DOI: 10.11883/1001-1455(2017)02-0299-08

高架桥混凝土多室箱梁水压爆破破碎机理数值模拟*

孙金山[1],姚颖康[2],吴 亮[3],谢先启[2],贾永胜[2],韩传伟[2],刘昌邦[2]
(1.中国地质大学(武汉)工程学院,湖北 武汉 430074;
2.武汉爆破有限公司,湖北 武汉 430023;
3.武汉科技大学理学院,湖北 武汉 430081)

摘要:高架桥钢筋混凝土箱梁属于薄壁空腔结构,钢筋含量高,难以进行钻孔爆破破碎。以武汉沌阳高架桥爆破拆除工程为背景,提出了采用水压爆破破碎多室钢筋混凝土箱梁的方案,并采用动力有限元数值模拟方法模拟了全封闭多室箱梁结构的水压爆破破坏过程,研究了炸药在水中爆炸后诱发的冲击波和爆生气体对下箱梁结构的双重作用过程;在对数值模拟与实际爆破效果分析基础上,探讨了箱梁水压爆破方案的药包布置方式、爆破参数和起爆顺序等。

关键词:高架桥;钢筋混凝土箱梁;水压爆破;破碎机制;爆破方案
中图分类号:O383.2 **国标学科代码**:13035 **文献标志码**:A

近年来,为完善我国交通基础建设,许多病害老旧高架桥需拆除。由于高架桥往往地处城市市区,周边环境复杂,工程量大,拆除的难度和风险较高。目前高架桥拆除主要有机械切割拆除和爆破拆除 2 种方式,其中,机械拆除方式施工效率低,安全风险大,对周边环境影响大,而爆破拆除具有高效经济等优点,是拆除大型建筑物的首选技术,因此城市高架桥宜采用爆破方式快速拆除。

城市高架桥上部结构常采用多室混凝土箱梁结构,而箱梁结构强度高、刚度大,在塌落至地面时往往仍能保持完整,以致诱发的触地冲击和触地振动较大,同时,要将其清除还必须要进行二次破碎。而由于箱梁结构壁薄且配筋率高,难以采用钻孔爆破的方式进行破碎,因此,对其实施水压爆破是较为合理的破碎方案。采用水压爆破对其进行预破碎时,既能达到破碎效果,又可减少粉尘和塌落触地振动效应。针对薄壁结构的水压爆破问题,许多学者通过实验和数值模拟的方法进行了大量的研究[1-6]。其中,杨忠华等[6]对桥梁钢筋混凝土拱座空心立柱的水压爆破机制进行了数值模拟,较为全面的阐述了水压爆破的力学机制。但由于高架桥箱梁结构的水压爆破研究者较少,且其结构具有一定的特殊性,因此,本文中拟针对多室混凝土箱梁结构爆破破碎机制与参数设计问题,采用数值模拟的方法对箱梁水压爆破破碎机制进行分析,并对其爆破参数进行讨论。

1 多室箱梁水压爆破动力有限元模型

与一般的水塔、水箱等单室薄壁混凝土结构不同,多室混凝土箱梁爆破时需在多个分割的空间内起爆多个药包,其水压爆破破碎的机制更为复杂,为此,采用动力有限元数值模拟方法对其水压爆破破碎过程进行分析。

1.1 武汉沌阳高架桥多室箱梁结构与初步爆破方案

武汉市沌阳高架桥采用爆破方式拆除,全桥共 181 孔,采用一次性连续塌落方式进行拆除,对部分箱梁实施水压爆破以提高后期清运效率。本桥上部结构典型横断面为 5 室箱梁结构(如图 1(a)所示),

* **收稿日期**:2015-07-20;**修回日期**:2015-12-10
基金项目:国家自然科学基金项目(51379194)
第一作者:孙金山(1980—),男,副教授,博士,sun99001@126.com。

每个空腹腔断面大致呈不规则矩形，其高宽尺寸约为 0.8 m×0.6 m。箱梁顶部钢筋混凝土壁厚为 0.08 m，底部钢筋混凝土壁和腹板厚度均为 0.1 m。

本工程的原爆破方案中，为了防止两侧产生飞石，仅对中间 3 个腔室进行爆破（如图 1(a)所示）。在单个箱梁腔室中布置一排质量均为 200 g 的药包（单个∅32 mm 乳化炸药药卷），药包轴线方向的间距为 2.5 m，入水深度为 0.6 m，箱梁中的所有药包同时起爆。爆破装药方案如图 1(b)所示。

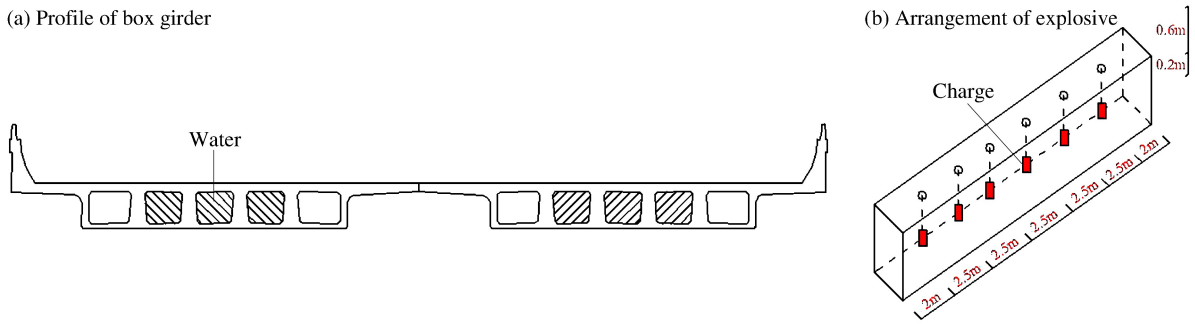

图 1 沌阳高架桥箱梁水压爆破方案

Fig. 1 Water pressure blasting plan of box girder of Zhuanyang viaduct

1.2 多室箱梁结构水压爆破有限元模型

（1）数值模拟方法

响亮水压爆破破碎过程选择 LS-DYNA 程序进行数值模拟，考虑爆破过程涉及炸药、水、气体、混凝土和钢筋等材料，采用流固耦合算法进行分析，即把钢筋混凝土结构网格和流体材料网格直接耦合，计算二者在每一时间步长的物理力学状态。钢筋混凝土结构网格采用拉格朗日网格，流体材料网格采用欧拉网格。在计算过程中，炸药与水等介质所引起的压力载荷自动作用到钢筋混凝土网格上，结构发生的动力响应又反作用于流体介质，最终实现流体-结构耦合作用过程的模拟[7-8]。

（2）数值模型

选择沌阳高架桥第 55、56 号墩间的箱梁进行分析。为简化分析，取箱梁跨中长为 2.5 m 的梁段进行建模，取整体模型的 1/4 进行分析，如图 2 所示。为了建模方便，将药包看作正方体药包，药包布置于腔室的中轴线上，距底板 0.2 m，轴线方向距离为 2.3 m，3 个空腔中的炸药同时起爆。钢筋混凝土采用等效模型，即将钢筋与混凝土材料等效为一种材料。为满足计算精度，设定有限元网格单元最大尺寸约为 1 cm。模型中顶部和左侧与外界空气接触的边界采用自由边界；前后和右侧的模型对称边界上采用无反射边界，并约束前后边界的位移使箱梁处于悬空状态。

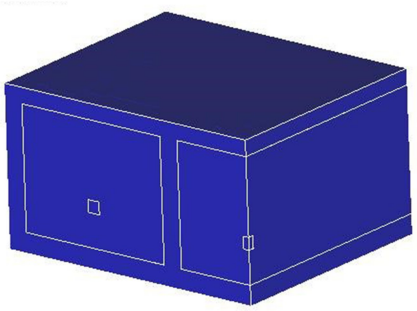

图 2 箱梁水压爆破有限元模型

Fig. 2 Finite element model of water pressure blasting plan of box girder

（3）混凝土本构模型

混凝土受到爆炸冲击荷载作用时，需要考虑大应变、高应变率和高围压下材料损伤破坏的过程，因而采用 LS-DYNA 中的 Johnson-Holmquist-Cook(JHC)模型模拟钢筋混凝土材料。钢筋混凝土的主要材料参数：密度为 2.5 kg/m^3，弹性模量为 35.7 GPa，剪切模量为 14.86 GPa，泊松比为 0.2，特征化粘性强度因数 A 为 0.79，特征化压力硬化因数 B 为 1.6，应变率影响参数 C 为 0.007，压力硬化指数 N 为 0.61，抗压强度为 0.048 GPa，抗拉强度为 0.004 GPa，损伤常数为 0.01，最大量纲一强度为 7.0，弹性压力为 0.016 GPa，弹性应变阈值为 0.001，压实压力为 0.8 GPa，压力应变阈值为 0.1，损伤参数 D_1、D_2

分别为 0.04 和 1.0，压力常数 K_1、K_2、K_3 分别为 85.0、−171.0 和 208.0 GPa。

（4）炸药状态方程

LS-DYNA 程序中，采用 JWL 方程模拟高能炸药的爆炸过程：

$$p_{\mathrm{eos}}=A\left(1-\frac{\omega}{R_1V}\right)e^{-R_1V}+B\left(1-\frac{\omega}{R_2V}\right)e^{-R_2V}+\frac{\omega E_0}{V} \tag{1}$$

式中：p_{eos}为由 JWL 状态方程决定的压力，V 为相对体积，E_0 为初始比内能，A、B、R_1、R_2、ω 为描述 JWL 方程的 5 个独立物理常数。本文中计算炸药参数取值见表 1，表中：ρ 为炸药密度，D 为炸药爆速。

表 1 JH-2 炸药计算参数

Table 1 Computational parameters of JH-2

ρ/(kg·m^{-3})	D/(m·s^{-1})	A/GPa	B/GPa	R_1	R_2	ω	E_0/(MJ·m^{-3})
1 300	4 000	214.4	0.182	4.2	0.9	0.15	4 192

（5）水和空气状态方程

水采用 MAT_NULL 材料模型，通过 Grüneisen 状态方程描述。空气密度取为 1.29 kg/m^3，压力采用线性多项式状态方程模拟。

2　水中冲击波和爆生气体对混凝土的破坏机理

2.1　水中爆炸冲击波作用过程

计算结果表明，炸药起爆后将生成冲击波，并在箱梁空间内传播、反射与反复震荡，如图 3 所示，其作用过程包括以下阶段。

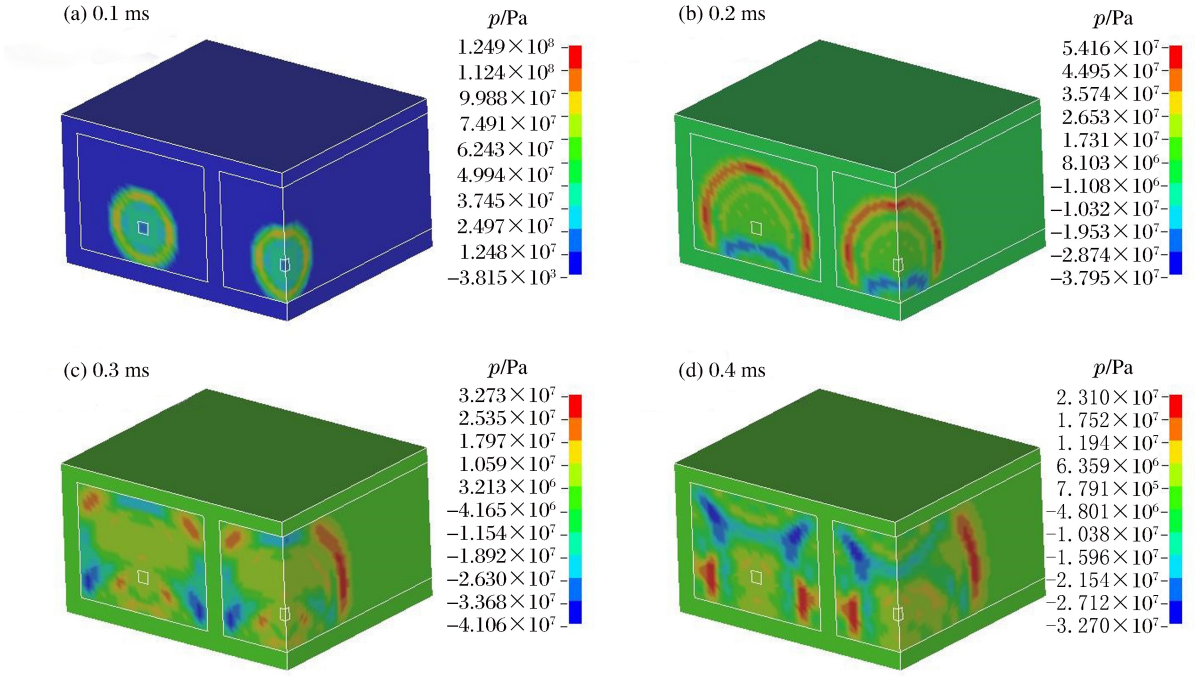

图 3　水中冲击波传播过程

Fig. 3　Shock wave propagation progress in water

（1）由于药包较为靠下，炸药起爆后 0.1 ms，冲击波先到达箱梁的底板，压力峰值约为 125 MPa，首次到达的冲击波在水中的平均传播速度约为 2 000 m/s，如图 3(a)和图 4 所示。在 0.2 ms 左右，冲击波到达箱梁的腹板和顶板。冲击波到达箱梁壁后，箱梁壁承受强大的压力，且由于其作用不均匀，钢筋混

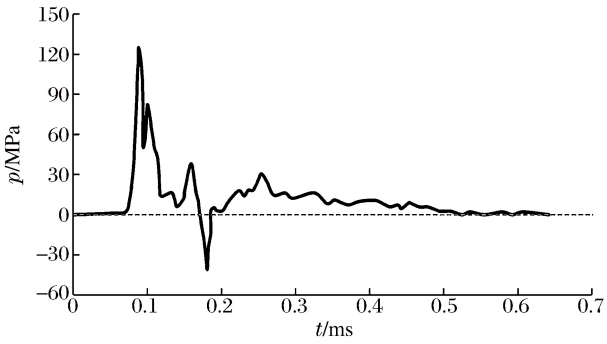

图 4 药包下方箱梁底板压力时程曲线

Fig. 4 Pressure time-history curve of the bottom of box girder under the explosive

凝土薄壁将承受强烈的弯曲和剪切作用，足以使其发生严重损伤开裂。但此时，由于初次到达的冲击作用时间极短，只有几十微秒，因此受惯性影响，钢筋混凝土还来不及发生较大的变形，不至于发生宏观的破碎，水体不至于渗漏。

(2) 冲击波到达箱梁壁后紧接着发生反射，反射的冲击波具有两段性，即前半段波仍属于压缩波，但迅速衰减至 40 MPa 左右，后半段波则为稀疏波，产生的拉力也达 40 MPa 左右(如图 4 所示)，而 20 ℃的水在 2 350 Pa 的正压条件下即可发生气化，因此在几十兆帕的负压条件下箱梁壁附近将发生严重的空化现象(图 3(b)～3(d)中的蓝色区)。此时，空化将进一步产生吸力，使箱梁壁产生向内侧运动的趋势，冲击波对箱梁壁实现了第二次加载。

(3) 在爆生气体膨胀至箱梁壁前(约 4.0 ms)，爆炸冲击波还将在箱梁中发生多次反射，但其压力将迅速衰减，如图 3(d)和图 4 所示，在 0.4 ms 时其峰值压力已迅速衰减至 20 MPa 左右，加之应力波的反射和叠加空化作用将难以再次形成，因此箱梁壁承受的后期作用以压力为主。钢筋混凝土承受冲击波的反复作用后，将发生严重的损伤，但由于作用时间仍为毫秒量级，宏观裂纹来不及扩展，因此仍不会发生强烈破碎和飞散。

2.2 爆生气体膨胀作用过程

箱梁中炸药爆炸产生冲击波后，随之生成大量的爆生气体，爆生气体与水混合后将产生强烈的膨胀作用，其膨胀过程如图 5 所示。计算结果显示，在 0.8 ms 时爆生气体到达箱梁的底部(如图 5(b)所示)，滞后于冲击波约 0.7 ms，平均传播速度为 250 m/s，远低于冲击波的传播速度。爆生气体膨胀到箱梁壁时，对混凝土施加膨胀压力，底板开始发生破坏。在 4.3 ms 时，爆生气体将基本充满整个箱梁横向空间，并沿轴线方向向两侧扩散(如图 5(d)所示)。

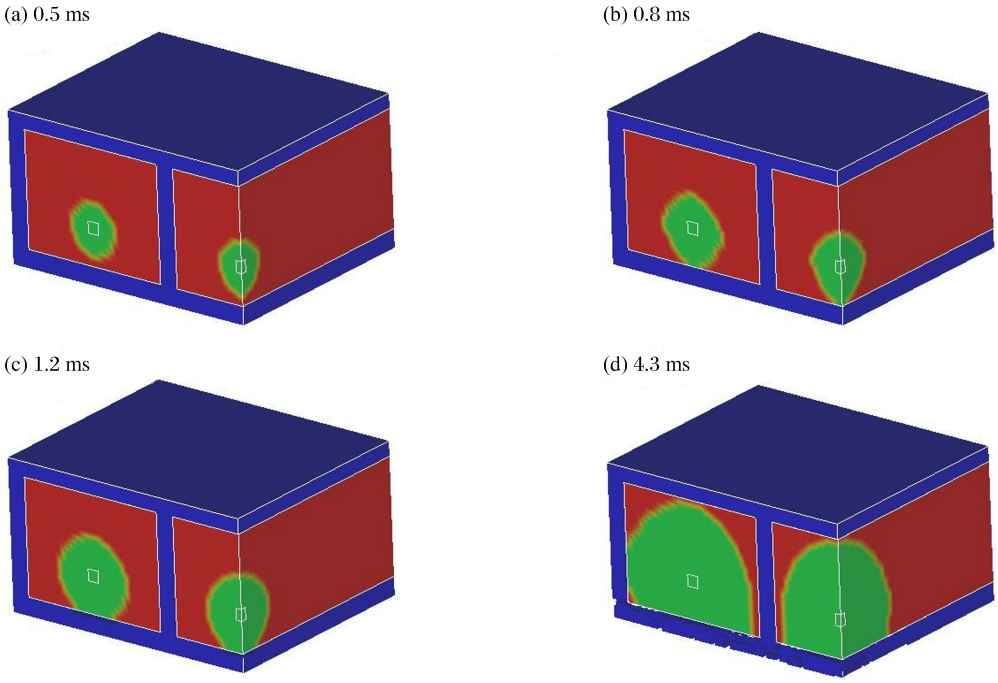

图 5 爆生气体膨胀过程

Fig. 5 Expansion process of blasting gas

2.3　箱梁结构的破碎过程

爆炸冲击波反复作用后，在爆生气体膨胀作用下，箱梁逐渐发生破碎，如图 6 所示。其破碎过程分为以下阶段。

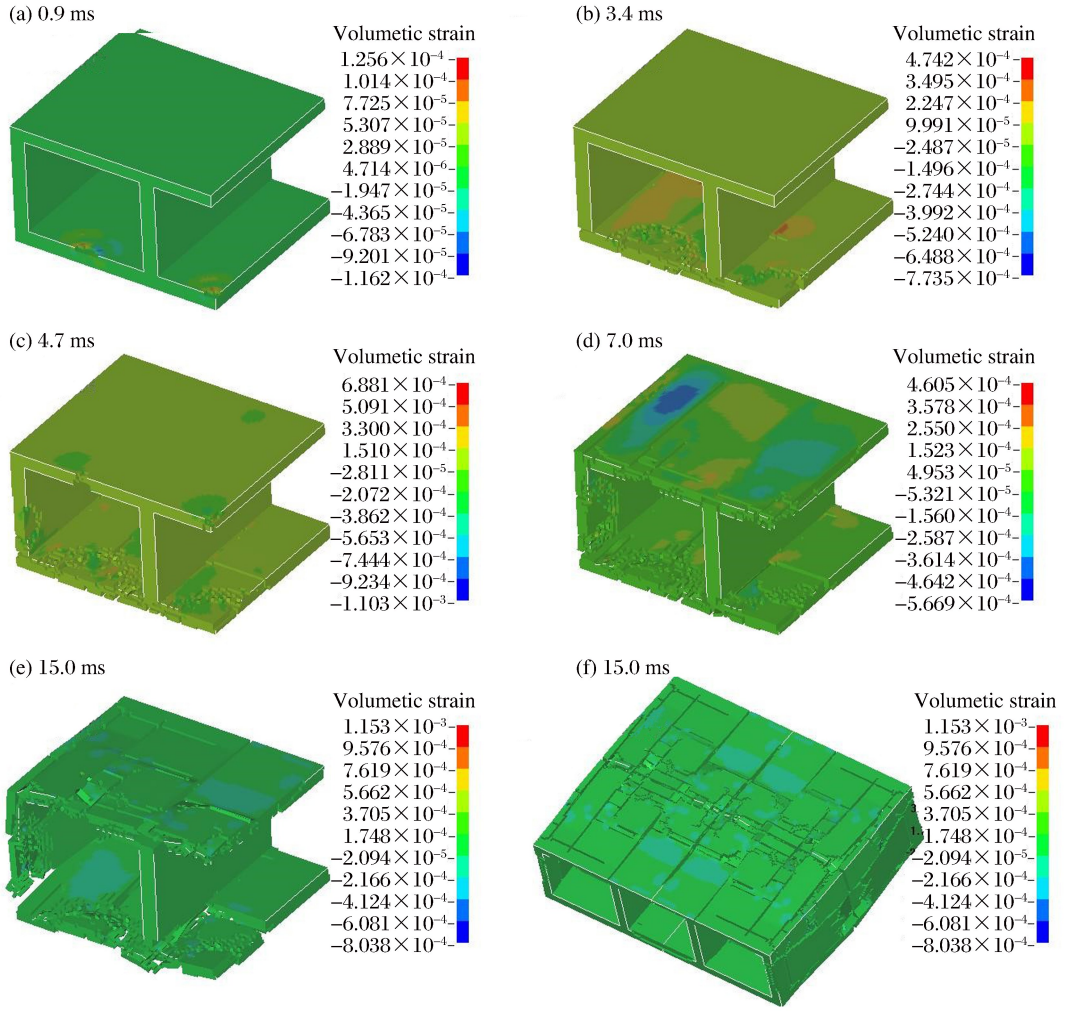

图 6　箱梁破碎过程

Fig. 6　Break process of box girder

(1) 炸药起爆后冲击波先对箱梁的混凝土壁进行约 0.4 ms 的冲击作用，但由于作用时间极短混凝土未发生宏观的破坏。随后，爆生气体膨胀至箱梁壁时，将引起持续的张拉作用，并进而导致混凝土壁向外的位移，在 0.9 ms 时刻箱梁底板首先发生破碎，并持续向四周扩展形成大量张拉裂纹，如图 6(a)、(b)所示。

(2) 随着爆生气体的进一步膨胀，在 4.5 ms 左右气体充满横断面，混凝土壁都开始发生破碎，同时延箱梁轴线方向扩展(如图 6(c)所示)。

(3) 炸药起爆 7.0 ms 后，箱梁已经发生较严重的破坏，出现贯通性裂纹，箱梁中的水和爆生气体将溢出，破坏终止(如图 6(e)所示)。此后，距离药包较远的箱梁壁难以发生强烈的破坏，而且箱梁腹板宏观上也无明显的破坏现象，这是由于两侧药包同时起爆时，腹板上施加的爆破荷载对称，仅受到两侧的挤压而没有产生位移，因此其破坏效应不显著(如图 6(f)所示)。

数值模拟结果表明，该箱梁的水压爆破破碎效果基本可满足要求，但腹板破碎效果较差，因此，将原爆破方案的药包同时起爆可改为：箱梁的中间腔室先起爆，两侧腔室随后同时起爆，起爆时差为 25 ms。

3 水压爆破方案优化与探讨

3.1 方案优化与爆破效果

数值模拟结果表明,该箱梁的水压爆破破碎效果基本可满足要求,但腹板破碎效果较差,因此,将原爆破方案的药包同时起爆改为:箱梁的中间腔室先起爆,两侧腔室随后同时起爆,起爆时差为 25 ms。

采用上述爆破方案后,实际爆破效果如图 7 所示。从图 7 可以看出,箱梁破碎效果较好,顶部、底部和腹板破碎都较为充分,对爆破后的箱梁采用破碎锤、挖机和切割工具可快速进行清运,比未采用水压爆破时施工效率大大提高。与数值模拟结果相比,箱梁的实际破碎相对较弱,这主要是由于数值模拟时为了简化模型、提高计算效率而采用了钢筋混凝土等效模型,未考虑复杂密布的钢筋网,因此数值模拟结果显示的破碎更加显著。

(a) After water pressure blasting (b) Without water pressure blasting



图 7 箱梁破碎效果

Fig. 7 Breaking result of viaduct

该工程的爆破飞石也得到了很好的控制,粉尘也较少,而且由于箱梁整体刚度受到了严重的削弱,塌落至地面时触地冲击和触地震动也有效降低。

3.2 爆破参数的探讨

尽管实际爆破方案的破碎效果基本达到了预期的要求,根据数值模拟结果和实际破碎效果,其爆破方案及爆破参数的选取仍值得探讨。

(1) 实际爆破方案中药包距离底板仅 0.2 m,而距离两侧腹板和顶板分别为 0.3 和 0.6 m。原方案入水深度是通过工程类比确定的,因为以往水压爆破的容器多为敞口容器,因此药包一般距离底部较近,而桥梁的箱梁实际为全封闭容器,因此,原爆破方案的入水深度过于偏下,数值模拟结果和实际破碎效果也显示,箱梁顶板的局部破碎效果相对较差。因此,对于全封闭的箱梁结构,其药包应布置于中部略偏下的位置,如本工程水深 0.8 m,其最佳入水深度应为 0.4～0.5 m。

(2) 原爆破方案中,为了提高施工效率、控制成本,药包沿箱梁轴线方向的间距设计为 2.5 m,数值模拟结果和实际破碎效果表明,两药包中间处的钢筋混凝土壁破碎程度较低,需要进一步破碎,可见其药包间距偏大,根据冲击波和爆生气体的传播规律,药包间距在 2 倍水深即 1.6 m 左右时可能破碎效果更佳。

(3) 箱梁相邻腔室同时起爆时,腹板破碎效果较差,因此可采用相邻腔室依次微差起爆的方式。

(4) 本工程中爆生气体作用 10 ms 左右时,箱梁壁将发生强烈的破碎,形成宏观裂纹,水和气体溢出,因此,相邻腔室间的药包起爆时差在 10 ms 以内时破碎效果较好。但是常规的导爆管雷管的最小延迟时间为 25 ms,时差过大,因此若要达到最优破碎效果,可选择电子雷管精确地控制起爆时差。

(5) 原爆破方案中为了防止两侧飞石的产生,仅在箱梁 5 个室中的 3 个室实施了水压爆破,实际爆破效果表明,在原爆破参数下,爆破时箱梁的飞石数量和飞散距离都得到了有效控制,因此周边防护条

件允许时，箱梁整体都采用水压爆破也是可行的。

4 结　论

以武汉沌阳高架桥爆破拆除工程为背景，提出了多室钢筋混凝土箱梁的水压爆破方案，并采用动力有限元模拟了其水压爆破破坏过程，并对爆破方案进行了探讨，得到以下结论。

(1) 混凝土多室箱梁实施水压爆破时，水中冲击波以较高的传播速度先对混凝土壁进行冲击，其冲击压力可达 100 MPa 量级，并通过冲击波反射所导致数十兆帕的负压作用加剧对钢筋混凝土的损伤，但由于其作用时间较短难以造成钢筋混凝土的充分破碎；随后，爆生气体产生强烈的膨胀作用，并对箱梁结构施加巨大的张拉作用，最终使得钢筋混凝土得到充分破碎。

(2) 群药包爆炸产生的水中冲击波在箱梁中的作用时间极短，小于毫秒量级，且压力急剧衰减；而爆生气体的作用时间可达到十毫秒至数十毫秒量级，其衰减过程伴随着结构的破坏；箱梁破碎时大致以药包投影为中心向四周放射状扩展且沿受力筋方向破坏更为严重。

(3) 一般高架桥多室箱梁结构采用水压爆破进行破碎时，炸药的用量取 150 g/m^3 左右时可满足箱梁破碎的基本要求；药包宜布置在箱梁单室横断面的中心位置，在箱梁轴线上宜采用较小的药包间距；相邻腔室间宜采用毫秒微差起爆，且宜采用数码雷管将时差应控制在 10 ms 左右。

参考文献：

[1] 张宪堂，陈士海. 多层复合壁构筑物水压爆破药量计算及应用[J]. 爆炸与冲击，1999，13(3)：256-261.
Zhang Xiantang, Chen Shihai. Calculation and application of water pressure blasting with multi-layered compound walls[J]. Explosion and Shock Waves, 1999, 13(3): 256-261.

[2] 周听清，奉孝中. 水压爆破中群药包药量的计算[J]. 中国科学技术大学学报，2000，30(5)：593-599.
Zhou Tingqing, Feng Xiaozhong. The Numeration of multi-charges weight for explosive in the water-pressure blasting[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2000, 30(5): 593-599.

[3] 谢俊杰，龙源，吴腾芳，等. 水压爆破在特殊结构构筑物拆除中的应用技术[J]. 工程爆破，2005，11(4)：50-53.
Xie Junjie, Long Yuan, Wu Tengfang, et al. Application technology of water pressure blasting to demolish of especial structure building[J]. Engineering Blasting, 2005, 11(4): 50-53.

[4] 段卫东，马建军，钟冬望. 水压爆破拆除矩形钢筋混凝土酿酒池[J]. 工程爆破，2003，9(2)：60-62.
Duan Weidong, Ma Jianjun, Zhong Dongwang. Demolition of a reinforced-concrete wine-making rectangular pool by water-pressure blasting[J]. Engineering Blasting, 2003, 9(2): 60-62.

[5] 李耀光. 水压爆破拆除钢筋砼蓄水池工程实践[J]. 爆破，2007，24(1)：79-80，83.
Li Yaoguang. Application of hydraulic explosion in demolishing a reinforced concrete pool[J]. Blasting, 2007, 24(1): 79-80, 83.

[6] 杨忠华，杨军，陈大勇. 混凝土拱座空心立柱水压爆破数值模拟研究[J]. 爆破，2010，27(4)：70-73.
Yang Zhonghua, Yang Jun, Chen Dayong. Study on water pressure blasting of reinforced arch seat and hollow pillar in numerical simulation[J]. Blasting, 2010, 27(4): 70-73.

[7] Holmquist T J, Johnson G R. A computational constitutive model for concrete subjected to larger strains, high strain rates and high pressure[C]// Jackson N, Dickert S. 14th International Symposium Ballistics. USA: American Defense Preparedness' Association, 1995, 591-600.

[8] 吴亮，钟冬望，卢文波. 空气间隔装药爆炸冲击荷载作用下混凝土损伤分析[J]. 岩土力学，2009，30(10)：3109-3104.
Wu Liang, Zhong Dongwang, Lu Wenbo. Study of concrete damage under blast loading of air-decking[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(10): 3109-3104.

Numerical simulation of water-pressure blasting mechanism in breaking viaduct box girder

Sun Jinshan[1,2], Yao Yingkang[2], Wu Liang[3], Xie Xianqi[2],
Jia Yongsheng[2], Han Chuanwei[2], Liu Changbang[2]
(1. *Engineering Faculty, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan* 430074, *Hubei, China*;
2. *Wuhan Explosions and Blasting Corporation Limited, Wuhan* 430023, *Hubei, China*;
3. *College of Science, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan* 430081, *Hubei, China*)

Abstract: As a thin-walled structure with a very high content of reinforcement, a viaduct box girder is hard to break using the drilling-style blasting. In this paper, based on the demolition project of Zhuan Yang Viaduct in Wuhan, a blasting plan using the water-pressure blasting technique was proposed to demolish multi-chamber reinforced concrete box girders. The breaking process of the multi-chamber box girder was simulated using the dynamic finite element method, the role played by the shockwave and the explosive gas in the breaking process were analyzed and, on the basis of the analysis and the actual blasting results, the charge arrangement, the blasting parameters and the blasting sequence of the water pressure blasting plan were discussed.

Keywords: viaduct; box girder; water pressure blasting; breakage mechanism; blasting plan

(责任编辑 王小飞)