

文章编号: 1001-1455(2002)04-0327-06

新浇筑基础混凝土爆破 安全震动速度的确定^{*}

卢文波

(武汉大学水利水电学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 针对以往完全依据工程经验来确定新浇筑混凝土爆破安全震动速度这一现状, 通过爆破地震波 (Rayleigh 波) 作用下的新浇筑基础混凝土中的震动速度及动拉应变的分布计算并结合不同龄期下新浇筑混凝土的允许极限拉应变分析, 提出了一种确定新浇筑基础混凝土安全震动速度的理论计算方法。理论分析结果和计算实例表明, 所提出的理论计算方法是合理可行的, 新浇筑基础混凝土的极限震动速度随混凝土龄期的缩短及基岩对新浇筑混凝土的基础约束程度的提高而降低。我国现行采用的新浇筑大体积混凝土基础面上的质点安全震动速度具有较大的安全储备。

关键词: 新浇筑混凝土; 爆破震动; Rayleigh 波; 安全震动速度

中图分类号: TV542 文献标识码: A

1 引言

在水利水电工程建设过程中, 为了加快施工进度, 大坝基础爆破开挖与邻近的混凝土浇筑间往往有一段时期的并行施工, 从而导致其间存在一个爆破震动对新浇筑混凝土的影响问题。现场及室内试验资料都表明, 爆破震动会对新浇筑混凝土的质量产生不利影响^[1-2]。因此严格控制爆破震动速度在安全标准范围内以降低爆破震动对新浇筑混凝土的影响, 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》^[1]第 3.7.1 条规定了新浇筑大体积混凝土基础面上的质点安全震动速度与混凝土龄期的对应关系, 如表 1。该新浇混凝土安全震动速度标准在确保水工大体积混凝土施工质量方面发挥了巨大作用。由于爆破震动对新浇筑混凝土影响问题本身的复杂性及现场破坏性试验方面的限制, 该标准主要通过相关工程经验的总结来确定^[2]。国外的一些室内外试验结果表明, 工程界现行采用的新浇筑混凝土爆破安全震动速度具有相当大的安全储备, 甚至说是过于保守^[3-5]。诚然, 在对新浇筑混凝土的爆破安全震动速度的界限值没有完全把握的情况下, 对电站大坝及核电站等涉及生命财产安全的重要混凝土建筑物采用严格的安全控制标准是有充分理由的。

表 1 新浇筑大体积混凝土基础面上的
质点安全震动速度

Table 1 Proposed safe vibration velocity
of young concrete

龄期/d	v_s /(mm/s)
0~3	15~20
3~7	20~50
7~28	50~70

本文中, 设法从理论上对新浇筑基础混凝土的爆破安全震动速度的界限值进行探讨和研究, 做到对爆破安全震动速度的界限值至少在量级上有所把握, 以期对该安全震动速度标准这一经验判据的修改和完善起到一定的指导作用。考虑到在水利水电工程的岩石基础爆破开挖和混凝土的并行浇筑过程中, 爆源一般离混凝土浇筑点 10~20m 及以远, 此时建基面上爆破地震波的主体一般为 Rayleigh 波。因此仅讨论 Rayleigh 波作用下的新浇筑混凝土的安全震动速度。而对体波作用下的新浇筑混凝土的质点安全震动速度问题将另文进行讨论。

* 收稿日期: 2001-10-16; 修回日期: 2002-04-15

基金项目: 教育部科学技术研究重点项目 (02133); 武汉大学邵逸周先生研究基金项目 (20623)

作者简介: 卢文波 (1968—), 男, 工学博士, 教授, 博士生导师。

2 Rayleigh 波作用下新浇筑混凝土中的震动速度和动拉应变分布

假设大坝建基面为一水平的自由面, 考虑平面应变条件下的 Rayleigh 波在弹性介质中的传播。设一对不均匀 P 波和 SV 波以相同的波速 c_R 沿 x 方向传播, 见图 1。

该表面波的位移势函数 φ 和 ψ 分别为

$$\varphi = A e^{-rz+ik(x-c_R t)} \quad (1)$$

$$\psi = B e^{-sz+ik(x-c_R t)} \quad (2)$$

$$r = k \sqrt{1 - (c_R/c_P)^2}, \quad s = k \sqrt{1 - (c_R/c_S)^2} \quad (3)$$

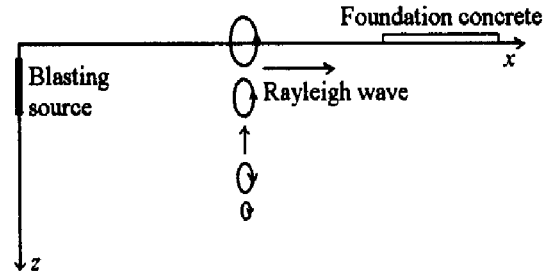


图 1 计算模型示意图

式中: A 、 B 为幅值, k 为波数, c_R 为 Rayleigh 波的波速, $c_R = \omega/k$, ω 为波的圆频率, c_P 和 c_S 分别为岩土介质的纵波和横波波速。

通过自由表面上的应力边界条件, 即

$$\sigma_{zz} \Big|_{z=0} = \left[(\lambda + 2\mu) \frac{\partial u_z}{\partial z} + \lambda \frac{\partial u_x}{\partial x} \right] \Big|_{z=0} = 0 \quad (4)$$

$$\sigma_{zx} \Big|_{z=0} = \mu \left[\frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x} \right] \Big|_{z=0} = 0 \quad (5)$$

式中: λ 和 μ 为拉梅常量, u_x 和 u_z 分别为 Rayleigh 波的水平 (x) 方向和垂直 (z) 方向的位移

$$u_x = \frac{\partial \varphi}{\partial x} - \frac{\partial \psi}{\partial z}, \quad u_z = \frac{\partial \varphi}{\partial z} + \frac{\partial \psi}{\partial x} \quad (6)$$

由上式可得

$$u_x = iAk \left[e^{-rz} - \frac{2rs}{k^2 + s^2} e^{-sz} \right] e^{ik(x-c_R t)} \quad (7)$$

$$u_z = Ak \left[-\frac{r}{k} e^{-rz} + \frac{2kr}{k^2 + s^2} e^{-sz} \right] e^{ik(x-c_R t)} \quad (8)$$

而 c_R 由瑞利方程确定, 即

$$(2k^2 - k_S^2)^2 - 4k^2 \sqrt{k^2 - k_P^2} \sqrt{k^2 - k_S^2} = 0 \quad (9)$$

式中: k_P 和 k_S 分别为纵波和横波的波数。

由 Rayleigh 波引起的垂直向震动速度和应变

$$\bar{v}_z = \partial u_z / \partial t, \quad \bar{\epsilon}_z = \partial u_z / \partial z \quad (10)$$

将式(8)带入并取其实际部

$$v_z = Ak \omega \left[-\frac{r}{k} e^{-rz} + \frac{2kr}{k^2 + s^2} e^{-sz} \right] \sin(kx - \omega t) \quad (11)$$

$$\epsilon_z = Ak \left[\frac{r^2}{k^2} e^{-rz} - \frac{2krs}{k^2 + s^2} e^{-sz} \right] \cos(kx - \omega t) \quad (12)$$

由式(12)可得

$$\epsilon_{z \max} = \epsilon_z \Big|_{z=0} = Ak \left[\frac{r^2}{k^2} - \frac{2krs}{k^2 + s^2} \right] \quad (13)$$

$$v_z \Big|_{z=0} = Ak \omega \left[-\frac{r}{k} + \frac{2kr}{k^2 + s^2} \right] \quad (14)$$

上述结果是在假定建基面为自由面即基础混凝土的厚度为零的条件下推得的。实际工程中, 建基面上的基础约束范围内的新浇筑混凝土块厚度与 Rayleigh 波的波长相比可以忽略不计。同时建基面上在已浇筑混凝土基础块的压重作用条件下的地面震动速度要小于自由面条件下的相应值, 因此把由式(13)确定的 $\epsilon_{z \max}$ 作为建基面处混凝土或基岩的最大动拉应变是有一定安全储备的。

3 新浇混凝土的极限震动速度

新浇筑基础混凝土体与建基面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,新浇筑混凝土基础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,防止新浇筑基础混凝土体与建基面间的结合面的拉断破坏成为爆破震动控制的关键。

为使在爆破地震作用下基础混凝土不发生拉断破坏,需满足

$$\epsilon_z' = \epsilon_{d \max} + \epsilon_s \leq \epsilon_{\text{lim}} \quad (15)$$

式中: ϵ_z' 、 $\epsilon_{d \max}$ 、 ϵ_s 和 ϵ_{lim} 分别为新浇筑混凝土内的总应变、爆破地震波引起的最大动拉应变、静力状态下混凝土内的初始应变及混凝土的允许拉伸应变。

静态条件下混凝土浇筑块内的初始应变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 $\epsilon_s = 0$ 。

考虑基岩和新浇筑混凝土结合面上的应力与位移条件的连续性,假定在结合面上可近似认为 $\sigma_z = 0$,则由建基面两侧岩石和新浇筑混凝土的物理方程可得

$$\epsilon_z' = \frac{\nu E'}{\nu' E} \epsilon_z \quad (16)$$

式中: ν 和 E 分别为基岩的泊松比和弹性模量,带上标者代表混凝土的相应值。

则由式(3)及式(13)~(16)可得

$$v_{\text{lim}} = \frac{(c_R/c_S)^2 c_R \nu E' \epsilon_{\text{lim}}}{\left[(2 - (c_R/c_S)^2) \sqrt{1 - (c_R/c_P)^2} - 2 \sqrt{1 - (c_R/c_S)^2} \right] \nu' E} \quad (17)$$

由式(17)可知,影响新浇筑基础混凝土的极限震动速度的因素为:新浇筑混凝土的允许极限拉应变、混凝土和基岩的弹性模量、泊松比以及基岩的声波速度。基岩对新浇筑混凝土的基础约束程度越强(基岩与新浇筑混凝土间弹性模量的比值越大),新浇筑基础混凝土的极限震动速度就越小。

因此,若已知新浇筑混凝土的极限拉应变、混凝土和基岩的弹性模量、泊松比以及基岩的声波速度等参数,可由式(17)确定出新浇筑混凝土的质点极限震动速度。

4 计算实例分析

国内对于混凝土早期强度(尤其是对初凝至7天的超早期混凝土抗拉强度)的研究做得不是很多。在没有实测资料的情况下,只能通过7、28d龄期的混凝土的强度来估算龄期小于7d的混凝土的强度。

混凝土的强度发展规律^[6-7]可用下式表示

$$\sigma = \frac{\sigma_u K_T (t - t_0)}{1 + K_T (t - t_0)} \quad (18)$$

式中: σ 和 σ_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 条件下混凝土的龄期及混凝土强度开始增长时的初始龄期。

试验资料表明,混凝土的泊松比一般不随龄期的增长而变化^[8]。因此,在计算中假定泊松比为常数,取 $\nu = 0.167$ 。

表2为国内某高坝参考国内其他水电工程试验资料并作适当修正后的大坝基础混凝土的抗压强度、抗拉强度、弹性模量及极限拉伸应变试验值。其中混凝土标号为C25(90d)。

对于一般大体积混凝土,其初凝时间一般为4~6h,故式(18)中取 $t_0 = 0.25d$ 。以表2中7、28d的强度试验值来确定式(18)中的参数 σ_u 和 K_T ,进而推算在不同龄期下混凝土的极限拉应变、混凝土弹性模量,见表3。

对基岩,考虑下述三种情况:假设其弹性模量分别为 60、40 和 20GPa,密度分别为 2700、2600 和 2500kg/m³,而泊松比均取为 0.25。则可推算出三种基岩的纵波、横波和 Rayleigh 波的速度:第一种情况为 5164、2981 和 2741m/s;第二种情况为 4300、2482 和 2283m/s;第三种情况为 3098、1793 和 1649m/s。据此,由式(17)推算的在不同龄期下混凝土极限震动速度见表 3。

表 2 不同龄期下混凝土的强度试验值

Table 2 Measured strength of young concrete at different age

龄期/d	σ_c /MPa	σ_t /MPa	E /GPa	$\epsilon_t/10^{-6}$
7	11	1.05	18.83	60
14			21.72	
28	20	1.95	24.77	85
60	22	2.25		88
90	25	2.45	29.37	90
180	28	2.90	31.53	95

表 3 推算的混凝土极限拉应变、弹性模量及极限震动速度

Table 3 Calculated ultimate tensile strain, elastic modulus and ultimate vibration velocity of young concrete

龄期/d	$\epsilon/10^{-6}$	E /GPa	$v_{lim 1}/(mm/s)$	$v_{lim 2}/(mm/s)$	$v_{lim 3}/(mm/s)$
0.5	5.4	2.0	2.6	3.1	5.2
1	14.6	5.3	20	24	32
1.5	22.1	6.3	46	60	80
2	28.4	9.8	73	88	118
3	38.3	12.8	129	155	209
5	51.6	16.6	224	270	364
7	60.0	18.8	298	355	479
14	74.8	22.4	439	528	712
40	88.6	25.6	595	715	964
90	93.7	26.8	661	794	1072
180	95.9	27.3	677	813	1097

由表 3 可知,混凝土的极限震动速度随混凝土强度的增长及基岩弹性模量、声波速度等参数的降低而增大。

为了检验表 3 中极限震动速度的合理性,对文献[2]中所列的实际观测资料进行了对比,其结果见表 4。

由表 4 可知,除序号为 8 的外,按本文方法计算的极限震动速度,来推算葛洲坝、大化、万安、隔河岩等国内水电工程,及美国 Auburn 和 Finland 坝的实际观测资料的影响效果时,预测结果与实测效果基本一致。

需要补充说明的是,上述观测资料中没有提供观测部位混凝土标号情况。因此,推算中假定大坝的基础混凝土标号为 C25(90d)可能与实际情况有一定差别,尤其对美国的 Auburn 和 Finland 坝。即使如此,仍有一点可以肯定,那就是通过上述理论推导得到的基础混凝土的极限震动速度,与实测的破坏震动速度至少是处于同一量级的。

表4 推算结果与爆破震动对大坝混凝土影响的观测资料^[2]的对比

Table 4 Comparison between measured data and calculated result of influence of young concrete under blasting vibration loading

序号	龄期/d	$v_{lim c}/(mm/s)$	预测破坏情况	$v_{lim m}/(mm/s)$	实际破坏情况	观测地点
1	1	20~32	不破坏	16.5	不破坏	葛洲坝、大化、
2	2	73~118	不破坏	17.9	不破坏	
3	7	298~479	不破坏	46.0	不破坏	万安、隔河岩
4	35	579~939	不破坏	254	不破坏	
5	40	595~964	不破坏	302	不破坏	等水电工程
6	40	595~964	接近破坏	466~653	破坏	
7	1.5	46~80	破坏	279~508	破坏	美国 Auburn 坝
8	7	290~479	接近破坏或破坏	279~508	不破坏	
9	0.25~3	129~209	接近破坏或破坏 ¹⁾	160	抗压强度降低	美国 Finland 坝
10	0.25~3	129~209	不破坏 ¹⁾	71~94	抗压强度不降低	

1)按龄期 3d 考虑,若龄期小于 2d,则预测结果为破坏

5 结论与结语

通过上述理论计算和实例分析,可获得以下基本结论:

(1)通过上述理论推导得到,基础混凝土的极限震动速度与实测的破坏震动速度处于同一量级。说明通过计算爆破地震波(Rayleigh波)作用下的新浇筑基础混凝土中的震动速度及动拉应变的分布,并结合不同龄期下新浇筑混凝土的允许极限拉应变分析,从理论上来确定新浇筑基础混凝土安全震动速度的方法是合理可行的。

(2)影响新浇筑基础混凝土的极限震动速度的因素为:新浇筑混凝土的允许极限拉应变、混凝土和基岩的弹性模量、泊松比以及基岩的声波速度。混凝土的极限震动速度随混凝土龄期的缩短及基岩对新浇筑混凝土的基础约束程度的提高而降低。

(3)我国现行采用的新浇大体积混凝土基础面上的爆破安全震动速度标准具有较大的安全余地,这与国内外试验成果相一致。

然而,对新浇筑基础混凝土这种特殊结构,其震动破坏不单由混凝土的早期强度所决定,而且还与静力状态下混凝土内的初始应变状态密切联系。新浇筑混凝土体内的应变状态受到混凝土内温度、应力、混凝土的徐变及自缩变形特性等多方面的影响。另外,国内外目前尚缺少混凝土的从初凝至 7d 龄期的超早期强度极限拉应变的试验资料,而此阶段的新浇筑混凝土最易受到爆破震动的不利影响。这些方面的研究工作还有待进一步开展。

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]. 水利部建设司. 水利水电施工技术规范汇编续编[C]. 北京:水利电力出版社, 1995.
SL47-94, Technical Standard for Rock Foundation Excavation of Hydraulic Structures[S]. Construction Division of DWC, P R China. Collection of Standard for Construction of Hydraulic and Hydroelectric Engineering[M]. Beijing: Hydraulic and Hydroelectric Publishing Company, 1995.
- [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, DONG 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]. J 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]. Int J for Blasting and Fragmentation, 1998, 2(2): 181-194.
- [6] 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.
- [7] Parsons T J, Naik T R. Early Age Concrete Strength Determination by Maturity[J]. Concrete Int: Design & Material Journal, 1985, 7(2): 37-43.
- [8] Fracis A O. Elastic Modules, Poissons Ratio and Compressive Strength Relationships at Early Ages[J]. ACI Material Journal, 1991, 88(1): 3-10.

Determination of the Limit of the Safety Velocity for Young Foundation Concrete under Blasting Vibration Loading

LU Wen-bo

*(School of Hydraulic and Hydroelectric Engineering,
Wuhan University, Wuhan 430072, Hubei, China)*

Abstract: Be aimed at the situation that the safety velocity of young concrete under blasting vibration loading was usually determined only by engineering experience, a theoretical method to determine safety velocity of young concrete under blasting vibration loading is proposed in this paper, through calculating of distribution of vibration velocity and dynamic strain in young foundation concrete caused by blasting seismic (Rayleigh wave) and analyzing of the ultimate tensile strain of young concrete. Results of theoretical analysis and calculated example show that the proposed method is both reasonable and feasible, the younger the concrete and the higher the degree of restraint from rock foundation are, the lower the safety vibration velocity of young concrete is permitted. The safety vibration velocity for young foundation concrete adopted in our country is of enough safety.

Key words: young concrete; blasting vibration; Rayleigh wave; safety velocity