

软岩筑面板 堆石坝技术

蒋涛
付军
周小文
编著

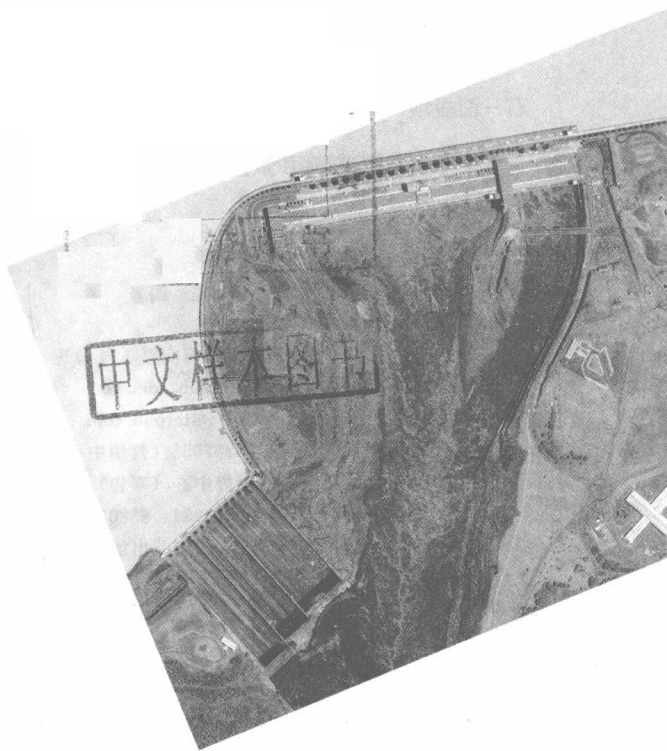
RUANYAN
ZHU MIANBAN
DUISHIBAN
JISHU

中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



软岩筑面板 堆石坝技术

蒋涛 付军 周小文 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



内 容 提 要

在面板堆石坝中充分利用软岩料填筑坝体是面板坝发展的一个重要特征,有些面板坝全断面使用软岩料填筑,为拓展软岩料的应用范围积累了重要的经验。本书首先介绍软岩面板堆石坝技术的发展,然后从软岩堆石料的工程性质、坝体断面分区及计算方法、防渗及地基处理、软岩料爆破开采技术、软岩面板堆石坝的填筑以及软岩应用面板坝工程实例等方面,对软岩筑面板堆石坝的技术进行总结。该书是第一本较全面介绍软岩筑面板坝技术的书籍,期待起到抛砖引玉的作用。

本书可供水利部门以及高等院校从事大坝工程科研、设计、施工、管理的人员和师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

软岩筑面板堆石坝技术 / 蒋涛, 付军, 周小文编著

— 北京: 中国水利水电出版社, 2010. 1

ISBN 978-7-5084-7191-4

I. ①软… II. ①蒋… ②付… ③周… III. ①软弱岩石—面板坝: 堆石坝 IV. ①TV641.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第018022号

书 名	软岩筑面板堆石坝技术
作 者	蒋涛 付军 周小文 编著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn
经 售	电话: (010) 68367658 (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	140mm×203mm 32开本 8.375印张 225千字
版 次	2010年1月第1版 2010年1月第1次印刷
印 数	0001—2000册
定 价	28.00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

混凝土面板堆石坝以其安全性、经济性、适应性好而在世界大坝建设中得到广泛的应用。中国自1985年引进现代混凝土面板堆石坝技术以来，经过消化、吸收和再开发，在水利水电建设中迅速推广，成为大坝建设中一种富有竞争力的坝型比较方案。到2008年的不完全统计，中国已建、在建混凝土面板堆石坝已有170座左右，其中坝高100m以上的有50座左右。坝高233m的水布垭坝，是目前世界上已建成混凝土面板堆石坝中的最高者。中国地域辽阔，这些工程很多都是大江大河上的大水库、大水电站，涵盖了各种不利的气候和地形地质条件，如：严寒酷暑、窄陡河谷、深覆盖层、强地震区、坝料不够理想等情况，缺乏已有经验可资借鉴。为此进行了大规模的科学研究和技术开发工作。中国混凝土面板堆石坝的建设在数量、坝高、规模和技术难度等方面均处于世界前列。

早期的抛填式面板堆石坝对坝料的要求是比较高的，选用的仅是开采石料中坚硬而有一定块径的部分。在引进振动碾薄层碾压技术以后，采用级配堆石，开采石料可以全部上坝，并压实到较高密度。由于有的坝址没有合适的硬岩材料，或有大量来自建筑物有效挖方的质量较差的材料可以利用，而开始利用软岩材料作为面

板堆石坝的坝体材料。利用软岩材料的方式大致有 3 种：一是用于下游坝体水位以上的干燥区，这是较为常见的情况，问题也较少，如哥伦比亚的 Salvajina 坝（高 148m，1984 年建成）等；二是用于坝的中间部位，上下游坡都有硬岩层包围，这种情况较少见，如美国的 Bailey 坝（高 95m，1979 年建成）等；三是全断面均用软岩填筑，但在上游过渡层下及底部设硬岩排水层排除可能的渗水，以保持软岩区的干燥状态，如印尼的 Cirata 坝（高 125m，1987 年建成）等。中国在软岩利用方面，也做了大量工作，相继建成了株树桥、十三陵上库、天生桥一级、茄子山、大坳、鱼跳、盘石头、寺坪等工程，都以不同方式利用了软岩材料。这些工程都已成功运行多年，一般对 100 米级及以下的坝是正常的，但也有一些高坝的下游次堆石区利用软岩后，因变形不协调而导致混凝土面板发生结构性裂缝，如 20 世纪 90 年代建成的 Aguamilpa 坝（高 187m）及天生桥一级坝（高 178m），说明以前从 100m 级混凝土面板堆石坝的经验中总结出来的下游堆石体变形不影响面板的提法，对更高的坝是不正确的，变形控制仍是利用软岩筑坝的重要问题。对特别高的混凝土面板堆石坝中利用软岩需要慎重对待。

由于软岩利用有较大的经济和环境效益，而软岩料级配宽且变异性大，软化系数小，湿化和流变性较明显，其工程性质及相应的施工技术较难掌握，有许多需要研究的问题。原国家电力公司专门设立了重点科研项目《利用软岩筑面板堆石坝技术的应用研究》，由中国

水利水电工程水利水电工程建设集团公司、中国水利水电科学研究院、宜昌市中水科技发展公司、中国葛洲坝工程集团公司、葛洲坝集团公司施工科研所江西省水利规划设计研究院等单位参加，以大坳、鱼跳、茄子山等利用软岩的混凝土面板堆石坝工程为依托，在国内外调查研究的基础上，进行了大量实验室和现场的试验研究工作，并与设计和施工人员一起，在施工现场实施这些科研成果，使软岩筑坝技术在理论和实践上都有明显的科技进步。

本书作者们参加了软岩筑坝课题的研究工作，对所取得的软岩筑坝方面的成果和经验进行了较全面的总结，论述了软岩材料的工程特性、坝体断面优化及施工控制措施、质量控制标准及填筑工艺等各个方面的问题，并介绍了一些工程实例，对从事本领域工作的同仁足资参考。是为序。



2009年10月

前言

近年来国内外许多成功经验表明，经过专门研究和设计，软岩料仍可作为堆石料填筑于坝体的适当部位。如国外的萨尔瓦兴娜、温尼克、红树溪和国内的十三陵抽水蓄能电站上库、株树桥、寺坪、盘石头等面板堆石坝，在其坝体内都填筑了大量的软岩料和风化料，取得了一定的工程应用经验。1999~2001年，国家电力公司将“利用软岩筑面板堆石坝技术的应用研究”作为重点应用推广科研项目，以云南茄子山、江西大坳、重庆鱼跳三个面板堆石坝为依托工程，进行软岩筑坝技术的应用研究工作。研究目标是拓宽软岩坝料利用范围，提供成套的系列化的应用研究成果，提高我国面板堆石坝设计和施工水平。在中国水利水电工程建设集团公司组织和领导下，科研课题组各承担单位共同努力，历时两年六个月，取得了大量的研究成果。作者参加了该科研项目研究的全过程，本书是在该课题研究成果的基础上，结合近年来有关面板坝的科研成果、施工经验总结编撰而成的。由于条件和学识有限，书中难免有不妥之处，敬请有关专家和读者批评。

本书由蒋国澄先生、赵增凯先生主审，中国葛洲坝集团股份公司王亚文先生在本书的编撰过程中提出了宝贵的审查意见和建议。在此，借本书出版之际对原课题

组领导和成员及上述各位专家一并表示感谢!

本书的研究与撰写亦得到清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室的开放课题“非硬岩面板堆石坝筑坝技术研究”(项目编号 SKLHSE-2006-C-01)资助。

编著者

2009年9月

目 录



序

前言

1 软岩面板堆石坝技术的发展	1
1.1 引言	1
1.2 面板堆石坝一般分区原则	4
1.3 软岩料利用原则	5
1.4 软岩料实际应用的部位	6
2 软岩堆石料的工程性质	10
2.1 软岩及软岩料	10
2.2 软岩料矿物及化学成分	12
2.3 软岩料级配及颗粒破碎特征	16
2.4 软岩粗粒料力学特性试验方法	19
2.5 软岩料压实性	23
2.6 软岩料渗透性	25
2.7 软岩料压缩性	27
2.8 软岩料强度	33
2.9 软岩料湿化变形特性	39
2.10 软岩料流变特性	42
3 坝体断面分区及计算方法	45
3.1 硬岩料面板坝变形特征	45
3.2 软岩料面板坝变形特征	48
3.3 软岩料筑坝断面分区优化设计方法	50
3.4 坝体边坡稳定分析	50
3.5 坝体有限元分析	55

3.6	大壩面板堆石壩优化设计	81
3.7	鱼跳面板堆石壩优化设计	86
3.8	寺坪面板堆石壩优化设计	98
4	防渗及地基处理	114
4.1	防渗设计原则	114
4.2	反滤设计原则	116
4.3	坝体防渗	118
4.4	地基防渗	133
4.5	寺坪面板坝地基处理	141
5	软岩料爆破开采技术	145
5.1	坝料开采爆破的方法	145
5.2	软岩的爆破特性	147
5.3	软岩料的爆破开采技术	148
5.4	鱼跳面板堆石坝软岩料爆破开采	150
6	软岩面板堆石坝的填筑	157
6.1	填筑标准的确定方法	157
6.2	软岩填筑的特点	161
6.3	软岩填筑碾压试验实例	162
6.4	软岩料施工工艺	179
6.5	坝体分区填筑方法	183
6.6	软岩料施工质量控制	186
7	软岩应用面板坝工程实例	187
7.1	萨尔瓦兴娜坝	187
7.2	温尼克坝	196
7.3	红树溪坝	201
7.4	贝雷坝	203
7.5	天生桥一级面板堆石坝	205
7.6	大壩坝面板坝石坝	216
7.7	鱼跳面板堆石坝	229
	参考文献	247



软岩面板堆石坝技术的发展

1.1 引言

一般以坝高度超过 15m 或者库容超过 300 万 m^3 的坝称为“大坝”。目前，全世界大坝超过 5 万座，其中，坝高超过 100m 的有 600 余座，坝高在 60~100m 之间的有 2000 余座。在这 5 万多座大坝中，我国有 2.2 万多座，占 44%。

土石坝能充分利用当地材料，能适应复杂地基，加上大型施工机具如挖、运、填筑及碾压机械的使用，使得土石坝具有造价低、适应性强、工期短等优点。自 20 世纪 60 年代以后土石坝在各种坝型中数量上逐渐占据上风，成为发展最快的一种坝型。目前，巴西 80m 以上的坝中土石坝占 75%；美国 60m 以上的坝中土石坝占 80% 以上。我国 80% 的大型水库是土石坝，小型水库 95% 以上是土石坝。

随着筑坝技术的发展，坝的高度逐渐提高。截止 2007 年底，世界上超过 200m 的高坝有 32 座，其中有重力坝 4 座，重力拱坝 3 座，拱坝 13 座，土石坝 8 座。超过 300m 的高坝有 2 座，都是土石坝，它们是前苏联在塔吉克斯坦瓦赫什河中游修建的努列克心墙土石坝，坝高 300m，库容 105 亿 m^3 ；在该河上游修建的罗贡心墙土石坝，高 335m，库容 133 亿 m^3 。表 1.1 列出国内外各种坝型的最高坝情况。

混凝土面板堆石坝（Concrete Faced Rockfill Dam，简称 CFRD）简称面板堆石坝或面板坝。自 20 世纪 80 年代以来面板堆石坝快速发展，逐步取代心墙坝和斜墙坝成为土石坝的主要坝型。我国在过去的近 30 年来亦建造了大量的面板堆石坝，坝高

30m 以上的面板堆石坝有 150 余座。面板堆石坝虽仅以薄面板防渗，但这种坝型在适应复杂地形和地质条件、强地震、施工质量控制与质量检测技术等方面近 20 余年来取得了很大的进展，工程质量越来越有保证。更重要的是，面板堆石坝的用料范围有逐渐扩大的趋势，各种软岩料和砂砾石料应用逐渐增多。

表 1.1 国内外各种坝型的最高坝

坝 型	国 外				国 内		
	坝 名	国家	坝高 (m)	建成 年份	坝名	坝高 (m)	建成 年份
混凝土重力坝	大狄克逊 (Grand Dixence)	瑞士	285	1961	三峡	181	2007
混凝土拱坝	英古里 (Ingulska)	前苏联	272	1986	二滩	240	1999
混凝土重力拱坝	萨杨-舒申斯克 (Sajano - Susenskaja)	前苏联	245	1980	龙羊峡	178	1989
混凝土支墩坝	丹尼尔约翰逊 Daniel (Johnson)	加拿大	214	1960	湖南镇	129	1979
混凝土面板堆石坝	阿瓜密尔帕 (Aguamilpa)	墨西哥	187	1993	水布垭	233	2007
沥青混凝土心墙坝	芬斯特塔 (Finstertal)	奥地利	150	1980	高岛	107	1979
土质心墙土石坝	罗贡 (Rogu)	前苏联	335	1989	小浪底	155	1999
砌石重力坝	纳加琼纳萨格 (Nagarjuna Sagar)	印度	125	1974	群英	101	1971

国内外在混凝土面板堆石坝的实践中，常以岩石单轴饱和抗压强度 30MPa 为界限将岩石分为硬岩和软岩。为保证面板尽可能不产生裂缝或少产生裂缝，设计中十分强调对坝体堆石变形的控制。与一般土石坝相比，面板堆石坝对堆石料的要求更高。许多工程因缺乏硬岩或中等硬度的岩石，在坝型选择中曾不得不放弃采用面板坝，也有的工程虽采用了面板坝，但是因坚持开采硬

岩料而增加了造价。

充分利用坝址附近的各种坝料，因材设计，是土石坝设计的基本原则。软岩料分布广，开采成本低，软岩料的充分利用已成为面板坝建设中的迫切要求。为提高利用软岩料填筑面板堆石坝的技术水平，改进设计和施工方法，国家电力公司在 1999～2001 年安排重点科研项目“利用软岩筑面板堆石坝技术的应用研究”，联合中国水利水电工程建设集团公司、中国水利水电科学研究院、葛洲坝集团公司、成都水利水电勘测设计院、重庆大溪河水电开发有限公司等单位对软岩筑面板坝技术进行了较系统的探讨^[1]。该项目主要依托江西大坳（坝高 90.2m）、云南茄子山（坝高 107m）和重庆鱼跳（坝高 110m）坝三座当时在建的大坝进行研究。

随着筑坝技术的发展，软岩料的利用越来越多。国外如美国的贝雷坝（Bailey）、印尼的希拉塔坝（Cirata）、澳大利亚的小帕拉坝（Little Para）、温尼克坝（Winneke）和红树溪坝（Mangrove Creek）、哥伦比亚的萨尔瓦兴娜坝（Salvajina）等，国内的株树桥、天生桥一级、大坳、寺坪、十三陵上池、盘石头、茄子山、大坳、鱼跳等面板堆石坝，均采用了软岩填料。国内外大量利用软岩料填筑的面板堆石坝已超过 15 座，这些软岩坝的成功经验表明，过去因抗压强度低、软化系数小而不被采用的软岩堆石料，经过专门设计，仍可作为堆石料填筑在坝体合适的部位甚至大部分区域^[2]。

随着面板堆石坝坝高的不断增加、坝址地形条件的日趋复杂以及筑坝材料的不断拓宽，对面板堆石坝的理论与试验研究将更加深入。在利用软岩筑坝方面，虽然国内外利用软岩修筑的面板堆石坝已超 15 座，积累了很多的经验，但是在认识上仍总结不够，软岩料在百米级高面板堆石坝中的应用还是比较少见的，对于一些关键问题的认识有待深入。这些问题包括：软岩料的工程力学性质、软岩利用与断面优化方法、软岩料开采技术、适应于软岩料的填筑标准和碾压方法、软岩填筑坝体的变形及流变特

性等。

1.2 面板堆石坝一般分区原则

堆石坝体在自重、水荷载及其他荷载作用下会发生变形。通过面板裂缝、趾板接缝、周边缝、面板分缝等部位，库水也会透过。因此，面板堆石坝的结构设计主要应考虑两个方面：①尽量减少坝体和面板的变形，限制面板裂缝的宽度和数量，保障面板结构的变形安全；②由于面板裂缝和漏水终究难以避免，趾板接缝、周边缝、面板分缝等部位也有可能因变形出现渗漏通道，这些渗漏通道都会通过坝体流向下游。为此，必须遵循土石坝设计“上防下排”的原则，减少库水的渗入，并使渗入坝体的水能够安全排出，以保障渗流安全。

因堆石体内各部分与混凝土面板的相对位置不同，坝体内部各部分所承受的荷载及其应力、变形状态各不相同，各部分变形对面板的影响亦有差异，使得坝体内各部分对于变形模量以及防渗、排渗的要求也不同。

为此，在堆石体设计中应根据堆石体各部分所起的作用，分别对材料的性质、最大粒径、颗粒级配、密实度、变形模量、透水性以及施工工艺提出不同的要求。填筑料的分区原则应该是^[3]：

(1) 各区坝料之间应满足水力过渡的要求，从上游向下游，坝料的渗透系数递增（软岩除外），相邻区下游坝料对其上游区有反滤保护作用，以防止产生内部管涌和冲蚀。

(2) 依据对面板的影响程度不同，坝体的变形模量从上游到下游可递减，使得蓄水后坝体变形尽可能小，从而减小面板和止水系统遭到破坏的可能性。

(3) 充分合理利用近坝材料和枢纽开挖石碴料。

基于上述原则，根据 Cooke 和 Sherard 提出的面板堆石坝坝体分区命名规则，常规的面板堆石坝坝体分区如图 1.1 所示^[4,5]。

I 区：位于面板底部上游侧，主要作用为封堵面板底部可能

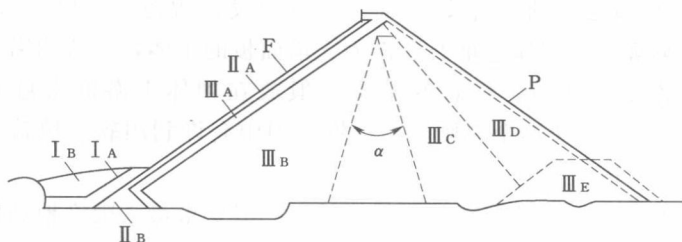


图 1.1 面板堆石坝分区示意图

I_A—上游铺盖区；I_B—盖重区；II_A—垫层区；II_B—特殊垫层区；III_A—过渡区；III_B—主堆石区；III_C—次堆石区；III_D—下游堆石区；III_E—抛石区（或滤水坝趾区）；F—混凝土面板；P—下游护坡； α —次堆石区上游边界的变化范围

的裂缝以及周边缝的张开。I_A 为上游铺盖区，I_B 为盖重区。

II_A 区：面板的垫层区，它为混凝土面板提供均匀的支撑，同时，它还应具有较低的渗透性以控制坝体的渗流。

II_B 区：特殊垫层区，这个区域紧靠在周边缝的下游侧，其主要功能为面板上游面铺设的细粒料的反滤材料。

III_A 区：II_A 区与坝体主堆石区的过渡区，填料采用经选择的小颗粒堆石。

III_B 区：坝体的主堆石区，它包含了坝体上游的大部分堆石，由于它是支承面板的主体，因此，一般采用相对较好的堆石。

III_C 区：坝体次堆石区，位于坝体下游侧。这部分堆石强度要求相对较低，但一般要求具有较好的排水性能。

III_D 区：下游堆石区。

III_E 区：抛石区（或滤水坝趾区）。

P 区：下游护坡。

1.3 软岩料利用原则

为了减少面板坝堆石体的变形，筑坝材料通常选用较为坚硬的岩石。较早的《混凝土面板堆石坝设计导则》（DL 5016—

93)^[6]以及之后的《混凝土面板堆石坝设计规范》^[7] (SL 228—98)都规定,坝体主堆石区作为支承面板的主体,一般均需采用较好的硬岩堆石,软岩的利用一般放在坝体下游的次堆石区(Ⅲ_C区)。按照这个原则,面板堆石坝中允许利用软岩填筑的部分较为有限。

为达到经济及缩减工期等目的,一般要求最大限度地利用近坝材料和枢纽开挖石渣。根据这些材料的特性,将它们用于坝内合适的部位。即由当地坝料来源设计坝体剖面,而不是规定大坝的剖面分区后再去寻找合适的坝料。这种思想促使软岩料的利用不断突破已有的经验和设计规范的局限。

硬岩堆石具有较高的抗剪强度和较低的压缩性,压实后仍能自由排水。软岩堆石强度相对较低,且由于其母岩质地较软,压实后颗粒破碎较多,破碎后的颗粒填充了堆石间的间隙,因此,其排水能力相对较低。但密实的软岩堆石仍具有较高的抗剪强度和抗变形能力。如果能够做好坝体排水,扩大软岩料的利用范围是可以接受的。

根据国内外已有的工程实践,对于软岩堆石料的利用实际采用的原则是:保证软岩料区的下边界线在大坝运行时处于干燥区,以便坝体排水畅通,并避免软岩遇水产生湿化变形;保证坝体下游边坡的稳定,且在其外侧留有不小于2m新鲜硬岩填筑区,以防止软岩料的继续风化;上边界线应保证其上有不小于5~10m的新鲜硬岩填筑层覆盖。应通过计算分析,在保证坝体施工期、运行期的沉降量以及面板的应力在合理范围内的前提下,上边界线尽量往坝体上游侧靠近,以期能够最大限度地利用软岩材料,从而使工程设计进一步优化。

1.4 软岩料实际应用的部位

国内外以往多是在坝体内下游区应用,且坝高一般在100m以下。自20世纪80年代中期后,由于建坝增多,坝址及坝料选择条件逐渐苛刻,相应的软岩料利用在面板坝中逐步发展,在坝

体中的填筑区域也逐步增大,不少已经放在了主堆石区,甚至发展到全部采用软岩料作为坝体填筑料。

表 1.2 列出国内外 16 座典型的利用软岩填筑的面板堆石坝。对于软岩料的使用部位大致有三种情况^[8,9,10]：

(1) 将软岩堆石放置在坝体轴线下游干燥区(即Ⅲ_c次堆石区),国外如萨尔瓦兴娜坝、温尼克坝、红树溪坝等。北京十三陵上池坝将风化的安山玄武岩填筑在次堆石区,湖南株树桥将风化板岩用在次堆石区。从坝体的应力、变形角度看,影响面板应力状态的主体是坝体的上游堆石区,而且,蓄水后坝体变形的主要影响区域集中在上游 1/3 坝体范围内,因此,一般情况下是采用这种布置方式。

(2) 将软岩堆石布置在坝体的中间部位,如贝雷坝,在上游坝踵处设置一新鲜岩石的棱体,上下游坡面也填筑一层新鲜岩石,而中间部位全部采用溢洪道开挖的石渣填筑。

(3) 将软岩作为主体填筑材料,基本上是全断面利用软岩堆石材料。国外如希拉塔坝、袋鼠溪坝、小帕拉坝、库奇坝等。当坝体全断面利用软岩堆石料时,应注意对坝体总变形量的控制,同时要注意排水的设计,一般是在上游面板垫层、过渡料层下及坝底部填筑一层新鲜岩石以用来排水。

我国在坝体全断面利用软岩堆石材料方面取得了长足的进展。我国江西大坳坝在上游主堆石区部位设立顶宽 5m,底宽 25m 的硬岩排水棱体,棱体后的上部 and 下部主、次堆石区全用软岩填筑,坝体总方量中软岩占 73.4%,是我国目前软岩筑坝利用软岩方量比例最高的坝。

云南茄子山工程,因岩石是二云花岗岩,硬度高,棱角锐,主堆石区全用硬岩时机械磨损严重,而岩石料场风化层是软岩,强度低,经设计研究在主堆石区中掺和 20% 软岩,大大减轻机械磨损,堆石体压得更密实。在次堆石区中掺和 40% 软岩,改善了填筑质量。实际效果证明主、次堆石区软岩和硬岩混合使用也是可行的。