

AM 文章编号: 1001-1455(2007)01-0034-06

# P 波作用下衬砌混凝土的爆破安全振动速度研究<sup>\*</sup>

李洪涛, 卢文波, 舒大强, 朱传云

(武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072)

**摘要:** 隧洞爆破开挖诱发的爆破地震会对邻近的衬砌混凝土产生不利影响, 利用应力波(P 波)在混凝土与基岩结合面处的透、反射规律研究结合面处的应力状态, 并通过结合面的抗拉强度分析, 提出了一种确定衬砌混凝土安全振动速度的理论计算方法。计算结果表明, 新浇筑衬砌混凝土极限振动速度随着基岩弹模的增大而降低, 而爆破地震波频率的影响非常有限。我国现行采用的新浇筑大体积混凝土基础面上的爆破安全振动速度有一定的安全储备。

**关键词:** 爆炸力学; 安全振动速度; 爆破振动; 衬砌混凝土; P 波

**中图分类号:** O382; TV542

**国标学科代码:** 130 · 3520

**文献标志码:** A

## 1 引言

在水利水电地下工程施工过程中, 当隧洞开挖与邻近的混凝土衬砌施工同时进行, 会存在爆破振动对衬砌混凝土的影响问题。现场及室内实验资料都表明, 爆破振动会对新浇筑混凝土产生不利影响<sup>[1-2]</sup>。因此, 严格控制爆破振动速度以降低开挖爆破作业对新浇筑衬砌混凝土的影响, 成为水电工程建设过程中的重要技术问题之一。

现行的《水工建筑物岩石基础开挖工程施工技术规范》(SL47-94)<sup>[1]</sup>对新浇大体积混凝土基础面上的安全质点振动速度作了严格规定, 如表 1 所示。该标准主要通过相关工程经验的总结来确定安全振动速度<sup>[2]</sup>。国外的一些室内外实验成果表明, 工程界现行采用的新浇筑混凝土爆破安全振动速度具有相当大的安全储备<sup>[3-5]</sup>。在理论研究方面, 卢文波等<sup>[6-7]</sup>探讨了 Rayleigh 波作用下的新浇筑基础混凝土爆破安全振动速度。

本文中设法从理论上对新浇筑衬砌混凝土的爆破安全振动速度进行探讨和研究。考虑到在水利水电地下工程隧洞开挖与邻近的混凝土衬砌并行施工过程中, 爆源距离衬砌混凝土较近, 此时混凝土基础面上爆炸应力波的主体一般为体波。因此, 仅讨论体波(P 波)作用下的新浇筑衬砌混凝土的安全振动速度。

新浇筑衬砌混凝土与基岩间的结合面是混凝土体强度的薄弱环节。在爆破地震波作用下, 新浇筑混凝土块沿结合面的整体剪切破坏一般不会发生, 另外考虑到混凝土的抗拉强度远低于抗压, 因此, 在爆破地震波作用下, 防止新浇筑衬砌混凝土体与基岩面间的结合面的拉断破坏成为爆破振动控制的关键。基于此, 本文中提出如下研究思路: 利用应力波(P 波)在混凝土与基岩结合面处的透、反射规律来研究结合面处的应力状态, 以结合面的抗拉强度作为破坏判据, 从而计算衬砌混凝土的极限振动速度。

表 1 新浇筑大体积混凝土基础面上的安全质点振动速度  
Table 1 Proposed safe vibration velocity  
of young concrete

混凝土龄期/d	安全振动速度/(cm/s)
0~3	1.5~2.0
3~7	2.0~5.0
7~28	5.0~7.0

\* 收稿日期: 2005-11-09; 修回日期: 2006-02-08

基金项目: 教育部科学技术研究重点项目(02133)

作者简介: 李洪涛(1979—), 男, 博士研究生。

### 2 应力波在岩石/混凝土结合面上的透、反射

岩石中爆破时,在近区,如果药包为球状则产生球面波,为柱状则产生柱面波。但在离爆心一定距离外,均可视为平面波。下面就弹性平面波(P 波)通过岩石/混凝土结合面时的情况进行研究。

如图 1 所示,设入射 P 波在  $xOz$  平面内,则反射及透射波均在  $xOz$  平面内。由应力波理论知道,斜入射的 P 波在界面处传播时,将产生 4 种波:反射 P 波、折射 P 波、反射 SV 波和折射 SV 波。图 1 中,下标 i,r,t 分别表示入射波、反射波、透射波; I、II 分别代表界面两侧的岩石、混凝土。

入射、反射及透射波的位移可以用统一的表达式<sup>[8]</sup>

$$U_n = A_n \mathbf{d}_n \exp[i(k_n \mathbf{r}_n \cdot \mathbf{l}_n - \omega_n t)] \quad (1)$$

式中: $n=1,2,3,4,5$  分别代表入射 P 波、反射 P 波、透射 P 波、反射 SV 波和透射 SV 波; $A_n$  为位移幅值; $\mathbf{d}_n$  为位移单位向量; $\mathbf{r}_n$  为点坐标单位向量; $\mathbf{l}_n$  为波传播方向的单位向量; $k_n$  为波数; $\omega_n$  为圆频率。

界面两侧位移可以表示为

$$\begin{cases} U_{kI} = \sum_j U_j \cdot \mathbf{i}_k & j = 1, 2, 4 \\ U_{kII} = \sum_j U_j \cdot \mathbf{i}_k & j = 3, 5 \end{cases} \quad (2)$$

式中: $k=z,x$ ( $z,x$  表示  $z$  轴、 $x$  轴两个方向); $\mathbf{i}_k$  表示坐标轴单位向量。

界面两侧的应力用胡克定律计算

$$\begin{cases} \sigma_{zz} = \lambda \frac{\partial U_x}{\partial x} + (\lambda + 2\mu) \frac{\partial U_z}{\partial z} \\ \sigma_{zx} = \mu \left( \frac{\partial U_z}{\partial x} + \frac{\partial U_x}{\partial z} \right) \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\lambda, \mu$  为拉梅常数。

界面上应满足位移和应力连续条件,有

$$U_{zI} = U_{zII} = U_z, \quad U_{xI} = U_{xII} = U_x \quad (4)$$

$$\sigma_{zzI} = \sigma_{zzII} = \sigma_{zz}, \quad \sigma_{zxI} = \sigma_{zxII} = \sigma_{zx} \quad (5)$$

联立式(1)~(5)可以得到如下用矩阵形式表示的代数方程组

$$\begin{pmatrix} -\left(\frac{c_{PI}}{c_{SI}}\right)^2 \cos 2\theta_4 & \frac{\mu_{II}}{\mu_I} \left(\frac{c_{PII}}{c_{SII}}\right)^2 \frac{c_{PI}}{c_{PII}} \cos 2\theta_5 & \frac{c_{PI}}{c_{SI}} \sin 2\theta_4 & \frac{\mu_{II}}{\mu_I} \frac{c_{PI}}{c_{SII}} \sin 2\theta_5 \\ \sin 2\theta_2 & \frac{\mu_{II}}{\mu_I} \frac{c_{PI}}{c_{PII}} \sin 2\theta_3 & \frac{c_{PI}}{c_{SI}} \cos 2\theta_4 & -\frac{\mu_{II}}{\mu_I} \frac{c_{PI}}{c_{SII}} \cos 2\theta_5 \\ \cos \theta_2 & \cos \theta_3 & -\sin \theta_4 & \sin \theta_5 \\ \sin \theta_2 & -\sin \theta_3 & \cos \theta_4 & \cos \theta_5 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{A_2}{A_1} \\ \frac{A_3}{A_1} \\ \frac{A_4}{A_1} \\ \frac{A_5}{A_1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \left(\frac{c_{PI}}{c_{SI}}\right)^2 \cos 2\theta_4 \\ \sin 2\theta_1 \\ \cos \theta_1 \\ -\sin \theta_1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

且必须满足

$$\begin{cases} k_1 \sin \theta_1 = k_2 \sin \theta_2 = k_3 \sin \theta_3 = k_4 \sin \theta_4 = k_5 \sin \theta_5 \\ k_1 c_{PI} = k_2 c_{PI} = k_3 c_{PII} = k_4 c_{SI} = k_5 c_{SII} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $c_{PI}, c_{SI}$  为岩石中纵波和横波速度; $c_{PII}, c_{SII}$  为混凝土中纵波和横波速度。

对于代数方程组(6),很难求得显式解,但可以通过编制程序,计算在入射 P 波频率、角度及界面两

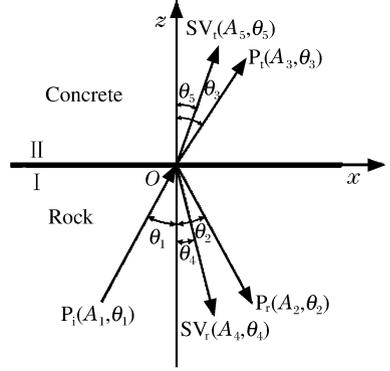


图 1 应力波在界面上的传播示意图  
Fig. 1 Sketch of transmission and reflection of stress wave through concrete-rock interface

侧介质物理力学性质变化时的透、反射波的位移幅值比  $A_n/A_1$ 。

结合面上的法向应力值表示为

$$\sigma_{zz} = \mu_{\parallel} k_1 A_1 \left[ \left( \frac{c_{P\parallel}}{c_{S\parallel}} \right)^2 \frac{c_{P\perp}}{c_{P\parallel}} \cos 2\theta_5 \frac{A_3}{A_1} + \frac{c_{P\perp}}{c_{S\parallel}} \sin 2\theta_5 \frac{A_5}{A_1} \right] \quad (8)$$

又有

$$\mathbf{v}_n = \dot{\mathbf{U}}_n = -i A_n \omega_n \mathbf{d}_n \exp[i(k_n \mathbf{r}_n \cdot \mathbf{l}_n - \omega_n t)] \quad (9)$$

由式(8)、(9)可得

$$\sigma_{zz} = \mu_{\parallel} \frac{v_1}{c_{P\perp}} \left[ \left( \frac{c_{P\parallel}}{c_{S\parallel}} \right)^2 \frac{c_{P\perp}}{c_{P\parallel}} \cos 2\theta_5 \frac{A_3}{A_1} + \frac{c_{P\perp}}{c_{S\parallel}} \sin 2\theta_5 \frac{A_5}{A_1} \right] \quad (10)$$

在求得各透、反射波位移幅值比  $A_n/A_1$  的情况下,对于给定的爆破振动速度峰值,可以很容易求得岩石/混凝土结合面上的法向应力值。

### 3 新浇混凝土的极限振动速度

#### 3.1 基岩/混凝土结合面抗拉强度确定

关于混凝土与基岩结合面强度性能的研究成果比较少。高正中等<sup>[9]</sup>进行了基岩与混凝土之间采用不同胶结方式的抗拉、抗剪等力学性能的实验研究,在基岩上直接浇筑混凝土,结合面轴向抗拉强度为 1.23 MPa,实验中采用的基岩为粉质砂岩,混凝土标号为 C20(28 d)。K. Y. Lo 等<sup>[10]</sup>的实验结果也表明基岩与混凝土的直接轴向拉伸强度为 1.27 MPa。

上述实验结果表明,28 d 龄期混凝土/基岩结合面的抗拉强度比同标号混凝土的抗拉强度要小得多。关于结合面早期强度的研究资料非常缺乏,而国内有一些混凝土早期强度的实验研究,在没有结合面强度资料的情况下,考虑将结合面 28 d 龄期强度值同混凝土强度比较,按照一定比例系数对混凝土早期强度做折减换算,作为混凝土/岩石结合面的抗拉强度值。

混凝土的强度发展规律<sup>[11-12]</sup>可用下式表示

$$\sigma = \frac{\sigma_u K_T (t - t_0)}{1 + K_T (t - t_0)} \quad (11)$$

式中: $\sigma$  和  $\sigma_u$  分别为混凝土的强度和龄期为无限长时的极限强度; $K_T$  为在养护温度为  $T$  条件下的强度增长速率参数; $t$  和  $t_0$  分别为在养护温度为  $T$  时混凝土的龄期及混凝土强度开始增长时的初始龄期。

在已有混凝土 7、28 d 龄期强度资料的情况下,可以通过式(11)来估算龄期小于 7 d 的混凝土强度。表 2 为国内某水电工程参考其他工程实验资料并作一定修正后的混凝土抗压强度  $\sigma_c$ 、抗拉强度  $\sigma_t$  及弹性模量  $E$  的实验值。其中混凝土标号为 C20(28 d)。

对于一般大体积混凝土,其初凝时间一般为 4~6 h,故式(11)中取  $t_0 = 0.25$  d。以表 2 中 7、28 d

的强度实验值来确定式(11)中的参数  $\sigma_u$  和  $K_T$ ,进而推断在不同龄期下混凝土的抗拉强度、弹性模量。

在动荷载作用下,混凝土的抗压和抗拉强度较静力条件下会有不同程度的提高。在应变速率影响下的混凝土抗拉强度的增长公式可以表示为<sup>[13]</sup>

$$f_{td} = \left[ 1.95 - 3.32 \left( \frac{1 - \dot{\epsilon}^{1/8}}{2.2 + 3.2 \dot{\epsilon}^{1/8}} \right) \right] f_{t0} \quad (12)$$

式中: $f_{td}$  为动抗拉强度; $f_{t0}$  为静抗拉强度; $\dot{\epsilon}$  为应变速率。

将文献[9]和文献[10]的实验结果同表1中28d混凝土抗拉强度对比,可以发现,混凝土/岩石结

表 2 不同龄期混凝土的强度实验值

Table 2 Experimental strength of young concrete at different age

$t/d$	$\sigma_c/MPa$	$\sigma_t/MPa$	$E/GPa$
7	11	1.05	18.83
14			21.72
28	20	1.95	24.77

合面抗拉强度约为同龄期混凝土抗拉强度的 63~65%。在计算中按照 0.6 的系数进行折减换算,得到结合面不同龄期的抗拉强度,再由式(12)求得其动抗拉强度。

### 3.2 结合面极限振动速度

考虑混凝土与基岩面间的结合面发生拉断破坏的临界状态,有

$$\sigma_{zz} + \sigma_s = f_{td} \tag{13}$$

式中: $\sigma_{zz}$ 为爆炸应力波入射引起的法向应力幅值, $\sigma_s$ 为静力状态下结合面上的初始应力。

静态条件下混凝土浇筑块内的初始应力与浇筑块基础厚度及其温度应力状态有关。考虑到大体积混凝土施工中,要防止在新浇筑混凝土中出现拉应力,可假定  $\sigma_s = 0$ 。

根据式(6)、(10)可以将  $\sigma_{zz}$  表示为  $v_1$ 、 $\theta_1$  的函数,即  $\sigma_{zz} = f_1(v_1, \theta_1)$ 。由式(13)可以得到不致破坏衬砌混凝土的容许入射应力波振速幅值  $v_1$ ,同时必须注意到结合面动抗拉强度  $f_{td}$  为入射应力波振速幅值  $v_1$ 、频率  $f$  的函数,即  $f_{td} = f_2(v_1, f)$ ,因此要想求得代数解非常困难,同样可以通过编程计算结合面极限振动速度。

## 4 计算结果及分析

当入射爆炸应力波振速幅值一定时,垂直入射的应力波引起的法向应力值最大,因此计算中主要考虑 P 波垂直入射( $\theta_1 = 0$ )这一最危险的情况。

通过编程计算不同龄期衬砌混凝土的极限振动速度,并考虑入射爆炸应力波频率  $f$ 、基岩弹性模量  $E_1$  的影响。各参数取值范围如下:龄期  $t = 0.5 \sim 28$  d,入射爆炸应力波频率  $f = 0 \sim 250$  Hz,基岩弹性模量  $E_1 = 20 \sim 80$  GPa。

实验表明,混凝土的泊松比一般不随龄期的增长而变化,因此在计算中假定泊松比为常数,取  $\nu_{II} = 0.167$ 。对于基岩的泊松比,也假定为常数,取  $\nu_I = 0.25$ 。

计算出的衬砌混凝土极限振动速度与龄期、入射波频率及基岩弹性模量的关系曲线如图 2 所示。表 3 为不同龄期衬砌混凝土在不同频率应力波入射时的极限振动速度计算值,表中给出了对应基岩弹性模量 20~80 GPa 的安全震速范围,每一栏数据前者基岩弹性模量为 80 GPa,后者为 20 GPa。

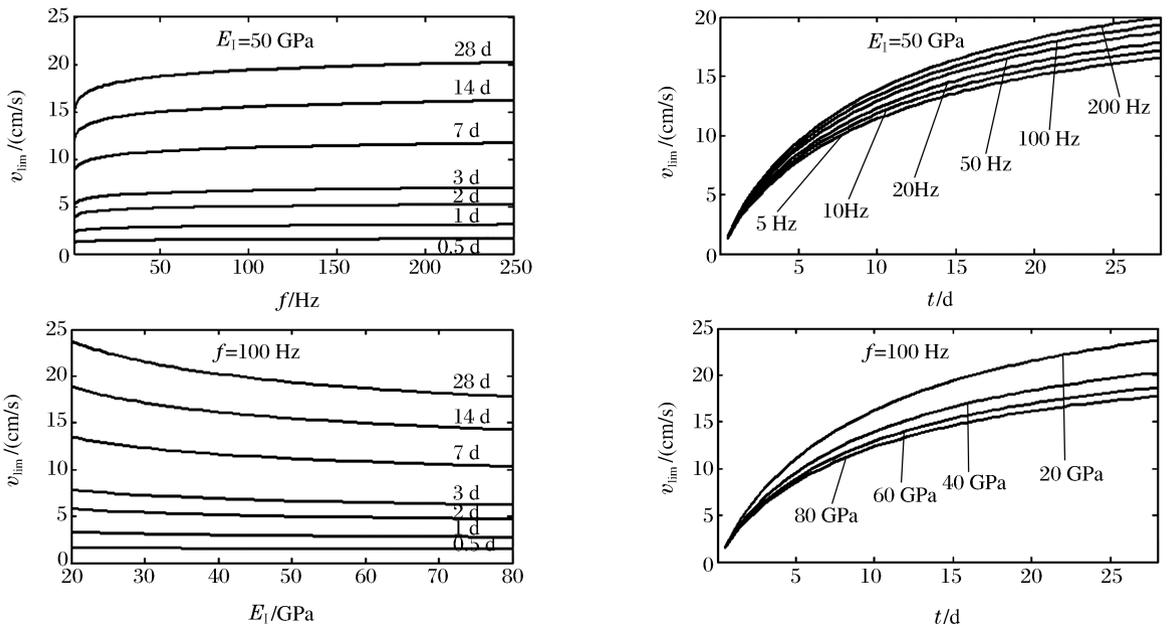


图 2 衬砌混凝土爆破振动允许速度计算曲线

Fig. 2 Calculation curves of ultimate vibration velocity of concrete lining

表 3 计算的衬砌混凝土极限振动速度  
Table 3 Calculation ultimate vibration velocity of concrete lining

$t/d$	$v_{lim}/(\text{cm/s})$					
	5 Hz	10 Hz	20 Hz	50 Hz	100 Hz	200 Hz
0.5	1.2~1.4	1.3~1.5	1.3~1.5	1.4~1.6	1.5~1.6	1.5~1.6
1	2.4~2.8	2.5~2.9	2.5~3.0	2.6~3.1	2.8~3.3	2.9~3.4
2	4.0~5.0	4.2~5.2	4.3~5.3	4.5~5.6	4.7~5.8	4.8~6.0
3	5.3~6.7	5.5~7.0	5.7~7.2	6.0~7.5	6.2~7.8	6.4~8.1
7	8.8~11.5	9.2~11.9	9.5~12.4	9.9~13.0	10.3~13.5	10.7~13.9
14	12.2~16.1	12.7~16.8	13.1~17.4	13.8~18.2	14.3~18.9	14.7~19.5
28	15.2~20.3	15.8~21.1	16.4~21.9	17.1~22.9	17.8~23.7	18.4~24.5

由图 2、表 3,可以得到以下结论:

(1) 计算结果同我国现行采用的新浇筑大体积混凝土基础面上的爆破安全振动速度标准基本上在同一量级上。另外,新浇混凝土浇筑 7~10 d 后出现的温度拉应力将降低混凝土抗震能力,陈明<sup>[14]</sup>认为,对于龄期大于 7 d 的新浇混凝土的安全质点振动速度需考虑 1~1.5 的安全系数。将表 3 的计算结果同表 1 规范规定值对比,并考虑温度应力的影响,可以发现,规范规定的安全震速有一定的安全储备。

(2) 随着混凝土龄期的增长,极限振动速度相应增大。在混凝土的早龄期阶段,安全质点振动速度迅速提高,至 14 d 时,极限振动速度已经达到 28 d 龄期的 80%,这同混凝土的强度增长规律是吻合的。

(3) 岩性对衬砌混凝土极限振动速度有较大的影响。随着基岩弹模的增大,衬砌混凝土极限振动速度逐渐增大,说明对于软岩上的衬砌混凝土可以适当放宽安全质点振动速度的控制标准。

(4) 入射爆炸应力波频率对衬砌混凝土的极限振动速度有一定影响,但非常有限。特别是当爆炸应力波为 20~150 Hz 时,入射波频率的影响非常小;随着混凝土龄期的增长,入射波频率的影响增大。

## 5 结 论

通过以上分析和讨论,可以得到如下主要结论:(1) 利用应力波理论对新浇衬砌混凝土的安全振动速度进行了探讨。着重分析了 P 波作用下混凝土/基岩结合面发生拉断破坏的情形,提出了一种预测爆破影响下衬砌混凝土安全质点振动速度的方法。(2) 用本文的方法计算出的衬砌混凝土安全振动速度同规范规定值基本上在同一量级上。我国现行采用的新浇筑大体积混凝土基础面上的爆破安全振动速度有一定的安全储备。(3) 混凝土龄期对极限振动速度影响较大,尤其在早龄期阶段,随着龄期的增长,混凝土极限振动速度迅速提高。(4) 基岩弹性模量增大,衬砌混凝土极限振动速度相应降低;而入射爆炸应力波频率对衬砌混凝土极限振动速度的影响非常有限。

需要指出的是,爆破振动对新浇筑衬砌混凝土的影响是一个十分复杂的问题,新浇筑衬砌混凝土体及结合面上的初始应力应变状态受到混凝土内温度应力、混凝土徐变及自缩变形特性等多方面的影响。另外,本文计算中所取用的混凝土/基岩结合面抗拉强度参数是在对混凝土强度作一定折减后获得的,对于结合面不同龄期的抗拉强度等力学性能的实验研究,还有待进一步开展。

## 参考文献:

- [1] SL47-94. 水工建筑物岩石基础开挖工程施工技术规范[S].
- [2] 朱传统,张正宇,佟锦岳,等. 爆破对新浇混凝土的影响和控制标准的研究[J]. 爆破,1990,9(3):28-32.
- ZHU Chuan-tong, ZHANG Zheng-yu, TONG Jin-yue, et al. A study for the influence of blasting to fresh concrete and its control criteria[J]. Blasting, 1990,9(3):28-32.

- [3] Hulshizer A J, Desai A J. Shock vibration effects on freshly placed concrete[J]. Journal of Construction Engineering and Management, 1984,110(2):266-285.
- [4] Hulshizer A J. Acceptable shock and vibration limits for freshly placed and maturing concrete[J]. ACI Materials Journal, 1996,93(6):524-533.
- [5] Worsey P, Giltner S, Drechsler T. Formulation of production blasting criteria for the construction of a lime plant at a major crushed stone operation[J]. International Journal for Blasting and Fragmentation, 1998,2(2):181-194.
- [6] 卢文波. 新浇筑基础混凝土爆破安全振动速度的确定[J]. 爆炸与冲击, 2002,22(4):327-332.  
LU Wen-bo. 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.
- [7] 卢文波, 陈明. 爆破振动作用下新浇基础混凝土的安全振动速度研究[J]. 长江科学院院报: S, 2003,20(1):8-10.  
LU Wen-bo, CHEN Ming. Study on safety vibration velocity caused by blasting for fresh placing foundation concrete[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute: S, 2003,20(1):8-10.
- [8] 阿肯巴赫 J D. 弹性固体中的波的传播[M]. 徐植信, 洪锦如, 译. 上海: 同济大学出版社, 1992.
- [9] 高正中, 张青云, 王波. 坝体混凝土力学特性实验研究[J]. 四川水力发电, 1996(3):45-49.  
GAO Zheng-zhong, ZHANG Qing-yun, WANG Bo. Experiment and study on mechanical property of dam concrete in contact face[J]. Sichuan Water Power, 1996(3):45-49.
- [10] Lo K Y, Ogawa T, Lukajic B, et al. Measurements of strength parameters of concrete-rock contact at the dam-foundation interface[J]. Geotechnical Testing Journal, 1991,14(4):383-394.
- [11] Nicholas J C C, Rajesh K. Maturity functions for concretes made with various cements and admixtures[J]. ACI Material Journal, 1992,89(1):188-196.
- [12] Parsons T J, Naik T R. Early age concrete strength determination by maturity[J]. Concrete International: Design & Material Journal, 1985,7(2):37-43.
- [13] 卢文波, 陈明. 国外混凝土早期强度及各强度参数间关系研究综述[J]. 湖北水力发电, 2003(2):42-45.  
LU Wen-bo, CHEN Ming. Summary of overseas studies on early strength of concrete[J]. Hubei Water Power, 2003(2):42-45.
- [14] 陈明. 爆破振动对新浇基础混凝土的影响研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2003.

## Study on the safety velocity for concrete lining under P wave loading

LI Hong-tao<sup>\*</sup>, LU Wen-bo, SHU Da-qiang, ZHU Chuan-yun

(State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science,  
Wuhan University, Wuhan 430072, Hubei, China)

**Abstract:** The vibration is induced by blasting during tunnel excavation that can have some adverse effect on the adjacent concrete lining. A theoretical method to determine safety velocity of concrete lining under blasting vibration loading is proposed, by calculating the stress on concrete-rock interface caused by blasting seismic (P wave), and analyzing the tensile strength of the interface. Calculated results show that the safety vibration velocity decrease with the increase of elasticity modulus of bed-rock, and that the effect of the frequency of blasting seismic is weak. The safety vibration velocity for young foundation concrete adopted in our country is of some safety.

**Key words:** mechanics of explosion; safety velocity; blasting vibration; concrete lining; P wave

\* Corresponding author: LI Hong-tao  
E-mail address: lmyht@126.com  
Telephone: 86-27-62489079