

文章编号:1001-4888(2020)01-0144-07

混凝土应力损伤评价指标的敏感性分析^{*}

胡晓鹏, 王博, 彭刚, 潘保学

(西安建筑科技大学 土木工程学院, 西安 710055)

摘要:测试了不同预损伤程度下混凝土的立方体抗压强度、劈拉强度、弹性模量、超声波速、吸水率,对比了各评价指标的敏感性,优选出实际工程应用方便、物理力学概念清楚、可敏感反映整个损伤阈值的混凝土应力损伤评价指标。研究表明:应优先选择弹性模量作为混凝土应力损伤的评价指标;当试验条件和试验时间允许时,可选择吸水率作为混凝土应力损伤的评价指标,但应适当增加吸水时间的测点,以提高测试数据的可靠性;当受工程现场或试验条件限制,只能采用无损检测时,可将超声波速作为应力损伤评价指标,但需结合弹性模量或吸水率使用,不宜单独用于混凝土应力损伤的评定。

关键词:混凝土应力损伤;评价指标;敏感性;立方体抗压强度;劈拉强度;弹性模量;超声波速;吸水率

中图分类号: TU528

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-18-157

0 引言

由于自身的结构特征,加载前混凝土的内部或表面已分布着微小的缺陷,遭受荷载作用后内部微裂纹会不断地延伸扩展,随着荷载的增加,裂缝扩展速度加快直至各裂缝贯通而导致混凝土结构破坏,这个过程称为混凝土损伤演化过程^[1]。混凝土因为其所处的环境因素或所承受的荷载机制作用,混凝土结构经常在损伤的状态下工作,这些损伤不仅影响混凝土结构的力学性能,也影响材料本身对劣化环境的抵制能力。

材料的内部损伤可理解为一种连续的场变量,而描述其损伤状态的场变量称为损伤变量^[2]。损伤变量分为宏观损伤指标和微观损伤指标两种,一般来说损伤变量的选择并不简单,或用物理微结构分析,或结合试验结果来选择。对于混凝土的宏观损伤指标,工程常选用抗压强度来描述,而学者常选用弹性模量来描述^[3,4]。为了更好地描述混凝土的损伤演化过程,超声检测、成像技术、频谱分析技术、神经网络技术、雷达技术、红外遥测技术、冲击回波技术、红外热像无损检测技术等新技术被广泛关注并使用^[5-8],但微观损伤指标的测试在实际工程中具有相当的难度,且其测试结果大多依赖于成像技术,测试及图像处理的可靠性较低。另外,混凝土损伤状态可分为微损伤、轻度损伤、中度损伤和重度损伤,目前的损伤指标大多在中度损伤以上比较敏感,但不能较敏感地反映混凝土的微损伤和轻度损伤。基于此,本文选取抗压强度、劈拉强度、弹性模量、超声波速、吸水率这几个物理力学指标,通过对比不同损伤阈值下各损伤指标的敏感性,优选出实际工程应用方便、物理力学概念清楚、可敏感反映整个损伤阈值的损伤评价指标,研究结果对于准确评价混凝土的内部损伤、保证混凝土结构的安全使用具有理论意义和工程应用价值。

^{*} 收稿日期: 2018-06-29; 修回日期: 2018-09-17

基金项目: 国家自然科学基金(51308441, 51678473, 51590914); 教育部“长江学者和创新团队发展计划”创新团队(IRT_17R84)

通讯作者: 胡晓鹏(1980—),男,博士,副教授。主要研究领域:工程结构可靠性与耐久性。Email: shs339@sina.com

1 实验

1.1 原料

水泥为普通硅酸盐 P. O42.5 水泥,其物理及力学性能指标见表 1;细骨料为沅河河沙,细度模数为 2.9,堆积密度为 $1450\text{kg}/\text{m}^3$;粗骨料为粒径为 $5\sim 31.5\text{mm}$ 的碎石,堆积密度为 $1400\sim 1700\text{kg}/\text{m}^3$;高效减水剂为 PCA®-I 聚羧酸高性能减水剂,减水效果在 20%左右,1h 内无塌落度损失,掺入量为胶凝材料质量的 0.8%。

混凝土的配合比见表 2,混凝土的坍落度为 65mm。

表 1 水泥的物理力学性能
Tab. 1 Physical and mechanical properties of cement

类型	细度模数 /%	初、终凝时间/min		弯拉强度 /MPa		抗压强度 /MPa	
		初凝	终凝	3d	28d	3d	28d
P. O42.5	0.6	90	360	6.7	9.1	30.9	49.8

表 2 混凝土的配合比
Tab. 2 Mix proportions of concrete

混凝土设计 强度等级	各物质含量/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)				
	水泥	砂	粗骨料	水	减水剂
C35	370.8	658.4	1222.8	178	2.97

1.2 试件养护与预损伤

将浇筑振捣成型好的混凝土试件在标准养护条件下养护至 28d 取出,待试件干燥后测试基准组混凝土的立方体抗压强度、轴心抗压强度,立方体抗压强度测试采用边长 100mm 的立方体试件,轴心抗压强度检测采用 $100\text{mm}\times 100\text{mm}\times 300\text{mm}$ 的棱柱体试件。

对其余的混凝土立方体试件分别预压 15%、30%、45%、60%、75% 的立方体抗压强度,对其余的棱柱体试件分别预压 15%、30%、45%、60%、75% 的轴心抗压强度,形成不同程度的混凝土内部预损伤。每种工况含 3 个试件,各性能参数采用 3 个试件实测值的算术平均值,3 个测值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^[9]。

1.3 损伤混凝土性能测试

依据《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2002),测试不同程度预损伤混凝土试件的立方体抗压强度、劈拉强度、弹性模量^[9]。参照文献[10]的技术要求,使用超声波检测仪测试预损伤混凝土试件的超声波速。

目前检测混凝土内部损伤的方法较少,吸水性可一定程度上反映混凝土的内部损伤^[11,12]。本文参照 ASTM C1585 的规定^[13],按以下步骤测试混凝土的吸水率:

(1) 对预损伤的棱柱体试件按图 1 进行分割(图中点线为切割时的位置示意),即用切割机首先在棱柱体试块($100\text{mm}\times 100\text{mm}\times 300\text{mm}$)中部切取尺寸 $100\text{mm}\times 100\text{mm}\times 100\text{mm}$ 的方块,然后再分别切掉其两侧 25mm,形成 $100\text{mm}\times 100\text{mm}\times 50\text{mm}$ 的薄片。

(2) 预处理。将试件放入 50℃ 烘箱中烘干,自然冷却至室温后称重;在水中浸泡直至试件完全饱和后称重,计算试件饱水量。之后将试件放入 50℃ 烘箱中,每天测量其重量,计算失水量;待失水量在

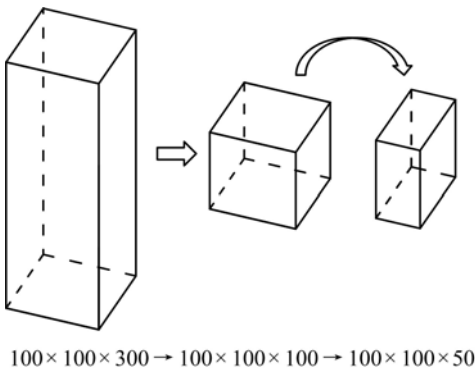


图 1 混凝土试件的切取示意图(单位:mm)
Fig. 1 Schematic representation of cutting specimens (unit: mm)

50% 饱水量左右时,采用保鲜袋将试件双层密封并置于 23℃ 养护室中养护 30d,使混凝土内部水分重新趋于平衡。

打开密封塑料袋,立即用铝箔胶带粘贴于上下表面,防止在接下来的预处理过程中试件内部水分散失,同时用树脂涂于试件侧面,以确保混凝土的毛细吸收过程为一维吸收。

树脂干燥后,撕去上下表面的铝箔胶带,用塑料薄膜覆盖试件上表面,在维持试件内部孔隙压力恒定的情况下防止测试过程中水分从试件上表面蒸发。

(3) 将试件称重,精确至 0.01g;测量试块吸水面的尺寸,精确至 0.1mm。

(4) 在水槽底部放置支撑试件的玻璃棒,将试件平稳放入玻璃棒上面,并慢慢向水槽中注入去离子水,直到液面高出混凝土底面 2 ± 1 mm,试验测试示意图如图 2 所示。水分依靠混凝土的毛细管吸收作用,逐渐侵入混凝土内部。

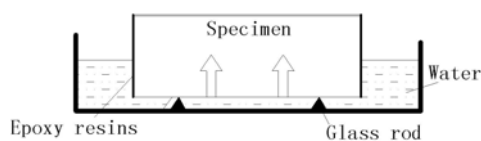


图 2 试件吸水试验示意图

Fig. 2 Schematic representation of water absorption test

(5) 在不同吸收时间(1min、5min、15min、30min、1h、2h、4h、6h、8h、1d、2d、3d、7d),取出试块擦拭表面水分后称重,精确至 0.01g。

(6) 根据测定的试件重量变化,用公式(1)计算吸水率:

$$S = \frac{i}{\sqrt{t}} \quad (1)$$

式中, S 为吸水率, $\text{mm}/\text{s}^{0.5}$; t 为试件毛细水吸收时间, s ; i 为试件单位横截面面积上的累计吸水量,即吸水体积与吸水表面积的值, mm^3/mm^2 。

2 试验结果

2.1 混凝土强度

图 3 给出了不同预损伤混凝土立方体抗压强度和劈拉强度的测试结果。由图可以看出:

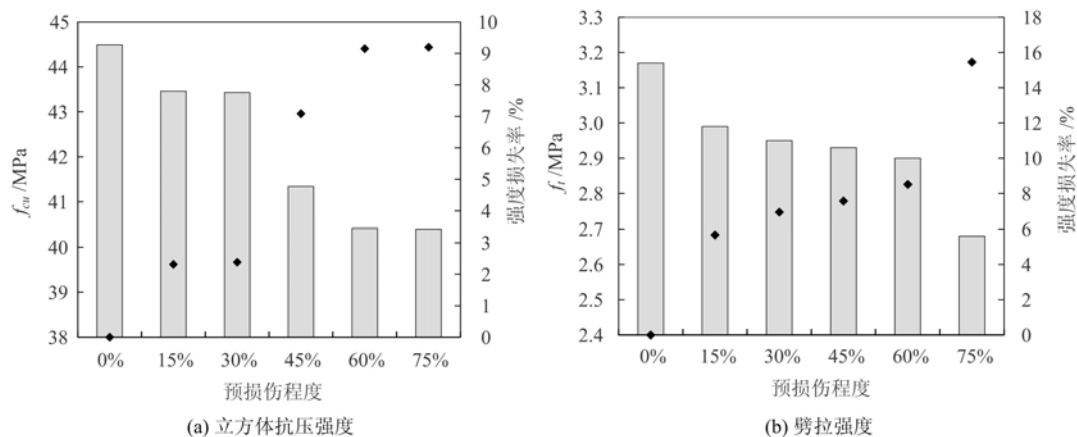


图 3 混凝土强度测试结果

Fig. 3 Test results of concrete strength

(1) 与未损伤混凝土的立方体抗压强度、劈拉强度相比,预损伤程度 15%、30%、45%、60%、75% 的混凝土立方体抗压强度分别损失了 2.31%、2.38%、7.08%、9.15%、9.19%,劈拉强度分别损失了 5.68%、6.94%、7.57%、8.52%、15.46%。

(2) 预损伤程度越大,混凝土立方体抗压强度、劈拉强度的强度损失越明显,但强度损失与预损伤程度不成线性变化。

(3) 预损伤程度从 15% 增大至 30%、60% 增大至 75% 时,立方体抗压强度的强度损失变化幅度很小,变化幅度在 0.1% 以内;预损伤程度从 15% 增大至 60%,劈拉强度的强度损失变化幅度较小,变化了 2.84%。

2.2 弹性模量

图4给出了不同预损伤混凝土弹性模量的测试结果。由图可以看出:

(1) 与未损伤混凝土的弹性模量相比,预损伤程度15%、30%、45%、60%、75%的混凝土弹性模量分别减小了8.21%、14.30%、18.55%、23.48%、26.53%。

(2) 预损伤程度越大,混凝土的弹性模量损失越明显。

(3) 从未损伤至预损伤程度75%,各预损伤程度下混凝土的弹性模量损失相对均匀。

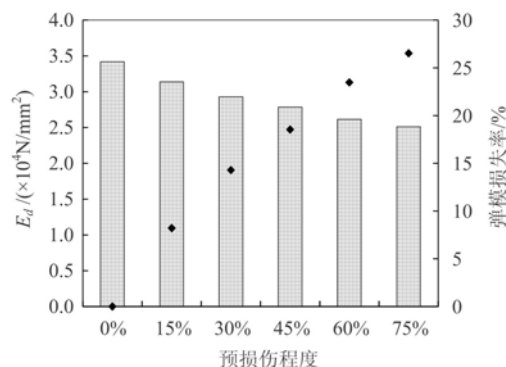


图4 混凝土弹性模量测试结果

Fig. 4 Test results of elastic modulus

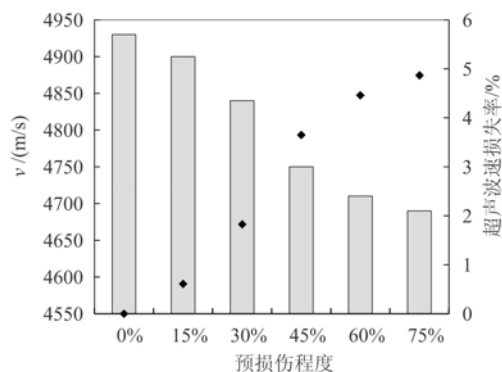


图5 混凝土超声波速测试结果

Fig. 5 Test results of ultrasonic velocity

2.3 超声波速

图5给出了不同预损伤混凝土超声波速的测试结果。由图可以看出:

(1) 与未损伤混凝土的超声波速相比,预损伤程度15%、30%、45%、60%、75%的混凝土超声波速分别减小了0.61%、1.83%、3.65%、4.46%、4.87%。

(2) 预损伤程度越大,混凝土的超声波速减小越明显。

(3) 从未损伤至预损伤程度75%,各预损伤程度下混凝土的超声波速减小程度相对均匀。

2.4 吸水性

图6给出了不同预损伤混凝土吸水性的测试结果,包括累计吸水量的变化曲线、吸水率的变化曲线。图中各吸收时间下混凝土累计吸水量、吸水率波动较大,但大致规律清楚,从图中可以看出:

(1) 预损伤程度越大,各吸收时间下混凝土累计吸水量越大,吸水率也越大。与未损伤混凝土的累计吸水量相比,各吸收时间下预损伤程度15%、30%、45%、60%、75%的混凝土累计吸水量增加了1.99%~12.6%(均值5.46%)、2.01%~24.61%(均值12.41%)、2.06%~32.37%(均值20.66%)、2.09%~43.13%(均值27.64%)、29.35%~85.71%(均值43.79%)。说明应力损伤下混凝土内部的微裂缝、宏观裂缝为水分传输提供了通道,混凝土更易吸水。

(2) 30min内不同损伤程度的混凝土迅速吸水,吸水率随吸水时间呈线性增长;这个阶段水分在混凝土中的传输机理主要体现为试块表面毛细孔的迅速饱和填充,表面的微裂缝会一定程度加速水分的传输^[13,14]。吸水时间从30min延续至8h,混凝土试块表面毛细孔饱和后,混凝土的吸水率变化较小;这个阶段水分在混凝土中的传输机理主要体现为长期毛细作用下混凝土非贯通气孔的缓慢填充、沿混凝土内部微裂缝的传输^[14,15]。吸水时间延续至8h后,混凝土的吸水率减小、或轻微增大;这个阶段水分在混凝土中的传输机理主要体现为水分沿混凝土内部微裂缝的传输,长期毛细作用下非贯通气孔的缓慢填充速度减慢。

3 损伤评价指标的敏感性对比分析

图7给出了不同预损伤混凝土各评价指标 S_d/S 的对比结果,图中 S_d 为预损伤后混凝土评价指标的测试结果, S 为未损伤混凝土评价指标的测试结果。从图中可以看出:

(1) 各损伤梯度下混凝土的吸水性变化幅度较大,各损伤梯度均表现出相当的敏感性,变化规律较

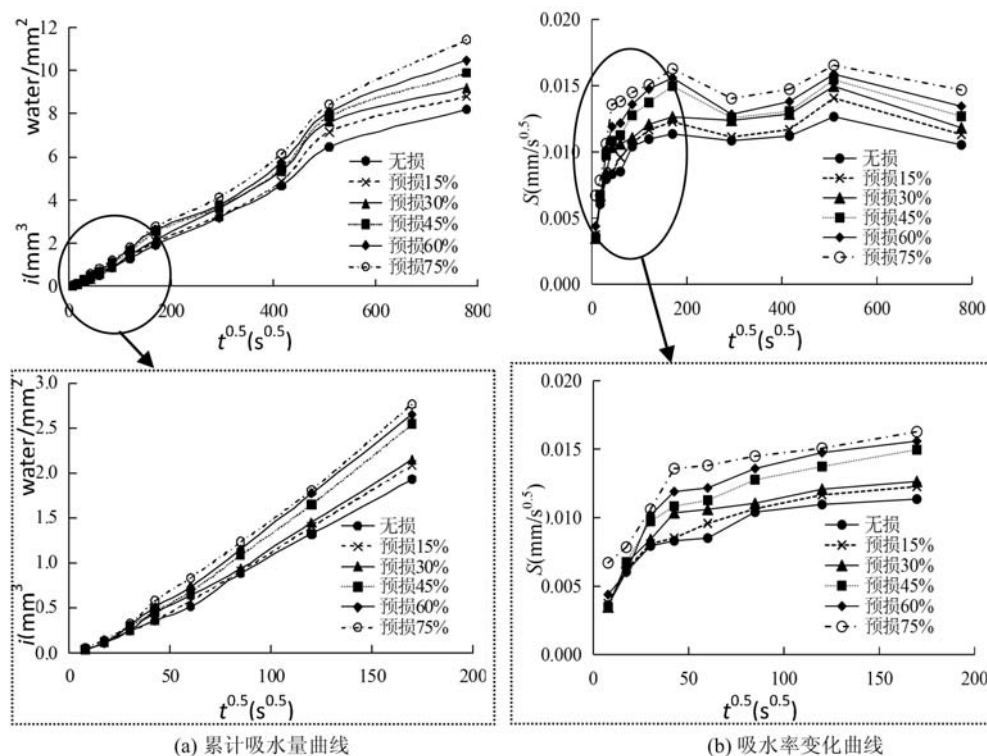


图 6 混凝土吸水性测试结果

Fig. 6 Test results of water absorability

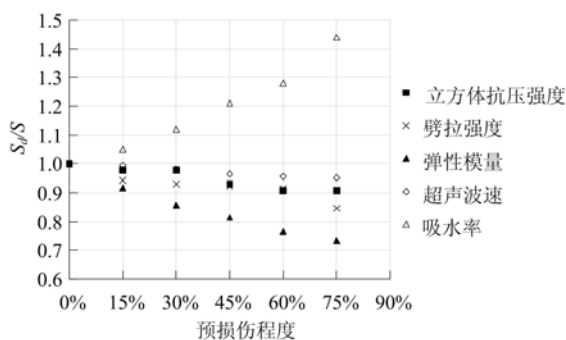


图 7 损伤评价指标的对比结果

Fig. 7 Comparison result of damage evaluation index

稳定。考虑到混凝土吸水率的波动性,实际工程中可通过小直径取样的方法减少对实际结构的破坏,通过增加样本数量、增加样本吸水时间测点等方法提高测试的准确性,以客观反映混凝土的内部应力损伤状态。

(2) 常规指标中,各损伤梯度下混凝土的弹性模量变化幅度较大,各损伤梯度均表现出明显的敏感性,变化规律较稳定。但弹性模量试件相对较大,取样对实际结构造成的损伤偏大。

(3) 各损伤梯度下混凝土的立方体抗压强度、劈拉强度变化幅度较小,不同损伤梯度下的变化规律不稳定。

(4) 各损伤梯度下混凝土的超声波速变化幅度较小,不同损伤梯度下的变化规律较稳定。

通过对比,建议优先选择弹性模量作为混凝土损伤的评价指标。试验条件和试验时间允许时,可选择吸水率作为混凝土损伤的评价指标。考虑到超声波速测试过程的无损伤、测试结果较稳定的特点,可将超声波速作为备选指标,但需结合弹性模量或吸水率使用,不宜单独用于混凝土应力损伤的评定。

4 结论

(1) 预损伤程度越大,混凝土立方体抗压强度、劈拉强度、弹性模量、超声波速的损失越明显,各吸收时间下混凝土累计吸水量、吸水率越大。

(2) 混凝土立方体抗压强度、劈拉强度的损失与预损伤程度不成线性变化,各预损伤程度下混凝土的弹性模量、超声波速损失相对均匀,各吸收时间下混凝土累计吸水量、吸水率波动较大。

(3) 建议优先选择弹性模量作为混凝土损伤的评价指标。试验条件和试验时间允许时,可选择吸

水率作为混凝土损伤的评价指标,但应适当增加吸水时间的测点,统计分析后用于反映混凝土的内部损伤状态。当受工程现场或试验条件限制,只能采用无损检测时,可将超声波速作为备选指标,但需结合弹性模量或吸水率使用,不宜单独用于混凝土应力损伤的评定。

本文通过试验研究对比优选了混凝土的应力损伤评价指标,优选出的评价指标实际工程应用方便、物理力学概念清楚、整个梯度敏感性良好。但不同强度等级的混凝土各评价指标的损伤程度存在一定差异,尚需开展进一步的研究。

参考文献:

- [1] 杨光松. 损伤力学与复合材料损伤[M]. 北京:国防工业出版社, 1995:6—12 (YANG Guangsong. Damage mechanics and damage of composite materials[M]. Beijing: National Defend Industry Press, 1995:6—12 (in Chinese))
- [2] 邓爱民. 混凝土损伤行为特性研究[D]. 南京:河海大学, 2001:8—9 (DENG Aimin. Study on behavior characteristics of concrete damage[D]. Nanjing: Hohai University, 2001(in Chinese))
- [3] 封伯昊, 张立翔, 李桂青. 混凝土损伤研究综述[J]. 昆明理工大学学报, 2001, 26(3):21—30 (FENG Bohao, ZHANG Lixiang, LI Guiqing. A summary of research on damage of concrete[J]. Kunming University of Science and Technology, 2001, 26(3):21—30 (in Chinese))
- [4] 高路彬. 混凝土变形与损伤的分析[J]. 力学进展, 1993, 23(4):510—519 (GAO Lubin. Analysis of deformation and damage for concrete[J]. Advance in Mechanics, 1993, 23(4):510—519 (in Chinese))
- [5] 纪洪广, 张天森, 蔡美峰, 等. 混凝土材料损伤的声发射动态检测试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(2):165—168 (JI Hongguang, ZHANG Tiansen, CAI Meifeng, et al. Experimental study on concrete damage by dynamic measurement of acoustic emission[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(2):165—168(in Chinese))
- [6] 赵国旗, 虞波, 骆英, 等. 与 CRP 相结合的 SAFT 在混凝土损伤检测成像中的研究[J]. 实验力学, 2015, 30(6):717—722 (ZHAO Guoqi, YU Bo, LUO Ying, et al. On the imaging method in concrete damage detection based on the combination of SAFT with CRP signal superposition method[J]. Journal of experimental mechanics, 2015, 30(6):717—722 (in Chinese))
- [7] 田威, 党发宁, 陈厚群. 单轴压缩条件下混凝土细观损伤演化机理的 CT 试验研究[J]. 实验力学, 2011, 26(1):54—60 (TIAN Wei, DANG Fanning, CHEN Houqun. Experimental study of concrete meso-damage evolution mechanism based on uniaxial compression CT method[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2011, 26(1):54—60(in Chinese))
- [8] 朱宏平, 徐文胜, 陈晓强, 等. 利用声发射信号与速率过程理论对混凝土损伤进行定量评估[J]. 工程力学, 2008, 25(1):186—191 (ZHU Hongping, XU Wensheng, CHEN Xiaoqiang, et al. Quantitative concrete-damage evaluation by acoustic emission information and rate-process theory[J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(1):186—191 (in Chinese))
- [9] GB/T 50081—2002, 普通混凝土力学性能试验方法标准[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2002 (GB/T 50081—2002, Standard for test method of mechanical properties on ordinary concrete[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2002 (in Chinese))
- [10] 国家建筑工程质量监督检验中心. 混凝土无损检测技术[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 1996:34—37 (National Center for Quality Supervision and Test of Building Engineering. Nondestructive testing technology for concrete[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1996:34—37 (in Chinese))
- [11] Hearn N. Effect of shrinkage and load-induced cracking on water permeability of concrete[J]. ACI Materials Journals, 1999, 96(2):234—241.
- [12] Wang Kejin, Jansan D C, Shah S P. Permeability study of cracked concrete[J]. Cement and Concrete Research, 1997, 27(3):381—393.
- [13] ASTM C 1585-04. Standard test method for measurement of rate of absorption of water by hydraulic cement concretes[S]. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2002.
- [14] 李淑红. 混凝土中毛细吸水过程的理论及试验研究[D]. 大连理工大学, 2011:20—34 (LI Shuhong. Theoretical

and experimental study on the capillary absorption within concrete [D]. Dalian University of Technology, 2011:20—34 (in Chinese))

- [15] 王新友, 蒋正武, 高相东, 等. 混凝土中水分迁移机理与模型研究评述[J]. 建筑材料学报, 2002, 5(1):66—71 (WANG Xinyou, JIANG Zhengwu, GAO Xiangdong, et al. Review on the mechanism and model of moisture transfer in concrete[J]. Journal of Building Materials, 2002, 5(1):66—71 (in Chinese))

Sensitivity analysis of evaluation index of concrete stress damage

HU Xiao-peng, WANG Bo, PENG Gang, PAN Bao-xue

(School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: The cube compressive strength, the splitting tensile strength, the modulus of elasticity, the ultrasonic wave velocity and the water absorption of concrete under different pre-damage degrees are tested. The sensitivity of each evaluation index is compared, and the evaluation index of damage evaluation is selected, which is convenient for practical engineering application, clear in physical mechanics and sensitive to the whole damage threshold. The results show that the modulus of elasticity should be selected as the evaluation index of concrete stress damage. The water absorption rate can be selected as the evaluation index of concrete stress damage when the test conditions and the time are allowed, but the measurement point of the water absorption time should be increased properly to improve the reliability of the test data. When the engineering sites or the test conditions are limited, the ultrasonic velocity can be used as a damage evaluation index for nondestructive testing, but it is not suitable for the evaluation of concrete stress damage alone and should be used in combination with the elastic modulus or the water absorption.

Keywords: stress damage of concrete; evaluation index; sensitivity; cube compressive strength; splitting tensile strength; modulus of elasticity; ultrasonic wave velocity; water absorption