



不同冲击条件下早龄期混凝土的力学特性

李夕兵^{1,2}, 王世鸣¹, 周 韬¹, 黄麟淇¹, 周 健¹

(1. 中南大学 资源与安全工程学院, 长沙 410083;

2. 中南大学 深部金属矿产开发与灾害控制湖南省重点实验室, 长沙 410083)

摘 要: 利用大杆径分离式霍金森压杆(SHPB)试验装置, 对1、3、7、14、28 d这5组龄期下的混凝土进行冲击压缩试验, 研究早龄期混凝土(C₂₀)在不同冲击条件下的力学特性。结果表明: 龄期7 d以前, 各龄期50%临界入射能的冲击有助于提高混凝土的强度和弹性模量; 龄期7 d以后, 无论是75%还是50%临界入射能的冲击, 都会使混凝土的强度和弹性模量降低; 在单次冲击条件下, 混凝土的变形能力和单位体积吸收能与龄期呈对数关系增长; 在多个龄期冲击条件下, 混凝土的变形能力和单位体积吸收能都受到不同程度的影响, 其中单位体积吸收能下降了50%。

关键词: 混凝土; 力学特性; 早龄期; 分离式霍金森杆

中图分类号: TU 528

文献标志码: A

Mechanical properties of early ages concrete under different impact loading conditions

LI Xi-bing^{1,2}, WANG Shi-ming¹, ZHOU Tao¹, HUANG Lin-qi¹, ZHOU Jian¹

(1. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;

2. Hunan Key Laboratory of Resources Exploitation and Hazard Control for Deep Metal Mines, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: In order to understand the mechanical properties of early age concrete(C₂₀) under different loading conditions systematically, the impact compression tests of five early age concrete were conducted with a large diameter split Hopkinson pressure bar. The results show that, the dynamic strength and elastic modulus of concrete are improved under the impact level of 50% or 75% corresponding critical incident energy before age of 7 d, while they would decrease if concrete suffered any impact after age of 7 d. The growth trend of deformation capacity and unit volume absorption energy of concrete with age can be presented with a logarithmic function under single impact. While the deformation capacity and unit volume absorption energy of concrete are affected when the concrete suffers impact at multiple ages, and the later is even declined by 50%.

Key words: concrete; mechanical property; early age; Split Hopkinson pressure bar

混凝土作为应用最广泛的建筑材料之一, 在基础工程建设中发挥着重要的作用。随着社会的进步, 高效建设已是现代建筑理念的核心, 在建设过程中, 为了加快施工进度, 混凝土在养护期间不可避免受到外界间断性甚至是持续性的影响, 例如隧道施工过程的爆破工序以及矿山工程的爆破开挖都会对刚浇筑混凝土

结构产生冲击扰动, 影响其整体功效。自1978年 LEW 等^[1]开始研究混凝土早龄期的抗压、劈裂强度和粘结强度之后, 大量学者开始关注早龄期混凝土的力学特性。NAGY^[2]采用无损检测法测量早期混凝土的弹性模量, 并提出了静态弹性模量的预测模型, 该模型与实际测量结果能很好的吻合。KIM 等^[3]研究了养

护温度、龄期和水泥种类对混凝土强度、抗压强度和弹性模量之间的关系,并在试验的基础上提出了根据温度和龄期来预测混凝土力学参数的模型。YI 等^[4]研究了混凝土强度和龄期对混凝土应力应变曲线的影响,提出以强度和龄期作为变量的新模型,能较好的拟合各种实测曲线。ZREIKI 等^[5]研究了结构中早龄期混凝土力学特性来预测裂纹扩展风险和残余应力,并采用热-化-力三者耦合的模型来预测早龄期混凝土应变、残余强度以及裂纹扩展风险评估。ZHANG 等^[6]在统计和分析前人大量实验结果的基础上,提出了一个基于早龄期混凝土强度、弹性模量及两者的变化系数的预测模型,该模型能很好地反映混凝土力学性质随龄期的变化。在工程实践中,混凝土骨料替代品的使用使得混凝土早期强度降低, KHOKHAR 等^[7]通过配料设计,优化早期混凝土强度。BEUSHAUSENA 等^[8]研究了不同水灰比和不同炉渣替代品对早龄期混凝土强度增长的影响。WANG 等^[9]研究了采用温度匹配养护和恒温养护来研究实际工程中温度对结构中早龄期混凝土力学性质的影响。金贤玉等^[10-11]研究了静载下混凝土早期受力对混凝土后期强度的影响,得出了早期混凝土受力时间及受力后养护条件对混凝土后期力学特性有影响的结论,并在分析普通混凝土和高性能混凝土结构早期裂缝的成因机理和控制措施基础上,建立了裂缝扩展过程的损伤模型,总结了混凝土早龄期的水化、温度、收缩、徐变、力学性能和断裂性能随时间的变化规律。

上述研究表明,大多研究者都专注于早龄期混凝土在静载下力学特性及静载作用对其后期力学影响的研究,较少涉及动载作用对早龄期混凝土后期力学特性影响的研究。基于工程和科学研究的需要,本文作者以 C20 混凝土为研究对象,研究多个龄期冲击后对其后期力学特性的影响,并与单次冲击下的力学特性进行比较。

1 早龄期混凝土冲击试验

为了更好地反映混凝土真实的力学特性,试验采

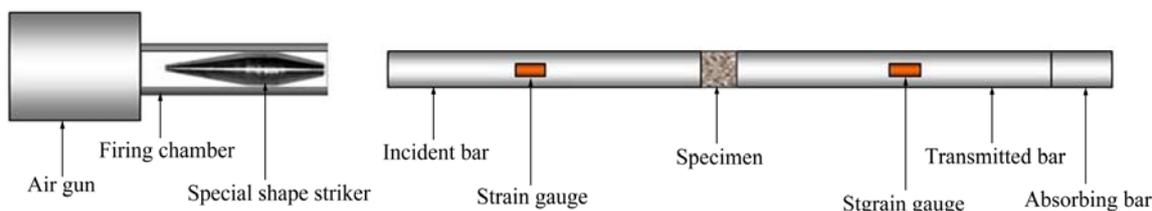


图1 SHPB 试验系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of SHPB experimental system

用试样的直径为 75 mm^[12],高径比为 0.5,其制备过程严格按照标准规程^[13]进行,制作过程如下:拌浆、捣实、抹平、养护、拆模、抹平、养护,其中第二次抹平主要是抑制混凝土度件的不平整度,采用水泥砂浆抹平。参照某实际隧道工程,混凝土试件配比设计强度为等级为 C20,详细配比见表 1,其中水泥采用 42.5 级普通水泥,碎石为变质砂岩,砂子为普通河砂,并根据规范要求,采用 16 mm 筛子筛分骨料,控制最大骨料直径小于模具直径 1/4^[12-13]。

表 1 混凝土配比设计

Table 1 Concrete mixture proportions

w/c	Unit mass/(kg·m ⁻³)				w _{ac} /%
	Cement	Aggregate	Sand	Water	
0.46	397	853	786	182	4

w/c indicates water cement mass ratio; w_{ac} indicates accelerator mass fraction.

冲击试验装置采用 75 mm 直径的 SHPB 装置,其示意图见图 1。该试验系统具有适应非均质脆性材料的中高应变率加载特点,加载应力通过采用纺锤形冲头实现了恒应变率的半正弦应力波加载^[14]。

冲击试验方案如下:1) 确定每一龄期单次冲击下混凝土试件发生破坏时的临界入射能和临界破坏强度^[15](见表 2)。此处试件破坏指的是试件受冲击后破碎成几个大块的临界破坏状态。当入射能小于临界入射能时,试件极有可能不会破坏,从而可以继续养护;2) 确定每个龄期冲击试验所需的入射能。本文作者以早龄期中每龄期临界入射能的 50%和 75%水平作为冲击入射能依据,通过调节气压,确保每次冲击入射能接近设定要求;3) 以步骤 2)确定每一龄期的入射能为基础,通过控制冲击气压值和冲头的位置,尽量确保每次入射能相近;4) 放置试样,做好试样与弹性杆间的润滑;5) 调节至所需入射能的气压值进行冲击,达到预定效果后,数据采集系统采集信号、存盘;6) 根据试验需要,尽可能使试件在 1、3、7、14 和 28 d 龄期都受到冲击,完成冲击后,试件没有损坏,则放入养护箱继续养护,同时为了对比,分别对混凝土在龄

期3、7、14和28 d混凝土相应冲击条件下进行单次冲击, 试验过程中记录典型单次冲击波形曲线如图2所示, 采用三波法间接地计算出试样的动态力学参数^[16], 试验结果见表3和4。

表2 动载下不同龄期临界破坏强度

Table 2 Critical failure strength of different ages concrete under impact load

Age/d	Incident energy/J	Strain rate/s ⁻¹	Strength/MPa
1	50	29	5.88
3	58	30	12.39
7	74	42	17.95
14	80	33	26.07
28	85	35	31.65

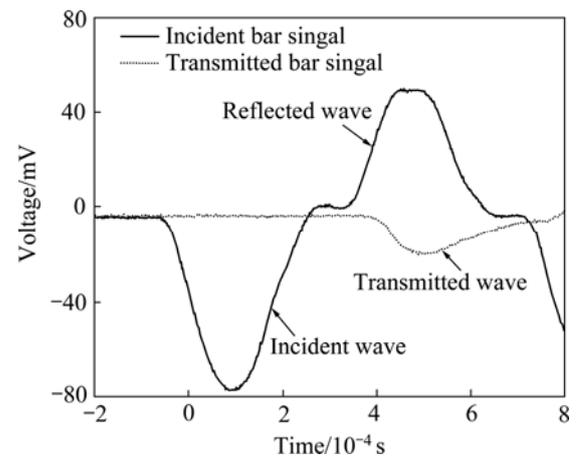


图2 典型的压缩试验波形图

Fig. 2 Typical waveform of compression test

表3 多次冲击荷载下早龄期混凝土力学特性

Table 3 Mechanical properties of early age concrete under multiple impact loading

Serial No.	Impact age/d	Incident energy/J	Strain rate/s ⁻¹	Strength/MPa	Elastic modulus/GPa	Unit volume absorbed energy/(J·cm ⁻³)	Critical strain	Failure shape
A1	1	23	16.9	4.38	2.11	0.031		Intact, crack around specimen
	3	39	19.1	11.8	3.12	0.080	0.0027	Fragmentation with two degrees
A2	1	18	21.1	4.46	2.56	0.025		Intact, crack around specimen
	3	44	22.7	10.29	4.87	0.090	0.0029	Fragmentation with two degrees
A3	1	23	18.7	3.53	2.24	0.019		Intact, fragmentation around end
	3	23	16	9.61	4.9	0.046		Intact, crack propagation
	7	48	25	9.37	4.6	0.055	0.0031	Fragmentation with small degrees
A4	1	32	20	4.56	1.53	0.031		Intact, crack around specimen
	3	35	20.9	8.57	5.4	0.050		Intact, crack propagation
	7	51	29.6	12.92	5.8	0.088	0.0034	Fragmentation with medium degrees
A5	1	22	15.1	3.43	1.88	0.016		Intact, fragmentation around end
	3	24	16.7	7.05	4.03	0.044		Intact, fragmentation around end
	7	30	20.9	11.17	4.79	0.065		Intact, fragmentation around end
	14	47	23.4	14.47	6.6	0.108	0.0033	Crush
A6	1	24	29.5	4.57	1.19	0.033		Intact
	3	26	23	8.11	3.4	0.057		Intact
	7	22	21.2	10.71	5.8	0.051		Intact, fragmentation around end
	14	29	20.1	11.84	7.4	0.062		Intact, local crack
	28	40	30.4	15.83	6.5	0.098	0.0046	Fragmentation with large degrees
A7	1	29	33.8	4.26	1.36	0.027		Intact
	3	23	23.5	9.61	3.96	0.033		Intact
	7	37	26.7	12.39	4.94	0.065		Intact, local crack
	14	29	25.3	14.24	5.99	0.065		Intact, local crack
	28	53	30.7	18.19	7.4	0.104	0.0044	Fragmentation with large degrees
A8	1	33	28.6	4.9	1.73	0.029		Intact
	3	37	26.8	8.8	1.79	0.058		Intact, fragmentation around end
	7	43	28.1	10.13	2.44	0.084		Intact, fragmentation around end
	14	42	25.9	16.78	5.53	0.113		Intact, fragmentation around end
	28	44	27.6	19.38	7.59	0.103	0.0043	Intact, crack around specimen

表4 单次冲击荷载下早龄期混凝土力学特性

Table 4 Mechanical properties of early age concrete under signal impact loading

Serial No.	Impact age/d	Incident energy/J	Strain rate/s ⁻¹	Strength/MPa	Elastic modulus/GPa	Unit volume absorbed energy/(J·cm ⁻³)	Critical strain	Failure shape
A 9	3	21	23.3	6.25	1.76	0.037		Intact
A 10	3	39	34.8	6.89	2.02	0.052		Intact
A 11	3	56	26.8	10.88	4.20	0.096	0.0036	Fragmentation with large degrees
A 12	7	31	33	7.73	2.79	0.052		Intact
A 13	7	56	29.9	8.89	3.37	0.076		Intact, local crack
A 14	7	61	36.1	15.95	4.34	0.109	0.0045	Fragmentation with large degrees
A 15	14	35	32	13.79	5.78	0.075		Intact
A 16	14	54	29.6	12.93	4.48	0.108		Intact
A 17	14	77	40.5	20.83	6.61	0.192	0.0054	Fragmentation with three degrees
A 18	28	52	25.3	19.67	6.25	0.168		Intact
A 19	28	65	24.6	21.87	8.51	0.169		Intact, fragmentation around end
A 20	28	103	32.74	29.97	8.88	0.220	0.0052	Fragmentation with large degrees

2 结果与讨论

2.1 强度特性分析

在多个龄期冲击试验中, 试件每次冲击完成后放入养护箱养护至下一龄期再进行冲击。从表3可以看出, 经过多龄期冲击后, 当冲击入射能大于该冲击龄期临界入射能的75%时, 试件就会发生破坏。因此, 为确保试件能在5个设定龄期都能完成冲击, 每次冲击的冲击入射能须控制在该冲击龄期临界入射能的75%以内。

图3和4所示分别为不同冲击条件下混凝土强度(σ)和弹性模量(E)随龄期(t)的变化。从图3和4可以看出, 在不同冲击条件下, 混凝土强度和弹性模量与龄期都呈对数关系增长, 且两者随龄期的变化类似。在7d以前, 受多个龄期冲击混凝土试件的强度和弹性模量增长速度高于在相同冲击条件下单次冲击试件的强度和弹性模量; 而在7d以后, 受多个龄期冲击混凝土试件的强度和弹性模量增长速度则小于单次冲击试件的强度和弹性模量, 且随着龄期的增长, 差距越来越大。这表明, 在龄期7d以前, 由于混凝土具有一定的黏弹性, 适当的冲击压缩(50%临界入射能)。提高了混凝土的密实度, 有助于提高混凝土的强度和弹性模量, 这与早龄期混凝土受静载作用后对后期混凝土强度影响相似^[10]; 在龄期7d以后, 由于混凝土开始逐渐显露准脆性材料的特性, 外界的冲击, 无论

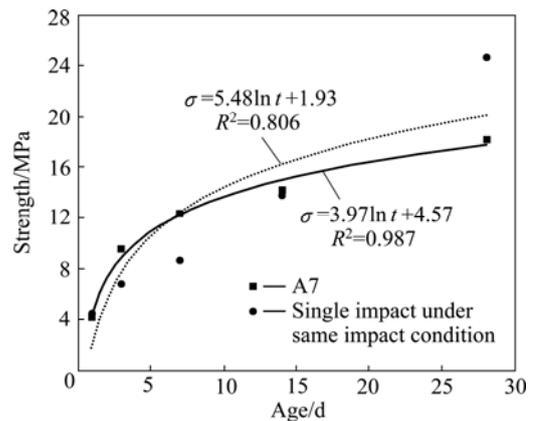


图3 不同冲击条件下混凝土强度随龄期的变化

Fig. 3 Variation in dynamic strength of concrete with age under different impact loading conditions

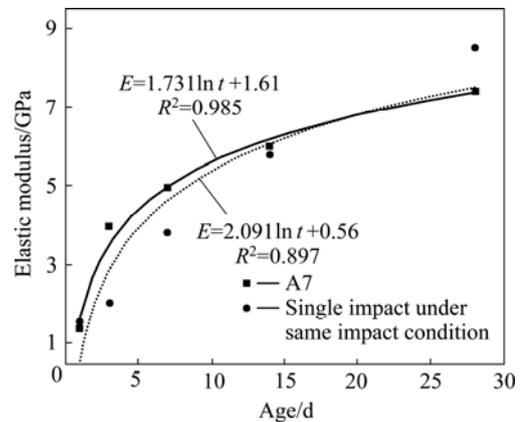


图4 不同冲击条件下弹性模量随龄期的变化

Fig. 4 Variation in dynamic elastic modulus of concrete with age under different impact loading conditions

是 50% 还是 75% 临界入射能, 都会使混凝土内部结构遭到破坏, 从而使混凝土的强度和弹性模量降低。

2.2 变形特性分析

图 5 所示为不同冲击条件下混凝土破坏时峰值应力对应的应变(以下简称峰值应变)随龄期的变化图。从图 5 可以看出, 不同冲击条件下, 混凝土峰值应变都与龄期呈对数关系增长。单次冲击条件下, 在龄期 14 d 以前, 峰值应变随龄期增长而迅速增长; 在龄期 14 d 以后, 峰值应变随龄期的增长变化不大^[15]; 与单次冲击破坏时峰值应变相比, 混凝土经多龄期冲击破坏时的峰值应变较小, 且随龄期的增长变化缓慢, 在龄期 14 d 以后峰值应变仍有一定的增长。多龄期冲击下, 混凝土的变形能力下降, 且随着龄期的增长恢复较慢反映了早期冲击导致混凝土变形能力下降、抵抗外界作用能力降低, 从而影响了混凝土的稳定性。

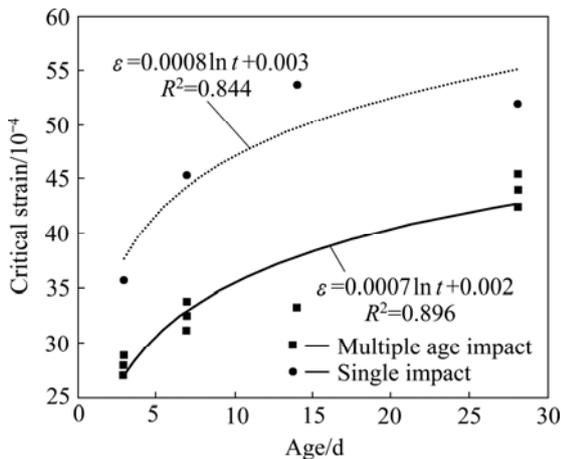


图 5 不同冲击条件下峰值应变随龄期的变化
Fig. 5 Variation in critical strain of concrete with age under different impact loading conditions

2.3 吸能关系分析

图 6 所示为不同冲击条件下试件破坏时单位体积吸收能(E_V)随龄期的变化。从图 6 中可以看出, 混凝土在两种冲击条件下, 除了在龄期 3 d 以前破坏时单位体积吸收能相近外, 随着龄期的变化, 单位体积吸收能呈不同的模式变化: 单次冲击破坏时, 试件单位体积吸收能与龄期成对数函数关系增长; 多龄期冲击破坏时, 试件单位体积吸收能随龄期的变化不明显, 基本保持在同一个水平。

图 7 所示为不同冲击条件下试件破坏时累积单位体积吸收能随龄期的变化。从图 7 可以看出, 不同冲击条件下, 试件发生破坏时的单位体积吸收能都随着龄期的增长而增长。与单次冲击条件下试件发生破坏时单位体积吸收能相比, 多龄期冲击条件下试件发生

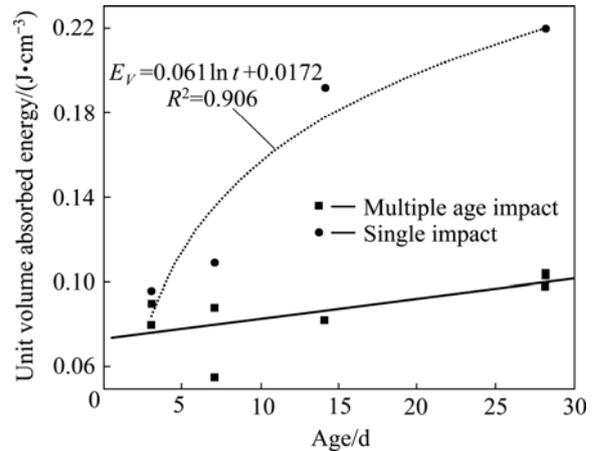


图 6 不同冲击条件下试件破坏单位体积吸收能随龄期的变化

Fig. 6 Variation in unit volume absorbed energy of concrete with age under different impact loading conditions

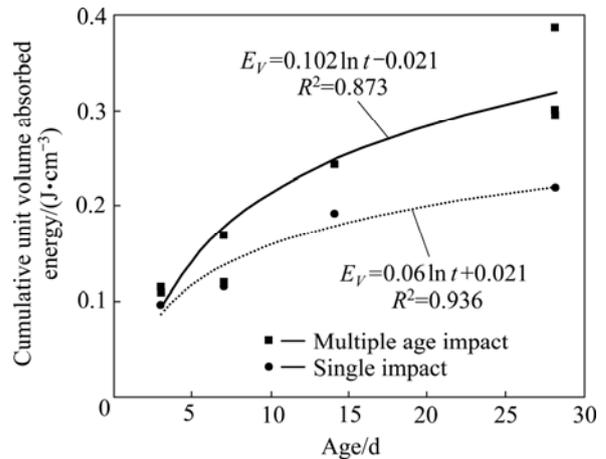


图 7 不同冲击条件下试件破坏累积单位体积吸收能随龄期的变化

Fig. 7 Variation in cumulative unit volume absorbed energy of concrete with age under different impact loading conditions

破坏需吸收更多的能量, 且随着龄期的增长, 两者之间的差距越来越大。在早龄期, 混凝土在外力作用下易发生较大变形, 单次冲击破坏与多龄期冲击破坏的单位体积吸收能相差不多, 且随着龄期的增长, 混凝土变形能力减弱, 单次冲击破坏吸收能量远小于多龄期冲击破坏累积吸收的能量。

结合图 6 和 7 分析可知, 随着龄期的增长, 多龄期冲击破坏累积单位体积吸收能远远大于单次冲击破坏单位体积吸收能, 但经多龄期持续冲击后, 混凝土在后期冲击破坏时单位体积吸收能也远小于单次冲击破坏的单位体积吸收能, 下降了近 50%。这表明, 多龄期冲击整体提高了混凝土吸收外界冲击能的能力, 但同时也降低了混凝土后期单次吸收外界冲击能的能

力。在实际工程中,与施工过程中抵抗外界作用能力相比,更注重施工完成后支护工程的整体功效。通过试验分析可知,即便混凝土试件在相应龄期50%临界入射能的冲击条件下受到持续冲击,混凝土后期吸收外界冲击能量的能力也会受到影响。因此,在实际工程中,除了在设计时需要考虑外界冲击对混凝土性能降低作用,在施工过程中还需要采取相应的措施来降低外界对支护结构在养护期间的扰动,例如延长两次爆破的时间间隔以及降低单次作用强度等。

3 结论

1) 在龄期7 d以前,适当的冲击压缩(50%临界入射能)有助于提高混凝土的强度和弹性模量;在龄期7 d以后,无论是50%还是75%临界入射能的冲击都会使混凝土的强度和弹性模量降低。

2) 混凝土在多龄期冲击后,变形能力下降且随着龄期的增长恢复较慢,抵抗外界荷载作用能力下降,影响了混凝土的稳定性。

3) 在龄期3 d之后,多龄期冲击破坏累积单位体积的吸收能远大于单次冲击破坏单位体积吸收能,但经多龄期持续冲击后,混凝土在后期冲击破坏时单位体积的吸收能也远小于单次冲击破坏的单位体积吸收能,下降了近50%。因此,在实际工程中,除了在设计时需要考虑工程在施工工程中会受到外界间断或持续干扰,在实际施工中还需要采取相应的措施,降低外界荷载对混凝土后期力学的影响,确保混凝土的整体功效。

REFERENCES

[1] 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.

[2] NAGY A. Determination of E-modulus of young concrete with nondestructive method[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 1997, 9(1): 15-20.

[3] KIM J K, HAN S H, SONG Y C. Effect of temperature and aging on the mechanical properties of concrete Part I. Experimental results[J]. *Cement and Concrete Research*, 2002, 32(7): 1087-1094.

[4] YI S, KIM J, OH T. Effect of strength and age on the stress-strain curves of concrete specimens [J]. *Cement and Concrete Research*, 2003, 33(8): 1235-1244.

[5] ZHANG Deng-xiang, YANG Wei-jun. The experimental study of early-age strength and elastic modulus of concrete[J]. *Advanced*

Materials Research, 2011, 163/167: 1190-1198.

- [6] ZREIKI J, BOUCHELACHEM F, CHAOUCHÉ M. Early-age behaviour of concrete in massive structures, experimentation and modeling[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2010, 240(10): 2643-2654.
- [7] KHOKHAR M I A, ROZIERE E, TURCRY P, GRONDIN F, LOUKILI A. Mix design of concrete with high content of mineral additions: Optimization to improve early age strength[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2010, 32(5): 377-385.
- [8] BEUSHAUSENA H, ALEXANDERA M, BALLIM Y. Early-age properties, strength development and heat of hydration of concrete containing various South African slags at different replacement ratios[J]. *Construction and Building Materials*, 2012, 29: 533-540.
- [9] WANG Jia-chun, YAN Pei-yu. Evaluation of early age mechanical properties of concrete in real structure[J]. *Computers and Concrete*, 2013, 12(1): 53-64.
- [10] 金贤玉, 沈毅, 李宗津, 王荣富. 混凝土早龄期受力对后期性能的影响[J]. *混凝土*, 2003, 7: 35-37.
- JIN Xian-yu, SHENG Yi, LI Zong-jin, WANG Rong-fu. Influence of preload concrete on its latter performance[J]. *Concrete*, 2003, 7: 35-37.
- [11] 金贤玉, 田野, 金南国. 混凝土早龄期性能与裂缝控制[J]. *建筑结构学报*, 2010, 31(6): 204-212.
- JIN Xian-yu, TIAN Ye, JIN Guo-nan. Early age properties and cracking control of concrete[J]. *Journal of Building Structures*, 2010, 31(6): 204-212.
- [12] BISCHOFF P H, PERRY S H. Compressive behaviour of concrete at high strain rates[J]. *Materials and Structures*, 1991, 24(1): 425-450.
- [13] GB/T 50081—2002. 普通混凝土力学性能试验方法标准[S]. GB/T 50081—2002. Standard for test method of mechanical properties on ordinary concrete[S].
- [14] LI X B, LOK T S, ZHAO J, ZHAO P. Oscillation elimination in the Hopkinson bar apparatus and resultant complete dynamic stress-strain curves for rocks[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2000, 37(7): 1055-1060.
- [15] 王世鸣, 李夕兵, 宫凤强, 朱晶晶. 静载和动载下不同龄期混凝土力学特性的试验研究[J]. *工程力学*, 2013, 30(2): 143-149.
- WANG Shi-ming, LI Xi-bing, GONG Feng-qiang, ZHU Jing-jing. Experimental study of mechanical properties of different ages concrete under static and dynamic load[J]. *Engineering Mechanics*, 2013, 31(2): 143-149.
- [16] 李夕兵, 古德生. 岩石冲击动力学[M]. 长沙: 中南工业大学出版社, 1994: 11-12.
- LI Xi-bing, GU De-sheng. *Rock impact dynamics*[M]. Changsha: Central South University of Technology Press, 1994: 11-12.

(编辑 龙怀中)