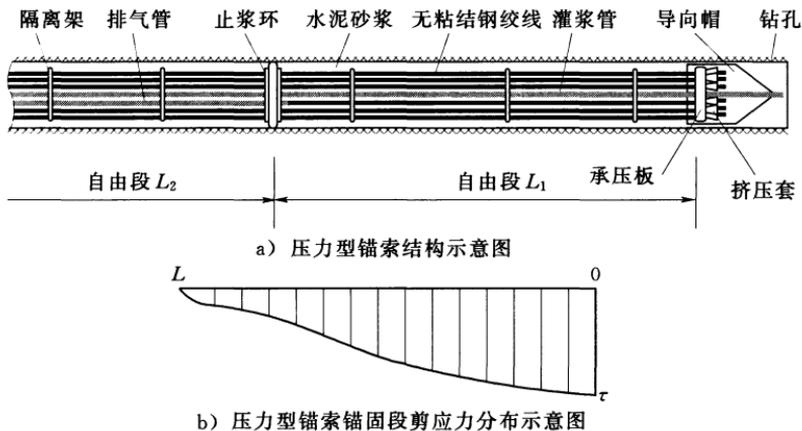


图 3 压力型锚索构造示意图

的不同位置中设置若干个承压板，将锚索孔底端一个承压板的压力分散于若干个承压板上，这种型式的预应力锚索中的各股钢绞线的长度是不等长的，而且其钢绞线必须采用无粘结钢绞线。这种锚索的最大优点是锚固段的剪应力分布更加均匀，可以最大限度地发挥锚固段的承载能力，多用于锚固深度较深、施加的预应力吨位较高的预应力锚索。压力分散型锚索结构及锚固段的剪应力分布见图 4。

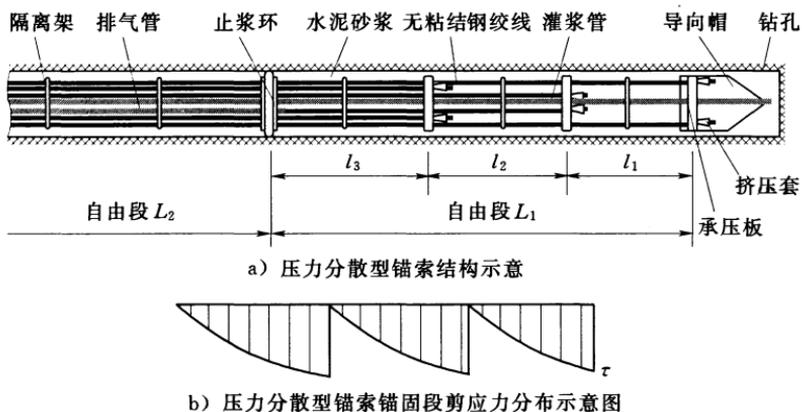


图 4 压力分散型锚索结构示意图

(5) 拉压复合型。拉压复合型预应力锚索锚固段由拉力型钢绞线束与压力型钢绞线束编制而成，使拉应力和压应力在锚固段内相互叠加，使得锚固体内应力及周边岩体间的粘结摩阻力均匀分布，可大幅度降低应力峰值。拉压复合型锚索结构及锚固段的剪应力分布见图 5。四川省瀑布沟水电站和紫坪铺水电站使用了 3000kN 级拉压复合型锚索，这种锚索锚固段结构见图 6。

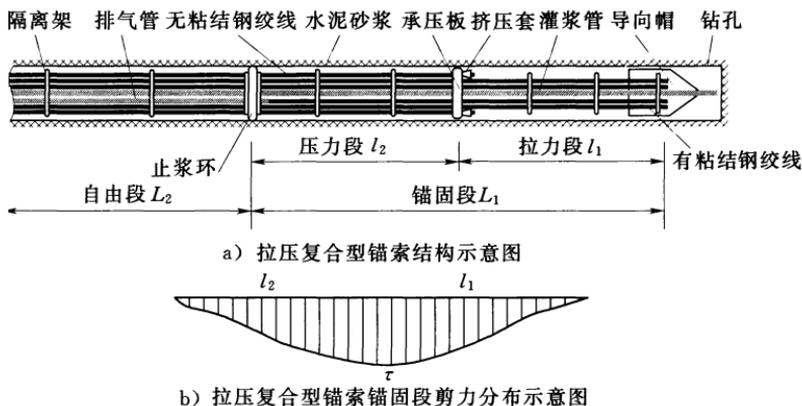


图 5 拉压复合型锚索锚固段结构示意图

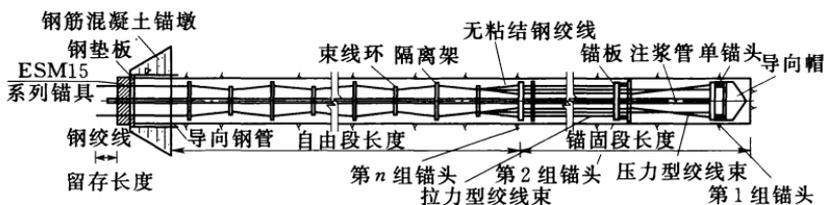


图 6 自由式拉压复合型预应力锚索结构示意图

随着锚固技术的迅猛发展，其应用领域和应用数量都有较大增加，新型锚索不断问世，选择锚索体形式时一定要充分考虑锚索型式的特点、单根锚索设计张拉力大小、锚索长度、施工条件和锚固介质的条件，经综合比较选定。

4.1.2 预应力锚索的锚固段、自由段、锚头及各种连接部件按

等强度原则设计是基本设计原则，也是最经济的设计方法，主要是为了保证预应力锚索的各个部件都具有相等的强度和寿命。

4.1.3 锚索的锚固段是提供锚固力的部位，锚固段的长度决定了锚索提供锚固力的大小，其长度可由计算确定；自由段是靠锚索材料的弹性变形形成锚固力的部件，其长度可由不稳定体位置或结构物尺寸决定；锚头是实现张拉和锁定及保持预应力的装置，锚头各部件的高度决定了锚头所需要的材料长度。预应力锚索的总长度是锚固段、自由段、锚头及外露的预留长度之和。

4.1.4 在预应力锚索中拉力型和压力型的各股钢丝和钢绞线是等长的，而拉力分散型和压力分散型锚索为改善锚固段的应力分布，充分发挥各股钢丝或钢绞线与胶结材料的粘结力，分别在不同部位将钢丝或钢绞线与胶结材料胶结，所以同一根锚索中钢丝或钢绞线长度是不一致的，分散的级数越多，不同长度钢丝或钢绞线分级也越多，所以必须专门进行设计，按分散的单元数计算所需锚固段长度。

4.1.5 由于胶结式锚索具有良好的防腐蚀功能，且具有较高的承载能力，再加上近几年来早强型外加剂的出现，实现迅速锚固已不是问题，所以在永久性锚固工程中具有非常明显的优点，得到了广泛采用。

由于机械式锚索可实现迅速张拉的特殊优点，因此也还有一定的应用场合，但选择此种锚索时一定要注意被锚固介质的地质条件和设计张拉力不要超过 1000kN。当设计张拉力大于 1000kN 时，宜选择胶结式锚固段锚索。

4.1.6 锚索的锚固力是靠胶结材料与孔壁的摩阻力来实现的，当锚索设计张拉力较高时，需要的胶结长度较长，但是当采用拉力型或压力型锚索时，锚固段过长，对提高锚索的锚固力并不明显，国际预应力锚固协会编制的实用规范（FIP）也注意到这一问题，并规定锚固段不宜超过 10m。

当计算的锚固段长度大于 10m 时，应采用改善锚固段结构或采用拉力分散型、压力分散型或拉压复合型预应力锚索，这样

可以保证锚固段均匀受力，大大地提高锚索的设计张拉力。

4.1.7 虽然我国预应力锚索材料近年来发展较为迅速，种类也比较多，但在水利工程中最广泛应用的还是高强预应力钢绞线。有粘结钢绞线使用方便、造价低，同水泥浆或水泥砂浆有良好的胶结，只要保护层厚度满足要求，防腐性能是可以得到保证的。

近几年来，无粘结钢绞线使用也较多，特别是对抗腐蚀要求较高、观测性预应力锚索或被锚固介质压缩变形较大需要进行补偿张拉时，使用无粘结钢绞线优点突出。

高强螺纹钢筋刚度大，又可承担一定剪力，多用于岩壁吊车梁的锚固。

对岩体较为破碎，成孔难度较大的部位，使用自钻式预应力锚杆也是一种非常好的选择，这种材料多用于边坡加固工程。

4.2 锚索体设计

4.2.1 锚索体的结构较为复杂，由于预应力锚固技术的不断发展，锚索的类型也由单一的拉力型发展为拉力分散型、压力型、压力分散型和拉压复合型，各种类型的锚索结构是不同的，也有不同的适用条件。因此，锚索体的结构设计十分重要，不仅应合理地选择锚索材料、计算需要的锚固力、合理地确定设计张拉力和锚索类型，而且还应根据地质条件、锚索重要程度做好防护设计。

4.2.2 预应力锚索钢材强度利用系数问题是预应力锚索设计中最为关键的问题，SL 212—98 第 4.2.7 条规定，在设计张拉力作用下的钢材强度利用系数为 0.6~0.65；第 4.4.1 条规定，对岩体中布置的锚索（包括边坡和地下工程），施加设计张拉力时，锚索中各股钢丝或钢绞线的平均应力不应大于钢材极限抗拉强度的 60%（即钢材强度利用系数为 0.6）；第 4.4.2 条规定，对于水工建筑物中布置的锚索，施加设计张拉力时，锚索中各股钢丝或钢绞线的平均应力不应大于钢材极限抗拉强度的 65%（即钢材强度利用系数为 0.65）。本标准本次修订时，共统计了 127 个

锚固工程的钢材强度利用系数的采用情况，其中可以收集到或根据设计张拉力和采用的锚固材料数量分析，共有 92 个工程可以查找出钢材强度利用系数指标。经统计、分析，34 个边坡锚固工程平均强度利用系数为 0.60；16 个坝基和坝体加固工程平均强度利用系数为 0.61；9 个地下厂房加固工程平均强度利用系数为 0.53；31 个预应力闸墩平均强度利用系数为 0.67；2 个水工隧洞混凝土衬砌环形锚索材料强度利用系数均采用 0.75。已建工程锚索材料强度利用系数采用情况见表 2。

表 2 已建工程锚索材料强度利用系数采用情况表

加固项目	统计工程数量	平均强度利用系数	工程采用的最大值	工程采用的最小值	说 明
边坡锚固	34	0.599	0.65	0.51	收集 43 个工程资料，可以分析计算有强度采用系数的工程 34 个
坝基、坝体加固	16	0.612	0.69	0.38	—
地下建筑物加固	9	0.529	0.57	0.48	—
预应力闸墩加固	31	0.665	0.705	0.57	—
水工隧洞环形锚索	2	0.75	0.75	0.75	—

根据大量的工程资料，本标准本次修订仍保留了“采用预应力钢丝或钢绞线做锚索体时，钢材强度利用系数不宜大于材料抗拉强度标准值的 60%；采用高强螺纹钢筋或高强中空自钻式杆材时，钢材强度利用系数不宜大于材料抗拉强度标准值的 65%”的规定。

钢材强度利用系数不宜过高，不宜大于 60% 的规定主要原因有以下三点：

(1) 由于锚索均由多股钢丝和钢绞线组成，尤其是高吨位锚索，数十股钢绞线张拉时，其各股钢丝或钢绞线受力是不均匀的，编制 SL 212—98 时统计了吉林省白山、丰满、黑龙江省镜

泊湖和河南省黄河小浪底等 4 个工程所使用的锚索，各股钢绞线的受力不均匀系数为 0.4~1.67，本次又加入了三峡水利枢纽预应力锚索的观测结果，1000kN 级预应力锚索受力不均匀系数为 0.91~1.09，3000kN 级为 0.84~1.16。

(2) 锚索受力较大，在长期高应力状态下工作的锚索，有应力腐蚀的可能。

(3) 边坡、地下工程加固中，因受地质条件的影响，不可见的因素较多，锚索受力条件具有不确定性，必须留有一定的安全裕度。

在预应力锚索的设计中，选择锚索材料的强度利用系数时要注意以下三个问题：

(1) 被锚固介质的稳定状况，当遇围岩有较大变形或受分部开挖影响变形增加较大时，应考虑降低材料强度利用系数。

(2) 当被锚固介质中存在腐蚀性物质时，也应采用较小的强度利用系数。

(3) 当采用压力分散型、拉力分散型预应力锚索时，由于锚索中钢绞线的长度不一致，锚索锁定后，短的锚索在同样变形条件下受力较大，长的受力小些，因此要处理好强度利用系数采用值。

4.2.3 围岩加固后，被加固的岩体或结构物仍然会发生较大变形，这主要和地质条件有关，锚固设计时应认真分析地质资料，预测可能发生位移的量值。如果加固后可能产生的位移值较大，势必增加锚索材料的应力，锚索越短适应变形能力越小，为了确保预应力锚索的安全使用，应预留较大的安全裕度，此时应降低锚索材料的强度利用系数。

4.2.4~4.2.6 隔离架的作用是保证锚索安装后顺直，不交叉、不弯曲、不与孔壁接触，以减少摩擦损失，陡倾角布置的锚索隔离架的间距可大些，水平或缓倾角布置的锚索，隔离架间距应小些。

隔离架一般用钢板制作，也可以用硬质塑料制作，厚度不宜

小于 10mm，目的是保证张拉时不损坏隔离架。隔离架设计时，不仅应满足穿索需要，还应预留灌浆管通道，保证注浆顺利。

4.2.7 为了有效地做好预应力锚索的防护，必须保证预应力钢绞线有 20mm 以上的保护层厚度。

4.3 锚固段的结构设计

4.3.1 锚固段长度，目前多数工程仍采用公式 (4.3.1-1) 进行计算确定，但此公式是在假定胶结材料沿孔壁的摩阻力和钢材与胶结材料的握裹力均匀分布的条件下进行计算的，而实际上，胶结材料沿孔壁的摩阻力与钢材和胶结材料的握裹力分布是不均匀的，且沿孔壁呈倒三角形分布，即锚固段上端大，并向孔底逐渐衰减，至孔底其数值已很小。该公式的计算结果是控制性的，只要参数选择合理，是可以作为设计使用的。

4.3.2 因为锚固段胶结材料与孔壁的摩阻力分布近似呈倒三角形，且沿孔壁衰减，至孔底其摩阻力已经很小，锚固段越长，摩阻力衰减越大，所以锚固段加长，锚固力提高值越不明显，从经济角度出发，靠增加锚固段长度来提高锚固力十分不经济，为此锚固段不宜过长。国际预应力锚固协会编制的实用规范 (FIP) 规定锚固段长度不宜超过 10m。

为了提高锚固段的锚固效果，锚固段部位孔壁尽可能粗糙，以提高胶结材料与孔壁的粘结强度。经分析比较也可采用拉力分散型或压力分散型锚索。

4.3.3 水泥浆或水泥砂浆不仅有良好的胶结性能，而且对锚索有较好的防护性能，为了保证胶结材料发挥最佳的锚固效果，胶结材料强度应根据围岩条件确定，围岩较完整、强度较高时，可选择高强度等级的水泥砂浆；围岩较破碎、强度较低时，水泥砂浆强度等级不宜过高。对锚固段注浆体既要保证其强度与围岩条件相适应，又要保证注浆密实。在水泥砂浆配比中加入适量减水剂、膨胀剂，有助于提高砂浆强度和密实性。

4.3.4 拉力分散型或压力分散型锚索的设计张拉力是分散在每

个锚固单元的，划分的锚固单元级数越多，锚固段受力越均匀，但级数越多，锚固段的结构越复杂，所以应认真做好锚固段的结构设计，合理确定每个锚固单元的承载能力，并保证整根锚索的总锚固力达到设计要求。

4.3.5 压力型和压力分散型锚索是靠端头的承压板和挤压套将锚固段的注浆体由受拉改变为受压的，这个承压板和挤压套承受分散给它的设计荷载，这个构件很重要，已有锚具生产厂家专门制造，尽可能地采用定型产品，以确保锚索工程的质量。

4.4 锚头的结构设计

4.4.1~4.4.4 锚头组成部件较多，主要有锚墩、孔口承压板、工作锚和工具锚等。锚墩和孔口承压板的作用是平整孔口起伏不平的岩体，使锚索同轴受力，保证施加的预应力均匀地传递至岩体；工具锚的作用是实现张拉的设备，由锚板和夹片组成，保证张拉千斤顶进行张拉时各股钢丝或钢绞线均匀伸长和受力；工作锚是预应力锚索形成永久存在的预应力的部件，它负责锚索锁定后的预应力保持；工具锚中的限位板的作用是保证锁定时钢丝和钢绞线回缩量不大于5mm的部件。无论是张拉力的施加和张拉力的锁定，其质量均与工具锚和工作锚的锚夹具质量有关，所以要求两种锚具硬度适中，张拉时不损伤钢丝或钢绞线，锁定时回缩量不大于5mm。目前我国生产的锚夹具已具有国际先进水平。完全能满足本标准4.4.3条和4.4.4条的规定。

4.4.5、4.4.6 孔口锚墩是传递张拉力的混凝土或钢筋混凝土构件，一般做成梯形，顶部尺寸应根据张拉设备尺寸确定；锚墩底部尺寸和接触部位的岩体质量有关，当孔口岩体破碎、承载力低时，锚墩底部尺寸应大些；当孔口岩体质量较好、承载能力大时，锚墩底部尺寸可小些。由于施加的锚固力较大，所以要求锚墩混凝土强度等级不低于C30，必要时配筋。当锚固工程在负

温条件下工作时，锚墩混凝土还应有抗冻要求。

锚墩承压面上一定要设置钢质承压板，厚度与张拉荷载有关，张拉力大，承压板应厚；张拉力小可薄些，但不宜小于20mm。承压板表面应平整光洁，保证锚墩均匀传递张拉应力。

4.5 预应力锚索的防护设计

4.5.1 预应力锚索接触的介质为岩体或土体，在岩体和土体中多含地下水，其成分千差万别，相当一部分地下水含有对钢材具有腐蚀性的物质。此外，预应力锚索施加张拉力后，预应力材料处于高应力状态下。在含腐蚀物质环境和高应力状态下，预应力锚索极易腐蚀，从而降低了锚索的使用寿命，所以锚索的防腐是十分重要的。

预应力锚索的腐蚀类型主要有化学腐蚀、应力腐蚀和静电腐蚀等，这些类型腐蚀的防护，应根据工程的重要程度，被锚固区域的地下水性质和锚固力的大小确定防护措施，做好防护设计。

4.5.2 锚固区内环境对预应力锚索的腐蚀不仅应考虑对胶结材料的腐蚀，还应考虑对预应力钢材的腐蚀。对上述两种材料的腐蚀程度可划分为弱腐蚀、中等腐蚀和强腐蚀。

腐蚀程度的制定可参照以下规范的有关规定判别。

(1)《水力发电工程地质勘察规范》(GB 50287—2006)附录 I 中规定的环境水对混凝土腐蚀程度分级见表 3，环境水腐蚀性的判定标准见表 4。

表 3 环境水对混凝土腐蚀程度分级

腐蚀程度	一年内腐蚀区混凝土的强度降低 F (%)	腐蚀的表面特征
无腐蚀	0	—
弱腐蚀	$F < 5$	材料表面略有损坏
中等腐蚀	$5 \leq F < 20$	侧壁表面有明显隆起、剥落
强腐蚀	$F \geq 20$	材料有明显破坏(严重裂开、掉小块)

表 4 环境水腐蚀性的判定标准表

腐蚀性类型		腐蚀性特征判定依据	腐蚀程度	界限指标	
分解类	溶出型	HCO_3^- 含量 (mmol/L)	无腐蚀	$\text{HCO}_3^- > 1.07$	
			弱腐蚀	$1.07 \geq \text{HCO}_3^- > 0.70$	
			中等腐蚀	$\text{HCO}_3^- \leq 0.70$	
			强腐蚀	—	
	一般酸性型	pH 值	无腐蚀	$\text{pH} > 6.5$	
			弱腐蚀	$6.5 \geq \text{pH} > 6.0$	
			中等腐蚀	$6.0 \geq \text{pH} > 5.5$	
			强腐蚀	$\text{pH} \leq 5.5$	
	碳酸型	游离 CO_2 含量 (mg/L)	无腐蚀	$\text{CO}_2 < 15$	
			弱腐蚀	$15 \leq \text{CO}_2 < 30$	
			中等腐蚀	$30 \leq \text{CO}_2 < 60$	
			强腐蚀	$\text{CO}_2 \geq 60$	
分解结晶复合类	硫酸镁型	Mg^{2+} 含量 (mg/L)	无腐蚀	$\text{Mg}^{2+} < 1000$	
			弱腐蚀	$1000 \leq \text{Mg}^{2+} < 1500$	
			中等腐蚀	$1500 \leq \text{Mg}^{2+} < 2000$	
			强腐蚀	$\text{Mg}^{2+} \geq 2000$	
结晶类	硫酸盐型	SO_4^{2-} 含量 (mg/L)	—	普通水泥	抗硫水泥
			无腐蚀	$\text{SO}_4^{2-} < 250$	$\text{SO}_4^{2-} < 3000$
			弱腐蚀	$250 \leq \text{SO}_4^{2-} < 400$	$3000 \leq \text{SO}_4^{2-} < 4000$
			中等腐蚀	$400 \leq \text{SO}_4^{2-} < 500$	$4000 \leq \text{SO}_4^{2-} < 5000$
			强腐蚀	$\text{SO}_4^{2-} \geq 500$	$\text{SO}_4^{2-} \geq 5000$

(2) 《岩土工程勘察规范》(GB 50021—2001) 第 12 章, 水和土腐蚀性评价中水对钢筋混凝土结构中钢筋的腐蚀、水对钢结构的腐蚀和土对钢结构腐蚀的评价指标分别见表 5~表 7。

表 5 水对钢筋混凝土结构中钢筋的腐蚀性评价表

腐蚀等级	水中的 Cl ⁻ 含量 (mg/L)		水中的 Cl ⁻ 含量 (mg/L)	
	长期浸水	干湿交替	$\omega < 20\%$ 的土层	$\omega \geq 20\%$ 的土层
弱	>5000	100~500	400~750	250~500
中	—	500~5000	750~7500	500~5000
强	—	>5000	>7500	>5000

注：当水或土中同时存在氯化物和硫酸盐时，表中的 Cl⁻ 含量是指氯化物中的 Cl⁻ 与硫酸盐折算后的 Cl⁻ 之和，即 Cl⁻ 含量 = Cl⁻ + SO₄²⁻ × 0.25。单位分别为 mg/L 和 mg/kg。

表 6 水对钢结构腐蚀性评价表

腐蚀等级	pH 值, (Cl ⁻ + SO ₄ ²⁻) 含量 (mg/L)
弱	pH=3~11, (Cl ⁻ + SO ₄ ²⁻) < 500
中	pH=3~11, (Cl ⁻ + SO ₄ ²⁻) ≥ 500
强	pH=<3 (Cl ⁻ + SO ₄ ²⁻) 任何浓度

注 1：表中系指氧能自由溶入的水和地下水；
 注 2：本表亦适用于钢管道；
 注 3：如水的沉淀物中有褐色絮状物沉淀（铁）、悬浮物中有褐色生物膜、绿色丛块，或有硫化氢臭，应作铁细菌、硫酸盐还原细菌的检查，查明有无细菌腐蚀。

表 7 土对钢结构腐蚀性评价表

腐蚀等级	pH 值	氧化还原电位 (mV)	电阻率 (Ω·m)	极化电流密度 (mA/cm ²)	质量损失 (g)
弱	4.5~5.5	>200	>100	<0.05	<1
中	3.5~4.5	100~200	50~100	0.05~0.20	1~2
强	<3.5	<100	<50	>0.20	>2

在锚固设计之前，如果将地下水和岩土中表 3~表 7 所列腐蚀性物质含量测定后，就可对被锚固介质的腐蚀程度进行认定，然后再按本标准 4.5.2 条的规定进行预应力锚索的防护设计。

4.5.3 根据已建工程经验，当锚固区地下水发育且具有腐蚀性时，最有效的办法就是在锚固之前对围岩进行固结灌浆，减少锚

固区域围岩的透水性，例如，安徽省梅山水库大坝基础加固、湖南省双牌水电站坝基加固和陕西省石泉水库大坝加固等工程均在锚索施工前进行了固结灌浆处理，有效地减轻了对预应力锚索的腐蚀。

4.5.4~4.5.7 无粘结预应力钢绞线是专门生产的防腐型预应力材料，它首先在钢丝或钢绞线表面喷涂一层防腐材料，外层加设塑料套管，钢丝或钢绞线之间充满防腐油；无粘结预应力锚索基本结构见图7，锚索包裹材料厚度见表8。

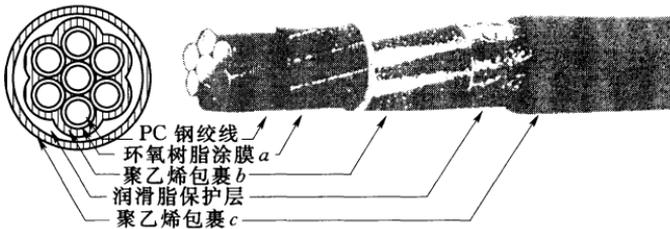


图7 无粘结预应力锚索基本结构图

表8 锚索包裹材料厚度表

锚杆材料	标准外径 (mm)	涂膜式包裹厚度 (mm)			标准润滑脂涂敷量 (g/m)
		a	b	c	
7股钢丝绞合	20.0	0.1	0.6	1.0	36

注：表中 a 为环氧树脂涂膜，b、c 均为聚乙烯包裹层

当环境中存在钠、钙、镁离子、碳酸盐、硝酸盐、亚硫酸盐、硫氰酸盐或氯离子等化学物质时，具有产生电化学腐蚀的条件，再加上预应力锚索的拉应力较大，会加速腐蚀过程，所以规定预应力锚索做防腐、防锈处理时，硝酸盐、亚硫酸盐、硫氰酸盐及水泥中的氯离子含量应控制在 0.02% 以内。无粘结钢绞线所使用的防腐材料应满足本标准 3.2.3 条的规定。

4.5.8 在地下工程或水工建筑物的某些区域总是不同程度地存在一些杂散电流。杂散电流容易引起电化学反应，加速预应力锚

索的腐蚀。

为防止杂散电流对锚索的腐蚀，不能使用与锚索体不同成分的金属做部件，在可能有杂散电流的区域设置阴极防护措施，即在钢绞线表面提供足够的电子，不失去电子就不会腐蚀。阴极防护方法有两种：一种是外加电流（直流）法；另一种是在钢绞线上连接活性金属。也可以采取引和排除杂散电流的各种接地电线保护等措施，防止电化学腐蚀的发生。

4.5.9 预应力锚索张拉完成后及时注浆，并适时封闭锚头的主要目的是为了加强防护、防止钢绞线和锚具的锈蚀。

4.5.10 无粘结锚索锚头的防护往往容易被忽视，有些工程锚固完成后，锚头长期裸露，这是十分有害的，不仅锚头容易腐蚀，同时也不利于预应力的保持。为此，应及时进行保护，其措施主要有涂防腐剂、混凝土或喷射混凝土包封，其包封厚度不应小于100mm；也可采用保护罩封闭，但盒内应充满防护油脂，且保证封闭严密。

4.6 张拉程序设计

4.6.1 按10%的设计张拉力实施预张拉是保证预应力锚索正式张拉时各股钢丝或钢绞线在相同长度条件下，同时起步施加张拉力，是保证各股钢丝或钢绞线应力均匀的重要措施。实施预张拉可采用小型张拉千斤顶逐股钢丝或钢绞线进行，并逐股锁定。

4.6.2 实施超张拉，是考虑了钢绞线回缩，锚夹具压缩等产生的预应力损失，是保证预应力锚索锁定后能够保存设计所需要的设计张拉力值。一般情况下规范允许的回缩量为5mm，按设计张拉力的110%施加超张拉力可以满足锚索锁定后达到设计张拉力的要求，但如果预应力锚索较长，锚夹具质量不好时，可能造成的锁定损失较大，此时可适当提高超张拉力，但不宜超过115%。

4.6.3 分级施加张拉力和每级张拉力持荷5min，是为了预应力钢丝或钢绞线的变形较均匀和充分，有时间进行自行调整。每级

荷载施加后，测定钢丝或钢绞线的实际伸长值是便于分析预应力锚索的实际受力情况，分析确定实际施加的预应力的的大小，这是每根锚索施加张力时必须做的，而且应准确记录。

有些时候由于张拉设备本身存在一定的摩阻力，实测出力会存在一定误差，所以确定每根预应力锚索的实际张拉力时，钢绞线的实际伸长值应与张拉设备的出力联合进行综合分析才能准确地确定锚索的实际锚固力。

对于锚索数量较多的锚固工程，张拉程序应专门设计，其设计内容包括张拉顺序、每根锚索首次张拉的张拉力、张拉次数，以避免某根锚索张拉时应力集中，对加固对象造成损害。

4.6.4 膨胀性岩体和岩爆发生部位，围岩变形有特殊的变化规律。膨胀性岩层由于组成物质不同，膨胀力、膨胀变形均不同；岩爆地区由于岩体初始应力大小不同，释放的规律也不同。这些特殊问题一般是通过原位监测结果进行分析，确定时、空变形规律后，再根据这些监测结果因地制宜地确定锚索的张拉程序。

5 边坡锚固设计

5.1 岩质边坡锚固

5.1.1 在水利水电工程建设中，几乎所有的工程均会遇到岩质边坡不稳定问题，这些不稳定边坡可能是自然边坡，也可能是人工开挖的边坡。对不稳定边坡的加固方法很多，有的采用支撑结构，有的采用抗滑桩，有的采用锚固洞，也有的采用锚杆或预应力锚索，为了减少不稳定边坡的下滑力，也有的工程采用削坡减压等措施。随着预应力锚固技术的发展，采用以预应力锚索为主的综合加固方法是最为有效的工程措施，不仅施工方便、经济，最主要的是可以充分利用不稳定块体的阻滑作用，提高滑动面的摩擦阻参数，是一种主动的加固方法，也是一种对围岩扰动小、最有利于环境保护的加固措施，所以对边坡采用预应力锚索加固在工程中得到了广泛和大量的应用。

为了系统地总结采用预应力锚索对不稳定边坡的加固经验，在修订 SL 212—98 时，收集了近 50 座水利水电工程边坡锚固的工程实例，其中应用吨位较大、预应力锚索数量较多、锚索长度较长的工程：如龙滩水电站高边坡预应力锚索设计张拉力 3000kN，数量达 3000 根；漫湾水电站边坡预应力锚索最大设计张拉力 3000kN，锚索总根数 2168 根；三峡水电站船闸高边坡及中隔墩，最大设计张拉力 3000kN，锚索总根数为 2113 根；锦屏一级水电站预应力锚索最大设计张拉力达 5000kN，总根数 3800 根，单根锚索最长达 120m；小湾水电站边坡锚索最大设计张拉力 6000kN，锚索总根数 1662 根，单根锚索长度为 80m 等。可见在边坡加固中，预应力锚索是非常重要的且经常采用的加固措施。

关于采用预应力锚索加固后的边坡稳定安全系数，因为《水利水电工程边坡设计规范》(SL 386—2007) 已于 2007 年 10 月

14 日开始实施，本次修订 SL 212—98 时，建议采用 SL 386—2007 第 3.4.2 条的规定，见表 9。

表 9 边坡加固后抗滑稳定安全系数标准表

运用条件	边坡级别				
	1	2	3	4	5
正常运用条件	1.30~1.25	1.25~1.20	1.20~1.15	1.15~1.10	1.10~1.05
非常运用条件 I	1.25~1.20	1.20~1.15	1.15~1.10	1.10~1.05	
非常运用条件 II	1.15~1.10	1.10~1.05		1.05~1.00	

SL 386—207 第 3.4.2 条还规定“经论证破坏后给社会、经济和环境带来重大影响的 1 级边坡，在正常运用条件下的抗滑稳定安全系数可取 1.30~1.50。但是，也有些重要工程或特殊部位布置的预应力锚索（如高拱坝的坝肩）一旦因安全储备不足而使边坡失稳，将造成不可估量的重大损失。经过论证后，应采用大于 1.5 的安全系数进行稳定分析，以增大安全储备，确保被加固的边坡安全。

关于抗滑稳定安全系数标准的具体应用还应遵守 SL 386—2007 第 3.4.3 条、第 3.4.4 条和第 3.4.5 条的规定。

5.1.2 边坡加固的预应力锚索布置与边坡失稳的总下滑力、软弱结构面的位置及单根预应力锚索的设计锚固力有关，应通过计算比较，确定其布置。

一般情况下，预应力锚索的总长度为其计算确定的锚固段长度、自由段长度（即岩面至滑动面的距离）和锚头段长度之和。对单根锚索来讲，由于拉力型、压力型预应力锚索，各股钢丝或钢绞线的长度是一致的，但压力分散型、拉力分散型预应力锚索各股钢丝或钢绞线由于锚固段的锚固位置不同，钢丝或钢绞线是不等长的。对各根锚索而言，由于滑动面的位置不同，各根锚索长度也可能是不一致的，所以各根锚索的长度应根据软弱结构面的位置、产状等，进行计算确定。

5.1.3 关于预应力锚索的间、排距，本标准建议为 3~6m，是

从对被锚固介质或不稳定岩体提供均匀的锚固力提出的，在实际设计时，应根据锚索数量，设计张拉力大小及总锚固力综合计算确定。

5.1.4 本条有关预应力锚索最优锚固角度的确定方法为保留条款。在边坡锚固设计中，预应力锚索布置方向是一个至关重要的问题。最有效的布置方向为逆滑动方向布置。但由于受施工条件、滑动体的边界条件限制，只能以一定的角度布置，所以必须经过综合比较，选择最优的锚固方向，以达到最有效的加固效果（见图8）。

图8中， φ 为锚索与滑动面的夹角； β 为锚索与水平面的夹角； α 为滑动面的倾角，它们有如下关系：

$$\alpha = \varphi \pm \beta$$

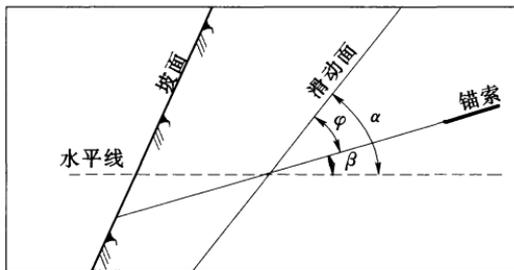


图8 最优锚固角

由图8可知，由锚索提供的抗力为：

$$P_{抗} = P \sin \varphi \tan \phi + P \cos \varphi$$

式中 ϕ ——滑动面上的摩擦角。

当 $\varphi = \phi$ 时，可得最大抗滑力为 $P_{抗max} = P / \cos \phi$ ，但此时锚索最长，不经济。综合比较后，当 $\varphi_{优} = 45^\circ + \varphi / 2$ 时，得到最优的锚固角度，因此最优的锚固角应为：

$$\beta_{优} = \alpha - \left(45^\circ + \frac{\phi}{2} \right)$$

但有些时候，也不可能按最优锚固角进行布置，此时可对锚固角进行适当调整，但必须保证提供较好的锚固效果。

当确定的最优锚固角度为 $-10^{\circ} < \beta < +10^{\circ}$ 时，锚索的注浆不易密实，因而会影响锚固的效果，因此需要调整至 $\beta \leq -10^{\circ}$ 或 $\beta \geq +10^{\circ}$ 。

5.1.5 当孔口岩体较为破碎或风化较为严重，锚墩受力较大时，岩体会产生较大的压缩变形，以及会由于岩体流变性较大，因而造成预应力损失加大，因此需要加大锚墩与围岩的接触面积，以减少接触压力。

5.1.6 在岩质边坡锚固设计中，排水是十分重要的问题。许多边坡的失稳，往往是由于水的浸入，削弱了结构面的强度，造成阻滑力减小。所以，无论采取哪种加固方案，都要首先解决排水问题。岩质边坡顶部的水应截住，使之不进入滑动面或被锚固体，同时结构面中或边坡中的水应设法尽快排出。施工用水也应有排放规划，设置固定的排水通道。

5.2 土质边坡锚固

5.2.1 土质边坡的稳定问题是工程设计中经常遇到的问题，尤其是在科学技术发展的今天，为保护环境、维护原生态，在工程建设中对不稳定土质边坡往往不采用大开挖和深削坡的工程措施，而采用挡墙加预应力锚索或抗滑桩加预应力锚索的综合性加固措施。

土质边坡一般为天然边坡，不稳定边坡的滑动是由于土体的抗剪强度较小，其滑动面一般呈圆弧形，进行稳定分析时可采用 SL 386—2007 第 5.2.7 条推荐的简化毕肖普（Simplified Bishop）法和摩根斯顿-普赖斯（Morgenstern-Price）法进行抗滑稳定分析计算；当滑动面呈非圆弧形时，宜采用摩根斯顿-普赖斯法和不平衡推力法进行抗滑稳定计算。对不稳定块体施加预应力后，其边坡稳定安全系数应符合 SL 386—2007 第 3.4.2 条的规定。

5.2.2 土体不稳定边坡往往会发生在岩体和土体的结合面的情况，此时锚固段应设置于岩体中，但应考虑结合面处岩体可能风

化较严重，其力学参数可能较低，锚固段应适当加深，使锚索锚固于完整、稳定的岩体中。

5.2.3 当不稳定边坡的滑动面在土体之中时，锚固段应设置在稳定的土体中，因土体本身力学指标较低，胶结材料与土体的粘结力不大，锚固段提供的锚固力有限，当需要预应力锚索提供较高锚固力时，应适当扩大锚索孔直径，或采用压力分散型锚索，也可将锚固段的不同部位局部扩大使锚固段呈“糖葫芦状”，以提高锚固段的承载能力。江苏省镇江市五峰山跨越长江的50万伏高压输电铁塔所在的五峰山山体，其土质边坡锚固就采用了这种做法，从而提高了预应力锚索的张拉力。

5.2.4 土质边坡加固同岩质边坡加固一样，也有最优锚固角的问题，最优锚固角度可按本标准5.1.4条规定选取。

5.2.5 土体中锚索的隔离架加密布置是防止锚索与土体接触，加强锚索防护的措施。

5.2.6 土体中锚索的锚墩置于土层上，土的压缩系数较大，为了提高锚头的锚固效果，设置混凝土锚墩是十分重要的。各根锚索的锚墩与纵横交叉的混凝土格梁相连，是为了加强锚固效果的整体性。

5.2.7 土质边坡顶部的截水、排水非常重要，是保证被加固土质边坡稳定的措施之一。

6 地下洞室锚固设计

6.1 地下洞室锚固

6.1.1 地下水工建筑物包括隧洞、地下厂房及与地下厂房相关的洞室群，采用预应力锚索加固不稳定岩体往往是最经济的方案。特别是大型地下厂房，采用预应力锚索系统加固边墙非常普遍，而且布置的预应力锚索非常多。例如金沙江下游的溪洛渡地下厂房开挖跨度 32m，最大开挖高度 75.1m，连同主变室和尾水洞室共布置 1500kN 和 1750kN 级预应力锚索共 5716 根；青海省的拉西瓦水电站地下厂房布置 1500kN 和 2000kN 级预应力锚索共 1500 根；云南省的大朝山水电站地下厂房布置 1600kN 级预应力锚索 1117 根；河南省的黄河小浪底地下厂房顶拱布置 1500kN 级预应力锚索 325 根。

大型地下洞室采用预应力锚索加固的同时，相邻锚索之间还布置了长锚杆及采用喷射混凝土对围岩加固。

地下洞室开挖后，由于应力重新分布形成的一定范围的塑性区、压剪破坏区可通过有限元法进行分析；由软弱结构面形成的下滑体和坍落体可通过极限平衡法计算。

对地下工程围岩的稳定分析应遵守《水电站厂房设计规范》(SL 266—2001) 第 5.2.3 条的规定。

6.1.2 地下洞室的塑性区和压剪破坏区是由洞室开挖后在岩体初始应力作用下，由于应力重新分布而产生的，在塑性区和压剪破坏区的岩体中拉应力可能超限，为此需施加一定数值的预压应力，以改善岩体中的应力条件，施加预应力的范围和范围主要由岩体中拉应力大小和塑性区的范围确定。由于塑性区和压剪破坏区的分布面积较大，对这些部位的加固属于系统性加固，通常情况下，是采用以预应力锚索为主，辅以长张拉锚杆（或长砂浆锚杆）、钢筋网喷射混凝土（或钢纤维、树脂纤维喷射混凝土）等

综合的加固措施来抵制塑性变形的发生。锚索提供的支护抗力与施加的预应力大小和单根锚索的作用面积有关，张拉锚杆（或砂浆锚杆）和钢筋网喷射混凝土（或钢纤维、树脂纤维喷射混凝土）提供的支护抗力可按锚喷支护新奥法相关资料进行计算，各种加固措施提供的支护抗力之和应大于不稳定岩体所需要的最小支护抗力，并有 1.5~1.8 倍的安全储备。

6.1.3 大型地下洞室的开挖尺寸较大，目前我国在金沙江、雅砻江修建的水力发电站地下厂房开挖跨度均大于 30m，开挖高度大于 70m，又采用分部开挖，布置的预应力锚索又是开挖完一层施工一层，开挖下层时由于围岩变形的空间效应影响，上层变形加大，此时由于上层锚索已施工完成，并起到了限制上部围岩变形的作用，这就势必使锚索应力增加。如果变形增大，锚索受力也要增加，例如四川省溪洛渡水电站地下厂房边墙锚索，开挖中有的锚索应力增加了 30% 以上，为此采取了降低锁定应力的措施，以适应由变形引起的锚索应力增大。

6.1.4、6.1.5 预应力锚索应穿越塑性区，锚固段必须设置在围岩的弹性区内，才能保证加固有效。对于较短的锚索而言，锚索间距可按长度的一半考虑，但对于长锚索而言，按锚索长度的一半布置间距可能过大，根据已建工程的经验锚索间距以不小于 4m 为宜，其间可以布置数根张拉锚杆或砂浆锚杆。

为了改善锚固段的应力状况，防止锚固段在同一断面的应力集中，对系统锚索数量较多、且锚固区岩体质量较差部位，采用长短相间的布置方式。

6.1.6、6.1.7 由软弱结构面组成的不稳定块体属局部加固范围，由于软弱结构面的出露位置不同、产状不同，产生的下滑力以及与周围稳定岩体的嵌固作用是有区别的。一般来讲，对拱部的塌滑体，预应力锚索设计时应考虑全部承担塌滑部位岩体的质量；而分布于边墙的不稳定体，计算需要锚索数量及需提供的锚固力时，则应充分考虑周围稳定岩体的嵌固作用。

6.1.8 地下厂房与主变室的距离一般较近，其隔墙厚度约为 20

~30m，此处布置的锚索最好采用对穿式锚索加固其岩墙，施工较为方便、快捷，有时对穿式锚索也可双向张拉，有利于减少锚索的摩阻损失，提高锚固效果。

6.2 岩壁吊车梁锚固

6.2.1 岩壁吊车梁是采用锚杆或锚索将钢筋混凝土吊车梁锚固在地下厂房顶拱两侧预留的岩台上，吊车荷载通过钢筋混凝土吊车梁传到岩壁。采用岩壁吊车梁可缩小地下厂房的开挖跨度，及早形成起重能力，加快施工进度。我国已建和再建的地下厂房中，绝大多数采用了岩壁吊车梁，已建成的岩壁吊车梁大都做过荷载试验，在吊车荷载下实测的锚杆应力和变位都较计算值小。从运行与使用情况看，岩壁吊车梁也比较安全可靠。因此，岩壁吊车梁在水电站地下厂房或其他大跨度地下洞室中越来越被广泛地应用。例如：黄河小浪底水利枢纽地下厂房的岩壁吊车梁长度219m，最大轮压800kN，吊车梁上部布置二排间距1.0m预应力锚索，下部布置一排，设计张拉力500kN；三峡水利枢纽右岸地下厂房和云南省小湾水电站地下厂房的岩壁吊车梁均布置了500kN级预应力锚索，没有布置预应力锚索的岩壁吊车梁也都布置了长锚杆。

6.2.2 岩壁吊车梁是布置在边墙围岩稳定的基础上的，在岩壁吊车梁锚固力的计算中，经常采用的方法是刚体静力平衡法、弹塑性有限元分析法等来确定锚索或锚杆的锚固力。

岩壁吊车梁采用的安全系数十分重要，而已建的工程采用的安全系数值有着很大的差异，例如吉林省白山水电站（尾水闸室）采用的安全系数 $K=1.65$ ；云南省鲁布革水电站地下厂房采用 $K=2.0$ ；广州抽水蓄能电站一期、二期地下厂房均采用 $K=2.5$ ；挪威的Saurdal水电站采用的 $K=1.36\sim 1.64$ ；辽宁蒲石河抽水蓄能电站采用的是 $K=1.8$ 。经综合比较分析，一些专家建议：1级建筑物可采用 $K=1.65$ ，2级建筑物可采用 $K=1.5$ 。为保证吊车梁的安全运行，对于结构安全级别为1级、2

级、3级建筑物的岩壁吊车梁，安全系数可分别采用2.0、1.8及1.5。

当采用刚体平衡法确定单位梁长中预应力锚索承担的拉力后，可按本标准6.2.2条确定预应力锚索的用量。

6.2.3 用于岩壁吊车梁锚固的预应力锚杆，选用高强螺纹钢筋主要理由是：高强螺纹钢筋强度大，握裹力好，安装方便，且有一定的刚度。

6.2.4 地下厂房开挖，尤其是岩壁吊车梁部位的开挖，虽然均采用光面控制爆破，但仍然存在一定的松弛区域，松弛区的影响深度一般小于1.0m，所以吊车梁锚索（杆）的锚固长度在计算的基础上再加1.0m的松弛深度影响区。在松弛区范围的锚筋，应外包沥青或其他材料，以减少该范围的锚索（杆）与岩壁的摩阻力。这样可避免孔口附近出现较高的局部应力。这一方法还能减小施工期因下部岩石开挖，边墙围岩变形加大而引起的锚索（杆）表层局部应力的增大。

6.2.5 为使锚索较好地承受垂直方向的吊车荷载，锚索（杆）与水平线的夹角越大越好，但当夹角过大时，锚索（杆）上方的岩体过薄，不利于吊车梁的稳定，所以锚索（杆）与水平线的夹角可按设计需要布置，一般取 $15^{\circ}\sim 25^{\circ}$ 。

6.2.6 岩壁吊车梁的稳定和所受的荷载大部分是依靠布置在吊车梁中的锚索（杆）承担，由于吊车梁的轮压较大，再加上岩体变形比较复杂，为保证吊车梁的稳定，应布置一定数量的监测仪器进行观测。

7 水工建筑物锚固设计

7.1 混凝土坝锚固

7.1.1 大坝或其他水工建筑物的基础中，往往存在对坝基稳定有一定影响的软弱结构面，或者由于基础岩体软弱、破碎，使大坝或其他水工建筑物的抗滑稳定安全系数不能满足规范要求。为了增加大坝或其他水工建筑物的稳定，采用预应力锚索是经济、有效的加固措施之一。例如安徽省梅山水库大坝高 88.24m，1958 年投入运行，由于坝基存在的断层、裂隙交错切割，完整性很差，再加上缓倾角节理的存在，造成右岸坝头和坝基不稳定，经复核抗滑安全系数仅为 0.95。为此，于 1962 年采用了预应力锚索进行加固，共安装预应力锚索 110 根，施加预压应力 277140kN。加固后坝基抗滑稳定安全系数提高到 1.05，满足了大坝稳定要求，同时减少了渗漏量。在国内采用预应力锚索对坝基加固的工程还有湖南省麻石水电站支墩大头坝基础，共安装预应力锚索 99 根，施加的锚固力 220500kN；湖南省双牌水电站溢流坝下游，共安装预应力锚索 274 根，提供锚固力 893750kN；吉林省丰满水电站共安装预应力锚索 361 根，提供的总锚固力为 707250kN，还在 51 号坝段安装了 6000kN 级预应力锚索，其中部分锚索的锚固段在基础之中；云南省小湾水电站在左右两岸坝址贴角及紧邻大坝的抗力体部位布置了 462 根 6000kN 级预应力锚索；陕西省石泉水电站为消除坝踵拉应力，在 7 个非溢流坝段中共布置 29 根张拉吨位为 6000kN 级和 1 根张拉吨位为 8000kN 级预应力锚索，设计总张拉荷载 176.6MN。国外也有不少工程采用了预应力锚索对其基础进行了加固。

为满足防洪、供水或增加发电量的需要，需对已建坝体进行改造、加高。但坝体加高后，如何解决坝体抗滑稳定是一个很重要的问题。通过预应力锚索，对坝体提供足够的正应力，则是解

决坝体稳定的重要途径之一，而且也是十分经济的办法，如图 9a) 所示；由于运行或其他的原因，已修建的坝体或其他水工建筑物，出现裂缝和其他局部破坏，影响工程的安全运行，需要采取加固补强措施，应用预应力锚固技术也是非常简便可行的方法，如图 9b) 所示。

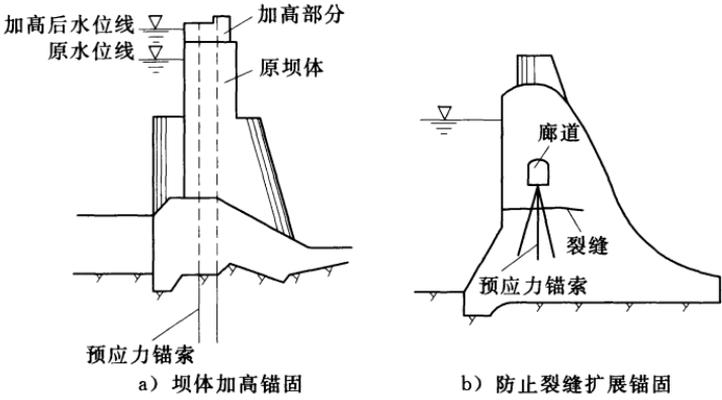


图 9 坝体加高与补强示意图

例如，吉林省丰满水电站建成于 20 世纪 40 年代，已运行近 70 年，由于设计与施工先天不足，混凝土存在渗漏、低强、抗冻标号低、整体性差等缺陷，20 世纪 80 年代对大坝进行了加固处理，除采用灌浆补强外，还采用了预应力锚固技术。预应力锚索不仅布置在坝体不同部位，还有部分锚索从坝顶或廊道伸入坝基。单根预应力锚索施加张拉力最大达 6000kN，锚索长度达 61.2m，对提高坝体稳定起到了良好的作用。国内对坝体及水工建筑物加固的还有吉林省白山水电站、辽宁省参窝水电站、河北省潘家口水电站等工程。

由于坝型不同，对基础稳定的要求是不同的，稳定性分析的方法和标准也有区别。为了使基础稳定适应相应上部结构的要求，必须采用与上部结构类型相适应的规范规定，对不稳定部位的基础进行加固。加固后，由预应力锚索提供的阻滑力计入总稳

定荷载，再校核结构物的稳定程度是否满足相应规范的要求。

对坝基施加锚固荷载，增大了坝基或坝体的正应力。为防止由于正应力的增加而引起的破坏，必须校核由锚固荷载引起的正应力增加幅度。一般情况下，原有荷载和锚固荷载之和而引起的正应力值不得大于坝基的允许应力，而坝基或坝体的拉应力也应在允许范围内，并满足相应规范的要求。

7.1.2 坝基的稳定性不足，一般情况下是由于缓倾角的结构面而引起的，倾角一般都在 20° 以内，为减少预应力锚索的数量和锚固荷载，在充分考虑方便施工和场地条件后，按照本标准 5.1.4 条的规定，选择最优的锚固角度。

7.1.3 坝基的锚固往往因为施工场地狭窄，锚索的布置受到施工场地条件的制约。在设计时应充分考虑这一因素，选择满足稳定要求、方便施工的布置型式。

当单根锚索设计张拉力大于 3000kN ，锚固段可能很长，为改善锚固段受力状况，可考虑采用拉力分散型或压力分散型锚索。

7.1.4 一般情况下，坝基加固在水下实施，有时承受的水压力还比较大，因此对锚索的防护特别重要，应按本标准 4.5.2 条规定中的 C 级标准进行防护。当地下水有腐蚀性时，应全孔进行固结灌浆，并按 D 级进行防护。

7.1.5 如果坝基软弱破碎，锚固荷载施加之前应进行固结灌浆处理，以提高锚固效果。固结灌浆的技术措施、灌浆压力选择及浆液配比选择等均应符合相应规范的要求，防止措施不当引起的附加应力增加，或降低锚固效果。

7.1.6 有些工程，由于长期运行和施工过程中存在一些薄弱环节，在高温差的反复作用下，出现了裂缝。为限制裂缝扩展，采取预应力锚固是最有效的方法之一。预应力锚索可在廊道中施工，也可在坝面施工。锚索应穿越裂缝，达到稳定部位。在锚索布置的设计中，为减小坝体的附加应力，并力求锚固力分散于坝体内，减少锚固段部位的应力集中，锚固段应错开布置。

7.1.7 一般情况下,对采用预应力锚索加固,防止裂缝扩展的工程,均要进行封闭裂缝的灌浆。如灌浆压力过大,势必会加大裂缝的宽度。为了使灌浆起到封闭裂缝的作用,一定要适度选择灌浆压力。

7.2 预应力混凝土闸墩锚固

7.2.1 随着我国国力的提高和经济的发展,兴建的大型水利水电工程越来越多,许多大型水利工程由于泄洪流量大,往往采用大跨度的弧形闸门以减少闸墩数量,增大泄洪孔口净宽以满足泄洪需要。泄洪孔口尺寸加大后,弧形闸门所承受的推力也随之加大。例如长江葛洲坝二江泄水闸弧门推力为 42000kN;福建省水口溢流表孔弧门推力为 43200kN;广西壮族自治区岩滩表孔泄洪闸弧门推力为 45394kN;云南省景洪溢流表孔弧门推力为 51200kN;陕西省喜河溢流表孔弧门推力为 53200kN;湖南省五强溪溢流表孔弧门推力为 60200kN;四川省紫兰坝潜孔泄水闸弧门推力为 60960kN;云南省大朝山泄洪排沙底孔弧门推力为 66000kN;重庆市草街冲沙闸弧门推力为 69300kN;云南省小湾放空底孔弧门推力高达 120000kN。随着弧门推力的加大,闸墩受力也随之增大,但由于溢流宽度的限制,闸墩尺寸不可能设计得过大,这就势必恶化了闸墩的应力状态。计算结果表明,支铰附近的闸墩内,由于水推力的作用,将产生 5~6MPa 的拉应力,再加上运行的要求,闸墩往往处于偏心受拉的工作状态。这一应力状态,采用常规的钢筋混凝土结构难以保证其在长期的持续荷载作用下的正常使用。为改善弧门支撑结构的应力状态,确保建筑物安全运行,便将预应力技术应用于大型弧门的钢筋混凝土闸墩上。

预应力技术应用于闸墩最早可追溯到 20 世纪 50 年代末修建的突尼斯梅列格溢洪道。比较系统、成熟的应用则要到 20 世纪 60 年代美国哥伦比亚河的瓦纳庞溢洪道工程。在我国,预应力闸墩起步较晚,但发展迅速。20 世纪 70 年代末,修建葛洲坝水

利枢纽时，首次应用了预应力闸墩结构，在大江、二江的泄水闸表孔闸墩中布置了 30 根长度为 15.4~24.0m 的主锚索，每根锚索设计张拉力为 3175kN。随后，青海省龙羊峡、云南省鲁布格革、广西壮族自治区岩滩、陕西省安康、福建省水口、湖南省五强溪、广西壮族自治区天生桥、辽宁省蒲石河、重庆市草街及云南省小湾等水利水电工程的大型弧门闸墩也采用了预应力锚索，都取得了较好的效果。近几年，我国在预应力闸墩的结构理论、设计、锚索体系与施工工艺和材料与设备等方面，均进行了更加深入的研究并取得了很大进展，在工程中也得到了进一步的提高。实践证明，在大型弧门的支撑结构中采用预应力锚索，对改善闸墩的应力状态、限制闸墩的变形、降低工程造价及保证工程安全运行是最为合理的技术措施。

锚块与闸墩和与大梁相连的颈部，以及闸墩的锚固区上游混凝土中的主拉应力，应满足 SL 191 的有关规定。混凝土支撑结构的强度及变形应满足结构及运行的要求。

弧形门的支撑结构系空间结构，在荷载作用下呈三向应力状态，加上混凝土收缩和温度作用，其应力分布比较复杂。在预应力闸墩的设计初期，往往采用全预应力设计，即钢筋混凝土闸墩中的主拉应力全部由布置的预应力锚索承担，这显然是不经济的，同时也难以保证结构任何部位都不开裂。为了节省投资，方便施工，提出了按部分预应力进行设计的思想。并从结构强度、变形、裂缝控制、运用要求、施工条件及技术经济等方面进行综合分析比较，寻求较为合理和先进的控制标准。一般情况下，混凝土拉应力不应超过混凝土轴心抗拉强度标准值的 0.7 倍，且拉应力分布范围不大；或允许闸墩混凝土出现一定的裂缝，但最大裂缝宽度不超过 0.2mm。青海省龙羊峡水电站底孔、深孔及中孔均采用了预应力闸墩，共布置预应力锚索 131 根，施加预应力总值为 486626kN。预应力闸墩采用“部分预应力设计理论”，其控制标准为：在闸墩和深梁锚固区，正常情况下，主拉应力 $\sigma_1 \leq 0.35\text{MPa}$ ；特殊情况下，主拉应力 $\sigma_2 \leq 0.70\text{MPa}$ ；在闸墩与

底板交界处, $\sigma_1 \leq 0.7\text{MPa}$, $\sigma_2 \leq 1.5\text{MPa}$; 在预应力锚固区端部, 一般不控制其应力值, 但必须采取构造措施和配置局部承压非预应力筋, 用来保证强度和控制裂缝开展宽度。

7.2.2 由于预应力闸墩中应力比较复杂, 又处于三向应力状态, 可采用结构力学法计算, 并采用三维有限元分析方法对闸墩进行应力复核。重要的工程还可采用结构模型试验确定其结构型式和预应力锚索的布置。例如湖南省五强溪、湖北省葛洲坝、广西壮族自治区岩滩、云南省漫湾、福建省水口、广西壮族自治区天生桥及辽宁省蒲石河等水利水电工程的预应力闸墩, 不仅进行了大量的计算分析, 还专门开展了试验研究工作。

7.2.3 闸墩的支撑结构在受到弧门水推力和主锚索张拉力的作用, 应力状态极为复杂, 在垂直于主锚索方向上会出现较大范围和量值的次生拉应力。为了抵消这部分次生拉应力对锚块产生的不利影响, 应在闸墩的支撑结构中不仅布置一定数量的主锚索还应布置适当数量的次锚索。

7.2.4 闸墩预应力锚索在立面, 大都沿弧门水推力合力方向布置, 尽可能使预应力合力与水推力合力重合, 但也应考虑闸墩内部应力尽可能达到均匀分布。为使支铰区附近应力集中得以扩散, 多呈扇形状态布置。统计国内闸墩预应力锚索在立面布置的扩散角为 $5^\circ \sim 15^\circ$ 。例如广西壮族自治区岩滩闸墩为 8.3° , 福建省水口闸墩为 10° 。

锚索沿弧门推力方向的平面内布置, 主要有平行、交叉、弯曲和倾斜等四种布置方式, 见图 10。

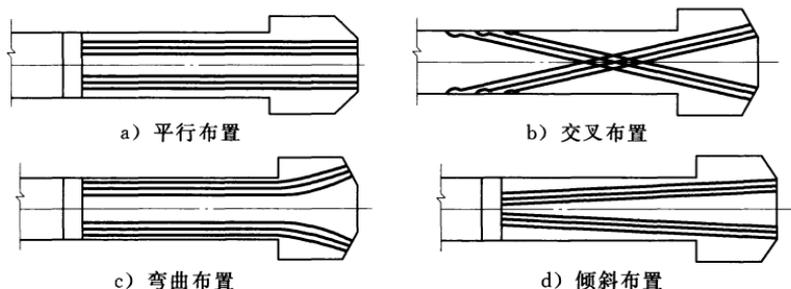


图 10 闸墩内预应力锚索平面布置图

这四种布置在国内外均有实例。例如广西壮族自治区岩滩闸墩中的锚索采用平行布置，湖北省葛洲坝二江闸墩中的锚索采用交叉布置，陕西省安康闸墩中的锚索采用弯曲布置。近年发展趋势是以平行布置为主，上游锚头稍向闸墩内移动，以便改善施工预留孔口的拉应力。云南省漫湾水电站闸墩锚索采用倾斜布置，将下游锚头的位置移到弧门推力作用线附近，不仅可以提高颈部的预压应力，而且使锚块上游面水平方向受压，将施工预留孔的拉应力明显减小。弧门推力在闸墩内产生的拉应力是外侧面大，内部小。因此，锚索布置应尽量靠闸墩外侧布置，以得到更有效的预应力效果。

此外，当锚索上游端在闸墩上开孔或留槽锚固时，锚索应长、短相间布置，以避免应力集中，恶化闸墩应力状态。

四川省二滩闸墩主锚索首次采用了 U 形锚固体体系，该体系在闸墩内的锚固只需预埋 U 形钢管形成孔道，U 形段周围的应力分布比直线形对穿锚索要均匀。贵州省构皮滩中孔闸墩预应力主锚索共采用 84 套 U—1 型锚固体体系。

7.2.5 大型弧门预应力混凝土支撑结构形式主要有深梁式（简支梁、固端梁）和锚块式。深梁式一般用于高水头泄洪孔口，闸墩为缝墩或孔口宽度较小的情况；锚块式一般用于弧门跨度较大的情况。

锚块是闸墩预应力锚索外锚固端，其结构形式对其应力状态有很大影响。在受弧门水推力和主锚索张拉力的作用下，应力状态极为复杂，为使锚块尤其是颈部应力条件得到改善，将锚块设计成不同形式。有些工程还采用了钢锚块，如湖北省五强溪水电站表孔闸墩。采用钢筋混凝土锚块也有简单型和复杂型，陕西省安康水电站表孔弧门支撑体即采用了复杂锚块，如图 11 所示。

近几年，为了使锚块内部的应力得以释放并提高颈部的预压应力效果，设计通常采用在锚块内开设预留槽的结构形式，如图 12 所示。开设预留槽锚块的结构形式较复杂锚块简单，受力性能较简单锚块合理，可减少主、次锚索数量，降低拉锚系数，经

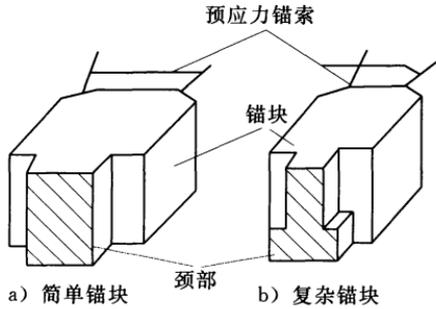


图 11 锚块的结构形式

济效益显著。这种形式的锚块在广西壮族自治区天生桥、内蒙古自治区尼尔基、辽宁省蒲石河、贵州省构皮滩及云南省景洪等水利水电工程的预应力闸墩上均有应用。

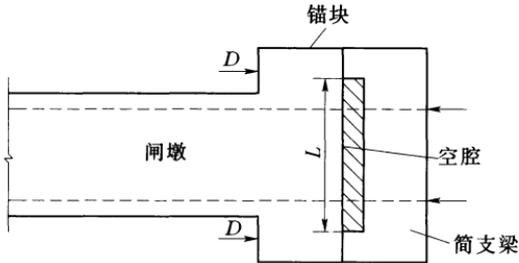
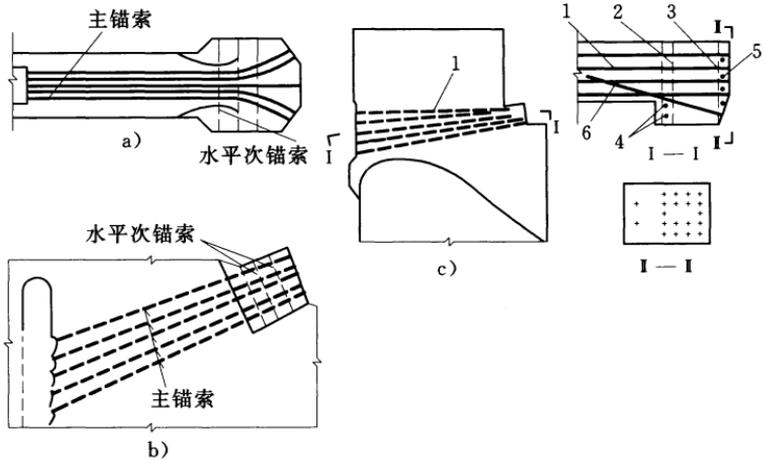


图 12 开设预留槽锚块的结构形式

为抵消在垂直于主锚索方向上出现较大范围和较大量值的次生拉应力，应在支撑结构中布置适当数量的次锚索，以改善支撑结构的应力状况。次锚索布置有两种：一种为水平布置；另一种为垂直布置。有些工程水平和垂直次锚索同时布置。次锚索不宜少于 3 排，第一排应靠近弧门铰支承面，其余布置在离支承面 $2h/3$ 的范围内， h 为支撑结构的高度。闸墩中主锚索和锚块中锚索布置见图 13。

7.2.6 由于闸墩尺寸较小，在闸墩施工过程中往往采用预留锚索安装通道的施工方法。待闸墩钢筋混凝土浇筑完成后，在预留



1—主锚索；2、3—水平次锚索；4、5—垂直次锚索；6—斜锚索

图 13 闸墩中主锚索和锚块中次锚索布置图

的通道中，安装锚索，实施张拉，最后封孔灌浆。为了安装方便，保证索体水泥浆或水泥砂浆的保护层厚度，预留的锚索通道要有足够的空间。预留空间的大小同锚索张拉荷载和采用的锚索材料有关。一般情况下，当主锚索张拉力为 3500kN 时，预埋管外径宜采用 107mm，内径不小于 100mm；次锚索单束张拉力为 2000kN 时，预埋管外径宜采用 92mm，内径 85mm。

锚索通道采用预埋法施工，预埋管的材料可为波纹管或钢管。采用钢管钢材用量大，造价高，而采用波纹管，可降低造价。福建省水口工程闸墩预埋锚索通道由钢管改为波纹管后，每米可节省 58 元，仅预埋管一项就节省投资 91 万元。

闸墩主锚索的锚固端型式，不仅应考虑对闸墩应力状态的影响，而且还应考虑施工方便。目前已建工程锚固端的布置主要有两种形式：一种是在闸墩上游预留锚固井、锚孔及浅槽，例如福建省水口、陕西省安康等水利水电工程；另一种形式是在闸墩上游面预留锚固槽，例如湖北省葛洲坝、广西壮族自治区天生桥及辽宁省蒲石河等水利水电工程。

7.2.7 由于闸墩和锚块尺寸较小，而承受的荷载又较大，所以混凝土应有足够的强度，同时还应布置一定数量的钢筋。已建工程经验表明，闸墩混凝土强度等级不宜小于 C30，钢筋混凝土锚块和颈部等部位的混凝土强度等级不宜小于 C40。

7.3 闸室、消力池（塘）和挡墙锚固

7.3.1 由于预应力锚索施工方便、造价低及易于实施，越来越广泛地应用于水工建筑物的加固、补强和工程改造。例如抵御较大上浮力的重力式闸室，不仅工程量大，施工工期长，也不经济，而采用预应力锚索，可将上浮力传递至基础深部，通过穿越建筑物的锚索，对闸室施加预压应力。这部分预压应力，可以抵消全部或部分的上浮力，使闸室结构处于稳定状态，如图 14a) 所示。为抵御水压力、土压力而修建的钢筋混凝土挡墙，也可以布置预应力锚索，施加较大的主动压力，并通过锚索体将这部分主动压力传递至岩体或土体深部，保证挡墙的稳定，这样便可将挡墙修建成轻型结构，以节省投资，如图 14b) 所示。

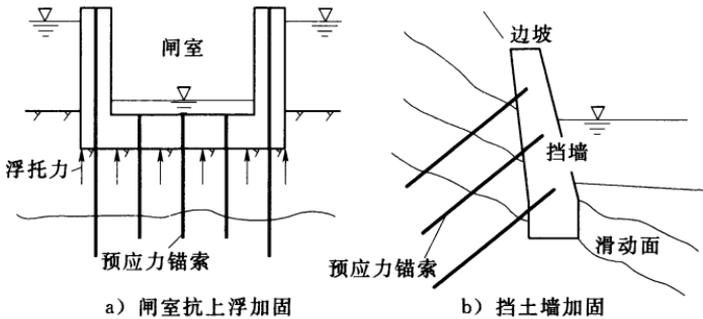


图 14 闸室、挡墙锚固示意图

7.3.2 闸室、消力池（塘）本身自重不能满足抗浮稳定需要时，应布置预应力锚索，其数量与张拉力应满足抗浮稳定的需要，其安全系数应符合《水闸设计规范》（SL 265）、《溢洪道设计规范》（SL 253）的规定。

闸室、消力池（塘）中布置预应力锚索后，应校核各种计算情况下的闸室基底平均压力，其基底平均压力和基底压力的最大与最小值之比都应满足 SL 265 的规定。

7.3.3 布置在挡墙中预应力锚索，对挡墙施加与岩体或土体滑动方向相反的主动压力，同挡墙自重共同提供阻滑力。挡墙的预应力锚固设计时，应充分考虑滑动体本身的阻滑作用与挡墙自重所起到的阻滑作用，阻滑力不足部分由预应力锚索承担。按这一要求确定预应力锚索的数量，并决定设计张拉力。预应力锚索的锚固段应布置在稳定的岩层中，并按本标准 5.1.4 条的规定选择最优锚固角度。

7.4 水工隧洞混凝土衬砌环形预应力锚索

7.4.1 当压力引水隧洞承受的内水压力较大，混凝土衬砌中产生较大的拉应力时，为了克服使衬砌开裂的拉应力，在混凝土衬砌施工中预先施加一定与内水压力相反的预压应力，用来抵消一部分内水压力产生的拉应力，在混凝土衬砌中布置可以张拉的环形锚索是有效的措施之一。

压力引水隧洞中的环形锚索式混凝土预应力衬砌的主要构件是衬砌周圈的环形锚索，通过紧固装置可以施加张拉力，使混凝土衬砌受到一定数值的预压应力，并通过灌浆将这部分预压应力保存在衬砌中，这种预压应力可抵消部分拉应力，这种技术措施已成功用于压力隧洞的设计与施工，目前国内外环形锚索式预应力衬砌主要工程特性指标见表 10。

表 10 国内外环形锚索式预应力衬砌主要工程特性指标

工程名称	国家	结构形式	最大内 水压 (MPa)	长度或 高度 (m)	内径 (m)	衬砌厚度 (m)	锚固主要参数			
							类型	根数	间距 (mm)	直径 (mm)
San fiorino	意大利	调压井	1	99	8.2	0.8~0.6	有粘结	12	2500~1000	15
Brasimone	意大利	调压井	0.6	61	26	0.7	有粘结	19 12	150~400	15

表 10 (续)

工程名称	国家	结构形式	最大内 水压 (MPa)	长度或 高度 (m)	内径 (m)	衬砌厚度 (m)	锚固主要参数			
							类型	根数	间距 (mm)	直径 (mm)
Piastra - Andouno	意大利	压力隧洞	0.8	11400	3.3	0.25	有粘结	4	300	15
Taloro	意大利	调压井	0.9	90	14.9	0.8	有粘结	19 12 7	300~600	15
Taloro	意大利	压力隧洞	0.9	495	5.5	0.45	有粘结	6	300	15
Chiotas - Piastra	意大利	压力隧洞	1.4	90	6.1	0.6	有粘结	12	300	12.7
隔河岩 水电站	中国	压力隧洞	1	602	9.5	0.75	有粘结	12	400	15
天生桥水电站	中国	压力隧洞	1.3	480	9.7	0.7	有粘结	12 14	400 330	15
Grimsel tailrace tunnel	瑞士	压力隧洞	1.4	60	6.8	0.6	无粘结	12	240	15
Presenzano	意大利	—	—	—	5.6	—	无粘结	6	300~580	15
小浪底水利 枢纽	中国	排沙洞	1.22	3×1100	6.5	0.65	无粘结	8	500	15.7

使压力引水隧洞获得预应力的方法很多，如在混凝土衬砌外缘布置可以紧固的拉筋或钢箍，也可以对混凝土与围岩之间的缝隙进行高压灌浆等。在采用预应力衬砌的时，应根据工程特点，运行要求，地质条件等因素，进行技术经济比较，选择技术先进、经济合理的预应力衬砌形式。

7.4.2、7.4.3 环形预应力锚索混凝土衬砌设计的主要内容是确定环形锚索的间距和每束锚索的设计张拉力，这两项内容均与隧洞衬砌承受的内水压力大小、混凝土衬砌采用的强度等级及环形锚索承担的内水压力比例有关。关于环形锚索

式预应力衬砌的内力计算，应按《水工隧洞设计规范》（SL 279）要求进行。由衬砌应力计算确定了应由锚索提供的预应力后，即可计算确定锚索的间距和单根锚索的设计张拉力。对一些重要工程还应通过有限元法或模型试验对施加环向锚索后的衬砌应力状态加以复核。黄河小浪底水利枢纽排砂洞就进行了模型试验，通过模型试验确定采用无粘结钢绞线做为环形锚索的材料。

7.4.4 由于衬砌中的环形锚索是沿衬砌周圈布置，在确定设计张拉力时，一定要考虑锚索沿孔壁的摩阻损失，沿孔壁的摩阻损失可根据 GB 50010—2010 所推荐的公式计算。关于孔道的摩阻系数 μ ，根据湖北省隔河岩水电站压力引水隧洞环形锚索式预应力衬砌 1380 束锚索实测伸长值进行了反演分析，其平均值为 0.153~0.220；黄河小浪底排砂洞环形锚索模型试验，有粘结钢绞线方案选择为 0.2，无粘结钢绞线方案选择为 0.05，3 条排砂洞环形锚索沿程摩阻损失采用的设计参数见表 11。

表 11 小浪底排砂洞环形锚索沿程摩阻采用的损失设计参数表

项 目		有粘结钢绞线方案	无粘结钢绞线方案
每束钢绞线根数		12	8
单根公称面积 (mm ²)		139	150
摩阻系数	μ	0.2	0.05
摆动系数	k	0.0015	0.0007
设计张拉力 (kN)		2343.6	1674
预应力沿程分布状况		波动大	较均匀
就位方式		先预埋波纹管，混凝土浇筑后再将钢绞线穿入管内	直接预埋在衬砌体内，就位要求较高

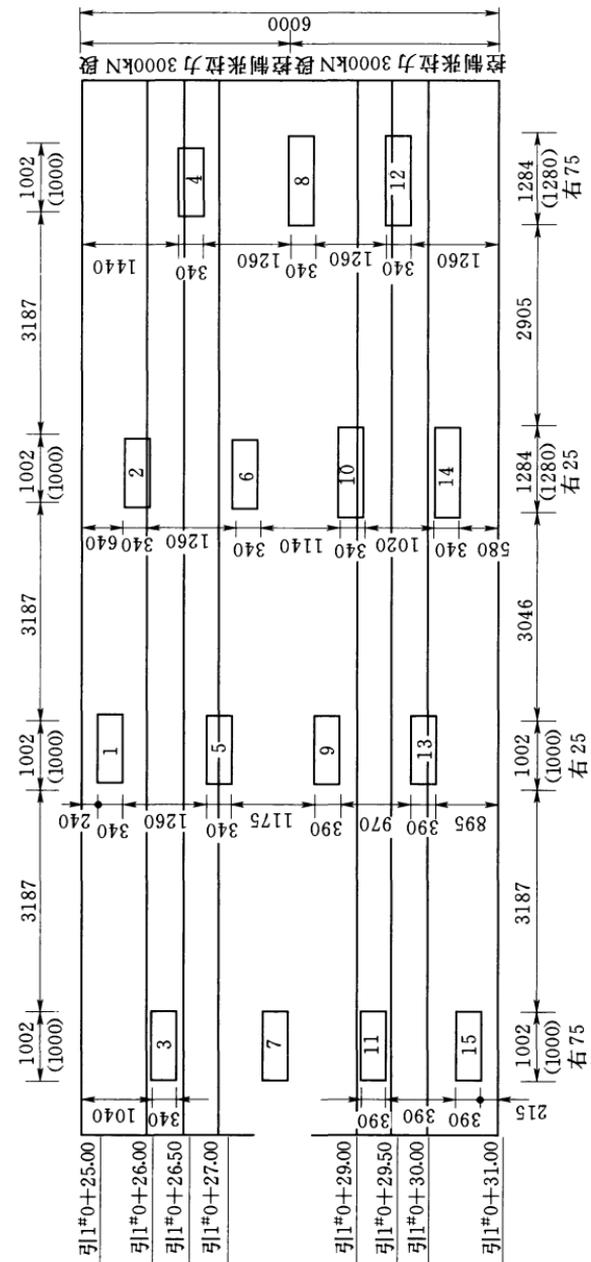


图 15 天生桥一级水电站后张预应力衬砌试验段张拉槽布置图 (单位: mm)

7.4.5 环形锚索布置在混凝土衬砌外缘，是为了有效的对混凝土衬砌提供预压应力，以最大限度的发挥锚索的预应力效果。锚索间距宜为 400~500mm 是根据已建工程经验确定的。

7.4.6 对混凝土衬砌施加环向预应力时，由于施加的张拉力较大，为防止局部应力集中而导致衬砌外缘混凝土损坏，为此要求衬砌混凝土有较高的强度，并且在达到设计强度后方可进行环形锚索的张拉。

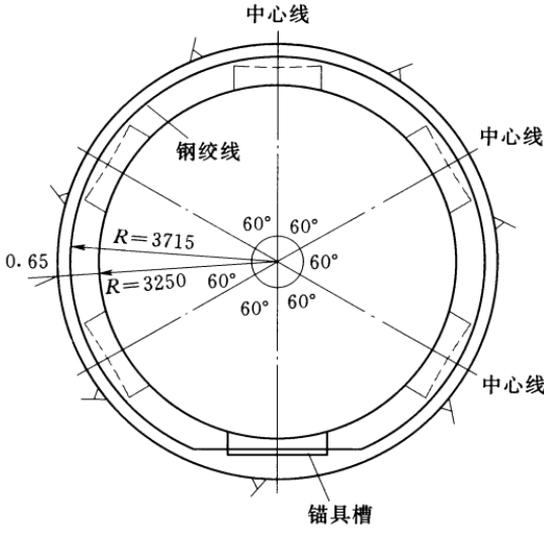
7.4.7 锚具槽是实现锚索张拉与锁定的部位，需要专门设置，为了保证混凝土均匀的受到锚索的环向压力，锚具槽不应布置在衬砌断面的同一位置，而应错开布置在不同位置上。广西天生桥一级水电站环形锚索预应力衬砌张拉槽布置见图 15。黄河小浪底排砂洞环形锚索预应力衬砌，为了减少锚具槽对断面削弱的影 响，采用全断面设置一个锚具槽的方案，为了使施加的预应力荷载所产生的应力分布更加均匀，对锚具槽沿洞轴线方向采用环向交错布置方式。对于有粘结钢绞线方案，曾对整个衬砌环采用 4 个锚具槽和 6 个锚具槽两种不同的交错布置情况进行了预应力叠加效果的比较，最终选定了 6 个锚具槽沿圆环均匀分布，纵向间距为 0.25m 的交错布置方案。对于无粘结钢绞线方案所采用的锚具槽是布置在衬砌环的下半圆，分别对两个锚具槽中心线的夹角为 90° 和 120° 两种不同布置情况进行了分析论证，最终选定两个锚具槽中心线的夹角为 90° ，纵向间距为 0.5m 的交错布置为推荐的设计方案。

经分析计算，所选定方案的结构应力状况满足全预应力的设计要求。预应力锚索及锚具槽的布置见图 16 和图 17。

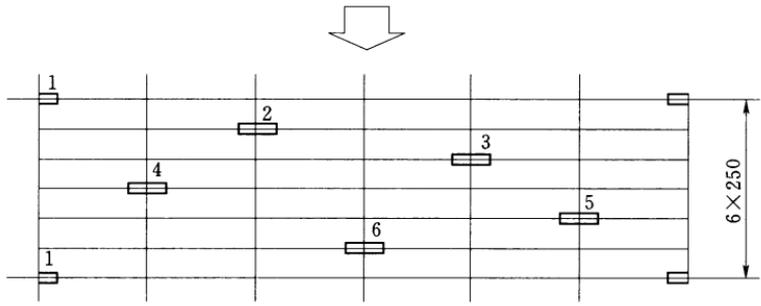
7.4.8 混凝土衬砌施工时，在环形锚索位置预埋波纹管，是方便环形锚索施工的具体措施，尤其是采用有粘结钢绞线作为锚索材料时是必须有的措施，对无粘结钢绞线也可简化施工，增加对钢绞线的防护。

7.4.9 对穿索孔道的及时进行回填灌浆是十分必要的，因为对

于环形预应力锚索式的衬砌混凝土强度等级一般不低于 C30，因此锚索孔道的回填灌浆材料强度也要与其匹配，不宜低于 30MPa。对于锚具槽，由于尺寸较小，为了防止收缩产生裂缝，建议采用无收缩混凝土。

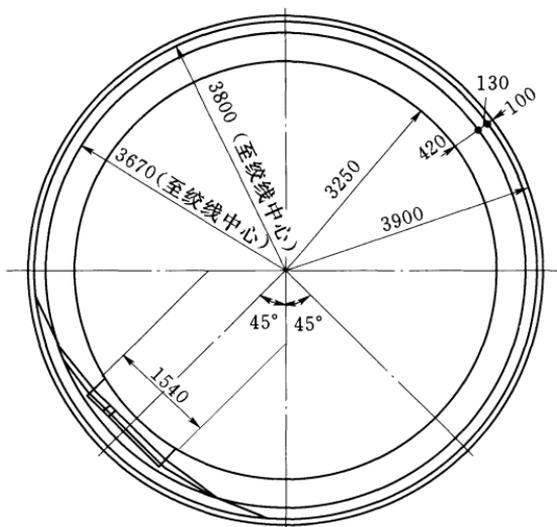


a) 有粘结预应力钢绞线布置图

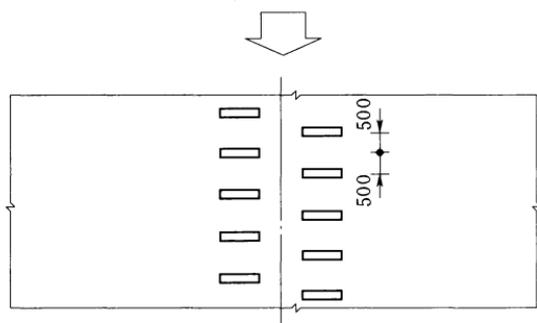


b) 有粘结锚具槽展开示意图

图 16 有粘结钢绞线锚具槽布置图 (单位: mm)



a) 无粘结预应力筋布置图



b) 无粘结方案锚具槽展开示意图

图 17 无粘结钢绞线锚具槽布置图 (单位: mm)

8 安全监测设计与试验

8.0.1、8.0.2 预应力锚固对象地质条件较为复杂，勘测设计时不可能查的十分清楚，即使安排了较多的勘测工作，但随着工程的进展，还可能发现新的情况，因此加强预应力锚固工程安全监测是必要的。根据监测结果，对锚固参数进行调整是锚固设计的动态控制措施，目前我国的长江三峡、黄河小浪底、四川省溪洛渡、云南省向家坝、四川省锦屏等大型水利水电工程均开展了安全监测工作，并责成专门队伍实施。

安全监测结果还是工程验收和工程安全评价的依据，为了做好安全监测，本标准规定了应遵守的基本原则和对监测仪器选型的要求。

8.0.3 在锚固设计文件中，应明确锚索施工中的技术要求和相应的质量评价标准，便于指导施工和工程的质量评定及验收。

8.0.4~8.0.7 预应力锚索安全监测主要是锚索体受力状况和被锚固对象的锚固效果两部分。锚索体的受力状况是逐根都要监测和记录的，对被锚固对象则是根据建筑物的安全等级、锚固工程的重要程度，按锚索总数的比例进行安排的，评价锚固工程的安全程度时，两个部分的监测结果要综合对照分析。

8.0.8 对于特殊部位的监测应根据锚固工程的特点和设计要求专门进行设计。

8.0.9 对监测要求中强调了安全监测仪器要及时安装，并优先安排监测锚索的施工，主要的是要尽早并在施工初期就要获得监测数据，防止实测值的丢失，保证获得实际的、真实的变化数据，以指导施工，发现异常情况及时进行处理。

8.0.10 在锚固工程的监测结果中，经常会发生实测锚固力大于20%和小于10%的情况，当实测锚固力大于设计锚固力20%时，说明锚索中钢丝或钢绞线的平均应力将超过钢材抗拉强度标准的

70%，如果增加趋势没有减缓，这对预应力锚索而言将是十分危险的；当实测锚固力小于设计锚固力 10% 时，说明被锚固对象的安全储备减小，也是十分危险的。所以，当遇到上述二种情况时，应及时分析，找出原因，研究处理措施，以确保工程安全。

8.0.11 对于预应力锚索使用数量较大，且地质条件较为复杂，采用本标准 4.3.1 条确定锚固段的胶结长度有一定困难，或对胶结材料与锚索孔孔壁粘结强度取值不十分准确时，应安排进行锚固段的拉拔试验，以合理确定胶结材料与孔壁的粘结强度指标，指导锚固段长度的确定。锚固段的拉拔力试验可分为非破坏性试验和破坏性试验两种，试验要求和方法可见附录 A。