

文章编号: 1001-1455(2013)03-0243-06

# 爆破冲击对早龄期混凝土强度影响的实验研究<sup>\*</sup>

李毅敏<sup>1</sup>,高政国<sup>1</sup>,朱庆庆<sup>1</sup>,黄晓波<sup>2</sup>,黄新<sup>1</sup>

(1. 北京航空航天大学交通科学与工程学院,北京 100191;

2. 中国人民解放军空军工程设计研究局,北京 100077)

**摘要:**以某大型全碎石填方机场工程为背景,针对早龄期混凝土受爆破振动损伤开展了实验研究。通过室内实验模拟场地爆破振动作用于早龄期混凝土试块,测量了不同龄期混凝土受振损伤后的强度。并将实验结果与有限元数值计算和现场爆破场地测试数据相结合,分析了早龄期混凝土损伤后的强度增长规律,建立了场地爆破与混凝土结构浇筑平行施工的安全技术指标。

**关键词:**固体力学;安全技术指标;模型实验;早龄期混凝土;爆破振动

**中图分类号:** O346.4

**国标学科代码:** 1301540

**文献标志码:** A

在大型场地工程中,爆破开挖和混凝土浇筑施工常常平行开展。开山爆破振动会对早龄期混凝土结构带来不利影响。早龄期混凝土强度没有完全增长,频繁冲击振动容易对混凝土造成损伤。爆破振动损伤对早龄期混凝土的强度增长的影响需要评价,以评估后期混凝土结构承载力能否达到设计要求,从而确定控制爆破和混凝土浇筑施工安全的技术指标。

目前,爆破振动对早龄期混凝土损伤的相关研究较少。通常认为在爆破振动作用下龄期小于3 d的混凝土最容易受到损伤。例如在法国,禁止在龄期小于1 d的混凝土附近进行爆破施工,允许在龄期1~5 d的混凝土30 m外爆破施工,并规定爆振速度小于5 cm/s<sup>[1]</sup>,而这会延缓施工进度并造成一定的经济损失。为此,对爆破施工的安全距离和混凝土养护时间的影响有了许多实验<sup>[2-3]</sup>,研究爆破振动对早龄期混凝土的影响,并提出了一些新的认识和技术要求。

本文中,为研究爆破振动对场地早龄期混凝土安全的影响,以某大型全碎石填方机场工程为背景,通过室内爆破冲击模型实验和现场爆破测试,结合有限元数值计算获得爆破冲击作用下早龄期混凝土强度随受振龄期、冲击速度的变化情况,建立工程适用的爆破施工安全指标。

## 1 模拟实验

### 1.1 实验

混凝土强度等级按立方体抗压强度标准值确定,根据GB 50010-2002《混凝土结构设计规范》中标准方法,制作边长100 mm的立方体C30混凝土试件<sup>[4]</sup>,共78个。实验装置如图1所示。

由于破坏性实验不能重复,为避免混凝土离散性,养护搬运条件以及强度实验中加载速度、试验机稳定性等因素对实验结果的影响,按不同受振龄期、冲击加速度和养护条件,共有26组试块,每组3个试块,实验结果取中值。

为研究不同受振龄期和振动速度对混凝土试块强度的影响,重锤高度 $H=70$  cm,分别在龄期为1、2、3、5、7和10 d时冲击混凝土试块,每组试块只在其对应的龄期受冲击。由加速度传感器测得,此时混凝土试块所受最大加速度 $a_1=28.6g$ 。调整重锤高度 $H=35$  cm,以加速度 $a_2=17.6g$ 冲击试块。养护龄期分别为18、28 d,另有2组未受振动,以作对比。

\* 收稿日期: 2012-01-16; 修回日期: 2012-03-07

基金项目: 海军后勤部科研项目(BY210B040)

作者简介: 李毅敏(1959—),男,高级工程师。

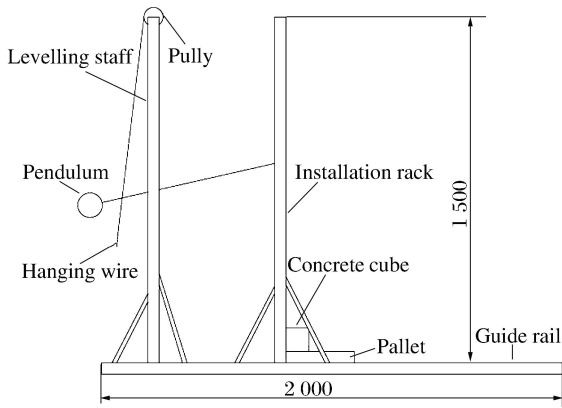


图 1 落锤实验装置

Fig. 1 Pendulum experiment setup

将受冲击后的混凝土试块在标准条件下水养护。为分析混凝土试块受振后,经不同养护时间的愈合程度是否相同,将受振龄期和冲击加速度相同的混凝土试块,放在相同的养护箱内,分别养护 18 和 28 d 后取出,进行抗压强度实验。

## 1.2 结果分析

由加速度传感器测得的加载加速度如图 2 所示,该加载比实际爆破加载作用时间短、强度大。典型的混凝土应力应变曲线的实测结果如图 3 所示。不同受振龄期的混凝土试块养护 18 和 28 d 的强度如表 1 所示,表中比率  $f_c/f_{c0}$  为不同受振龄期强度与未受振混凝土强度的比。

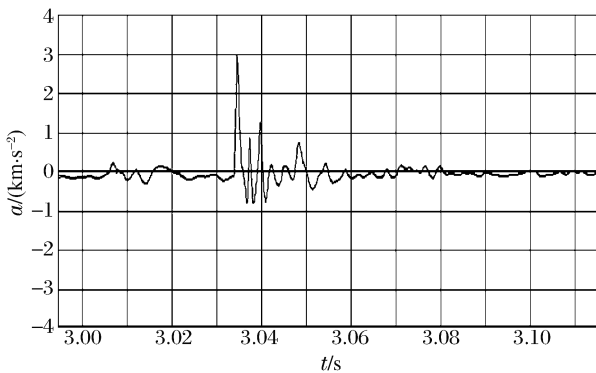


图 2 典型的加载加速度

Fig. 2 Impact acceleration

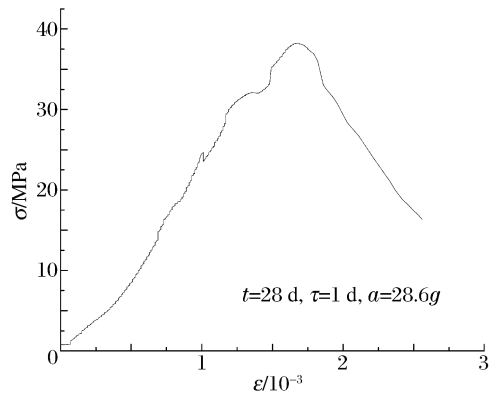


图 3 实测的应力应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curve of concrete cube

由表 1 可见,冲击加速度较大时,受振动后的混凝土强度均略有降低。在龄期为 1~2 d 时受振的混凝土,经 28 d 养护后,其强度所受到的影响比受振龄期 3~5 d 的混凝土小,这是由于在此期间水泥水化作用<sup>[5-6]</sup>尚未完成,振动在混凝土内部产生的裂隙,在潮湿养护的条件下可以通过水化作用逐渐愈合。龄期 3 d 后,振动对混凝土强度影响随受振龄期增加而减小。当冲击加速度减小时,混凝土强度随龄期变化趋势大致相同,但影响不明显。对于养护 18 d 的混凝土,其强度与受振龄期关系与养护 28 d 的混凝土相近,强度减小量均在受振龄期 3~5 d 时最大。因此在龄期 3~5 d 的混凝土结构附近应限制爆破施工,以避免对混凝土结构强度造成不利影响。

对普通硅酸盐水泥配制的混凝土,强度与龄期关系为<sup>[7]</sup>

$$f_c(t) = (0.000\ 075\ 3t^3 - 0.005\ 15t^2 + 0.121t)f_k \quad (1)$$

式中: $t$  为混凝土龄期, $f_c(t)$  为龄期  $t$  对应的混凝土抗压强度, $f_k$  为混凝土 28 d 的标准强度。不考虑损伤的抗压强度随龄期增长曲线如图 4 所示。根据式(1)得到不同龄期混凝土抗压强度,并取混凝土抗拉

强度  $f_t = f_c/10$ , 如表 2 所示。

表 1 混凝土试块强度

Table 1 The strength of concrete cube samples

t/d	$f_{c0}/\text{MPa}$	$\tau/\text{d}$	$\alpha_1 = 28.6\text{g}$		$\alpha_1 = 17.6\text{g}$	
			$f_c/\text{MPa}$	$f_c/f_{c0}$	$f_c/\text{MPa}$	$f_c/f_{c0}$
28	42.78	1	39.92	0.933	41.74	0.976
		2	39.82	0.931	42.51	0.994
		3	37.43	0.875	41.00	0.958
		5	39.30	0.919	41.29	0.965
		7	40.04	0.936	43.95	1.027
		10	40.14	0.938	44.20	1.033
18	41.38	1	37.96	0.917	41.09	0.993
		2	38.57	0.932	40.01	0.967
		3	36.90	0.892	38.75	0.936
		5	37.61	0.909	37.94	0.917
		7	37.93	0.917	39.37	0.951
		10	40.00	0.967	41.40	1.000

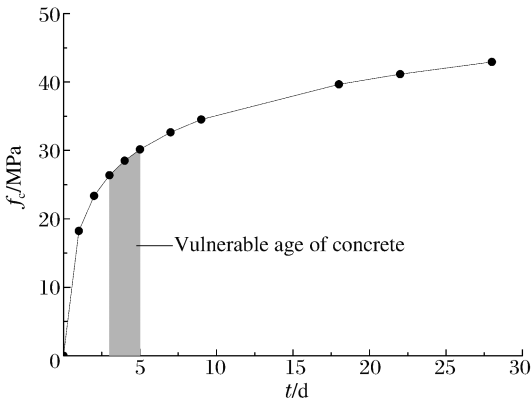


图 4 混凝土强度增长曲线

Fig. 4 Increasing curve of strength of concrete

表 2 混凝土参数

Table 2 Parameters of concrete

$\tau/\text{d}$	$f_c/\text{MPa}$	$f_t/\text{MPa}$	$E/\text{MPa}$	$f_c/f_{c28}$
1	4.959	0.495	2.261	0.115
2	9.497	0.949	2.725	0.221
3	13.633	1.363	3.023	0.317
5	20.776	2.077	3.423	0.484
7	26.544	2.654	3.700	0.618
28	42.924	4.292	4.878	1.000

虽然施工期爆破振动强度不高,但对一定条件下

的早龄期混凝土有一定的影响。从实验结果可以

分析,龄期不超过 3 d 的混凝土由于水化过程未完成,受爆破振动后强度增长空间大,不会对混凝土最终强度有显著的影响。龄期超过 5 d 的混凝土强度已有较大增长,受振后损伤较小,对混凝土最终强度同样没有显著影响。而龄期 3~5 d 的混凝土受振后有一定的损伤残留,表现为出最终强度的减小。根据实验结果,可将龄期 3~5 d 的混凝土受振混凝土强度折减系数取为 0.87。

## 2 爆破施工安全分析

### 2.1 有限元数值模拟

实验表明,混凝土的弹性模量随着龄期的增长而变化。对刚拌合的流态混凝土,其弹性模量可视为零,随着水化作用的进行,弹性模量逐渐增长,最后趋向于一个稳定的值。可以把混凝土弹性模量看作是龄期的函数<sup>[8]</sup>,即

$$E(t) = E_0(1 - e^{-at^b}) \tag{2}$$

式中: $a$ 、 $b$ 、 $E_0$  为参数,对普通混凝土,通常取  $a = -0.4$ ,  $b = 0.34$ ,  $E_0 = 1.41E_{c28}$ 。不同龄期混凝土参数见表 2。

由以上参数,利用有限元软件模拟不同龄期的混凝土受爆破冲击后的内部响应。模型采用 solid 65 号单元,对底部施加全约束,如图 5 所示。对该块体施加的水平冲击荷载如图 6 所示。得到混凝土内部

各点加速度与受振龄期和受振荷载峰值的关系,如图 7 所示。

由图 7(a)可见,在较大的加速度荷载下,受振龄期越小,混凝土内部动力响应越大。说明早龄期混凝土的弹性模量和强度都很低,在受到较大冲击荷载时受振响应较大,容易发生破坏。

由图 7(b)可见,典型的工程爆破冲击作用下,龄期 3 d 混凝土的加速度响应为龄期 18 d 混凝土响应的 1.4 倍。数值模拟中未考虑早龄期混凝土材料的阻尼作用,并且经现场实验与数值模拟结果验证,爆破振动对混凝土影响较小,可视为弹性范围内变化。综合考虑早龄期混凝土受振后折减与动力特性对响应的影响,本工程中取动力响应增大系数为 1.5,进行施工安全设计。

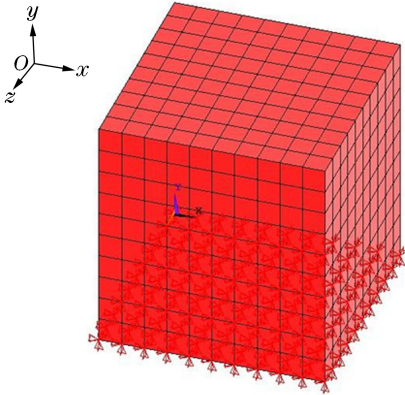


图 5 有限元模型

Fig. 5 FEM model

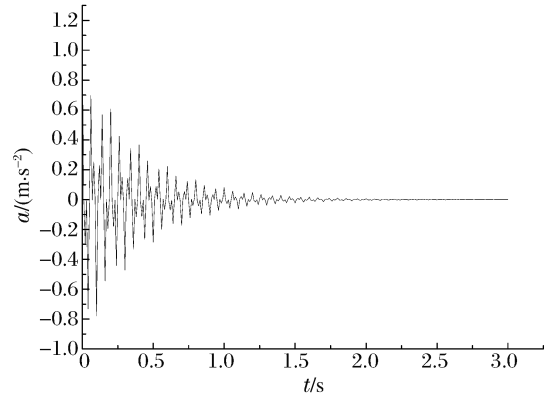


图 6 振动冲击

Fig. 6 Impact load

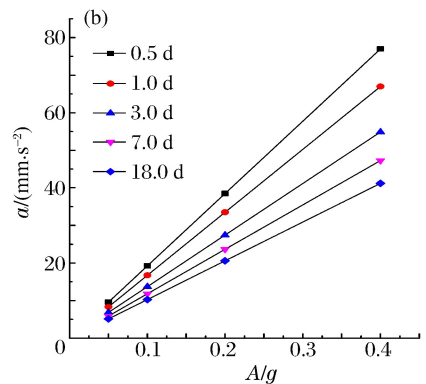
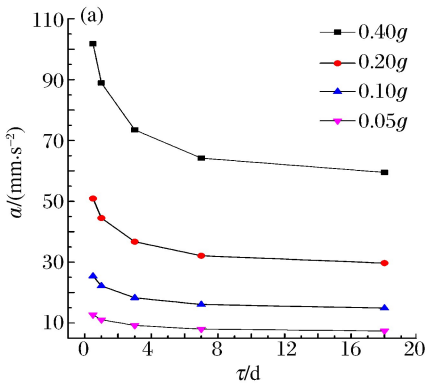


图 7 混凝土内部加速度

Fig. 7 Internal accelerations of concrete

## 2.2 场地实验与施工安全指标

爆破振动速度一般用质点振动峰值速度描述,通常采用萨道夫斯基经验公式<sup>[7]</sup>,即爆破振动衰减公式为:

$$v = K \left( \frac{R}{Q^m} \right)^{-\alpha} \quad (3)$$

式中: $v$ 为质点振动速度,cm/s; $Q$ 为同时起爆单段最大装药量,kg; $K$ 为与介质和爆破方法有关的常数; $\alpha$ 为地震波的衰减指数; $R$ 为爆源至被保护物的距离,m; $m$ 为药量指数。在大爆破时将萨道夫斯基经验公式中的药量指数取为 1/3。在某大型全碎石填方机场工程现场,对爆破区域附近的各个测点振动速度进行测量,测点布置如图 8 所示,振动波形如图 9 所示。根据现场数据(见表 3),利用最小二乘法回归,得到参数: $K=5.869, \alpha=0.587$ 。

按照 GB 6722-2003《爆破安全规程》中允许标准,钢筋混凝土结构房屋安全标准取为 3.0 cm/s,考虑早龄期混凝土受振强度折减与动力响应增大效应,取荷载增大系数为 1.5,最终确定本工程早龄期混

凝土安全标准为 2.0 cm/s。按照公式(3)计算安全距离,如表 4 所示。

表 4 为本工程爆破安全施工的技术指标。通过现场工程检测验证,场地混凝土建筑在爆破施工后未发生质量事故。

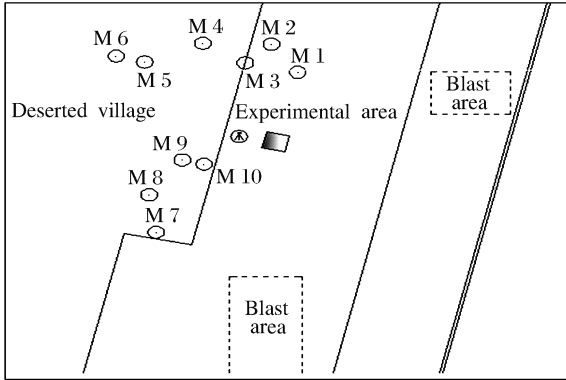


图 8 测点布置  
Fig. 8 Measured points

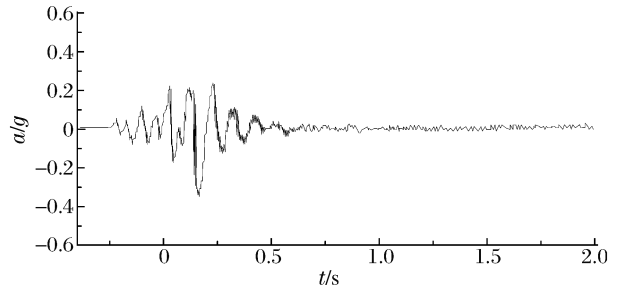


图 9 实测振动波形  
Fig. 9 Measured waves

表 3 实测点最大振动速度  
Table 3 Maximum vibration velocities  
at different measuring points

测点	Q/kg	R <sub>min</sub> /m	v <sub>max</sub> /(cm·s <sup>-1</sup> )
1	1 221	2 600	0.14
2	3 540	1 800	0.49
3	1 232	850	0.35
4	1 120	2 450	0.26
5	2 600	1 050	0.49

表 4 不同单响药量的安全距离  
Table 4 Safety distances of  
different single charge quantities

Q/kg	R <sub>s</sub> /m
1 221	66.89
3 540	95.39
1 232	67.09
1 120	65.00
2 600	86.06

### 3 结 论

(1)早龄期混凝土受爆破冲击后,会产生一定的强度损伤。冲击加速度越大,早龄期混凝土受损伤越明显。对于龄期小于 3 d 的混凝土试块,受爆振冲击损伤后,经过 18 或 28 d 的养护后其损伤程度会大大减轻,其裂缝因水化作用而得到相当程度的愈合。

(2)混凝土在龄期为 3~5 d 时易受爆破振动损伤,其最终强度受到的影响相对较大,爆破动力响应也与原混凝土结构有显著的差别。因此对于爆破场地的混凝土结构平行施工,需考虑混凝土龄期制定相应的爆破施工安全指标。

(3)较大的加速度荷载下,受振龄期越小,混凝土内部动力响应越大,并且当受振荷载较大时,这种影响也越大。场地安全爆破距离可通过现场测试获得。

### 参考文献:

[1] 朱传统,张正宇,佟锦岳. 爆破对新浇混凝土的影响和控制标准的研究[J]. 爆破,1990,12(3):28-32.  
Zhu Chuan-tong, Zhang Zheng-yu, Tong Jin-yue. Research on effects and control of young concrete under blast[J]. Blasting, 1990,12(3):28-32.

[2] Ansell A. In situ testing of young shotcrete subjected to vibrations from blasting[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2004,19(6):587-596.

[3] Zhang Chang-suo, Hu Feng, Zou Steve. Effects of blast induced vibrations on the fresh concrete lining of a shaft [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2005,20(2):356-361.

- [4] 金贤玉. 早龄期混凝土试验研究及损伤分析与模糊评价[D]. 杭州:浙江大学, 1997.
- [5] 陈明, 卢文波. 超早龄期混凝土爆破安全振动速度的讨论[J]. 工程爆破, 2006, 12(2): 79-82.  
Chen Ming, Lu Wen-bo. Safety vibration velocity of fresh concrete under blasting vibration[J]. Engineering Blasting, 2006, 12(2): 79-82.
- [6] 冯乃谦. 实用混凝土大全[M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 2005: 234-255.
- [7] 朱伯芳. 大体积混凝土温度应力与温度控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 1999: 142-248.
- [8] 杨伟林, 杨柏坡. 爆破地震动效应的数值模拟[J]. 地震工程与工程震动, 2005, 25(1): 8-13.  
Yang Wei-lin, Yang Bai-po. Numerical analysis of explosion seismic effect[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2005, 25(1): 8-13.

## An experimental investigation into effects of blast-induced vibration on strength of early-age concrete \*

Li Yi-min<sup>1</sup>, Gao Zheng-guo<sup>1</sup>, Zhu Qing-qing<sup>1</sup>, Huang Xiao-bo<sup>2</sup>, Huang Xin<sup>1</sup>

(1. School of Transportation Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;

2. Air Force Engineering Design and Institute of PLA, Beijing 100077, China)

**Abstract:** By taking a large airport engineering as an example, the damages to early-age concretes under blasting vibration were experimentally investigated. Pendulum experiments were carried out on the C30 plain concrete cubic specimens at different ages. And the uniaxial compression experiments were conducted on the two groups of concrete cubic specimens, which were subjected to the same impact loads at the same ages, at 18 and 28 days of the same water curing, respectively. The corresponding uniaxial compressive strengths were measured. The results show that the curing time can affect the uniaxial compressive strengths of early-age concretes exposed to blasting vibration and blasting vibration can more obviously decrease the uniaxial compressive strengths of 3-5 days old concretes. Based on the above experimental results, the compressive strength evolution of early-age concretes subjected to blasting vibration at different curing ages was revealed by combining with the site test and the numerical simulation. And the security technology indexes were proposed for large engineering construction projects consisting of concreting and blasting.

**Key words:** solid mechanics; security technology index; model experiment; fresh concrete; blasting vibration

\* Received 16 January 2012; Revised 7 March 2012

Corresponding author: Gao Zheng-guo, gaozg@buaa.edu.cn