

# 百色水利枢纽碾压混凝土重力坝设计

麦家乡

TV642.2

18-22

(广西水利电力设计院 南宁 530023)

**摘要** 百色碾压混凝土重力坝高130 m, 因地质条件复杂, 泄流量大, 给该坝设计带来一些特殊技术问题。研究了: 坝轴线由4段折线组成, 它能充分利用有限宽的辉绿岩带作为坝基; 上游坝面防渗和大坝稳定问题; 坝基础和上游蚀变带的处理。

**关键词** 碾压混凝土 重力坝 动力分析

水利枢纽, 坝设计

## 1 工程概况

百色水利枢纽坝址处于右江上游河段平圩村附近, 下游距百色市区22 km, 是郁江综合利用开发规划中第二个梯级。坝址上游流域面积19 600 km<sup>2</sup>, 年径流量8.29 Gm<sup>3</sup>, 多年平均流量263 m<sup>3</sup>/s。枢纽是以防洪为主, 结合航运、发电, 兼顾灌溉、供水等综合利用的工程, 正常蓄水位228 m, 水库总库容5.6 Gm<sup>3</sup>, 其中防洪库容1.64 Gm<sup>3</sup>。地下电站装机容量4×135 MW, 通航建筑物为带中间渠道的二级垂直升船机, 过坝船舶吨位2×300 t 机驳船队。拦河大坝为RCC重力坝, 最大坝高130 m, 坝长700 m。通过枢纽下泄流量: 五千年一遇校核泄洪流量11 880 m<sup>3</sup>/s, 五百年一遇设计泄洪流量10 480 m<sup>3</sup>/s, 百年一遇泄洪水流量9 440 m<sup>3</sup>/s, 50年一遇控泄洪水流量3 000 m<sup>3</sup>/s。

坝址区出露的地层主要是泥盆系中上统的罗富组和榴江组, 石炭系上中下统, 以及顺层侵入的华力西期辉绿岩。坝区地震基本烈度为7度, 大坝以8度设防。拦河坝修建在第一条辉绿岩带上, 岩体厚约120 m, 水平宽度约145 m, 倾向下游偏右, 倾角约55°, 辉绿岩上下游界面存在1~5 m厚的岩性松软的接触蚀变带, 其上下游为硅质岩、泥岩、硅质泥岩等地层。辉绿岩体内有一组顺倾角(55°)节理和一组反倾角(25°~30°)节理。F<sub>6</sub>顺河断层在右河床通过坝基, 将坝基辉绿岩带切割成左右岸两段。

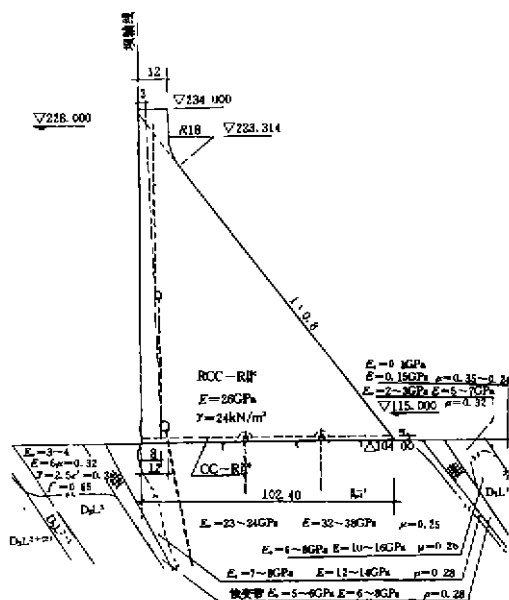
## 2 坝轴线选择

坝址河道流向正南, 为开阔“V”型河谷, 左岸有二条小冲沟切割, 右岸有4号大冲沟深切, 破坏了岸坡的完整性。平圩坝址, 唯有第一条辉绿岩带适宜修建高的混凝土重力坝, 辉绿岩产状为NW300°SW<55°, 走向与河流呈60°交角, 倾向下游偏右岸, 在右岸沿着4号冲沟上游山梁向上游延伸, 在左岸顺

着走向展布, 在河床部位岩体水平厚度140~150 m, 扣除蚀变带部份仅有135~140 m, 其岩性坚硬, 抗压强度达80~180 MPa, 微、弱风化岩层的变形模量分别为23~24 GPa与7~8 GPa。辉绿岩上下游界面蚀变带表部宽度1~5 m, 随着深度加深逐渐变窄, 约70 m深处尖灭, 其性状松软, 变形模量仅有2~6 GPa。辉绿岩上、下游为较软的硅质岩与泥岩, 其抗压强度分别为30~80 MPa与15~20 MPa, 变形模量分别为3~8 GPa与0.65~2 GPa。可见坝基岩性差异较悬殊。由于岩层倾角构成上游软弱的蚀变带、硅质岩、泥岩以50°~55°角斜插入辉绿岩底部, 对约束辉绿岩体变形能力很低, 坝基主要持力岩层辉绿岩体似斜向上游的悬臂梁, (见图1)。大坝的位置不同, 坝基应力应变将发生变化。根据一般经验, 坝踵置在上游较软的地基上, 坝踵区拉应力较小, 可利用上游硅质岩做为坝基一部份; 坝往下游移会减小坝踵垂直变位, 尤其是本坝址岩层的倾角与外荷载的合力方向基本一致的情况, 坝趾区主压应力不会过于集中; 从坝基的处理考虑, 希望坝基础比较均一, 不存在大的地质构造或软弱带, 尤其对130 m高坝来说, 如坝基跨越辉绿岩上游蚀变带, 不光是坝基础处理工程量大及要求较高, 并影响大坝施工进度。所以坝基全部放置在辉绿岩带上为宜。尽管辉绿岩宽度有限, 坝轴线选择余地很小, 在设计中还是考虑了三条坝轴线进行二维有限元分析以资比较, 上坝轴线坝踵接近上游蚀变带边缘, 中坝线坝踵与坝趾均离上下游蚀变带一定距离, 下坝线坝趾接近下游蚀变带边缘, 上、下坝线的距离仅约35 m。计算结果表明, 三条坝轴线坝的位移及应力虽有大小之差, 但皆在允许范围之内, 无实质性的区别。

上坝轴线过于接近上游蚀变带, 对上游蚀变带处理的要求较高, 坝踵区底部辉绿岩体单薄, 在施工开挖时易造成破坏, 坝基础混凝土浇筑受蚀变带

处理制约; 辉绿岩为微弱透水体, 而蚀变带和硅质岩为中等透水体, 且以 $55^{\circ}$ 角斜插入坝基, 在硅质岩层内设置防渗帷幕不仅工程量较大, 而且防渗效果也不会好。



**图1 坝基地质剖面图**

下坝轴线的大坝坝趾接近下游蚀变带，对坝基应力传递扩散不利，造成应力集中，可能导致坝趾岩体局部破坏，即使在蚀变带表部做混凝土塞及底部做固结灌浆处理，但由于下游的弱风化硅质岩及泥岩软弱，其效果也不会显著。

中坝轴线大坝的上下游坝脚均离蚀变带有一定距离, 对大坝施工干扰相对减少, 有利于加快工程施工进度, 坝踵底部有一定厚度的辉绿岩体, 也便于设置防渗帷幕, 库水从上游蚀变带沿着岩体的反倾角构造裂隙渗入坝基的途径尚有一定的长度, 只要坝基排水系统按常规做好, 大坝的稳定安全是有保证的。此外, 考虑到勘探工作的精度, 坝基上下游距蚀变带有一定余地也是必要的。

经过综合分析比较,认为中坝线优点较多,故本阶段选用中坝线。整个大坝要座落在辉绿岩带的中部,在平面上坝轴线必须大致沿岩层的走向布置,同时要满足溢流坝段垂直河道流向、工程量省及坝体稳定的要求。受以上诸多条件限制,700 m 长的坝轴线由四段折线组成;左河床坝段长88 m,垂直河

道流向,布置溢流坝;右河床坝段长105 m,向上游转折25°角,避开下游蚀变带,转折处楔形坝体可帮最高坝坝块的稳定;右岸坡坝段长315 m,再向上游转折15°角,以增加坝基稳定性及节省工程量;左岸坡坝段长192 m,向下游转折7°角,避开上游蚀变带,以便布置电站进水口及缩短引水隧洞长度。

### 3 大坝剖面设计

### 3.1 设计原则

碾压混凝土重力坝设计主要依据《混凝土重力坝设计规范》及其补充规定、《碾压混凝土坝设计导则》进行设计,剖面应满足坝体及坝基的稳定和应力条件、布置要求,坝的体形力求简单,不设纵缝,最小尺寸应满足碾压机械运行的要求。

### 3.2 剖面设计

坝顶不设防浪墙, 坝顶高程按水库正常蓄水位 228 m 与校核洪水位 231.27 m 加相应浪高与安全超高值计算, 得相应坝顶高程为 230.55 m 与 231.87 m, 比可能最大洪水位 233.45 m 低, 最终考虑可能最大洪水不漫顶因素, 确定坝顶高程为 234 m。

上游坝面采用垂直,以使坝体型简单,碾压机械可靠边碾压坝防渗体二级配RCC,坝踵离上游蚀变带可远些,亦可增大坝踵区压应力。

下游坝坡采用1:0.8,基本三角形顶点高程232 m,坝顶顶宽12 m,最低坝基面高程104 m,最大坝高130 m。

#### 4 大坝稳定及应力计算

#### 4.1 大坝稳定分析

#### 4.1.1 坝身及坝基面稳定计算

抗滑稳定按抗剪断强度公式进行计算，抗剪断强度参数采用表1所列值。

**表1 抗剪断强度值**

| 计算截面部位                  |               | $f$ | $c$<br>(MPa) |
|-------------------------|---------------|-----|--------------|
| F <sub>6</sub> 断层<br>左侧 | 混凝土与弱风化辉绿岩接触面 | 1.0 | 0.9          |
|                         | 混凝土与微风化辉绿岩接触面 | 1.1 | 1.1          |
| F <sub>6</sub> 断层<br>右侧 | 混凝土与弱风化辉绿岩接触面 | 0.8 | 0.7          |
|                         | 混凝土与微风化辉绿岩接触面 | 1.0 | 0.9          |
| RCC 层间结合面               |               | 1.1 | 0.9          |

计算结果列于表2。

从表2所列的计算成果可看出,正常水位工况安全系数最小为3.0,校核水位与排水失效工况安全系数皆大于2.5,地震工况安全系数大于2.3,满足设

计规范要求。

表2 抗滑稳定安全系数

| 计算工况 | 坝 块            |      |                |      |                |                |
|------|----------------|------|----------------|------|----------------|----------------|
|      | 4号             | 5号   | 7号             | 9号   | 10号            | 14号            |
| 正常水位 | 4.87<br>(4.47) | 3.00 | 3.09<br>(4.14) | 3.21 | 3.21<br>(3.40) | 4.40<br>(4.00) |
| 校核水位 | 4.38           |      |                |      | 2.91           | 3.99           |
| 地 震  | 3.79           |      |                |      | 2.48           | 3.34           |
| 排水失效 | 4.70           |      | 2.88           | 2.96 | 2.99           | 4.26           |

注：括弧内数值为RCC层间结合面抗滑稳定安全系数。

#### 4.1.2 大坝基础稳定分析

大坝置在有限宽的辉绿岩带上，辉绿岩上下游的蚀变带、硅质岩、泥岩岩性较软弱，F<sub>6</sub>顺河断层在右河床通过，右岸坝下游被4号冲沟深切割，坝基形成临空面，F<sub>6</sub>断层右边的辉绿岩体的物理力学参数比左边低，坝基失稳的可能性应比左河床及左岸坡大。初设阶段着重分析受F<sub>6</sub>断层影响的9号与10号坝块，以及下游临空较大的右岸坡14号坝块。并委托四川联合大学水电学院水科所对9号、10号块（长70 m）做三维地质力学模型试验及相应三维有限元计算，对14号坝块做二维地质力学模型试验及相应二维有限元计算。

地质力学模型几何比例为1:150，坝体模型按坝体结构及材料弹性模量进行模拟，坝基地质模型按地质构造及各层岩体的物理力学参数进行模拟。采用综合法与超载法进行试验，试验分析成果如下：

14号坝块稳定安全度：超载法  $K_s = 3.9$ ；综合法  $K_s = 3.8$ 。9号与10号坝块因受F<sub>6</sub>断层影响，综合稳定安全系数  $K_s = 3.3$ 。

上述计算分析成果说明，大坝坝身、坝基础面及坝基深层的稳定安全度皆满足设计规范要求。

#### 4.2 大坝应力计算

由于坝基地质条件较复杂，选择代表性的4号、5号、7号、8号、9号、10号、14号、坝块进行计算，其中9号、14号坝块做了线性二维有限元计算，5号、8号坝块做了线性三维有限元计算，14号坝块做了非线性二维有限元计算，9号、10号坝块做了非线性三维有限元计算，对最高9号坝块进行动力分析。从静力计算成果看，位移场与应力场属于常见的一般规律，坝轴线选择及坝剖面基本合理。从大坝动力特性及地震反应看，大坝结构设计是合理可行，仅在大坝头部局部应力大于坝体RCC—R<sub>90</sub>150号的容许抗拉强度，仅须在该部位上下游表面采用适当布筋的

改性混凝土，大坝竣工一年之后可以抗御8度地震。

## 5 大坝细部结构设计

### 5.1 坝体分缝

坝体分缝是根据布置、结构、施工浇筑条件及混凝土温度控制等因素确定。溢流坝段长88 m 布置4孔溢流表孔，设2条横缝分成3个坝块。挡水坝段标准横缝间距35 m，每坝块的RCC仓面控制在3 500 m<sup>2</sup>以下。不设置纵缝。

### 5.2 坝体防渗

坝上游迎水面防渗体、采用二级配RCC，其标号为R<sub>90</sub>200号S<sub>10</sub>，顶部厚3 m，底部最大厚度8 m，约为坝高的1/15。死水位203 m 以下铺设自粘性复合卷材防水层。

### 5.3 坝体排水

在坝体上游面基础灌浆排水廊道和155 m、195 m 高程的检查观测交通廊道组成的立面上，设置排水孔，在坝体内形成一道排水幕，排水孔采用拔管法造成，孔径15 cm，间距3 m。

### 5.4 坝体混凝土设计

坝体混凝土设计可分为二个典型剖面：溢流坝段剖面与挡水坝段剖面。在分析研究各坝段的工作条件的基础上，选择适用各种工作条件的混凝土，百色大坝混凝土主要分成下列几个区：

I 区：坝体内部三级配RCC；

II 区：坝体上游面二级配抗渗RCC；

III 区：坝基垫层抗渗常态混凝土（CC）；

IV 区：溢流坝面、泄洪放空孔、闸墩抗冲磨CC。

大坝混凝土分区标号性能设计见表3。挡水坝材料分区见图2。

表3 大坝混凝土分区标号性能设计指标

| 分区  | 抗压强度<br>(MPa)                            | 抗渗指标            | 抗冲刷       | 抗侵蚀   | 低热   | 抗冻              |
|-----|--|-----------------|-----------|-------|------|-----------------|
| I   | R <sub>90</sub> 15<br>R <sub>28</sub> 15 | S <sub>4</sub>  |           | 无特殊要求 | 掺粉煤灰 | D <sub>25</sub> |
| II  | R <sub>90</sub> 20                       | S <sub>10</sub> |           | 无特殊要求 | 掺粉煤灰 | D <sub>50</sub> |
| III | R <sub>28</sub> 20                       | S <sub>8</sub>  |           | 无特殊要求 | 掺粉煤灰 | D <sub>25</sub> |
| IV  | R <sub>90</sub> 40                       | S <sub>4</sub>  | 抗冲刷<br>耐磨 | 无特殊要求 | 掺粉煤灰 | D <sub>50</sub> |

## 6 大坝基础处理

本工程最大坝高130 m，坝基压应力2~4 MPa，水头高，防渗水力梯度大，具有F<sub>6</sub>断层贯穿坝基，坝踵上游蚀变带、硅质岩以55°角斜插入坝基。坝基处

理着重做好坝基防渗排水系统、F<sub>6</sub>断层与蚀变带的处理,改善和加固坝基岩体,确保大坝安全。

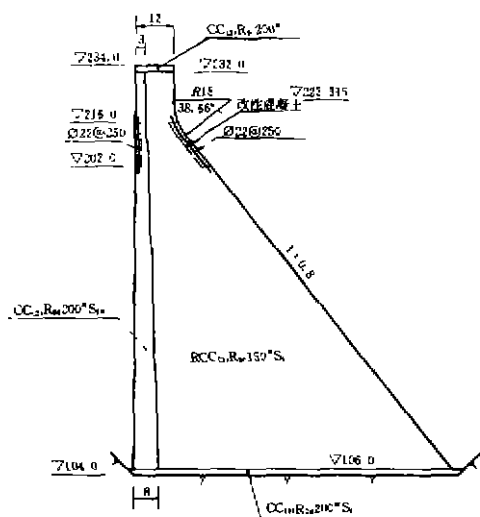


图2 挡水坝材料分区及配筋图

### 6.1 坝基防渗灌浆帷幕及排水

根据混凝土重力坝设计规范规定,帷幕须设置2排,主帷幕深度以岩体单位吸水量( $1\sim3$ )  $L_a$ 控制。可是,本坝基水文地质条件特殊,坝基辉绿岩下伏透水性强的蚀变带,含洞穴的硅质岩与泥岩岩层。辉绿岩体是微弱透水体,透水率为 $(0.1\sim10) L_a$ ,其本身就是较好的防渗体,坝基不会产生大的渗漏。上游蚀变带为中强透水体,透水率为 $(10\sim100) L_a$ ,硅质岩为中等透水体,并以 $55^\circ$ 角斜伸入坝基,坝踵底部辉绿岩体厚仅有 $30\sim40$  m,亦即坝踵处深度超过 $30\sim40$  m就是蚀变带、硅质岩中、强透水体,深度到 $70\sim80$  m,局部到 $100$  m才是泥岩微弱透水体。若要做成接地式防渗帷幕,帷幕就相当深,须在坝基开挖穿过河底的灌浆隧洞方能实施,这是不可取的。由于坝基辉绿岩为微弱透水体,以设帷幕来防止坝基漏水其作用不大。从降低坝基扬压力角度考虑,做成悬挂式帷幕,结合排水应是可行。对于坝基渗流问题,委托长委会江峡工程技术开发公司做了“百色水利枢纽坝基及左坝肩三向电阻网络渗流模型试验”。从试验成果中看出,设在硅质岩体内 $60$  m深的帷幕,帷幕前后水位差仅有 $2\sim3$  m,效果甚微。要降低坝基的扬压力主要得靠排水措施,抽排是个有效措施。可是控制大坝稳定的是下游无水的正常工况(电站不发电),常年抽水运行费会增加,对大坝安全也不利。因此,只有采用加强常规排水措施来降低

扬压力。在试验中做了不设帷幕,设一道主排水孔二道副排水孔的试验方案,从地下水等势线图(见图3)计算得主排水孔幕处渗透压力折减系数为0.21,比设计采用值0.30小,总的渗透压力比设计值小30%。坝基渗流模型试验成果表明,设置防渗灌浆帷幕作用不大。但从大坝安全考虑,防渗帷幕还须按常规设置,主帷幕1排,孔深取0.5倍坝高,副帷幕1排,斜向上游,孔深取主帷幕深的0.5倍。

坝基排水,除在上游灌浆廊道布置1排主排水孔外,在坝基中部增设2条纵向排水廊道,每条廊道内设1排孔,孔深20 m,在坝基构成3道排小孔幕。

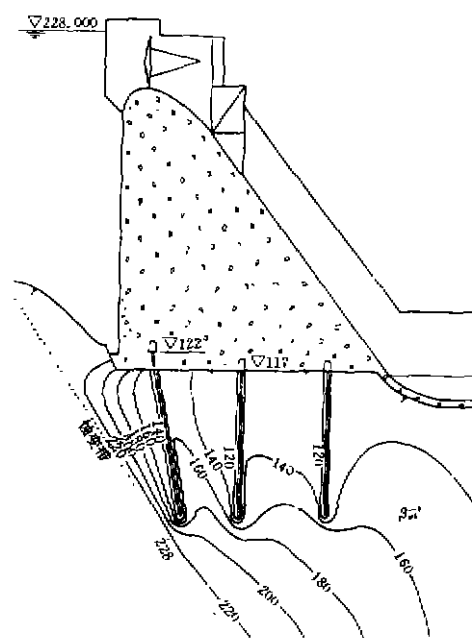


图3 坝基渗透水流等势图

## 6.2 F<sub>6</sub>断层处理

F<sub>2</sub>断层从9号坝块基础穿过,破碎带宽6 m,影响带宽2~6 m,需要处理长度140 m。处理措施按常规做混凝土塞,塞深度10 m,两侧开挖坡1:0.5,并开挖到好岩石。混凝土塞两侧及底部进行固结灌浆,孔深15 m。为了更有效堵截渗流,在坝基防渗帷幕处做一道宽10 m,厚5 m,深20 m的混凝土防渗墙。在混凝土塞下游末端设一排水反滤井,防断层内小颗粒被渗透水流带走。

### 6.3 蚀变带处理

上游蚀变带宽一般2~4 m,局部宽达7~10 m,须处理长度720 m,下游蚀变带宽0.4~6.6 m,须处理长度350 m。在可研阶段采取在顶部做混凝土塞,底部进行固结灌浆措施处理,其目的是使坝基应力向外传递扩散和阻止库水沿蚀变带往坝基渗流。现

经有限元计算发现,在坝踵附近至上游蚀变带浅表部存在一个明显拉应力区,其最大主拉应力均出现在蚀变带混凝土塞位置、混凝土塞是主拉应力集中部位,在正常水位、校核水位及地震工况时,拉应力分别为1.24 MPa、1.073 MPa、2.534 MPa。而蚀变带未作处理正常水位工况时,主拉应力仅出现在坝踵部位,其最大值仅有0.271 MPa。计算成果说明蚀变带表部做混凝土塞,主拉应力增大4.5倍,混凝

土塞也可能被拉裂,达不到设计意图,看来,塞两侧的岩性相差悬殊不宜用混凝土做塞。从坝基渗流模型试验成果也可以看出,在蚀变带表部做混凝土塞或混凝土盖板,虽可阻库水直接进入蚀变带,渗透水头可降低7~8 m,效果并不大。何况还很难保证盖板不被拉裂。

针对蚀变带处理措施,专取9号坝块作线性二维有限元计算分析,计算成果列于表4。

表4 各处理方案的应力及位移值

| 蚀变带处理方案      | 应力 (MPa)   |            |            |            | 位移 (cm) |       |      |       |
|--------------|------------|------------|------------|------------|---------|-------|------|-------|
|              | 坝 踵        |            | 坝 趾        |            | 坝 顶     |       | 坝 踵  |       |
|              | $\sigma_1$ | $\sigma_y$ | $\sigma_2$ | $\sigma_y$ | $x$     | $y$   | $x$  | $y$   |
| 不作处理         | 0.26       | -0.35      | -2.99      | -1.46      | 2.28    | -1.10 | 0.94 | -0.17 |
| 作固结灌浆处理      | 0.28       | -0.34      | -3.03      | -1.44      | 2.26    | -1.10 | 0.93 | -0.17 |
| 作混凝土塞和固结灌浆处理 | 0.43       | -0.32      | -3.35      | -1.48      | 2.22    | -1.11 | 0.91 | -0.72 |

综合上述计算分析,上游蚀变带不是非要处理不可。但从大坝安全和工程实践的经验来看,在坝踵上游较近处,辉绿岩与硅质岩之间夹一层较软弱的蚀变带,其性状比上游硅质岩差,这是大坝安全的隐忧,应采用适当的措施进行处理,如固结灌浆处理等。固结灌浆可在一定程度上减少沿蚀变带水流下渗,也可使变形模量提高20%~30%,由5~6 GPa提高到6.25~7.5 GPa,与硅质岩的变模几乎相等,不会导致应力集中的问题。关于固结灌浆的深度,曾做过20 m与40 m方案比较,有限元计算成果相差甚微,故决定采用20 m,并与坝基的固结灌浆连成一片。

下游蚀变带处理的范围仅限于离坝趾较近的6号~12号坝块下游蚀变带,处于消力池部位表部仍须做混凝土塞,底部做固结灌浆处理,其余部位仅作固结灌浆处理,根据蚀变带的宽度不同布4~6排孔,孔距3 m,孔深15~20 m。

## 7 结语

本工程坝轴线由四段折线组成,在国内外是少

见。但它能充分利用有限宽的辉绿岩作为坝基,减少基础处理工程量,是合理的选择。

在坝上游面采用二级配富胶凝材料 RCC 作为坝的防渗体,其优点是可以进行全断面碾压,防渗体与坝内部 RCC 之间没有规律的交接面,交接面不须要特别处理,可以简化施工工序。这种防渗措施在国内荣地坝最先采用以来,在普定、山仔、江垭坝等相继采用。

坝基础地质构造缺陷的处理措施,应根据地质条件进行具体分析,否则达不到设计意图,本工程上游蚀变带的处理就是一个例。

百色工程坝基灌浆防渗帷幕,对防渗与降低坝基扬压力的作用不大,降低扬压力主要是靠排水,这是坝基特殊的水文地质条件所决定的。

### 作者简介

麦家乡 男 高级工程师

(收稿日期:1996-10-24)

## Design on the RCC Gravity Dam of Baise Hydroproject

Mai Jiexiang

(Guangxi Design Institute of Water Resources & Electric Power)

**Abstract** This paper investigates the design of Baise Hydroproject. Its dam axis comprises four sections of straight line, thus fully utilizes the limited diabase dam foundation. The upstream impervious coating, dam stability, foundation treatment and the treatment of upstream alternative zone are also discussed.

**Key words** RCC, gravity dam, kinetics analysis