

钢筋混凝土梁在冲击波与破片联合作用下的动态响应分析

田力^{1,2}, 赵玲清¹

(1. 天津大学 建筑工程学院, 天津 300072;

2. 滨海土木工程结构与安全教育部重点实验室(天津大学), 天津 300072)

摘要:运用 LS-DYNA 软件, 通过在炸药底部布置预制破片, 模拟冲击波与破片对钢筋混凝土梁的复合作用。分析了冲击波单独作用、破片单独作用以及冲击波与破片复合作用下钢筋混凝土梁动态响应的不同。仿真结果表明: 在冲击波与破片联合作用下, 结构的毁伤程度远大于冲击波单独作用时。并且在冲击波与破片复合作用下, 结构的动态响应大于在冲击波单独作用和破片单独作用下动态响应之和。破片群不仅产生局部破坏, 还会将动能传递给钢筋混凝土梁, 从而使结构产生整体破坏。

关键词:冲击波; 破片; 复合作用; 钢筋混凝土梁

中图分类号: TU375.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0373(2017)03-0006-07

0 引言

武器爆炸会产生冲击波和大量的高速破片。这两种毁伤元都对结构产生破坏, 但其毁伤机理不同。破片是对结构进行侵彻, 削弱结构强度; 冲击波主要是使结构产生变形、震塌。在近区爆炸时, 冲击波和破片的联合作用对结构的破坏最大。早期, 研究人员对于破片与冲击波的联合作用, 主要是解耦, 然后对破片和冲击波产生的破坏分别研究, 并进行数值相加。近年来, 人们认识到破片与冲击波对结构的毁伤破坏不是简单地叠加, 而是具有增强效应。Leppänen 通过实验和数值模拟分析了冲击波和破片对混凝土的复合作用, 给出了其破坏模式, 发现在冲击波和破片作用下, 混凝土的破坏主要集中在受载区域。因此 Leppänen 认为冲击波和破片作用在设计阶段可以分开考虑^[1]。Nyström 利用 Auto-DYN 软件并且采用单自由度方法研究了钢筋混凝土墙体在破片和冲击波复合作用下的动态响应, 通过墙体中点联合作用时的位移大于分别作用时产生的位移之和, 得出联合作用对结构破坏大于单一荷载产生破坏之和^[2]。Hu 等利用 MPM 方法对冲击波和破片协同作用下的混凝土墙进行了研究, 得出带壳装药比不带壳装药产生的危害更大^[3]。Kong 等通过实验和数值分析研究了破片和冲击波对多层防护结构的联合毁伤作用, 以及对带壳装药爆炸产生的破片速度的分布规律进行研究^[4]。李伟等采用带壳装药模拟战斗部, 并进行舱内爆炸试验, 研究了冲击波与破片复合作用对结构破坏的影响, 发现在破片密集作用区域, 弹孔之间的边界由于冲击波作用撕裂并贯通^[5]。

为研究钢筋混凝土梁在破片与冲击波联合作用下的动态响应, 运用 ANSYS/LSDYNA 软件分别模拟了钢筋混凝土梁在破片群载荷、冲击波载荷及联合载荷作用下的变形及破坏。

1 数值模拟

1.1 模型简介

收稿日期: 2017-03-26 责任编辑: 车轩玉 DOI: 10.13319/j.cnki.sjztdxxb.2017.03.02

基金项目: 国家自然科学基金(51178310, 50678116)

作者简介: 田力(1970-), 男, 博士, 副教授, 主要从事工程结构抗爆、抗冲击理论的研究。E-mail: ltian@tju.edu.cn

田力, 赵玲清. 钢筋混凝土梁在冲击波与破片联合作用下的动态响应分析[J]. 石家庄铁道大学学报: 自然科学版, 2017, 30(3): 6-11.

运用 LS-DYNA 软件建立了钢筋混凝土简支梁的分离式模型(如图 1 所示),模型由空气、炸药、破片和钢筋混凝土梁组成。空气、炸药、破片以及混凝土采用的是 Solid164 实体单元,钢筋采用的是 Beam161 梁单元。破片和钢筋混凝土梁采用 Lagrange 网格;炸药和空气采用 Euler 网格,使用多物质 ALE 算法。通过流固耦合的方法驱动破片飞散以及实现冲击波对钢筋混凝土梁的作用;破片对钢筋混凝土梁的侵蚀作用通过定义两者间的侵蚀接触实现。由于爆炸冲击荷载作用时间非常短,通常假定混凝土与钢筋之间粘结完好,因此建模时混凝土和钢筋之间的连接采用共节点方法。

混凝土保护层 20 mm。钢筋混凝土梁的截面为 200 mm×400 mm,跨度为 3 m。梁箍筋配筋率为 0.5%,纵筋直径为 20 mm。单个破片质量为 30 g,炸药底距钢筋混凝土梁 500 mm。TNT 炸药质量为 3.2 kg,钢筋与混凝土单元为 10 mm。

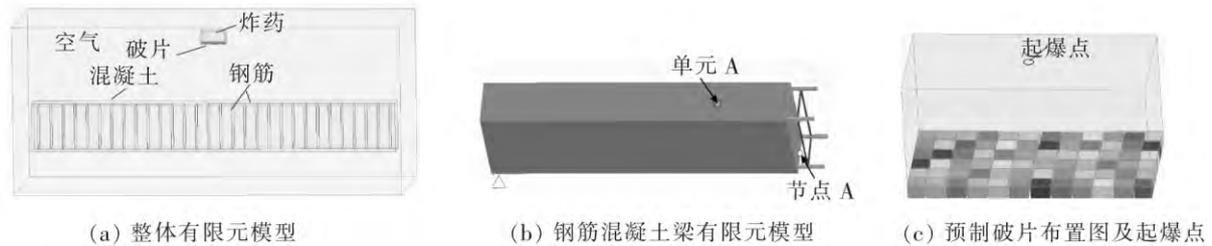


图 1 有限元模型

1.2 材料本构

破片采用刚体忽略其变形。

钢筋采用随动强化双线性弹塑性模型^[6-7],并通过 Cowper-Symonds 模型考虑应变率效应。钢筋应力表示为

$$\sigma_y = \left[1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{C} \right)^{\frac{1}{p}} \right] (\sigma_0 + \beta E_p \epsilon_{eff}^p) \tag{1}$$

式中, P, C 为应变率参数; β 为调整等向强化和随动强化参数; E_p 为塑性硬化模量; ϵ_{eff}^p 为有效塑性应变; $\dot{\epsilon}$ 为钢筋应变率; σ_0 为钢筋初始屈服应力。

钢筋采用的材料参数如表 1 所示。

表 1 钢筋材料参数

弹性模量	泊松比	屈服应力	切线模量	应变率参数		失效应变	强化参数
E/GPa	ν	σ_0/MPa	E_t/GPa	C/s^{-1}	p	f_s	β
210	0.3	400	1.2	40	5	0.12	0

混凝土采用 *MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3(MAT72)^[6-7],该模型考虑了材料的应变率效应。混凝土材料的应变率效应通过混凝土强度增大系数 DIF 来表示^[8]。混凝土强度增大系数 DIF 采用 K&C 模型。本文混凝土采用 C30。

TNT 炸药采用 *MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN^[6-7] 材料模型,采用 JWL 状态方程来描述。表达式如下

$$P = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E_0}{V} \tag{2}$$

式中, P 为爆轰压力; A, B, R_1, R_2, ω 为材料常数; V 为相对体积; E_0 为初始内能。

TNT 参数如表 2 所示。

表 2 TNT 炸药的材料参数

$\rho_0/$	$D/$	$PCJ/$	$A/$	$B/$	R_1	R_2	ω
$(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$(\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$	GPa	GPa	GPa			
1.63	6.93	27	374	7.43	4.15	0.95	0.3

表中: ρ_0 为质量密度; D 为爆速; PCJ 为(Chapman-Jouget) 压力。

空气采用 *MAT_NULL^[6-7] 模型, 以及采用 LINEAR_POLYNOMIAL 状态方程描述。表达式如下

$$P = C_0 + C_1\mu + C_2\mu^2 + C_3\mu^3 + (C_4 + C_5\mu + C_6\mu^2)E \quad (3)$$

式中, $C_0, C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6$ 均是常数; E 为单位体积内能。若 $\mu < 0$, 则 $C_2\mu^2$ 和 $C_6\mu^2$ 均设置为零, 其中

$$\mu = \frac{\rho}{\rho_0} - 1 \quad (4)$$

式中, ρ 为空气即时密度; ρ_0 为空气初始密度。

空气参数如表 3 所示。

表 3 空气状态方程参数

C_0	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	E_0/J	V_0
-1×10^{-6}	0	0	0	0.4	0.4	0	2.5×10^{-6}	1.0

2 计算结果与分析

2.1 数值模型实验验证

运用 Zhang^[9] 以及汪维^[10] 做的钢筋混凝土梁的实验来验证所建有限元模型的合理性。采用流固耦合方法和相同的材料模型验证参数的准确性。有限元模型见图 2(a), 实验装置见图 2(b)。该实验是对近爆下钢筋混凝土梁的动态响应进行了研究。实验中, TNT 质量为 0.51 kg, 爆距为 400 mm; 钢筋混凝土梁的截面为 100 mm × 100 mm, 跨度为 1.1 m; 箍筋纵筋直径都为 6 mm, 箍筋间距为 60 mm; 混凝土抗压强度 40 MPa, 钢筋强度为 300 MPa; 混凝土保护层厚度 20 mm。建模时所采用的数据与实验一致, 网格大小为 10 mm。



图 2 有限元模型及实验装置图^[9]

文献^[9]中测得梁的跨中最大位移是 35 mm, 梁的背面混凝土脱落区长度约为 12 cm。

仿真结果中, 在 9 ms 时梁跨中达到最大位移为 31.6 mm, 残余位移为 26 mm, 背面混凝土脱落区长度为 11.2 mm。由仿真结果与实验对比可得, 跨中最大位移两者相差 9.7%, 背面混凝土脱落区长度相差 6.7%。误差来源可能是边界条件与实际有差异以及材料有偏差。数值模拟中梁跨中节点位移时程曲线如图 3 所示。从图 4 可以看出, 有限元模拟的损伤结果与实验相近。

2.2 破片飞散

采用单点起爆, 破片在冲击波的驱动下向四周飞散, 形成一定空间分布的破片群。距爆炸点最近的破片速度最大, 随着距离增大, 破片速度减小。这是由于稀疏波引起的。

在 (0~0.4 ms) 破片飞散形成破片群, 破片飞散如图 5 所示。距爆心最近的破片的最大速度为 1 478 m/s, 而相距最远的破片的速度为 790 m/s。破片的速度时程曲线如图 6 所示。同时由图 7 可知, 距爆心距离越近, 破片到达钢筋混凝土梁的时间越短, 其中距离 d 为破片与爆心的水平距离。

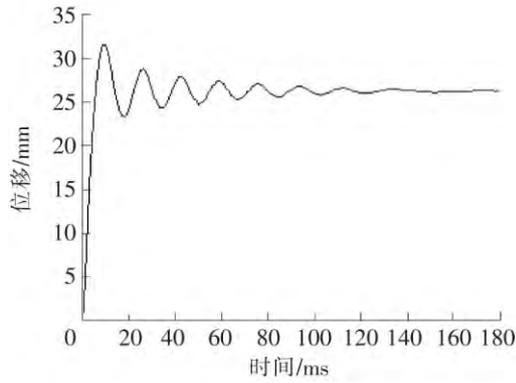
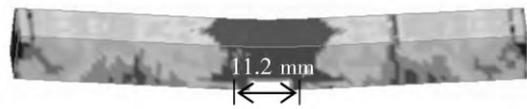


图 3 梁跨中节点位移时程曲线



(a) 有限元塑性应变云图



(b) 实验损伤图^[9]

图 4 梁塑性应变云图及实验损伤图



(a) $t=100 \mu\text{s}$



(b) $t=200 \mu\text{s}$



(c) $t=300 \mu\text{s}$

图 5 破片飞散图

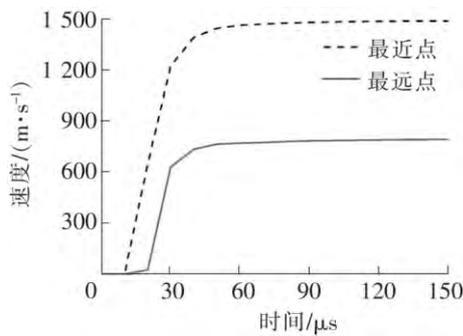


图 6 破片速度时程曲线

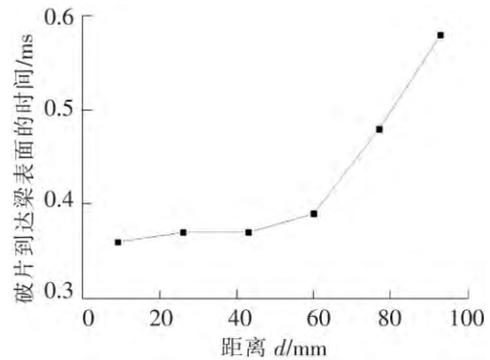


图 7 破片到达钢筋混凝土梁表面的时刻

2.3 冲击波、破片单独作用以及联合作用结果对比分析

(1)通过使流体不与钢筋混凝土梁耦合,实现破片对混凝土梁的单独作用。先到达的破片使结构产生应力应变,这相当于给后到达的破片提供初始应力,从而使后到达的破片对结构产生的破坏更大。破片群对钢筋混凝土梁的破坏,先是破片群对结构的局部冲击与侵彻破坏。从而在梁的正面成坑,并且使部分钢筋切断,从而使钢筋混凝土梁的强度降低。并且在侵彻坑处产生应力集中,使钢筋混凝土梁抵抗整体变形能力大大降低。该过程分为两个阶段。

在第一阶段(0.4~0.8 ms)破片群冲击钢筋混凝土梁,在梁正面侵彻成坑,由于梁中间部分破片密布,故会形成密集的侵彻坑。又由于应力波的叠加,各个弹坑相连接成一整片。在这个过程中,由于中间的破片速度大,因此先接触钢筋混凝土梁,两侧的破片后到达。中间部分的箍筋被切断,截面削弱,有效高度减小,强度降低,更易发生变形。损伤如图 8 所示。

在第二阶段(0.8~8 ms)此时破片的速度降低到很小,对结构作用可忽略。钢筋混凝土梁吸收了破片群传递的动能后,继续产生整体变形,在 6.35 ms 左右达到最大位移约 8.2 mm。这之后梁开始恢复变形。跨中节点 A 的位移时程曲线如图 10 所示。

从图 8(g)可以看出,塑性区域集中在梁的中间部分,是由局部破坏效应和整体破坏效应共同引起。局部破坏先发生,后引起整体破坏,并且破片引起的破坏作用是不可忽略的。

(2)在 $t=0.2$ ms 时,破片早已达到最大速度,冲击波与破片的相互作用可忽略。此时删除破片,利用重启动,分析了钢筋混凝土梁在冲击波单独作用下的动态响应和破坏。由于冲击波在驱动破片的过程中,发生了反射以及绕流现象。因此冲击波到达钢筋混凝土梁时的峰值压力降低。在冲击波单独作用下,钢筋混凝土梁在 4.4 ms 左右挠度达到最大值 1.4 mm,而后减小。由以上可知冲击波引起的破坏比破片引起的破坏小。梁跨中位移时程如图 10 所示。

(3)冲击波与破片复合作用下,由于冲击波的初始传播速度大于破片的初始速度,因此冲击波先到达,破片后到达。冲击波作用时间与破片作用时间有重叠,在该过程中冲击波与破片对钢筋混凝土梁的破坏进行了耦合。由图 8 与图 9 对比可以看出,在相同的时刻,联合作用下混凝土剥落更严重,钢筋变形更大。这是由于冲击波先作用,使结构处于一定的应力状态下,破片更易对结构进行侵彻,造成局部破坏。同时冲击波作用使局部破坏处产生应力集中,使结构产生更大的破坏。钢筋混凝土梁在破片与冲击波联合作用下的位移时程曲线如图 10 所示,在 7.75 ms 左右钢筋混凝土梁达到最大位移 10.7 mm。由图 10 可知,钢筋混凝土梁在不同的载荷作用下,其产生最大响应的的时间不同。在冲击波单独作用下,在 4.4 ms 时,结构响应最大;在破片单独作用下,在 6.35 ms 时,结构响应最大;在联合作用下,在 7.75 ms 时,结构响应最大。并且联合作用下的最大响应大于分别作用之和。由于产生最大响应的的时间不同,因此不能进行简单的数值叠加。单元 A 在联合作用、破片单独作用以及冲击波单独作用下的应力如图 11 所示。单元 A 的位置见图 1。由图 11 可知,在联合作用下,单元应力在 0.55 ms 达到最大值 28.7 MPa;在破片单独作用下,单元应力在 0.65 ms 达到最大值 24 MPa;在冲击波单独作用下,单元应力在 4.5 ms 达到最大值 8 MPa。在 0.55 ms 时,破片单独作用时单元应力为 9.6 MPa,冲击波单独作用单元应力为 1.9 MPa。在此时刻,联合作用时的应力是破片单独作用时的 2.5 倍左右。这说明在此时刻,冲击波与破片作用进行了耦合,出现应力集中。

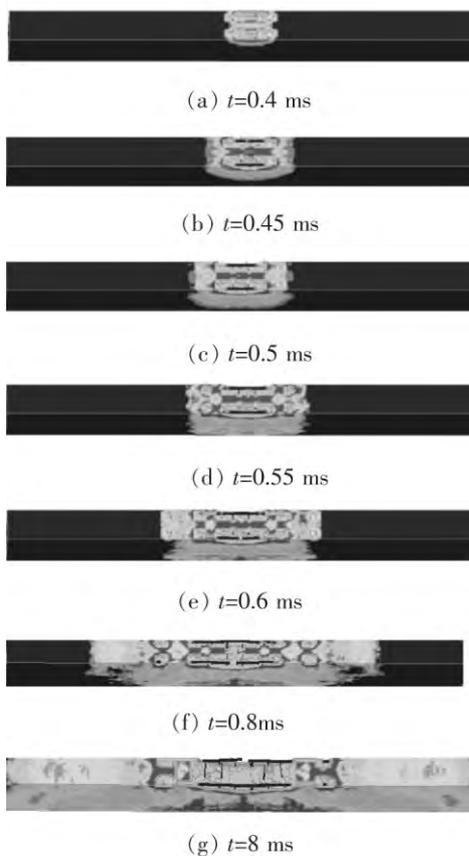


图 8 破片作用下简支梁的塑性应变云图

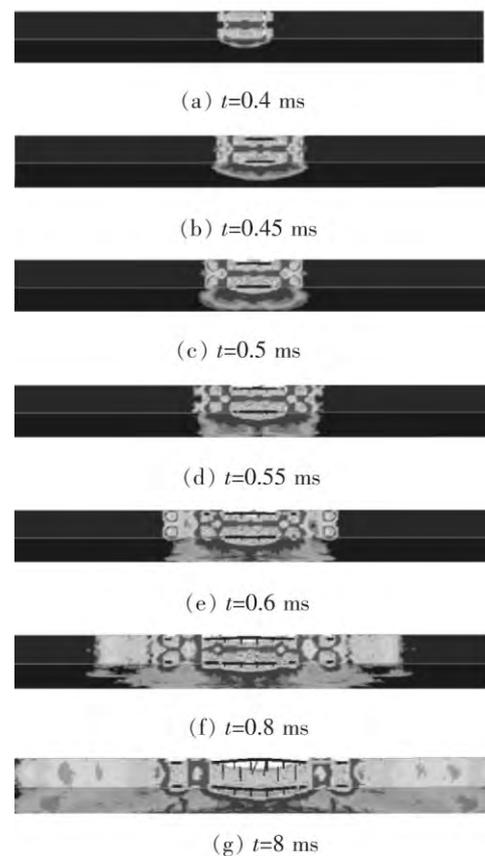


图 9 联合作用下简支梁的塑性应变云图

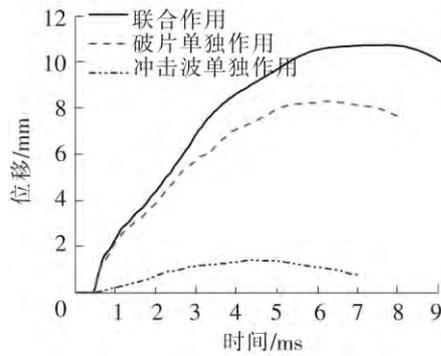


图 10 梁在联合作用、破片、冲击波单独作用下跨中位移

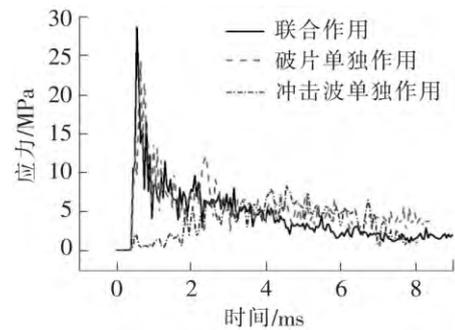


图 11 梁在联合作用、破片、冲击波单独作用下单元 A 应力

3 结论

运用 LS-DYNA 软件,对破片和冲击波对钢筋混凝土梁的协同作用进行了数值分析。

得出以下结论:

(1) 通过冲击波的驱动,实现破片飞散并且距起爆点越近,破片获得的速度越大,相应的动能越大。中间破片速度大,对结构破坏严重。

(2) 破片群的破坏与单个破片不同,破片群不仅引起局部破坏,而且也引起整体响应。单个破片会使结构产生侵彻坑,而破片群会将侵彻坑连成一片,大大削弱结构的有效高度,降低结构的承载力。破片群的破坏力很大,应该考虑。

(3) 冲击波单独作用下,引起的动态响应很小,这是由于冲击波驱动破片飞散后,其中一部分能量变成了破片的动能,故冲击波作用于结构的能量减小。

(4) 冲击波与破片联合作用下,钢筋混凝土梁产生的位移大于单独作用之和。结构在破片单独作用、冲击波单独作用以及联合作用下产生最大位移的时间是不同的,因此不能简单地叠加。

参 考 文 献

- [1] Joosef L. Experiments and numerical analyses of blast and fragment impacts on concrete [J]. *Int J Impact Eng*, 2005, 31: 843-860.
- [2] Nyström U, Gylltoft K. Numerical studies of the combined effects of blast and fragment loading [J]. *Int J Impact Eng*, 2009, 36: 995-1005.
- [3] Hu W, Chen Z. Model-based simulation of the synergistic effects of blast and fragmentation on a concrete wall using the MPM [J]. *Int J Impact Eng*, 2006, 32: 2066-2096.
- [4] Kong X S, Wu W G, Li J, Chen P. Experimental and numerical investigation on a multi-layer protective structure under the synergistic effect of blast and fragment loading [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2014, 65: 146-162.
- [5] 李伟,朱锡,梅志远,等. 战斗部舱内爆炸对舱室结构毁伤的实验研究[J]. *舰船科学技术*, 2009, 31(3): 34-37.
- [6] Hallquist J O. LS-DYNA Theory Manual [M]. California: Livermore Software Technology Corporation, 2006: 273-277.
- [7] Hallquist J O. LS-DYNA Keyword User's Manual [M]. California: Livermore Software Technology Corporation, 2007: 1430-1432.
- [8] Malvar L J, Ross C A. Review of strain rate effects for concrete in tension [J]. *ACI Materials Journal*, 1998, 96(5): 735-739.
- [9] Zhang D. Experimental study on scaling of RC beams under close-in blast loading [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2013, 33: 497-504.
- [10] 汪维. 钢筋混凝土构件在爆炸荷载作用下的毁伤效应及评估方法研究[D]. 长沙:国防科技大学, 2012.

(下转第 19 页)

3D Deformation Analysis of Retaining Structures of Foundation Pits Based on Elastic Resistance Method

Wang Chenghua, Li Kai

(School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China)

Abstract: Methods to analyze the existing internal force and deformation of foundation pits' retaining structures are compared, and the concept of space elastic resistance method is put forward, including its calculation model, principle, formulas and corresponding program. Through an example, the reasonable arrangement for corner supports is summarized by analyzing the internal force and deformation of retaining structures under different supports, and the inner force and deformation of the supporting structure under inhomogeneous overload are analyzed. Moreover, the question whether the supports need to be laid to the foundation pits with small plane size is investigated. These conclusions are of certain reference value for the design of foundation pits' retaining structures.

Key words: retaining structures; internal force; deformation; space elastic resistance method

~~~~~  
(上接第 11 页)

## Dynamic Response of the Reinforced Concrete Beam Under Blast and Fragment Loading

Tian Li<sup>1,2</sup>, Zhao Lingqing<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Key Laboratory of Coast Civil Structure Safety(Tianjin University), Ministry of Education, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** In this thesis, the synergetic effects of blast wave and fragment on reinforced concrete beam are simulated by using LS-DYNA software by placing fragments at the bottom of the charge. Numerical simulation is used to analyze the different dynamic responses of different models. The dynamic responses of the reinforced concrete beam for blast loading, fragment loading and simultaneous loading are studied. The results show that the damage of the reinforced concrete beam subjected to simultaneous loading is severer than that subjected to blast loading alone. In addition, the response of the reinforced concrete beam under combined loading is bigger than if adding that under fragment and blast loading treated separately. Not only is local failure caused by fragment cluster, but integral damage is also caused by fragment cluster, which transfers the impulse to the structure.

**Key words:** blast wave; fragment; synergetic effects; reinforced concrete beam