

DOI: 10.11779/CJGE20230963

高混凝土面板堆石坝接缝止水试验研究和应用

郇能惠¹, 王立安¹, 任 强¹, 张志韬¹, 张 贤¹, 王新奇², 代巧枝²

(1. 南京水利科学研究院岩土工程研究所, 江苏 南京 210024; 2. 黄河勘测规划设计研究院有限公司, 河南 郑州 450031)

摘 要: 混凝土面板堆石坝是当前最有竞争力的坝型, 为保障高混凝土面板堆石坝的安全, 坝体和面板的应力变形性状以及接缝位移成为研究的重点之一, 通过止水材料开发、接缝止水结构设计和止水结构防渗模型试验研究提出了高混凝土面板堆石坝新型止水结构, 并应用于高混凝土面板堆石坝工程。在此基础上进行了高坝新型接缝止水结构力学特性试验研究, 形成了试验方法, 建立了高坝新型止水结构的刚度表达式, 通过在某高坝工程的应用表明提出的接缝止水应力应变关系全面反映高坝新型止水结构各主要部件对于面板与趾板以及面板之间力的传递的贡献, 更好地反映复杂地形地质条件下高坝设计布置的影响, 具有一定的工程应用价值。

关键词: 混凝土面板堆石坝; 接缝止水; 应力变形性状; 刚度表达式

中图分类号: TV641 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2025)01-0030-09

作者简介: 郇能惠(1940—), 男, 浙江诸暨人, 教授级高级工程师, 博士生导师, 主要从事水利水电工程和电力建设工程中的岩土力学和水工结构工程的研究工作。E-mail: nhli@nhri.cn。

Mechanical properties of new type of joint waterstop for high CFRDs and its application

LI Nenghui¹, WANG Li'an¹, REN Qiang¹, ZHANG Zhitao¹, ZHANG Xian¹, WANG Xinqi², DAI Qiaozhi²

(1. Geotechnical Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China; 2. Yellow River Engineering Consulting Co. Ltd., Zhengzhou 450031, China)

Abstract: The concrete face rockfill dam (CFRD) is one of the most competitively powerful dam types now. In order to ensure the safety of high CFRDs the stress and strain behaviors of dam body and concrete face as well as the displacements of joints have become the point of engineering researches. A new type of joint waterstop is put forward and used in several high CFRDs. The mechanical properties of the new type of joint waterstop for high CFRDs are investigated, and a series of stiffness expressions for three-dimension displacements of joints are established. The proposed stiffness expressions can represent the contribution of main components of waterstop to the force transfer from face slab to face slab and from face slab to plinth, and then the influences of arrangement of the high CFRDs on the stress and strain behaviors of CFRDs especially under complex topographical and serological conditions are revealed.

Key words: concrete face rockfill dam; joint waterstop; stress strain behavior; stiffness expression

0 引 言

混凝土面板堆石坝是以堆石为主体并在上游面设置混凝土面板作为防渗结构的一种坝型。全世界已建和在建的坝高 30 m 以上的混凝土面板堆石坝已达到 500 多座, 中国自 1985 年开始建造, 至今已建和在建的坝高 30 m 以上的混凝土面板堆石坝约有 400 座。这种坝型的经济性良好, 能适应不良的气候条件和地形地质条件, 充分利用当地不同岩性材料和建筑物开挖料, 成为当前最有竞争力的坝型之一。国内外大坝工程技术人员在设计理念、计算方法、筑坝材料、混凝土面板、接缝止水、安全监测、施工技术方面都取得显著的技术进步^[1-2]。

20 世纪末天生桥一级坝、Aguamilpa 坝、Barra Grande 坝和 Campos Novos 坝出现的面板脱空、面板结构性裂缝、面板挤压破坏和严重渗漏等问题促使大坝工程师认识到经验设计存在的问题, 提出了坝体变形协调以及坝体变形与面板变形同步协调的新理念^[2], 坝体和面板的应力变形性状以及接缝止水位移成为研究的重点, 面板堆石坝面板与面板、面板与趾板之间接缝止水的力传递和变形协调成为重点研究的对象之一。20 多年来, 中国水利水电科学研究院、华东勘测设计研究院、河海大学、四川联合大学和南京水利科

收稿日期: 2023-10-07

学研究院等许多研究团队进行了成功的接缝止水结构模型试验和数值模型分析^[3-11]。高混凝土面板堆石坝的接缝止水结构和止水材料取得突破性发展, 建立了塑性填料+波型橡胶止水带+橡胶棒+嵌缝材料+止水铜片的高坝新型止水结构, 应用于水布垭、猴子岩、江坪河、巴贡、三板溪、南俄二级、阿尔塔什、黔中、JLT-1、紫坪铺、公伯峡等高混凝土面板堆石坝工程。

本文试验就是在前人成功试验研究的基础上, 结合某高混凝土面板堆石坝(B坝)工程需要, 进行高坝接缝止水结构的力学特性试验研究, 建立了高坝新型接缝止水的劲度表达式, 反映面板与面板、面板与趾板以及面板与防浪墙之间力的传递关系。通过在B坝工程中应用证明本文提出的高坝接缝止水应力应变关系可用于高面板堆石坝的应力变形计算分析, 更好地反映不同地形地质条件下高混凝土面板堆石坝设计布置对面板堆石坝应力变形性状和接缝位移的影响, 为保障大坝安全服务。

1 高混凝土面板堆石坝接缝止水

中国高混凝土面板堆石坝新型接缝止水结构由塑性填料+波形橡胶止水带+橡胶棒+嵌缝材料+止水铜片构成。

新型周边缝、张性垂直缝、压性垂直缝与面板顶部水平缝止水结构有所不同, 各类接缝止水结构如图1~5所示。高混凝土面板堆石坝接缝止水结构部件(以B坝为例)主要包括: ①面膜——厚6mm的GB型三元合成橡胶盖板; ②GB型弹塑性止水填料; ③厚6mm的GB型波形合成橡胶止水带; ④厚1.2mm的F型或W型止水铜片; ⑤厚20mm压性垂直缝嵌缝聚乙烯泡沫板; ⑥厚12mm周边缝嵌缝聚乙烯泡沫板; ⑦直径12~70mm尼龙棒; ⑧厚3mm乳化沥青。

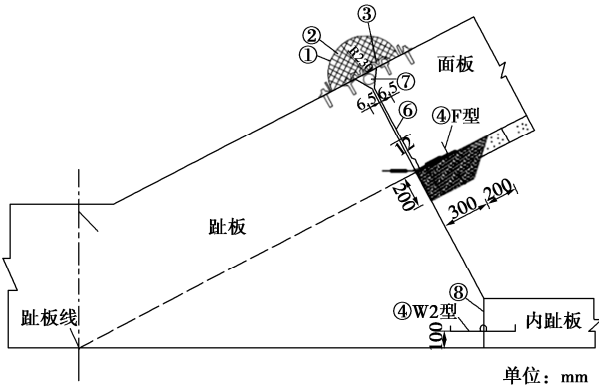
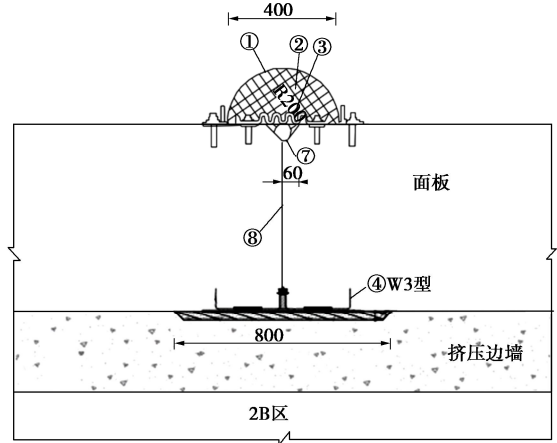


图 1 周边缝接缝止水结构

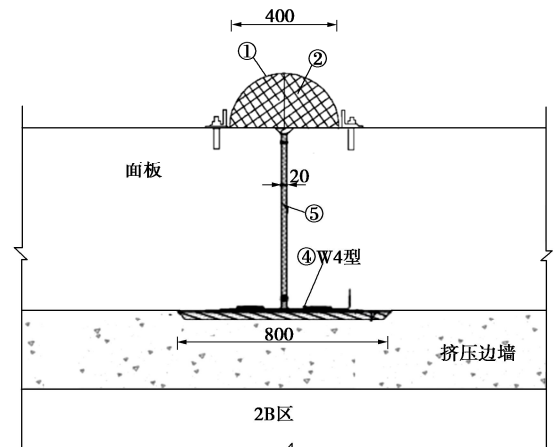
Fig. 1 Waterstop of perimeter joint



单位: mm

图 2 面板垂直缝张性缝止水结构

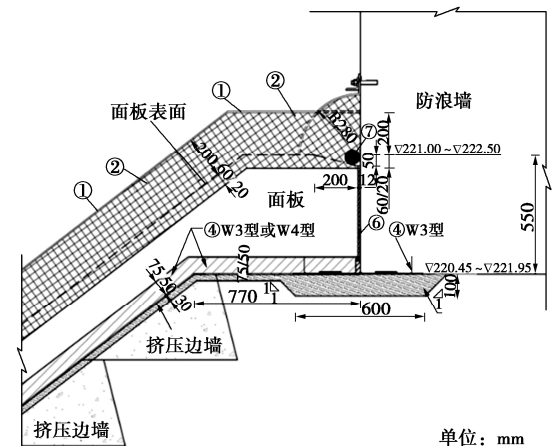
Fig. 2 Waterstop of vertical tension joint



单位: mm

图 3 面板垂直缝压性缝止水结构

Fig. 3 Waterstop of vertical compression joint



单位: mm

图 4 面板顶部水平缝止水结构

Fig. 4 Waterstop of horizontal joint of top concrete face

周边缝止水部件①②③④⑥在周边缝位移时发挥止水作用, 面板垂直缝张性缝止水部件①②③④在垂直缝位移时发挥止水作用, 面板垂直缝压性缝止水部件①②④⑤在垂直缝位移时发挥止水作用, 面板顶部水平缝止水部件①②④⑥发挥止水作用。

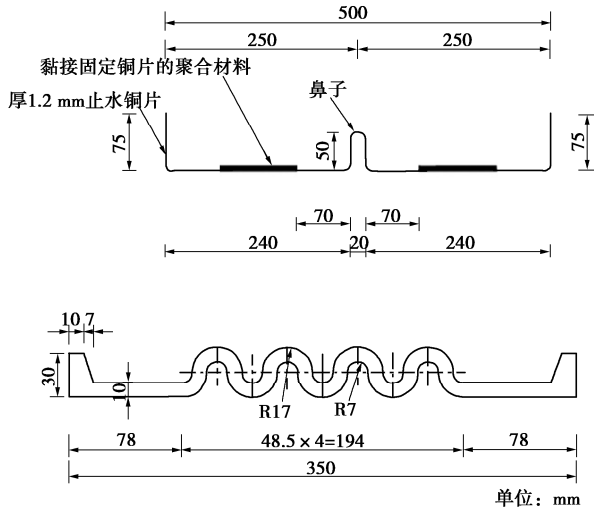


图5 止水铜片和波形合成橡胶止水带

Fig. 5 Copper waterstop and corrugated rubber waterstop

2 接缝止水试验

周边接缝止水对于面板与趾板之间力的传递起主要作用的是止水铜片、波形橡胶止水带和嵌缝材料（聚乙烯泡沫板），面板垂直缝张性缝接缝止水对于各块面板之间力的传递起主要作用的是止水铜片和波形橡胶止水带，面板垂直缝压性缝和水平缝对于力的传递起主要作用是止水铜片和嵌缝材料（聚乙烯泡沫板），面板顶部水平缝对于面板与防浪墙之间力的传递起主要作用的是止水铜片和嵌缝材料（聚乙烯泡沫板）。

接缝止水部件中的面膜（三元合成橡胶盖板）厚度仅 6 mm，弹塑性密封填料和乳化沥青流动性好，尼龙棒可以移动，这些部件对于接缝两侧混凝土板之间力的传递作用很小。因此没有必要进行这些部件的力学特性试验。

接缝止水的应力应变关系测定可以分离成接缝止水部件的剪切、拉伸、压缩和沉降试验，然后加以组合就得到接缝在三向位移时应力应变关系。

接缝止水试验装置采用深圳 SANS 公司的 CMT 系列微机控制 5105 型电子万能试验机，最大试验力 100 kN，试验力分辨率 5×10^{-6} F.S.，变形测量范围 800 mm，变形分辨率 0.008 mm。专用研制了不同结构型式的夹具，夹具使得不同试件长度的止水铜片、波形橡胶止水带都能在试验机上受到剪切、沉降和拉伸作用，接缝止水试验的部件取自 B 坝接缝止水结构，试验长度分别为 50，100，200，300，400 mm。试件在作用力下发生剪切、沉降和拉伸变形时不受到外界影响，精确测定作用力与位移的关系。

高混凝土面板堆石坝接缝止水主要部件止水铜片和波形橡胶止水带的沉降、拉伸试验结果如图 6~9 所示。聚乙烯泡沫板压缩试验结果如图 10 和图 11 所示。止水铜片和波形橡胶止水带的剪切试验结果如图 12，13 所示。

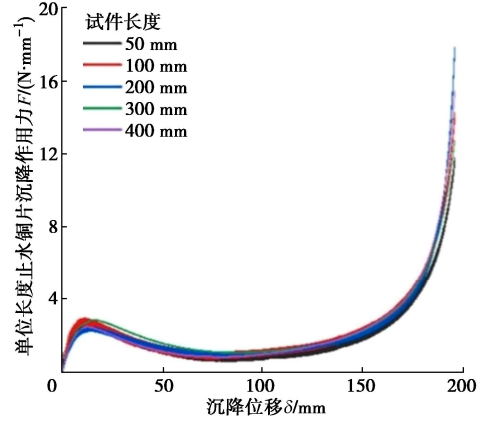


图6 单位长度止水铜片沉降作用力 F 与沉降位移 delta 关系曲线

Fig. 6 Relationship between settlement force F and settlement displacement δ of unit length copper waterstop

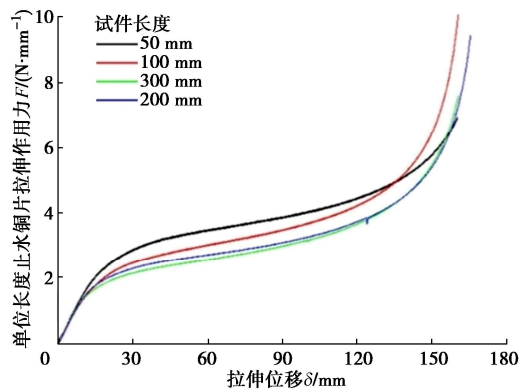


图7 单位长度止水铜片拉伸作用力 F 与拉伸位移 delta 关系曲线

Fig. 7 Relationship between tensile force F and tension displacement δ of unit length copper waterstop

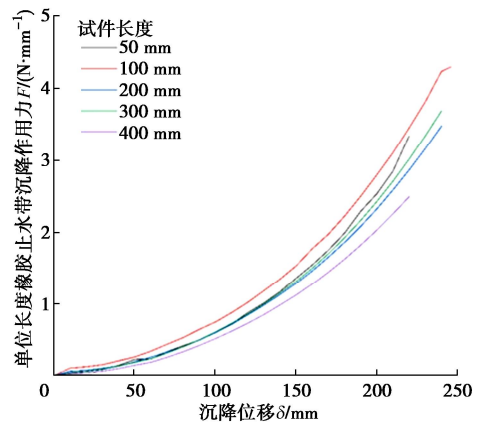


图8 单位长度橡胶止水带沉降作用力 F 与沉降位移 delta 关系曲线

Fig. 8 Relationship between settlement force F and settlement displacement δ of unit length corrugated rubber waterstop

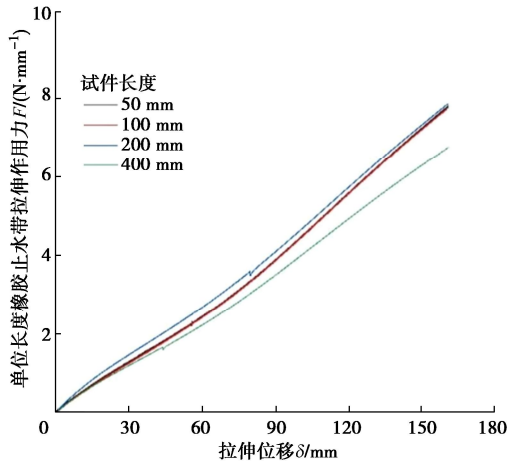


图 9 单位长度橡胶止水带拉伸作用力 F 与拉伸位移 δ 关系曲线

Fig. 9 Relationship between tensile force F and tension displacement δ of unit length corrugated rubber waterstop

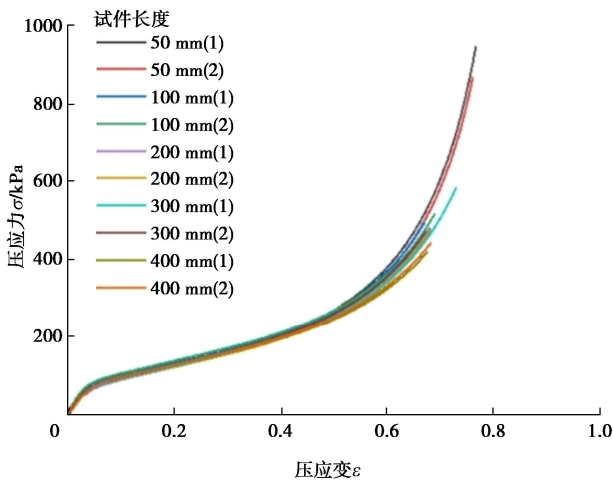


图 10 聚乙烯泡沫薄板压缩应力应变曲线

Fig. 10 Compression stress-strain relationship of thin polyethylene foam board

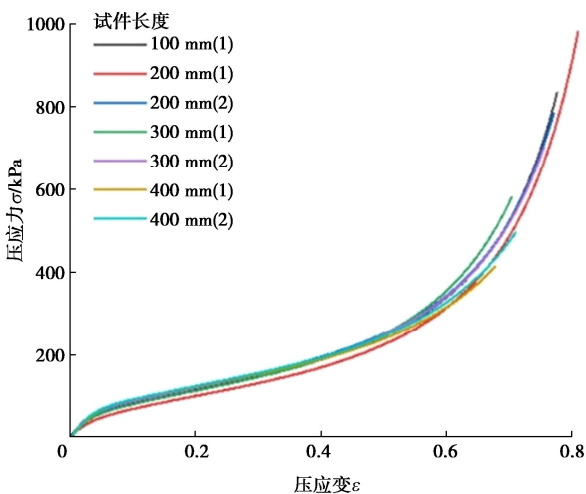


图 11 聚乙烯泡沫厚板压缩应力应变曲线

Fig. 11 Compression stress-strain relationship of thick polyethylene foam board

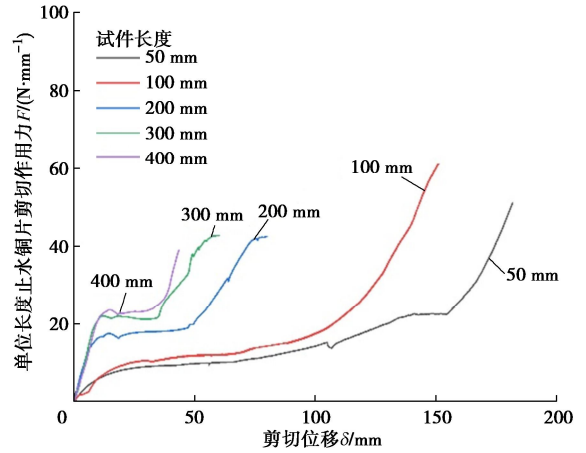


图 12 单位长度止水铜片剪切作用力 F 与剪切位移 δ 关系曲线

Fig. 12 Relationship between shear force of unit length copper waterstop F and shear displacement δ

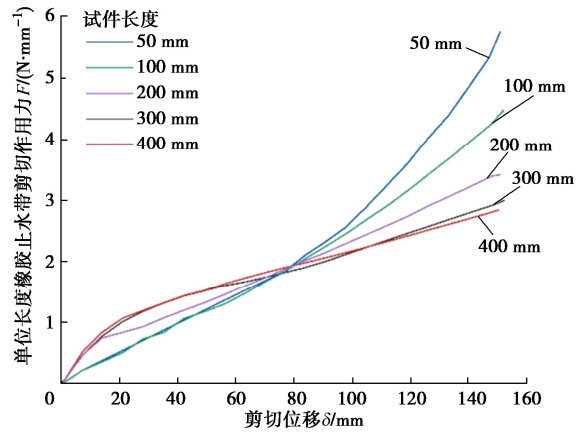


图 13 单位长度橡胶止水带剪切作用力 F 与剪切位移 δ 关系曲线

Fig. 13 Relationship between shear force F and shear displacement δ of unit length corrugated rubber waterstop

进行不同长度的接缝止水部件试验, 试件长度分别为 50, 100, 200, 300, 400 mm, 以研究试件长度的影响。从图 6~11 可以看出: 不同试件长度的接缝止水部件的沉降、拉伸和压缩试验的结果相当接近, 试件长度的影响可以忽略不计, 因此取不同试件长度的单位长度作用力与位移的关系曲线的均值可得到的接缝沉降、拉伸和压缩位移时止水刚度表达式。从图 12, 13 可以看出: 单位长度止水铜片和波形橡胶止水带剪切作用力 F 与剪切位移 δ 关系曲线, 随着试件长度增加逐渐向试件长度 300, 400 mm 的曲线趋近, 试件长度 300, 400 mm 的单位长度止水铜片和波形橡胶止水带剪切作用力 F 与剪切位移 δ 关系曲线试验结果已相当接近。可以取试件长度 400 mm 的剪切试验结果, 建立接缝止水剪切位移刚度表达式。高混凝土面板堆石坝接缝三向位移时主要部件刚度表达式或应力应变关系式如下。

止水铜片剪切位移刚度表示式为

$$F = 2.17405\delta - 0.06277\delta^2 + 6.7395 \times 10^{-4} \delta^3 \quad (1)$$

止水铜片沉降位移劲度表达式为

$$F = 0.3945\delta - 0.0164\delta^2 + 2.42863 \times 10^{-4} \delta^3 \quad (2)$$

止水铜片拉伸位移劲度表达式为

$$F = 0.1252\delta - 0.0017\delta^2 + 7.45633 \times 10^{-6} \delta^3 \quad (3)$$

波形橡胶止水带剪切位移劲度表达式为

$$F = 0.053\delta - 5.14986 \times 10^{-4} \delta^2 + 1.88768 \times 10^{-6} \delta^3 \quad (4)$$

波形橡胶止水带沉降劲度表达式为

$$F = 0.016\delta + 3.07094 \times 10^{-5} \delta^2 + 1.08677 \times 10^{-7} \delta^3 \quad (5)$$

波形橡胶止水带拉伸位移劲度表达式为

$$F = 0.0395\delta + 3.17702 \times 10^{-6} \delta^2 + 1.84252 \times 10^{-7} \delta^3 \quad (6)$$

聚乙烯泡沫薄板压缩应力应变关系式为

$$\sigma = 1286.56071\varepsilon - 3957.02925\varepsilon^2 + 4775.25974\varepsilon^3 \quad (7)$$

聚乙烯泡沫厚板压缩应力应变关系式为

$$\sigma = 1115.48602\varepsilon - 3600.3031\varepsilon^2 + 4390.3041\varepsilon^3 \quad (8)$$

式中： F 为单位长度止水作用力(N/mm或kN/m)； δ 为接缝位移(mm)； σ 为压应力(kPa)； ε 为压应变。拟合的相关系数为0.94~0.99。

混凝土面板堆石坝各接缝发生位移时各接缝止水部件在力的传递发挥各自作用，止水部件劲度表达式或应力应变关系式都采用多项式表示，因此依据接缝止水作用机理，将高混凝土面板堆石坝接缝止水主要部件的劲度表达式或应力应变关系式组合就可得到接缝位移时接缝止水的劲度表达式如式(9)~(21)应用于混凝土面板堆石坝应力变形计算分析。

周边缝剪切位移时劲度表达式为

$$F = 2.2271\delta - 0.0633\delta^2 + 0.00067\delta^3 \quad (9)$$

周边缝沉降位移时劲度表达式为

$$F = 0.4105\delta - 0.0163\delta^2 + 0.0002\delta^3 \quad (10)$$

周边缝压缩位移时劲度表达式为

$$F = 9.2124\delta - 1.9584\delta^2 + 0.1608\delta^3 \quad (11)$$

周边缝拉伸位移时劲度表达式为

$$F = 0.1647\delta - 0.016\delta^2 + 7.64058 \times 10^{-6} \delta^3 \quad (12)$$

面板垂直缝张性缝剪切位移时劲度表达式为

$$F = 2.2271\delta - 0.0633\delta^2 + 0.00067\delta^3 \quad (13)$$

面板垂直缝张性缝沉降位移时劲度表达式为

$$F = 0.4105\delta - 0.0163\delta^2 + 0.0002\delta^3 \quad (14)$$

面板垂直缝张性缝张开位移时劲度表达式为

$$F = 0.1647\delta - 0.016\delta^2 + 7.64058 \times 10^{-6} \delta^3 \quad (15)$$

面板垂直缝压性缝剪切位移时劲度表达式为

$$F = 2.1741\delta - 0.0628\delta^2 + 6.74 \times 10^{-6} \delta^3 \quad (16)$$

面板垂直缝压性缝沉降位移时劲度表达式为

$$F = 0.3945\delta - 0.0164\delta^2 + 2.43 \times 10^{-6} \delta^3 \quad (17)$$

面板垂直缝压性缝张开位移时劲度表达式为

$$F = 0.1252\delta - 0.0017\delta^2 + 7.6 \times 10^{-6} \delta^3 \quad (18)$$

面板垂直缝压性缝压缩位移时劲度表达式为

$$F = 5.8349\delta - 0.9658\delta^2 + 0.0604\delta^3 \quad (19)$$

垂直缝(压性缝)嵌缝材料应力应变关系式为

$$\sigma = 1115.48602\varepsilon - 3600.30031\varepsilon^2 + 4390.30414\varepsilon^3 \quad (20)$$

周边缝嵌缝材料的应力应变关系式为

$$\sigma = 1286.56071\varepsilon - 3957.02925\varepsilon^2 + 4775.25974\varepsilon^3 \quad (21)$$

3 接缝止水试验成果应用

本文所述的高混凝土面板堆石坝接缝止水试验研究成果在某高混凝土面板堆石坝(B坝)工程中得到应用。

3.1 B坝工程概况

B坝是坝高192 m混凝土面板堆石坝，最高运行水位(MFL)时水库总库容29.9亿 m^3 ，大坝建在沉积岩上，上游坝坡1:1.4，下游马道间坝坡1:1.3，马道宽9 m。坝顶长度1135 m，坝轴线在桩号0+880 m有转折，大坝左岸与电站进水口相邻，趾板X线陡峻。面板面积21.6万 m^2 ，面板宽度15 m，共计面板75块。面板分三期浇筑，面板浇筑时坝体填筑高程高于该期面板顶部高程10~27 m。

B坝典型断面和坝体分区如图14所示。

3.2 B坝三维有限元应力变形计算要点

筑坝材料进行大型三轴压缩试验，计算模型采用Duncan E-B模型和“南水”双屈服面模型，计算参数如表1所示。面板与垫层之间接触面进行接触面单剪试验，确定接触面计算参数(接触面计算参数从略)。接缝止水采用连接单元模拟。为了对比接缝单元应力应变关系对面板应力变形与接缝位移的影响，比较了以往只考虑接缝止水铜片研究成果(止水铜片计算参数如表2所示)与本文研究得出的高坝新型接缝止水试验研究成果对大坝应力变形性状的影响。

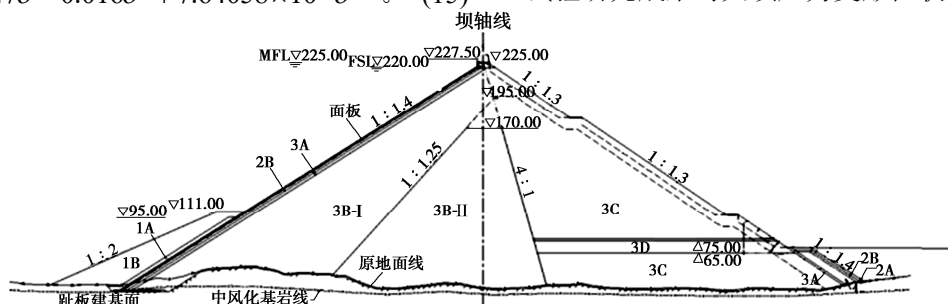


图14 B坝典型断面和坝体分区图

Fig. 14 Typical section and dam zoning of Dam B

表 1 B 坝筑坝材料静力特性计算参数

Table 1 Parameters of static mechanics of materials of Dam B

坝体分区	筑坝材料	干密度/ (g·cm ⁻³)	φ ₀ / (°)	Δφ / (°)	K	n	R _r	E-B 模型		南水模型		
								K _b	m	c _d /%	n _d	R _d
垫层区	微新砂岩	2.22	51.6	8.7	1075	0.34	0.64	770	0.23	0.24	0.62	0.61
过渡区	微新砂岩	2.19	52.9	10.0	1230	0.30	0.66	725	0.09	0.26	0.64	0.58
主堆石 3B I 区	微新砂岩 95%+ 微新页岩 5%	2.14	51.9	9.9	970	0.30	0.66	550	0.14	0.29	0.65	0.60
主堆石 3B II 区	微新砂岩 45%+ 中等风化砂岩 45%+ 微新页岩 10%	2.05	49.8	8.8	765	0.31	0.66	330	0.24	0.48	0.61	0.63
下游堆石 3C 区	微新砂岩 35%+ 中等风化砂岩 35%+ 微新页岩 30%	2.09	48.0	8.0	680	0.30	0.66	285	0.26	0.66	0.52	0.64
排水区 D 区	微新砂岩	2.14	51.4	9.6	1040	0.29	0.63	595	0.19	0.28	0.53	0.55

表 2 止水铜片单元计算参数

Table 2 Parameters of copper waterstop of CFRDs

接缝位移	拟合公式	a	b	c	d	e
张开位移	$F = a + be^{[c(\delta-d)/e]^2}$	-9.13	18.76	-0.50	34.66	35.97
沉降位移	$F = \frac{\delta - a}{b + c(\delta - a) + d(\delta - a)^2}$	45.54	0.24	0.14	0.0027	
剪切位移	$F = \frac{\delta}{a + b\delta - c\delta^2}$	0.89	0.06	5 × 10 ⁻⁵		

表 3 两类接缝止水参数计算得到的面板应力变形性状对比

Table 3 Comparison of stress-strain behaviors of concrete face by calculated using two kinds of joint stress-strain relationship parameters

接缝止水 计算参数	满蓄期面板变形最大值/cm				满蓄期面板应力最大值/MPa		
	挠度	坝轴向位移		顺坡向应力	坝轴向应力		
		向右岸	向左岸		拉应力	压应力	
以往值	47.5	4.6	-5.3	12.90	-1.27	12.10	
本次研究值	48.9	5.6	-5.9	13.22	-1.32	12.82	

表 4 两类接缝止水参数计算得到的接缝位移对比

Table 4 Comparison of joint displacement between that calculated using two kinds of joint stress-strian relationship parameters

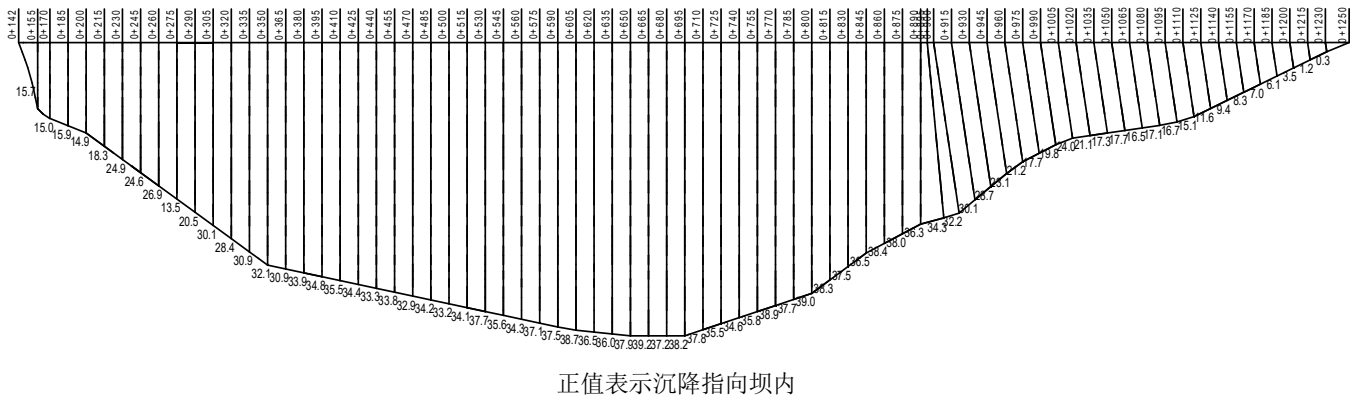
接缝止水参数	满蓄期周边缝							
	剪切位移		沉降位移		张开位移			
	区域/桩号	位移值/mm	区域/桩号	位移值/mm	区域/桩号	位移值/mm	区域/桩号	位移值/mm
以往值	0+155~0+425	2.2~25.8	0+305~0+1080	14.4~37.5	0+425~0+605	5.9~28.1	0+800~0+860	17.8~26.5
本次研究值	0+155~0+425	5.3~26.4	0+305~0+1080	16.7~39.2	0+425~0+605	7.5~33.5	0+800~0+860	20.4~27.7

接缝止水参数	满蓄期垂直缝							
	剪切位移		沉降位移		张开位移			
	区域/桩号	位移值/mm	区域/桩号	位移值/mm	区域/桩号	位移值/mm	区域/桩号	位移值/mm
以往值	0+305~0+365	8.1~12.7	0+470~0+890	5.4~13.2	0+230~0+305	11.0~14.2	0+860~0+930	6.8~13.8
本次研究值	0+305~0+365	8.2~13.6	0+470~0+890	5.4~13.5	0+230~0+305	14.2~14.8	0+860~0+930	6.8~13.8

3.3 接缝止水应力应变关系影响的对比

接缝止水应力应变关系对混凝土面板堆石坝变形应力性状的影响主要反映在面板应力变形性状和接缝位移。B 坝采用两类接缝止水应力应变关系计算参数计算得到的面板应力变形性状的分布规律基本相同, 采用本文研究的接缝止水应力应变关系计算参数得到的面板变形(挠度和坝轴向位移)和面板应力(顺坡向应力和坝轴向应力)均稍大, 如表 3 所示。

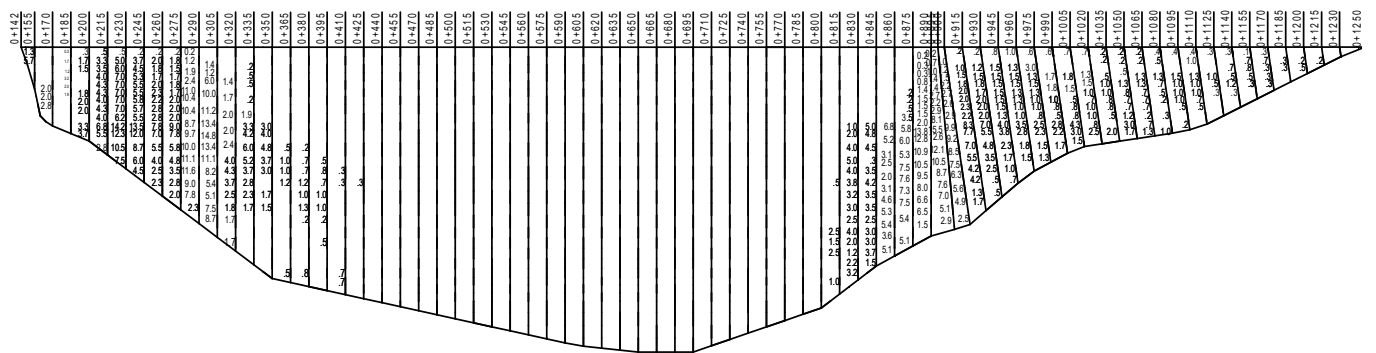
B 坝采用两类接缝止水应力应变关系得到的接缝位移分布规律也基本相同, 采用本文研究的接缝止水应力应变关系计算参数得到的接缝位移稍大, 特别是河床底部的周边缝沉降位移和张开位移, 地形较陡峭的两岸附近, 特别是左岸与电站进水口连接处的周边缝剪切位移, 左岸附近与坝轴线转折处垂直缝张开位移和剪切位移都稍大, 并且这些接缝位移的数值与范围都较大(如表 4 所示), 例如满蓄期周边缝沉降位移



正值表示沉降指向坝内

图 15 满蓄期周边缝沉降位移 (mm)

Fig. 15 Settlements of perimeter joint under FSL



正值表示张开; 未标注区域表示压紧

图 16 满蓄期垂直缝张开位移 (mm)

Fig. 16 Opening displacements of vertical joint under FSL

最大值达到 39.2 mm (如图 15 所示), 满蓄期周边缝剪切位移最大值达到 26.4 mm。满蓄期垂直缝张开位移最大值 14.8 mm (如图 16 所示)。从对比结果可以看出: 本文研究提出的接缝止水应力应变关系不仅较全面反映了高坝接缝止水结构部件对力的传递的贡献, 更能揭示复杂地形地质条件下高混凝土面板堆石坝设计布置的影响。

4 结 论

(1) 本文提出的接缝止水结构应力应变关系的试验方法采用通用的万能试验机配备专用夹具就可以测定高混凝土面板堆石坝新型止水结构主要部件对于力的传递的贡献, 组合形成止水结构三向位移的劲度表达式, 可用于高混凝土面板堆石坝应力变形性状计算。

(2) 本文提出的高混凝土面板堆石坝接缝止水的应力变形关系具有一定的代表性, 通过在 B 坝工程应用可以发现, 本文提出的接缝止水应力应变关系能更好地反映复杂地形地质条件下高坝设计布置对高混凝土面板堆石坝应力变形性状的影响。

参考文献:

- [1] 郇能惠. 高混凝土面板堆石坝新技术[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007. (LI Nenghui. Recent Technology for High Concrete Face Rockfill Dams[M]. Beijing: China Water and Power Press, 2007. (in Chinese))
- [2] 贾金生, 郇能惠, 徐泽平, 等. 高混凝土面板坝安全关键技术研究[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2014. (JIA Jinsheng, LI Nenghui, XU Zeping, et al. Study on Key Technology for the Safety of High CFRDs[M]. Beijing: China Water and Power Press, 2014. (in Chinese))
- [3] 徐 耀, 郝巨涛. 混凝土面板堆石坝面板接缝止水技术的发展与展望[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2018, 16(5): 457-465. (XU Yao, HAO Jutao. Development and prospect of slab joint waterstop technology of CFRDs[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2018, 16(5): 457-465. (in Chinese))
- [4] 贾金生, 郝巨涛, 吕小彬, 等. 高混凝土面板堆石坝周边缝新型止水[J]. 水利学报, 2001, 32(2): 35-38. JIA Jinsheng, HAO Jutao, LÜ Xiaobin, et al. New type of waterstop for

- perimetric joints of high CFRD[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001, **32**(2): 35-38. (in Chinese))
- [5] 郝巨涛, 岳耀真, 吕小彬, 等. 面板坝铜片止水水力学性能的试验研究[J]. 水利学报, 2000, **31**(10): 16-21. (HAO Jutao, YUE Yaozhen, LÜ Xiaobin, et al. Experimental study on mechanical properties of copper waterstop in CFRD[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2000, **31**(10): 16-21. (in Chinese))
- [6] 谭建平. SR 型塑性止水材料的研制与应用[C]// 土石坝技术 2005 年论文集. 北京: 中国电力出版社, 2005: 267-289. (TAN Jianping. Development and application of SR type plastic sealing material[C]// Proceeding of Technology for Earth-rockfill Dams. Beijing: China Electric Power Press, 2005: 267-289. (in Chinese))
- [7] 卢廷浩, 王益群, 刘志刚. 周边缝结构模型试验及缝单元本构关系[C]// 混凝土面板堆石坝国际研讨会, 北京, 2000. (LU Tinghao, WANG Yiqun, LIU Zhigang. Structure model test and constitutive relation on perimeter joint[C]// Proceedings International Symposium on Concrete Faced Rockfill Dams, Beijing, 2000. (in Chinese))
- [8] 刘浩吾. 混凝土面板堆石坝接缝止水的实验和分析[J]. 岩土工程学报, 1995, **17**(5): 65-70. (LIU Haowu. Tests and analysis of joint waterstops of concrete face rockfill dams[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1995, **17**(5): 65-70. (in Chinese))
- [9] 蔡胜华, 黄良锐, 唐丽芳. 水布垭水利枢纽面板堆石坝接缝止水材料及型式试验研究[J]. 长江科学院院报, 1999, **16**(1): 60-64. (CAI Shenghua, HUANG Liangrui, TANG Lifang. Study on sealing materials and type of concrete joints in CFRD of Shuibuya project[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 1999, **16**(1): 60-64. (in Chinese))
- [10] 卢廷浩, 袁俊平. 面板堆石坝三维计算的几个问题[C]// 土石坝与岩土力学技术研讨会论文集, 都江堰, 2001. (LU Tinghao, YUAN Junping. Somethings about three-dimensional calculations of CFRD[C]// Proceedings of National Symposium on Earth-rockfill Dams and Geotechnical Mechanics, Dujiangyan, 2001. (in Chinese))
- [11] 曹利军, 马超, 彭文哲, 等. 三向位移作用下面板堆石坝周边缝“W”型铜止水变形特性研究[J]. 中国农村水利水电, 2021(4): 177-181, 187. (CAO Lijun, MA Chao, PENG Wenzhe, et al. Research on the deformation characteristics of “W” type copper water stop at peripheral joints of CFRD under three-dimensional displacement[J]. China Rural Water and Hydropower, 2021(4): 177-181, 187. (in Chinese))