

文章编号: 1673-2049(2014)01-0056-07

钢筋混凝土简支板梁桥爆破拆除数值模拟

黄平明¹, 冯剑平¹, 王 蒂¹, 朱 郑²

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 山东高速股份有限公司京台分公司
枣庄养护所, 山东 济南 250014)

摘要: 为了实现对钢筋混凝土简支板梁桥爆破拆除过程的有限元数值模拟, 采用动力分析软件 ANSYS/LS-DYNA 建立了分离式共节点模型; 对比分析了在板梁两侧切口与跨中切口采用微差爆破与不采用微差爆破 2 种方案下的爆破效果, 并对 2 块板梁上、下缘混凝土的受力过程进行了分析。结果表明: 分离式共节点模型可以体现出钢筋和混凝土的力学性能差异; 采用微差爆破可以减小爆堆范围, 使得更多的钢筋和混凝土单元失效被删除。

关键词: 桥梁工程; 爆破拆除; 数值模拟; 分离式共节点模型; 钢筋混凝土简支板梁桥; 微差爆破
中图分类号: TU746.5 **文献标志码:** A

Numerical Simulation of Blasting Demolition for RC Bridges of Simply-supported Plate Girder

HUANG Ping-ming¹, FENG Jian-ping¹, WANG Di¹, ZHU Zheng²

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Zaozhuang Maintenance Department, Beijing-Taibei Branch of Shandong Hi-speed Company Limited, Jinan 250014, Shandong, China)

Abstract: In order to realize the numerical simulation of blasting demolition for reinforced concrete (RC) bridges of simply-supported plate girder, the separate model of common nodes was established using the dynamic analysis software ANSYS/LS-DYNA. The blasting effectiveness between using millisecond blasting and without using millisecond blasting at the cuts which was on both sides and the plate girder at mid-span were comparatively analyzed, then the loading processes of the concrete both on the upper and lower edge were studied. The results show that the separate model of common nodes can reflect the differences of the mechanical property between the steel and concrete; the scope of the blasting heap can be decreased and more steel and concrete elements can be invalid by using the scheme of millisecond blasting.

Key words: bridge engineering; blasting demolition; numerical simulation; separate model of common node; RC bridge of simply-supported plate girder; millisecond blasting

0 引言

随着经济的高速发展和桥梁保有量的增加, 越

来越多的桥梁的通行能力已经不能满足车流量的增加, 许多桥梁由于各种原因需要拆除或重建, 爆破拆除是拆除钢筋混凝土结构的主要方法之一, 因其快

收稿日期: 2013-10-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(51278064); 云南省交通运输厅科技教育项目(云交科教[2011]355号);

云南省交通运输厅科技计划项目(云交科[2011]17-a)

作者简介: 黄平明(1965-), 男, 湖北当阳人, 教授, 博士研究生导师, 工学博士, E-mail: hpming@vip.sina.com.

捷、高效的特点得到了广泛的应用。在以往的爆破拆除中,人们多是通过经验来进行建(构)筑物的爆破拆除设计,这样不能全面地反映爆破拆除的力学性能。利用计算机模拟技术则可以对建(构)筑物的爆破拆除过程进行数值模拟,优化爆破设计方案,预演爆破拆除过程^[1-3]。本文中笔者尝试采用分离式共节点钢筋混凝土模型对钢筋混凝土筒支板梁桥上部结构的爆破拆除过程进行数值模拟,为数值模拟技术在钢筋混凝土桥梁爆破拆除中的应用提供理论依据和技术支持。

1 数值计算方法

在 ANSYS/LS-DYNA 中,采用的是一种显式方法——改进的中心差分时间积分法^[4-6]。在 t 时刻的加速度定义为

$$\mathbf{a}_t = \mathbf{M}^{-1} \mathbf{F}_t^{\text{ext}} - \mathbf{F}_t^{\text{int}} \quad (1)$$

式中: \mathbf{a}_t 为加速度矢量; $\mathbf{F}_t^{\text{ext}}$ 为施加的外部力矢量; $\mathbf{F}_t^{\text{int}}$ 为内部力矢量; \mathbf{M} 为总体质量矩阵。

定义 $\mathbf{F}^{\text{int}} = \sum_{\Omega} (\int \mathbf{B}^T \sigma_n d\Omega + F^{\text{hg}}) = F^{\text{contact}}$, 其

中, \mathbf{B} 为应变位移矩阵, F^{hg} 为沙漏阻力, F^{contact} 为接触力, σ_n 为单元应力, Ω 为单元体积。

速度 \mathbf{V} 和位移 \mathbf{u} 计算式为

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{V}_{t+\Delta t/2} &= \mathbf{V}_{t-\Delta t/2} + \mathbf{a}_t \Delta t_t \\ \mathbf{u}_{t+\Delta t} &= \mathbf{u}_t + \mathbf{V}_{t+\Delta t/2} \Delta t_{t+\Delta t/2} \\ \Delta t_{t+\Delta t/2} &= 5(\Delta t_t + \Delta t_{t+\Delta t}) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: Δt 为时间增量。

式(1),(2)不需要对刚度矩阵进行分解,内部矢量包含所有的非线性问题,不需要对其进行收敛检查。该方法在处理接触碰撞、爆炸等大变形、大位移问题中具有优势。

2 有限元模拟

2.1 材料的选择

本模型采用的是 ANSYS/LS-DYNA 中提供的 * MAT_PLASTIC_KINEMATIC 材料模型^[7-9]。该材料模型是与应变率有关的塑性随动强化模型,具有失效应变,是一种各向同性、随动强化或各向同性与随动强化的混合模型。在冲击或爆炸荷载作用下,结构材料会产生快速变形,应变率也会明显提高。应变率采用 Cowper-Symonds 模型来考虑,采用与应变率有关的因数来表示屈服应力 σ_y ,即

$$\sigma_y = [1 + (\frac{\dot{\epsilon}}{C})^{\frac{1}{P}}] (\sigma_0 + \beta E_p \epsilon_{\text{eff}}^p) \quad (3)$$

式中: $\dot{\epsilon}$ 为应变率; C, P 均为 Cowper-Symonds 应变率参数; $[1 + (\frac{\dot{\epsilon}}{C})^{\frac{1}{P}}]$ 为材料放大因子; σ_0 为初始屈服应力; β 为可调强化参数, $\beta=0$ 为塑性随动强化模型, $\beta=1$ 为等向强化模型; E_p 为塑性强化模量, $E_p = \frac{E_{\text{tan}} E}{E - E_{\text{tan}}}$, E, E_{tan} 分别为弹性模量和切线模量; ϵ_{eff}^p 为等效塑性应变, $\epsilon_{\text{eff}}^p = \int_0^t (\frac{2}{3} \epsilon_{ij}^p \epsilon_{ij}^p)^{1/2} dt$, ϵ_{ij}^p 为塑性应变率, $\epsilon_{ij}^p = \epsilon_{ij} - \epsilon_{ij}^e$, ϵ_{ij} 为总应变率, ϵ_{ij}^e 为弹性应变率。

模型中钢筋和混凝土材料均为塑性随动硬化材料,钢筋和混凝土材料的力学性能参数如表 1 所示。

表 1 材料的力学性能参数

Tab. 1 Mechanical Behavior Parameters of Materials

材料类型	密度/ (kg · m ⁻³)	弹性模 量/GPa	泊松比	抗拉强 度/MPa	抗压强 度/MPa
钢筋	7 800	200	0.270 0	280	280
混凝土	3 200	30	0.166 7	6	20

2.2 模型的建立

2.2.1 基本假设

(1) 采用分离式共节点模型模拟结构的倒塌过程,并且不考虑钢筋和混凝土材料之间的粘结和滑移^[10-12]。

(2) 不考虑爆破切口破坏形成的过程和炸药爆炸对整体结构的作用,采用直接删除爆破切口内混凝土单元的方法来模拟爆破切口的形成。

(3) 爆破切口是平滑的。

(4) 不考虑钢筋混凝土结构倒塌过程中与地面的相互作用。

2.2.2 模型概况

该模型为单跨钢筋混凝土筒支板梁桥,跨径为 10 m,桥面宽度为 9 m。对于该桥梁结构,采用有限元软件 ANSYS/LS-DYAN 建立分离式共节点钢筋混凝土有限元模型,在 LS-DYAN 环境下求解,在 LS-PREPOST 中进行后处理分析。钢筋采用 Beam161 单元,混凝土采用 Solid164 单元。

Beam161 单元用 3 个节点定义,即节点 I, J 均确定梁的轴向,节点 K 确定横截面的主轴方位。

Solid164 单元是三维实体单元,具有 8 个节点,每个节点有 9 个自由度,只有位移是具有实际意义上的物理自由度。

由于板梁为空心板结构,采用扫掠生成体网格的方式对板梁结构进行网格划分,网格划分尺寸为 0.1 m,有限元模型如图 1 所示。

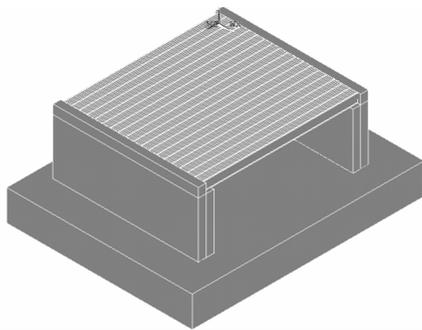


图1 有限元模型

Fig.1 Finite Element Model

由于板梁在下落的过程中既包含与桥台的接触,又包含与地面的接触,接触关系比较复杂,采用LS-DYNA提供的AUTO_SINGLE_SURFACE的接触方式来模拟,该接触方式可以自动搜索接触面、判断接触面并可以处理侵蚀、断裂等复杂的边界变化情况,材料的摩擦因数设定为0.6。该接触方式自动确定壳单元接触表面方向,自动检查壳单元的每一面,通常限制搜索深度。

2.3 爆破模拟方案

钢筋和混凝土材料的破坏准则非常复杂,涉及到材料的本构关系和各种失效准则等因素,本文中钢筋和混凝土材料的失效均由应变控制,其失效应变分别为5.0%,0.48%。在有限元数值模拟中,材料的失效是靠删除单元来实现的。根据微差爆破和重力作用的原理,利用关键字* MAT_ADD_EROSION来删除混凝土单元网格并形成爆破切口。板梁在重力作用下发生失稳、破坏、倒塌落地,通过关键字* LOAD_BODY_Y(Y方向)来实现。

本文中拟对钢筋混凝土简支板梁进行微差爆破拆除,保留两侧桥台,采用2种方案进行数值模拟。方案1:爆破拆除板梁两侧各1.0 m及跨中1.0 m的板梁结构,采取从板梁一侧到板梁另一侧微差0.5 s的爆破方案,切口形成的时间分别为0.5,1.0,1.5 s。方案2:爆破拆除板梁两侧各1.0 m及跨中1.0 m的板梁结构,采取板梁两侧切口同时形成并与中间切口微差0.5 s的爆破方案,切口形成时间分别为0.5,1.0 s。

3 数值结果分析

3.1 倒塌过程模拟结果比较

3.1.1 方案1数值模拟效果

方案1的爆破拆除倒塌效果如图2所示。跨中切口两侧第1个切口、第2个切口附近板梁单元的

z 方向位移-时间曲线分别如图3(a),(b)所示。

从图2,3可以看出:

(1)当 $t=0.6$ s时,第1个爆破切口刚形成之后。

(2)当 $t=1.1$ s时,跨中爆破切口刚形成之后。

(3)当 $t=1.6$ s时,第2个爆破切口形成,第1个切口处的钢筋由于与桥台强烈的摩擦,出现了混凝土和钢筋单元失效破碎被删除的情况,跨中切口处的钢筋也开始出现变形,并拉扯着第2切口处的板梁下落。

(4)当 $t=3.9$ s时,两侧切口处的钢筋都在与桥台的摩擦作用中失效被删除,第1个切口处板梁的下落速度明显快于第2个切口处的板梁,跨中切口处的钢筋在两侧混凝土板梁的拉扯作用下缓慢变形,并拉着2块板梁互相靠拢。

(5)当 $t=5.2$ s时,第1个切口处的钢筋开始着地,第2个切口处的钢筋仍在与桥台接触摩擦,大量钢筋失效被删除。

(6)当 $t=6.0$ s时,第1个切口处的板梁落地,先落地的板梁通过跨中裸露出来的钢筋拉扯着第2个切口处的板梁下落,同时第1块板梁向跨中靠拢的速度加快[图3(a)]。

(7)当 $t=7.0$ s时,第2个切口处的板梁落地,在跨中裸露钢筋的拉力作用下,第1块板梁靠近桥台的一边翘起,并逐渐靠近第2块板梁,第2块板梁同样在裸露钢筋的作用下,出现了远离第1块板梁的趋势[图3(b)],但是速度不及第1块板梁大。

(8)当 $t=9.0$ s时,2块板梁基本靠拢,跨中裸露钢筋严重失效。

(9)当 $t=10.0$ s时,2块板梁落地靠拢完毕,两者移动的位移之和基本上等于跨中切口长度1.0 m(图3)。

3.1.2 方案2数值模拟效果

方案2的爆破拆除倒塌效果如图4所示。跨中切口两侧第1个切口、第2个切口附近板梁单元的 z 方向位移-时间曲线分别如图5(a),(b)所示。

从图4,5可以看出:

(1)当 $t=0.6$ s时,板梁两侧的爆破切口刚形成之后。

(2)当 $t=1.1$ s时,跨中爆破切口刚形成之后。

(3)当 $t=1.6$ s时,两侧切口处的钢筋开始与桥台产生摩擦作用,出现了钢筋和混凝土单元失效破碎被删除的情况,跨中切口处钢筋也开始出现变形。

(4)当 $t=3.9$ s时,伴随着板梁的不断下落,两

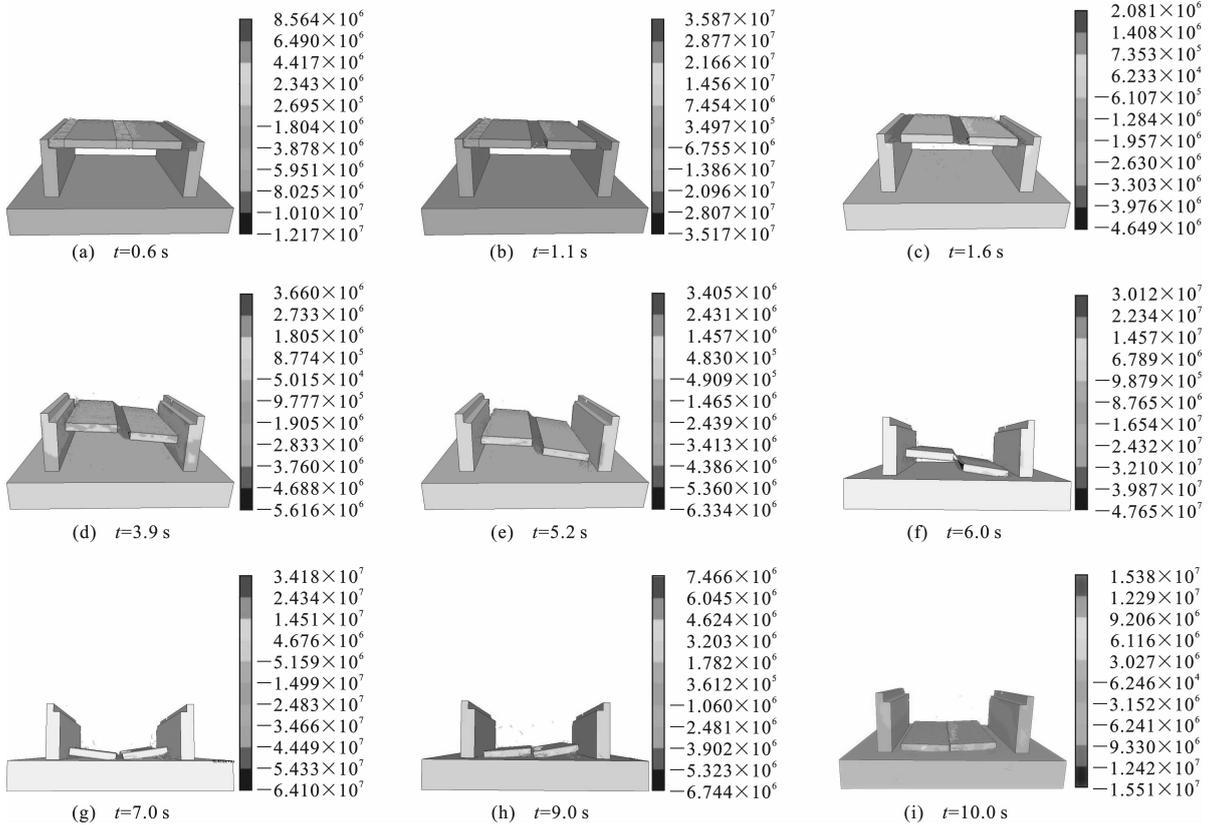
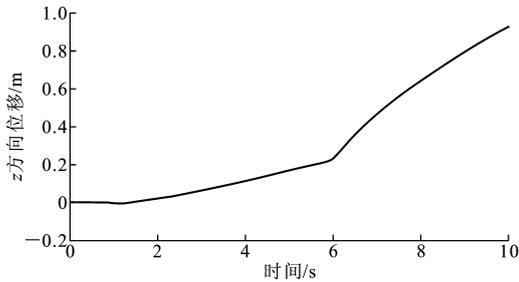
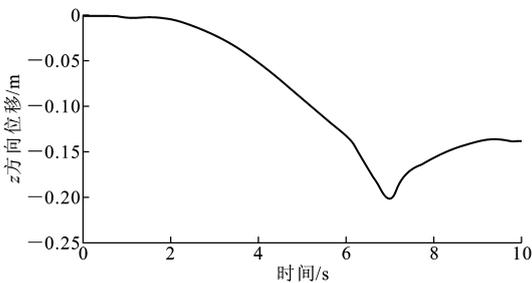


图2 方案1的爆破拆除倒塌效果(单位:Pa)

Fig. 2 Collapse Effects of Blasting Demolition in Scheme One (Unit: Pa)



(a) 第1个切口附近



(b) 第2个切口附近

图3 方案1跨中切口两侧板梁的z方向位移-时间曲线

Fig. 3 z Direction Displacement-time Curves of Plate Girder at Both Sides Across Mid-span Incision in Scheme One

侧切口处的钢筋都在与桥台的强烈摩擦中失效被删除,跨中切口处的裸露钢筋继续变形。

(5)当 $t=5.2$ s时,在重力作用下,板梁继续下落,两侧切口处的钢筋仍在与桥台接触摩擦,大量钢筋失效被删除,跨中切口处的裸露钢筋继续严重变形,两侧板梁有向中间靠拢的趋势。

(6)当 $t=6.0$ s时,两侧切口处的钢筋继续与桥台接触摩擦、失效被删除,两侧桥台的混凝土出现了破损情况。

(7)当 $t=7.0$ s时,两侧切口处的钢筋开始着地,板梁继续下落至落地,并在跨中裸露钢筋的拉扯作用下,跨中两侧的板梁开始向中间靠拢(图5)。

(8)当 $t=9.0$ s时,板梁完全落地,跨中两侧的板梁继续向中间靠拢。

(9)当 $t=10.0$ s时,2块板梁落地靠拢完毕,两者移动的位移之和约为0.43 m,没有达到方案1中的跨中切口长度1.0 m(图5)。

3.2 板梁混凝土应力

参照方案1,桥面板梁的切口位置见图6。方案1,2的混凝土应力-时间曲线见图7,8。图7(a)和图8(a)取自第1个切口处板梁的上缘,图7(b)和图8(b)取自第1个切口处板梁的下缘,图7(c)和图8(c)取自第2个切口处板梁的上缘,图7(d)和图

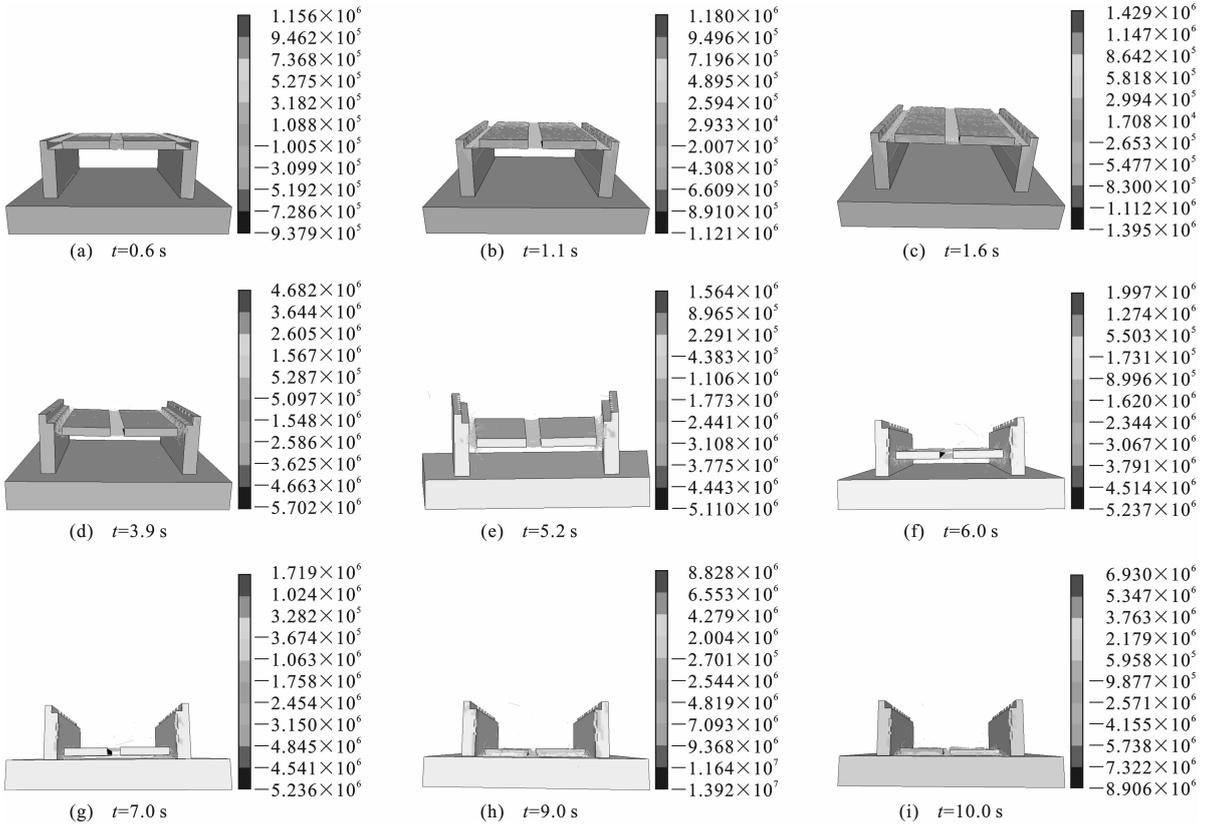


图 4 方案 2 的爆破拆除倒塌效果 (单位:Pa)

Fig. 4 Collapse Effects of Blasting Demolition in Scheme Two (Unit:Pa)

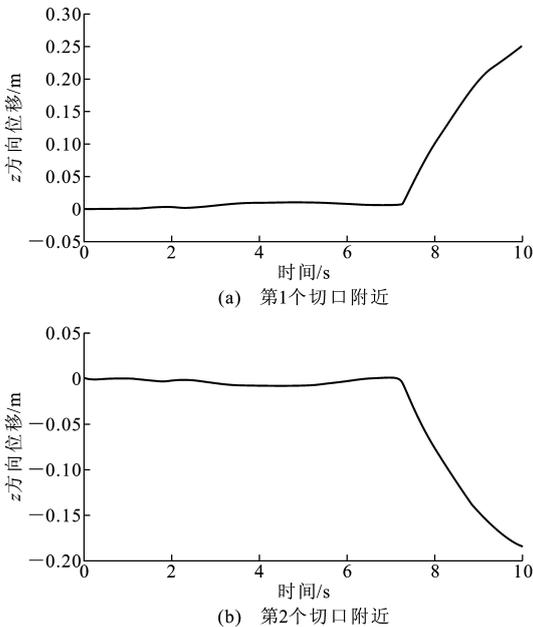


图 5 方案 2 跨中切口两侧板梁的 z 方向位移-时间曲线
Fig. 5 z Direction Displacement-time Curves of Plate Girder at Both Sides Across Mid-span Incision in Scheme Two

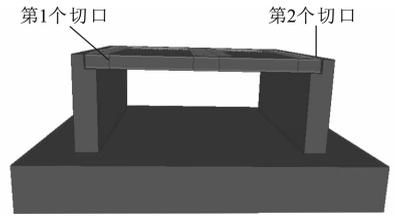


图 6 桥面板梁的切口位置

Fig. 6 Location of Cut at Deck Plate Girder

($t=1.0\text{ s}$), 由于受到裸露钢筋的拉扯作用, 混凝土受到轻微的拉应力作用; 之后混凝土受压直到第 1 块板梁落地 ($t=6.0\text{ s}$), 跨中裸露钢筋的猛然拉扯使得混凝土受到 1 个拉应力极值; 最后在重力与裸露钢筋的拉扯作用下, 混凝土受压直到整个板梁完全落地。从图 8(a) 可以看出: 第 1 个爆破切口形成后 ($t=0.5\text{ s}$), 混凝土一直受压; 当 $t=4.9\text{ s}$ 时, 由于跨中裸露钢筋的严重变形, 钢筋的猛然拉扯作用使得混凝土开始受拉; 之后混凝土处于不断变化的拉应力与压应力交替状态, 当 $t=6.2\text{ s}$ 时达到了拉应力极值; 当 $t=7.2\text{ s}$ 时, 板梁落地, 混凝土不再受任何作用力。

8(d) 取自第 2 个切口处板梁的下缘。

从图 7(a) 可以看出: 在跨中切口形成的瞬间

从图 7(b) 可以看出: 跨中切口形成后 ($t>1.0\text{ s}$), 下缘混凝土受跨中裸露钢筋的拉扯作用要比上

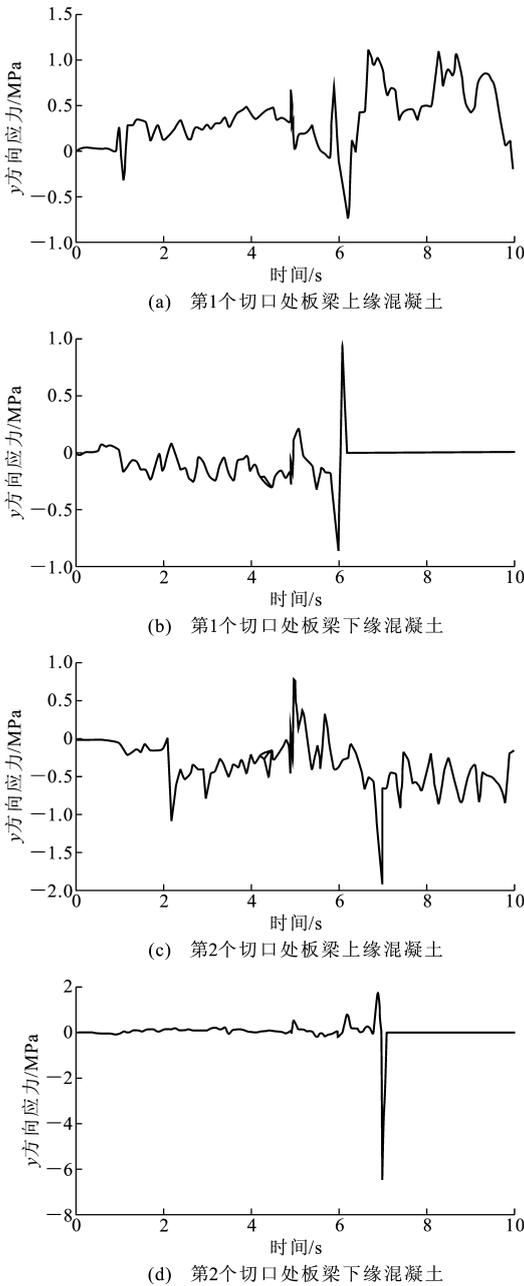


图7 方案1混凝土的应力-时间曲线

Fig. 7 Stress-time Curves of Concrete in Scheme One

缘大,直到板梁落地($t=6.0$ s)之前,混凝土几乎都是受到拉应力作用,至板梁落地时达到了一个拉应力极值;板梁落地时混凝土达到了一个压应力极值,之后混凝土不再受任何作用力。从图8(b)可以看出:在 $t=2.0$ s之前,下缘混凝土几乎不受作用力;当 2.0 s $<t<7.2$ s时,混凝土处于幅度变化不大的拉应力与压应力交替状态;板梁落地($t=7.2$ s)时,混凝土受到一个压应力极值,而后受到幅度变化较大的拉应力,直到板梁完全落地。

从图7(c)可以看出:在跨中切口形成以后($t>1.0$ s),上缘混凝土受拉;直到 $t=5.0$ s时,第1块

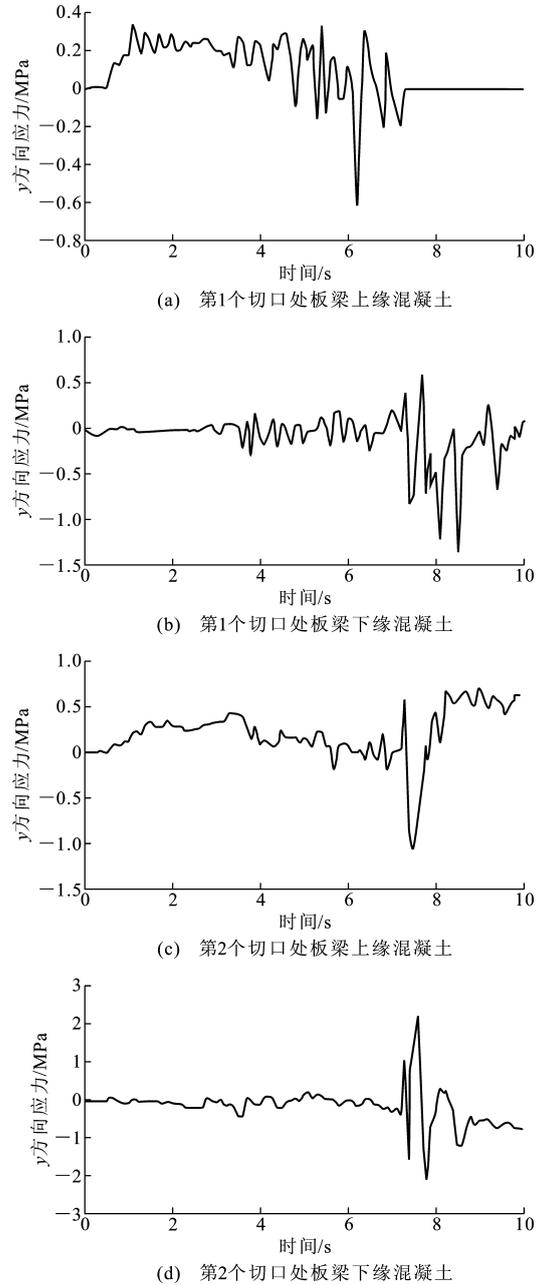


图8 方案2混凝土的应力-时间曲线

Fig. 8 Stress-time Curves of Concrete in Scheme Two

板梁切口处的钢筋落地,通过跨中裸露钢筋的作用,混凝土受到一个压应力极值,而后又受拉;直到第2块板梁落地($t=7.0$ s),混凝土受到一个拉应力极值,后又缓慢减小,直到整个板梁完全落地。从图8(c)可知:在 $t=5.5$ s之前,上缘混凝土一直受压;当 $t=5.5$ s时,混凝土受到轻微的拉应力,随后处于不断变化的拉应力与压应力交替状态;直到 $t=7.2$ s时,板梁开始落地,混凝土受到一个拉应力极值;之后拉应力减小,混凝土受压直到板梁完全落地。

从图7(d)可以看出:下缘混凝土受到微小的压

应力作用;第 1 块板梁落地时($t=6.3$ s),压应力有稍许增加;第 2 块板梁落地时($t=7.0$ s),混凝土受到一个拉应力极值(6.5 MPa),此时混凝土达到了抗拉失效强度,之后不再受力,直到板梁完全落地。从图 8(d)可以看出:在板梁落地之前($t<7.2$ s),下缘混凝土处于幅度变化比较小的拉应力与压应力交替状态;板梁落地以后($t>7.2$ s),混凝土又处于幅度变化比较大的拉应力与压应力交替状态;到板梁完全落地之前的近 2 s,混凝土受到较小的拉应力作用。

4 结 语

(1)基于动力分析软件 ANSYS/LS-DYNA,采用分离式共节点的钢筋混凝土模型可以模拟板梁结构从下落到完全落地的过程,从而实现了桥梁结构爆破拆除塌落过程的连续仿真模拟。虽然没有结合工程实际或试验,但可以为今后类似桥梁的爆破拆除数值模拟提供借鉴。

(2)通过对比板梁两侧微差起爆和同时起爆可以得出:微差爆破使得跨中切口两侧的板梁在落地后完全靠拢,节省了场地;微差爆破使得 2 块板梁的下缘混凝土在其落地后不再参与受力;微差爆破使得更多的钢筋和混凝土单元由于下落速度的反复变化失效被删除。

(3)通过对钢筋和混凝土的应力随时间不断变化的分析可以得出,利用分离式共节点模型能够较好地体现出这 2 种不同材料在力学性能上的差异。

参考文献:

References:

- [1] 胡文军,卢艳华. 钢结构建筑爆破拆除计算机模拟初步研究[J]. 工程爆破,2002,8(4):11-15,10.
HU Wen-jun, LU Yan-hua. Preliminary Study on Computer Simulation of Blasting Demolition of Steel Construction[J]. Engineering Blasting, 2002, 8(4): 11-15, 10.
- [2] 余业清,钟冬望,汪洋. 数值模拟在爆破拆除中的应用[J]. 爆破,2006,23(2):22-25.
YU Ye-qing, ZHONG Dong-wang, WANG Yang. Application of Numerical Simulation in Explosive Demolition[J]. Blasting, 2006, 23(2): 22-25.
- [3] 贾金河,于亚伦. 建筑物拆除爆破数值模拟方法的研究[J]. 工程爆破,1999,5(1):47-51.
JIA Jin-he, YU Ya-lun. Study on Numerical Simulation for Demolition Blasting of Building[J]. Engineering Blasting, 1999, 5(1): 47-51.
- [4] 谢春明,杨 军,薛 里. 高耸筒形结构爆破拆除的数值模拟[J]. 爆炸与冲击,2012,32(1):73-78.
XIE Chun-ming, YANG Jun, XUE Li. Numerical Simulation of Blasting Demolition of Tall Tubby Structure[J]. Explosion and Shock Waves, 2012, 32(1): 73-78.
- [5] 宋天培,谢春明,杨 军. 公路双曲拱桥结构爆破拆除数值模拟[J]. 爆破,2012,29(4):90-94.
SONG Tian-pei, XIE Chun-ming, YANG Jun. Numerical Simulation of Explosive Demolition of Highway Double Curved Arch Bridge[J]. Blasting, 2012, 29(4): 90-94.
- [6] Livermore Software Technology Corporation. LS-DYNA User's Manual; Version 970[M]. Livermore: Livermore Software Technology, 2003.
- [7] 石少卿,康建功,汪 敏,等. ANSYS/LS-DYNA 在爆炸与冲击领域内的工程应用[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2011.
SHI Shao-qing, KANG Jian-gong, WANG Min, et al. The Engineering Application of ANSYS/LS-DYNA in the Field of Explosion and Impact[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.
- [8] 杨 军,杨国梁,张光雄. 建筑结构爆破拆除数值模拟[M]. 北京:科学出版社,2012.
YANG Jun, YANG Guo-liang, ZHANG Guang-xiong. Numerical Simulation of Blasting Demolition for Architectural Structure [M]. Beijing: Science Press, 2012.
- [9] 言志信,于焕小,朱 辉. 框架结构爆破拆除过程研究[J]. 爆破,2012,29(4):19-22,27.
YAN Zhi-xin, YU Huan-xiao, ZHU Hui. Research on Explosive Demolition Process of Frame Structure[J]. Blasting, 2012, 29(4): 19-22, 27.
- [10] 池恩安. 公路桥梁组合拆除爆破及数值模拟[D]. 武汉:武汉理工大学,2011.
CHI En-an. Numerical Simulation and Application of Highway Bridge Demolition Blasting[J]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2011.
- [11] 杨国梁. 钢筋混凝土建筑结构爆破拆除数值模拟研究[D]. 北京:北京理工大学,2009.
YANG Guo-liang. Numerical Simulation on Reinforced Concrete Structure Blasting Demolition[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2009.
- [12] 杨忠华. 钢筋混凝土桥梁结构爆破拆除数值模拟研究[D]. 北京:北京理工大学,2010.
YANG Zhong-hua. Numerical Simulation on Blasting Demolition of Bridge Construction of Reinforced Concrete Structure [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2012.

