

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2015.05.007

胶凝砂砾石坝研究综述

蔡新^{1,2}, 杨杰¹, 郭兴文²

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏南京 210098; 2. 河海大学力学与材料学院, 江苏南京 210098)

摘要: 回顾胶凝砂砾石坝的特点与发展; 介绍国内外几个较为典型的胶凝砂砾石坝工程; 着重阐述关于胶凝砂砾石填筑料工程特性的研究, 包括: 筑坝材料的室内试验、本构模型、耐久性等, 胶凝砂砾石坝的静力、动力、温度应力、稳定性等结构工作性态, 胶凝砂砾石坝结构模型试验、断面设计、施工技术等方面的研究进展, 同时进行归纳总结并指出研究的不足; 最后建议了胶凝砂砾石坝及其坝料今后可开展的研究方向。

关键词: 胶凝砂砾石坝; 胶凝砂砾石料; 工程特性; 结构分析; 综述

中图分类号: TV321; TV649 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2015)05-0431-011

Review of cement sand and gravel dams

CAI Xin^{1,2}, YANG Jie¹, GUO Xingwen²

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. College of Mechanics and Materials, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The characteristics and development of cement sand and gravel (CSG) dams are reviewed, and several typical CSG dams around the world are described. Then, engineering properties of CSG material are described in detail, with a discussion of laboratory testing features, the constitutive model, and durability of CSG material. The workability of CSG dams is examined through static and dynamic structural analysis, temperature stress analysis, and stability analysis. Model tests, cross-sectional design, and construction technology of CSG dams are described. Some shortcomings of previous research are pointed out. Finally, some new directions for research on CSG dams and CSG material are suggested.

Key words: cement sand and gravel dam; cement sand and gravel material; engineering properties; structural analysis; review

胶凝砂砾石坝是在近几十年总结传统面板堆石坝与碾压混凝土坝优点基础上发展起来的一种新坝型, 它具有水泥用料省、施工导流方便、温控简单、施工速度快、适应软弱地基以及抗震性能好等特点^[1]。

胶凝砂砾石坝的概念是 Raphael^[2] 于 1970 年在美国加利福尼亚州召开的“混凝土快速施工会议”上首次提出的, 他建议使用胶凝砂砾石料(cement sand and gravel, CSG)筑坝, 采用高效率的土石方运输机械和压实机械进行施工。20 世纪 70 年代, 我国林一山先生也曾提出了由迎水面相对不透水的防渗墙与其后肥胖的低胶凝砂砾石稳定结构构成 CSG 坝的雏形^[3]。1972 年田纳西流域管理局的 Cannon 进一步拓展了 CSG 坝的设计思想。1992 年日本第一次将 CSG 技术应用于胶凝砂砾石工程^[4]; 另外, 国内一些专家也陆续开展了胶凝砂砾石坝的相关研究工作。

尽管胶凝砂砾石坝的研究及应用目前还处于初步发展阶段, 建设数量与工程规模尚无法与传统的面板堆石坝、碾压混凝土坝相比, 但随着近几十年来国内外众多学者对该坝型的深入研究及工程实践的发展^[5],

收稿日期: 2015-07-16

基金项目: 国家自然科学基金(51179061); 水利部土石坝破坏机理与防控技术重点实验室开放基金(YK913001); “十二五”国家科技支撑计划(2012BAD10B02)

作者简介: 蔡新(1964—), 男, 江苏启东人, 教授, 博士, 主要从事力学教学和水工结构工程研究。E-mail: xcai@hhu.edu.cn.

该坝型诸多优点逐渐凸显出来,被认为是今后有广阔发展前景的一种新坝型。

1 几个典型的胶凝砂砾石坝工程

据资料统计^[5],CSG 坝在国外已建成 10 多座,如美国柳溪坝(Willow Creek)、希腊的 Marathia 坝和 AnoMera 坝、土耳其的 Cindere 坝、多米尼加共和国在 Moncion 坝溢流坝部分的胶凝砂砾石坝、日本的一些胶凝砂砾石坝等。而国内主要以围堰为主,永久性工程仅有山西的守口堡坝(现处于施工中)。

1982 年美国俄勒冈州建成的 Willow Creek 是世界上第一座全碾压混凝土重力坝,该坝内部碾压混凝土的胶凝含量仅为 66 kg/m^3 ,是典型的贫胶碾压混凝土坝。该坝大幅度节省了水泥的用量,同时水化热也有较大程度的减少,简化了温控措施。筑坝中使用了修筑土石坝的大规模机械化施工技术,达到快速施工的目的。该坝 $33.1 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的碾压混凝土浇筑任务在不到 5 个月的时间内完成,比常态混凝土重力坝缩短工期 1~1.5 a,造价仅相当于常态混凝土重力坝的 40%,相当于堆石坝的 60%。此坝可看作 CSG 坝的雏形^[5]。

1993 年和 1997 年,在希腊 Mykonos 岛上分别建成了 2 座胶凝砂砾石坝——Marathia 坝(真正意义上的第一座胶凝砂砾石坝)和 AnoMera 坝,坝高分别为 25 m 和 32 m,上下游的坡度均为 1:0.5。坝坡面采用阶梯形^[5],如图 1 所示,碾压层厚度在 20~30 cm 之间。筑坝材料主要来源于河床和坝址附近,经过粉碎、筛选和分堆,骨料的最大粒径为 60 mm,胶凝材料掺量(质量浓度,下同)为 70 kg/m^3 (其中粉煤灰掺量为 20%),密度为 $2300 \sim 2400 \text{ kg/m}^3$ 。

目前世界上已建最高的胶凝砂砾石坝是土耳其 Cindere 坝(图 2),其坝体采用对称梯形结构,只在上游面设置防渗面板和排水系统。上游的防渗面板是混凝土面板加 PVC 膜防渗,在 PVC 膜后设置渗漏收集管道,集中到上游面板后的排水管道中。河床到坝顶高度为 72 m,坝基到坝顶高度为 107 m,坝顶长 280.58 m、宽 10 m,上下游坝面坡度为 1:0.7,坝体每 20 m 设置 1 条垂直缝。胶凝材料掺量为 50 kg/m^3 水泥和 20 kg/m^3 的粉煤灰,大坝施工一共用了 $150 \times 10^4 \text{ m}^3$ 胶凝砂砾石料和 $18 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的常规混凝土^[5]。

2001 年多米尼加共和国在 Moncion 坝坝体中间溢流坝部分采用了胶凝砂砾石筑坝^[5]。该坝段坝高 28 m,两侧均为土石坝,长度分别为 140 m 和 220 m;中部是 270 m 长的胶凝砂砾石坝。因胶凝砂砾石坝强度较高、稳定性也较好,其上下游面坡度比两边土石坝部分陡,均为 1:0.7,碾压层厚 30 cm,坝体每 15 m 设置 1 条收缩缝,不处理冷缝。上游面用常规混凝土防渗面板,面板厚 30 cm。

在日本,坝工界对胶凝砂砾石新坝型极其关注,自 1990 年起大量投入研究和开发胶凝砂砾石坝新技术。该坝型在设计上采用上下游坝坡对称的梯形断面,坝体采用“金包银”结构(图 3),即上游采用混凝土面板,并配合地基的防渗帷幕构成防渗体系,下游设防护混凝土面板。CSG 坝在设计时要根据坝址附近可获得的砂砾石料、开挖料等确定胶凝砂砾石料的材料特性,在此基础上进行坝体设计,使其能满足材料要求,这种设计能更好地满足环保和经济需要。参照这一思想,日本的一些胶凝砂砾石工程陆续被建设:1992 年的 Nagashima 坝上游围堰^[6];1994 年修建的 Tyubetsu 大坝围堰和 Kubusugawa 大坝围堰;1999 年采用 CSG 技术修建的第一座永久性建筑物——Nagashima 水库拦砂坝;2002 年建成的 Haizuka 水库拦砂坝^[7];2006 年建成的坝高 39 m 的 Okukubi 坝——日本第一座 CSG 拦河主坝。

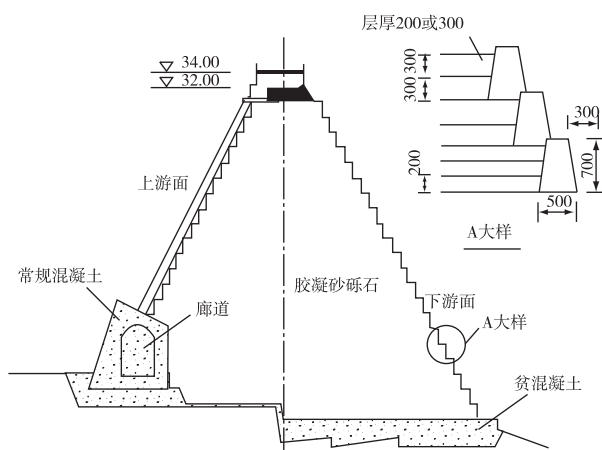


图 1 希腊 AnoMera 胶凝砂砾石坝剖面示意图
(高程单位:m,尺寸单位:mm)

Fig. 1 Cross-section of AnoMera CSG dam in Greek
(Units of elevation:m, units of others:mm)



图 2 土耳其 Cindere 坝

Fig. 2 Cindere dam in Turkey

此外,还有 2 座大坝——Sanru 坝和 Honmyogawa 坝^[5]。

我国利用胶凝砂砾石筑坝的技术研究始于 1990 年,中国水利水电科学研究院、河海大学、华北水利水电学院、武汉大学、新疆农业大学、山西省水利水电勘测设计研究院、福建省水利水电勘测设计研究院等,对胶凝砂砾石坝的筑坝材料特性、大坝稳定和应力分析、施工工艺等问题进行了广泛探索。2004 年,我国建成了福建街面水电站下游围堰,为国内第一座胶凝砂砾石围堰。经过多年的研究与实践,我国已取得不少胶凝砂砾石筑坝经验。目前已建成或在建的多座胶凝砂砾石工程^[8]见表 1。

表 1 国内胶凝砂砾石工程情况

Table 1 CSG projects in China

工程名称	断面形式	地区	坝高/m	坝顶长/m	上游坡比	下游坡比
街面水电站下游围堰	对 称	福建	16.3	49.5	1:0.6	1:0.6
飞仙关水电站一期纵向围堰	对 称	四川	12.0	335.0	1:0.6	1:0.6
沙沱水电站二期下游围堰	对 称	贵州	14.0	132.5	1:0.6	1:0.6
守口堡水库大坝	对 称	山西	64.6	366.0	1:0.6	1:0.6
洪口水电站上游围堰	非对称	福建	35.5	90.0	1:0.3	1:0.75
功果桥水电站二期下游围堰	非对称	云南	56.0	130.0	1:0.4	1:0.7

2 胶凝砂砾石料工程特性

2.1 试验研究

胶凝砂砾石料的力学特性是胶凝砂砾石坝结构分析的基础,其研究手段以试验为主。1997 年,陆述远等^[9]、唐新军等^[10]在天然级配砂石料中掺入少量胶凝材料进行抗压强度及抗折强度试验,得出如下结论:胶凝砂砾石料的抗压强度受细骨料(粒径<5 mm)和胶凝掺量影响显著;胶凝砂砾石料的弹性模量远高于普通堆石料,可有效减小上游防渗面板变形;粉煤灰有利于改善材料硬化后的力学性能,可节省水泥用量。2003 年Batmaz 结合土耳其 Cindere 坝进行了胶凝砂砾石料强度试验研究^[5],发现当胶凝掺量为70 kg/m³时,90 d龄期的胶凝砂砾石料强度可达5 MPa以上,可满足高度100 m大坝的要求。2006 年贾金生等^[11]结合福建街面水电站下游围堰工程的筑坝材料,通过试验研究抗压强度与抗拉强度,结果表明当采用当地天然砂砾石,掺入水泥和粉煤灰各40 kg/m³,其180 d龄期抗压强度可达到 C7.5,并满足围堰的力学、稳定、防渗和抗溶蚀要求。2007 年杨首龙^[12]结合白沙、街面和洪口 3 个水电站胶凝砂砾石围堰工程,对不同配比的胶凝砂砾石料进行了拉、压强度以及弹性模量和泊松比等的试验研究。柴启辉^[13]对胶凝砂砾石料力学性能试验及施工工艺进行初步探讨,给出了不同骨料级配在不同胶凝掺量时达到强度的基本范围。刘录录等^[14]对胶凝砂砾石料的抗压强度影响因素及规律进行了研究,得到影响胶凝砂砾石料的抗压强度影响因素主次顺序为胶凝用量、水胶比、细料含量以及抗压强度随胶凝掺量增加而增大,最佳水胶比为 1.2,细料含量在 25%~30%之间时抗压强度达到最大等规律。

上述研究主要基于单向受压、抗折、加卸载试验,能反映胶凝砂砾石料不同级配对抗压强度、抗拉强度以及弹性模量的影响。2007 年孙明权等^[15]对不同胶凝掺量的胶凝砂砾石料进行了三轴剪切排水试验,结果表明,胶凝砂砾石料应力应变曲线具有明显的非线性特征及软化特征。2010 年蔡新等^[16]和武颖利^[17]除完成胶凝砂砾石料抗压、抗折等基本材料试验之外,还进行了不同围压下的大型三轴剪切试验,研究了胶凝砂砾石料的破坏强度、初始切线弹性模量与围压之间的关系以及胶凝砂砾石料泊松比与应力状态之间的关系。Wu 等^[18]考虑不同龄期进行胶凝砂砾石料大型三轴试验,着重分析了胶凝砂砾石料胶结后在不同龄期对应力应变关系的影响,进一步揭示了胶凝砂砾石料的强度和应力应变特征。Tatsuoka 等^[19]、Lohani 等^[20]、Kongsukprasert 等^[21-23]、Ezaoui 等^[24]对类似于胶凝砂砾石料的路基材料进行应力-应变特性分析及强度特性、龄期影响等的相关三轴试验研究,得出与孙明权等^[15]、蔡新等^[16]成果相符的规律。

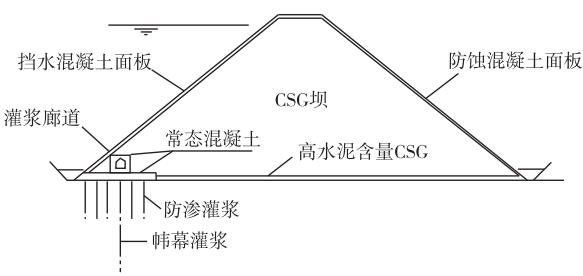


图 3 日本某 CSG 坝典型剖面图
Fig. 3 Typical cross-section of CSG dam in Japan

2003年,Omae等采用动三轴仪测试了一个实际胶凝砂砾坝的筑坝材料动力性质,得出如下结论^[25]:在小幅值循环压力作用下,材料的动剪切模量随围压增大而增大,材料动力本构关系表现出明显的非线性性质,随着剪应变增大,材料动剪切模量减小,材料动剪切模量随应变率的减小而明显减小。明宇等^[26]通过不同胶凝掺量下胶凝砂砾坝坝料的动力大型三轴试验,研究胶凝砂砾石料的动力特性,给出了胶凝掺量、围压对材料动力特性影响的变化规律;之后,傅华等^[27]开展了不同掺量的胶凝砂砾石料的静动力三轴试验,进一步验证了蔡新等^[16]研究的静动力特性规律的合理性。

综上所述,胶凝砂砾石料静力特性主要集中于材料弹性分析,对一些试验研究得出的弹塑性特征尚无法进行定量分析;胶凝砂砾石料的动力强度和破坏形式的相关研究较少;此外,胶凝砂砾石料的力学特性主要是基于室内试验现象的总结,仅为宏观意义上的特性,仍无法描述胶凝砂砾石料内部机理。

2.2 本构模型研究

目前关于胶凝砂砾石料本构关系的研究方法大致可分为混凝土法和土工法2种。混凝土法将胶凝砂砾石料视为一种强度较低的贫胶混凝土,采用线弹性材料假定。日本学者Hirose假定胶凝砂砾石料为线弹性材料,以弹性极限强度作为设计强度的设计理念^[25]。国内学者李永新等^[28]针对胶凝砂砾石坝填筑分层的结构特征,考虑层间薄弱面的影响,提出了横观各向同性的等效线弹性模型。何蕴龙等^[29]在总结前人已完成试验得出的应力应变曲线基础上,分析胶凝砂砾石料的应力应变特征,并与堆石料、混凝土进行对比分析,借用Ottosen模型的函数表达式,表示胶凝砂砾石料的应力应变关系,模型能较好地反映材料的应变软化特性,但曲线峰值之前模型计算值稍低于三轴试验值。土工法则视胶凝砂砾石料为一种改性的堆石体,着重模拟材料应力-变形的非线性特征。孙明权等^[30]针对胶凝砂砾石应力-应变曲线中的应变软化问题对邓肯-张的双曲线模型进行改进,提出了一个形式较简单且参数有一定物理意义的非线性弹性模型,但无法反映胶凝砂砾石在初始应力状态下表现出的剪胀性特征。蔡新等^[16]和武颖利^[17]在进行胶凝砂砾石料的基本材料试验和三轴试验基础上,总结出了一个可反映胶凝砂砾石料变形特征的非线性弹性应力应变关系,采用对试验数据的回归分析得出反映胶凝砂砾石应力-应变特性的本构模型,参数计算简便,均可由三轴试验数据确定。Wu等^[18]在胶凝砂砾石料不同龄期的大型三轴试验基础上,提出了基于应变一致假定的二元并联概念模型,该模型既能描述硬填料的应力应变非线性特征,又能描述变形模量随着龄期变化的特征,但模型过于复杂,工程人员掌握较为困难。2013年刘俊林等^[31]利用广义双曲线的应力应变关系对胶凝砂砾石料非线性本构模型进行研究,所得模型较为简单,但与以往模型一样,无法准确模拟胶凝砂砾石料峰值强度之前的应力应变关系。此外,孙明权等^[32]针对 $E-\nu$ 模型的缺点对胶凝砂砾石料进行 $K-G$ 模型的适用性探讨,并对该模型的应力-应变理论预测曲线和试验曲线进行对比。蔡新等^[33]考虑剪胀与软化特性,利用改进 $K-G$ 模型模拟胶凝砂砾石料非线性关系,但预测结果误差较大。

针对胶凝砂砾石料动力本构关系的专题研究较少,仅蔡新等^[34]基于动三轴试验,研究了不同围压、不同胶凝掺量下胶凝砂砾石料的动本构关系及动模量衰减规律,得出结论:胶凝砂砾石料动本构关系可借用Kondner R L双曲线模型进行描述;围压、胶凝掺量对动本构关系均有影响,但围压的影响较大。此外,他们在不同胶凝掺量、围压的胶凝砂砾石料动力特性变化规律基础上,建立了新的动本构模型。所建模型可为该坝型的设计研究和实际应用提供参考。

以上所建立的胶凝砂砾石料的静、动力本构模型多为弹性模型,尚无法真实反映胶凝砂砾石料静、动力学特征,尤其是塑性变形特性。

2.3 耐久特性研究

研究胶凝砂砾石料的耐久特性,目的在于大幅度提高胶凝砂砾石料的耐久性,使胶凝砂砾石坝的使用寿命延长,具有巨大的经济效益和社会效益。混凝土耐久性的研究相对成熟,其主要受外在环境与碱骨料反应等内在因素影响,混凝土内在原因为碱骨料反应,骨料与水泥浆热工性质差异引起的体积变化会对混凝土的耐久性产生不利影响;而胶凝砂砾石料虽类似于混凝土,但其本身具有特殊性,需专门开展胶凝砂砾石料耐久性研究。借鉴混凝土碱骨料反应的研究思路,进行胶凝砂砾石料的内在影响因素(水泥浆)的渗透溶蚀性能研究。胶凝砂砾石料中的水泥硬化后成为水泥石,其主要产物是氢氧化钙、含水硅酸钙、铝酸钙、铁酸钙、水化硫铝酸钙;胶凝砂砾石料长期与水接触,其中水泥石被溶解,使液相石灰的质量浓度更低,然后材料中固体氢氧化钙溶解加以补偿,随后其他在一定浓度的氢氧化钙溶液中才能稳定的水化物相继分解,导致材料中

低盐基性水泥水化产物分解成非结合性产物,最终使结构物遭到破坏。王晓强^[35]通过溶蚀性能试验解释了这一现象。陈霞等^[36]为进一步验证渗透溶蚀机理,采用 Ca^{2+} 的溶出浓度和 Ca^{2+} 的渗透量来表征胶凝砂砾石料的渗透溶蚀程度,进行渗透溶蚀试验,发现胶凝砂砾石料渗透出的 Ca^{2+} 量是试验龄期的函数,且 Ca^{2+} 浓度与龄期曲线呈先升、后降趋势,最后稳定在一个固定值;胶凝砂砾石料胶凝材料用量少,其抗渗透溶蚀性能较常规混凝土稍差,渗透水中 Ca^{2+} 的极限浓度低于常规混凝土。此外,陈霞等^[36]通过从原材料、环境水和施工工艺等方面提出了改善胶凝砂砾石料抗渗透溶蚀的一些有效措施。除胶凝砂砾石料的渗透溶蚀外,冯炜^[37]针对胶凝砂砾石料的一些影响耐久性(如抗渗性、抗冻性等)因素,分别采用逐级加压法与快冻法进行试验研究,指出外加剂对材料抗渗、抗冻性能的影响,最终建议胶凝砂砾石料采用外加剂并以高龄期为设计龄期进行坝体保护层材料的研发。

胶凝砂砾石料蠕变特性是胶凝砂砾石料耐久性的外因与内因共同影响产生的,可认为是其耐久性的重要影响因素。除与渗透溶蚀、冻胀有关,胶凝砂砾石料蠕变还有2个特点^[37]:(a)虽然胶凝材料用量少,水灰比、水胶比大,但胶材浆体包裹充分的胶凝砂砾石,其内部孔隙率不大,引起蠕变的主要因素是硬化水泥石的蠕变;(b)胶材浆体包裹不充分的胶凝砂砾石,其内部孔隙率大,随着荷载时间的增加,内部孔隙的压缩引起其变形。

胶凝砂砾石料的耐久性研究目前仅停留在渗透溶蚀、抗渗及抗冻性方面的一些影响规律探讨,不够系统深入,未能量化;而蠕变特性,尤其在细观层面下的定量分析极少,影响胶凝砂砾石筑坝技术较好地应用于实际工程,也无法准确预测该坝型的使用寿命。

3 胶凝砂砾石坝结构分析

国内外已建的胶凝砂砾石坝断面一般为对称梯形断面,边坡坡比一般为1:0.5~1:0.8,坝体设计依据重力坝理念,利用材料力学法,以坝体不产生拉应力和满足胶凝砂砾石料抗压强度要求作为应力控制标准,同时满足坝体整体稳定要求。但随着对大坝不断地深入研究及应用推广,胶凝砂砾石坝的结构分析与设计需采用数值模拟等更为精细的手段。针对胶凝砂砾石坝已开展了一些数值计算研究,如静、动力应力变形分析,稳定性分析等。

3.1 静力分析

王秀杰等^[38-39]运用有限元软件 ANSYS 对某一中低坝模型进行了静力计算,对不同坝坡情况下 CGS 坝的工作状态、坝体的应力应变分布规律等进行了探讨;李永新等^[28]认为胶凝砂砾石料为弹塑性材料,基于弹塑性本构模型对胶凝砂砾石坝进行有限元分析,探讨了黏聚力、内摩擦角、杨氏模量等模型参数对胶凝砂砾石坝应力与稳定影响的敏感性;施金^[40]假定胶凝砂砾石料应力应变关系符合邓肯 $E-\mu$ 模型,着重分析了胶凝砂砾石料中胶凝掺量的变化对邓肯 $E-\mu$ 模型各项参数的影响,并选择3种典型的胶凝砂砾石坝坝体进行坝体和面板的应力与位移分析;杨令强等^[41]采用有限元算法对胶凝砂砾石料和土料形成的复合坝进行了计算,探讨了土体破坏以及胶凝砂砾石料强度破坏的安全系数问题;孙明权等^[42]通过“虚加刚性弹簧法”和“分步迭代法”来反映超贫胶结材料的软化特性,并编制非线性有限元计算程序来模拟施工逐级加荷,对胶凝砂砾石坝的应力和应变进行了计算;彭云枫等运用三维有限元数值模拟方法,对胶凝砂砾石坝的面板和坝体结构进行分析^[25];吴凤先等^[43]对不同坝高和坝料的坝型进行理论分析,将分析结果与有限元计算结果进行对比,对误差较大的坝体区域进行修正;明宇等^[44]根据相关试验得到的胶凝砂砾石料非线性弹性应力应变关系,利用 ABAQUS 的二次开发平台,开发了胶凝砂砾石料非线性弹性本构模型的 UMAT 用户子程序,采用胶凝砂砾石坝的施工模拟及新填筑层位移修正的处理方法,对胶凝砂砾石坝在不同工况下的工作性态进行了研究。该方面目前存在的主要问题:由于没有可真实反映胶凝砂砾石料弹塑性变形特征的本构模型,胶凝砂砾石坝结构分析多参照传统的堆石料和混凝土材料的线弹性模型、理想弹塑性模型以及邓肯-张非线性弹性本构模型,个别研究人员基于试验资料,在邓肯-张本构模型的基础上进行修正得到胶凝砂砾石料的非线性弹性本构模型,但均无法真实反映胶凝砂砾石坝的塑形变形特征,成为胶凝砂砾石坝应力变形准确预测的一个瓶颈问题。

3.2 动力分析

1992年,Londe采用拟静力方法分析了胶凝砂砾石坝的抗震性能,利用材料力学方法计算坝体动应力,

研究发现,与传统重力坝相比,胶凝砂砾石坝在坝踵、坝趾部位基本没有地震动应力集中的现象,地震工况并不会严重地影响坝基附近应力状况^[25];之后,Hirose等基于线性弹性理论,运用反应谱法对日本境内的胶凝砂砾石坝进行了地震动力计算分析,结果发现该坝型在地震作用下的变形以剪切变形为主,坝体顶部没有发生动应力集中现象,与常态重力坝相比,地震作用下胶凝砂砾石坝的应力增加幅度较小,该坝型具有良好的抗震性能^[25];Gurdil等对Cindere坝进行了地震时程分析,得出该坝具有较高的抗震安全度,完全可以抵御该坝址区的设防地震烈度8度地震^[5];Liapichev对100m高的CSG坝进行了二维动力分析,研究发现对称体型的CSG坝抗震性能良好,在峰值加速度为0.4g的地震作用下大坝基本可保证正常工作;当地震峰值加速度高达0.8g时,地震作用对大坝的破坏依然有限,大坝的整体安全稳定可以得到保证^[25]。基于一维剪切楔理论,何蕴龙等^[45-46]推导出计算胶凝砂砾石坝自振频率和振型的理论公式,并采用一个简化等效体系计算动水压力对坝体自振频率和振型的影响,对胶凝砂砾石坝进行地震反应谱分析,比较分析有限元法与剪切楔法计算所得坝体的自振特性,论证了剪切楔法计算胶凝砂砾石坝地震动力反应的适用性和可靠性;于跃等^[47]基于剪切楔法,推导出梯形断面胶凝砂砾石坝的运动微分方程,利用合流超比函数和Liouville函数推导出计算胶凝砂砾石坝自振频率和振型的理论公式,得出在简谐波作用下的坝体速度、加速度和动位移的计算公式,将基于剪切楔法的实例计算结果与有限元法的计算结果进行比较,验证了剪切楔法理论计算公式在胶凝砂砾石坝自振特性和动力反应计算中的可靠性。Xiong等^[48]基于细观损伤理论和有限元法,对典型Hardfill坝遭遇8度地震及强震条件下的动力反应进行数值分析,研究其在地震过程中的破坏模式与破坏机理,得出在8度地震荷载作用下,Hardfill坝应力水平较低,处于未损伤或轻微损伤状态。上述关于该坝型的抗震分析主要通过理论假设,将坝料视为混凝土等线性材料,而事实上胶凝砂砾石料的材料特性有明显的非线性,采用线弹性假设不能客观地反映该坝型的动力变形特征,因而计算结果无法真实体现胶凝砂砾石坝的抗震特性。明宇^[25]利用动三轴试验建立的胶凝砂砾石料动力本构关系,考虑不同坡比、胶凝掺量进行了动力工作性态研究,同时提出了一些抗震设计指标。

3.3 温度应力分析

针对胶凝砂砾石坝温控问题,仅刘斌等^[49]运用三维有限元数值计算,对施工期的胶凝砂砾石坝进行了温度场仿真,并与碾压混凝土重力坝进行对比分析,得出胶凝砂砾石坝温度场的变化规律,还就弹性模量、绝热温升、线膨胀系数、极限拉伸、徐变度等因素对胶凝砂砾石料的热力学特性进行了分析,发现在相同条件下,与常规混凝土和碾压混凝土相比,胶凝砂砾石料的温度应力比较小,且具有较大的抗裂余度,是一种具有推广应用前景的新型坝工材料。

3.4 稳定性分析

渗流、不同地基等对大坝结构稳定的影响较大。刘文拯等^[50]研究了胶凝砂砾石坝在不同透水性坝基下的渗流场分布规律,并将其与设置各种不同防渗排水措施后的胶凝砂砾石坝渗流场分布规律进行对比分析,将计算结果整理成流网图和特征点渗透坡降图,为明确坝基渗流特征及对该坝型的进一步研究提供了基础。胶凝砂砾石坝能适应软弱地基,大部分仅体现在定性分析的基础上,乐治济^[51]将胶凝砂砾石料视为线弹性材料,利用有限单元法和反应谱法,比较分析了胶凝砂砾石坝与重力坝的动、静力特征,总结了该坝型和地基的渗透特性对坝体工作性态的影响,分析了均质地基和前后软硬不同地基上筑坝时对坝体工作特性的影响,探讨了胶凝砂砾石坝在软地基上建设的可能性。另外,杨会臣^[8]对胶凝砂砾石坝的坝基适应性问题进行了研究,提出了胶凝砂砾石坝的坝基要求:从坝体受力和稳定角度,坝体、地基适宜的弹性模量比可限定在0.5~2.0倍范围内;当地基、坝体弹性模量难以满足0.5~2.0倍关系时,对于较软地基,通过选用较大的坝体断面和比地基弹性模量低的坝体弹性模量,可满足坝体的强度和稳定要求。渗流、地基等对胶凝砂砾石坝的工作性态具体影响如何,研究成果较少,尚无法准确归纳。

4 胶凝砂砾石坝模型试验研究

为了解胶凝砂砾石坝在竣工期和蓄水期的工作性态,2008年蔡新等^[52]采用离心模型试验方法对不同胶凝掺量下坝体的应力变形进行试验研究,同时与非线性有限元法数值计算进行对比分析,得出结论:胶凝掺量的增加,致坝体沉降和面板挠度在竣工期和蓄水期明显减小,改善了面板的受力条件,可保证防渗体系的正常工作,提高坝体抗剪强度与承载力,设计时坝坡可放陡,坝体断面显著缩小,大幅度节省了筑坝砂砾石

料,从而保证了大坝的安全可靠性;此外,离心试验得到的竣工期和蓄水期的坝体应力、位移以及面板法向位移与数值计算结果规律基本一致,可为胶凝砂砾石坝的设计提供参考。2012年熊堃等^[53]为了研究坝的结构破坏模式与破坏机理,评价结构安全度以促进新坝型的发展和应用,采用地质力学模型试验方法,进行了国内首次胶凝砂砾石坝破坏模型试验,分析了大坝在外荷载作用下的变形、破坏特征及其演变过程,得出结论:胶凝砂砾石坝的破坏区域主要发生在坝踵、坝趾及坝基面上,在超载过程中大坝经历了稳定、非线性变形以及失稳破坏3个阶段。已进行的模型试验仅能大致反映胶凝砂砾石坝的整体受力情况及一般规律,仍无法准确反映胶凝砂砾石坝实际工程的工作状态及承载能力。

5 胶凝砂砾石坝断面设计

国内外已建工程中基本采用上、下游等坡比的对称梯形坝。以土耳其 Cindere 坝的设计为例,满足稳定要求的最优断面的上游坡比为 1:0.4、下游坡比为 1:0.8,该断面在正常运行遭遇地震的工况下,抗滑稳定安全系数为 1.27,略大于规定要求值(1.2)。该工程最终采用上下游坡比为 1:0.7 的对称断面,坝体体积比最优方案增加约 11%,但坝体的稳定和应力情况获得改善,正常运行遭遇地震工况下抗滑稳定安全系数为 1.396,最大可信地震工况下抗滑稳定安全系数为 1.05,坝基应力降低 21%。国外在修建胶凝砂砾石坝中通常默认大坝断面为对称的梯形断面,对胶凝砂砾石坝断面的优化及最优断面影响因素的研究较少。国内学者在胶凝砂砾石坝结构静动力分析的基础上,进行了一些断面优化设计研究。王秀杰^[38]研究了 CSG 坝不同断面的静力、动力特性,表明 CSG 坝结构安全度和稳定性高,抗震性好,而对称断面或者上下游接近的断面具有良好的受力特性,是值得推荐的断面形式。施金^[40]将胶凝砂砾石坝视为面板堆石坝中较为特殊的一种坝型,以面板堆石坝的约束条件,通过不同坝坡组合的体型优选进行设计,与普通面板堆石坝相比,胶凝面板砂砾石坝的优化方案坝坡可更陡,堆石方量更少、造价更低,且满足应力、稳定的约束条件,得到的断面安全可靠、经济合理。蔡新等^[54]基于试验提出的胶凝砂砾料本构模型,采用多目标优化的思想,综合考虑坝体的经济性、位移对水位变化的敏感性、整体抗滑稳定安全系数和整体强度安全系数,选取 3 种不同的权重系数组合进行研究,优选出最优坝体断面,为该坝型的设计研究和推广应用提供参考。明宇等^[55]基于重力坝和面板堆石坝的特性,提供了一种依赖初值选取的优化方法,对大坝进行多目标优化设计,其优化坝体断面可保证良好的安全稳定性和经济性,且分析结果符合实际工程的一般规律。李晶^[56]对胶凝砂砾石坝最优断面进行研究,探讨了胶凝砂砾石坝断面与材料设计允许强度、坝高及基岩条件等因素的关系,提出了胶凝砂砾石坝最优对称断面的适用范围。

6 胶凝砂砾石坝施工技术研究

已完成的胶凝砂砾石坝工程大多参照碾压混凝土坝的技术规范施工。在胶凝砂砾石坝施工前应进行现场碾压试验,验证胶凝砂砾石设计配合比、施工工艺流程、施工系统和施工设备的适应性,确定其施工工艺和参数。在拌和设备 and 工艺方面,日本先用分批拌和系统进行胶凝砂砾石料的拌和,之后根据胶凝砂砾石料施工的要求,研制出连续拌和系统,生产能力大幅度提高,且砂砾石料与胶凝材料得以拌和均匀^[37];而国内工程实践是采用装载机、反铲挖掘机等设备进行搅拌,双卧轴强制连续式搅拌机进行搅拌^[13]。碾压也是保证胶凝砂砾石坝强度的重要手段,贾金生^[57]指出碾压厚度不应小于最大石料粒径的 3 倍,且碾压层厚宜为 400~600 mm;振动碾的行走速度需控制,碾压方向需与水流垂直,还需根据季节、天气条件及胶凝砂砾石的特性确定碾压时间。层面处理方面,日本的 Takashi 等人结合 Nagashima 对 4 种不同的层面处理方式进行分析,发现不做处理的强度最低,不同层面处理对胶凝砂砾石坝的强度具有较大的影响^[25]。结合上述研究成果并参照碾压混凝土坝的技术规范,国内虽然制订了胶凝砂砾石坝施工的相关技术标准^[58],但专门针对胶凝砂砾石坝的施工工艺进行的探讨很少,且较为零碎,尚未形成系统成熟的施工工艺。

7 今后研究的方向

国内外学者及工程师对胶凝砂砾石新坝型进行了一些研究与实践,但其筑坝材料特性、设计理论、计算方法、施工技术等方面的相关研究尚不成熟,有待进一步研究。

a. 胶凝砂砾石料力学特性试验与本构模型研究。研究胶凝砂砾石料塑性变形特性,提出胶凝砂砾石料

的破坏准则、屈服函数、硬化规律,并在此基础上建立合理、有效的胶凝砂砾石料弹塑性本构模型;结合宏观试验,对胶凝砂砾石料细观的数值模拟,阐述胶凝砂砾石料的变形机制;条件允许的情况下,宜进行胶凝砂砾石料的细观试验研究。在专门动力试验基础上对胶凝砂砾石料的动力强度指标等进行进一步研究,为胶凝砂砾石坝的设计施工和抗震优化提供判定准则。

b. 胶凝砂砾石料的耐久性。进行胶凝砂砾石料室内抗冻性能试验,探讨提高其材料抗冻耐久性的方法、途径和可行性;进行绝热温升、比热、导温试验,为温度场及应力场仿真分析提供基础数据,对胶凝砂砾石料在温度变化及冻融影响下的耐久性进行深入研究。通过三轴蠕变试验,研究胶凝砂砾石料蠕变特性对耐久性的影响,建立宏观变量之间的关系,同时通过宏观、细观多尺度分析,建立考虑蠕变特性的更合理的材料本构模型。

c. 胶凝砂砾石坝模型试验。选取典型工程,进行离心模型试验、振动台试验及溃坝试验等试验研究,从而准确把握胶凝砂砾石坝实际工程的工作状态及承载能力。

d. 胶凝砂砾石坝结构设计。基于所建立的胶凝砂砾石料的弹塑性本构模型及蠕变本构模型,研究制定胶凝砂砾石坝合理的控制标准和剖面设计原则;分析胶凝砂砾石坝上、下游边坡确定的控制条件,研究不同强度指标下应力、应变控制标准和剖面设计原则,研究胶凝砂砾石坝上、下游边坡确定的理论依据和计算方法;系统分析渗流、温度、地基、抗冻等对胶凝砂砾石坝工作性态的影响。在此基础上,提出防渗、地基加固、工程防冻、防裂要求的结构或工程措施。

e. 胶凝砂砾石坝施工技术研究。对胶凝砂砾石坝已有施工关键技术研究进行完善,提出一套系统完整的胶凝砂砾石坝施工工艺。

f. 其他方面的研究。结合实际工程的建设,进行安全监测、反演分析等,校验结构分析模型,确保建筑物的安全运行。探讨胶凝砂砾石筑坝技术作为农村小水电土石坝破坏加固、修筑堤防的措施,甚至可尝试应用于高坝修筑与加固等研究。

8 结 语

胶凝砂砾石坝是一种具有很强竞争力的新坝型,国内外对胶凝砂砾石坝的研究虽取得了一定的进展,但也存在许多不足。随着研究的不断深入和人们对胶凝砂砾石坝这一新坝型认识的提高,必将在我国水利建设中取得实质性的推广应用,并产生显著的经济和社会效益。

参考文献:

- [1] LONDE P, LINO M. The faced symmetrical hardfill dam: a new concept for RCC[J]. International Water Power & Dam Construction, 1992, 44(2): 19-24.
- [2] RAPHAEL J M. The optimum gravity dam, rapid construction of concrete dams[M]. New York: ASCE, 1970.
- [3] 杨世华.林一山治水文集[M].北京:新华出版社,1981.
- [4] FUJISAWA T. Study on strength and physical properties of cemented materials for CSG design[R]. Japan: Hydraulic Research Engineering Group, Public Works Research Institute, 2002.
- [5] CAI Xin, WU Yingli, GUO Xingwen, et al. Research review of the cement sand and gravel (CSG) dam[J]. Frontiers of Structural and Civil Engineering, 2012, 6(1): 19-24.
- [6] HATTORI Y. Construction of a sediment trap dam using CSG concrete[J]. Dam Technology, 1993, 150: 50-58.
- [7] NAGAYAMA Y. Development of the CSG construction method for sediment trap dams[J]. Civil Engineering Journal, 1999, 41(7): 6-17.
- [8] 杨会臣.胶凝砂砾石坝结构设计研究与工程应用[D].北京:中国水利水电科学研究院,2013.
- [9] 陆述远,唐新军.一种新坝型:面板胶结堆石坝简介[J].长江科学院院报,1998, 15(2): 54-56. (LU Shuyuan, TANG Xinjun. Brief introduction to a new type of dam called face-plate-cementing rockfill dam[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 1998, 15(2): 54-56. (in Chinese))
- [10] 唐新军,陆述远.胶结堆石料的力学性能初探[J].武汉水利电力大学学报,1997, 30(6): 15-18. (TANG Xinjun, LU Shuyuan. Preliminary research on mechanical behaviors of cemented rockfill material[J]. Engineering Journal of Wuhan University: Engineering Science Edition, 1997, 30(6): 15-18. (in Chinese))
- [11] 贾金生,马锋玲,李新宇,等.胶凝砂砾石坝材料特性研究及工程应用[J].水利学报,2006, 37(5): 578-582. (JIA Jinsheng,

- MA Fengling, LI Xinyu, et al. Study on material characteristics of cement-sand-gravel dam and engineering application [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(5): 578-582. (in Chinese))
- [12] 杨首龙. CSG 坝筑坝材料特性与抗荷载能力研究 [J]. 土木工程学报, 2007, 40(2): 97-103. (YANG Shoulong. Characteristics and load carrying capacity of CSG dam construction materials [J]. China Civil Engineering Journal, 2007, 40(2): 97-103. (in Chinese))
- [13] 柴启辉. 胶凝砂砾石坝材料力学性能试验及施工工艺初步探讨 [D]. 郑州: 华北水利水电学院, 2012.
- [14] 刘录录, 何建新, 刘亮, 等. 胶凝砂砾石材料抗压强度影响因素及规律研究 [J]. 混凝土, 2013(3): 77-80. (LIU Lulu, HE Jianxin, LIU Liang, et al. Study on influencing factors of compressive strength of gel sandy gravel materials and law [J]. Concrete, 2013(3): 77-80. (in Chinese))
- [15] 孙明权, 彭成山, 李永乐, 等. 超贫胶结材料三轴试验 [J]. 水利水电科技进展, 2007, 27(4): 46-49. (SUN Mingquan, PENG Chengshan, LI Yongle, et al. Triaxial test of over lean cemented material [J]. Advances in Science and Technology of Water Resource, 2007, 27(4): 46-49. (in Chinese))
- [16] 蔡新, 武颖利. 胶凝堆石料本构特性研究 [J]. 岩土工程学报, 2010, 32(9): 1340-1344. (CAI Xin, WU Yingli. Constitutive equation for CSG materials [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(9): 1340-1344. (in Chinese))
- [17] 武颖利. 胶凝堆石坝坝料力学特性及大坝工作性态研究 [D]. 南京: 河海大学, 2010.
- [18] WU Mengxi, DU Bin, YAO Yuancheng, et al. An experimental study on stress-strain behavior and constitutive model of hardfill material [J]. Science China: Physics, Mechanics & Astronomy, 2011, 54(11): 2015-2024.
- [19] TATSUOKA F, BENEDETTO H, KONGKITKUL W, et al. Modeling of ageing effects on the elastoviscoplastic behavior of geomaterial [J]. Soils and Foundations, 2008, 48(2): 155-174.
- [20] LOHANI T N, KONGSUKPRASERT L, WATANABE K, et al. Strength and deformation properties of cemented-mixed gravel evaluated by triaxial compression tests [J]. Soils and Foundations, 2004, 44(5): 95-108.
- [21] KONGSUKPRASERT L, TATSUOKA F. Ageing and viscous effects on the deformation and strength characteristics on cemented-mixed gravelly soil in triaxial compression [J]. Soils and Foundations, 2005, 45(6): 55-74.
- [22] KONGSUKPRASERT L, TATSUOKA F. Small strain stiffness and nonlinear stress-strain behavior of cemented-mixed gravelly soil [J]. Soils and Foundations, 2007, 47(2): 375-394.
- [23] KONGSUKPRASERT L, TATSUOKA F, TATEYAMA M. Several factors affecting the strength and deformation characteristics cement-mixed gravel [J]. Soils and Foundations, 2005, 45(3): 107-124.
- [24] EZAOUI A, TATSUOKA F, SANO Y, et al. Ageing effects on the yielding characteristics of cement-mixed granular materials [J]. Soils and Foundations, 2010, 50(5): 705-724.
- [25] 明宇. 胶凝堆石坝坝料动力特性及大坝地震响应研究 [D]. 南京: 河海大学, 2013.
- [26] 明宇, 蔡新, 郭兴文, 等. 胶凝砂砾石料动力特性试验 [J]. 水利水电科技进展, 2014, 34(1): 49-52. (MING Yu, CAI Xin, GUO Xingwen, et al. Dynamic characteristic test on cemented sand and gravel material [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2014, 34(1): 49-52. (in Chinese))
- [27] 傅华, 陈生水, 韩华强, 等. 胶凝砂砾石料静、动力三轴剪切试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2015, 37(2): 357-362. (FU Hua, CHEN Shengshui, HAN Huaqiang, et al. Experimental study on static and dynamic properties of cemented sand and gravel [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(2): 357-362. (in Chinese))
- [28] 李永新, 何蕴龙, 乐治济. 胶结砂砾石坝应力与稳定有限元分析 [J]. 中国农村水利水电, 2005(7): 35-38. (LI Yongxin, HE Yunlong, LE Zhiji. Analysis of the stress and finite element stability for the cemented sand & gravel dam [J]. China Rural Water and Hydropower, 2005(7): 35-38. (in Chinese))
- [29] 何蕴龙, 刘俊林, 李建成. Hardfill 筑坝材料应力-应变特性与本构模型研究 [J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2011, 43(6): 40-47. (HE Yunlong, LIU Junlin, LI Jiancheng. Study on the stress-strain property and constitutive model of hardfill material [J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2011, 43(6): 40-47. (in Chinese))
- [30] 孙明权, 杨世锋, 张镜剑. 超贫胶结材料本构模型 [J]. 水利水电科技进展, 2007, 27(3): 35-37. (SUN Mingquan, YANG Shifeng, ZHANG Jingjian. Study on constitutive model for over lean cemented material [J]. Advances in Science and Technology of Water Resource, 2007, 27(3): 35-37. (in Chinese))
- [31] 刘俊林, 何蕴龙, 熊堃, 等. Hardfill 材料非线性弹性本构模型研究 [J]. 水利学报, 2013, 44(4): 451-461. (LIU Junlin, HE Yunlong, XIONG Kun, et al. Study on nonlinear elasticity constitutive model of Hardfill material [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(4): 451-461. (in Chinese))
- [32] 孙明权, 刘运红. 非线性 K-G 模型对胶凝砂砾石材料的适应性 [J]. 人民黄河, 2013, 35(7): 92-97. (SUN Mingquan, LIU

- Yunhong. Adaptive research of nonlinear K-G model to CSG material[J]. Yellow River, 2013, 35(7): 92-97. (in Chinese))
- [33] 蔡新, 杨杰, 郭兴文, 等. 一种胶凝砂砾石坝坝料非线性 K-G-D 本构新模型[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2014, 42(6): 491-496. (CAI Xin, YANG Jie, GUO Xingwen, et al. A new type of nonlinear K-G-D constitutive model for CSG material[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2014, 42(6): 491-496. (in Chinese))
- [34] 蔡新, 宋小波, 杨杰, 等. 胶凝堆石料动本构关系及动模量衰减模型[J]. 水电能源科学, 2013, 31(12): 94-97. (CAI Xin, SONG Xiaobo, YANG Jie, et al. Dynamic constitutive relation and dynamic modulus attenuation model of CSG materials[J]. Water Resources and Power, 2013, 31(12): 94-97. (in Chinese))
- [35] 王晓强. 胶凝砂砾石坝材料的渗透溶蚀研究及工程应用[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2013.
- [36] 陈霞, 曾力, 何蕴龙, 等. Hardfill 坝材料的渗透溶蚀性能[J]. 武汉大学学报: 工学版, 2009, 42(1): 42-45. (CHEN Xia, ZENG Li, HE Yunlong, et al. Leaching corrosion of Hardfill Dam materials[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2009, 42(1): 42-45. (in Chinese))
- [37] 冯炜. 胶凝砂砾石坝筑坝材料特性研究与工程应用[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2013.
- [38] 王秀杰. CSG 坝静、动力性能及最佳剖面研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2005.
- [39] 王秀杰, 何蕴龙. 梯形断面 CSG 坝初探[J]. 中国农村水利水电, 2005(8): 105-107. (WANG Xiujie, HE Yunlong. Trapezoidal section of CSG dam[J]. China Rural Water and Hydropower, 2005(8): 105-107. (in Chinese))
- [40] 施金. 胶凝面板堆石坝结构分析与优化设计研究[D]. 南京: 南京水利科学研究所, 2006.
- [41] 杨令强, 马静, 刘景华, 等. CSG 材料与土体材料联合筑坝仿真研究[J]. 中国农村水利水电, 2007(4): 87-93. (YANG Lingqiang, MA Jing, LIU Jinghua, et al. Research on the simulation of CSG and soil suilding dam[J]. China Rural Water and Hydropower, 2007(4): 87-93. (in Chinese))
- [42] 孙明权, 彭成山, 陈建华, 等. 超贫胶结材料坝非线性分析[J]. 水利水电科技进展, 2007, 27(8): 42-45. (SUN Mingquan, PENG Chengshan, CHEN Jianhua, et al. Nonlinear analysis of over lean cemented material dam[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2007, 27(8): 42-45. (in Chinese))
- [43] 吴凤先, 何蕴龙, 李平. Hardfill 坝坝基竖向应力大小及分布规律求解[J]. 中国农村水利水电, 2009(7): 72-79. (WU Fengxian, HE Yunlong, LI Ping. The distribution of vertical stress on hardfill dam foudation[J]. China Rural Water and Hydropower, 2009(7): 72-79. (in Chinese))
- [44] 明宇, 蔡新, 严伟. ABAQUS 的二次开发在胶凝堆石坝工程中的应用[J]. 水电能源科学, 2013, 31(4): 81-84. (MING Yu, CAI Xin, YAN Wei. Application of ABAQUS secondary development to cemented sand and gravel dam[J]. Water Resources and Power, 2013, 31(4): 81-84. (in Chinese))
- [45] 何蕴龙, 肖伟, 李平. Hardfill 坝横向地震反应分析的剪切楔法[J]. 武汉大学学报: 工学版, 2008, 41(4): 38-42. (HE Yunlong, XIAO Wei, LI Ping. Shear wedge method of lateral seismic response analysis of Hardfill dams[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2008, 41(4): 38-42. (in Chinese))
- [46] 何蕴龙, 张艳锋. Hardfill 坝自振特性分析的剪切楔法[J]. 人民长江, 2008, 39(13): 98-100. (HE Yunlong, ZHANG Yanfeng. Analysis of free vibration characteristics of shear wedge method for hardfill dam[J]. Yangtze River, 2008, 39(13): 98-100. (in Chinese))
- [47] 于跃, 张艳锋, 何蕴龙, 等. 基于剪切楔法的 Hardfill 坝自振特性和动力反应分析[J]. 天津大学学报: 自然科学版, 2009, 42(4): 327-334. (YU Yue, ZHANG Yanfeng, HE Yunlong, et al. Analysis on free vibration and dynamic response of hardfill dams based on shear wedge method[J]. Journal of Tianjin University: Natural Sciences, 2009, 42(4): 327-334. (in Chinese))
- [48] XIONG Kun, WENG Yonghong, HE Yunlong. Seismic failure modes and seismic safety of Hardfill dam [J]. Water Science and Engineering, 2013, 6(1): 199-214.
- [49] 刘斌, 何蕴龙, 彭云枫. Hardfill 坝温度场仿真分析[J]. 人民长江, 2008, 39(14): 92-95. (LIU Bin, HE Yunlong, PENG Yunfeng. Simulation of temperature field for Hardfill dam[J]. Yangtze River, 2008, 39(14): 92-95. (in Chinese))
- [50] 刘文拯, 何蕴龙, 尹鹏. Hardfill 坝渗流场数值分析[J]. 武汉大学学报: 工学版, 2008, 41(2): 5-10. (LIU Wenzheng, HE Yunlong, YIN Peng. Numerical analysis of Hardfill dam's seepage flow field[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2008, 41(2): 5-10. (in Chinese))
- [51] 乐治济. 不同地基条件下胶结砂砾石料坝工作特性研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2005.
- [52] 蔡新, 武颖利, 李国英. 胶凝面板堆石坝离心模型试验研究[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2008, 36(5): 585-589. (CAI Xin, WU Yingli, LI Guoying. Research on centrifugal model experiment for concrete-faced cemented-rockfill dam[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2008, 36(5): 585-589. (in Chinese))
- [53] 熊堃, 何蕴龙, 吴迪. Hardfill 坝结构破坏模型试验研究[J]. 水利学报, 2012, 43(10): 1214-1222. (XIONG Kun, HE

- Yunlong, WU Di. Study on structure failure test of Hardfill dam [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(10): 1214-1222. (in Chinese))
- [54] CAI Xin, WU Yingli, YI Jianggang, et al. Research on shape optimization of CSG dams [J]. Water Science and Engineering, 2011, 4(4): 445-454.
- [55] 明宇, 蔡新, 郭兴文, 等. 基于新型本构模型的胶凝堆石坝多目标优化[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2013, 41(2): 156-160. (MING Yu, CAI Xin, GUO Xingwen. et al. Multi-objective optimization design of cement sand and gravel dam based on a new constitutive model[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2013, 41(2): 156-160. (in Chinese))
- [56] 李晶. 胶凝砂砾石坝与常规重力坝最优断面研究[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2013.
- [57] 贾金生. 中国大坝建设 60 年[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2013.
- [58] SL 678—2014 胶结颗粒料筑坝技术导则[S].

· 简讯 ·

第四届“河口日”国际学术研讨会将在河海大学召开

由河海大学主办, 江苏省海洋湖沼学会以及江苏省海岸海洋资源开发与环境安全重点实验室协办的第四届“河口日”国际学术研讨会将于 2015 年 10 月 13—15 日在河海大学召开。河口日学术研讨会(Estuary Day Workshop)于 2012 年由美国、英国、荷兰以及西班牙等多国科学家的共同努力下联合发起, 旨在搭建一个相对小范围的、开放的学术交流平台, 在轻松、愉快的学术氛围中, 共同探讨河口水动力、泥沙及物质输运特性和河口动力地貌特征等领域的最新科学研究进展。该学术研讨会已经成功在荷兰举办了 3 届。每一届选择一个明确的主题, 与会学者通过口头报告和延展性讨论的形式进行学术交流讨论, 围绕共同感兴趣的课题开展国际科研合作。

本届“河口日”学术研讨会以“海岸、河口环境下的动力地貌平衡”为主题开展学术研讨。会议邀请了来自新西兰、英国、荷兰、美国、意大利, 以及南京大学、华东师范大学、中山大学、南京水利科学研究院和河海大学近 30 名学者参会交流。会后还将组织赴江苏沿海进行现场考察。

(本刊编辑部供稿)