

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2016.03.012

紧邻建(构)筑物水下爆破振动安全判据研究综述*

苏莹^{①②} 吴立^② 彭亚雄^② 周瑞锋^② 苏小毛^③

①武汉科技大学城市学院(湖北武汉,430083)

②中国地质大学(武汉)(湖北武汉,430074)

③湖南创意爆破工程有限公司(湖南长沙,410001)

[摘要] 简要阐述了水下爆破作用下建(构)筑物安全性能评价指标,综合分析了振动幅值单因素安全判据在水下爆破紧邻建(构)筑物安全性能评定中的应用,并介绍了振速-频率双因素安全判据理论研究方法及各安全判定标准,分析讨论了两种判据在爆破振动安全评定考虑因素与应用范围上的不足。基于累积损伤机理及振动叠加理论,介绍了爆破振动持续时间及微差爆破延时间隔对建(构)筑物安全性能的影响。提出爆破振动安全判据应从爆破振动持续时间及微差爆破延时间隔这两方面加以完善,并建议在实际工程中采用最佳微差延时间隔以达到最优降噪效果。

[关键词] 安全判据;振动速度;振动频率;振动持续时间;微差爆破延时间隔

[分类号] TD235

引言

高强度的爆破振动会使周边建(构)筑物局部失稳甚至整体破坏^[1-2]。因此,必须采用合理的爆破振动安全判据,对紧邻建(构)筑物的稳定性与安全性进行判断,使其振动状态始终处于安全可控的范围内。水下爆破时紧邻建(构)筑物受迫振动的主要评价指标包括:振动速度、振动频率、振动持续时间等^[3-4]。工程上多采用爆破质点振速单因素安全判据或综合考虑振速-频率的双因素安全判据^[5]。

爆破振速安全判据考虑因素过于单一,不能很好地反映建(构)筑物受迫振动的真实状态,目前已很少运用于实际工程^[6]。振速-频率的双因素安全判据考虑了频率作用下质点安全振速的折减,与单因素判据相比较,更为合理^[7-9]。因而,近年来各国在原安全标准基础上,提出了考虑频率因素的振速安全标准。

爆破振动持续时间会导致振动叠加,从而影响结构动力响应特征^[10]。国内外学者也对此开展了一系列理论研究。凌同华等^[11]利用时-能密度法,对微差爆破延期时间进行优化分析,得出爆破振动幅值最小情况下的最优微差延期时间范围;Aldas等^[12]基于对振动叠加理论与微差爆破干扰降振理论的研究,开发了一个系统的爆破振动监测控制体

系。但目前工程领域尚无可指导实践的统一安全判据,需要进行研究探讨。

1 水下爆破安全判据

1.1 振动幅值单因素安全判据

1.1.1 爆破振动强度因子

单因素爆破振动安全判据可以用统一的爆破振动强度因子 A 来表示,其经验公式为^[13]:

$$A = KQ^{\alpha}r^{\beta} \quad (1)$$

式中: A 为测点所在地质点爆破振动强度因子(振动速度、位移或加速度); r 为爆心至测点之间的距离, m ; Q 为单段装药量, kg ; K 、 α 、 β 为与地质条件有关的系数。

霍永基等^[14]研究发现,爆破振动强度因子中,振动速度与建(构)筑物的稳定性与安全性关系更为紧密,对其影响更大,因而在水下爆破工程中,一般采用振动速度来判断紧邻建(构)筑物受迫振动的安全性与稳定性。

1.1.2 质点爆破振速

质点爆破振速可按 Sadaovsk 公式求解^[15-16]:

$$v = K\left(\frac{Q^{\varepsilon}}{r}\right)^{\alpha} \quad (2)$$

式中: v 为待测质点爆破振速, cm/s ; ε 为与药量相关的指数; K 、 α 为与地质条件有关的系数,其参考取值

* 收稿日期:2015-07-18

基金项目:湖北省科技厅自然科学基金重点项目(2013CFA110);中国地质大学(武汉)教学实验室开放基金(SKJ2014065)

作者简介:苏莹(1991-),女,硕士,主要从事工程爆破、围岩动力响应方面的研究。E-mail:18672765612@163.com

通信作者:吴立(1963-),男,教授,博导,主要从事工程爆破、围岩动力响应方面的研究。E-mail:lwu@cug.edu.cn

如表 1 所示。

表 1 爆区不同岩性的 K 、 α 值

Tab. 1 Value of K and α under different lithological characters in blasting area		
岩性	K	α
坚硬岩石	50 ~ 150	1.3 ~ 1.5
中硬岩石	150 ~ 250	1.5 ~ 1.8
软岩石	250 ~ 350	1.8 ~ 2.0

K 、 α 的取值随着爆破类型、方式的不同而不同;同时,由于实际工程中地质条件复杂多变,该取值多采用现场试验或回归分析等方法获得。 ε 一般取 1/2 或 1/3^[17]。对实测数据分别用 $\varepsilon = 1/2$ 和 $\varepsilon = 1/3$ 进行回归分析,发现 $\varepsilon = 1/3$ 时,剩余标准差较小,因此,一般情况下,取 $\varepsilon = 1/3$ 较为合理^[18-19]。

由于水下爆破振速测量环境与爆破影响因素的复杂性,采用萨达夫斯基公式无法准确得知质点振速。针对水下爆破的特殊性,孟吉复等^[20-23] 引入高程差因子 γ ,对传统萨达夫斯基公式进行修正,修正后质点振速的表达式为:

$$v = K \left(\frac{Q^{\frac{1}{3}}}{r} \right)^{\alpha} \left(\frac{Q^{\frac{1}{3}}}{H} \right)^{\gamma}.$$

(3)

式中: H 为爆破点至测点间的相对高差,m; γ 为高差修正系数; K 、 α 和 γ 取值可采用现场试验或多组监测数据的回归分析获取。

水下爆破工程中,紧邻建(构)筑物在持续爆破振动作用下的动力响应状态不仅与爆破振动特性有关,还应当充分考虑结构自身的动力特性^[24]。质点振速、振动频率以及振动持续时间均会对建(构)筑物安全性能判定产生较大影响,因而采用单一的质点振动速度判定结构安全性缺乏合理性^[25-27]。目前,国内外多采用振速-频率双因素安全判据。

1.2 振速-频率双因素安全判据

1.2.1 基于频率比的折合振速

焦永斌^[28] 采用频率比 β_f 计算频率作用下质点振动折合速度,其表达式为:

$$v_f = \beta_f v_c.$$

(4)

式中: v_f 为频率作用下地面质点折合振速,cm/s; β_f 为频率效应影响系数; v_c 为地面质点的振动速度,cm/s。

β_f 可通过最小二乘法分析获得:

$$\beta_f = \frac{1}{K_{\beta} \lg \frac{f_b}{f_g}}.$$

(5)

式中: K_{β} 为频率比例系数; f_g 为建(构)筑物的自振

频率,Hz; f_b 为爆破振动作用下地面质点的振动频率,Hz。

$f_b/f_g < 5$ 时, $K_{\beta} = 1 \sim 2$, $\beta_f < 1$,折合振速小于监测值,建(构)筑物在爆破振动作用下不会产生共振,对其安全有利; $f_b/f_g > 5$ 时, $K_{\beta} = 2 \sim 4$, β_f 可能等于或者大于 1,折合振速大于或等于监测值,可能引发建(构)筑物共振,对其安全不利^[29]。

目前,国内对于 f_b 有两种较为常用的计算方法。焦永斌^[28] 研究得出 f_b 的计算公式如下:

$$f_b = \frac{K_f c_s^{\frac{7}{3}}}{Q^{\frac{1}{2}}} \left(\frac{Q^{\frac{1}{3}}}{r} \right)^{\frac{2}{5}}.$$

(6)

式中: K_f 为与振动频率相关的系数, $K_f = 0.01 \sim 0.03$; c_s 为岩石的横波波速,cm/s。

唐春海等^[30] 针对不同的爆破形式,得出:

$$f_b = k \left(\frac{Q^{\frac{1}{3}}}{\log r} \right)^{\frac{1}{2}}.$$

(7)

式中: k 为与频率相关的系数,硇室爆破中, $k = 0.8 \sim 5.0$;台阶爆破中, $k = 5.0 \sim 50.0$;拆除爆破时, $k = 1.0 \sim 10.0$ 。 k 在其取值范围内,与 Q 存在如下关系: Q 值较大时, k 可取较小值;反之亦反。

折合振速及两类频率预测公式均属于经验公式,较为粗糙,无法准确判断建(构)筑物安全性,但仍为爆破振动安全判据做了有益探索,值得借鉴。

1.2.2 国内外频率-振速双因素安全判据

国内外对于爆破振动安全判据做了一系列探索,结合各国工程经验与实际抗震设防要求,获得了符合各国实际的频率-振速爆破振动安全判据,具体如表 2 ~ 表 5 所示^[21-32]。

1.2.3 基于频率-振速因素的工程设计方法

张立国等^[33] 通过量纲和谐原理及 δ 定理建立相似准数方程,推导了爆破振动主频预测公式:

表 2 瑞士爆破振动安全判据

Tab. 2 Safety criterion of blasting vibration in Switzerland		
建筑物分类	频率范围/ Hz	质点振动速度/ (mm · s ⁻¹)
钢结构、钢筋混 凝土结构	10 ~ 60	30
	60 ~ 90	30 ~ 40
砖混结构	10 ~ 60	18
	60 ~ 90	18 ~ 25
砖石墙体、木楼阁	10 ~ 60	12
	60 ~ 90	12 ~ 18
历史性及 敏感性建筑	10 ~ 60	8
	60 ~ 90	8 ~ 12

表 3 德国爆破振动安全判据(DIN4150)

Tab.3 Safety criterion of blasting vibration in Germany (DIN4150)

建筑物类型	频率范围/ Hz	合速度/ (mm·s ⁻¹)
工业建筑及 商业建筑	10	20
	10~50	20~40
	50~100	40~50
民用建筑	10	5
	10~50	5~15
	50~100	15~20
重点保护建筑	10	3
	10~50	3~8
	50~100	8~12

表 4 美国露天矿务局标准(OSM 标准)

Tab.4 Criterion of the open-pit mine bureau in America (OSM criterion)

频率/Hz	1~4	4~13	13~29	29 以上
振速/ (mm·s ⁻¹)	4.79~20.00	20	20~50	50

表 5 中国爆破振动安全允许标准

Tab.5 Safety criterion of blasting vibration in China

保护对象类别	主振频率 <i>f</i> /Hz	允许安全振速/ (m·s ⁻¹)
土窑洞、土坯房、 毛石房屋	<i>f</i> <10	0.5~1.0
	10≤ <i>f</i> <50	0.7~1.2
	50≤ <i>f</i> <100	1.1~1.5
一般砖房、非抗震的 大型砌块建筑物	<i>f</i> <10	2.0~2.5
	10≤ <i>f</i> <50	2.3~2.8
	50≤ <i>f</i> <100	2.7~3.0
钢筋混凝土结构房屋	<i>f</i> <10	3.0~4.0
	10≤ <i>f</i> <50	3.5~4.5
	50≤ <i>f</i> <100	4.2~5.0
一般建筑与古迹	<i>f</i> <10	0.1~0.3
	10≤ <i>f</i> <50	0.2~0.4
	50≤ <i>f</i> <100	0.3~0.5
重力式码头	—	5.0~8.0
水工隧道	—	7.0~15.0

$$f\bar{r}=K\left(\frac{Q^{\frac{1}{3}}}{r}\right)^{\alpha}.$$

(8)

式中: K 、 α 为与传播介质相关的参数,可通过现场试验获得。

工程地质条件与周边建(构)筑物分布已知时,以频率-振速双因素安全标准为控制值,可获得爆破现场合理振动幅值。结合式(3)与式(8),可获得同

时考虑频率、振速的最优单段装药量。

1.3 考虑振动持续时间的爆破振动安全判据

在持续爆破振动影响下,围岩裂隙发展直至破坏,同时建(构)筑物振动速度允许值下降(降低 2 倍以上^[34]),严重危害围岩及临近建(构)筑物安全性能。同时,结构反应超过弹性极限后可能会导致强度有所丧失,其具体表现为:1)线性体系中,结构反应较大值的发生概率随振动持续时间的上升而上升;2)非线性体系中,振动持续时间的升高也会导致结构内部产生永久变形的概率上升;3)爆破振动作用下,结构物的损坏程度仍将随振动持续时间的上升而上升。

振动持续时间 t 与距离 r 之间的近似关系可表示如下^[35]:

$$\lg t = -1.6 + \lg \frac{r}{1\,000}.$$

(9)

高富强等^[36]参照萨达夫斯基公式,采用量纲分析得出:

$$t\frac{v_{\max}}{r}=K\left(\frac{Q^{\frac{1}{3}}}{r}\right)^{\alpha}.$$

(10)

式中: v_{\max}/r 为比例速度,反映的是振动速度幅值与爆心距测点距离之间的定量关系。

振动持续时间由 1 s 增加至 50 s 的过程中,爆破能量对于紧邻结构物的破坏能力平均可增大 40 倍^[35]。从以上结论可以得知,振动持续时间也应当作为水下爆破作用下紧邻建(构)筑物安全判据的考虑因素之一,但目前国内外暂无相关成果。

1.4 微差爆破振动叠加效应

1.4.1 微差爆破振动叠加理论

微差爆破振动传播过程中,由于地震波在传播介质中衰减较慢,一般会产生相互干扰与叠加,与齐发爆破相比,情况更为复杂。微差爆破振动叠加强度的影响因素包括:起爆顺序及抵抗线方向、爆心距、微差间隔时间。当爆心与测点之间的距离超过 50 m 时,不同起爆顺序下振动叠加放大系数差别不大^[37]。而与之相反的是,爆心距及微差爆破间隔时间这两个因素对爆破振动叠加放大系数会产生较大的影响。图 1 为不同微差爆破间隔时间下振动叠加放大系数与爆心距的关系图。

由图 1 可知,当爆心距较小时,振动叠加系数趋于 1,基本未产生振动叠加;当其值增大到一定程度后,爆破振动叠加系数将随着爆心距的增大而增大。与此同时,振动叠加系数也与微差爆破间隔时间有一定关系。微差爆破间隔时间的不同会引起爆破作用及振动效应的改变^[38-41]。

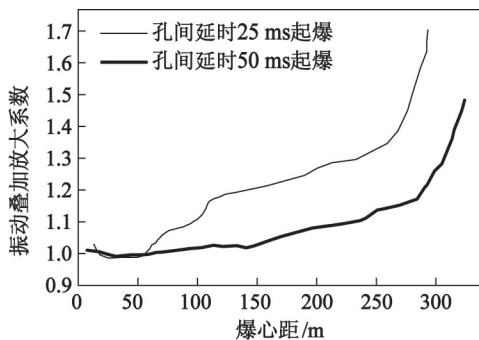


图 1 不同微差爆破间隔时间下振动
叠加放大系数与爆心距的关系

Fig. 1 Relationship between amplification coefficient of vibration superposition and distance to blasting center under different delay intervals of differential blasting

1.4.2 最优微差延时间隔

若采用的微差爆破间隔时间趋于合理,爆破振动能够最大限度地叠加相消^[42]。Langefors 等^[43]研究发现,在爆破振动周期及波形一致的情况下,若将微差爆破间隔时间取为 $\Delta t = T/2$ (T 为振动周期),可以最大限度地使爆破振动干扰相消,从而达到最佳降振效果。然而,实际微差爆破相邻段爆破振动的干扰并非简单叠加,而应当综合考虑实际地质条件及爆破方案等诸多因素的影响^[44]。

沈伯骞^[45]推导出的微差爆破相较于同条件下齐发爆破的爆破振动效应降低系数求解公式为:

$$B = \frac{A_n}{A_{ji}} = \frac{(\sin \frac{n}{2} \omega) \Delta t}{\sqrt{n} (\sin \frac{1}{2} \omega) \Delta t} \quad (11)$$

式中: B 为微差爆破地震效应的降低系数; A_n 为微差爆破振幅; A_{ji} 为齐发爆破振幅; n 为微差爆破的段数; Δt 为微差起爆的延迟时间, ms; ω 为岩层的自振频率, Hz。

B 值越小,说明微差爆破延时间隔的取值对于减振更为有利。当式(11)分子部分取 0 时,将获得最佳减振效果。故最优微差延时间隔的求解公式如下:

$$\Delta t = \frac{2\pi k}{n\omega}; k = 1, 2, \dots, n-1. \quad (12)$$

2 问题与思考

1) 采用水下爆破作用下地面质点振动速度单因素安全判据在某种程度上能够判定建(构)筑物安全性,但却具有很大的局限性。其原因在于:建(构)筑物安全性能影响因素很多,建(构)筑物自身动力特性、起爆方式、地震波传递介质等都会对其产生较大影响^[46-49]。地面质点振动速度相同,振动频

率及振动持续时间差别较大时,建(构)筑物实际所处状态会与单因素判据评估结果相距甚远^[50]。因而,振动频率及振动持续时间对建(构)筑物安全性能的影响是不容忽视的,需要加大研究力度,形成可运用于实践的多因素统一安全判据。

2) 国内外日渐普及的振速-频率双因素安全判据是在实践过程中形成的修正判据,与单因素相比更具合理性,但仍存在一定缺陷。其一,工程领域已开始采用考虑爆破振动频率与爆破振速协同作用的双因素安全判据对以房屋为主的建筑物在爆破振动作用下的安全性能进行判定,但对于结构动力响应复杂的建(构)筑物(岩石边坡、洞室围岩和新浇混凝土等)却无可供参考的双因素安全判据^[51];其二,双因素安全判据未考虑振动持续时间对建(构)筑物动力特性的影响,考虑因素不够全面,对建(构)筑物在爆破振动作用下的安全判定有失准确^[52];其三,在水下爆破实践中,由于水环境较陆地环境复杂,影响因素繁多,该判据在水下爆破工程中的适用性还有待考察^[53-54]。因而,该安全准则的广度与深度还需要在实践中补充强化。

3) 目前工程领域对于爆破振动持续时间的研究仍停留于理论层面,未与振动速度及振动频率联系起来,无法用于准确判定建(构)筑物安全性能。同时,在微差爆破过程中,间隔时间的不同会在中远区产生不同程度的叠加,直接影响建(构)筑物安全性能,因而微差爆破间隔时间也应当考虑在爆破振动安全判据内^[55]。在工程实践中,可运用微差爆破振动叠加理论和建(构)筑物累计损伤机理,选择降振效果最佳的微差爆破时间,从而减小微差爆破振动叠加对建(构)筑物安全性能的影响^[56-57]。

3 结论

1) 质点振动速度单因素安全判据考虑因素单一,对建(构)筑物的安全判定结果与其实际所处状态相差较大,应减少其工程应用。

2) 振速-频率双因素安全判据是对前者的修正,具有一定合理性,但未体现出振动持续时间对结构安全性能的影响,且多应用于房屋为主的建筑物,水下环境适用性也有待考察。

3) 爆破振动持续时间会使建(构)筑物在反复的水下爆破振动冲击作用下产生累计损伤,有必要将其列入安全判据范畴,对相关行业标准进行修正,并运用于工程实践。

4) 微差爆破会在中远区产生振动叠加,影响建(构)筑物安全性能,需要在安全判据中加以考虑,并在实际工程中采用最佳微差爆破间隔时间,达到

最优降振效果。

参 考 文 献

- [1] JONES J P, WHITTIER J S. Waves at a flexibly bonded interface[J]. Journal of Applied Mechanics, 1967, 34(4):905-909.
- [2] SCOTT D F, WILLIAMS T J, DENTON D K, et al. Seismic tomography as a tool for measuring stress in mines[J]. Mining Engineering, 1999, 51(1):77-80.
- [3] 石崇, 毕卫国. 爆破地震破坏判据的探讨[J]. 岩土力学, 2004, 25(增刊):115-118.
SHI C, BI W G. Discussion of blasting damage criteria[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(Suppl.):115-118.
- [4] 阳生权, 廖先葵, 刘宝琛. 爆破地震安全判据的缺陷与改进[J]. 爆炸与冲击, 2001, 21(3):223-228.
YANG S Q, LIAO X K, LIU B C. Default of the judging standard of blasting vibration safety abstract[J]. Explosion and Shock Waves, 2001, 21(3):223-228.
- [5] 言志信, 王永和, 江平, 等. 爆破地震测试及建筑结构安全标准研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(11):1907-1911.
YAN Z X, WANG Y H, JIANG P, et al. Study on measurement of blast-induced seism and building safety criteria[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(11):1907-1911.
- [6] 汪旭光, 于亚伦. 关于爆破震动安全判据的几个问题[J]. 工程爆破, 2001, 7(2):88-92.
WANG X G, YU Y L. On several problems of safety criterion for blasting vibration[J]. Engineering Blasting, 2001, 7(2):88-92.
- [7] 程康, 徐学勇. 爆破振动频率对振动效应影响的试验研究[J]. 爆破, 2003, 20(3):79-81.
CHENG K, XU X Y. Experimental Research on influence of blasting vibration frequency on its vibration effect[J]. Blasting, 2003, 20(3):79-81.
- [8] 李孝林, 穆太升, 董鑫, 等. 频率在爆破震害中的作用及其影响因素分析[J]. 工程爆破, 2001, 7(3):15-18.
LI X L, MU T S, DONG X, et al. Role of frequency in harm of blasting vibration and analysis on its influence factors[J]. Engineering Blasting, 2001, 7(3):15-18.
- [9] 陶刘群, 于亚伦. 爆破振动安全判据三大核心问题研究[J]. 金属矿山, 2012(10):127-129.
TAO L Q, YU Y L. Research of three key issues on safety standards of blasting vibration[J]. Metal Mine, 2012(10):127-129.
- [10] 阳生权. 爆破地震累积效应理论和应用初步研究[D]. 长沙:中南大学, 2002.
YANG S Q. Study on theory and application of blasting vibration cumulative effect[D]. Changsha: Central South University, 2002.
- [11] 凌同华, 李夕兵, 王桂尧. 爆破震动灾害主动控制方法研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(7):1439-1442.
LING T H, LI X B, WANG G Y. A study on initiative control of blast vibration damages[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(7):1439-1442.
- [12] ALDAS G G U, ECEVITOGLU B. Waveform analysis in mitigation of blast-induced vibrations[J]. Journal of Applied Geophysics, 2008, 66(1/2):25-30.
- [13] 黄树棠, 张雪亮. 爆破地震效应[M]. 北京:地震出版社, 1981.
- [14] 霍永基, 王湘均, 费骥鸣. 爆破地震效应及安全评定方法[M]//中国力学学会工程爆破专业委员会. 土岩爆破文集(第二辑). 北京:冶金工业出版社, 1985.
- [15] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 爆破安全规程:GB6722—2014[S]. 北京:中国标准出版社, 2015.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Safety regulations for blasting:GB6722—2014[S]. Beijing:China Standard Press, 2015.
- [16] 长江重庆航道工程局. 水运工程爆破技术规范:JTS204—2008[S]. 北京:人民交通出版社, 2008.
Changjiang Chongqing Waterway Engineering Bureau. Technical code of blasting for port and waterway engineering:JTS204—2008[S]. Beijing:China Communications Press, 2008.
- [17] LOPEZ J C, LOPEZ J E, JAVIER F. Drilling and blasting of rocks[M]. Rotterdam, Netherlands: AA Balkema, 1995:1-150.
- [18] 赵明生, 梁开水, 曹跃, 等. 爆破地震作用下建(构)筑物安全标准探讨[J]. 爆破, 2008, 25(4):24-27.
ZHAO M S, LIANG K S, CAO Y, et al. Discussion on the security criteria of construction (structure) of building under blasting vibration[J]. Blasting, 2008, 25(4):24-27.
- [19] 言志信, 吴德伦, 王漪, 等. 地震效应及安全研究[J]. 岩土力学, 2002, 23(2):201-203.
YAN Z X, WU D L, WANG Y, et al. The study of blast vibration effect and safety[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, 23(2):201-203.
- [20] 孟吉复, 惠鸿斌. 爆破测试技术[M]. 北京:冶金工业出版社, 1992.
- [21] 唐海, 李海波. 反映高程放大效应的爆破振动公式研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(3):820-824.
TANG H, LI H B. Study of blasting vibration formula of reflecting amplification effect on elevation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(3):820-824.

- [22] 周同岭,杨秀甫,翁家杰. 爆破地震高程效应的实验研究[J]. 建井技术,1997,18(增刊):31-35.
- [23] 李春军,吴立,付海涛,等. 基于 AHP-Fuzzy 法的水下爆破设计方案优选[J]. 爆破器材,2015,44(4):45-50.
LI C J, WU L, FU H T, et al. Design optimization of underwater blasting based on AHP-Fuzzy method[J]. Explosive Materials, 2015, 44(4):45-50.
- [24] 魏海霞. 爆破地震波作用下建筑结构的动力响应及安全判据研究[D]. 青岛:山东科技大学,2010.
WEI H X. Study on dynamic response and safety criterion of buildings to blasting vibration waves[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2010.
- [25] 许红涛,卢文波. 几种爆破震动安全判据[J]. 爆破, 2002,19(1):8-10.
XU H T, LU W B. Advance on safety criterion for blasting vibration[J]. Blasting, 2002, 19(1):8-10.
- [26] LONGERFORS U, WESTERBERG H, KIHLSSTRÖM B. Ground vibrations in blasting[J]. Water Power, 1958: 335-421.
- [27] 余永强,杨小林,梁为民. 爆破开挖的振动效应与安全判据[J]. 金属矿山,2008(2):35-39.
YU Y Q, YANG X L, LIANG W M. Vibration effect and safety criteria of blasting excavation[J]. Metal Mine, 2008(2):35-39.
- [28] 焦永斌. 爆破地震安全评定标准初探[J]. 爆破, 1995(3):45-47.
- [29] 胡冬冬,程康,刘阳,等. 频率因素对爆破振动影响的分析探讨[J]. 爆破,2012,29(4):127-130.
HU D D, CHENG K, LIU Y, et al. Discussion of blasting vibration effect on frequency factor condition[J]. Blasting, 2012, 29(4):127-130.
- [30] 唐春海,于亚伦,王建宙. 爆破地震安全判据的初步探讨[J]. 有色金属,2001,53(1):1-4.
TANG C H, YU Y L, WANG J Z. Elementary study of safety criterion for blasting vibration[J]. Nonferrous Metals, 2001, 53(1):1-4.
- [31] 刘先锋,况龙川,孔凡林,等. 爆破震动安全判据评述[J]. 四川建筑科学研究,2010,36(5):153-155.
LIU X F, KUANG L C, KONG F L, et al. Review of safety criterion for blasting vibration[J]. Sichuan Building Science, 2010, 36(5):153-155.
- [32] 刘殿中. 工程爆破实用手册[M]. 北京:冶金工业出版社,1999.
- [33] 张立国,龚敏,于亚伦. 爆破振动频率预测及其回归分析[J]. 辽宁工程技术大学学报,2005,24(2):187-189.
ZHANG L G, GONG M, YU Y L. Forecast and regression analysis of blasting vibration frequency[J]. Journal of Liaoning Technical University, 2005, 24(2):187-189.
- [34] 张志呈. 爆破地震参量与振动持续时间[J]. 四川冶金,2002(3):1-4.
- [35] 李的林,高振儒,朱立新. 爆破震动危害中几个重要因素分析[J]. 工程爆破,1999,5(3):64-67.
LI D L, GAO Z R, ZHU L X. Analysis on several principal factors of blasting vibration hazards[J]. Engineering Blasting, 1999, 5(3):64-67.
- [36] 高富强,侯爱军,杨小林,等. 基于量纲理论的爆破振动持续时间分析[J]. 金属矿山,2010(9):143-145.
GAO F Q, HOU A J, YANG X L, et al. Analysis of blasting vibration duration based on dimension theory[J]. Metal Mine, 2010(9):143-145.
- [37] 甄育才,朱传云. 中远区微差爆破振动叠加效应影响因素分析[J]. 爆破,2005,22(2):11-16.
ZHEN Y C, ZHU C Y. Analysis on influential factors of vibration superposition in middle and far field of millisecond blasting[J]. Blasting, 2005, 22(2):11-16.
- [38] 宗琦,刘积铭,徐颖. 合理延迟时间的理论分析和试验研究[J]. 中国矿业大学学报,1998,27(1):86-89.
ZONG Q, LIU J M, XU Y. Theoretical analysis and experiment research on reasonable delay time of millisecond blasting[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1998, 27(1):86-89.
- [39] 吴腾芳,王凯,倪荣福. 微差爆破间隔时间计算模型的探讨[J]. 工程爆破,1997,3(4):59-62.
WU T F, WANG K, NI R F. Study on calculating models of interval time in millisecond blasting[J]. Engineering Blasting, 1997, 3(4):59-62.
- [40] 苏华友,陆文. 微差爆破间隔时间合理性分析[J]. 四川冶金,2000(3):15-17.
- [41] 张丹,段恒建,曾福洪. 分段爆破地震强度的试验研究[J]. 爆炸与冲击,2006,26(3):279-283.
ZHANG D, DUAN H J, ZENG F H. Experimental study on subordinate blasting seismic intensity[J]. Explosion and Shock Waves, 2006, 26(3):279-283.
- [42] WHEELER R M. How millisecond delay periods may enhance or deduce blast vibration effects[J]. Mining Engineering, 1998, 40(10):969-973.
- [43] LANGEFORS U, KIHLSSTRÖM B. The modern technique of rock blasting[M]. Stockholm: Almqvist & Wiksell, 1963.
- [44] 郭学彬,张继春,刘泉,等. 微差爆破的波形叠加作用分析[J]. 爆破,2006,23(2):4-8,49.
GUO X B, ZHANG J C, LIU Q, et al. Analysis of waveform superimposed action of millisecond blasting[J]. Blasting, 2006, 23(2):4-8, 49.
- [45] 沈伯骞. 微差爆破最佳微差时间的计算[J]. 辽宁师

- 院学报(自然科学版),1978(1):29-35.
- [46] MOORE A J, RICHARDS A B, GAD E F, et al. Structural response of brick veneer houses to blast vibration [C]// Proceedings of the 29th Annual Conference on Explosives and Blasting Technique. Nashville, Tennessee, USA, 2003:223-230.
- [47] MYER L R, PYRAK-NOLTE L J, COOK N G W. Effects of single fracture on seismic wave propagation [J]. Rock Joints, 1990, 15:467-473.
- [48] ADWARDS A T, NORTHWOOD T D. Experimental studies of the effects of blasting on structures [J]. Engineer, 1960, 210:538-546.
- [49] DUVALL W I, FOGELSON D E. Review of criteria for estimating damage to residences from blasting vibration; BM-RI-5968 [R]. Washington: U-S-Bureau of Mines Report Investigation, 1962:59-68.
- [50] 罗忆, 卢文波, 陈明, 等. 爆破振动安全判据研究综述 [J]. 爆破, 2010, 27(1):14-22.
- LUO Y, LU W B, CHEN M, et al. View of research on safety criterion on blasting vibration [J]. Blasting, 2010, 27(1):14-22.
- [51] 卢文波, 李海波, 陈明, 等. 水电工程爆破振动安全判据及应用中的几个关键问题 [J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(8):1513-1520.
- LU W B, LI H B, CHEN M, et al. Safety criteria of blasting vibration in hydropower engineering and several key problems in their application [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(8):1513-1520.
- [52] FARNFIELD R A. Environmental effect of blast-recent experience [J]. International Mining & Mineral, 1998, 1(4):94-99.
- [53] 陈春歌, 申志兵, 张贤凯, 等. 水下爆破冲击波危害及安全控制措施的模拟分析 [J]. 安全与环境工程, 2011, 18(1):58-61.
- CHEN C G, SHEN Z B, ZHANG X K, et al. Simulation of underwater explosion shock hazards and safety control [J]. Safety and Environmental Engineering, 2011, 18(1):58-61.
- [54] 张占峰. 复杂城市环境下水下钻孔爆破安全控制研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2013.
- ZHANG Z F. Study on safety control of underwater drilling blasting under the complex urban environment [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013.
- [55] 李彬峰. 爆破地震效应及其控制措施分析 [J]. 爆破, 2003, 20(2):83-85.
- LI B F. Analysis of controlling measurement and blasting vibration effect [J]. Blasting, 2003, 20(2):83-85.
- [56] 张艺峰, 姚道平, 谢志招, 等. 爆破地震效应主控因素分析及减震措施探讨 [J]. 岩土力学, 2010, 31(1):304-308.
- ZHANG Y F, YAO D P, XIE Z Z, et al. Analysis of master control factor of blasting seismic effect and discussion on shock absorption measures [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(1):304-308.
- [57] MA G C, MIYAKE A, OGAWA T, et al. Study on the numerical simulations of the blasting and the reduction of vibrations in blasting demolition [J]. Journal of the Japan Explosives Society, 1995, 56(1):33-43.

Research Review on Safety Criterion of Underwater Blasting Nearby Constructions

SU Ying^{①②}, WU Li^②, PENG Yaxiong^②, ZHOU Ruifeng^②, SU Xiaomao^③

①City College, Wuhan University of Science and Technology (Hubei Wuhan, 430083)

②China University of Geosciences (Wuhan) (Hubei Wuhan, 430074)

③Hu'nan Chuangyi Blasting Engineering Co., Ltd. (Hu'nan Changsha, 410001)

[ABSTRACT] Evaluation indexes for the safety performance of structures under the underwater blasting were briefly expounded, and the application of the single vibration amplitude criterion to the safety performance evaluation under this circumstance was analyzed. Besides, the theoretical research methods of the dual-factor vibrating velocity-frequency safety criterion as well as the national current standards were introduced. From the above, the lack of the consideration and application scope of both criterions in the safety performance evaluation of blasting vibration was discussed. Based on the cumulative damage mechanism and the vibration superposition theory, the effect that the blasting vibration duration and the differential blasting delay interval result in the safety performance of structures was studied. It was proposed that the safety criterion of blasting vibration should be improved from two aspects, the blasting vibration duration and differential blasting delay interval, and the ideal millisecond delay intervals should be applied in practical engineering to achieve optimal effect of vibration reduction.

[KEY WORDS] safety criterion; vibration velocity; vibration frequency; vibration duration; delay interval of differential blasting