

PVA 纤维对混凝土抗裂与增韧效应影响的研究进展

郭丽萍^{1,2}, 陈波³, 杨亚男¹

(1. 东南大学材料科学与工程学院, 江苏 南京 211189; 2. 江苏省土木工程材料重点实验室, 江苏 南京 211189;
3. 南京水利科学研究院水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029)

摘要: 对高抗拉强度和高弹性模量的聚乙烯醇(PVA)纤维在影响混凝土抗裂与增韧效应方面的研究进展和存在的问题进行了综述。在改善抗裂性能方面,PVA纤维提高了混凝土的抗塑性开裂能力和极限拉伸值等性能,我国大型水利水电及水运工程已经开始采用PVA纤维提高混凝土的抗裂性;在韧性提高方面,研究主要集中在纤维掺量、混凝土强度、钢筋配筋率等因素对混凝土弯曲韧性的影响上。认为应在PVA纤维增韧材料的设计理论、裂缝形成与扩展的机制、PVA纤维混凝土本构方程等方面开展进一步的研究。

关键词: 聚乙烯醇纤维;混凝土;抗裂性能;弯曲韧性

中图分类号: TU528.572 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7647(2015)06-0113-06

Progress of PVA fibers research in improving crack resistance and toughness of concrete//GUO Liping^{1,2}, CHEN Bo³, YANG Ya'nan¹ (1. School of Materials Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China; 2. Jiangsu Key Laboratory of Construction Materials, Nanjing 211189, China; 3. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: The progress of research on and existing problems with polyvinyl alcohol (PVA) fibers with high tensile strength and high elastic modulus in improving crack resistance and toughness of concrete are summarized. In terms of crack resistance improvement, PVA fiber improves the resistance to plastic cracking and ultimate tensile strength of concrete. Projects in hydraulic engineering, hydropower engineering, and water transport engineering in China have begun using PVA fibers to improve crack resistance of concrete. In terms of toughness improvement, research mainly focuses on the effect of fiber content, concrete strength, the reinforcement ratio, and other factors in the flexural toughness of concrete. The theory of design of toughening materials, mechanisms of crack formation and propagation, and constitutive equations of PVA fiber-reinforced concrete should be further investigated.

Key words: polyvinyl alcohol fiber; concrete; crack resistance; flexural toughness

聚乙烯醇(polyvinyl alcohol, PVA)纤维作为一种高抗拉强度和高弹性模量的新型合成纤维,在提高混凝土的抗裂性能与弯曲韧性方面有着广阔的应用前景。

在大型水利水电工程、桥梁、铁路、港口码头、高层建筑、地铁及隧道工程建设中,越来越多的用到高强高性能混凝土。使用高强高性能混凝土可以优化结构设计,提高空间利用率,加快施工速度,但高性能混凝土的收缩和脆性却制约着其应用和发展。混凝土强度越高,混凝土的拉压比越低,混凝土越脆,越易开裂,因此,对提升混凝土的抗裂性与弯曲韧性提出了更高的要求。PVA纤维是实现工程水泥基

材料(ECC)超高延性的关键材料^[1-3],但是,在参加高强度高弹性模量的PVA纤维来提高混凝土的抗裂性能与弯曲韧性的试验研究与工程应用方面,目前还缺少系统的研究。本文综述了近年来PVA纤维对混凝土抗裂与增韧效应影响方面的研究进展,并对进一步研究的方向作了展望。

1 PVA纤维的性能及特点

用于混凝土抗裂,常用的是当量直径5~20 μm、拉伸强度约为1100 MPa、弹性模量小于35 GPa的中等强度和模量的超细短切PVA纤维,也可以使用高强度高弹性模量的短切PVA纤维。高强度高弹性

基金项目:国家自然科学基金(51378113);中国铁路总公司科技开发计划重点课题(2014G004-N);中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(Y414001)

作者简介:郭丽萍(1979—),女,山西运城人,副教授,博士,主要从事纤维混凝土增韧及耐久性研究。E-mail:guoliping691@163.com

模量的 PVA 纤维具有与钢筋一样高的抗拉强度,其弹性模量大于或等于 35 GPa,跟混凝土的弹性模量比较接近,可显著提升混凝土韧性或延性。PVA 纤维在混凝土中分散均匀、乱向分布、相互搭接成立体的网状结构,在混凝土中起到提高抗裂性、增强韧性的作用,从而提高混凝土的整体质量及耐久性。PVA 纤维掺入混凝土后与混凝土中的任何材料都不发生化学反应,其物理、化学性能稳定,PVA 纤维在混凝土中所发挥的抗裂增韧等作用 是纯物理性的,是一种能提高混凝土抗裂性与韧性的新型材料。

PVA 纤维在混凝土中的均匀分散程度,是发挥其在混凝土中抗裂及增韧效应的重要前提。对于高掺量 PVA 纤维混凝土而言,PVA 纤维均匀分散特性对于混凝土抗裂增韧效应的影响更加显著。张丽辉等^[3-4]在相关研究中采用高强度高弹性模量短切 PVA 纤维,当纤维体积掺量提高到 2% 时,仍能保证纤维的均匀分散,且对混凝土抗裂性与韧性有显著提升效果。但是对于高掺量的中等强度和弹性模量超细短切 PVA 纤维混凝土,在实际使用时,容易出现纤维在混凝土中结团或分散不均匀的情况,需要通过优化新拌混凝土塑性黏度和改善 PVA 纤维表面亲水性等措施来提高超细 PVA 纤维在混凝土中的均匀性分散特性,从而保证其对混凝土抗裂性能作用的发挥。

2 PVA 纤维在国内抗裂混凝土中的试验研究与工程应用

目前我国大型水利水电及水运工程中已经开展了采用 PVA 纤维来提高混凝土抗裂性的试验研究并在工程中得到应用。

计涛等^[5]结合某水电工程抗冲磨混凝土的抗裂要求,研究了 PVA 纤维增强抗冲磨混凝土的变形性能、抗裂性能,试验结果表明:当 PVA 纤维掺量为 0.9 kg/m³ 时,混凝土的 28d、90d 和 180d 极限拉伸值分别增大了 10%、11% 和 4%。PVA 纤维对混凝土塑性阶段的抗裂性能提高明显,对混凝土早期干缩有一定的抑制效果,但是掺 PVA 纤维混凝土后期的干缩值略有增加。

表 1 PVA 纤维在混凝土抗裂中的应用实例

工程名称	混凝土强度等级	PVA 纤维掺量/ (kg · m ⁻³)	PVA 纤维性能参数					
			长度/mm	当量 直径/μm	密度/ (g · cm ⁻³)	抗拉 强度/MPa	弹性 模量/GPa	断裂 延伸率/%
某水电工程 ^[5]	C ₉₀ 50	0.9	12		1.28	1 565	38.0	8.0
锦屏一级 ^[6]	C ₁₈₀ 40	0.9						
溪洛渡 ^[8]	C ₁₈₀ 40	0.9			1.28	1 646	37.1	6.6
向家坝 ^[9]	C ₁₈₀ 25/C ₉₀ 30	0.9				1 685	41.0	
皂河三线船闸 ^[10]	C25	12.0	9	20	1.29	1 300	37.0	7.0

李光伟等^[6]结合锦屏一级和溪洛渡水电站拱坝 C₁₈₀40 混凝土开展了 PVA 纤维混凝土体积稳定性试验,结果表明:在高拱坝混凝土中掺入 0.9 kg/m³ 的 PVA 纤维,可以有效降低拱坝混凝土的弹性模量,提高拱坝混凝土的极限拉伸值,减少拱坝混凝土的收缩变形,提高拱坝混凝土的抗裂性能。

改性 PVA 纤维在溪洛渡水电站大坝强约束区、长间歇等施工部位得到了成功应用,累计浇筑改性 PVA 纤维混凝土超过 50 万 m³;现场检测试验结果表明,掺改性 PVA 纤维混凝土 7 d、28 d、90 d、180 d 极限拉伸值分别提高 17.5%、11.9%、7.1% 和 4.8%,且尚未发现裂缝^[7-8]。

金沙江向家坝水电站为防止长间歇面发生裂缝的风险,除采用常规的温控措施外,在收仓前浇筑了掺 0.9 kg/m³ 改性 PVA 纤维的常态混凝土(厚度为 0.5 m)和碾压混凝土(厚度 0.6 m),以提高混凝土的抗拉强度和极限拉伸值^[9]。试验结果显示,改性 PVA 纤维混凝土较不掺纤维的混凝土抗拉强度和极限拉伸值均有所提高,干缩率降低,且不影响混凝土自生体积变形;也有部分试验结果显示,掺 PVA 纤维混凝土的自生体积变形有减小的趋势。从施工现场数据来看,掺改性 PVA 纤维混凝土较不掺纤维混凝土长间歇面的裂缝明显减少,甚至基本没有裂缝;掺改性 PVA 纤维混凝土能够改善碾压混凝土层面的结合质量,在早期及中后期有利于大坝混凝土的抗裂。

在水运工程也有应用的案例,如在京杭运河扩容工程皂河三线船闸工程中,为了提高混凝土的抗裂性能,浇筑了 PVA 纤维体积掺量为 1% (在混凝土配合比中,PVA 纤维的用量为 12 kg/m³) 的 C25 混凝土试验段^[10]。

表 1 为在不同工程中混凝土的强度等级、PVA 纤维掺量及纤维的性能参数。从表 1 可以看出,为了尽可能地提高混凝土的抗裂性能,PVA 的最优掺量的确定,仍需要进一步研究。在目前的水利水电工程中,采用 PVA 纤维提高混凝土的抗裂性时,不管是常态混凝土、泵送混凝土,还是碾压混凝土,都采用的是 0.9 kg/m³ 的掺量,这是参照聚丙烯纤维的常用掺量

而定的。聚丙烯纤维的密度是 0.9 g/cm^3 , 按照 0.1% 体积掺量折算, 得出在混凝土中的质量掺量为 0.9 kg/m^3 ; 而 PVA 纤维的密度为 1.3 g/cm^3 , 采用与聚丙烯纤维同样的质量掺量, 其合理性值得商榷。Noushini 等^[11] 在混凝土中掺入体积掺量分别为 0.125% 、 0.25% 、 0.375% 和 0.5% 的表面未经处理的 PVA 纤维, 进行混凝土的干燥收缩试验, 结果表明, 不论是 $0\sim7\text{ d}$ 还是 $28\sim112\text{ d}$, 掺入 PVA 纤维的混凝土干缩比基准混凝土平均高 $5\%\sim10\%$, 这表明在 $0.125\%\sim0.5\%$ 掺量区间, 掺量对干缩的影响不明显; 而在皂河三线船闸混凝土试验段中, 同样是为了达到提高混凝土抗裂性的目的, 采用了 1% 的体积掺量。

在以往的关于 PVA 纤维在抗裂混凝土的相关工程应用研究中, 更多的是从塑性收缩、干缩、自生体积变形、极限拉伸值、弹性模量等宏观性能上研究 PVA 纤维对混凝土抗裂性能的改善效果, 表 1 所列出的纤维长度、当量直径、弹性模量等基本性能参数对混凝土抗裂性能的影响却研究较少, 而 PVA 纤维本身的性能对混凝土抗裂性能影响的微观机理和基础理论也没有得到足够的关注。

3 PVA 纤维在增韧混凝土中的试验研究

近年来, 国内外逐渐开展了采用 PVA 纤维提高混凝土材料韧性的研究。

邓宗才等^[12] 对水胶比 0.38 、抗弯强度为 $5.82\sim7.02\text{ MPa}$ 的 PVA 纤维混凝土的弯曲韧性进行了研究, 按照 ASTM C1018—1997《Standard test method for flexural toughness and first-crack strength of fiber-reinforced concrete (using beam with third-point loading)》测定了不同 PVA 纤维掺量混凝土梁的荷载-挠度全曲线。PVA 纤维体积掺量为 0.06% 、 0.076% 、 0.10% 时, 韧性指数 I_5 分别是不掺 PVA 纤维基准混凝土的 3.89 、 3.82 和 4.24 倍, I_{10} 分别是基准混凝土的 5.33 、 6.08 和 7.29 倍, I_{30} 分别是基准混凝土的 8.91 、 8.98 和 9.83 倍, 掺入 PVA 纤维以后, 混凝土在断裂过程中吸收能量的能力显著增强。掺加 PVA 纤维以后, 混凝土抗弯强度较基准混凝土分别提高 10% 、 24% 、 33% 。

Noushini 等^[13] 研究了体积掺量为 0.125% 、 0.25% 和 0.5% , 抗压强度为 60 MPa 左右的混凝土弯曲韧性, 0.5% 掺量时混凝土韧性改善效果最好。同时, Noushini 等^[14] 还研究了 PVA 纤维长度分别为 6 mm 和 12 mm 、体积掺量均为 0.5% 的混凝土的荷载-裂缝张开位移 (CMOD) 关系, 结果表明, 在 CMOD 为 0.5 mm 时, 掺 PVA 纤维混凝土的残余抗

弯强度均为基准混凝土的 2 倍以上。

在超高强 PVA 增韧混凝土方面, 已针对 C110 和 C100 强度等级混凝土开展了相关研究。

闫长旺等^[15] 从拉压比的角度研究了 PVA 纤维对混凝土韧性的改善效果。在 C100 混凝土中 PVA 纤维掺量为 0% 、 0.17% 、 0.25% 、 0.34% 、 0.5% 时, 超高强混凝土拉压比为 $0.0562\sim0.0661$, 拉压比值与未掺 PVA 纤维的基准混凝土相比, 提高了 $15.3\%\sim35.6\%$ 。

杜修力等^[16] 按照 ASTM C1018—97 对体积掺量为 $0\%\sim1.5\%$ 、基体强度为 110 MPa 以上的 PVA 纤维高强混凝土弯曲韧性进行了试验研究。PVA 纤维体积掺量为 0.5% 、 1.0% 和 1.5% 时, 混凝土的抗弯强度比基准混凝土分别增大了 35% 、 28% 和 273% 。混凝土弯曲韧性试验表明, 在 0.5% 掺量时, 混凝土到达最大荷载时混凝土呈脆性破坏, 无法测得荷载-挠度曲线的下降段; 掺量提高至 1.0% 和 1.5% 时, 可以测得完整的荷载-挠度曲线。随着 PVA 纤维掺量的提高, 混凝土的抗弯韧性得到提高, PVA 纤维体积掺量增加到 1.5% 时, 韧性指数 I_5 、 I_{10} 、 I_{20} 分别是基体混凝土的 4.49 、 8.42 、 14.85 倍, 较 1.0% 掺量时分别提高 7.5% 、 10.3% 和 7.2% 。

此外, 在结构构件层次开展 PVA 纤维增强钢筋混凝土梁抗弯性能的试验, 进行 PVA 纤维的增韧效果评价的研究也逐渐增多^[17-21]。

Hamoush 等^[17] 研究了抗压强度为 $33\sim53\text{ MPa}$ 、PVA 纤维掺量为水泥质量 3% 的钢筋纤维混凝土在受压与受拉状态下的应力-应变曲线以及混凝土在四点弯曲试验中的荷载-挠度关系, 提出了 PVA 纤维钢筋混凝土的荷载-挠度预测方程。

苏骏等^[18-19] 进行了 PVA 纤维增强钢筋混凝土梁抗弯性能试验, 在 C30 混凝土梁中配置 2 根受拉纵向钢筋, PVA 纤维体积掺量为 1.0% 和 2.0% 。试验结果表明, 随 PVA 纤维含量的增加, 初裂荷载和极限承载力都有一定的提高, 混凝土的延性得到改善, 混凝土由脆性破坏变为延性破坏, 混凝土梁呈多缝开裂。林晖^[10] 试验结果也表明, 当 PVA 纤维体积掺量大于 0.5% 时, 混凝土出现了双缝和多缝开裂的特征。

何飞等^[20] 进行了 PVA 纤维增强钢筋混凝土梁抗弯性能四点弯曲试验, 在 C40 混凝土梁中配置 2 根受拉钢筋, PVA 纤维体积掺量为 0.05% 、 0.15% 、 0.3% 、 0.5% 和 1.0% , 试验结果表明, 掺加 PVA 纤维的混凝土低配筋梁表现出了适筋梁的受弯破坏形式; 随着 PVA 纤维掺量的提高, 混凝土梁吸收能量的能力增强, 混凝土裂缝宽度减小、裂缝数

量增多,变形能力增强。

袁勇等^[21]以 PVA 纤维体积掺量为 0.5% 和 1.0% 的钢筋混凝土梁(混凝土水胶比 0.46)为研究对象,其弯曲试验研究表明,纤维的加入使得钢筋混凝土梁的受力变形特性有所改变,适用于普通混凝土梁的相关规范所给出的开裂荷载、极限荷载、裂缝宽度计算公式不再适用于掺 PVA 纤维混凝土梁。

表 2 为相关试验的混凝土强度(强度等级)、试件尺寸、配筋及 PVA 纤维的基本物理力学性能参数等信息。从表 2 可以看出,这些 PVA 纤维的当量直径较小,抗拉强度和断裂延伸率均差别很大。随着生产工艺和技术的发展,已研发出当量直径约为 40 μm 的高强度高弹性模量 PVA 纤维,预计其增韧效果将会与 15 μm 当量直径的 PVA 纤维存在一定差异。PVA 纤维的物理力学性能变化对混凝土韧性的影响,目前尚未有系统的研究。

上述研究结果表明,不论是普通强度的混凝土,还是高强、超高强混凝土,PVA 纤维明显改善了混凝土弯曲韧性,且韧性随纤维掺量的增加而增大。在普通混凝土中,纤维体积掺量约 0.1% 时,已经能明显改善混凝土的弯曲韧性,而对高强、超高强混凝土,纤维体积掺量在 0.5% 时,混凝土仍呈脆性破坏。混凝土强度等级越高,需要更高的掺量来提高混凝土的韧性。在低强度等级混凝土中,PVA 纤维表现出拔出破坏模式,在高强、超高强混凝土中,PVA 纤维表现出拔断破坏模式。PVA 纤维的掺量、混凝土的强度以及纤维的破坏模式存在一定的相关关系。

4 研究展望

a. 关于 PVA 纤维增韧材料的设计理论。根据复合材料理论,纤维混凝土的性能取决于纤维、基体和界面特性及三者相互之间的关系。在高延性水泥基复合材料的研究中,基于细观力学的材料设计理论已基本完善,而在混凝土材料的层次,PVA 纤维增强混凝土的材料设计仍然沿用普通混凝土配合比设计或钢纤维混凝土配合比设计的思路,即采用大

量的试配试验,优选出满足特定性能要求的配合比和纤维掺量,而纤维本身的性能参数以及纤维与基体的相互作用,在材料设计中完全被忽略。高抗裂、高韧性的 PVA 纤维混凝土尚缺少完善的材料设计理论,需开展 PVA 纤维的表面特性、强度、弹性模量、当量直径、长径比、断裂伸长率等材料性能参数对混凝土性能的影响,掺 PVA 纤维混凝土的流变学特性、纤维与基体的界面特性、亲水性 PVA 纤维对混凝土耐久性的影响等方面的研究,以完善 PVA 纤维设计理论。

b. 关于裂缝形成与扩展的机制。PVA 纤维混凝土的材料试验和结构试验均表明,掺入一定量的 PVA 纤维以后,混凝土的裂缝宽度、数量等特征与未掺纤维的混凝土有明显的差异。目前的研究关注对宏观试验现象的观察和描述,而在裂缝起裂与扩展的机制、纤维与基体之间的滑移或拔出过程中的能量吸收及耗散、纤维三维分布对裂缝扩展的影响等方面,缺少从微观到宏观的多尺度结构、多性能层次的损伤及断裂机制的研究。

c. 关于 PVA 纤维混凝土本构方程。尽管 Hamoush 等^[17]提出了 PVA 纤维混凝土荷载-挠度预测模型,袁勇等^[21]提出了针对特定 PVA 纤维混凝土的裂缝宽度计算拟合公式,但关于 PVA 纤维混凝土本构方程的研究仍处于起步阶段,对 PVA 纤维混凝土结构设计和工程应用缺少必要的理论支撑以及行业规程和国家标准。尤其需要关注 PVA 纤维混凝土在弯曲荷载作用下的荷载-挠度关系或荷载-CMOD 关系,关注混凝土裂缝扩展与残余承载力的关系,建立弯曲荷载作用下 PVA 纤维混凝土的本构方程,为 PVA 纤维混凝土的结构设计提供依据。

d. 进一步开展高抗裂、高韧性的 PVA 纤维混凝土基础研究,这对于发展新型合成纤维混凝土基础理论、推动相应的工程应用技术提升、维护对抗裂和韧性有较高要求的重大基础工程混凝土结构的安全性和服役寿命,都具有重要的理论意义和工程应用价值。

表 2 PVA 纤维增强钢筋混凝土构件的材料参数

数据来源	混凝土强度	试件尺寸/mm	受拉配筋	掺量/%	PVA 纤维性能参数					
					长度/mm	当量直径/μm	密度/(g·cm ⁻³)	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	断裂延伸率/%
文献[17]	33~53 MPa	1830×133×140	2 φ 12 2 φ 16	3(水泥质量)	6,8,18		1.3	1 100~1 400		
文献[18-19]	C30	2 000×300×150	2 φ 12 2 φ 14 2 φ 16	0.5,1,1.5,2	12	15	1.3	1 704	33.4	12
文献[20-21]	C40	2 000×250×150	2 φ 12	0.05,0.1,0.3,0.5,1.0	12	15	1.28	>1 612	41.2	6

5 结 语

掺加 PVA 纤维可有效提高混凝土的抗裂性能,该技术已经在水利水电工程中得到了大量的应用。应进一步开展不同 PVA 纤维掺量、不同 PVA 纤维材料物理力学性能对不同强度等级的混凝土抗裂与增韧效应影响的研究,而 PVA 纤维混凝土的材料设计理论、多尺度的裂缝形成与扩展的机制、混凝土本构方程等研究亟待开展。

参考文献:

[1] LI V C. 高延性纤维增强水泥基复合材料的研究进展及应用[J]. 硅酸盐学报,2007,35(4):531-536. (LI V C. Progress and application of engineered cementitious composites[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2007,35(4):531-536. (in Chinese))

[2] LI V C. Tailoring ECC for special attributes: a review [J]. International Journal of Concrete Structures and Materials,2012,6(3): 135-144.

[3] 张丽辉,郭丽萍,孙伟,等.生态型高延性水泥基复合材料的高温损伤[J]. 硅酸盐学报,2014,42(8):68-74. (ZHANG Lihui, GUO Liping, SUN Wei, et al. Damage of ecological high ductility cementitious composites after exposed to high temperature[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society,2014,42(8):68-74. (in Chinese))

[4] 张丽辉,郭丽萍,孙伟,等.高延性水泥基复合材料的流变特性和纤维分散性[J]. 东南大学学报:自然科学版,2014,44(5):1037-1040. (ZHANG Lihui, GUO Liping, SUN Wei, et al. Rheological property and fiber dispersion of high ductility cementitious composites[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2014, 44(5):1037-1040. (in Chinese))

[5] 计涛,纪国晋,王少江,等. PVA 纤维对水工抗冲磨混凝土性能的影响[J]. 东南大学学报:自然科学版,2010,40(2):192-196. (JI Tao, JI Guojin, LIU Yanxia, et al. Influence of polyvinyl alcohol fiber on properties of hydraulic abrasion-resistant concrete [J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2010, 40(2):192-196. (in Chinese))

[6] 李光伟,鲁少林,钟贻辉. PVA 纤维在水工高拱坝混凝土中的应用[J]. 华北水利水电学院学报,2012,33(6):112-115. (LI Guangwei, LU Shaolin, ZHONG Yihui. The application of PVA fiber in hydraulic high arch dam concrete[J]. Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power,2012,33(6):112-115. (in Chinese))

[7] 孙明伦,张利平,石妍.大坝改性 PVA 纤维混凝土的性能试验研究[J]. 混凝土,2012(7):124-126. (SUN Minglun, ZHANG Liping, SHI Yan. Study of performance

of dam concrete with modified PVA fiber[J]. Concrete, 2012(7):124-126. (in Chinese))

[8] 杨富亮.溪洛渡水电站掺 PVA 纤维混凝土的试验研究及应用[J]. 云南水力发电,2011,27(5):11-17. (YANG Fuliang. Test and study of improved PVA fibre blended concrete and its application in Xiluodu Hydropower Project [J]. Yunan Water Power, 2011, 27(5):11-17. (in Chinese))

[9] 窦立刚,施建梅.金沙江向家坝改性 PVA 纤维混凝土的技术参数研究[J]. 黄河水利职业技术学院学报,2012,24(1):18-21. (DOU Ligang, SHI Jianmei. The study of technical parameters of modified PVA fiber reinforced concrete in Xiangjia Dam of Jinsha River[J]. Journal of Yellow River Conservancy Technical Institute, 2012,24(1):18-21. (in Chinese))

[10] 林晖. 掺 PVA 纤维混凝土的力学及变形性能研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2006.

[11] NOUSHINI A, VESSALAS K, ARABIAN G, et al. Drying shrinkage behaviour of fibre reinforced concrete incorporating polyvinyl alcohol fibres and fly ash [J/OL]. Advances in Civil Engineering,2014. doi:10.1155/2014/836173.

[12] 邓宗才,薛会青,李朋远. PVA 纤维增强混凝土的弯曲韧性[J]. 南水北调与水利科技,2007,5(5):139-141. (DENG Zongcai, XUE Huiqing, LI Pengyuan. Flexural toughness of polyvinyl alcohol (PVA) fiber reinforced concrete beams [J]. South-to-North Transfers and Water Science & Technology, 2007, 5(5):139-141. (in Chinese))

[13] NOUSHINI A, SAMALI B, VESSALAS K. Flexural toughness and ductility characteristics of polyvinyl-alcohol fibre reinforced concrete (PVA-FRC) [C]//Proceedings of the 8th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures. Toledo, Spain: International Association of Fracture Mechanics for Concrete and Concrete Structures,2013:1110-1121.

[14] NOUSHINI A, VESSALAS K, SAMALI B. Static mechanical properties of polyvinyl alcohol fiber reinforced concrete (PVA-FRC) [J]. Magazine of Concrete Research,2014,66(9):465-483.

[15] 闫长旺,张菊,贾金青.高弹模 PVA 纤维超高强混凝土拉压比试验研究[J]. 内蒙古工业大学学报:自然科学版,2012,31(1):58-62. (YANG Changwang, ZHANG Ju, JIA Jinqing. Evaluation of ratio between splitting tensile strength and compressive strength of high modulus polyvinyl alcohol (PVA) fiber reinforced ultra high strength concrete[J]. Journal of Inner Mongolia University of Technology,2012,31(1):58-62. (in Chinese))

[16] 杜修力,田予东,李晓欣,等. PVA 纤维高强混凝土的力学性能试验研究[J]. 混凝土与水泥制品,2008(4):46-49. (DU Xiuli, TIAN Yudong, LI Xiaoxin, et al. The study

of mechanical properties of PVA fiber reinforced high strength concrete [J]. China Concrete and Cement Products, 2008 (4) : 46-49. (in Chinese)

[17] HAMOUSH S, ABU-LEBDEH T, CUMMINS T. Deflection behavior of concrete beams reinforced with PVA micro-fibers [J]. Construction and Building Materials, 2010, 24 (11) : 2285-2293.

[18] 苏骏, 李响. PVA 纤维混凝土受弯梁力学性能分析 [J]. 湖北工业大学学报, 2012, 27 (2) : 122-124. (SU Jun, LI Xiang. Analysis on the mechanical behavior of the flexural PVA fiber-reinforced concrete beam [J]. Journal of Hubei University of Technology, 2012, 27 (2) : 122-124. (in Chinese))

[19] 李响. PVA 纤维混凝土梁抗弯性能研究 [D]. 武汉: 湖

(上接第 72 页)

综上所述, 经过变形成因分析、焦点问题分析, 认为小湾大坝经受了 1 240 m 正常蓄水位工况下的综合考验, 尽管坝体变形量值较大, 但变形规律总体正常, 大坝首蓄期处于安全状态。

参考文献:

[1] 邢林生, 周建波. 我国特高坝安全长效运行技术探讨 [J]. 水利水电科技进展, 2013, 33 (4) : 1-5. (XING Linsheng, ZHOU Jianbo. Discussion on long-term and safety operation of ultra-high dams in China [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2013, 33 (4) : 1-5. (in Chinese))

[2] 邹丽春. 小湾水电站工程的挑战与思考 [J]. 水力发电, 2010, 36 (12) : 15-19. (ZOU Lichun. Challenge and thinking of constructing Xiaowan Hydropower Project [J]. Water Power, 2010, 36 (12) : 15-19. (in Chinese))

[3] 赵斌, 赵志勇, 邱小弟, 等. 小湾水电站安全监测自动化

系统的总体设计 [J]. 水电自动化与大坝监测, 2008, 32 (6) : 53-57. (ZHAO Bin, ZHAO Zhiyong, QIU Xiaodi, et al. General design of safety monitoring automation system for Xiaowan Hydropower Station [J]. Hydropower Automation and Dam Monitoring, 2008, 32 (6) : 53-57. (in Chinese))

[4] 胡波. 基于原型监测的小湾特高拱坝首次蓄水期变形特性若干关键问题研究 [R]. 南京: 南京南瑞集团公司, 河海大学, 2013.

[5] 胡灵芝, 邹兴宏. 云南澜沧江小湾水电站第三阶段蓄水期拱坝及坝基坝肩安全监测资料分析专题报告 [R]. 昆明: 中国水电顾问集团昆明勘测设计研究院, 2011.

[6] 舒涌. 二滩拱坝初次蓄水的变位监测反分析 [J]. 水电站设计, 2006, 22 (2) : 34-41. (SHU Yong. Back analysis of displacement monitoring results during Ertan Arch Dam first impoundment [J]. Electromechanical Technology of Hydropower Station, 2006, 22 (2) : 34-41. (in Chinese))

(收稿日期: 2014 - 08 - 24 编辑: 郑孝宇)

(上接第 81 页)

[5] 杨璞, 刘应华, 袁鸿雁, 等. 计算结构极限载荷的修正弹性补偿法 [J]. 工程力学, 2006, 23 (3) : 21-26. (YANG Pu, LIU Yinghua, YUAN Hongyan, et al. A modified elastic compensation method for the computation of limit loads [J]. Engineering Mechanics, 2006, 23 (3) : 21-26. (in Chinese))

[6] 陈立杰, 刘应华, 杨璞, 等. 复杂结构塑性极限分析的修正弹性补偿法 [J]. 机械工程学报, 2007, 43 (5) : 187-193. (CHEN Lijie, LIU Yinghua, YANG Pu, et al. Modified elastic compensation method for limit analysis of complex structures [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43 (5) : 187-193. (in Chinese))

[7] 杨绿峰, 余波, 张伟. 弹性模量缩减法分析杆系和板壳结构的极限承载力 [J]. 工程力学, 2009, 26 (12) : 64-

70. (YANG Lufeng, YU Bo, ZHANG Wei. The elastic modulus reduction method for load carrying capacity evaluation of frame, plate and shell structures [J]. Engineering Mechanics, 2009, 26 (12) : 64-70. (in Chinese))

[8] 夏志皋. 塑性力学 [M]. 上海: 同济大学出版社, 1991.

[9] MACKENZIE D, SHI J, BOYLE J T. Finite element modeling for limit analysis by elastic compensation method [J]. Computers & Structures, 1994, 51 (4) : 403-410.

[10] 郑东健, 雷霆. 基于突变理论的高拱坝失稳判据研究 [J]. 岩土工程学报, 2011, 33 (1) : 23-27. (ZHENG Dongjian, LEI Ting. Instability criteria for high arch dams using catastrophe theory [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33 (1) : 23-27. (in Chinese))

(收稿日期: 2014 - 06 - 04 编辑: 熊水斌)

• 118 • 水利水电科技进展, 2015, 35 (6) Tel: 025 - 83786335 E-mail: jz@hhu.edu.cn http://www.hehaiqikan.cn