

冲击载荷作用下钢筋混凝土结构动力响应仿真

王 翔^{*,**} 刘又文[†] 沈 庆^{*} 宁小倩^{††}

^{*}(中国人民解放军理工大学工程兵工程学院, 南京 210007)

^{**}(中国人民解放军总后勤部军事交通研究所, 天津 300161)

[†](湖南大学工程力学系, 长沙 410082)

^{††}(中国人民解放军军事交通学院基础部, 天津 300161)

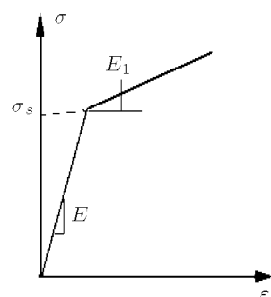
摘要 运用动态有限元技术对冲击性载荷作用下钢筋混凝土结构的动力响应进行细观结构的仿真分析, 建立分离式材料模型, 获得射弹在钢筋混凝土中的侵彻深度与弹坑半径, 得出钢筋配筋率、配筋方式、配筋位置以及混凝土材料性质等相关因素的影响规律, 并针对结果进行分析和讨论, 为防护工程设计提供了参考依据。

关键词 冲击载荷, 钢筋混凝土, 动力响应, 仿真

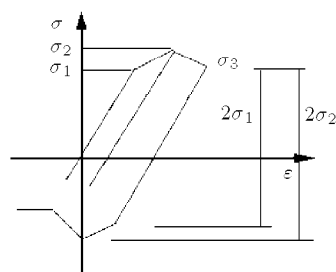
钢筋混凝土是土木建筑的主要结构材料, 抗压强度大, 抗拉强度小, 在射弹的冲击荷载作用下, 常以脆性方式破坏, 其抵抗冲击载荷的能力一直是武器研制与工程防护部门所关注的问题。以往研究大多是通过测试、分析、总结实弹实验数据, 得出诸多经验公式, 很少研究其毁伤机理和抗毁设计。近年来, 随着计算机硬件技术的飞速发展和非线性有限元分析技术的计算精度不断提高, 利用计算机仿真手段对钢筋混凝土抗毁效能进行研究逐渐受到重视^[1,3~6]。本文在建立反映结构本质特征模型的基础上, 采用拉格朗日列式描述增量法, 就冲击载荷作用下的钢筋混凝土结构响应进行仿真分析, 获得射弹在混凝土中的侵彻深度和弹坑半径与钢筋配筋率、配筋方式、配筋位置以及混凝土的材料性质等因素的影响因素, 为武器研制及防护工程设计提供参考依据。

1 结构材料与建模分析

数值仿真研究的基础是能够对材料模型进行准确的描述, 钢筋混凝土是由水泥、沙、石、钢筋等粘结的混合物, 其力学性能随配方的不同千差万别, 钢筋包裹于混凝土中, 且体积较小。本文采用分离式建模方式, 将钢筋与混凝土分别建模, 钢筋采用图 1(a) 所示的双线性随动硬化模型 (BKIN)。混凝土材料是一种脆性材料, 受拉强度为受压强度的 1/10 左右, 受压屈服后混凝土“软化”, 破坏形式包括压碎和拉裂两种, 选用多线形随动硬化模型 (MKIN), 如图 1(b) 所示, 合理选取参数 σ 可比较接近混凝土模型, 在一定范围内描述混凝土的特性^[7]。



(a) 双线性随动硬化模型



(b) 多线形随动硬化模型

图 1

虽然混凝土与钢筋 2 者的粘结、滑移以及相互作用非常复杂, 但一般情况下混凝土与钢筋之间都有良好的锚固, 故假设混凝土单元与钢筋单元之间的位移完全协调, 不考虑钢筋与混凝土之间的滑移, 并通过加入界面单元的方法, 提高仿真分析的精度。

2 数值模拟

2.1 计算模型

本文着眼于钢筋混凝土结构的被毁伤程度, 旨在通过仿真分析提高钢筋混凝土结构的抗毁伤能力, 对射弹的攻击形式进行简化, 设定射弹倾角 θ 和攻

角 α 均为 0° ，射弹的几何尺寸、材料强度为定值，而采用不同的混凝土材料强度、配筋方式和配筋率，以探讨这些因素对于钢筋混凝土结构抗毁伤能力的影响规律。计算模型示意图见图 2。

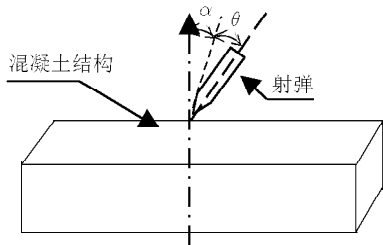


图 2 仿真计算模型

射弹以 BGM-109 型导弹，即“战斧”式巡航导弹为原型，采用尖锥形弹头，圆柱型弹身，采用 30CrMnSi 炮弹用钢，弹长 2.5 m，弹径 0.4 m，长细比为 3.125，射弹速度取 400 m/s，钢筋混凝土结构为一长方体，各边尺寸为 10 m×5 m×7.7 m，采取一定的钢筋配筋率和配筋方式。

混凝土材料选用 PLASTIC-KINEMATIC 材料模型，配筋选用 BILINEAR-ISOTROPIC 材料模型，材料具体取值见表 1。其中， f_{ck} 为材料轴心抗压强

度 (MP)， f_{tck} 为轴心抗拉强度 (MP)， f_s 为断裂失效塑性最大变形。

时间步长决定了动力分析的准确度和中心差分法的稳定性，其决定于模型中所有单元的尺寸。对于三维实体单元，系统预测步长由 $\Delta t = 0.9 \frac{L_e}{c}$ 决定，其中 L_e 为单元最小长度， $c = \sqrt{\frac{E}{2(1+\mu)\rho}}$ 为弹性材料中剪切波的传递速度。 E 为杨氏模量， M 为泊松比， ρ 为材料比重。选取较小的时间步长可以提高分析的精度，但同时引起计算时间的显著增加。考虑计算规模和所需达到的计算精度，最终确定计算步长为 $50\mu s$ [2,8]。

射弹以 4 节点四面体单元划分网格，混凝土以 8 节点六面体划分网格，配筋以梁单元划分单元。有限元单元的尺寸 Δx 决定于弹性材料中波的传递速度与步长的乘积， $\Delta x = c\Delta t$ ，并考虑到模型规模，确定单元最小尺寸 0.15 m，共计节点总数为 8082 个，单元总数为 6525 个。

对于冲击载荷作用下的钢筋混凝土结构，需要一个无限域来表示地面，本文设定混凝土结构的下底面作为非反射边界条件来表示无限域，阻止应力波从模型的边界反射，消除膨胀波与剪切波的反射。

表 1 模型材料参数表

参数	部件		
	射弹	钢筋	混凝土
ρ	7.48×10^3	7.48×10^3	2.5×10^3
E	210	210	34.5
μ	0.3	0.3	0.167
f_{ck}	520	400	324
f_{tck}	400	360	2.64
f_s			0.05

2.2 相关因素分析

钢筋混凝土模型采用的配筋方式如图 3(a)~图 3(i) 所示，图 3(a) 没有配置钢筋，其余图配有一定形式的钢筋，均置于混凝土结构的中部，用深色线表示。射弹速度变化曲线见图 4(a)~图 4(i)，速度均取射弹的尖锥形顶点的速度变化值。文中的配筋方式组合 1 至组合 9，与图 3 的配筋形式、图 4 的速

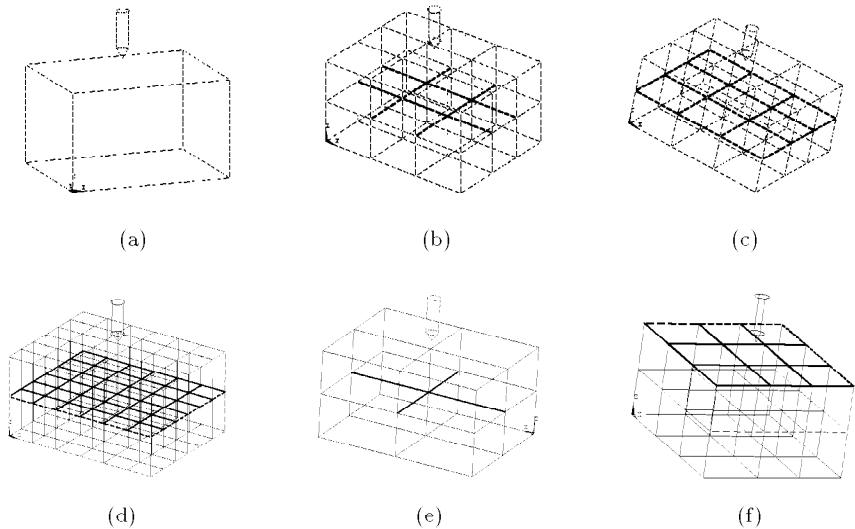


图 3 钢筋混凝土配筋方式

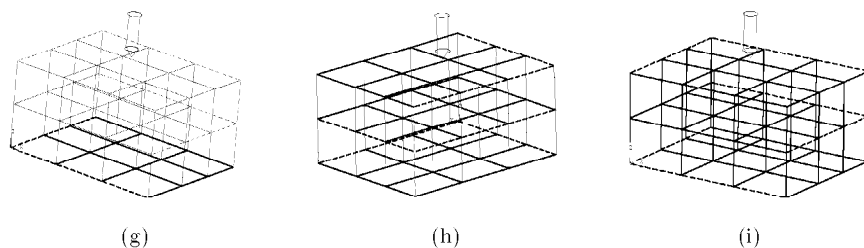


图 3 钢筋混凝土配筋方式 (续)

度变化——对应 (例如配筋组合 1 与图 3(a), 图 4(a) 对应).

2.2.1 配筋率和配筋方式对毁伤的影响

考察组合 1 至组合 5. 由图 4(a)~图 4(e) 可知, 射弹能量的减少主要在射弹侵入混凝土的初始阶段.

射弹的侵彻运动与混凝土结构的毁伤变形具有相对滞后性, 集中在 0.0025 s 与 0.005 s 之间, 射弹与混凝土结构相接触后略停顿后混凝土结构才出现毁伤现象, 其间射弹速度变化率明显增大, 速度值减小. 图 4(a) 中, 速度曲线在 0.0075 s 与 0.01 s 间有下降趋势, 是因为由于结构没有配置钢筋, 射弹在 0.0078 s

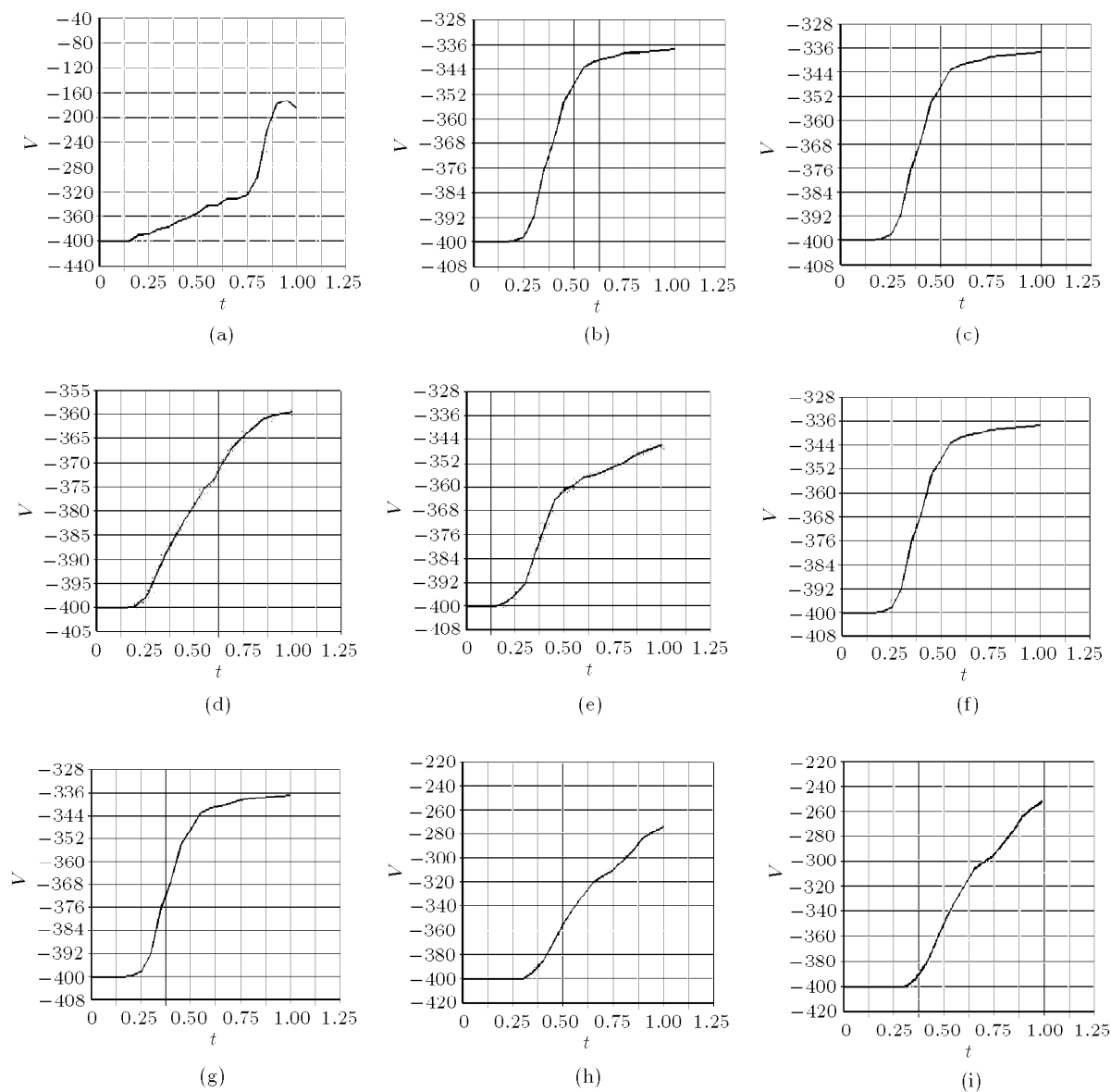


图 4 射弹速度变化图

时已穿出模型, 其它 4 种情况射弹速度变化趋于平滑.

由表 2 知, 混凝土结构配筋方式由组合 1 到组合 5, 射弹速度变化量明显减小, 表明配筋方式对于结构的抗毁伤能力有着重要影响. 组合 5 射弹击中钢筋, 虽然配筋率没有组合 3, 组合 4 大, 但射弹速度变化量增大, 射弹侵彻深度减小, 说明射弹在侵彻过程中碰到钢筋或钢筋能够约束射弹的情况下, 钢筋混凝土结构的防御作用明显增强; 组合 3 相对于组合 2 多设置了匝筋, 其速度变化量小于组合 2, 侵彻深度减小, 表明在混凝土中配置匝筋可提高钢筋混凝土结构抵御射弹破坏能力.

表 2 算例数据一览表

配筋	节点	项目		
		速度变化量 /m·s ⁻¹	侵彻深度 /m	弹坑半径 /m
组合 1	9	227.97	4.18	1.54
组合 2	9	62.674	3.632	0.933
组合 3	9	62.555	3.631	0.933
组合 4	9	40.4	3.495	0.625
组合 5	9	54.015	3.511	1.25

随着混凝土配筋率的提高, 射弹速度变化率逐步增加, 射弹在混凝土中的侵彻深度、弹坑半径等指标数值逐步减小. 混凝土构件中受拉钢筋最小配筋率为 0.6%, 钢筋配筋率达到此数值时射弹的侵彻深度和弹坑半径等指标趋于稳定, 这对国防工程、人防工程等工程防护设计中有着重要的参考价值^[9].

2.2.2 配筋位置对毁伤效果的影响

组合 6 至组合 9 延用组合 3“井”字形配筋形式, 分别布置在混凝土的上部、下部、上中下 3 层 (各层没有互相连接) 以及网格状布置 (布置在混凝土的上、中、下部, 3 层中间纵向、横向互相连接).

分析图 4(f)~图 4(i) 和表 3 容易得出, 配筋的位置对于钢筋混凝土结构的抗拉强度有着重要影响. 在混凝土的上层、下层、上中下 3 层以及混和等位置分别设置配筋网, 射弹的速度变化量逐渐增大, 而射弹侵入深度递减, 速度变化率增大. 虽然射弹传递给混凝土的能量增大, 但由于钢筋的配置大幅度改善混凝土的抗拉性能, 混凝土单元未达到应力

表 3 算例数据统计表

配筋	节点	项目	
		速度变化量 /m·s ⁻¹	侵入深度 /m
组合 6	9	63.079	3.731
组合 7	9	63.525	3.632
组合 8	9	127.632	3.20
组合 9	9	154.206	2.96

和应变失效准则, 射弹对钢筋混凝土结构的毁伤程度反而减小. 组合 9 设置多片平行“主”钢筋网, 并在垂直于“主”钢筋网方向设置“次”钢筋网, 竖向荷载下产生向上的支撑力, 冲击能量可快速耗散, 侵彻深度减小幅度大, 大幅度提高了混凝土的抗毁性能.

2.2.3 材料性质对毁伤效果的影响

保持钢筋配筋的配筋率和配筋方式不变, 沿用组合 3 配筋形式, 分别采用高低标号 (C40, C60, C80) 混凝土进行设计, 共进行 3 种工况的计算. 由表 4 知, 在桥梁等交通设施中采用高标号的混凝土, 随着混凝土材料的抗压强度的提高, 射弹的侵彻深度在一定程度上也随之减小, 但变化幅度较小, 所以在考虑采用提高混凝土材料标号的方法来减小桥梁的毁伤程度时, 应注意应用的经济性.

表 4 算例数据一览表

工况	工况 1	工况 2	工况 3
侵彻深度 (m)	3.683	3.561	3.536

3 讨 论

现有经验公式表明, 射弹的侵入深度与射弹的比动能有密切的关系, 根据“别列赞”侵彻深度计算公式^[10] $H = \lambda \times K_d \times \frac{M}{d^2} \times v_0$, M 为射弹与混凝土结构碰撞时的重量, d 为射弹的弹径, λ 是与射弹弹形有关的系数, K_d 为阻力系数, 与障碍物的性质有关, 取 1.0×10^{-7} , 设弹体着靶速度 v_0 为变量, 变化区间为 400~700 m/s, 计算得射弹侵彻深度为 2.5~4.0 m 之间, 其变化见图 5, 与上述仿真结果基本符合.

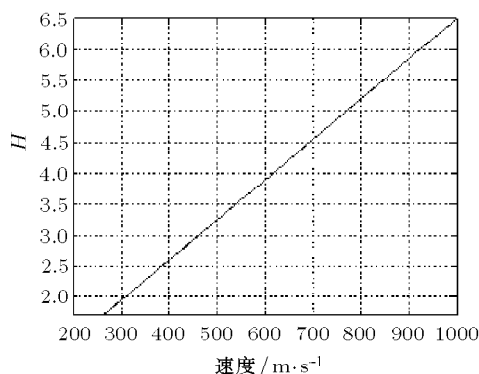


图 5 “别列赞”经验公式 (v 变量)

模拟结果不可避免存在疏漏. 与一般试验不同的是, 射弹侵彻混凝土的全过程通常在 30~200 μ s 之间, 在如此短的时间内受许多边界条件和偶然性因素的影响, 做到模拟结果与实际情况吻合程度很好

是相当不容易的. 作者分析其差别来源主要存在于以下几个方面:

(1) 国内外试验^[11]表明, 武器侵彻和爆炸对土木工程的破坏离散性很大, 试验和计算的符合程度主要看其破坏规律是否一致. 本文中, 射弹、混凝土结构的诸多尺寸均为一般性的数值, 不是特指某种型号的射弹对于某型结构的破坏规律;

(2) 虽然设置非反射边界条件表示无限域, 但与实际边界条件仍存在一定的差异;

(3) 由于本文的关注点在于结构的抗毁能力, 故在不影响分析目的的情况下对射弹结构、材质等进行了一定程度的简化处理. 这类简化对于类似武器打击这样的冲击性载荷有利, 一方面可简化模型, 另一方面引起的误差较小, 但对于作用周期时间较长的载荷, 如地震载荷, 这样简化模型将会产生较大的误差. 在动力分析中, 对于不同类型的载荷, 有针对性的模型简化是非常必要的.

4 结 论

通过建立、计算、分析毁伤影响因素计算模型, 对冲击载荷作用下钢筋混凝土响应过程以及相关因素的分析研究, 得出以下结论:

(1) 与整体式钢筋混凝土模型相比, 采用分离式模型, 将混凝土与钢筋分开建模能够更好地对钢筋混凝土的破坏细观特征进行模拟, 达到对毁伤效果进行定量分析的目的.

(2) 在国防工程等工程设计中既考虑配筋的经济性, 又注意到工程设施的抗毁性能, 受拉钢筋配筋率达到 0.6% 时, 结构的抗冲击毁伤能力可达较理想的状态, 射弹侵彻混凝土结构的各项数值趋于稳定.

(3) 钢筋的铺设位置对于混凝土结构毁伤也产生重要影响. 在工程设计中应将钢筋配置为网格状, 避免单层钢配筋单独在混凝土布置, 可在一定程度上提高结构的抗毁性能.

(4) 提高混凝土材料标号, 对于提高结构的抗冲

击毁伤性能影响不大, 且不经济.

参 考 文 献

- Forrestal MJ, Frew DJ, Hanchak SJ, et al. Penetration of grout and concrete targets with ogive-nose steel projectiles. *Int Impact Engng*, 1996, 18(5): 465~476
- Theodor Krauthammer. Modern Protective Structure Design. Analysis and Evaluation, July 1995
- 王翔等. ANSYS/LS-DYNA 有限元程序及其在交通设施武器毁伤研究中的应用. 军事交通学院学报, 2004, 4: 10~13 (Wang Xiang, et al. Ansys/LS-Dyna and its application to simulating damage of traffic facilities. *Journal of Military Traffic Institute*, 2004, 4: 10~13 (in Chinese))
- 李聚轩等. 力学在防护工程中的应用展望. 力学 2000 年大会论文集, 2000. 523~524 (Li JX, et al. The Application of mechanics in the Defence Works, 2000. Mechanics Conference, 2000. 523~524 (in Chinese))
- 宋顺成. 模拟导弹战斗部侵彻混凝土的数值计算. 第二届全国计算爆炸力学会会议论文集: 计算爆炸力学理论、方法及工程应用, 2002. 277~283 (Song Shuncheng. The Second Conference in Explode Mechanics. 2002. 277~283 (in Chinese))
- 蔡清裕等. 模拟刚性动能弹丸侵彻混凝土的 FE-SPH 方法. 长沙: 国防科技大学学报, 2003 (6): 87~90 (Cai Qingyu, et al. The FE-SPH method of simulating girid missile invading into concrete. *Journal of National University of Defence Technology*, 2003 (6): 87~90 (in Chinese))
- 陶学康. 后张预应力混凝土设计手册. 北京: 中国建筑工业出版社, 1996 (Tao Xuekang. The Post-tentioned Cable Design Manual. Beijing: Construction Industry Press, 1996 (in Chinese))
- 克拉夫 RW, 彭津 J. 结构动力学. 南京: 解放军理工大学, 1975 (Ray W, Clough, et al. Dynamics of Structures. Nanjing: The Science and Engineering University, PLA, 1975 (in Chinese))
- 混凝土结构设计规范. 北京: 中华人民共和国建设部, 2002 (The Standard of Concrete Structure Design. Beijing: Department of Construction, 2002 (in Chinese))
- 尹放林等. 弹体侵彻深度计算公式对比研究. 爆炸与冲击, 2000 (1): 79~82 (Yin Fanglin, et al. The comparison of depth of projile invacation. *Explosion and Shock Waves*, 2000 (1): 79~82 (in Chinese))
- 徐建波等. 长杆射弹侵彻混凝土实验研究. 爆炸与冲击, 2002 (4): 175~177 (Xu Jianbo, et al. The experiment of projile's invading concrete. *Explosion and Shock Waves*, 2002 (4): 175~177 (in Chinese))

THE SIMULATION OF THE DYNAMIC RESPONSE OF A REINFORCED CONCRETE UNDER IMPACT LOADS

WANG Xiang*,** LIU Youwen[†] SHEN Qing* NING Xiaoqian^{††}

*(Engineering Inst. of Engineering Corps., P. L. A. Univ. of Science and Technology, Nanjing 210007, China)

** (Institute of Military Traffic, Tianjin 300161, China)

[†] (Department of Engineering Mechanics of Hunan University, Changsha 410082, China)

^{††} (Basic Department, P. L. A. Institute of Military Traffic, Tianjin 300161, China)

Abstract The article establishes an FEM model for reinforced concrete under impact loads. The depth of intruding and the radius of crater are obtained.

Key words impact load, reinforced concrete, dynamic response