

# 混凝土面板堆石坝接缝止水的实验和分析\*

刘浩吾

(四川联合大学水利系, 成都, 610065)

**文 摘** 混凝土面板堆石坝周边缝止水的损坏是其漏水的主要原因。针对工程实用形式的周边缝铜止水和 PVC 止水, 首次进行了承受错位变形的破坏实验, 揭示了止水极限变形能力和开裂规律, 提出了接缝止水的计算模型、设计准则及提高铜止水极限抗裂能力的工程措施。

**关键词** 混凝土面板堆石坝, 接缝止水, 破坏实验, 设计准则。

## 1 引 言

混凝土面板堆石坝是近年来坝工技术中的重大成就, 具有很强的竞争力。国外已建成百米以上高坝 20 座, 我国兴建中的天生桥面板坝高达 178m。

面板坝的防渗体系由底座—接缝—面板构成。其中周边缝和竖向缝是面板中的结构间断面, 起着吸纳其不均匀变形的作用。实践证明, 接缝止水防漏是保障大坝防渗能力的关键。纵观现代混凝土面板坝的发展史, 最严重的漏水事故常起因于周边缝止水损坏。美国 New Exchequer 面板坝 (坝高 150m, 1966 年竣工) 是由高 98m 的重力拱坝加高而成, 面板连接在老坝下游面 56m 高处, 建于由抛填堆石向辗压堆石的过渡期, 局部采用辗压堆石。蓄水后面板与老坝连接的周边缝的变形持续增大, 漏水渐多, 最大  $13.7\text{m}^3/\text{s}$ , 用抛投砂砾料堵漏, 曾减至  $0.23\text{m}^3/\text{s}$ , 后又逐年增大, 终于在 1985 年被迫放空水库大修<sup>[1]</sup>。70 年代以来的现代型面板坝中, 最大漏水事故发生在哥伦比亚 Anchicaya 坝<sup>[2]</sup> (坝高 140m, 1974 年竣工)。其右岸面板垫层曾为山洪冲毁, 回填质量欠佳。漏水最大达  $1.8\text{m}^3/\text{s}$ , 被迫放水检修。检查证实面板完整, 而岸坡周边缝, 特别是右岸, 变形严重, 成为主要漏水部位。经填缝处理, 漏水量降为  $0.18\text{m}^3/\text{s}$ 。综上所述, 周边缝止水的完整性是面板坝防渗关键所在, 应予以充分重视。为此, 本文采用铜止水和 PVC 止水的实用型式, 首次进行了受力—变形关系测定和破坏实验。当前, 止水设计仍处在经验阶段。关于止水片最大变形, 澳大利亚的经验有代表性。该国 6 座坝观测到的最大沉降位移为 21.5mm, 约为止水片不断裂极限值的 1/6。观测最大开度为 12mm, 其安全度与上述类似。观测到的最大剪切位移, 铜止水、不锈钢止水各为 7.5, 7.0mm, 可能接近 T 型接头和 W 型止水片的极限值<sup>[3]</sup>。关于止水的实验研究, 墨西哥最近发表了一些止水承受变形和内水压的实验结果<sup>[4,5]</sup>, 该实验是把铜和 PVC 止水分别埋入混凝土试块, 施加不大的沉降、张开、错动变形和水压, 观察漏水与否。铜止水试件焊成方盒形, 变形时焊缝开裂漏水 (似属于试验方法不当); 铜片与混凝土粘结不牢也会漏水; 缝口铺飞灰有助于堵漏; 未见止水本身的破坏实验和受力测试。

\* 国家教委博士点基金项目。

到稿日期: 1993-09-30。

2 止水片承受张开和沉降变形的分析

周边缝常用多重止水,其中主止水为铜止水(F,W型)和PVC止水。其防漏能力取决于本身的完整性及与混凝土的牢实嵌固。周边缝的变形具有空间性质,一般包括3个相互正交的分量:张开、沉降(垂直于板面)、错动(或称切向变形,平行于缝面),如图1所示。图2所示铜止水和PVC止水是有代表性的工程实用型式。F型铜止水厚1.5mm,拱肋高60mm、宽15mm,见图2(a)。PVC止水厚6mm,见图2(b)。F或W型铜止水在承受接缝张开、沉降变形时,拱肋首先展平,而后受拉,终至拉断。铜止水不至于断裂的最大张开量为

$$D = (2h + \frac{\pi}{2}b - b)(1 + \epsilon_{\max}) - b \tag{1}$$

式中  $h$  为拱肋高度,  $b$  为拱肋宽度,拱肋顶视为半圆;  $\epsilon_{\max}$  为紫铜极限拉应变,可取为慢加载极限值,我们由国标试验实测为10.13%。由式(1)很容易得到该铜止水张开极限值为126.6mm。对沉降分量,类同,极限沉降量为  $(D + b)$ ,即沉降量不大于  $(D + b)$  时不至于开裂。

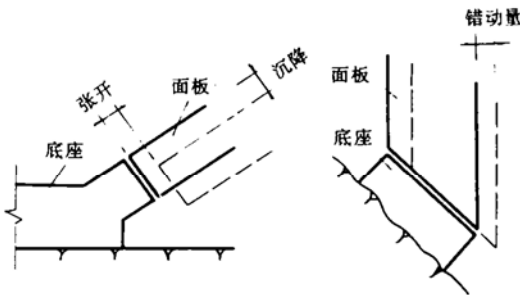


图1 周边缝空间变形的三分量

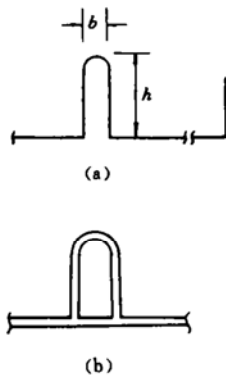


图2 工程中应用的铜止水和PVC止水

当接缝受压时,压力由缝内嵌入木板承受。事实上,铜止水必须免受侧向挤压,以免拱肋折断。面板坝周边缝的最大变形的原型观测见表1。可见周边缝的张开和沉降量一般均小于100mm,亦即小于铜止水对张开、沉降变形的承受能力。唯一的例外是Anchicaya坝,而该观测值得自该坝右岸,正如前述,这实为山洪事故所致,不属于通常情况。故结合下述实验结果可以判明,引起铜止水开裂的主要因素是错动变形,而非张开或沉降。

表1 现代混凝土面板堆石坝周边缝最大变形的观测值

| 坝名        | 国家   | 坝高<br>(m) | 张开<br>(mm) | 沉降<br>(mm) | 错动<br>(mm) | 坝名         | 国家   | 坝高<br>(m) | 张开<br>(mm) | 沉降<br>(mm) | 错动<br>(mm) |
|-----------|------|-----------|------------|------------|------------|------------|------|-----------|------------|------------|------------|
| Ariea     | 巴西   | 160       | 22.8       | 55.2       | 24.4       | Winneke    | 澳大利亚 | 85        | 9          | 19         | 24         |
| Salvajina | 哥伦比亚 | 148       | 7.3        | 19.0       | 15.9       | Mackintosh | 澳大利亚 | 75        | 4.8        | 20         | 2.8        |
| Anchicaya | 哥伦比亚 | 140       | 125        | 100        | 15         | Bastyan    | 澳大利亚 | 75        | 4.8        | 21.5       |            |
| Khao Laem | 泰国   | 130       |            | 9.4        | 5.9        | 成屏         | 中国   | 74.6      | 11.1       | 22.6       | 18.6       |
| Shiroro   | 哥伦比亚 | 125       | 30         | 50         | 21         | Kangroo    | 澳大利亚 | 60        | 5.5        |            |            |
| Reece     | 澳大利亚 | 122       | 7          | 70         |            | 西北口        | 中国   | 95        | 6.8        | 10.4       |            |
| Cethana   | 澳大利亚 | 110       | 12         |            | 7.5        | 关门山        | 中国   | 58.5      | 2.4        | 4.4        | 1.7        |
| Murchison | 澳大利亚 | 94        | 12         | 9.6        | 7          | Serpentine | 澳大利亚 | 39        | 1.8        | 5.3        |            |
| Kotmale   | 斯里兰卡 | 90        | 2          | 12         | 4          | Paloona    | 澳大利亚 | 38        | 0.5        | 5.5        |            |

### 3 铜止水和塑胶止水变形能力和实验研究

实验目的是测定 F 型铜止水和 PVC 止水承受错动(切向变形)的极限能力和变形特性。实验在万能材料试验机和 500t 型岩石三轴试验机上进行, 后者用于 PVC 试件以满足其位移行程要求。为模拟止水片在实际工程中承受错动变形时受力状态和边界条件(包括两翼端部的嵌固), 特制专用试验架(由型钢制成), 可实现铜止水的接触约束的错动变形试验和无接触约束的错动变形试验。试件两翼用钢板夹固, 并有环氧树脂粘牢, 使止水两翼成为固端。沿止水长度方向对可动一翼施加变位, 量测作用力。逐级增加变位, 直至开裂。铜止水上装竖向和水平向千分表和应变花多组。

F 型铜止水错动变形的力-变位试验共完成 18 件。试件长 10~30cm, 缝宽 15mm 或 65mm, 后者称为宽缝试验, 其止水拱肋仍宽 15mm, 而接缝宽为 65mm。PVC 止水试件长 10cm。图 3 绘出错动变形  $P-\delta$  试验和破坏试验的典型记录。图中圆圈内数字为试件编号。

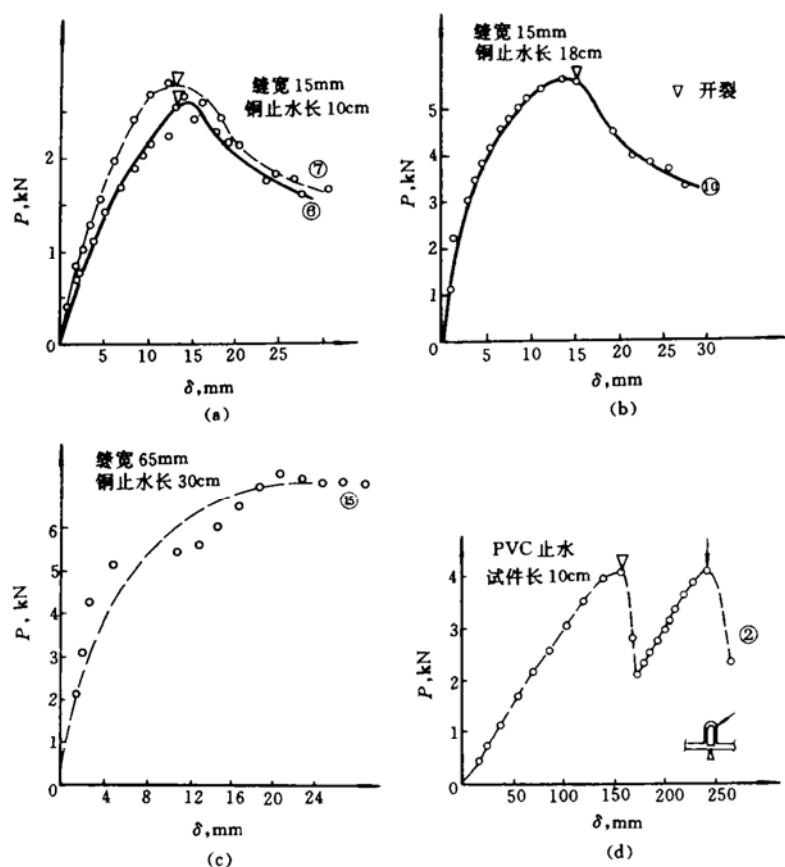


图3 F型铜止水和PVC止水错动变形和破坏试验的  $P-\delta$  曲线

由 F 型铜止水错动变形和破坏试验发现如下基本特点:

a) 变形与开裂规律。开裂前的  $P-\delta$  曲线, 初期基本上是线性的, 接近开裂时呈现非线性, 见图 3。止水的切向承载能力很小, 仅约  $20\text{kN/m}$ 。结构作用微弱。开裂总是出现在

固定支座一侧的上边缘的拱肋底脚。随变位增加开裂扩展, 裂缝加长变宽。不论试件长短、缝面宽窄, 开裂部位和扩展规律相同。

b) 拱肋偏转与接触约束。随错动变形的施加, 拱肋出现反对称的侧向偏转变形, 如图 4。拱肋上部向可动支座一侧的型钢挤压, 下部向固定支座一侧挤压。这表明接缝侧面对拱肋的偏转变形会产生接触约束。侧向约束使止水变位柔性减小、受力复杂化而加速开裂 (图 3 (a) (b))。

c) 自由偏转。为消除侧向约束以提高承受错动变形的能力, 进行了宽缝试验。结果拱肋偏转时不再约束而呈自由偏转, 其测试曲线如图 3 (c)。接触约束时错动极限为 15mm, 而自由偏转条件下提高为 23mm, 增大 53.3%, 确有效果。

本试验成果 1989 年曾供天生桥一级面板坝接缝设计参考应用, 文献 [6] 指出: “室内接缝试验表明, 在缝宽 15mm 情况下铜止水错位 15mm 后开裂, 用较大的缝宽, 破坏变形增大。本工程缝宽采用 25mm。” 本成果还在铜街子深覆盖层上面板坝可行性论证中参考应用。

据偏转自由有利于变形能力, 故在高坝的陡河岸周边缝的细部设计中, 建议采用局部宽缝形式以提高抗裂能力, 如图 5。即拱肋外围包裹泡沫, 浇入混凝土, 工艺简便。止水侧翼与面板底面贴接处可涂沥青, 放松对其变形的制约, 有利于抗裂。

以不锈钢片代替铜止水是止水工艺的新发展。优点是造价低、强度高、施工不易损坏<sup>[7]</sup>。这里要指出的是, 它的错动变形极限较大。低碳不锈钢的极限拉伸达 25% 以上, 按线性关系推算, 同一型式的 F 型止水错动极限可达 37.0mm, 即比铜止水约大 1.5 倍。

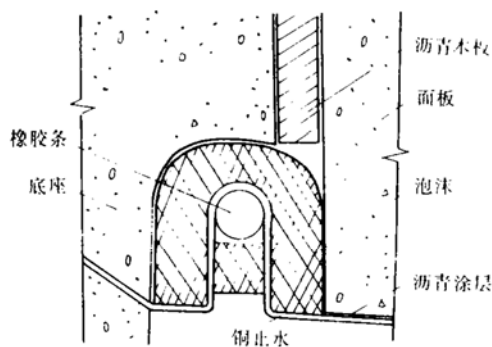
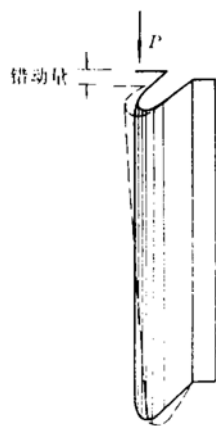


图 4 铜止水承受错动变形时拱肋的侧向偏转

图 5 陡岸周边缝局部加宽的细部构造示意图

## 4 接缝止水的计算模型、特性参数和设计判据

按实测曲线, F 型铜止水错动变形时的  $P-\delta$  关系可概化为双曲线模型, 有

$$P = \frac{\delta}{a + b\delta} \quad (2)$$

式中  $a, b$  为参数, 在  $\delta - \delta/P$  坐标中式 (2) 为一直线, 易定其值, 得  $a$  为 1.10,  $b$  为 2.36 (缝宽 15mm) 或  $a = 1.52, b = 3.52$  (缝宽 65mm); 开裂极限错位  $u_c = 1.5\text{cm}$  (缝宽 15mm),  $2.3\text{cm}$  (缝宽 65mm)。式中,  $P, \delta$  各以  $\text{kN/cm}$ ,  $\text{cm}$  为单位。

F 型铜止水和 PVC 止水在张开、沉降变形时的应力应变关系为

铜止水
$$\left. \begin{aligned} \sigma &\doteq 0, && \text{当 } d \leq l; \\ \sigma &= E\epsilon, && \text{当 } d < \epsilon_P \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

PVC 止水
$$\sigma = E\epsilon \quad (4)$$

式中  $l$  为拱肋展开增加的宽度; $\epsilon_P$  为应力峰值时的应变,可取 5.5%; $E$  为杨氏模量, $E_{\text{铜}} = 6500\text{MPa}$ , $E_{\text{PVC}} = 5\text{MPa}$ 。

嵌缝沥青木板在承压、受剪时的应力应变关系可按材料力学计算,即压应力  $\sigma = E\epsilon$ ,剪切应力  $\tau = f\sigma$ 。这里  $E$  为横木纹弹性模量,约 800MPa; $f$  为摩擦系数,约为 0.1~0.2。

据此以天生桥面板坝为例估计止水的结构作用,张开和错动时铜止水和 PVC 止水在面板中产生的应力上限各为 81, 54kPa,均小于 100kPa,故其结构作用可忽略。即接缝缝面的结构作用主要靠缝内木板传递。按上述实验分析,接缝止水的变形允许值可统一表达为

$$[\Delta] = \Delta / K \quad (5)$$

式中  $\Delta$  代表张开、沉降或错动变形; $[\Delta]$  为变形允许值; $K$  为安全系数,建议取为 1.2~1.4。当  $K$  取为 1.25 时,上述铜止水、同型不锈钢止水和 PVC 止水的变形允许值见表 2。

表 2 面板坝接缝金属止水和 PVC 止水允许变形建议值

| 止水类型               | 张开<br>(mm) | 沉降<br>(mm) | 错 动        |            |
|--------------------|------------|------------|------------|------------|
|                    |            |            | 缝宽 15 (mm) | 缝宽 50 (mm) |
| F 型铜止水 (肋高 60mm)   | 101        | 113        | 12         | 18         |
| F 型不锈钢止水 (肋高 60mm) | 117        | 129        | 30         | 45         |
| PVC 止水             | 120        | 120        | 120        | 120        |

表 2 变形允许值与表 1 观测值对比,易见周边缝止水片的开裂控制在金属止水,而金属止水的开裂控制在错动变形。

5 结 论

(1) 通过本文的实验、变形计算及其与观测值的对比表明,F 型铜止水对张开、沉降两种变形的适应能力强,而 PVC 止水对张开、沉降和错动三种变形的适应能力强,可变形 100mm 而不破裂。而铜止水对切向变形颇为敏感,承受能力低,变形极限仅 15mm,若干面板坝实测值已接近此极限,个别甚或突破。故在周边缝细部设计以及观测中应特别注意这一关键环节。

(2) 本文提出的提高周边缝 F 型金属止水错动变形能力的建议,包括拱肋外包泡沫形成局部宽缝,采用低碳不锈钢止水等是可行的。

(3) 本文提出的接缝止水的计算模式、特性参数和设计判据,可供面板坝工程设计中参考应用。

本项实验得到电力部、水利部昆明勘测设计院协助,刘晓青 ([美] 夏威夷大学)、饶宏玲 (电力部成都勘测设计院) 等参加了工作,特致谢。

## 参 考 文 献

- 1 Leps T M, et al. New Exchequer Dam, California. In: Concrete Face Rockfill Dams——Design, Construction and Performance. (eds) Cooke J B, Sherad J L. 1985. 15~26.
- 2 里加拉多 G 等. 安奇卡亚混凝土面板堆石坝混凝土面板的性状. 见: 国外混凝土面板堆石坝. 北京: 水利电力出版社, 1988. 246~255.
- 3 菲茨帕特里克 M D 等. 混凝土面板堆石坝的设计. 见: 国外混凝土面板堆石坝. 北京: 水利电力出版社, 1988. 61~77.
- 4 Montanez L E. The Perimetric Joint Design for Aguamilpa Dam. Water Power and Dam Construction, 1992 (4): 22~28.
- 5 蒙塔内斯 L E 等. 阿瓜密尔巴坝的设计. 见: 国际高土石坝学术研讨会论文集. 北京, 1993. 232~247.
- 6 杨世源. 天生桥混凝土面板堆石坝的设计. 见: 混凝土面板堆石坝会议论文集. 南京: 河海大学出版社, 1990. 306~310.
- 7 瓦蒂 A 等. 混凝土面板坝的施工. 见: 国外混凝土面板堆石坝. 北京: 水利电力出版社, 1988. 78~92.

## Tests and Analysis of Joint Waterstops of Concrete Face Rockfill Dams

*Liu Hao - wu*

(Department of Hydraulic Engineering, Sichuan Union University, Chengdu)

**Abstract** Damage of perimeter joint waterstops is the principal cause of leakage in the concrete face rockfill dams. For the first time the failure tests have been performed on the F - type copper waterstop and PVC waterstop under tangential displacement. The results revealed the regularity of the waterstop rupture. The computation model and design criteria of waterstops are presented, and the engineering measures for increasing the limit displacement of the copper waterstop discussed.

**Key words** concrete face rockfill dams, failure test, joint waterstops, design criteria.