

施工期混凝土力学性能的试验研究

董振平, 王 静, 胡晓鹏, 杨 兰

(西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 通过测试施工期混凝土材料的力学性能参数(立方体抗压强度、劈拉强度、轴心抗压强度、弹性模量、应力-应变本构关系曲线), 研究了混凝土力学性能随龄期的变化规律, 参照相关文献考虑龄期的影响建立了施工期混凝土各力学性能参数的计算模型. 研究表明: 随着龄期的不断增长, 混凝土立方体抗压强度、劈拉强度、轴心抗压强度、弹性模量、应力-应变曲线的峰值应力逐渐增大, 而应力-应变曲线的峰值应变逐渐减小; 前 7 d 混凝土各力学性能指标变化速度较快, 7 d 后变化速度逐渐变缓.

关键词: 混凝土; 施工期; 立方体抗压强度; 劈拉强度; 轴心抗压强度; 弹性模量; 应力-应变本构关系

中图分类号: TQ174.75

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2018)06-0788-05

Experimental study on mechanical properties of concrete during construction period

DONG Zhenping, WANG Jing, HU Xiaopeng, YANG Lan

(School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

Abstract: By testing concrete materials in the construction period, the mechanical properties such as cube compressive strength, splitting tensile strength, axial compressive strength, elastic modulus, stress-strain constitutive relation curve were obtained, the change laws of mechanical properties with age were studied. Reference to relevant research results, some calculation models of various mechanical properties with concrete age were established. The results show that with increase of concrete age, some mechanical properties including the cube compressive strength, the splitting tensile strength, the axial compressive strength, the elastic modulus, the peak stress of stress-strain constitutive relation curve increases gradually, but the peak strain of stress-strain constitutive relation curve decreases gradually. The change speed of the mechanical properties is fast in the first 7 days after concrete pouring, but the change speed gradually decreased after 7 days.

Key words: concrete; construction period; cubic compressive strength; splitting tensile strength; axial compressive strength; elastic modulus; stress-strain constitutive relation

在施工期内, 混凝土材料、施工期钢筋混凝土结构由于结构材料性能、荷载效应的时变性, 使得由钢筋混凝土结构构件和临时性支撑系统组成的在建结构具有较高的失效风险概率^[1]. 由于施工过程的复杂性、过程性, 施工期钢筋混凝土结构的材料强度、粘结性能、构件承载能力、节点约束、模板支撑体系、传力机制、内力分布均体现出明显的时变性及变异性. 其中, 混凝土材料随龄期的时变性是诸多时变因素中最重要的因素之一.

对于施工期混凝土材料力学性能的时变规律, 国内外学者进行了相关的试验研究并建立了相应的计算模型^[2-4]. Lew 和 Richard^[5] 研究了混凝土在较早龄期的抗压、劈拉强度和粘结强度, 获得了不同的温度和水泥水化程度下混凝土的抗压强度、劈拉强度和切线模量之间的关系. Smith 和 Donald M^[6] 对粉煤灰高性能混凝土的早龄期强度和弹性模量进行了相应的试验研究, 并得到了高性能混凝土早期强度和弹性模量的相关关系式. 文献[7]~[10]研究了各种混凝土(粉煤灰混凝土、

收稿日期: 2017-09-21 修改稿日期: 2018-11-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51308441, 51678473); 陕西省自然科学基金基础研究计划(2016JM5073); 陕西省教育厅专项科研项目(2013JK0951)

第一作者: 董振平(1970—), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究既有结构的评定与加固. E-mail: dongzp_02@163.com

通信作者: 胡晓鹏(1980—), 男, 博士, 副教授, 主要研究混凝土结构耐久性. E-mail: shs339@sina.com

掺合料混凝土、轻集料混凝土、商品混凝土等)在施工期内的立方体抗压强度、弹性模量、应力-应变本构关系的变化规律,建立了各力学性能的计算模型。但上述研究大多集中在施工期混凝土的立方体抗压强度、弹性模量,考虑龄期的立方体抗压强度和弹性模量计算模型相对较成熟;但施工期混凝土劈拉强度、轴心抗压强度、应力-应变本构关系方面的研究较少,目前尚缺乏可靠的计算模型,这给施工期结构安全控制、施工期结构可靠性分析造成了一定的难度。

本文通过测试施工期混凝土材料的力学性能参数(立方体抗压强度、劈拉强度、轴心抗压强度、弹性模量、应力-应变本构关系曲线),研究了混凝土力学性能随龄期的变化规律,参照相关文献考虑龄期的影响建立了施工期混凝土各力学性能参数的计算模型。本文的研究成果对于施工期安全控制、施工期混凝土结构可靠性分析具有重要的理论依据和工程应用价值。

1 试验概况

1.1 原材料

水泥为陕西秦岭水泥建材有限公司生产的普通硅酸盐水泥(P.O.42.5);细骨料为沔河河沙,细度模数为2.9,堆积密度为1450 kg/m³;粗骨料为粒径10~20 mm的碎石,压碎指标为12%,堆积密度为1400~1700 kg/m³;高效减水剂为聚羧酸减水剂,减水效果在20%左右,1 h内无塌落度损失,掺入量为胶凝材料质量的0.4%。

1.2 配合比

混凝土设计强度等级为C30,其配合比如表1所示。

表1 混凝土的配合比

Tab.1 Mix proportion of concrete				kg/m ³
水泥	砂	石	水	减水剂
346	692	1185	170	3.4

1.3 试件成型与养护

浇筑振捣成型好的试件在标准养护条件下养护至龄期1 d、3 d、5 d、7 d、14 d、28 d时,按《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T 50081-2002)的要求^[11]测试其立方体抗压强度、劈拉强度、轴心抗压强度、弹性模量、应力-应变本构关系曲线。混凝土立方体抗压强度、劈拉强度测试采用边长为100 mm的立方体试件,每组3

个,共计36个试件;应力-应变本构关系曲线测试采用100 mm×100 mm×300 mm的试件,每组6个,共计36个试件;弹性模量测试采用150 mm×150 mm×300 mm的试件,每组6个,共计36个试件。其中,取3个试件按照规范[11]要求测定混凝土的轴心抗压强度,另3个试件用于测定混凝土的弹性模量。各性能参数采用各试件测值的算术平均值,3个测值中的最大值或最小值中如有一个与中间值的差值超过中间值的15%时,则取中间值。

2 试验结果与分析

2.1 立方体抗压强度

图1给出了混凝土立方体抗压强度随龄期的变化曲线。从图1可以看出:混凝土立方体抗压强度随龄期不断增长;尤其是前7 d增长速率较快,1 d、3 d、5 d、7 d立方体抗压强度分别为28 d强度的24%、59%、74%、81%;7 d后立方体抗压强度随混凝土龄期的增长速度逐渐变缓,14 d的立方体抗压强度强度约为28 d天强度的98%。

美国ACI committee 209、Betonbau、程多松等提出了多种考虑龄期增长的立方体抗压强度计算模型^[10,12-15]。参照上述几种函数形式对本文的试验数据进行拟合分析,发现采用ACI经验公式拟合本文的试验结果具有较好的相关性(相关系数 $R^2=0.984$),其计算模型为:

$$f_{cu,t} = \frac{t}{2.541 + 0.873t} f_{cu,28} \quad (1)$$

式中, $f_{cu,t}$ 和 $f_{cu,28}$ 分别为龄期为 t 和28 d时的混凝土立方体抗压强度(MPa); t 为混凝土龄期(d)。

2.2 劈拉强度

图2给出了混凝土劈拉强度随龄期的变化曲线。从图2可以看出:混凝土劈拉强度随龄期不断增长,其增长速度快于立方体抗压强度;1 d、3 d、5 d、7 d立方体抗压强度分别为28 d强度的29%、68%、86%、94%;7 d后劈拉强度随混凝土龄期的增长速度缓慢,7 d至14 d劈拉强度增长了5%,而14 d至28 d劈拉强度仅增长了1%。

目前,尚没有考虑龄期变化的混凝土劈拉强度计算模型,考虑到混凝土劈拉强度随龄期变化趋势同立方体抗压强度相似,本文采用与立方体抗压强度相应的计算模型对图2的试验数据进行拟合分析,发现采用指数函数拟合本文的试验结果

具有较好的相关性(相关系数 $R^2=0.998$), 其计算模型为:

$$f_{ts,t} = f_{ts,28} (1 - e^{-0.374t}) \quad (2)$$

式中, $f_{ts,t}$ 和 $f_{ts,28}$ 分别为龄期为 t 和 28 d 时的混凝土劈拉强度(MPa).

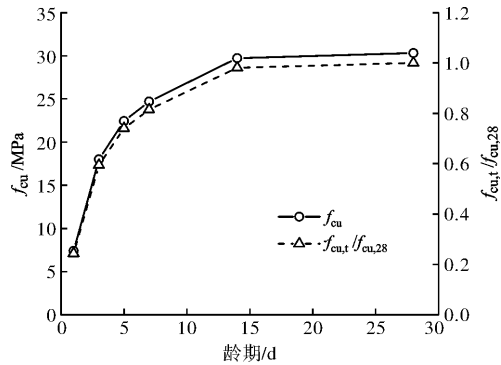


图1 施工期混凝土立方体抗压强度增长曲线

Fig. 1 Growth curves of cube compressive strength

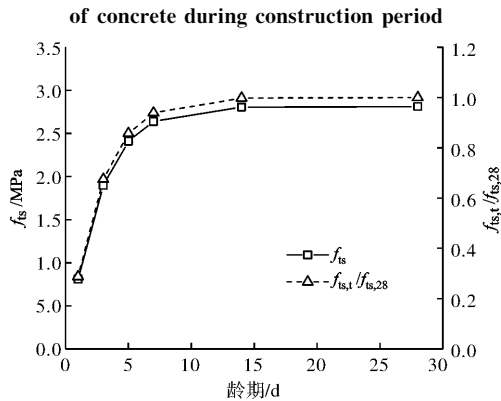


图2 施工期混凝土劈拉强度增长曲线

Fig. 2 Growth curves of splitting strength of concrete during construction period

2.3 轴心抗压强度

图3给出了混凝土轴心抗压强度随龄期的变化曲线. 从图3可以看出: 混凝土轴心抗压强度随龄期不断增长; 1 d、3 d、5 d、7 d、14 d 立方体抗压强度分别为 28 d 强度的 24%、69%、78%、82%、93%.

目前, 尚没有考虑龄期变化的轴心抗压强度计算模型, 考虑到混凝土轴心抗压强度随龄期变化趋势同立方体抗压强度相似, 本文采用与立方体抗压强度相应的计算模型对图3的试验数据进行拟合分析, 发现采用指数函数拟合本文的试验结果具有较好的相关性(相关系数 $R^2=0.985$), 其计算模型为

$$f_{c,t} = f_{c,28} (1 - e^{-1.428t}) \quad (3)$$

式中, $f_{c,t}$ 和 $f_{c,28}$ 分别为龄期为 t 和 28 d 时的混凝土

轴心抗压强度(MPa).

2.4 弹性模量

图4给出了混凝土弹性模量随龄期的变化曲线. 从图4可以看出: 相比于立方体抗压强度、劈拉强度、轴心抗压强度, 1 d 内混凝土弹性模量增长幅度较大, 1 d 弹性模量达到 28 d 的 55%; 1 d 后弹性模量增长速度变缓, 3 d、5 d、7 d、14 d 弹性模量分别为 28 d 的 81%、87%、91%、97%.

通过实验研究和理论分析国内外学者研究了混凝土弹性模量随龄期的变化规律并建立了相应的计算模型, 计算模型大致有 ACI 建议公式^[12]和简化指数拟合法^[16-17]两种. 对图4的试验数据进行拟合分析, 发现采用 ACI 建议公式拟合本文的试验结果具有较好的相关性(相关系数 $R^2=0.993$), 其计算模型为

$$E_{c,t} = E_{c,28} \sqrt{\frac{t}{2.128 + 0.906t}} \quad (4)$$

式中, $E_{c,t}$ 和 $E_{c,28}$ 分别为龄期为 t 和 28 d 时的混凝土弹性模量(MPa).

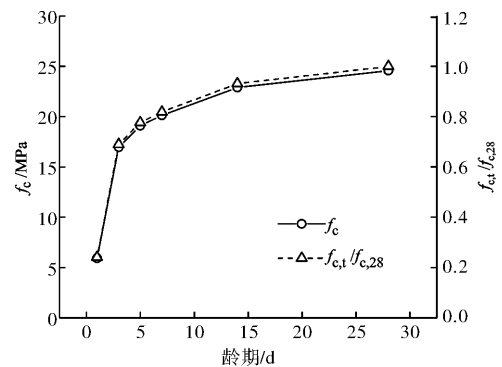


图3 施工期混凝土轴心抗压强度增长曲线

Fig. 3 Growth curves of axial compressive strength of concrete during construction period

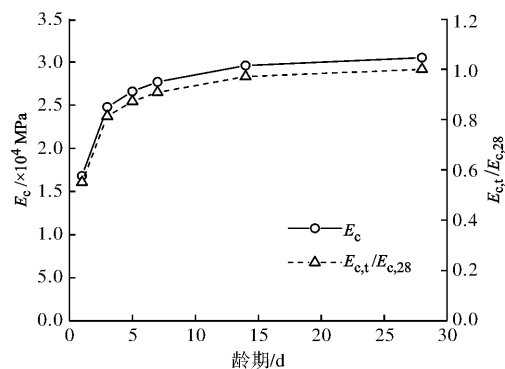


图4 施工期混凝土弹性模量增长曲线

Fig. 4 Growth curves of elastic modulus of concrete during construction period

2.5 应力-应变本构关系

图5给出了不同龄期的混凝土应力-应变本构关系曲线。从图中可以看出:随着龄期的增长,本构关系曲线的上升段越来越陡(可用初始切线模量来表征),峰值应力逐渐增大而峰值应变逐渐减小。具体来说,1 d、3 d、5 d、7 d、14 d、28 d龄期混凝土的本构关系曲线初始弹性模量平均值分别为 0.53×10^4 MPa、 0.86×10^4 MPa、 1.84×10^4 MPa、 2.47×10^4 MPa、 2.71×10^4 MPa。1 d、3 d、5 d、7 d、14 d、28 d混凝土的平均峰值应力分别为5.59 MPa、15.56 MPa、16.77 MPa、17.21 MPa、19.20 MPa、19.25 MPa;而对应的平均峰值应变分别为 7.66×10^{-3} 、 2.09×10^{-3} 、 1.60×10^{-3} 、 1.19×10^{-3} 、 1.18×10^{-3} 、 1.17×10^{-3} 。

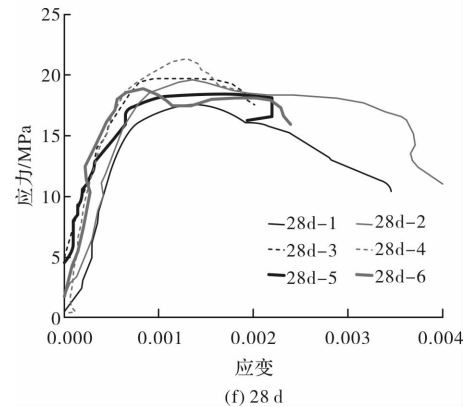
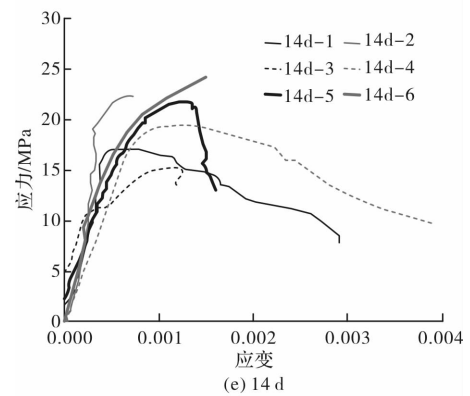
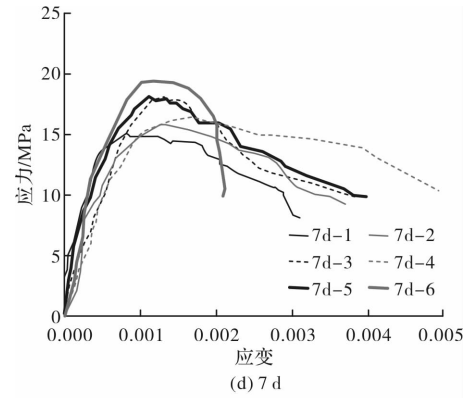
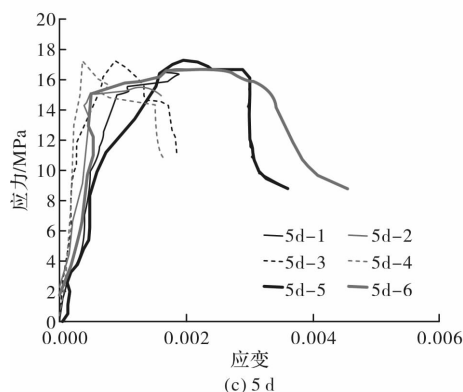
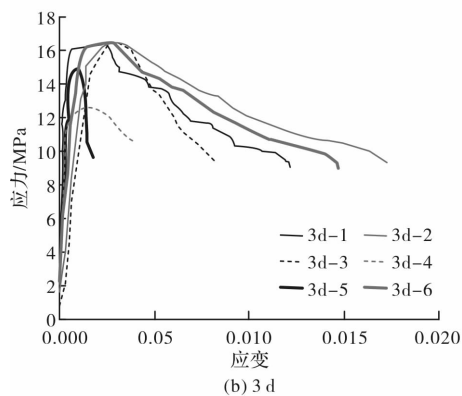
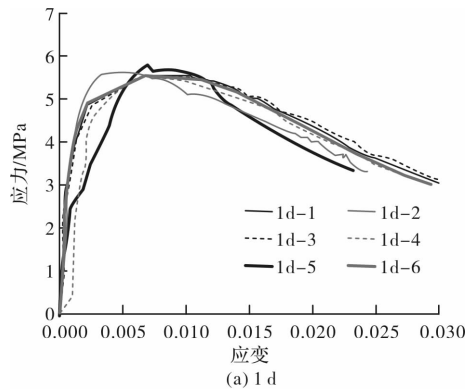


图5 施工期混凝土的应力-应变本构关系曲线

Fig. 5 Stress-strain constitutive relation curves of concrete during construction period

对于混凝土的应力-应变本构关系曲线,国内外学者提出了多项式、指数式、三角函数和有理分式等多种数学函数形式^[18-20]。本次利用《混凝土结构设计规范》(GB50010-2015)的建议公式^[21]对试验结果进行拟合分析,其数学函数形式见式(5),拟合结果见表2。

$$\begin{cases} y = \alpha_a x + (3 - 2\alpha_a)x^2 + (\alpha_a - 2)x^3, & x \leq 1 \\ y = \frac{x}{\alpha_d(x-1)^2 + x}, & x > 1 \end{cases} \quad (5)$$

式中, $x = \epsilon/\epsilon_p$; $y = \sigma/f_c$; ϵ_p 为峰值应变; f_c 为峰值应力; α_a 、 α_d 为待定常数。

表2 施工期混凝土应力-应变本构关系曲线拟合结果

Tab. 2 Fitting results of the stress-strain constitutive relation curves of concrete during construction period

龄期	曲线上升段		曲线下降段	
	α_a	相关系数 R^2	α_d	相关系数 R^2
1d	2.35	0.844 0	0.41	0.977 4
3d	2.71	0.946 6	0.21	0.894 6
5d	2.61	0.965 3	0.73	0.955 5
7d	2.52	0.974 6	0.49	0.860 9
14d	2.09	0.975 3	0.62	0.960 3
28d	2.43	0.913 6	0.14	0.690 9

3 结论

(1)随着龄期的不断增长,混凝土立方体抗压强度、劈拉强度、轴心抗压强度、弹性模量、应力-应变曲线的峰值应力逐渐增大,而应力-应变曲线的峰值应变逐渐减小;前7 d混凝土力学性能指标变化速度较快,7 d后变化速度逐渐变缓。

(2)根据试验结果,参照相关研究成果,考虑混凝土龄期建立了立方体抗压强度、劈拉强度、轴心抗压强度、弹性模量、应力-应变本构关系的计算模型。

参考文献 References

- [1] 赵国藩. 工程结构生命全过程可靠度[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2004.
ZHAO Guofan. Life-cycle reliability degree in engineering structures [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2004.
- [2] 王甲春, 阎培渝. 基于等效龄期的粉煤灰混凝土抗压强度计算模型[J]. 中山大学学报. 2014, 53(4): 83-87.
WANG Jiachun, YAN Peiyu. Computational model of fly ash concrete compressive strength based on the equivalent age[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni. 2014, 53(4): 83-87.
- [3] ONER A, AKYUZ S, YILDIZ R. An experimental study on strength development of concrete containing fly ash and optimum usage of fly ash in concrete[J]. Cement & Concrete Research, 2005, 35(6): 1165-1171.
- [4] YOSHITAKE I, ZHANG W, MIMURA Y, et al. Uniaxial tensile strength and tensile Young's modulus of fly-ash concrete at early age[J]. Construction & Building Materials, 2013, 40(40):514-521.
- [5] LEW H S, REICHARD T W. Mechanical properties of concrete at early ages [J]. Journal of the American Concrete Institute, 1978, 75(10):533-542.
- [6] HAMMONS M I, SMITH D M. Early-time strength and elastic modulus of concrete with high proportions of fly ash[C]// Serviceability and Durability of Construction Materials. ASCE, 2015.
- [7] 胡晓鹏, 牛荻涛, 张永利. 粉煤灰混凝土早期强度的现场调查与试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2012, 40(6): 676-680.
HU Xiaopeng, NIU Ditao, ZHANG Yongli. Field investigation and experimental research on early-stage strength of fly ash concrete [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2012, 40(6): 676-680.
- [8] 马智英. 钢纤维混凝土早期力学性能发展规律的试验研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2003.
MA Zhiying. An experimental study on the properties of steel fiber reinforced concrete at early ages [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2003.
- [9] 罗才毅. 不同掺合料混凝土早期力学性能试验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2002.
LUO Caiyi. Test research on mechanical properties of young concrete of different mineral admixtures [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2002.
- [10] 程多松, 尚建丽, 孙立春, 等. 轻集料混凝土早期强度预测的试验研究[J]. 混凝土, 2007(1): 32-33.
CHENG Duosong, SHANG Jianli, SUN Lichun, et al. Experimental study on forecasting early strength of light aggregate concrete [J]. Concrete, 2007(1): 32-33.
- [11] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 普通混凝土力学性能试验方法标准: GB/T 50081-2002 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
Ministry of Housing and Urban-rural Development of the People's Republic of China. Standard for test

- method of mechanical properties on ordinary concrete; GB/T 50081-2002 [S]. Beijing: China Architecture & Building press, 2003.
- [12] ACI Committee 209. Prediction of creep, shrinkage, and temperature effects in concrete structures (209R-92). America Concrete Institute, 1992.
- [13] BETONBAU. Fib model code for concrete structures [J]. Ernst & Sohn, 2013.
- [14] 王梦梦. C40 早龄期混凝土力学性能试验研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2014.
WANG Mengmeng. Experimental study on mechanical behavior of C40 concrete at early age [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014.
- [15] 张健仁, 王海臣, 杨伟军. 混凝土早期抗压强度和弹性模量的试验研究[J]. 中外公路, 2003, 23(3): 89-92.
ZHANG Jianren, WANG Haicheng, YANG Weijun. Experimental study on compressive strength and elastic modulus of early age concrete[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2003, 23(3): 89-92.
- [16] 朱伯芳. 混凝土的弹性模量、徐变度与应力松弛系数[J]. 水利学报, 1985(9):56-63.
ZHU Bofang. Elastic modulus, creep and stress relaxation coefficient of concrete[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1985(9):56-63.
- [17] 林星平. 混凝土弹性模量及徐变度的计算[J]. 云南水利发电, 1999(4): 15-18.
LIN Xingping. Calculation of elastic modulus and creep of concrete [J]. Yunnan Water Power. 1999(4): 15-18.
- [18] HOGHESTAD E. Concrete stress distribution in ultimate strength design [J]. ACI, 1955(12): 455-479.
- [19] KENT D C, PARK R. Flexural members with confined concrete [J]. ASCE, 1971 (97): 1969-1990.
- [20] PARK R, PAULAY T. Reinforced concrete structure [M]. New York: John Wiley & Sons, 1975.
- [21] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范: GB50010-2015[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
Ministry of Housing and Urban-rural Development of the People's Republic of China. Code for design of concrete structures: GB/T 50010-2015 [S]. Beijing: China Architecture & Building press, 2015.

(编辑 吴海西)

(上接第 782 页)

- [10] 张素磊, 张顶立, 刘胜春, 等. 基于对应分析模型的隧道衬砌病害主成因挖掘[J]. 中国铁道科学, 2012, 33(2):56-60.
ZHANG Sulei, ZHANG Dingli, LIU Shengchun, et al. Discovering the main causes of tunnel lining damage based on correspondence analysis model[J]. China railway science, 2012, 33(2):56-60.
- [11] 王文广, 代高飞, 朱合华, 等. 某公路隧道病害成因与治理[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2005, 28(12):101-103.
WANG Wenguang, DAI Gaifei, ZHU Hehua, et al. Reasons of tunnel disease and disease management on highway [J]. Journal of Chongqing University (Natural Science Edition) 2005, 28(12):101-103.
- [12] 吴梦军, 张永兴, 刘新荣. 公路隧道病害处治技术研究[J]. 地下空间与工程学报, 2007, 3(5):967-971.
WU Mengjun, ZHANG Yongxing, LIU Xingrong. Research on disease treatment technology of highway tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007, 3(5):967-971.
- [13] 张云龙, 夏才初, 张国柱, 等. 基于虚拟现实的公路隧道病害可视化管理系统[J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(s1):1740-1745.
ZHANG Yunlong, XIA Caichu, ZHANG Guozhu, et al. Visual road tunnel damage management system based on virtual reality[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014, 10(s1): 1740-1745.

(编辑 吴海西)