

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2012.03.009

全级配混凝土梁动强度提高机理研究

杜成斌,孙立国,江守燕,陈玉泉

(河海大学力学与材料学院,江苏 南京 210098)

摘要:基于细观力学方法对全级配混凝土梁的动强度提高机理进行研究.假定混凝土由骨料、砂浆和界面三相材料组成,按全级配混凝土实际配比生成随机混凝土骨料模型.采用塑性损伤模型并考虑材料的应变软化,利用全级配混凝土梁的静弯拉(破坏)试验标定骨料、砂浆和界面的参数.在此基础上对冲击荷载下全级配混凝土梁的动弯拉破坏过程进行数值模拟,重点讨论惯性效应和应变率效应对混凝土材料强度增强因子的影响.研究结果表明:(a)当应变率小于 8 s^{-1} 时,材料惯性对梁的极限荷载影响可以忽略不计;当应变率大于 8 s^{-1} 时,材料惯性对全级配混凝土强度的动力增强因子(S_{DIF})影响增大.(b)当应变率小于 20 s^{-1} 时,率效应对 S_{DIF} 影响较大,在高应变率区 S_{DIF} 主要受材料惯性的影响.此外,探讨了初始缺陷(损伤)对全级配混凝土梁破坏荷载的影响.

关键词:全级配混凝土梁;惯性效应;应变率;动力增强因子;冲击荷载

中图分类号:TV332.12;TU312 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2012)03-0294-06

Dynamic strength enhancement mechanism of a fully-graded concrete beam

DU Cheng-bin, SUN Li-guo, JIANG Shou-yan, CHEN Yu-quan

(College of Mechanics and Materials, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The dynamic strength enhancement mechanism of a fully-graded concrete beam was studied based on mesomechanics. Assuming that the concrete composites are composed of aggregate particles, cement matrix, and an interface transitional zone (ITZ), the numerical aggregate models were generated randomly based on the actual aggregate grade of fully-graded concrete. A plastic-damage model for concrete, in which strain softening was taken into consideration, was adopted. The material parameters of the aggregate particles, cement matrix, and ITZ were identified through a static flexural-tension experiment. Based on the identified parameters, the dynamic flexural-tension failure process of the fully-graded concrete beam was numerically simulated under an impact load. The effects of inertia and strain rate on the dynamic increase factor (S_{DIF}) were analyzed. The results show the following: (a) The inertial effect on the limited load could be neglected when the strain rate was lower than 8 s^{-1} ; when the strain rate was greater than 8 s^{-1} , the inertial effect on S_{DIF} of the fully-graded concrete beam increased. (b) When the strain rate was lower than 20 s^{-1} , the strain rate had a significant effect on S_{DIF} , whereas the S_{DIF} was mainly controlled by the inertia effect. In addition, the effect of initial damage on the failure load of the fully-graded concrete beam was studied.

Key words: fully-graded concrete beam; inertial effect; strain rate; dynamic increase factor; impact load

全级配混凝土在动载下的破坏强度是高混凝土坝抗震安全评价的重要研究内容,最近 10 多年来一直得到有关研究者的关注,许多学者进行了试验和数值模拟研究^[1-5].

由于试验条件的限制,目前很难针对全级配混凝土梁进行动力破坏试验.现有进行的全级配混凝土梁试验的动载频率只有 $1 \sim 10\text{ Hz}$,激励频率高于 10 Hz 的荷载由于试验装置的出力限制,位移、振幅都非常小,很难实现梁的破坏.尽管外荷频率接近一般高混凝土坝的基频,但相对于全级配混凝土梁而言,这种“动载”很

收稿日期:2011-03-02

基金项目:国家自然科学基金(11132003,50779011) 国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2007CB714104)

作者简介:杜成斌(1965—),男,江苏盐城人,教授,博士,主要从事水工结构工程中力学问题的研究. E-mail:cbdu@hhu.edu.cn

难激发其动态特性和动响应,实际所得的试验结果大都为静力成果,很难推广应用于高混凝土坝的抗震安全评价,同时也影响一些规律性结论的总结.比较合适的方法是结合部分湿筛小试件(或少量全级配试件)的静动力试验结果,研究合适的数值模型(材料参数),然后再推广用于全级配混凝土梁的动载破坏研究.

笔者在文献[6]的基础上对全级配混凝土梁的动弯拉破坏进行研究.假定混凝土是由骨料、水泥砂浆和两者间的黏结带组成的三相材料,考虑材料的应变率效应,利用大型商业软件 ABAQUS 进行全级配混凝土在动载下的强度提高机理研究,主要探讨惯性效应和应变率效应对动强度的影响,得到全级配混凝土的强度动力增强因子(S_{DIF})随应变率变化的规律有别于湿筛混凝土试件以及欧洲-国际混凝土协会(CEB)公式的结果,率敏感点值变小且曲线上抬变化更快等结论.

1 计算模型

1.1 计算对象与计算网格

计算对象选择 DL/T5150—2001 水工混凝土试验规程^[7]推荐的全级配混凝土梁,其截面尺寸为 450 mm × 450 mm,长度为 1 700 mm.骨料采用四级配碎石,配比为特:大:中:小 = 30:30:20:20,相应的骨料粒径范围分别为 80 ~ 150 mm,40 ~ 80 mm,20 ~ 40 mm 以及 10 ~ 20 mm.计算简图见图 1.

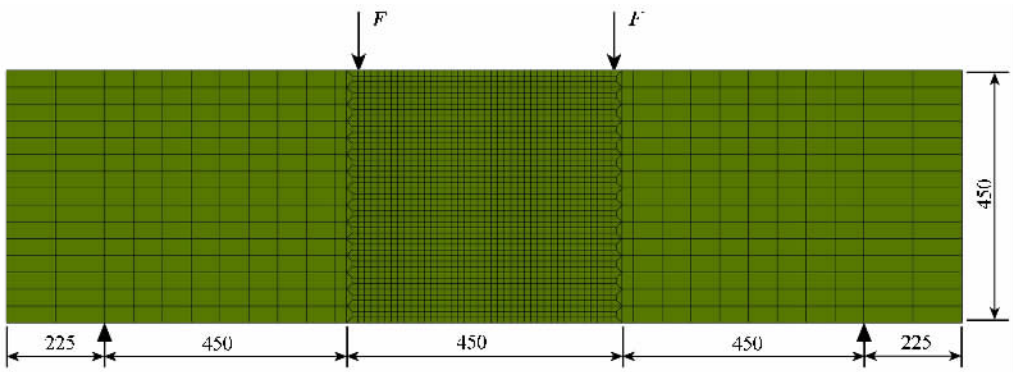


图 1 全级配混凝土梁静、动弯拉计算网格剖分示意图(单位:mm)

Fig. 1 Sketch map of grid profile of fully-graded concrete beam for static and dynamic flexural-tension computation (Unit:mm)

根据梁的受力特点,中间 450 mm 为纯弯段,其弯矩最大,破坏一般在该部位发生.同时考虑细观非线性有限元计算条件的限制,选择中间部分 450 mm × 450 mm × 300 mm 作为非均质段,利用已研制的混凝土三维随机骨料模型^[8](3D-RAS)生成任意多面体试件,其骨料投放和骨料单元的剖分结果见图 2.

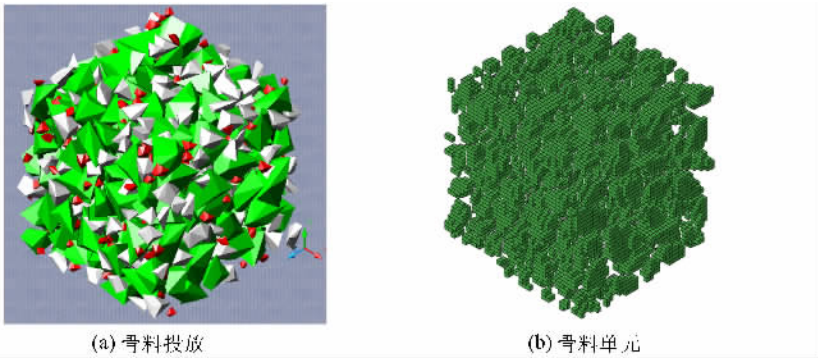


图 2 非均质段骨料投放与单元网格剖分

Fig. 2 Aggregates and meshes in heterogeneous composites

1.2 采用的材料本构模型说明

基于 ABAQUS 软件进行计算.材料本构模型采用 Lubliner 等^[9]和 Lee 等^[10]提出的适合往复荷载作用的混凝土塑性损伤模型,研究中考虑混凝土材料的软化效应,为减少裂缝开裂计算的网格依赖性,应力峰值后以拉应力-裂缝宽度曲线^[11]代替应力-应变全曲线的下降段,材料的率效应按欧洲混凝土协会推荐的公式^[12]取用,具体见文献[6].计算采用的材料参数见表 1.这些参数部分是根据试验给出的,部分是经过多次试算与全级配梁静力试验比较确定的.

表1 计算中采用的混凝土及其各相材料参数

Table 1 Material parameters for each phase adopted in the calculation

材 料	弹性模量/GPa	泊松比	抗拉强度/MPa	极限裂缝宽度/mm
混凝土	40.0	0.17		
砂 浆	40.0	0.21	2.2	0.08
骨 料	55.5	0.16	4.2	0.08
界面区材料	35.0	0.16	1.2	0.08

2 数值模型的静力试验结果验证

由于缺少全级配混凝土试件的动力试验结果(全过程),笔者首先采用数值模型与课题组进行的全级配梁的静载破坏全过程试验进行对比.图3为数值模拟与试验得到的荷载-位移结果对比.图4为数值模拟破坏时裂缝的位置和形态与试验结果的对比.

由图3可以看出,在弹性阶段两者基本一致,峰值荷载基本接近,下降段趋势两者也基本相似.数值模拟得到的裂缝样式为一条宏观裂缝,其深度和位置与试验结果比较接近.对比表明,选取的随机骨料模型及材料参数可以进行全级配混凝土梁的静、动破坏研究.

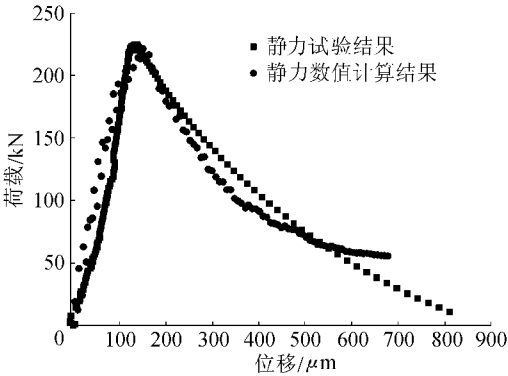
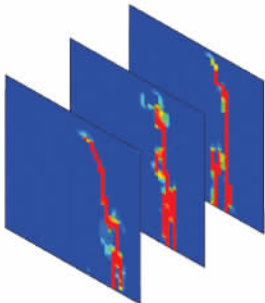


图3 数值模拟与试验结果比较

Fig. 3 Comparison of numerical and experimental results



(a)数值模拟结果



(b)试验破坏裂缝

图4 数值模拟裂缝与试验结果对比

Fig. 4 Comparison of crack shape between numerical and experimental results

3 全级配混凝土梁动静、动破坏影响因素分析

3.1 惯性效应对材料强度 S_{DIF} 的影响

采用不同加载速度,但不考虑材料的率效应,共仿真计算了8种情况,加载速度范围为 $5.0 \times 10^{-4} \sim 0.5$ m/s,图5给出部分加载时程,加载速度曲线工况1、工况2、工况3、工况4对应的稳态加载速度分别为0.05 m/s,0.1 m/s,0.2 m/s,0.5 m/s.图6为计算得到的荷载-跨中挠度曲线.可以看出,随着加载速度的提高,破坏荷载明显增大.

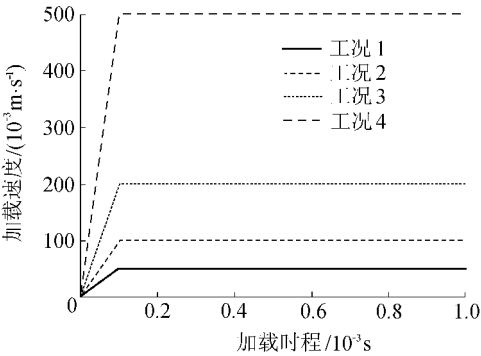


图5 计算采用的加载曲线

Fig. 5 Loading curves for calculation

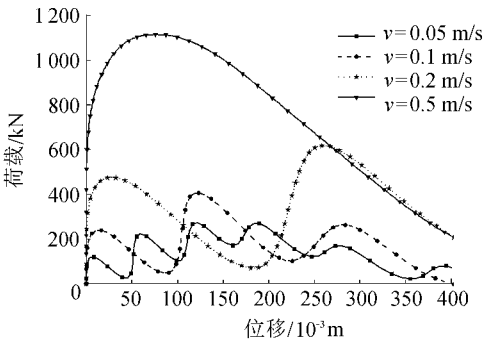
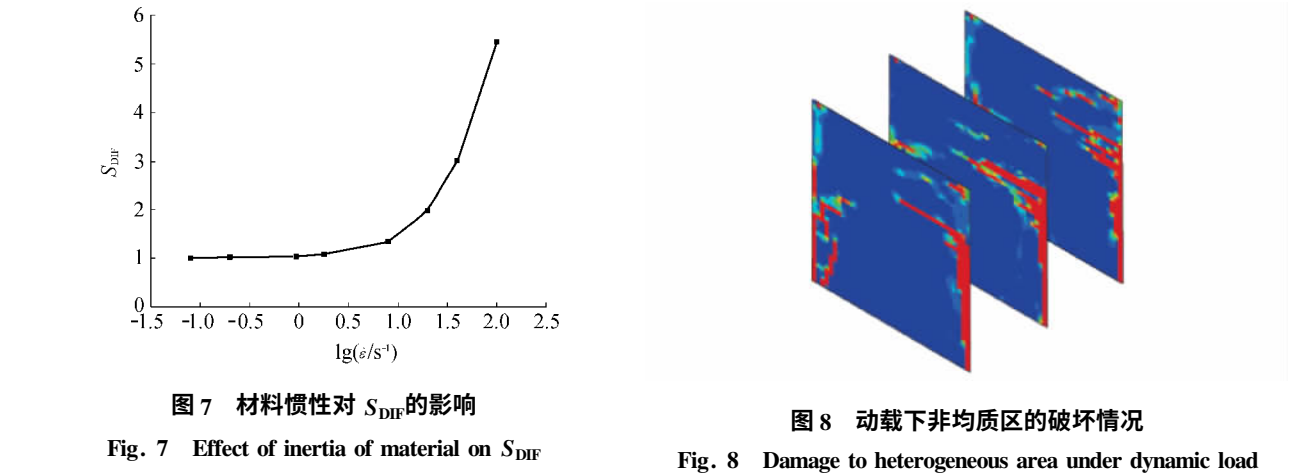


图6 计算得到的荷载跨中挠度曲线

Fig. 6 Curves of load-displacement at mid-span obtained by calculation

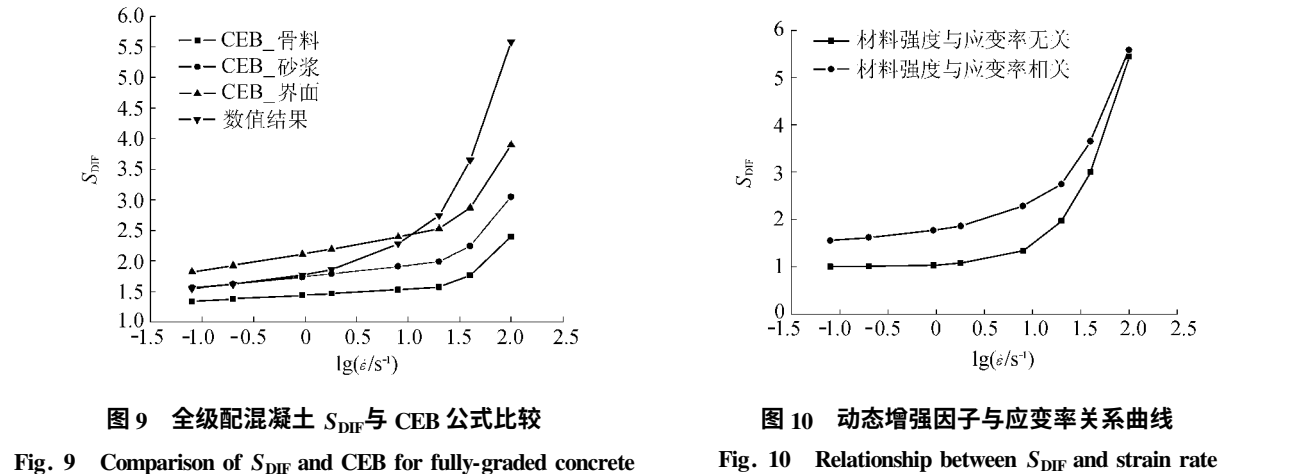
研究表明 :当加载速度小于 $1.0 \times 10^{-2} \text{m/s}$ 时,应变率为 1.8s^{-1} ,材料惯性对梁的极限荷载影响很小 ;当加载速度大于 $5.0 \times 10^{-2} \text{m/s}$ 时,应变率为 8s^{-1} ,材料惯性对梁的极限荷载影响逐渐变大(见图 7. S_{DIF} 为材料强度的动力增强因子^[6]).材料惯性对湿筛混凝土梁影响的率敏感值为 60s^{-1} ^[4],比较而言,材料惯性对全级配梁率敏感点值更小,几乎是湿筛试件率敏感点值的 $1/10$.通常地震作用下材料的应变率在 $10^{-4} \sim 10^{-2} \text{s}^{-1}$ 之间,在此区间惯性对全级配梁的影响也很小.

从动载下材料非均质区的破坏情况(图 8)可以明显看出有多条裂缝出现,且有骨料断裂现象.



3.2 材料率效应对 S_{DIF} 的影响

图 9 给出了考虑率效应的全级配混凝土梁的 S_{DIF} 与 CEB 公式结果的比较.可以看出,总的变化规律相似,但全级配混凝土的率敏感点值变小,曲线上抬变化更快,这一点与湿筛混凝土试件的规律不同^[4].当 ϵ 大于 1.8s^{-1} 时, S_{DIF} 的率敏感性明显增强.图 10 为是否考虑应变率效应的 S_{DIF} 与应变率关系曲线.可以看出,考虑材料应变率效应后,即使 $\epsilon < 1.8 \text{s}^{-1}$,与惯性效应相比,率效应对材料 S_{DIF} 的影响较大 ;当 $\epsilon > 20 \text{s}^{-1}$ 时,惯性对材料 S_{DIF} 的影响占主导地位.



3.3 材料初始缺陷对全级配混凝土梁破坏的影响

研究中采用不同孔隙率 P 来模拟混凝土材料的初始缺陷,按 Weibull 随机分布模拟了 P 分别为 1% 、 3% 和 5% 这 3 种情况全级配梁的破坏情况,加载速度为 0.1m/s .图 11 为 3 种缺陷试件与无缺陷试件的荷载-位移曲线比较.可以看出,随着初始缺陷比例增加,梁的破坏荷载明显减小,峰值点后缺陷的影响比较大,缺陷大的试件离散程度大.图 12 为不同孔隙率下试件的最终裂纹形态.根据以上结果,得到与湿筛混凝土试件类似的结论 :当孔隙率较小时,裂纹的位置与无初始损伤时的裂纹位置接近.孔隙率增大时,裂纹起裂的位置发生明显变化.

4 结 语

静力数值模拟与试验结果对比表明：(a)采用任意形状的随机骨料模型建立全级配混凝土的数值模型是可行的。(b)当应变率小于 8 s^{-1} 时，材料惯性对梁的极限荷载影响可以忽略不计；当应变率大于 8 s^{-1} 时，材料惯性对全级配混凝土强度的 S_{DIF} 影响增大，且应变速率越高其影响越大。(c)当应变率小于 20 s^{-1} 时，率效应对 S_{DIF} 的影响较大，在高应变率区， S_{DIF} 主要受惯性影响。(d)全级配混凝土的 S_{DIF} 随应变率变化的规律有别于湿筛混凝土试件以及 CEB 公式的结果，率敏感点值变小则曲线上抬变化更快。(e)静力破坏给试件造成明显的单条宏观裂纹，而动载下的破坏则呈现明显的多条裂纹情况。(f)当孔隙率较小时，裂纹的位置与无初始损伤时的裂纹位置接近；孔隙率增大时，裂纹起裂的位置发生明显变化。

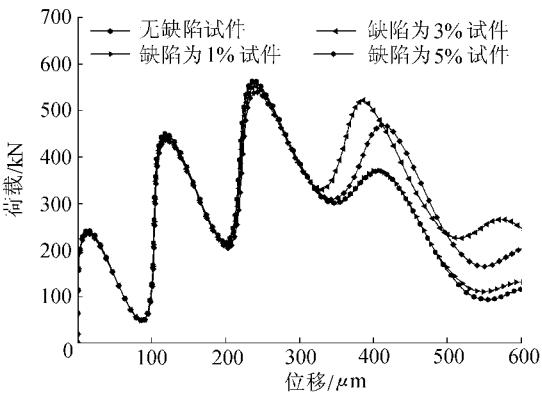


图 11 有缺陷情况荷载-跨中位移比较

Fig. 11 Comparison of curves of load-displacement at mid-span for concrete with damage and without damage

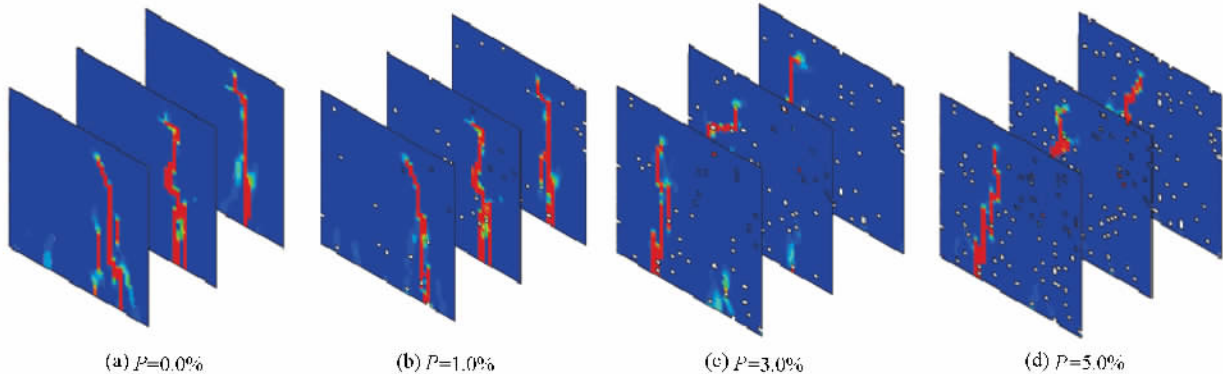


图 12 不同孔隙率下试件的裂纹形态

Fig. 12 Crack shapes of specimens with different porosities

参考文献：

[1] 侯顺载,李金玉,曹建国,等.高拱坝全级配混凝土动态试验研究[J].水力发电,2002(1):51-53. (HOU Shun-zai, LI Jin-yu, CAO Jian-guo, et al. Dynamic tests and study on the fully-graded concrete for high arch dam[J]. Water Power, 2002(1):51-53. (in Chinese))

[2] 马怀发,陈厚群,黎保琨.应变率效应对混凝土动弯拉强度的影响[J].水利学报,2005,36(1):69-76. (MA Huai-fa, CHEN Hou-qun, LI Bao-kun. Influence of strain rate effect on dynamic bending strength of concrete[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(1):69-76. (in Chinese))

[3] 杜修力,田瑞俊,彭一江.预静载对全级配混凝土梁动弯拉强度的影响[J].地震工程与工程振动,2009,29(2):98-102. (DU Xiu-li, TIAN Rui-jun, PENG Yi-jiang. Influence of initial static loading on dynamical bending strength of fully-graded concrete beam[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2009, 29(2):98-102. (in Chinese))

[4] 王怀亮,宋玉普,王宝庭.用刚体弹簧元法研究全级配混凝土力学性能[J].大连理工大学学报,2006,46(增刊):105-117. (WANG Huai-liang, SONG Yu-pu, WANG Bao-ting. Numerical simulation of mechanical behavior of fully-grade concrete based on rigid body spring model[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2006, 46(Sup):105-117. (in Chinese))

[5] 马怀发,王立涛,陈厚群,等.混凝土动态损伤的滞后特性[J].水利学报,2010,41(6):659-664. (MA Huai-fa, WANG Li-tao, CHEN Hou-qun, et al. Mechanism of dynamic damage delay characteristic of concrete[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(6):659-664. (in Chinese))

[6] 杜成斌,江守燕,徐海荣,等.基于细观力学的湿筛混凝土试件动弯拉破坏研究[J].河海大学学报:自然科学版,2012,40(2):195-200. (DU Cheng-bin, JIANG Shou-yan, XU Hai-rong, et al. Study on static and dynamic failure of wet-screened concrete

specimen[J]. Journal of Hohai University Natural Science,2012,40(2):195-200. (in Chinese))

[7] DL/T5150—2001 水工混凝土试验规程[S].

[8] 杜成斌,孙立国.任意形状混凝土骨料的数值模拟及其应用[J].水利学报,2006,37(6):662-667. (DU Cheng-bin, SUN Li-guo. Numerical simulation of concrete aggregates with arbitrary shapes and its application[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2006,37(6):662-667. (in Chinese))

[9] LUBLINER J, OLIVER J, OLLERR S,et al. A plastic-damage model for concrete[J]. International Journal of Solids and Structures, 1989,25(3):329-326.

[10] LEE J,FENVES G L. Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures[J]. Journal of Engineering Mechanics,1998,124(8):892-900.

[11] HILLERBORG A, MODEER M, PETERSSON P E. Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements[J]. Cement and Concrete Research,1976,6(6):773-782.

[12] CEB-FIP Model Code 1990 Redwood Books[S].

· 简讯 ·

河海大学举行‘全球水循环与国家水安全’ 优势学科创新平台总结会

2012年5月19日,“全球水循环与国家水安全”优势学科创新平台总结会在河海大学举行.党委书记朱拓、校长王乘、副校长朱跃龙、中国工程院吴中如院士和王超院士出席会议.会议由朱拓书记主持,王乘校长致辞.

由中国科学院汪集 院士为组长,中国科学院薛禹群院士、水利部周学文总规划师为副组长,中国工程院吕志涛院士、蔡道基院士、张建云院士,大连理工大学党委常务副书记孔宪京教授、中国科学院南京地理与湖泊研究所所长杨桂山教授、东南大学副校长沈炯教授等9人组成的专家组对平台进行了总结和检查.

王乘校长对出席总结会的各位专家表示热烈的欢迎,并介绍了“全球水循环与国家水安全”优势学科创新平台建设的总体成效.王校长表示,学校将以此次会议为契机,全面总结建设成果和经验,认真查找存在的问题和不足,高标准启动下一期建设规划,扎扎实实做好平台建设的各项工作,进一步提升解决全球气候变化下的水科学问题、保障国家水安全重大需求、服务重大水利水电工程建设等方面的能力,争取产生一批具有国际领先水平的研究方向、研究团队和国家级科研平台,持续产出国际同行广泛认可的原始创新成果,全面提升学科声誉,为建成具有国际一流水利学科的高水平特色研究型大学奠定基础.

朱跃龙副校长从目标任务、完成情况、建设管理、总体成效、今后设想等5个方面向专家组作了“全球水循环与国家水安全”优势学科创新平台建设总结汇报.专家组在听取汇报的基础上,对建设工作总结进行了审查.经过认真讨论和评议,形成了评价意见,认为平台建设全面超额完成任务,达到了预期目标,取得了显著的社会效益和经济效益,一致同意通过平台建设工作总结.

优势学科创新平台建设以来,学校紧密围绕“水利特色,世界一流”的战略目标,瞄准和跟踪全球气候变化背景下的水问题等国际学科前沿,积极服务国家水安全、生态安全和水资源可持续利用等重大需求,积极探索管理体制和运行机制的改革与创新,推进学科的交叉融合,创建产学研深度合作的新模式,推行以创新质量和贡献为导向、以绩效考核为核心的评价机制.通过建设,平台已成为我国水科学领域学术领军人才和高水平创新团队的培育基地、水循环与水安全理论和技术的创新基地、重大水工程关键技术的研发基地和水科学领域的高层次国际学术交流基地.

(本刊编辑部供稿)