

刘数华 方坤河 刘六宴 著

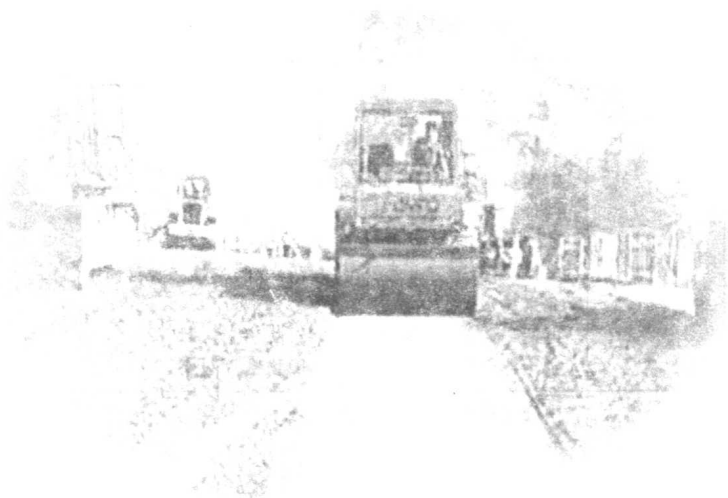
水工碾压混凝土 的抗裂性能



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

水工碾压混凝土 的抗裂性能

刘数华 方坤河 刘六宴 著◎



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书从材料的角度出发,通过全面研究水工碾压混凝土的抗裂性能认为碾压混凝土的抗裂性能优于常态混凝土,提出了提高碾压混凝土抗裂性能的方法和措施。本书的主要内容有混凝土裂缝的发展、碾压混凝土的变形性能、碾压混凝土的热学性能和提高碾压混凝土抗裂性能的研究等。

本书可作为碾压混凝土科研、设计、施工等人员的参考书,也可作为高等院校水工结构和建筑材料专业的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

水工碾压混凝土的抗裂性能 / 刘数华, 方坤河, 刘六宴著. —北京: 中国水利水电出版社, 2006

ISBN 7-5084-4174-5

I. 水... II. ①刘... ②方... ③刘... III. 碾压土坝: 混凝土坝—抗裂性—研究 IV. TV642.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第141593号

书 名	水工碾压混凝土的抗裂性能
作 者	刘数华 方坤河 刘六宴 著
出版 发行	中国水利水电出版社(北京市三里河路5号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn
经 售	电话: (010) 63202266 (总机)、68331835 (营销中心) 北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市兴怀印刷厂
规 格	850mm×1168mm 32开本 6.125印张 190千字
版 次	2006年12月第1版 2006年12月第1次印刷
印 数	0001—3000册
定 价	20.00元

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

最广泛使用的结构材料是混凝土，通常是由波特兰水泥与砂、石子及水拌制而成。据资料统计，全世界水泥年产量已达到 20 亿 t，混凝土年使用量大约为 30 亿 m^3 ，可以说混凝土是社会建设中使用量最大的一种材料。

混凝土自古希腊和古罗马时期诞生以来，已经发展了 2000 多年。在漫长的岁月中，混凝土技术不断地进步和发展。从材料的角度讲，混凝土技术的发展有三次质的飞跃：

第一，波特兰水泥的问世。波特兰水泥的产生标志着真正意义的水泥混凝土的问世。

第二，外加剂的出现。高效减水剂降低了混凝土中水泥的用量，提高了混凝土拌和物的工作性，提高了混凝土的强度、密实度及耐久性；引气剂通过在混凝土中引入均匀细小的密闭气泡，极大地提高了混凝土的抗冻性和耐久性；促凝剂和缓凝剂使混凝土的凝结时间更容易被我们所控制……自此，打破了传统的混凝土四要素（水泥、水、砂和石）框架，混凝土的强度、耐久性等性能也有了极大的提高，标志着现代混凝土的出现。

第三，第六组分的研究。第六组分指的是矿物掺合

料作为辅助胶凝材料的使用。粉煤灰具有形态效应、火山灰效应和微集料填充效应，作为掺合料掺入混凝土中，能改善混凝土的性能；矿渣是玻璃体，自身就能发生水化反应，能改善混凝土的各方面性能；硅粉能极大地提高混凝土的强度和耐久性……这些矿物本来都是一些工业废料，利用到混凝土中不仅减少了污染，降低了混凝土的水泥用量，而且提高了混凝土的各方面性能。

以上的每次飞跃都意味着混凝土科学向前迈出了重要的一步，都极大地推动了混凝土科学和技术的发展。

坝工界一直认为“无坝不裂”，坝体的裂缝问题或混凝土的抗裂性能一直备受各国科学家的关注，碾压混凝土坝也一样或多或少地存在裂缝。如何预防和减少碾压混凝土开裂，便成为一个极其重要的课题。

碾压混凝土是用振动碾压实的超干硬混凝土。碾压混凝土坝是坝工界在寻求快速、经济地建设混凝土重力坝过程中产生的一种新坝型。由于这种坝型造价低、建设速度快，在较短时间内获得了世界性的认可。碾压混凝土同其他混凝土一样，也是由水泥、掺合料、砂石骨料、外加剂和水等材料所组成，但各组分所占比例同常态混凝土有较大差别。材料组成和施工工艺的差别，也就带来了性能上的差别。碾压混凝土的变形性能和热学性能的改善，对提高其抗裂性能是至关重要的。

本书从材料的角度出发，首先全面研究水工碾压混凝土变形性能和热学性能，提出改善水工碾压混凝土变形性能和热学性能的方法；其次，将碾压混凝土变形性能和热学性能与常态混凝土进行对比，得出碾压混凝土

的抗裂性能优于常态混凝土的结论，为大力推广碾压混凝土技术提供理论依据；最后，提出提高水工碾压混凝土抗裂性能的方法，从而达到预防或减少裂缝的出现、提高水工碾压混凝土运行的安全性和使用寿命的目的。

本书作者长期从事水工建筑材料研究，特别是近年来始终关注碾压混凝土的抗裂性能，曾主持了“九五”国家科技攻关项目“提高碾压混凝土抗裂能力的研究”等科研工作，在水工碾压混凝土的抗裂性能方面取得了卓有成效的研究成果，并在此基础上完成了本书。

书中引用了大量的国家电力公司成都勘测设计研究院科研所、南京水利科学研究院、长江科学院、武汉大学等多家单位的内部科研资料，在此深表感谢。

由于作者的学识和时间等原因，本书还有未完善之处，敬请读者指教！

作者

2006年9月 清华园

目

录

前言

第一章 绪论	1
第一节 碾压混凝土的筑坝材料新进展	1
第二节 碾压混凝土的开裂调查和研究进展	5
第三节 我国碾压混凝土抗裂特性初探	12
第二章 混凝土裂缝的发展	20
第一节 混凝土不受荷载情况下裂缝的生长	20
第二节 混凝土荷载作用下裂缝的发展	23
第三节 混凝土裂缝的产生及预防	27
第三章 碾压混凝土的变形性能	34
第一节 碾压混凝土的抗压弹性模量	34
第二节 碾压混凝土的极限拉伸变形	43
第三节 碾压混凝土的徐变	53
第四节 碾压混凝土的干缩	66
第五节 碾压混凝土的自生体积变形	77
第六节 碾压混凝土的温度变形	85
第七节 小结	87
第四章 碾压混凝土的热学性能	93
第一节 碾压混凝土胶凝材料的水化热	93
第二节 碾压混凝土的绝热温升	106
第三节 碾压混凝土的导温系数、导热系数和比热	114

第四节 小结	122
第五章 提高碾压混凝土抗裂性能的研究	125
第一节 混凝土抗裂性能的评价	126
第二节 高韧低脆水泥研究	132
第三节 粉煤灰对混凝土抗裂性能影响的试验研究	136
第四节 提高混凝土抗裂性能的试验研究	143
第五节 MgO 对碾压混凝土自生体积变形的影响	151
第六节 粉煤灰对碾压混凝土抗裂性能的影响	158
第七节 硅粉对碾压混凝土抗裂性能影响的试验研究	163
第八节 磷矿渣对碾压混凝土抗裂性能的影响	167
第六章 结论与展望	174
第一节 结论	174
第二节 展望	175
参考文献	178

第一章 绪 论

第一节 碾压混凝土的筑坝材料新进展

一、碾压混凝土筑坝技术的发展

1960~1961年，中国台湾修筑石门坝心墙，首次采用了碾压混凝土（Roller Compacted Concrete，简称 RCC）。当时的 RCC 是在普通的混凝土工厂备制的，采用连续级配，骨料最大粒径 76mm。胶凝材料掺量 $107\text{kg}/\text{m}^3$ ，混凝土拌和物用自卸卡车运输，用推土机平仓，每层厚 30cm，借助自卸卡车和推土机压实。

1974~1982年，巴基斯坦在修复塔贝拉水利枢纽建筑物时，利用枯水期浇注了 250 多万 m^3 的碾压混凝土，可将其看作是碾压混凝土发展的最重要的里程碑。骨料采用筛选的当地材料，其最大粒径 150mm，细料（小于 0.075mm）用量约为 10%。硅酸盐水泥用量开始为 $133.5\text{kg}/\text{m}^3$ ，后期为 $110\text{kg}/\text{m}^3$ ，混凝土由连续式拌和设备拌制，用自卸卡车运往浇注地点，用振动碾压实。在实现混凝土高速浇注工艺方面，塔贝拉采用碾压混凝土的经验是成功的。

日本碾压混凝土研究是在混凝土坝工程事务所的领导于 1974 年开始的。日本首次采用碾压混凝土筑坝技术（起名 RCD 施工法）的是 1980 年修建的 89m 高的岛地川坝和玉川坝基础板浇注。碾压混凝土胶凝材料（70% 硅酸盐水泥和 30% 粉煤灰）用量为 $130\text{kg}/\text{m}^3$ 。

1974 年美国陆军工程师兵团研究了碾压混凝土重力坝方案，作为土坝设计替代方案，为 1982 年竣工的柳溪坝奠定了基础。柳溪坝是世界上第一座全部采用碾压混凝土修筑的不设段间缝的



大坝。坝高 52m，坝顶长 518m，混凝土方量 33 万 m^3 。混凝土采用破碎的人工骨料拌制，骨料最大粒径 76mm，细粒料用量为 4%~10%。胶凝材料视不同坝区而定。水泥用量为 $47\text{kg}/\text{m}^3$ ，粉煤灰用量为 $19\text{kg}/\text{m}^3$ ，大坝内区碾压混凝土浇注层最厚为 24~34cm，并采用激光束控制浇注水平度。

我国碾压混凝土筑坝技术已经非常成熟，达到了世界先进水平，这主要表现在以下几个方面：

(1) 我国已建工程最多，在建及规划设计中的工程最多。

(2) 已建、在建的不少工程代表了国际最先进的水平。例如，沙牌坝高 132m，是目前世界上最高的碾压混凝土拱坝；龙首坝高 80m，是世界上已建的最高的碾压混凝土薄拱坝，是厚高比 0.17 的双曲拱坝；招徕河坝高 105.5m，是世界上在建的最高的碾压混凝土薄拱坝，是厚高比 0.17 的双曲拱坝；龙滩坝高 216.5m，是世界上在建的最高的碾压混凝土重力坝。至 2005 年底，我国已建成的碾压混凝土坝 61 座。在建的碾压混凝土坝 35 座，正在规划、设计及即将施工的碾压混凝土坝 31 座。此外，还有不少的碾压混凝土围堰工程。

二、碾压混凝土施工方法的发展

(一) 贫碾压混凝土施工法

贫碾压混凝土内部混凝土采用的胶凝材料（即硅酸盐水泥及火山灰材料）含量小于 $100\text{kg}/\text{m}^3$ ，其中火山灰材料掺量高达 40%。大约按层厚 30cm 铺筑。例如，威洛·克里克、格林德斯顿峡及蒙克斯威尔坝就是这种类型的坝。

(二) 碾压混凝土坝施工法

碾压混凝土坝施工法起源于日本，与世界其他地方采用的方法不同。铺筑层厚 50~100cm，从大坝上游向下游面切割成横缝。内部碾压混凝土用一层 2~3m 厚的常规混凝土保护，对每道缝，采用止水及排水综合措施。这类坝所采用的胶凝材料含量为 $120\sim 130\text{kg}/\text{m}^3$ ，其中火山灰材料掺量为 20%~35%。典型的例子是岛地川坝和玉川坝。



(三) 高灰浆碾压混凝土施工法

高灰浆碾压混凝土具有很低的孔隙率，层间结合良好，每一层表面不进行处理。混凝土铺筑层厚为 30cm，胶凝材料含量通常在 $150\text{kg}/\text{m}^3$ 以上，但是火山灰材料掺量大，一般为 60%~80%。因此，硅酸盐水泥用量低。例如上静水坝、圣·尤基尼亚及莱尔波特坝。

(四) 碾压混凝土施工方法的分布

早期的碾压混凝土坝多采用低胶凝材料用量的贫浆碾压混凝土，而从目前较为稳定的发展趋势看，现在的碾压混凝土坝多采用高灰浆碾压混凝土。表 1-1 列出的是当前碾压混凝土筑坝混凝土类型的分布情况，从中可以看出：高灰浆碾压混凝土几乎占到一半。

表 1-1 当前碾压混凝土施工方法的分布

碾压混凝土施工方法	所占比例 (%)
高灰浆碾压混凝土（胶凝材料用量 $150\text{kg}/\text{m}^3$ 以上）施工法	46.5
中等胶凝材料用量碾压混凝土（胶凝材料用量 $100\sim 140\text{kg}/\text{m}^3$ ）施工法	21.5
RCD 施工法	18.0
贫碾压混凝土（胶凝材料用量低于 $99\text{kg}/\text{m}^3$ ）施工法	12.5
新型硬填坝	1.5

三、碾压混凝土筑坝材料进展

到目前为止，已建和在建的碾压混凝土坝中的 60% 分布在中国、日本、美国和西班牙。这四个国家的碾压混凝土筑坝技术也处于世界领先水平。

(一) 中国

中国的碾压混凝土坝平均胶凝材料用量为 $173\text{kg}/\text{m}^3$ ，其中包括 $79\text{kg}/\text{m}^3$ 水泥和 $94\text{kg}/\text{m}^3$ 的活性掺合料（活性掺合料约占总胶凝材料的 54%）。所有的碾压混凝土都掺用了同一类的活性掺合料（即 CaO 含量低的粉煤灰）。



(二) 日本

日本的碾压混凝土坝均为 RCD 施工法建造, 平均坝高为 87m, 混凝土平均浇筑方量为 59 万 m^3 , 其中碾压混凝土为 37 万 m^3 , 占混凝土总方量的 63%。所有碾压混凝土坝的胶凝材料用量为 $120\text{kg}/\text{m}^3$ 或 $130\text{kg}/\text{m}^3$ 。对于坝高在 100m 以下的碾压混凝土坝, 其胶凝材料用量几乎都是 $120\text{kg}/\text{m}^3$, 而坝高在 100m 以上的几乎都是 $130\text{kg}/\text{m}^3$ 。所有的碾压混凝土坝均掺加了活性掺合料, 几乎都是低钙粉煤灰。

(三) 美国

美国碾压混凝土胶凝材料中活性掺合料的比例变化范围很大, 从 0 (美国在碾压混凝土技术领先国家中是唯一一个在碾压混凝土中可以不掺掺合料的国家) 到 69% (上静水坝)。平均胶凝材料用量为 $138\text{kg}/\text{m}^3$, 比日本的碾压混凝土坝高, 但比中国低, 而且也低于世界用量的平均水平。

(四) 西班牙

西班牙碾压混凝土坝的平均胶凝材料用量为 $208\text{kg}/\text{m}^3$, 比中国、日本、美国都要高。和中国、日本一样, 西班牙所有的碾压混凝土坝均掺加了活性掺合料, 而且都是低钙粉煤灰。所有的碾压混凝土坝都采用高灰浆碾压混凝土, 最低胶凝材料用量为 $160\text{kg}/\text{m}^3$ 。

(五) 四国碾压混凝土筑坝材料的情况

综上所述, 四个国家碾压混凝土平均的水泥用量大致相当, 基本上在 $75\sim 85\text{kg}/\text{m}^3$ 的范围 (见表 1-2)。胶凝材料用量的差异主要由活性掺合料用量的不同所造成。在日本碾压混凝土胶凝材料用量最低, 活性掺合料的掺量也最低, 而在西班牙胶凝材料用量最高, 活性掺合料的掺量也最高。

这四个国家中, 日本、中国和西班牙已经根据本国的特殊情况形成了自己的风格。而日本全部采用特有的 RCD 施工法建造。这种坝型由于碾压混凝土所占比例较小, 因此造价相对昂贵, 但对于一个长期受地震困扰的国家来说, 这种碾压混凝土坝的结构



型式是有安全保障的。在中国和西班牙，碾压混凝土坝均采用高灰浆碾压混凝土。日本、中国和西班牙的碾压混凝土坝都参加了活性掺合料，一般都是低钙粉煤灰。而美国，碾压混凝土的设计原理纷杂多变，从很低的胶凝材料用量（ $64\text{kg}/\text{m}^3$ ）到很高的胶凝材料用量（ $252\text{kg}/\text{m}^3$ ），从根本不掺加活性掺合料到采用很高掺量的活性掺合料，各种情况似乎没有一个固定的发展模式。

表 1-2 四国碾压混凝土胶凝材料用量情况 (kg/m^3)

国 家	水 泥		活性掺和料		总胶凝材料	
	平均	最大	平均	最大	平均	最大
中国	79	140	94	140	173	230
日本	87	96	35	78	123	130
美国	85	184	53	173	138	252
西班牙	75	88	130	170	204	250

碾压混凝土筑坝技术经历了几十年的研究和工程施工实践，积累了不少研究成果和工程经验，各方面的技术已达到成熟且已在实践中得到运用。在筑坝材料方面，还可以考虑利用各种废弃的质量较好的掺合料来取代水泥，以尽量降低筑坝费用，同时还能改善混凝土的各项性能。

第二节 碾压混凝土的开裂调查和研究进展

一、裂缝调查

当前已建、在建和设计中的碾压混凝土坝，其分缝、裂缝和漏水情况是多种多样的。现将已建的一些碾压混凝土坝的分缝、裂缝及渗漏情况列于表 1-3，并对其进行初步分析。

影响碾压混凝土坝产生裂缝的因素很多，包括坝的几何尺寸和结构，坝体的材料（特别是胶凝材料中水泥的用量）和混凝土



表 1-3 碾压混凝土坝分缝、裂缝及渗漏状况调查

编号	坝的名称	国别	坝体尺寸	水泥+掺合料用量 (kg/m ³)	裂缝、渗漏情况	初步分析
1	上静水坝 (Upper Stillwater Dam)	美国	高 91m, 长 815m	79+173	共出现 23 条较大裂缝, 其中有 17 条贯穿性裂缝, 成为主要的渗漏通道; 水渗入基础廊道并从下游渗出, 看不到层间渗漏; 坝身渗漏量曾达到 107L/s	胶凝材料用量较大, 导致水化温升高; 筑坝地址环境温度低, 导致内外温差大, 进而诱发裂缝
2	柳溪 (Willow Creek)	美国	高 52m, 长 543m	47+19	渗漏量曾达 170L/s, 处理后为 10L/s, 未发现裂缝	胶凝材料, 特别是水泥用量低
3	岛地川坝 (Shimajigawa Dam)	日本	高 89m, 长 240m	91+39	间隔 15m 设横缝及止水, 未发现明显裂缝	典型的 RCD 施工法建造, 防渗效果好, 但碾压混凝土的经济、快速优越性得不到充分发挥
4	中叉 (Middle Fork)	美国	高 38m, 长 128m	66+0	常态混凝土防渗层, 厚 0.3m, 渗漏量曾达 29.9L/s, 其中 25% 来自坝身排水孔	胶凝材料用量过低, 防渗、防裂效果较差
5	铜田 (Copper Field)	澳大利亚	高 40m, 长 340m	80+30	溢流坝中部出现贯穿性裂缝, 4 条缝总开度 4.5mm	水泥用量 80kg/m ³ , 稍高, 第一个冬季坝温由 35℃ 降至 11℃



续表

编号	坝的名称	国别	坝体尺寸	水泥+掺合料用量 (kg/m ³)	裂缝、渗漏情况	初步分析
6	温彻斯特 (Winchester)	美国	高 21m, 长 335m	104+0	未设横缝, 溢洪道和坝顶均出现明显裂缝	文献分析显示: 由于水泥用量较高, 碾压混凝土内部也可能产生裂缝
7	盖尔斯维尔 (Galesville)	美国	高 50m, 长 290m	53+51	高温时铺筑, 冬季温差过大, 坝顶和坝面开裂, 出现 6 条贯穿裂缝	主要由于温度应力引起
8	孟克斯威尔 (Monksville)	美国	高 48m, 长 671m	42+0	表面出现密集的干缩裂缝, 未出现明显裂缝	低温施工, 温度应力小
9	萨柯 (Saco de Nove)	巴西	高 56m, 长 230m	75+0	施道出现渗水, 出现表面裂缝	内外温差较大, 拉应力超过抗拉强度
10	布卡 (Bucca)	澳大利亚	高 12m, 长 123m	90+90	横缝缝距 100m, 出现较多裂缝, 并有贯穿性裂缝	横缝缝距较长, 内外温差较大, 冬季散热快而出现较大基础温差
11	潘哥 (Pangue)	智利	高 115m, 长 410m	84+76	横缝缝距 50m, 未出现明显裂缝	低温期施工, 绝热温升 18.6°C
12	新维多利亚 (New Victoria)	澳大利亚	高 52m, 长 288m	79+160	裂缝情况不详	实测最大温升 40°C, 预计内外温差造成的温度应力超过抗拉强度, 出现裂缝



续表

编号	坝的名称	国别	坝体尺寸	水泥+掺合料用量 (kg/m ³)	裂缝、渗漏情况	初步分析
13	卡斯蒂尔勃朗柯 (Castilblanco)	西班牙	高 25m, 长 123m	72+116	每 15m 设诱导缝, 裂缝及渗水情况 不详	西班牙第一座碾压混凝土坝, 间隔 15m 设一条横缝
14	山达欧捷尼亚 (Santa Eugenia)	西班牙	高 83m, 长 285m	90+12, 110+130	上游设厚 6.5~10.5m 的富浆碾压混凝土, 设 3 条横缝, 裂缝及渗水情况不详	西班牙最高碾压混凝土坝, 西班牙工程小组认为: 当胶凝材料中水泥含量为 70kg/m ³ , 横缝间距 80m, 不会开裂
15	迈尔号 (Meil II)	哥伦比亚	高 141m, 长 240m	65+0, 90+0	未出现明显裂缝	坝址温度稳定在 20℃ 左右, 胶凝材料少, 内外温差小
16	札毫克 (Zaaholik)	南非	高 47m, 长 527m	36+34	每隔 10m 设诱导缝, 沿缝有些裂缝; 廊道出现若干条裂缝, 缝宽一般不大于 1mm, 只有一条冬季宽达 2mm	水泥含量很少, 基础温降也较小, 裂缝估计不会贯穿
17	沃尔威坦斯 (Wolwedans)	南非	高 70m, 长 268m	58+136	1991 年以来自裂缝的渗漏量为 1.4~3.5L/s	坝址气温温和, 很少超过 26℃, 裂缝较少, 渗漏量不大
18	斯太基科奇 (Stagecoach)	美国	高 48m, 长 115m	71+77	廊道及下游出现裂缝, 间距 5~7m, 渗漏量最高达 4L/s	施工质量差, 抗拉强度和抗剪强度较小, 出现很多裂缝



续表

编号	坝的名称	国别	坝体尺寸	水泥+掺合料用量 (kg/m ³)	裂缝、渗漏情况	初步分析
19	磨石峡 (Grindstone Canyon)	美国	高 42m, 长 396m	76+0	建成不久就出现一条上下游连通的 裂缝,可能贯穿坝体	横缝间距较大
20	孔西波森 (Concepcion)	洪都 拉斯	高 68m, 长 69m	90+0	出现裂缝,并有贯穿性裂缝	基础温差 20℃,内外温差 还大些,温度应力较大
21	里约 (Riou)	法国	高 26m, 长 308m	0+120	下游表面观测到若干条较大的裂缝	经计算,上下游的拉应力 最大可达 4MPa
22	赛赫德拉费赫 (Serre De La Fare)	法国	高 80m, 长 350m	70+30	未出现明显裂缝	每 45m 设置一条观测横缝, 中间设间隔 15m 的 2 条表 面缝
23	龙门滩坝	中国	高 56m, 长 149m	54+86	1988 年施工后一天,沿坝顶面出现 2 条表面裂缝,其中一条较长,自上 游延伸至下游;1990 年蓄水后出现 3 条贯穿裂缝;1991 年廊道附近出现一 条贯穿性裂缝	夏季施工
24	隔河岩围堰	中国	高 40m, 长 290m	95+85	1988 年建成,8 月过水后出现 4 条 较大裂缝,缝宽最大 5mm,缝距 30 ~40m	水泥用量较大,水化热温 升较高