

YUYINGLI ZHADUN JIEGOU  
SHIYAN JI LILUN

# 预应力闸墩结构 试验及理论

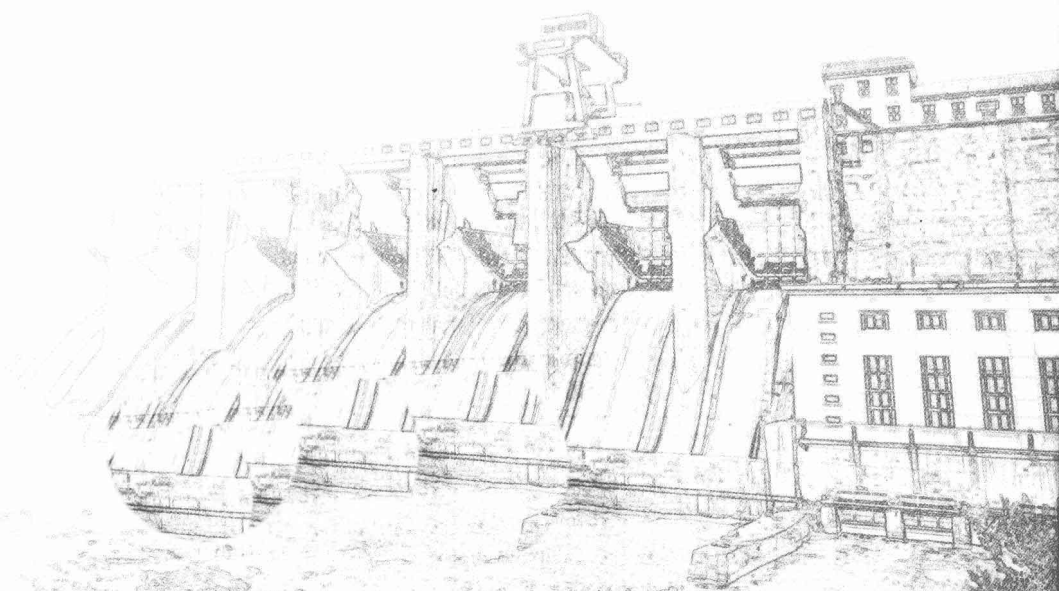
解伟 李树山 著



中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn

# 预应力闸墩结构 试验及理论

解伟 李树山 著



中国水利水电出版社  
[www.waterpub.com.cn](http://www.waterpub.com.cn)

本书从预应力闸墩结构受力机理与设计原则、计算方法等方面进行了较为详尽的论述，并对国内有关研究成果进行了综述。在此基础上，系统开展了蒲石河预应力闸墩结构受力性能理论分析与试验研究。

本书可供水利工程专业的技术人员、大学生、研究生等参考使用。

### 图书在版编目 (C I P) 数据

预应力闸墩结构试验及理论 / 解伟, 李树山著. --  
北京: 中国水利水电出版社, 2010. 12  
ISBN 978-7-5084-8280-4

I. ①预… II. ①解… ②李… III. ①水力发电站—  
预应力结构—闸墩—结构试验②水力发电站—预应力结构—  
闸墩—理论研究 IV. ①TV662

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第264303号

|  |  |
|--|--|
| 书<br>作<br>出<br>版<br>发<br>行                     | <p><b>预应力闸墩结构试验及理论</b><br/>解伟 李树山 著<br/>中国水利水电出版社<br/>(北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038)<br/>网址: www.waterpub.com.cn<br/>E-mail: sales@waterpub.com.cn<br/>电话: (010) 68367658 (营销中心)</p> |
| 经<br>售   | <p>北京科水图书销售中心(零售)<br/>电话: (010) 88383994、63202643<br/>全国各地新华书店和相关出版物销售网点</p>   |
| 排<br>印<br>规<br>格<br>版<br>次<br>印<br>数<br>定<br>价 | <p>中国水利水电出版社微机排版中心<br/>北京纪元彩艺印刷有限公司<br/>184mm×260mm 16开本 9印张 213千字<br/>2010年12月第1版 2010年12月第1次印刷<br/>0001—1000册<br/><b>25.00元</b></p>  |

凡购买我社图书, 如有缺页、倒页、脱页的, 本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

# 前 言

国内外已对多个实际预应力闸墩结构进行了数值仿真分析,与模型试验结果之间吻合得比较好。鉴于预应力闸墩结构受力状态的复杂性,单纯的理论分析很难全面反映该结构的实际工作状态和应力分布,对大型预应力闸墩结构应进行数值计算与模型试验,以验证理论分析的准确度。目前的预应力闸墩模型试验研究大多局限于简单锚块式弧门支承结构的情况,对锚块内设置空腔这一结构型式进行仿真模型试验研究资料很少。锚块内设置空腔这一结构型式,有利于提高预应力锚束的预压效果,但也使得锚块受力状态复杂化,其受力性能分析的难度进一步提高。为了探讨和揭示设置空腔型式的闸墩锚块受力性能以及对闸墩颈部应力状态的影响规律,本书以蒲石河抽水蓄能电站排沙闸预应力闸墩结构为例,对该预应力闸墩结构进行仿真模型试验,并与三维有限元数值分析结果进行比较,明确闸墩颈部与锚块内的实际受力情况,验证结构设计方案的合理性,检验设计的安全度,在此基础上,为预应力闸墩结构的优化设计提出合理化建议,从而积累预应力闸墩结构受力状况分析的宝贵资料。

本书的主要研究内容如下。

(1) 建立预应力混凝土闸墩结构受力模型和设计计算方法。根据闸墩体内预应力作用机理,提出预应力混凝土闸墩结构在预应力、单侧弧门推力、双侧弧门推力作用下关键部位的内力理论计算公式。结合部分预应力计算理论,提出预应力混凝土闸墩结构运行阶段抗裂性能验算方法,并给出闸墩结构极限承载力计算公式。

(2) 预应力混凝土闸墩结构有限元数值模拟分析研究。采用有限元数值分析法模拟预应力闸墩结构在预应力、单侧弧门推力、双侧弧门推力作用下关键部位的受力性能,分析预应力闸墩结构应力分布及其变化的特征。

(3) 结合蒲石河抽水蓄能电站排沙闸预应力混凝土闸墩模型试验,分析不同的预应力筋张拉工序对闸墩颈部预压效果的影响规律,确定合理的预应力筋张拉工序。研究双侧弧门关闭工况下闸墩颈部的受力状态,研究在单侧弧

门关闭工况下闸墩结构的超载能力。验证模型试验实测数据、理论计算和三维有限元分析结果的一致性，确定预应力混凝土闸墩结构新型设计型式及设计方法的可行性。

本书是作者对预应力闸墩结构受力性能研究的总结，旨在为该研究领域的发展及工程应用总结经验。

本书由解伟、李树山编写。全书由解伟统稿。

本书的研究工作得到了辽宁蒲石河抽水蓄能有限公司科研项目、河南省杰出人才支持计划等项目资助，在此一并致谢。在试验研究过程中，张世宝、魏鹏、闫飞、胡志远、盖占方、李晓克等做了大量工作，在此表示衷心的感谢！

希望本书的出版，能有力地促进我国预应力闸墩结构设计理论和方法的发展；同时，起抛砖引玉之用，希望能有更多这方面的著作问世。

预应力闸墩的性能研究还处于发展阶段，鉴于作者学识、水平有限，本书难免有不当之处，敬请批评指正。

作者

2010年11月

# 目 录

## 前言

|   |     |
|---|-----|
| <b>第 1 章 概述</b> .....                     | 1   |
| 1.1 预应力闸墩结构发展概况 .....                     | 1   |
| 1.2 预应力闸墩结构的研究现状 .....                    | 5   |
| 1.3 预应力闸墩结构模型试验的基本理论及相似关系 .....           | 29  |
| <b>第 2 章 预应力闸墩结构理论计算方法</b> .....          | 36  |
| 2.1 预应力闸墩设计原则 .....                       | 36  |
| 2.2 预应力闸墩结构选型设计方法 .....                   | 37  |
| 2.3 预应力闸墩结构极限状态理论计算方法 .....               | 39  |
| 2.4 算例分析 .....                            | 48  |
| <b>第 3 章 蒲石河新型预应力闸墩结构有限元分析</b> .....      | 54  |
| 3.1 预应力闸墩结构三维有限元分析的目的 .....               | 54  |
| 3.2 工程概况 .....                            | 54  |
| 3.3 有限元模型的建立 .....                        | 59  |
| 3.4 本章小结 .....                            | 69  |
| <b>第 4 章 蒲石河新型预应力闸墩结构模型试验研究</b> .....     | 71  |
| 4.1 引言 .....                              | 71  |
| 4.2 预应力闸墩结构模型试验设计 .....                   | 71  |
| 4.3 预应力闸墩结构模型试验结果及分析 .....                | 105 |
| 4.4 模型试验结果与有限元计算结果的对比分析 .....             | 118 |
| <b>第 5 章 预应力锚束锚固区受力性能研究</b> .....         | 121 |
| 5.1 概述 .....                              | 121 |
| 5.2 闸墩体内预应力主锚束锚固区受力性能研究 .....             | 122 |
| 5.3 锚块表面预应力主锚束锚固区受力性能研究 .....             | 126 |
| <b>第 6 章 主要结论与建议</b> .....                | 134 |
| 6.1 蒲石河抽水蓄能电站下水库泄洪排沙闸预应力闸墩结构模型试验的特点 ..... | 134 |

|                |     |
|----------------|-----|
| 6.2 主要结论 ..... | 135 |
| 6.3 主要建议 ..... | 136 |
| 参考文献 .....     | 137 |



# 概述

## 1.1 预应力闸墩结构发展概况

### 1.1.1 预应力闸墩结构的发展现状

预应力是指为改善结构或构件在各种使用条件下的工作性能和提高其强度而在使用前预先施加的永久性内应力<sup>[1]</sup>。

1928 年法国学者弗莱西奈 (E. Freyessinet) 开始将预应力技术应用于混凝土结构中<sup>[2]</sup>。预应力混凝土具有优越的控制裂缝和变形性能, 因此预应力混凝土技术被广泛应用于工业民用建筑、桥梁、矿山建筑、高陡边坡、大型地下洞室的围岩加固, 大型弧门闸墩、高坝坝基加固, 以及各种建筑物的维护和补强工程中<sup>[3]</sup>。

随着大型枢纽建筑物的泄水量增大、工作水头提高及泄洪孔口尺寸不断加大, 闸墩结构所承受的弧门推力也随之增大。例如, 葛洲坝水利枢纽泄水闸弧门推力为 42000kN; 水口水电站溢洪道弧门推力为 43200kN; 岩滩水电站溢洪道弧门推力为 45390kN; 大藤峡水电站溢洪道弧门推力达到 58400kN<sup>[3]</sup>。巨大的弧门推力通过弧门支承结构传递给闸墩体, 这不仅在混凝土闸墩墙面上形成大面积的拉应力区, 而且在弧门支承结构与闸墩的连接部位(颈部)产生很大的局部拉应力。受到溢流宽度的限制, 闸墩尺寸不可能设计过大, 这势必恶化闸墩颈部的受力状态。已有研究表明, 当弧门推力达到 25000kN 时, 支铰附近的闸墩颈部将产生 5MPa 以上的拉应力, 特别在检修工况下, 闸墩往往处于偏心受拉的工作状态, 采用常规的钢筋混凝土结构型式无法满足运行要求。为了改善弧门支撑结构的应力状态, 优化闸墩的结构设计, 确保弧门安全运行, 最有效的办法是将预应力技术应用于大型弧门的钢筋混凝土闸墩<sup>[3]</sup>。

20 世纪 50 年代末, 突尼斯的梅列格水电站溢洪道上首先在闸墩结构中采用预应力技术。60 年代初, 美国在修建瓦纳庞 (Wanapum) 水电站溢洪道工程时, 对预应力混凝土



表 1.1 国内大型预应力闸墩实例

| 工程名称及建筑物 | 孔口特征(弧门尺寸)  |           |              | 支承结构     |                          | 预应力体系<br>(按锚具分) | 闸墩厚度<br>(m) | 主锚束布置               | 施加预应力        |              | 吨锚比<br>(拉锚系数) |
|----------|-------------|-----------|--------------|----------|--------------------------|-----------------|-------------|---------------------|--------------|--------------|---------------|
|          | 尺寸<br>(m×m) | 水头<br>(m) | 弧门推力<br>(kN) | 形式       | 尺寸<br>(长×宽×高)<br>(m×m×m) |                 |             |                     | 单束拉力<br>(kN) | 总施加力<br>(kN) |               |
| 葛洲坝水利枢纽  | 三江冲沙闸       | 12×10.5   | 23           | 边墩 14000 | 深梁式闸墩                    | 12×5×6          | 3.0         | 10束(162φ5mm) 高强钢丝   | 3000         | 30000        | 2.1           |
|          | 二江泄水闸       | 12×12     | 29           | 中墩 42000 | 简单锚块式                    | 9.9×6×5         | 5.3         | 30束(84φ7mm) 高强钢丝    | 3000         | 90000        | 2.1           |
|          | 大江泄水闸       | 12×19.5   | 24.5         | 中墩 40000 | 简单锚块式                    | 10.5×6×5        | 5.3         | 30束(84φ7mm) 高强钢丝    | 3000         | 90000        | 2.3           |
| 龙羊峡水电站   | 底孔泄水道       | 5×7       | 120          | 中墩 64200 | 深梁式闸墩                    | 6.5×5×7         | 3.4         | 40束(84φ7mm) 高强钢丝    | 3500         | 140000       | 2.18          |
|          | 深孔泄水道       | 5×7       | 95           | 中墩 46000 | 深梁式闸墩                    | 6.5×5×7         | 3.4         | 30束(84φ7mm) 高强钢丝    | 3500         | 105000       | 2.28          |
|          | 中孔泄水道       | 8×9       | 60           | 中墩 45300 | 深梁式闸墩                    | 8×4×5           | 4.0         | 30束(26根7φ5mm) 钢绞线   | 4186         | 125580       | 2.8           |
| 鲁布革水电站   | 表孔溢洪道       | 13×17.5   |              | 中墩 28000 | 简单锚块式                    | 8.5×5×5         |             | 30束(16根7φ5mm) 钢绞线   | 2300         | 69000        | 2.46          |
|          | 中孔泄水道       | 11×12     | 26.4         | 中墩 35000 | 复杂锚块式                    | 6.4×5×4.2       | 5.0         | 24束(19根7φ5mm) 低松弛钢丝 | 2400         | 55800        | 1.6           |
| 安康水电站    | 表孔溢水道       | 15×19     | 18.68        | 中墩 27520 | 复杂锚块式                    | 5.6×5.5×4.4     | 4.0         | 20束(19根7φ5mm) 低松弛钢丝 | 2950         | 49528        | 1.8           |
|          | 表孔溢洪道       | 15×21.5   | 21           | 中墩 46320 | 简单锚块式                    | 9.8×5.5×5       | 5.0         | 30束(85φ7mm) 低松弛钢丝   | 3024         | 98970        | 1.96          |
| 二滩水电站    | 中孔泄水道       | 6×5       | 80           | 中墩 34000 | 深梁式闸墩                    | 6×3×5           | 变厚度 2.8~4.5 |                     | 2000         | 40000        | 1.18          |

续表

| 工程名称及建筑物    | 孔口特征(弧门尺寸)  |           |              | 支承结构      |                          | 预应力体系<br>(按锚具分) | 间墩厚度<br>(m) | 主锚束布置                                    | 施加预应力        |              | 吨锚比<br>(拉锚系数) |
|-------------|-------------|-----------|--------------|-----------|--------------------------|-----------------|-------------|--|--------------|--------------|---------------|
|             | 尺寸<br>(m×m) | 水头<br>(m) | 弧门推力<br>(kN) | 形式        | 尺寸<br>(长×宽×高)<br>(m×m×m) |                 |             |  | 单束拉力<br>(kN) | 总施加力<br>(kN) |               |
| 水口<br>水电站   | 18×22       | 22        | 中墩<br>432000 | 简单<br>锚块式 | 8.4×5×4                  | DVF-Z 锚         | 5           | 30束(84φ7mm)<br>低松弛钢丝                     | 2744         | 82320        | 1.9           |
| 铜街子<br>水电站  | 14×17.5     | 17.5      | 边墩<br>15000  | 简单<br>锚块式 | 5.3×5×5.5                | 墩头锚             | 3.1         | 30束(162φ5mm)<br>高强钢丝                     | 3000         | 30000        | 2.0           |
| 东风<br>水电站   | 5×6         |           | 边墩<br>18500  | 深梁式<br>闸墩 | 14×4×5                   |                 |             |  | 3000         | 36000        | 1.95          |
| 小浪底<br>水利枢纽 | 4.4×4.5     | 122       | 边墩<br>25000  | 深梁式<br>闸墩 | 12.6×5×5                 | QM 锚            | 3.45        | 13束(21根 7φ5mm)<br>钢绞线                    | 3500         | 45500        | 1.8           |
| 漫湾<br>水电站   | 13×21       |           | 中墩<br>35000  | 深梁式<br>闸墩 |                          |                 | 5.5         | 20束(21根 7φ5mm)<br>钢绞线                    | 3000         | 60000        | 1.7           |
| 大藤峡<br>水电站  | 14×15       | 25        | 中墩<br>59829  | 简单<br>锚块式 | 9×5×7                    |                 |             |  | 4700         | 141000       | 2.4           |
| 李家峡<br>水电站  | 8×10        | 60        | 中墩<br>50970  | 预应力<br>大梁 | 8×5×6                    | QM              |             | 36束(21根 7φ5mm)<br>钢绞线外侧平衡束<br>19根 7φ5mm) | 3600         | 127200       | 2.5           |
| 大峡<br>水电站   | 11×15       | 22        | 中墩<br>23230  | 复杂<br>锚块式 | 5.8×5.29×5               | XM              | 4           | 20束(19根 7φ5mm)<br>低松弛钢丝                  | 3460         | 69200        | 2.97          |
| 宝珠寺<br>水电站  | 13×15       | 20.5      | 中墩<br>25349  | 简单<br>锚块式 | 5×6×2.5                  | DHF-Z           |             | 20束(12根 7φ7mm)<br>低松弛预应力高强钢丝             | 3856         | 77120        | 3.0           |
| 江坪河<br>水电站  | 14×15       |           | 中墩<br>44200  | 简单<br>锚块式 |                          | HVM15-26        | 3           | 30束(26根 7φ5mm)<br>钢绞线                    | 3800         | 114000       | 2.6           |

续表

| 工程名称及建筑物    | 孔口特征(弧门尺寸)  |               |              | 支承结构      |                          | 预应力体系<br>(按锚具分) | 闸墩厚度<br>(m) | 主锚束布置                   | 施加预应力        |              | 吨锚比<br>(拉锚系数) |
|-------------|-------------|---------------|--------------|-----------|--------------------------|-----------------|-------------|-------------------------|--------------|--------------|---------------|
|             | 尺寸<br>(m×m) | 水头<br>(m)     | 弧门推力<br>(kN) | 形式        | 尺寸<br>(长×宽×高)<br>(m×m×m) |                 |             |                         | 单束拉力<br>(kN) | 总施加力<br>(kN) |               |
| 平班水电站       | 17×14.3     |               | 中墩<br>32478  | 复杂<br>锚块式 | 上高5.8,<br>下高4.4,<br>长5.6 |                 | 4.5         | 20束(7φ5mm)<br>钢绞线       | 2500         | 50000        | 1.54          |
| 天生桥<br>一、二级 | 13×20       |               | 中墩<br>34760  | 复杂<br>锚块式 | 8×4.5×4.5                | OVM15-19        | 4           | 16束(19根7φ5mm<br>钢绞线)    | 3500         | 56000        | 1.6           |
| 棉花滩水电站      | 16×18       | 18            | 中墩<br>35451  | 简单<br>锚块式 | 5×5.4                    | OVM15-21        | 5           | 26束(21根<br>φ15.24mm钢绞线) | 3300         | 85800        | 2.42          |
| 糯扎渡水电站      | 15×20       | 182           | 中墩<br>38216  | 简单<br>锚块式 | 10.3×6×6                 | OVM15-19        | 4.5         | 20束(19根<br>φ15.24mm钢绞线) | 3500         | 70000        | 1.83          |
| 彭水水电站       | 14×24.5     |               | 中墩<br>43640  | 简单<br>锚块式 | 10.5×5.5×6               | OVM15-19        | 5.5         | 36束(19根<br>φ15.24mm钢绞线) | 3042         | 109512       | 1.93          |
| 居甫渡水电站      | 13×20       |               | 中墩<br>37700  | 复杂<br>锚块式 |                          | OVM15-19        | 4           | 20束(19根<br>φ15.24mm钢绞线) | 3300         | 66000        | 1.75          |
| 三板溪水电站      | 20×19       |               | 中墩<br>52108  | 简单<br>锚块式 | 9.6×8.4×5.6              | OVM15-30        | 5           | 20束(30<br>φ15.24mm)钢绞线  | 4195         | 83900        | 1.61          |
| 景洪水电站       | 15×21       |               | 中墩<br>51200  | 复杂<br>锚块式 | 10.8×6×6×5.6             |                 | 5           | 24束(19φ15.24mm)<br>钢绞线  | 3000         | 72000        | 1.41          |
| 大花水电站       | 6×7         | 63            | 中墩<br>42422  | 深梁式<br>闸墩 | 4.2×6.2×6                | HVM夹片<br>群锚     | 4           | HVM15~20群锚<br>共30束      | 3000         | 90000        | 2.1           |
| 五强溪水电站      | 19×23       | 110<br>(设计水位) | 中墩<br>52060  | 钢锚块       | 2.7×8.3×4                |                 | 5.5         | 30束                     | 4200         | 126000       | 2.42          |

闸墩结构进行了系统的受力性能研究。70年代,我国修建葛洲坝水利枢纽时,首次闸墩结构中应用预应力技术,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的主锚束,每根锚杆设计张拉力为3175kN。随之,国内岩滩、安康、水口、小浪底、溪洛渡等水电工程的大型弧门闸墩也相继采用预应力技术,均取得令人满意的效果。表1.1列出了国内部分已建或在建的大型预应力闸墩工程实例。

应用初期,限于预应力混凝土结构的理论研究水平、施工技术能力等诸多因素的影响,预应力技术难以满足大型弧门闸墩设计要求。随着科技水平的日益进步,特别是进入21世纪以来,国内许多大型水利发电工程相继建设,预应力混凝土闸墩结构被广泛应用于泄洪建筑物中,这也推动了我国预应力混凝土结构设计理论与施工技术的发展,特别是预应力张锚体系、施工工艺、材料和设备等方面,均进行了更加深入的研究并取得了很大进展。随着国产高强钢丝、钢绞线产量的增加以及部分预应力设计思想的提出和传播,预应力技术在大型闸墩结构工程中得到了广泛应用。实践证明,在大型闸墩结构中采用预应力技术,对改善闸墩的应力状态、限制闸墩的变形、降低工程造价、保证工程安全运行是最为合理的技术措施<sup>[3]</sup>。

### 1.1.2 预应力闸墩结构设计存在的问题

预应力混凝土结构设计理论和计算机分析技术的不断进步,施工技术的不断成熟,各种新型材料的不断涌现,促进了大型预应力闸墩结构的发展。纵观国内预应力技术半个世纪的发展历程,预应力闸墩结构已被越来越多的水利水电工程采用。但迄今为止,国内还没有专门的预应力混凝土闸墩结构设计标准或设计规定,使得预应力混凝土闸墩的设计无章可循,国内设计单位所采用的设计原则和设计方法不统一,闸墩的抗裂控制标准和安全度设置水平各行其是。总结目前国内预应力闸墩结构设计方法,存在以下主要问题<sup>[4]</sup>。

(1) 预应力闸墩的设计理论落后。与其他工程结构设计一样,弧形闸门预应力闸墩结构的基本设计应包括承载能力和正常使用两类极限状态的计算,但目前在工程界对弧形闸门预应力闸墩的设计理论主要是半理论、半经验的拉锚系数法。该设计法按预应力总拉力与弧形闸门总推力的比值(也即是拉锚系数)进行设计,按照预定拉锚系数确定预应力钢筋的数量,然后按照构造要求配置部分非预应力钢筋,拉锚系数的取值一般在2.0左右,个别工程甚至超过3.0。由此可见,该设计方法并没有按照承载能力和正常使用两类极限状态分别进行计算。

(2) 对弧门支承结构(锚块)承载力和抗裂性等计算也没有具体的规定。

(3) 预应力闸墩的设计没有统一的设计标准作指导。设计方法不完善,设计标准不统一,彼此还有较大的差别。

## 1.2 预应力闸墩结构的研究现状

### 1.2.1 预应力混凝土闸墩结构设计思想

预应力混凝土闸墩结构的发展与预应力混凝土的设计水平密切相关。早期预应力混凝土

土理论认为施加预应力是为了把混凝土变成弹性材料，其目的只是为了改变混凝土的性能，变脆性材料为弹性材料。为保证结构或构件在正常使用期间不出现裂缝，作用在结构或构件上的预压应力必须超过外部荷载产生的拉应力，形成全截面受压混凝土，即结构或构件采用“无拉应力”或“零应力”作为预应力混凝土的设计准则<sup>[5]</sup>。限于理论水平的不足，初期预应力混凝土结构均按此准则进行设计，结构设计水平处于全预应力阶段。

随着对预应力混凝土认识的深入，把预应力混凝土按照抗裂性分为严格要求不出现裂缝、一般要求不出现裂缝和允许出现裂缝三类，裂缝控制等级分属于一级、二级和三级，对前两类计算方法采用应力控制，也即把预应力划分为全预应力（对应抗裂一级）和部分预应力（对应抗裂二级、三级）<sup>[6]、[7]</sup>。按全预应力设计的结构承载能力安全系数偏大，浪费钢材；在恒载小、活载大的条件下，预压区混凝土长期处于高压应力状态将引起大徐变，造成较大的预应力损失；由构件约束所引起的拉应力有可能造成严重的裂缝，过大的预压应力也将引起沿预应力筋束方向的水平裂缝。而部分预应力设计有利于节约预应力钢材；减小混凝土徐变引起的预应力损失；同时由于配置有普通钢筋，破坏时具有较大的延性和能量吸收能力，有利于结构的抗震；预压应力的降低也有利于局部裂缝问题的解决。实践证明，部分预应力混凝土既具有全预应力混凝土与钢筋混凝土两者的一些主要优点，又基本上排除了两者的主要缺点，目前已逐渐成为预应力混凝土闸墩结构的主导设计思想<sup>[8]</sup>。

## 1.2.2 预应力混凝土闸墩结构设计型式

### 1.2.2.1 弧门支承结构型式

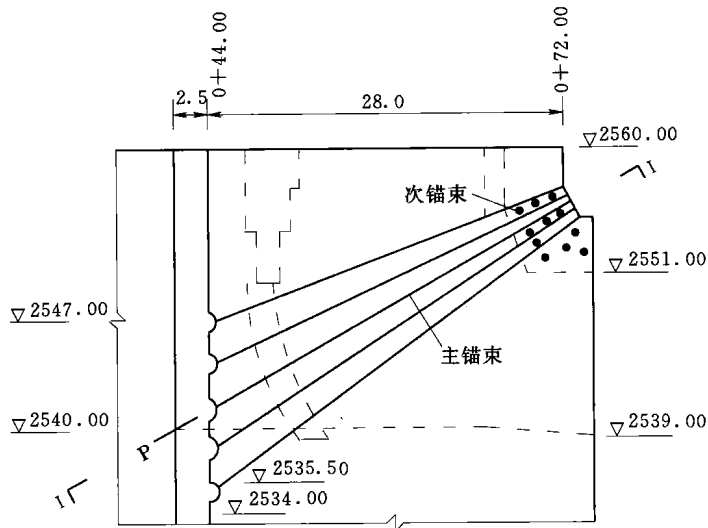
大型弧门预应力闸墩支承结构形式主要有两种，分别是深梁式和锚块式。其中，深梁式包括简支梁和固端梁，锚块式包括简单型和复杂型。

#### 1. 深梁式支承结构型式

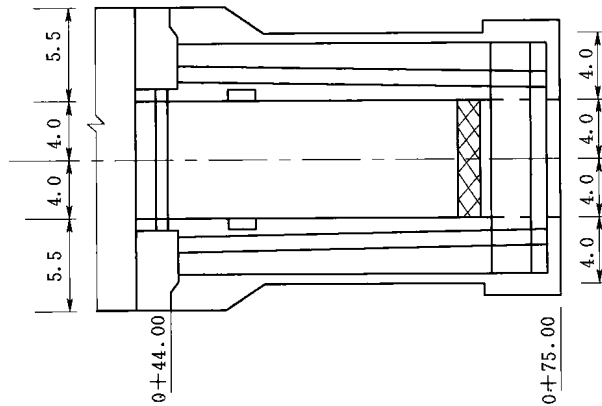
深梁式支承结构适用于高水头泄洪孔口，闸墩为缝墩或孔口宽度较小的情况下，将弧门支承在跨闸墩的深梁上比较有利。它能够改善闸墩受力偏心状态，提高闸室刚度以抵御高烈度地震及高速水流的强烈振动。深梁沿弧门推力的合力方向高度一般为4~7m，高跨比为0.5~1.0，约为闸墩厚度的1~1.5倍左右。深梁与闸墩的连接方式可采用单接自由式或整体固结式。如采用整体固结式，将会产生较大的温度应力，需要采取必要的温控措施。目前，在葛洲坝水利枢纽三江冲沙闸、龙羊峡水电站底孔、深孔及中孔泄水道、二滩水电站中孔泄水道、东风水电站、小浪底水利枢纽排沙洞、漫湾水电站泄洪冲沙孔、构皮滩水电站中孔、大花水水电站中孔等均采用深梁式支承结构形式。图1.1为预应力闸墩深梁式支承结构布置图。

#### 2. 锚块式支承结构形式

锚块式支承形式一般适用于弧门跨度较大（10m以上）的情况。优点是形体简单，施工方便。不足之处在于锚块两端伸出闸墩外，在大吨位弧门推力作用下产生较大的弯



(a) 立面图



(b) I—I 剖面图

图 1.1 预应力闸墩深梁式支承结构布置图 (单位: m)

矩。在闸墩颈部产生较大的应力集中, 需要较多的主锚束来提高颈部抗裂性能。锚块尺寸受弧门支铰布置、锚束布置要求、结构受力条件所控制。锚块高度一般取 4~6m, 闸墩越厚, 锚块高度也大。锚块高度大, 虽对增大锚块刚度有利, 但也减少了主锚束的预压效果。闸墩伸出闸墩外的距离, 主要考虑弧门铰的安装要求。一般锚块外伸长度为 2m 左右。锚块立面形状多为梯形, 主要根据锚束的布置而定。锚块式支承结构形式为大多数工程所采用, 如葛洲坝水利枢纽二江和大江泄水闸、鲁布革水电站表孔溢洪道、安康水电站中孔和表孔泄水道、岩滩水电站表孔溢洪道、水口水电站溢流表孔、铜街子水电站溢流表孔、大藤峡水电站泄水高孔、大峡水电站表孔溢洪道、宝珠寺水电站中孔、江坪河水电站溢流表孔、平班水电站溢流表孔、天生桥一级溢流表孔、棉花滩水电站溢流表孔、糯扎渡水电站溢流表孔、彭水水电站表孔、居甫渡水电站表孔、景洪水电站表孔等工程采用锚块式支承结构形式。图 1.2 为预应力闸墩锚块式支承结构布置图。

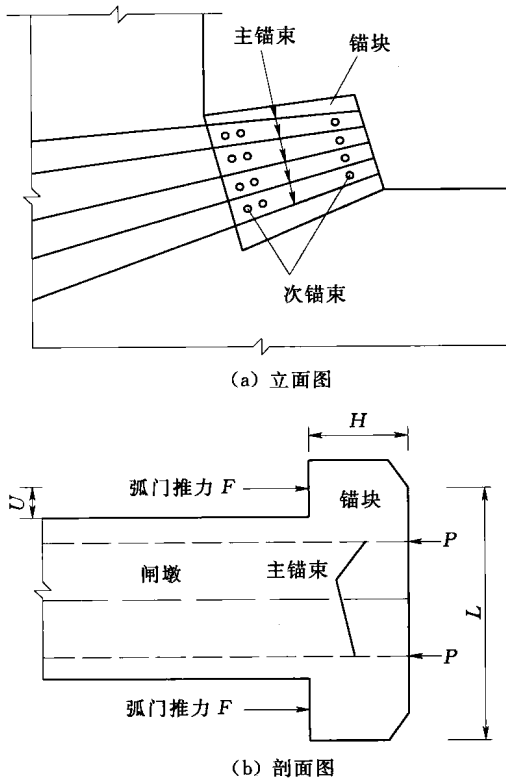


图 1.2 预应力闸墩锚块式支承结构布置图

### 1.2.2.2 预应力锚束的布置

预应力锚束布置得合理与否，将直接影响弧门支承结构受力性能与预应力效果。

#### 1. 主锚束布置

主锚束在立面上大都沿弧门水推力合力方向布置，尽量使预压力合力与弧门水推力相重合以达到有效和经济的目的是。为使支铰区附近应力集中得以扩散，主锚束在立面上多呈扇形状态布置，图 1.3 为闸墩立面主锚束布置图。据统计，国内闸墩预应力主锚束在立面布置的扩散角为  $5^{\circ} \sim 15^{\circ}$ 。

主锚束在闸墩厚度方向的布置，应力求使闸墩内部应力分布均匀，布置形式主要有平行式、弯曲式、交叉式、倾斜式等，如图 1.4 所示。平行式施工方便、布置灵活，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；弯曲式可根据结构受力特性在支承体端部将锚束弯成曲线形式，但施工较复杂，而且预应力张拉损失增加；交叉式一般用于厚度较大的中墩，

可改善支承体结构的应力状态，但需在闸墩表面预留楔形浅槽；采用倾斜式布置，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，并使施工预留孔的拉应力明显减小，但其施工布置较复杂。这四种布置形式在国内均有实例，例如岩滩水电站闸墩中的主锚束采用平行式布置，葛洲坝水利枢纽二江泄水闸闸墩中的主锚束采用交叉式布置，安康水电站闸墩中的主锚束采用弯曲式布置，漫湾水电站闸墩中的主锚束采用倾斜式布置。

主锚束上游端锚固位置及形式，可采用闸墩中预留锚洞、浅槽、竖井及锚固于闸墩上游面等。如闸墩尺寸较大，以锚固在闸墩中间合适部位为宜，在保证闸墩应力状态满足设计要求下，锚束长度越短越好，可以减少预应力的损失。

主锚束距闸墩表面最小距离为  $500 \sim 600\text{mm}$ ，间距为  $400 \sim 600\text{mm}$ ，确保主锚束锚下混凝土局部承压强度符合规范要求，还需方便施工。

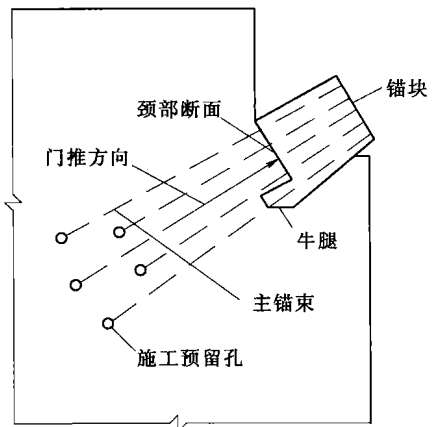


图 1.3 闸墩立面主锚束布置图



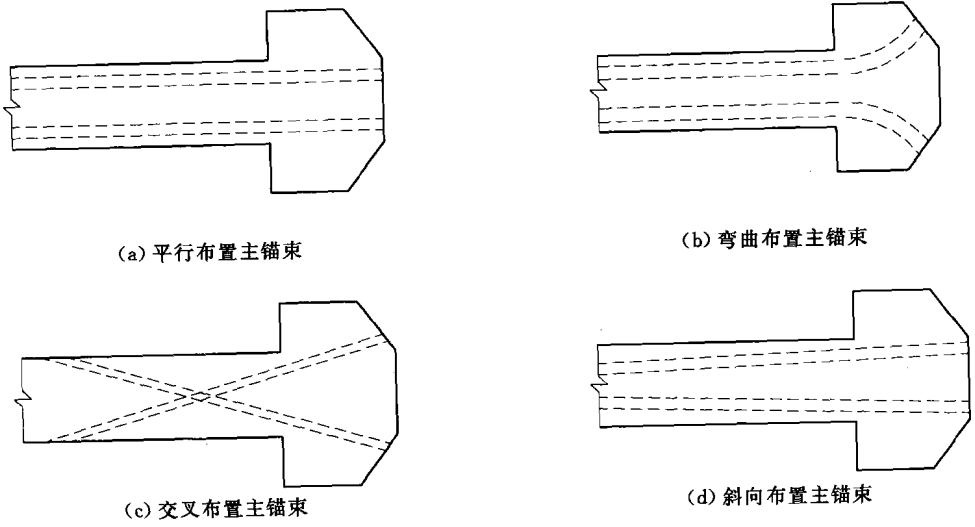


图 1.4 闸墩平面内主锚束布置图

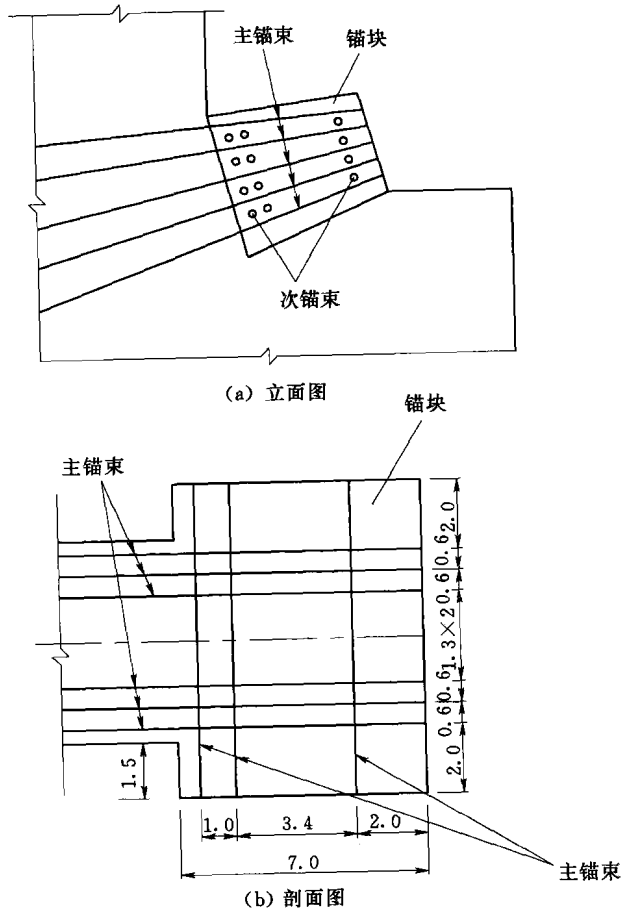


图 1.5 水平次锚束布置 (单位: m)

## 2. 次锚束布置

为了抵抗主锚束张拉及弧门推力联合作用下在支承体体内产生的次生拉应力，需在支持体上布置次锚束。近年来，根据工程经验，次锚束多采用水平布置方式。因在主锚束及弧门推力作用下，颈部附近水平向次生拉应力较大，因而在锚块颈部附近布置两排次锚束，锚束下游部位布置一排次锚束。水平次锚束布置方式如图 1.5 所示。

### 1.2.3 预应力闸墩的预应力作用<sup>[4]</sup>

#### 1.2.3.1 国内外规范对预应力作用的规定

对结构施加预应力，实质上是产生一种强迫变形，这与一般的重力荷载作用是有区别的，不过扣除各类损失值后的有效预应力也同重力荷载一样，故很多国家规范都将预应力作用作为永久作用看待。国内外相关规范对预应力的作用均有详细的规定，具体情况如下。

(1) 美国《混凝土结构设计规范》(ACI 318—2005) 第 8.2.4 规定，结构设计时应考虑一些力的影响，比如预应力、吊车荷载、振动冲击、收缩、温度变化、徐变、抗收缩混凝土的膨胀以及支座的不均匀沉降。

(2) 欧洲《混凝土结构设计规范》(EN 1992—1—1) 第 9.4.1 条中关于作用分类为：“考虑由重型预应力束所施加的预应力，该力随时间的变化不大，所以可按一个外加力考虑。”“预应力一般以  $P$  表示，它近似永久作用”。

(3) 日本土木学会《混凝土标准规范（设计篇）》(1986) 第 4.1 条规定，永久荷载是指其变化与平均值相比可忽略不计的荷载，例如静载、静土压力及预应力等，混凝土的收缩及徐变也按永久荷载处理。

(4) 欧洲国际混凝土协会《1990 CEB—FIP 模式规范（混凝土结构）》认为：预应力的一部分具有荷载性质，另一部分具有承载力的性质，相应于预应力钢筋先伸长（即施加预应力）的部分起荷载作用，相应于其余伸长（由于荷载引起）的部分起承载力作用。

(5) 前苏联国家标准《荷载与作用》(CHиП 2.01.07—85) 第 1.6 条规定：“结构或地基内由预应力引起的内力，在计算中应按永久荷载引起的内力考虑。”

(6) 国际桥梁结构协会 (IABSE) 于 1991 年 4 月在德国斯图加特市召开的结构混凝土学术讨论会上，有些专家将预应力作为外力，如同荷载一样作用于混凝土，另外有些专家则把预应力筋当作配筋，是构件整体的一部分而提供抗力。

(7) 我国《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2002) 没有明确提出预应力作用作为外加荷载，但在设计条文中体现了将其作为恒载对待。GB 50010—2002 第 7.8.1 条中“局部承压承载力计算”指出：局部受压面上作用的局部荷载或局部压力设计值，对后张法预应力混凝土构件中的锚头局压区的压力设计值，应取 1.2 倍张拉控制力。

(8) 我国《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2004) 第 4.1 条表 4.1.1 中将预应力作为永久荷载。