

DOI:10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.01.005

宋家东, 杨锐, 杨峰, 等. 新老混凝土缝面切向刚度早龄期发展规律[J]. 水利水运工程学报, 2019(1): 35-41. (SONG Jiadong, YANG Rui, YANG Feng, et al. Development rule of tangential stiffness of new and old concrete joint faces at early age and its application in temperature control simulation[J]. Hydro-Science and Engineering, 2019(1): 35-41. (in Chinese))

# 新老混凝土缝面切向刚度早龄期发展规律

宋家东<sup>1</sup>, 杨锐<sup>2</sup>, 杨峰<sup>3</sup>, 章景涛<sup>4</sup>, 强晟<sup>4</sup>, 华夏<sup>5</sup>

(1. 河南省水利第一工程局, 河南 郑州 450004; 2. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 陕西 西安 710065; 3. 河南省出山店水库建设管理局, 河南 郑州, 450004; 4. 海海大学 水利水电学院, 江苏 南京 210098; 5. 普渡大学 机械工程学院, 美国印第安纳 西拉法叶 47907)

**摘要:** 由于缺乏新老混凝土缝面早龄期力学性能发展规律的研究, 一般认为大体积混凝土浇筑块间歇面强度与浇筑块相同, 由此导致间歇面上下层新老混凝土相互约束偏大, 从而使浇筑块内部的应力计算值偏大。设计了新老混凝土缝面早龄期剪切试验, 获取了需要的参数历时曲线, 然后将该成果应用到实际混凝土坝工程的施工期温度场和应力场仿真计算。计算结果表明, 在间歇面上设置缝面单元, 并考虑其早龄期强度发展, 可以相对合理地模拟约束情况, 计算得到的浇筑块拉应力值相对较小, 更符合实际情况。

**关键词:** 新老混凝土; 切向刚度; 剪切试验; 早龄期; 缝面单元

**中图分类号:** TU528.0      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1009-640X(2019)01-0035-07

在实际混凝土浇筑工程中, 由于浇筑能力、结构因素和温控条件等因素影响, 混凝土浇筑会选择分块分仓浇筑方式, 所以混凝土施工缝是必然存在的<sup>[1-3]</sup>。混凝土结构的分块分仓形式、浇筑先后顺序和浇筑间歇期等会直接影响浇筑块的受力和变形, 特别是新浇筑的混凝土与已浇筑一段时间的老混凝土之间, 由于龄期不同, 热学和力学参数都有较大差异, 会让新老混凝土之间产生额外的约束, 而且结合面处由于施工质量等原因, 很容易成为薄弱面而产生裂缝<sup>[4-5]</sup>。因此, 新老混凝土缝面问题是一个需要重点关注的课题。

国内外不少学者为新老混凝土缝面问题做过大量的研究工作并取得了许多重要成果<sup>[6-8]</sup>。对影响新老混凝土粘结的诸多因素进行了研究, 发展了对新老混凝土缝面的处理方法和施工工艺, 并试验研究了新老混凝土缝面的力学性能, 分析了缝面粘结强度等力学性能问题。但是, 这些成果多限于针对某工程的特定需要而进行新老混凝土缝面强度的测定<sup>[9-11]</sup>, 对缝面力学性能的试验研究也多使用成熟的混凝土浇筑块, 这些混凝土浇筑块浇筑后日期较长, 不能反映新老混凝土缝面在早龄期的力学性能变化<sup>[12-15]</sup>, 即无法反映早龄期阶段间歇面附近的材料强度变化。因此, 本文设计了新老混凝土缝面早龄期剪切试验方法, 获取了缝面切向刚度的发展历时曲线, 并应用到实际工程的仿真计算中, 验证其合理性。

## 1 试验研究

### 1.1 试验方法

采用剪切试验<sup>[16-17]</sup>预模拟新老混凝土结合面切向刚度系数( $K_s$ )随龄期( $\tau$ )的变化过程, 同时得到新混凝土试块弹性模量( $E$ )随龄期( $\tau$ )的变化情况。试验分别模拟新老混凝土浇筑间歇期 3, 5 和 14 d 的情况,

收稿日期: 2018-04-26

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51679074)

作者简介: 宋家东(1966—), 男, 河南郑州人, 高级工程师, 主要从事水利工程方面研究。E-mail: 3263506148@qq.com

通信作者: 强晟(E-mail: sqiang2118@163.com)

即先浇筑两边的老混凝土试块,间隔3 d(或5,14 d)再浇筑中间的新混凝土试块,直至新老混凝土缝面(新混凝土)龄期达到1,2,3,5,7,14和28 d时,做缝面的剪切试验,试验总共分3组,3组试验分期来做,每组(共21块)又分7小组,每小组制作有3个试块。试验装置如图1所示。

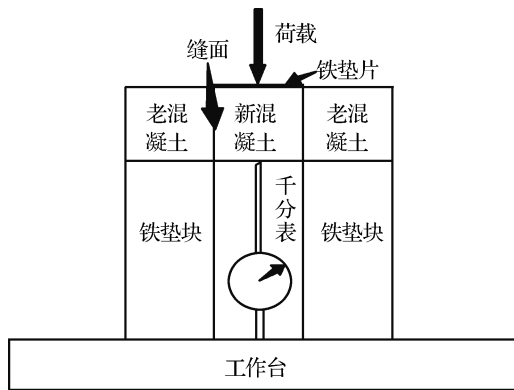


图1 试验装置

Fig.1 Test device

## 1.2 试验材料和仪器

模具采用50 mm×50 mm×50 mm三联钢模具,尺寸比较小,不宜添加石子,故混凝土原材料只采用水泥、黄砂和水。其中水泥选用海螺牌P·C 32.5复合硅酸盐水泥,砂子用10 kg袋装的黄砂。

仪器主要包括有:①微机控制电液伺服万能试验机;②50 mm×50 mm×50 mm三联钢模具;③10 kg电子秤(最小精度1 g);④千分表及支架;⑤小榔头、小铁锹、食用油、牙刷、抹布以及保鲜膜等。

## 1.3 试块的制备

本试验是研究新老混凝土缝面的切向刚度,故保证结合面良好胶结非常关键。试块制备过程为:

(1) 试验配合比取1:3:0.7(水泥:砂子:水),按照配合比称量对应的试验原材料,同时将称量的水泥和黄砂分开放置。将水泥和砂子混合拌匀,再倒入水拌合成混凝土。

(2) 将混凝土拌合均匀,浇筑两侧老混凝土,可以用小铁锹分4次放入模具内,每次放入混凝土后,需用小铁棒捣若干次。最后,当试块制作完成后约1 h,还需覆盖一层塑料保鲜膜,相当于进行常规的保湿养护,待浇筑新混凝土时撕去保鲜膜。

(3) 分别于龄期1 d(或2,3,5,7,14,28 d),逐个撕去保鲜膜,拆掉模具,检查试块的质量,确认合格后,用黑色记号笔分别做好标记,取3个试样做剪切试验。浇筑新混凝土时,需重复步骤1~3。

## 1.4 试验结果分析

为获取新混凝土的荷载随加载时间的曲线,推求弹性模量的历时曲线,本试验加载速率取0.011或0.05 kN/s。试验测得破坏时的荷载值(图2),此处仅以5 d龄期的曲线为例;推求抗压强度(图3);最后得到弹性模量拟合结果见图4。

通过缝面早龄期剪切强度试验,可得到破坏时的荷载,千分表可测出位移,通过应力应变关系可以推求切向刚度,最后拟合出切向刚度-龄期曲线见图5。拟合的结果依次为: $K_s = 1.28 \times (1 - \exp(-0.17\tau^{0.95}))$ (3 d),  $K_s = 1.35 \times (1 - \exp(-0.17\tau^{0.92}))$ (5 d),  $K_s = 1.26 \times (1 - \exp(-0.17\tau^{0.79}))$ (14 d)。

由图5可见,间歇期长短对缝面切向刚度的终值影响不大,终值基本都在1.2~1.4 GPa。通过该试验方法获取相应的计算参数,对实际工程缝面的早龄期应力问题进行仿真计算。由于间歇期14 d比较符合实际工程中的间歇期,本文取新老混凝土间歇期为14 d的拟合结果为后续仿真计算的参数。

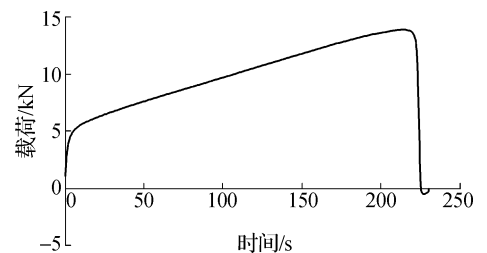


图2 缝面龄期为5 d的试块受压破坏曲线  
Fig.2 Compression failure curve of joint face under 5 d intermission

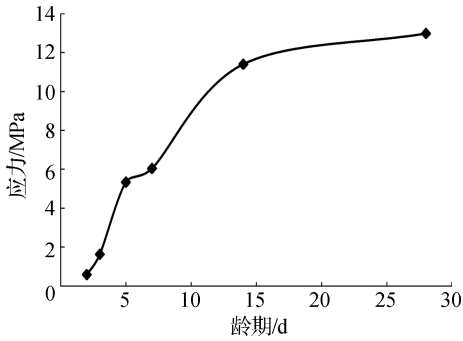


图3 抗压强度随龄期变化曲线

Fig.3 Curve of compressive strength with age

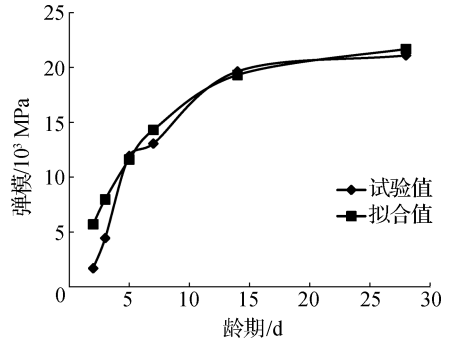


图4 新混凝土弹性模量随龄期变化曲线

Fig.4 Curve of elastic modulus of new concrete

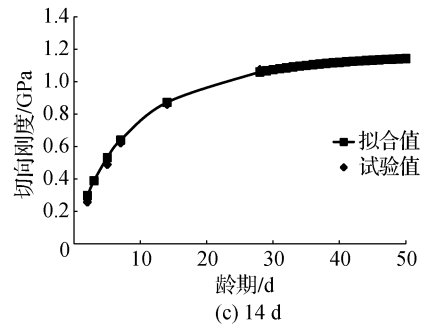
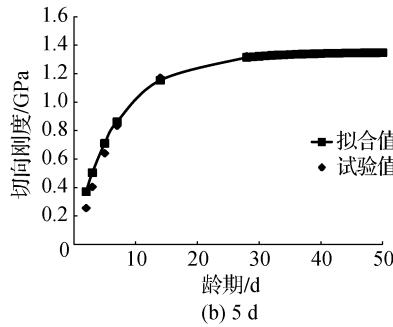
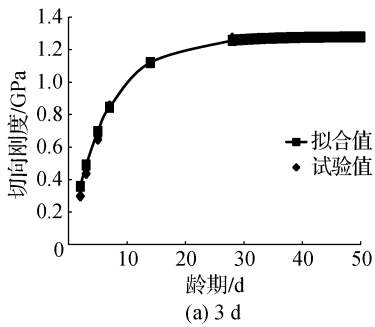


图5 不同间歇期缝面切向刚度-龄期曲线

Fig.5 Tangential stiffness-age curve of joint face under different intermissions

## 2 工程仿真计算

河南省出山店水库是一座以防洪为主要目的,兼灌溉、供水、发电、旅游等综合效益的新建大型工程,于2014年年底正式修建。设计水库总库容12.60亿 $m^3$ 。主坝型式为混合坝型,其中混凝土坝段长429.57 m。坝顶高程100.4 m,防浪墙顶高程101.6 m。水库设计水位为95.78 m,校核水位98.12 m。工程级别为1等,主要建筑物级别为1级。本文选取其中1个非溢流坝段为研究对象。

### 2.1 主要计算参数

出山店水库所在地多年月平均气温拟合余弦曲线公式如下:

$$T_a(t) = 15.7 + 13 \times \cos\left[\frac{\pi}{6}(t - 6)\right] \quad (1)$$

式中: $T_a(t)$ 为月平均气温( $^{\circ}C$ ); $t$ 为月份。

根据地质资料、配合比和有关反演结果,确定主要材料的热学和力学参数见表1。

表1 材料的热学与力学参数

Tab. 1 Thermal and mechanical parameters of materials

材料	导热系数 $\lambda/(kJ \cdot (m \cdot h \cdot ^{\circ}C)^{-1})$	绝热温升 $\theta_0/^{\circ}C$	导温系数 $a/$ $(m^2 \cdot h^{-1})$	线胀系数 $\alpha/$ $(10^{-6}/^{\circ}C)$	泊松比 $\mu$	密度 $\rho/(kg \cdot m^{-3})$	最终弹性模量 $E_0/GPa$
C20 混凝土	9.617	39.5	0.004 31	8.378	0.167	2 353	30.3
地基	10.500	0	0.005 48	7.000	0.200	2 680	55.0

根据实测温度反演得到的 C20 混凝土的绝热温升的表达式:

$$\theta = 39.5 \times (1 - \exp(-0.1 \times \tau^{1.95})) \quad (2)$$

式中: $\theta$  为绝热温升( $^{\circ}\text{C}$ ); $\tau$  为龄期(d)。

根据抗压强度折算得到混凝土弹性模量计算式为:

$$E(\tau) = 30.3 \times (1 - \exp(-0.1 \times \tau^{1.95})) \quad (3)$$

式中: $E(\tau)$  为弹模(GPa); $\tau$  为龄期(d)。

表面热交换系数根据现场各结构不同时段的面覆盖情况和风速而定。混凝土的自生体积变形和徐变根据工程经验取值<sup>[4]</sup>。计算考虑的荷载有温度荷载、自生体积变形、徐变、自重。

## 2.2 计算模型和特征点布置

坝段整体有限元计算模型见图 6(a),通过对坝体单元赋上不同颜色的材料号显示浇筑顺序不同的浇筑层。为了显示典型关键位置的温度和应力随龄期的发展历时过程,在这些缝面研究位置附近取若干特征点。特征点 1,2,3 均位于  $Y=12.5\text{ m}$  的平面上(坝段横河向宽度为 25 m),特征点具体位置见图 6(b)。

为了分析缝面单元对新老混凝土温度和应力计算结果的影响,根据不同计算工况,分别在第 2 层和第 3 层浇筑块之间、第 3 层和第 4 层浇筑块之间、第 6 层和第 7 层浇筑块之间设置缝面单元<sup>[18]</sup>,缝面单元位置见图 6(c)和(d)。

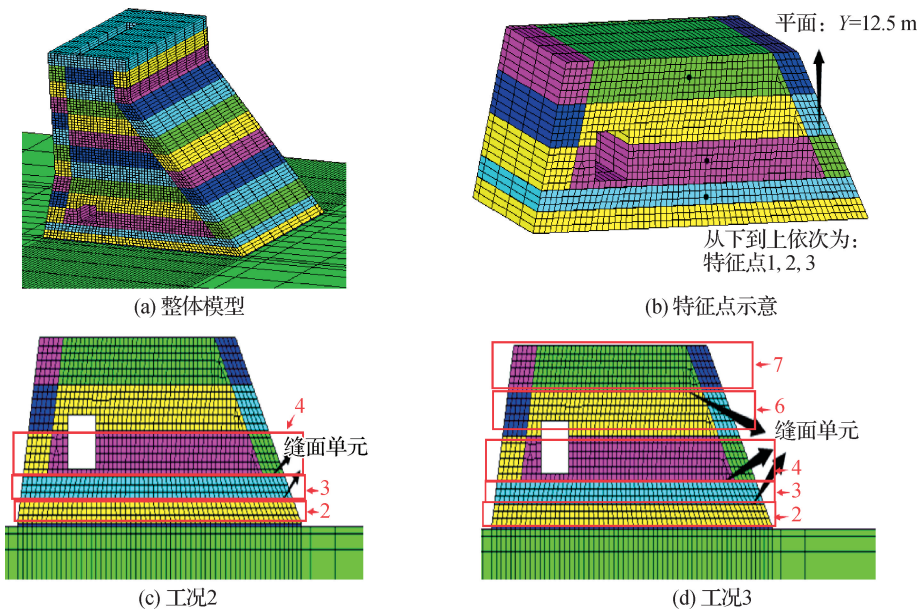


图 6 有限元计算模型

Fig. 6 Finite element calculation models

## 2.3 计算工况

工况 1:新老混凝土胶结面不设置缝面单元,即缝面上混凝土强度与浇筑块强度相同。单元总数为 38 852,节点总数为 44 534。工况 2:在第 2 层和第 3 层浇筑块之间、第 3 层和第 4 层浇筑块之间,分别设置缝面单元,单元总数为 40 012,节点总数为 45 832,其他工况同工况 1;计算模型见图 6(c)。工况 3:在第 2 层和第 3 层浇筑块之间、第 3 层和第 4 层浇筑块之间、第 6 层和第 7 层浇筑块之间分别设置缝面单元,单元总数为 40 502,节点总数为 46 382,其他工况同工况 1;计算模型见图 6(d)。若无特殊说明,在计算结果分析中,所有应力以拉为正,压为负。



## 2.4 计算结果分析

图7是特征点1,2,3在3个计算工况的温度对比历时曲线和第一主应力对比历时曲线。由图7(a)温度曲线可知,3种工况的温度曲线相同。特征点1在2.5 d达到温度峰值,由于特征点1所在浇筑块很薄,只有1.50 m厚,故温度峰值后温降速度较快,其内部拉应力迅速增长,在常规单元计算条件下,拉应力最大值得达4.1 MPa,如图7(b)所示,远超过抗拉强度的极限值。此后,由于上层混凝土浇筑导致混凝土再次上升,拉应力逐步下降,最终趋于稳定。在工况2和工况3中,特征点应力历时曲线走势均很接近,应力峰值明显小于工况1,应力峰值减少到1.94 MPa,在中后期,应力值比工况1减小了1~2 MPa。

位于第5层浇筑层中心位置的特征点2,其温度历时曲线见图7(c),第4.5 d达到峰值,最高温度达44.6℃。应力历时曲线见图7(d),相对于未设缝面单元的工况1,工况2和工况3应力历时曲线则基本相同,应力局部有波动,此外,拉应力在中后期与工况1差异很大,主要是由于第4层和第5层混凝土增设了缝面单元,减少了新老混凝土之间相互约束,故缝面附近特征点拉应力受影响较大。

位于第7层混凝土中心的特征点3,由于浇筑时环境温度高,混凝土水化热峰值达到57℃,见图7(e)。由于总体温降幅度大,故最终的总体拉应力增幅明显高于特征点1和2,应力历时曲线见图7(f)。在常规单元计算工况中,冬季时,混凝土内部拉应力超过了抗拉强度;而工况2和工况3则拉应力仍小于抗拉强度,即浇筑块内部并未开裂。

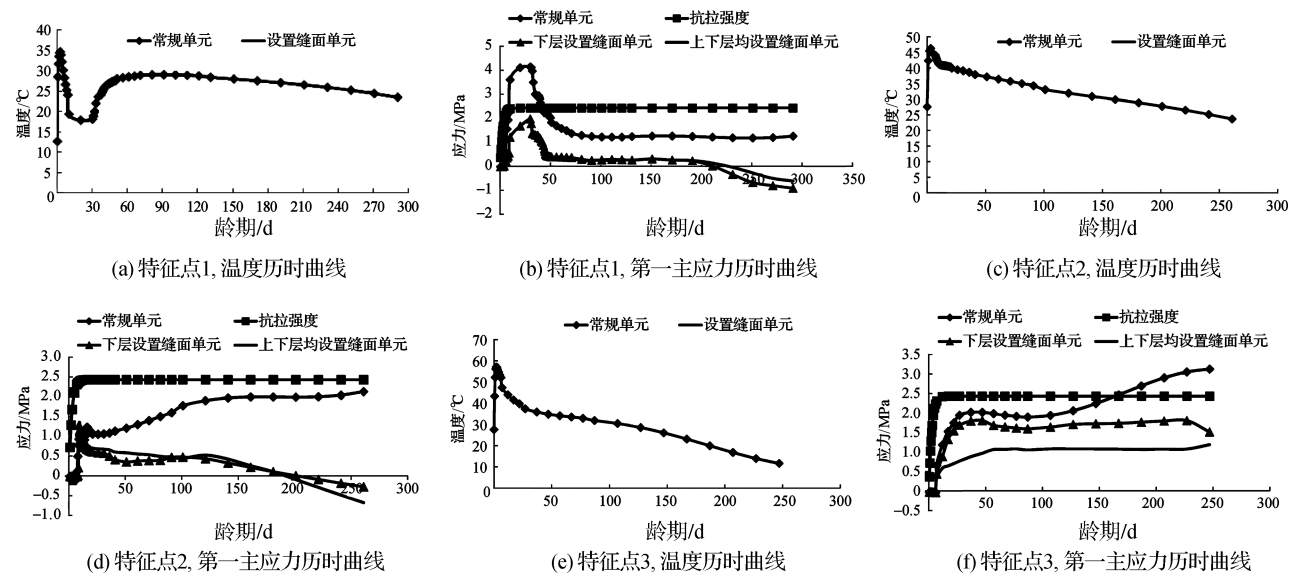


图7 3个特征点的温度历时曲线和第一主应力历时曲线

Fig. 7 Temperature curves and first principal stress curves of 3 feature points

综上所述:在3个不同计算工况中,特征点1,2,3的温度历时曲线完全相同,可见是否在混凝土胶结面设置缝面单元,对温度场没有影响;但当在浇筑块下部间歇面设置缝面单元时,或上下间歇面均设置缝面单元时,对比只设置常规单元的工况,由于上下层新老混凝土之间的约束明显减小,计算得到的特征点第一主应力都明显减小。

## 3 结语

(1) 通过设计新老混凝土缝面早龄期剪切强度试验,得到了缝面早龄期切向刚度随龄期变化的试验数据,并通过拟合得到切向刚度-龄期历时曲线,为缝面单元早龄期力学性能仿真计算提供了依据。

(2) 在浇筑块间歇面设置缝面单元,可以相对合理地模拟上下层新老混凝土约束效果,考虑缝面单元的

早龄期切向刚度发展曲线后,温控仿真计算得到的混凝土浇筑块内部拉应力值相对较小,在冬季浇筑块内部拉应力未超过抗拉强度,与工程现场冬季未出现内部深层裂缝相符。

## 参 考 文 献:

- [1] 田稳玲,赵志方,赵国藩,等.新老混凝土的粘结机理和测试方法研究综述[J].河北理工学院学报,1998,20(1):84-94. (TIAN Wenling, ZHAO Zhifang, ZHAO Guofan, et al. The research summarization on the mechanism of adherence of young concrete to the old and its test method[J]. Journal of Hebei Institute of Technology, 1998, 20(1): 84-94. (in Chinese))
- [2] 吴康振.新老混凝土粘结性能问题研究及有限元分析[D].成都:西华大学,2012. (WU Kangzhen. The reasearch of binding performance of new and old concrete and finite element analysis[D]. Chengdu: Xihua University, 2012. (in Chinese))
- [3] 孙林松,王德信,谢能刚.接触问题有限元分析方法综述[J].水利水电科技进展,2001,21(3):18-20,68-69. (SUN Linsong, WANG Dexin, XIE Nenggang. A survey of finite element analysis for contact problems[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2001, 21(3): 18-20, 68-69. (in Chinese))
- [4] 朱伯芳.大体积混凝土温度应力与温度控制[M].2版.北京:中国水利水电出版社,2012. (ZHU Bofang. Temperature stress and temperature control of mass concrete[M]. 2nd Ed. Beijing: China Water Power Press, 2012. (in Chinese))
- [5] 张子明,郑国芳,宋智通.基于等效时间的早期混凝土温度裂缝分析[J].水利水运工程学报,2004(01):41-44. (ZHANG Ziming, ZHENG Guofang, SONG Zhitong. Temperature crack analysis of early concrete based on equivalent time[J]. Hydro-Science and Engineering, 2004 (1): 41-44. (in Chinese))
- [6] 赵志方,周厚贵,刘健,等.新老混凝土粘结复合受力的强度特性[J].工业建筑,2002(10):37-39,62. (ZHAO Zhifang, ZHOU Hougui, LIU Jian, et al. Adhesive strength behavior of young on old concrete under biaxial stresses[J]. Industrial Construction, 2002(10): 37-39, 62. (in Chinese))
- [7] 袁群,刘健.新老混凝土粘结的剪切强度研究[J].建筑结构学报,2001,22(2):46-50. (YUAN Qun, LIU Jian. Study on adhesive shear strength of young on old concrete[J]. Journal of Building Structures, 2001, 22(2): 46-50. (in Chinese))
- [8] LI G Y, XIE H C, XIONG G J. Transition zone studies of new-to-old concrete with different binders[J]. Cement and Concrete Composites, 2001, 23(4/5): 381-387.
- [9] 胡智农,徐斌,张霞林,等.喷射硅粉混凝土(砂浆)在船闸修补中的应用[J].水利水运工程学报,2005(3):50-53. (HU Zhinong, XU Bin, ZHANG Xialin, et al. Application of shotcrete (mortar) in lock repair[J]. Hydro-Science and Engineering, 2005 (3): 50-53. (in Chinese))
- [10] DYBEL P, WALACH D. Evaluation of the development of bond strength between two concrete layers[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2017, 245(3). DOI:10.1088/1757-899X/245/3/032056
- [11] 王振领.新老混凝土粘结理论与试验及在桥梁加固工程中的应用研究[D].成都:西南交通大学,2007. (WANG Zhenling. Study on bond theory and test of new and old concrete and its application in bridge strengthening engineering[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2007. (in Chinese))
- [12] WANG X H, ZHANG Y, LUO J H. The experiment study on adherence capability between new and old concrete of pavement [J]. Advanced Materials Research, 2014, 853: 151-154.
- [13] 何伟.新老混凝土界面粘结强度的研究[D].长沙:湖南大学,2005. (HE Wei. The research on the interfacial bond strength of new-to-old concrete[D]. Changsha: Hunan University, 2005. (in Chinese))
- [14] 潘传银,石雪飞,周可攀.新、老混凝土粘结抗剪强度试验[J].交通科学与工程,2014,30(2):6-12. (PAN Chuanyin, SHI Xuefei, ZHOU Kepan. Study on shear strength of new and old concrete bonding interface[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2014, 30(2): 6-12. (in Chinese))
- [15] 赵联楨,杨平,刘成.混凝土早期力学性能试验研究[J].水利水运工程学报,2013(1):35-40. (ZHAO Lianzhen, YANG Ping, LIU Cheng. A study of concrete early mechanical properties[J]. Hydro-Science and Engineering, 2013(1): 35-40. (in Chinese))
- [16] 杨锐.水工大体积混凝土早龄期缝面强度问题研究[D].南京:河海大学,2016. (YANG Rui. Research on joint face strength problem of early-age mass concrete structures[D]. Nanjing: Hohai University, 2016. (in Chinese))
- [17] 强晟,杨锐,娄二召,等.一种获取混凝土间歇面早龄期剪切强度历时曲线的方法:CN201610346262.2[P].2016-05-

24. (QIANG Sheng, YANG Rui, LOU Erzhaoh, et al. A method to obtain the shear strength duration curve of the joint face of concrete at early age; CN201610346262.2[P]. 2016-05-24. (in Chinese))

- [18] 张南南. 混凝土结构施工期仿真计算中的小变形接触问题研究[D]. 南京: 河海大学, 2014. (ZHANG Nannan. Research on contact problem of small deformation for concrete structure in construction simulation [D]. Nanjing: Hohai University, 2014. (in Chinese))

## Development rule of tangential stiffness of new and old concrete joint faces at early age and its application in temperature control simulation

SONG Jiadong<sup>1</sup>, YANG Rui<sup>2</sup>, YANG Feng<sup>3</sup>, ZHANG Jingtao<sup>4</sup>, QIANG Sheng<sup>4</sup>, HUA Xia<sup>5</sup>

(1. *The First Hydraulic Engineering Bureau of Henan Province, Zhengzhou 450004, China*; 2. *China Power Northwest Engineering Coporation Limited, Xi'an 710065, China*; 3. *Chushandian Reservoir Construction Administration Bureau of Henan Province, Zhengzhou 450004, China*; 4. *College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China*; 5. *School of Mechanical Engineering, Purdue University, Indiana 47907, USA*)

**Abstract:** Due to the lack of research on the development rule of early age mechanical properties of new and old concrete joint faces, the strength of the joint face is generally considered to be the same as that of pouring blocks, which leads to large mutual restraint of new and old concrete on the intermittent surface, and further causes a relatively large stress calculation value in the pouring block. In this paper, an experiment is designed to test the early-age shear stiffness of new and old concrete joint faces, and the required parameter duration curve is obtained. Then the test results are applied to the simulation of temperature field and stress field during the construction period of the actual concrete dams. The results show that when the joint face elements considering the early age strength development are set on the intermittent surface, the constraint condition of new and old concrete joint faces can be reasonably simulated. The calculated tensile stress of the pouring block is relatively small, which is more in line with the actual phenomenon.

**Key words:** new and old concrete; tangential stiffness; shear test; early age; joint face element