

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2017.03.004

冲击荷载下的新浇混凝土损伤特性及强度试验研究

刘 彬, 阳生权, 姚悟闻

(湖南科技大学 土木工程学院, 湖南 湘潭 411201)

摘 要: 以新浇混凝土养护过程会受到各类工程振动的作用与影响为工程背景, 结合静载试验与冲击动载试验, 得出冲击荷载影响下新浇混凝土的强度随龄期的变化规律。通过基于 Weibull 分布的统计损伤模型得出混凝土关于龄期的动态损伤本构模型。采用 SHPB 压杆装置进行混凝土试件破坏试验, 得出在混凝土不同龄期的冲击动载下, 混凝土抗压强度与静载下抗压强度的比值均为 2:1 左右; 随着龄期的增长, 混凝土试件受冲击破坏的破碎程度越来越小。采用 SHPB 压杆装置对不同龄期的混凝土做加载损伤试验, 得出了冲击荷载下混凝土最薄弱龄期区段及其强度降低率达到峰值的龄期。

关键词: 冲击荷载; 龄期; 抗压强度; 损伤模型; SHPB 压杆

中图分类号: TU502

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2017)03-0019-07

An Experimental Study on the Damage Features and Strength of Newly-Laid Concrete Under Impact Loads

LIU Bin, YANG Shengquan, YAO Wuwen

(School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan Hunan 411201, China)

Abstract: Taking as its background the fact that the process of the concrete curing will be under the action and influence of various kinds of engineering vibrations, combined with static tests as well as dynamic tests, the change rules will be worked out of the strength of the newly-laid concrete with curing age under impact loads. The dynamic damage constitutive model of concrete can be established on the statistical damage model, which is based on Weibull distribution. It is thus concluded that the ratio between the compressive strength of concrete and the compressive strength under static loads will be 2:1, based on a comparative analysis of uniaxial compressive strength of concrete specimens under the action of impact dynamic load and static load which was carried out by the destructive test of the SHPB strut devices. With the increase of the curing age of concrete specimen impact, the degree of fragmentation of concrete specimens, which are under impact failure, is decreasing. Meanwhile, the loading test of concrete under different ages can be carried out by using SHPB devices, thus successfully obtaining the age range of the weakest age and the peak age of strength reduction of the concrete under impact loads.

Keywords: impact load; curing period; compressive strength; damage model; SHPB strut

收稿日期: 2016-12-15

基金项目: 湖南省研究生科研创新基金资助项目 (CX2015B492)

作者简介: 刘 彬 (1992-), 男, 湖南岳阳人, 湖南科技大学硕士生, 主要研究方向为岩石力学,
E-mail: 15200359732@126.com

通信作者: 阳生权 (1968-), 男, 湖南耒阳人, 湖南科技大学教授, 博士, 硕士生导师, 主要从事岩石力学与爆破工程方面的研究, E-mail: 984336908@qq.com

对于新浇混凝土受冲击影响的试验,目前已有学者从不同的角度建立了不同的物理模型和理论模型进行研究^[1-3]。单仁亮等^[4]利用预埋件对不同龄期的混凝土进行拉拔试验,并得出12~24 h为混凝土受爆破荷载影响最大的龄期区段。卢文波等^[5-6]从安全震动速度的角度,结合各个龄期下的允许极限拉应变进行理论推导,开创性地奠定了关于新浇混凝土安全震速的理论基础,使新浇大体积混凝土的安全震动速度不再局限于仅以工程经验的总结来确定。胡振峰等^[7]从损伤学的角度针对隧道初支的喷射混凝土建立了有限元模型,确定了混凝土容许损伤值以内最大炸药用量。

1 新浇混凝土动载下影响机理分析

工程振动引起的弹性波在不同介质中的传播规律不同,对同一批新浇混凝土成型过程中,不同时期所产生的影响也必然不同。混凝土是由胶凝材料、气孔、粗细骨料以及游离水分等成份经拌合而成的不均质体,随着混凝土的凝结硬化,混凝土的强度越来越高,各成份的占有率也会发生改变:晶体、胶体占有率增大,游离水分以及气孔占有率减小。由于短龄期阶段的混凝土中游离水分、气孔等成份占有率较大,集料间胶结能力较差,混凝土处于不稳定状态。

混凝土的凝结硬化过程中,不可避免地伴随有原生微孔洞和原生微裂纹。从损伤力学的角度来看,混凝土的破坏可以被看做是一个从原生微裂缝、体积元的破坏、宏观裂纹的产生、裂纹的发展与失稳直至破坏的演化过程。

在新浇混凝土成型过程中,受动载作用时易产生不同程度的微裂缝,随着胶结力的增大,这些微裂缝使骨料不能正常凝结,从而影响不断致密的内部结构,导致成型后的混凝土强度达不到设计标准的要求。因此,通过混凝土冲击破坏试验以及损伤试验,找出混凝土受冲击动载最薄弱的龄期区段,对提高混凝土的工程质量具有重要意义。

2 新浇混凝土基于龄期的动态损伤本构模型

由于混凝土材料在工程中的运用非常广泛,针对不同的工程特性与力学特性要求,应采用不同的数学物理方法,以及不同的角度来建立混凝土的本构模型。对于混凝土动态本构模型的研究大体分为两类,一是从微观的角度出发,以能量守恒与转换建立模型;二是进行大量试验,通过拟合试验数据得到动态

本构模型的经验公式。但这两种研究方法都具有一定的局限性,前者参数较多,难以确定;后者存在人为因素,不具有代表性。

若将混凝土试块划分为若干个微元体,从宏观角度看,微元体可视为质点;从细观角度看,微元体又足够大,是包含各种微孔洞、微裂纹的损伤体。分析时,假设微元破坏前服从胡克定律,即应力-应变呈线弹性,破坏后不再具备承载能力;并假设各微元体冲击强度服从概率统计分布,由于Weibull概率分布的取值范围和均值特点满足混凝土冲击破坏统计特征,所以可假设其概率密度函数 $p(F)$ 服从以 m 和 F_0 为参数的二参数Weibull分布,即

$$p(F) = \frac{m}{F_0} \cdot \left(\frac{F}{F_0}\right)^{m-1} \cdot \exp\left[-\left(\frac{F}{F_0}\right)^m\right] \quad (1)$$

式中: $p(F)$ 是混凝土强度为 F 时微元体的破坏概率;
 m 为混凝土岩石脆性参数;
 F 为混凝土微元强度随机分布变量;
 F_0 为混凝土的宏观平均强度。

定义损伤变量 D 为混凝土中已破坏微元数 N_f 与总微元数 N 之比,即

$$D = \frac{N_f}{N} \quad (2)$$

因此在区间 $[F, F+dF]$ 内已被破坏的混凝土微元数为 $Np(F)dF$ 。当加载到 F 时,已破坏的微元数

$$N_f = \int_0^F Np(y)dy \quad (3)$$

将式(1)和(3)代入式(2),得到损伤变量

$$D = \int_0^F p(y)dy = 1 - \exp\left[-\left(\frac{F}{F_0}\right)^m\right] \quad (4)$$

由于混凝土损伤体服从统计学概率分布的统计损伤模型,结合黏弹性模型,故可简化为损伤体与黏性体并联关系,如图1所示。

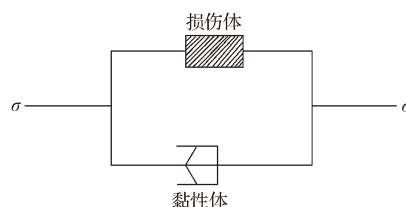


图1 混凝土微元体黏弹性损伤模型

Fig. 1 A viscoelastic damage model of concrete infinitesimal elements

由并联体的特性可知,组合体总应变等于各分应变,组合体总应力等于二者应力叠加,即可得出混凝土损伤本构模型

$$\sigma = E\varepsilon \cdot \exp \left[- \left(\frac{F}{F_0} \right)^m \right] + \eta \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (5)$$

式中: σ 为冲击强度;

E 为弹性模量;

ε 为应变;

η 为黏性系数;

t 为时间。

对于不同龄期的混凝土,微元体之间的黏结程度不同,其黏性系数 η 也不同。王世鸣等^[8]提出混凝土不同龄期的黏性系数 η 可以通过超声波无损检测技术来获取,并通过试验得出超声波在不同频率下的纵波波速与龄期的关系,其黏性系数 η 与龄期的关系为 $\eta=0.045\exp(0.01t)$ (其中 t 为时间, d)。将黏性系数 η 代入式(5)可得出混凝土基于龄期的动态损伤模型,即

$$\sigma = E\varepsilon \cdot \exp \left[- \frac{1}{m} \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_m} \right)^m \right] + 0.045\exp(0.01t) \cdot \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (6)$$

式中 ε_m 为峰值应变。

3 不同龄期混凝土的冲击强度试验

3.1 试验准备

本文参照一般工程背景下的实际状况,对试验模型进行如下基本简化与假设:

1) 将工程振动简化为一次性冲击振动;

2) 假设混凝土试块受载面为均匀、连续且各向同性;

3) 忽略混凝土结构形式的影响,仅研究其力学效应的相似性,仅考虑特定尺寸下混凝土的动力响应。

材料选用 C20 混凝土,模具选用直径为 50 mm、高 50 mm 的圆柱形波纹管,混凝土配合比如表 1 所示,最大骨料直径小于 12 mm。按照标准规程称量、拌合、搅拌、振捣、拆模、养护。为消除试验时应力集中的情形,浇筑 4 h 后采用 M7.5 水泥砂浆进行两端抹面,以控制试件平整度。混凝土试件样品如图 2 所示。

表 1 混凝土砂浆配合比

Table 1 Mortar mixture ratios of concrete

项目	配 料				
	水 /kg	泥 /kg	粗骨料 /kg	细骨料 /kg	水 /kg 速凝剂质量分数 /%
混凝土	1.00	2.15	1.98	0.45	2
砂浆	1.00		5.93	0.58	



图 2 混凝土试件

Fig. 2 Concrete specimens

3.2 试验过程

SHPB 冲击试验主要过程如下:

1) 按照配合比制备好混凝土试块,端部平整,正常养护、拆模,分组标号,测得基本物理特征参数;

2) 检查示波器、应变仪、高速摄像机、PC 端是否正常,确保能正常进行试验;

3) 在两杆相应位置用砂纸打磨、酒精擦拭后粘贴应变片,并使用电阻表检查应变片粘贴质量;

4) 开启气瓶阀门,调节工作气压;

5) 将锥形冲头回推至相应位置;

6) 将试块放置在透射杆与入射杆之间,试块与杆端尽量对齐以避免偏压现象,必要时需涂抹润滑剂确保试块与杆端紧密接触;

7) 将示波器调试至待触发状态,确保采集系统准备就绪;

8) 分别打开组合阀,将气压输入缸内后关闭组合阀;

9) 启动发射阀门,保存电波数据,收集破坏试样。

试验采用分离式 SHPB 压杆装置,如图 3 所示。采用高压氮气为动力发射冲头、入射杆和透射杆直径均为 50 mm,两杆分别贴两个应变片,连接示波器采集入射波、反射波以及透射波。



图 3 SHPB 压杆装置

Fig. 3 SHPB strut devices

在 SHPB 压杆试验中,如果气压调至过大、冲头调至过远、冲击速度过大则会导致试块粉碎性破坏,得出的数据及结论不准确;若气压过小、冲头离入射杆过近、冲击速度过缓则难以触发应变产生电波信

号。由于早期混凝土强度较低，骨料与水泥浆之间连接不紧密，故在进行冲击试验时难以控制临界入射能的大小。并且，在进行 SHPB 冲击试验时，混凝土试块在冲击前后是否能达到应力平衡是试验进行的关键。对 1~3 d 的混凝土进行了气压平衡测试，并得出最小气压下应力平衡曲线，如图 4 所示。

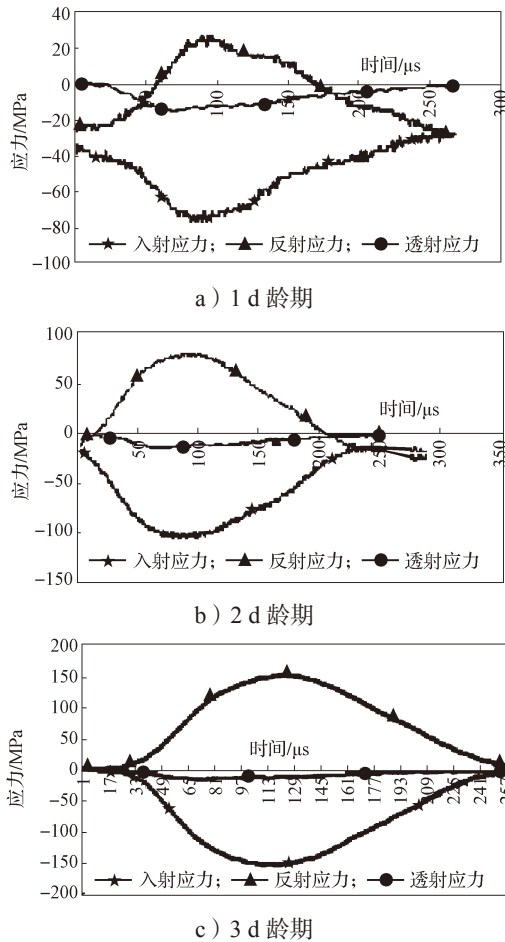


图 4 早龄期混凝土最小气压下应力平衡曲线对比
Fig. 4 Comparison between stress equilibrium curves of early age concrete under small pressures

由图 4 可以看出，随着龄期的增长平衡曲线越来越稳定，入射应力与反射应力偏移越来越小。1 d 龄期与 2 d 龄期的混凝土试块在小气压（保证纺锤形冲头能正常冲出的最小气压）冲击下，入射应力与反射应力存在较大偏差，平衡性较差，从而得出的应力-应变等曲线误差较大。而 3 d 龄期的混凝土试块在小气压下的平衡曲线无偏移现象，透射应力平稳持续，效果较好。所以，可选择在第 3 d 对混凝土试块进行最小冲击龄期的 SHPB 冲击破坏动载试验。

本试验同时制作两批试块共 69 个，第一批次 6 组试块，每组 8 个。每组试件在龄期为 1, 2, 3, 7, 14, 28 d 时采用霍普金森杆进行冲击试验和静载抗压试验。每个龄期选 2 个试件调试气压，用于确定临界入

射能。每个龄期选取 3 个试件，施加 100% 的临界入射能，使其处于临界破坏状态，采集入射波、反射波以及透射波，动载下典型的波形如图 5 所示。每个龄期选取 3 个试块用剪切流变仪进行静载抗压试验，控制加载速度为 5 N/s，测得其静载抗压强度。

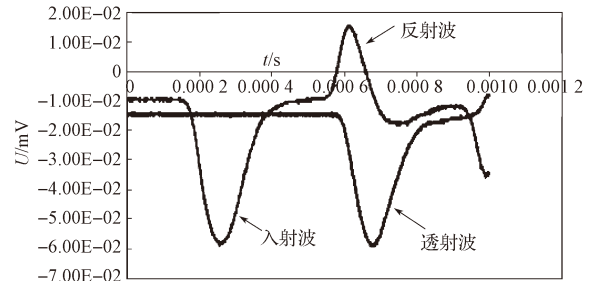


图 5 一维应力波示意图

Fig. 5 A sketch map of one dimensional stress waves

第二批 7 组试块，每组 3 个。其中 6 组试块分别在龄期为 0.5, 1, 2, 3, 7, 14 d 时采用霍普金森杆施加 50%~70% 临界入射能进行冲击加载，使其产生一定损伤，然后继续养护至 28 d。第 7 组试块无冲击，标准养护 28 d，留作对比组。28 d 时，每组试块用剪切流变仪进行静载抗压试验，控制加载速度为 5 N/s，记录其静载抗压强度。SHPB 压杆损伤后的试件具有端部效应，即端部破坏严重，见图 6a；28 d 龄期静载破坏的试件从中部开裂，开裂方向由内而外，裂片呈锥形，见图 6b。



a) 冲击加载损伤后的试件



b) 28 d 静载破坏后的试件

图 6 冲击损伤试件与静载破坏后的试件
Fig. 6 Impact damage test specimen and those undergoing static load failures

4 试验结果分析

4.1 早龄期混凝土静载、动载破坏试验分析

对不同龄期混凝土进行静载、动载破坏试验, 测量其力学参数, 试验结果如表 2 所示。

通过对比表 2 中混凝土不同龄期的静载试验数据可以得出, 0~3 d 内, 混凝土抗压强度从 0 MPa 增长至 6.9 MPa; 而到第 7 d, 混凝土强度为 9.0 MPa; 至第 14 d, 混凝土强度为 14.3 MPa; 终凝强度为 18.6 MPa。由此可知, 0~3 d 为混凝土强度增长最快速的时期, 此时的混凝土水灰比减少, 水化反应强烈, 微

结构中界面过渡区的孔隙体积与尺寸快速减小, 从而导致其强度快速提升。而在 3~7 d 龄期, 水化反应减弱, 结晶不良的 C-S-H 和固态氢氧化钙、次生钙矾石开始填充于大钙矾石与各类晶体构架的孔隙之间, 骨料与水泥浆之间的过渡区开始逐渐密实。7 d 以后, 水化反应进入后期, 强度增长缓慢, 随着混凝土龄期的增长, 界面过渡区的强度开始超越砂浆本体强度。而混凝土弹性模量的增长速率相对稳定, 即使混凝土龄期达到 14 d, 水化反应进入后期, 弹性模量仍保持稳定增长, 14~28 d 龄期内弹性模量从 4.96 GPa 增长到 8.11 GPa。

表 2 不同龄期混凝土静载、动载破坏试验结果

Table 2 Impact compressive strength of concrete under static load and dynamic load during different curing periods

组次	振动时龄期 /d	静载下混凝土抗压强度 /MPa			100% 临界入射能下混凝土冲击抗压强度 /MPa			静载下弹性模量 /GPa	动载下峰值应变
		①	②	③	①	②	③		
1	1	3.2						1.20	
2	2	4.6	4.0					1.76	
3	3	6.9	7.2	5.8	13.8	10.0	12.6	1.98	0.008 8
4	7	9.0	7.5	8.8	19.1	16.5	18.0	2.56	0.009 2
5	14	14.3	12.2	10.0	31.7	29.4	30.8	4.96	0.009 7
6	28	18.6	16.9	18.4	36.3	40.2	29.3	8.11	0.008 5

注: 表中的①②③表示同一组 3 个不同的试件, 下同。

众所周知, 混凝土为准脆性材料, 在静载作用下其破坏特性与龄期的关系为: 早龄期混凝土具有一定的黏性, 随着混凝土龄期的增大, 这种黏性逐渐减小, 峰值应变无明显变化, 极限应变逐渐变小, 直至 28 d 时试块呈准脆性破坏。

而在冲击动载下, 混凝土的变形特征不仅取决于混凝土本身的物理特性, 冲击入射能、冲击应变率等都是决定性的因素。基于目前的研究, 三波法是 SHPB 最优的数据处理方法。通过对第一批试块进行冲击破坏试验, 分析入射波、反射波、透射波信号, 可得动载下不同龄期时, 混凝土试块的应力 - 应变曲线 (图 7) 以及冲击抗压强度 (图 8)。

由图 7 可知, 冲击荷载下混凝土各龄期的峰值应变较稳定, 冲击破坏下的峰值应变约为静载下峰值应变的 1/2。混凝土前期由黏弹性向准脆性转变这一特性, 在冲击动载下的应力 - 应变曲线中并无明显体现。

由图 8 可知, 7~14 d 龄期区段内混凝土冲击抗压强度提升幅度较大, 14~28 d 龄期区段冲击抗压强度提升较缓。对比静载、动载破坏试验的数据得出: 3 d 龄期的混凝土冲击动载下抗压强度提升 100%, 7 d 龄期混凝土冲击动载下抗压强度提升 112%, 14 d 龄期的混凝土冲击动载下抗压强度提升 121%, 28 d 龄期混凝土冲击动载下抗压强度提升 95%。由此图可知, 各个同龄期的冲击抗压强度为其静载抗压强度的 2 倍

左右, 14 d 龄期的混凝土冲击抗压强度相对静载抗压强度提升最大。

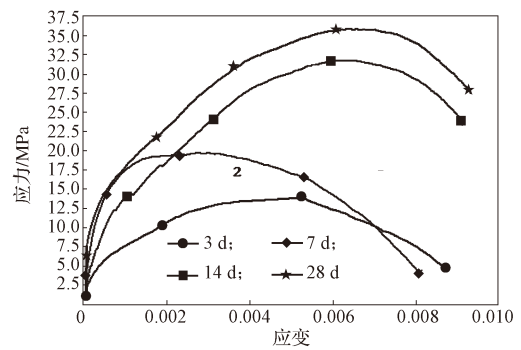


图 7 不同龄期混凝土的应力 - 应变曲线

Fig. 7 Stress-strain curves of concrete at different ages

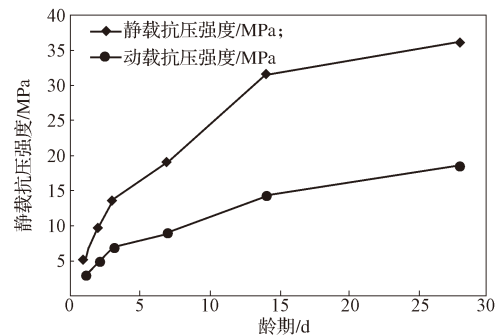


图 8 不同龄期的混凝土抗压强度

Fig. 8 Compressive strength of concrete during different curing periods

在 SHPB 压杆破坏试验中, 通过观察来判断不同龄期混凝土的破坏模式, 如图 9 所示。

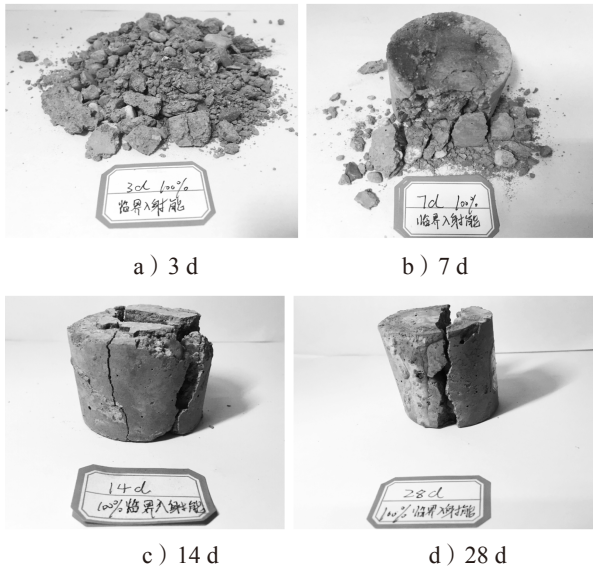


图 9 不同龄期混凝土冲击破坏模式

Fig. 9 Impact damage mode of concrete at different ages

由图 9 可知, 0~7 d 的混凝土在受 100% 临界入射能的情况下呈粉碎状, 其中 0~3 d 的混凝土破碎程度相对较高; 7 d 后的混凝土碎裂成大块, 并伴随贯穿裂纹; 28 d 龄期混凝土碎裂成 2~3 块, 并伴随裂纹。这表明, 随着混凝土凝结硬化过程中强度的提高, 混凝土的整体性加强, 受冲击动载的临界破坏状态随龄期呈现出不同的破坏模式。总体上, 随龄期的增长, 混凝土受冲击破坏的破碎程度越来越低。

4.2 早期混凝土动载损伤试验分析

通过 SHPB 装置对不同龄期的 6 组混凝土施加 50%~75% 的冲击荷载, 继续养护至 28 d, 测得其终凝抗压强度与强度降低率, 如表 3 和图 10 所示, 并得出卸载龄期与终凝强度的关系曲线, 如图 11 所示。

表 3 不同龄期受冲击混凝土试块终凝后抗压强度与强度降低率

Table 3 Compressive strength and strength reduction of concrete block with impact concrete during different curing periods

组次	振动时 龄期/d	终凝时静载抗压强度 /MPa				抗压强度 降低率/%
		①	②	③	平均值	
1	0.5	19.3	18.4	18.6	18.8	-4.45
2	1	9.6	7.8	6.3	7.9	56.03
3	2	9.8	10.3	8.8	9.6	46.38
4	3	13.6	12.9	14.2	13.6	24.49
5	7	16.0	15.2	14.8	15.3	14.66
6	14	17.6	17.0	17.1	17.2	4.26
7	无振动	18.6	16.9	18.4	18.0	

由表 3 和图 10~11 可知, 在 1 d 龄期以内施加冲击荷载, 混凝土终凝抗压强度反而高于无冲击振动

的抗压强度, 即强度降低率为负值; 在 1~4 d 龄期内施加冲击荷载, 其终凝强度均低于无冲击振动时的 80%, 即抗压强度降低率为 20% 以上, 其中, 1 d 龄期时影响最大, 强度降低率达到 56.03%; 14 d 以后, 强度降低率基本控制在 5.00% 以内。这表明, 1~4 d 龄期为最薄弱龄期区段, 在此区段若受到冲击荷载作用, 必将较大程度上影响混凝土终凝强度; 4~7 d 为次薄弱龄期区段。

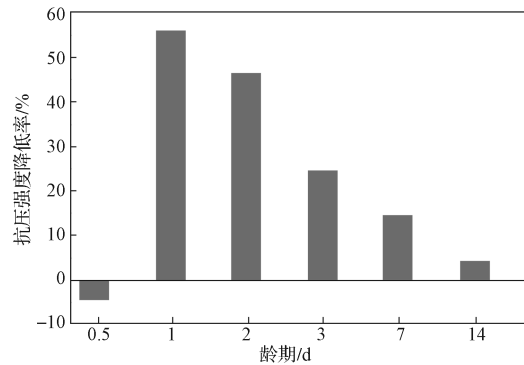


图 10 不同龄期混凝土冲击抗压强度降低率

Fig. 10 Impact compressive strength of concrete at different ages

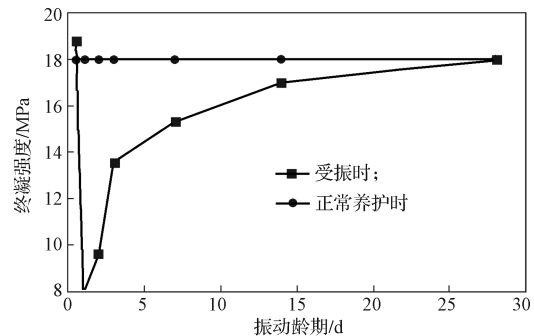


图 11 卸载龄期与终凝强度的关系曲线

Fig. 11 Duration of loading and the final setting strength

究其原因: 在 0~1 d 内, 混凝土试件内水泥浆未固结, 骨料与水泥浆处于游离状态, 氢氧化钙、细沙骨料等小颗粒未完全填充在粗骨料与水泥浆之间的界面过渡区内, 在受到一定入射能的冲击动载作用下, 反而起到“捣实”的效果, 使混凝土强度提高, 出现了强度降低率为负值的情况。随着龄期的增长, 界面过渡区的介质强度逐渐超越水泥浆基体区的强度; 然而, 过渡区是一个微裂纹发育区域, 微裂纹的大量存在是不可避免的, 也就是说, 在混凝土受到外部荷载以前, 其内部过渡区就已存在微裂纹。在龄期 1~4 d 内, 固相体之间黏附力较弱, 受到冲击时微裂纹易发展、增多、相互贯通形成内部裂缝, 从而会对混凝土强度的发展产生不可避免的影响; 在养护成型后再受到静载压缩作用时, 内部裂缝空隙较大、承载力较弱, 在较小的外力作用下就可能产生宏观裂纹,

继而导致试块整体失稳破坏。

通过不同龄期混凝土的冲击损伤试验,定量得出了不同龄期的混凝土受冲击损伤对终凝强度的影响。在大型混凝土建筑物、构筑物工程中,为了保证混凝土的强度与质量,应当对龄期为1~4 d的混凝土采取高级预警机制,防止其受到外力冲击;对4~7 d的混凝土采取次级预警机制。

5 结论

通过上述研究可得如下结论:

1) 不同龄期混凝土试块在静载与冲击动载下的破坏试验结果表明,在冲击动载下不同龄期混凝土抗压强度均为静载下抗压强度的2倍左右,且随龄期的增长,在各龄期的临界入射能下,混凝土受冲击破坏的破碎程度越来越低。

2) 新浇混凝土试块在不同龄期施加50%~75%临界入射能的冲击损伤试验结果表明,1~4 d龄期损伤的混凝土终凝强度均低于无冲击振动时的80%,故1~4 d为冲击荷载下最薄弱龄期区段,其中1 d龄期时强度降低率达到峰值。

参考文献:

- [1] 韩海林,李国华,魏建东,等.非破损方法在C30新浇筑混凝土受震后性能检测中的应用[J].四川建筑科学研究,2011,37(4):166-169.
HAN Hailin, LI Guohua, WEI Jiandong, et al. Application of the Non-Destructive Method in the Property Test of C30 Fresh Concrete After Shaken[J]. Sichuan Building Science, 2011, 37(4): 166-169.
- [2] 李勇,苏德志,贾加力.劲性混凝土柱施工技术难点及质量控制[J].铁道建筑技术,2013(12):118-122.
LI Yong, SU Dezhi, JIA Jiali. Technical Difficulties and Quality Control of the Composite Steel Concrete Column Construction[J]. Railway Construction Technology, 2013(12): 118-122.
- [3] 李岩峰,刘熙媛,张建民,等.干硬性夯实混凝土与普通浇筑混凝土材料特性对比研究[J].河北工业大学学报,2011,40(4):85-90.
LI Yanfeng, LIU Xiyuan, ZHANG Jianmin, et al. Comparative Study on Material Characteristics Between Rammed Dry Concrete and Ordinary Depositing Concrete[J]. Journal of Hebei University of Technology, 2011, 40(4): 85-90.
- [4] 单仁亮,耿慧辉,吕进阳,等.新喷混凝土强度受爆破荷载影响的模型试验[J].煤炭学报,2014,39(11):2157-2164.
SHAN Renliang, GENG Huihui, LÜ Jinyang, et al. Model Tests on the Strength of Young Shotcrete Under Blasting Loads[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(11): 2157-2164.
- [5] 卢文波.新浇筑基础混凝土爆破安全震动速度的确定[J].爆炸与冲击,2002,22(4):327-332.
LU Wenbo. Determination of the Limit of the Safety Velocity for Young Foundation Concrete Under Blasting Vibration Loading[J]. Explosion and Shock Waves, 2002, 22(4): 327-332.
- [6] 卢文波,赖世骧,朱传云,等.三峡工程岩石基础开挖爆破震动控制安全标准[J].爆炸与冲击,2001,21(1):67-71.
LU Wenbo, LAI Shixiang, ZHU Chuanyun, et al. Safety Standards of Blast Vibrations Adopted in Rock Base Excavation of Three Gorge Project[J]. Explosion and Shock Waves, 2001, 21(1): 67-71.
- [7] 胡振锋,吴子燕,李政.喷射混凝土衬砌爆破损伤的数值分析[J].矿业研究与开发,2005,25(5):71-75.
HU Zhenfeng, WU Ziyan, LI Zheng. Numerical Analysis on the Blasting Damage of Shotcrete Lining[J]. Mining Research and Development, 2005, 25(5): 71-75.
- [8] 王世鸣,李夕兵,宫凤强,等.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 Shiming, LI Xibing, GONG Fengqiang, et al. A Numerical Analysis on the Blasting Damage of Shotcrete Lining[J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(2): 143-149.

(责任编辑:邓光辉)