

混凝土力学性能的应变率效应

李新忠,魏雪英,赵均海

(长安大学 建筑工程学院,陕西 西安 710061)

摘要:针对混凝土材料本构关系具有明显的应变率效应,对混凝土材料在不同应变率下的力学性能进行了分析研究。总结了应变率对混凝土抗压强度、抗拉强度、弹性模量以及临界应变的影响,通过比较各拟和公式预测的动态增大系数以及文献中的试验数据,分析了各公式的适用条件和范围。结果表明:对于混凝土抗压强度,在不同的应变率范围内应采用不同的经验公式;对于混凝土抗拉强度,修正的 CEB(欧洲国际混凝土委员会规范)公式与试验数据符合更好;应变率对弹性模量的影响较小,可采用 CEB 公式计算动态弹性模量;应变率对与极限抗压强度、极限抗拉强度相对应的临界应变值的影响需做进一步的研究。

关键词:结构工程;混凝土;应变率;抗压强度;抗拉强度;弹性模量;临界应变

中图分类号:O347 **文献标志码:**A

Strain rate effect on mechanical properties of concrete

LI Xin-zhong, WEI Xue-ying, ZHAO Jun-hai

(School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, Shaanxi, China)

Abstract: The strain rate has a significant influence on the mechanical properties of concrete, the strain rate effects on compressive strength, tensile strength, elastic modulus and threshold strain were reviewed and summarized. The dynamic increase factor (DIF) obtained from various empirical equations were compared with experimental results reported in the references in a wide range of strain rate. The results show that the DIF of compressive strength can be determined by different empirical equations according to the range of strain rate. The DIF of tensile strength obtained from modified CEB (Euro-International Committee for Concrete) formula is coincided with experimental results. The strain rate effects on the elastic modulus are much smaller than that on the tensile strength and compressive strength. The CEB formula can be used to predict the dynamic elastic modulus. The strain rates effects on the threshold strain corresponding to the compressive strength, tensile strength are needed to study further. 5 figs, 19 refs.

Key words: structure engineering; concrete; strain rate; compressive strength; tensile strength; elastic modulus; threshold strain

0 引言

现代混凝土结构除承受正常设计荷载,往往还要承受诸如撞击、地震和爆破等强动荷载,例如高速公路混凝土护栏在车辆的撞击作用下的响应;机场的混凝土路面和跑道除承受飞机着落的冲击荷载外,还可能遭遇炸弹袭击等。研究混凝土的动态力学性能是研究混凝土本构关系以及结构动态响应的基础,但由于混凝土具有高度的不均匀性及复杂的内部微观结构,特别是由于混凝土材料一方面表现为脆性(断裂应变很小,仅千分之几),另一方面又表现为粘性(应变率相关),使得这一研究增加了复杂性和特殊性。随着试验技术的进步和试验条件的改善,近 20 年来,人们开始系统研究混凝土的动态力学性能。国内外已有很多学者对混凝土的动态力学性能进行了试验研究,结果表明,混凝土材料具有明显的应变率硬化效应、围压效应和损伤软化效应等特性^[1-16]。但是,由于采用的试验设备不同、试件的尺寸、混凝土的骨料、级配等不同,得到的试验数据与拟和的经验公式之间差别很大,应用时难以选择。为此,本文总结了应变率对混凝土的抗压强度、抗拉强度、弹性模量和临界断裂应变等的影响,比较了各经验公式给出的动态增大系数以及试验结果,分析了对试验结果的影响因素,以及各经验公式的适用范围和条件。

1 抗压强度的应变率效应

已有很多学者对混凝土的应变率效应进行了研究,其中对混凝土抗压强度的应变率效应研究最多,对于应变率效应最常用的表达方式是用动态增大系数 DIF(Dynamic Increase Factor)。文献[1]总结了应变率范围在 $10^{-8} \sim 10^3 \text{ s}^{-1}$ 内混凝土抗压强度的试验结果,可以看到,在某一应变率下 DIF 的取值可相差 2 倍以上。这些不确定性可能由以下原因引起:①不同的试验设备;②不同的试件尺寸;③不同的材料性能(例如混凝土骨料、级配和养护条件等);④动力边界条件等。尽管各个试验数据之间有一定的差别,但应变率对混凝土抗压强度的影响仍然很明显,尤其在应变率大于 10 s^{-1} 以上。

应变率在 $10 \sim 10^3 \text{ s}^{-1}$ 范围内,CEB 规范建议,抗压强度的动态增大系数 DIF 的公式为

$$C_{\text{DIF}} = \begin{cases} 1 & \dot{\epsilon} \leq \dot{\epsilon}_{\text{stat}} \\ \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_{\text{stat}}} \right)^{1.026\alpha} & \dot{\epsilon}_{\text{stat}} < \dot{\epsilon} \leq 30 \text{ s}^{-1} \\ \gamma(\dot{\epsilon})^{1/3} & \dot{\epsilon} > 30 \text{ s}^{-1} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $C_{\text{DIF}} = \sigma_{\text{cd}} / \sigma_{\text{cs}}$, 为动态压缩强度与静态压缩强度之比, σ_{cd} 为某应变率 $\dot{\epsilon}$ 下的动态压缩强度, σ_{cs} 为静态压缩强度; $\dot{\epsilon}_{\text{stat}} = 30 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$; $\lg(\gamma) = 6.156\alpha - 0.49$, $\alpha = (5 + 3\sigma_{\text{cu}}/4)^{-1} = (5 + 9\sigma_{\text{cs}}/\sigma_{\text{c0}})^{-1}$, σ_{cu} 为混凝土立方体抗压强度(MPa), $\sigma_{\text{c0}} = 10 \text{ MPa}$, 是一参考值。

分离式霍普金森压杆(SHPB)对于研究高应变率下材料的动态力学性能具有很好的优势。近年来,已有很多学者应用这一技术研究了混凝土的应变率效应。Tedesco 等建议应变率小于 10^2 s^{-1} 时单轴抗压强度 DIF 的公式为

$$C_{\text{DIF}} = 0.009\,651 \lg(\dot{\epsilon}) + 1.058 \geq 1.0 \quad \dot{\epsilon} \leq 63.1 \text{ s}^{-1} \quad (2)$$

$$C_{\text{DIF}} = 0.758\,1 \lg(\dot{\epsilon}) - 0.289 \leq 2.5 \text{ s}^{-1} \quad \dot{\epsilon} > 63.1 \text{ s}^{-1} \quad (3)$$

Grote 等利用 SHPB 研究了应变率在 $250 \sim 1700 \text{ s}^{-1}$ 范围内的混凝土砂浆的动态力学性能,并得到的 C_{DIF} 公式为

$$C_{\text{DIF}} = 0.023\,5 \lg(\dot{\epsilon}) + 1.07, \dot{\epsilon} \leq 266.0 \text{ s}^{-1} \quad (4)$$

$$C_{\text{DIF}} = 0.882(\lg(\dot{\epsilon}))^3 - 4.48(\lg(\dot{\epsilon}))^2 + 7.22(\lg(\dot{\epsilon})) - 2.64, \dot{\epsilon} > 266.0 \text{ s}^{-1} \quad (5)$$

Li 等通过数值模拟 SHPB 试验过程表明,通过 SHPB 试验得到的 DIF 小于 10^2 s^{-1} 范围内需要进行修正^[17]。因为试验观察到的动态强度的增大部分,是由于试件接触面的约束引起的侧向围压效应引起的。分离式霍普金森压杆技术最初应用于金属,而金属试件表面的摩擦可以通过应用润滑剂而忽略不计,另外,金属材料的强度与静水压力无关。但是对于混凝土,试件表面的摩擦不可忽略,而混凝土的强度与静水压力相关,在试件受到高速压缩时,围压效应使得混凝土的强度增大。文献[7]通过分析指出,当摩擦系数大于 0.3 时,对 DIF 的影响尤为显著。

为此,他们提出的修正公式为

$$C_{\text{DIF}} = 1 + 0.034\,38(\lg(\dot{\epsilon}) + 3), \dot{\epsilon} \leq 10^2 \text{ s}^{-1} \quad (6)$$

$$C_{\text{DIF}} = \beta_0 + \beta_1 \lg(\dot{\epsilon}) + \beta_2 (\lg(\dot{\epsilon}))^2, \dot{\epsilon} > 10^2 \text{ s}^{-1} \quad (7)$$

式中: $\beta_0 = 8.530\,3$, $\beta_1 = -7.137\,2$, $\beta_2 = 1.729$, 均是根据试验数据拟和得出的常数。

下页图 1 给出了上述几个公式的比较,可以看出,在应变率小于 30 s^{-1} 的范围内,各个公式之间差别不大,CEB 公式考虑了抗压强度的影响,抗压强度越大,其动态增大系数越小,在这一应变率范围内比较适用。应变率在 $30 \sim 100 \text{ s}^{-1}$ 范围内,CEB 给出

的值最大,明显大于其他公式的预测值,Grote、Li与 Tedesco 给出的公式之间差别很小,由于 Grote 试验的应变率范围为 $250 \sim 1\,700\text{ s}^{-1}$,所以拟和公式的转折点在 266 s^{-1} ,在这一范围建议使用 Li 与 Tedesco 给出的公式。当应变率高于 100 s^{-1} 时,CEB 给出的 DIF 值仍远大于其他公式的值,建议使用 Grote 或 Li 给出的公式。

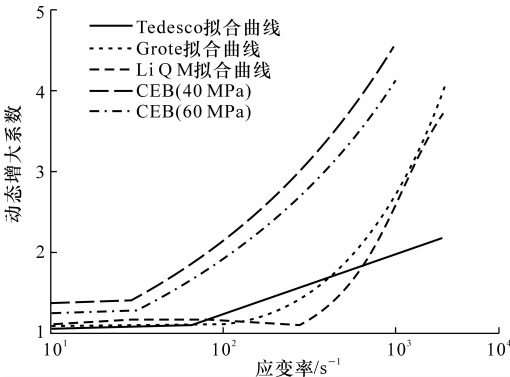


图1 混凝土抗压强度动态增大系数比较

2 抗拉强度的应变率效应

以往混凝土的动态抗拉强度的试验资料较少,但近年来由于试验技术的进步,已有学者对于高应变率下混凝土的抗拉强度进行了研究。Ross 等对混凝土的动态抗拉强度进行了一系列的研究,分别进行了劈裂抗拉试验和直接拉伸试验^[7-10];Brara 等进行了应变率在 $10 \sim 120\text{ s}^{-1}$ 范围内的混凝土拉伸试验^[11];Yan 等利用伺服液压试验机,进行了应变率为 $10^{-5} \sim 10^{-0.3}\text{ s}^{-1}$ 的混凝土拉伸试验^[12]。

应变率在 $10 \sim 10^3\text{ s}^{-1}$ 范围内时,CEB 建议抗拉动态增大系数 T_{DIF} 的公式为

$$T_{\text{DIF}} = \begin{cases} 1 & \dot{\epsilon} \leq \dot{\epsilon}_{\text{stat}} \\ \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_{\text{stat}}}\right)^{1.016\delta} & \dot{\epsilon}_{\text{stat}} < \dot{\epsilon} \leq 30\text{ s}^{-1} \\ \theta\left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_{\text{stat}}}\right)^{1/3} & \dot{\epsilon} > 30\text{ s}^{-1} \end{cases} \quad (8)$$

式中: $T_{\text{DIF}} = \sigma_{\text{td}}/\sigma_{\text{ts}}$,为动态拉伸强度与静态拉伸强度之比; σ_{td} 为在某一应变率 $\dot{\epsilon}$ 下的动态拉伸强度; σ_{ts} 为在应变率 $\dot{\epsilon}_{\text{stat}} = 3 \times 10^{-6}\text{ s}^{-1}$ 下的拉伸强度; $\dot{\epsilon}$ 的应用范围为 $3 \times 10^{-6} \sim 300\text{ s}^{-1}$; $\lg(\theta) = 7.11\delta - 2.33$; $\delta = 1/(10 + 6\sigma_{\text{cs}}/\sigma_{\text{c0}})$ 。

图2给出了根据 CEB 公式计算得到的抗拉强度动态增大系数。从图2可以看出,在同一应变率下,抗压强度越高,其动态增大系数越低。比较图2与图1可以看到,在同一应变率时,抗拉强度的增大系数大于抗压强度的增大系数,说明混凝土抗拉强度的

应变率效应更显著,这与众多试验结果相符^[18]。

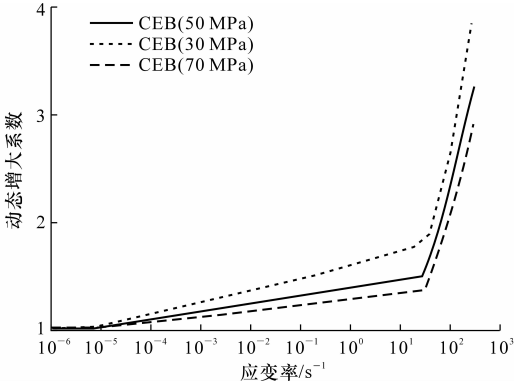


图2 根据 CEB 公式计算的混凝土抗拉强度的动态增大系数

文献[18]对混凝土抗拉强度的应变率效应做了综述,认为在应变率大于 10 s^{-1} 的范围内,CEB 公式给出的结果偏小,认为 DIF 公式的转折点应该在 1 s^{-1} 更为合理,提出修正的 CEB 公式为

$$T_{\text{DIF}} = \begin{cases} 1 & \dot{\epsilon} \leq \dot{\epsilon}_{\text{stat}} \\ \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_{\text{stat}}}\right)^{\delta} & \dot{\epsilon}_{\text{stat}} < \dot{\epsilon} \leq 1.0\text{ s}^{-1} \\ \theta\left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_{\text{stat}}}\right)^{1/3} & \dot{\epsilon} > 1.0\text{ s}^{-1} \end{cases} \quad (9)$$

式中:准静态参考应变率 $\dot{\epsilon}_{\text{stat}} = 1 \times 10^{-6}\text{ s}^{-1}$; σ_{ts} 为在应变率 $\dot{\epsilon}_{\text{stat}} = 1 \times 10^{-6}\text{ s}^{-1}$ 下的拉伸强度; $\dot{\epsilon}$ 的应用范围为 $1 \times 10^{-6} \sim 160\text{ s}^{-1}$;此时 $\delta = 1/(1 + 8\sigma_{\text{cs}}/\sigma_{\text{c0}})$, $\lg(\theta) = 6\delta - 2$ 。

图3为 CEB 公式、Malvar 修正的 CEB 公式预测值以及文献中的试验数据的比较。由图3可以看到,这一修正的 CEB 公式计算结果与试验结果吻合得较好,其适用范围为 $1 \times 10^{-6} \sim 160\text{ s}^{-1}$ 。

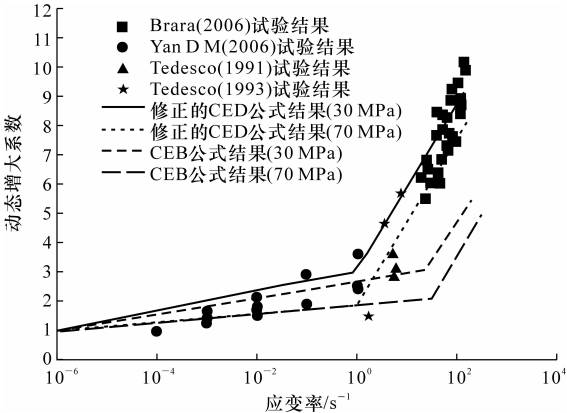


图3 抗拉强度动态增大系数比较

3 应变率对混凝土弹性模量的影响

混凝土的弹性模量也与应变率相关^[6,9,12-13]。Sukontasukkul 等利用 578 kg 的落锤从不同高度落下,分别给出了准静态下落锤距试件 250 mm 和

500 mm 高度时的应力应变曲线^[13]。从试验结果可以看出,混凝土的压缩强度和弹性模量均随应变率的增大有显著的提高,得到准静态下落锤距试件 250 mm 和 500 mm 高度落下时,混凝土的初始弹性模量分别为 39 GPa、177 GPa 和 466 GPa。

Grote 等利用分离式霍普金森压杆,得到了混凝土砂浆在应变率为 290 ~ 1 500 s⁻¹ 下的应力应变曲线,如图 4 所示^[6]。从图 4 中可以看出,在这一应变率范围内,砂浆的初始弹性模量也随着应变率的增大而增大。Yan 等给出了应变率为 10⁻⁵ ~ 10^{-0.3} s⁻¹ 时混凝土抗拉割线弹性模量的增大系数,并且研究了混凝土含水量对动态增大系数的影响,含水量较高的 C 组试验得到的增大系数,明显高于其他两组的增大系数^[12]。

虽然众多学者研究了混凝土的应变率效应,但由于混凝土弹性模量一方面随应变率的增大而增大;另一方面混凝土中的微损伤会随加载过程而演化扩展,出现应力软化,弹性模量降低。所以,弹性模量不仅与应变率相关,也与加载历史相关,很难简单给出弹性模量与应变率的关系式,一般只能给出割线弹性模量或初始弹性模量的动态增大系数公式。

CEB 建议弹性模量的动态增大系数采用如下公式

$$C_{\text{DIF}} = E_d/E_s = (\dot{\epsilon}_d/\dot{\epsilon}_s)^{0.026} \quad (10)$$

式中: $\dot{\epsilon}_d$ 为准动态应变率; $\dot{\epsilon}_s = 3 \times 10^{-5}$ s⁻¹,为准静态应变率。

文献[1]中给出了混凝土的动态弹性模量 E_d 与静态弹性模量 E_s 之比, $E_d/E_s = 1.0 - 1.5$,与 CEB 公式给出的增大系数基本吻合。图 5 给出 CEB 公式与 Yan D M 等的试验结果,虽然参考准静态应变率不同,但由于在应变率较低的范围内对弹性模量的影响很小,故可以忽略。比较图 5、图 3 和图 1 可以看出,弹性模量的增大系数远小于抗拉强度、抗压强度的增大系数。

4 应变率对临界应变的影响

由于混凝土是脆性材料,在高速应变率下试件的破坏是非常迅速的过程,要准确测量混凝土的断裂应变非常困难,因此,对于混凝土动态断裂应变值的应变率效应,文献中的结果很不一致。从 Grote 的结果(图 4)可以看出,对应极限抗压强度的应变值随着应变率的增大而增大,但增大的幅度很小,也可能是由于试验误差而造成^[6]。Yan 等的试验结果表

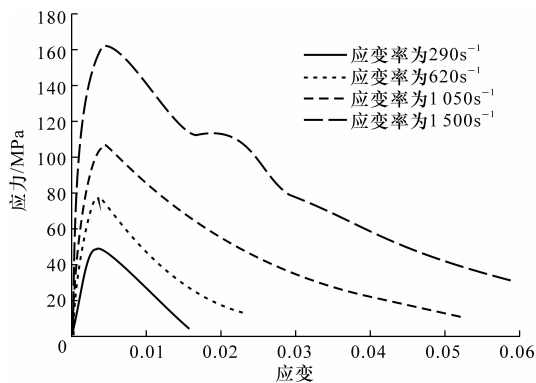


图 4 混凝土砂浆在不同应变率下的应力应变曲线^[6]

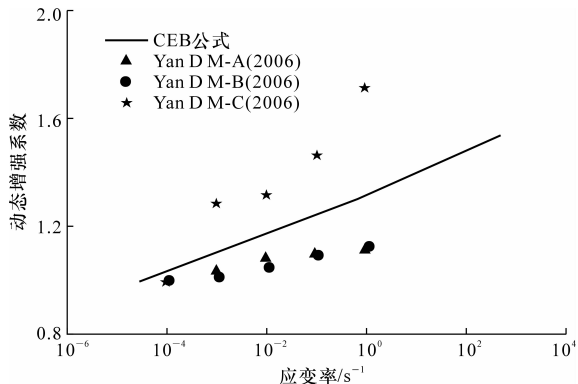


图 5 弹性模量的动态增强系数比较

明,对应混凝土极限抗拉强度的应变值随应变率的增大而增大,给出了拟和公式^[12]。文献[19]汇总了有关的文献报道,得到极限抗压强度相对应的动态应变值 ϵ_{d0} 与静态应变值 ϵ_{s0} 之间的比值在 70% ~ 140% 范围内波动。

CEB 建议公式为

$$\epsilon_{d0}/\epsilon_{s0} = (\dot{\epsilon}_d/\dot{\epsilon}_s)^{0.020} \quad (11)$$

式中: ϵ_{d0} 为应变率为 $\dot{\epsilon}_d$ 时与极限抗压强度对应的临界应变值; ϵ_{s0} 为准静态时的压缩临界应变; $\dot{\epsilon}_s$ 为准静态参考应变率(10⁻⁶ s⁻¹)。

Yan D M 等分别给出 3 组试验的拟和公式为

$$\epsilon_{dt}/\epsilon_{st} = 1.0 + 0.203 \lg(\dot{\epsilon}_t/\dot{\epsilon}_{ts}) \quad (12)$$

$$\epsilon_{dt}/\epsilon_{st} = 1.0 + 0.109 \lg(\dot{\epsilon}_t/\dot{\epsilon}_{ts}) \quad (13)$$

$$\epsilon_{dt}/\epsilon_{st} = 1.0 + 0.067 \lg(\dot{\epsilon}_t/\dot{\epsilon}_{ts}) \quad (14)$$

式中: ϵ_{dt} 为应变率为 $\dot{\epsilon}_t$ 时与极限抗拉强度对应的临界应变值; ϵ_{st} 为准静态的拉伸临界应变; $\dot{\epsilon}_{ts}$ 为准静态参考应变率(10⁻⁵ s⁻¹),公式的适用范围为 10⁻⁵ ~ 10^{-0.3} s⁻¹。

对于临界应变的应变率效应,还需要做进一步的研究。

5 结 语

(1) 各经验拟和公式的建立均基于一定应变率

范围内的试验数据,应用时必须注意其适用条件和范围。

(2) 对于混凝土的抗压强度,在应变率小于 30 s^{-1} 的范围内,CEB 公式较为适用;应变率在 $30 \sim 100 \text{ s}^{-1}$ 范围内,Li Q M 公式或 Tedesco 公式比较适用;当应变率高于 100 s^{-1} 时,CEB 给出的 DIF 值远大于其他公式的值,与试验值相差较大,建议使用 Grote 或 Li Q M 给出的公式。

(3) 对于混凝土的抗拉强度,Malver 给出的修正 CEB 公式,计算结果与试验结果的吻合较好,其适用范围为 $10^{-6} \sim 160 \text{ s}^{-1}$ 。

(4) 应变率对混凝土的弹性模量的影响程度远小于其对抗压、抗拉强度的影响,CEB 规范给出的公式与试验结果吻合较好。

(5) 应变率对混凝土临界应变的影响很难准确测定,其动态临界应变与准静态临界应变的比值在一定范围内波动,还需做进一步的研究。

参考文献:

References:

- [1] Bischoff P H, Perry S H. Compressive behavior of concrete at high strain rates[J]. Materials and Structures, 1991, 24(6): 425-450.
- [2] Tang T, Malvern L E, Jenkins D A. Rate effects in uniaxial dynamic compression of concrete[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1992, 118(1): 108-124.
- [3] Zhao H. A study on testing techniques for concrete-like materials under compressive impact loading[J]. Cement Concrete Composite, 1998, 20(4): 293-299.
- [4] Ross C A, Tedesco J W, Kuennen S T. Effects of strain rate on concrete strength[J]. Materials Journal, 1995, 92(1): 37-47.
- [5] Tedesco J W, Ross C A. Strain-rate-dependent constitutive equations for concrete[J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 1998, 120(4): 398-405.
- [6] Grote D L, Park S W, Zhou M. Dynamic behavior of concrete at high strain rates and pressures I: experimental characterization[J]. International Journal of Impact Engineering, 2001, 25(9): 869-886.
- [7] Ross C A, Thompson P Y, Tedesco J W. Split-Hopkinson pressure-bar tests on concrete and mortar in tension and compression[J]. Materials Journal, 1989, 86(5): 475-481.
- [8] Tedesco J W, Ross C A. Experimental and numerical analysis of high strain rate splitting tensile tests[J]. Materials Journal, 1993, 90(2): 162-169.
- [9] Ross C A, Jerome D M, Tedesco J W, et al. Moisture

- and strain rate effects on concrete strength[J]. Materials Journal, 1996, 93(3): 293-300.
- [10] Tedesco J W, Ross C A, McGill P B, et al. Numerical analysis of high strain rate concrete direct tension tests[J]. Computers & Structures, 1991, 40(2): 313-327.
- [11] Brara A, Klepaczko J R. Experimental characterization of concrete in dynamic tension[J]. Mechanics of Materials, 2006, 38(3): 253-267.
- [12] Yan D M, Lin G. Dynamic properties of concrete in direct tension[J]. Cement and Concrete Research, 2006, 36(7): 1371-1378.
- [13] Sukontasukkul P, Nimityongskul P, Mindess S. Effect of loading rate on damage of concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2004, 34(11): 2127-2134.
- [14] 张学钢. 大体积混凝土芯部温度监测及力学性能变化[J]. 筑路机械与施工机械化, 2011, 28(5): 74-77.
ZHANG Xue-gang. Temperature monitoring and mechanical property change of core of mass concrete[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2011, 28(5): 74-77.
- [15] 郭 猛, 刘 洪, 白文静. 混凝土桥梁结构的等耐久性设计[J]. 建筑科学与工程学报, 2010, 27(1): 117-121.
GUO Meng, LIU Hong, BAI Wen-jing. Equal durability design of concrete bridge structure[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2010, 27(1): 117-121.
- [16] 肖诗云, 林 皋, 逯静洲, 等. 应变率对混凝土抗压性能的影响[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 2002, 35(5): 35-39.
XIAO Shi-yun, LIN Gao, LU Jing-zhou, et al. Effect of strain rate on dynamic behavior of concrete in compression[J]. Journal of Harbin University of Civil Engineering & Architecture, 2002, 35(5): 35-39.
- [17] Li Q M, Meng H. About the dynamic strength enhancement of concrete-like materials in a split Hopkinson pressure bar test[J]. International Journal of Solids and Structures, 2003, 40(2): 343-360.
- [18] Malvar L J, Ross C A. Review of strain rate effects for concrete in tension[J]. Materials Journal, 1998, 95(6): 735-739.
- [19] 蒋昭镠, 陈江瑛, 黄得进, 等. 混凝土结构动态安全分析的重要基础: 混凝土动态力学性能[J]. 宁波大学学报: 理工版, 1997, 10(2): 50-57.
JIANG Zhao-biao, CHEN Jiang-ying, HUANG De-jin, et al. Dynamic mechanical behaviour of concrete: the fundamental element of safety analysis for concrete structures[J]. Journal of Ningbo University: Natural Science & Engineering Edition, 1997, 10(2): 50-57.