

文章编号: 1001-1455(2006)05-0474-07

炸药爆炸作用下地下结构的动力响应分析*

杜修力¹, 廖维张¹, 田志敏², 李亮¹

(1. 北京工业大学工程抗震与结构诊治北京市重点实验室, 北京 100022;

2. 总参工程兵国防工程研究设计所, 北京 100850)

摘要: 基于显式有限元计算程序 LS-DYNA3D 和粘弹性人工边界条件, 建立了爆腔-地下结构-软回填层-岩土介质系统三维弹粘塑性动力响应分析模型, 其中爆腔的模拟采用了经验关系式。通过与美陆军技术手册 TM5-855-1 经验公式的计算结果比较, 表明该分析模型与方法是合理的。还进一步讨论了软回填层的隔震效果。

关键词: 固体力学; 爆炸; 地下结构; 动力响应; 软回填层

中图分类号: O342

国标学科代码: 130 · 1565

文献标志码: A

1 引言

国内外的研究表明, 武器或装药爆炸作用下, 即使地下工程能够经受住爆炸荷载作用而不产生破坏, 但爆炸产生的强烈地震动引起的结构内部冲击震动却可能十分严重, 可造成人员伤亡和设备损坏。近年来, 国内外的许多学者对爆炸荷载作用下结构的动力响应进行了大量的理论和实验研究, 取得了一些有价值的成果^[1~6]。美国学者 J. L. O'Daniel 等^[1]采用有限元软件 DYNA3D 对由回填土、隔震材料、埋置炸药和部分埋置结构组成的土-结构体系进行地下爆炸冲击作用下的动力相互作用分析, 考虑土介质与结构的弹塑性, 并将数值计算结果与现场实验收集的数据做了比较, 模拟的结果与实验结果吻合较好, 且此模型中的荷载通过高爆炸药材料来模拟。由于采用 Lagrangian 单元使得炸药单元附近的网格变形过大而影响模拟效果, T. Krauthammer 等^[2]建立三维有限元模型重点分析了部分埋置钢筋混凝土结构遭受邻近常规爆炸作用时的回填土影响因素, 模拟了泡沫隔震层的隔震效果。

国内, 在核爆炸方面, 田志敏等^[3]、方秦等^[4]分析核爆炸应力波作用下由围岩、软回填层和内层钢筋混凝土衬砌三者构成二维圆形复合结构的反应, 其爆炸荷载采用均布压力荷载近似模拟。在常规武器爆炸方面, 田志敏等^[5]根据现场原型实验结果, 研究了炮弹在顶爆和侧爆情况下引起的浅埋结构内的震动特点, 频谱规律和结构底板震动三个正交分量的幅值之间的关系, 并给出了预测结构底板震动加速度峰值的经验公式。冯进技等^[6]收集了相关化爆试验实测数据, 经量纲分析和回归计算, 得出了常规武器爆炸条件下工事底板震动加速度计算的经验公式, 该公式全面考虑了弹体、介质、工事、弹体与工事的相对位置等各种因素, 可信度高, 实用性强。

本文中, 将应用高效的显式有限元 LS-DYNA3D 和粘-弹性人工边界的方法来求解爆炸作用下地下浅埋结构内部的冲击环境, 并讨论了软回填层的设置及其效果评价, 从而得出一些对工程有实际意义的结论。

2 数值分析模型与计算方法

将岩土介质与钢筋混凝土地下结构介质模拟为弹粘塑性介质, 爆炸模拟通过经验关系在形成的爆腔内壁加径向压力来实现。岩土介质、钢筋混凝土结构介质、软回填材料(泡沫混凝土)计算区采用三维

* 收稿日期: 2005-05-30; 修回日期: 2005-09-02

基金项目: 国家杰出青年基金项目(50325826); 国家人防办十五计划项目

作者简介: 杜修力(1963—), 男, 博士, 教授, 博导。

有限元离散,其中钢筋混凝土介质采用将钢筋弥散于整个混凝土单元的均一材料模型模拟。为模拟爆炸波能量向无穷远域辐射引起的阻尼效应影响和节省计算存储与提高计算效率,设置粘弹性人工边界条件^[7]来解决这一问题。粘弹性人工边界就是在人工边界上施加并联的弹簧和阻尼元件来模拟无限地基的恢复和吸能作用。其优点是无零频漂移和计算精度高^[8]。LS-DYNA3D^[9~10]是 LSTC 公司研发的显式有限元计算程序,被用于大量的实例爆炸冲击荷载或高速碰撞作用下材料和结构的动态响应分析问题,在本文中,选择 LS-DYNA3D 作为计算软件,并将粘弹性人工边界条件实现于计算模型中。

2.1 爆炸荷载的确定

考虑 TNT 球形装药在土中的爆炸引起的地下结构动力响应。对于粘性土,最靠近爆腔的是破碎区,接着是弹塑性区,离药包最远的是弹性区^[11]。作为近似,在爆腔内壁上加径向压力来模拟炸药。爆腔的半径可由文献^[11]中的经验公式求得

$$R_{vd} = k_{vd} R_w, \quad R_{vd} = k_{vd}^* \sqrt[3]{W} \tag{1}$$

式中: R_{vd} 为爆腔半径; R_w 为药包半径; W 为药包质量; k_{vd} 、 k_{vd}^* 为与介质相关的常数。考虑 1 000 lb 低阻爆破弹的爆炸效应,其等效为 250 kg 的 TNT 炸药,经计算可得爆腔的半径为 2 m。土介质中的地冲击荷载可近似用三角形荷载代替。其具体参数可根据美陆军技术手册 TM5-855-1 求得^[12],此公式建立在大量的试验和分析基础之上,多数情况下与试验符合较好,形式简单,具有较好的可靠性。

$$\text{升压时间: } t_r = 0.1 t_a; \quad \text{荷载到达时间: } t_a = R/c$$

式中: t_a 为地冲击从爆点传播至某一给定点 R 所需的时间, R 为传播距离,m; c 为传播距离上的纵波波速;荷载作用时间 t_d 取 $(1\sim 3)t_a$,本文中取荷载作用时间 $t_d = t_a$ 。

$$p_{\max} = 48.77 f(\rho c) (2.78 R/W^{1/3})^{-n} \tag{2}$$

式中: p_{\max} 为峰值压力,Pa; ρc 为声阻抗, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; W 为装药质量,kg; n 为衰减系数; f 为爆炸耦合系数,对于地下封闭爆炸, $f=1.0$ 。

为了更好地与 TM5-855-1 手册中的经验公式比较,本文的土介质参数取自手册中的一组实验参数:密度为 $1\,950\text{ kg}/\text{m}^3$,地震纵波波速为 $300\text{ m}/\text{s}$,衰减系数 $n=2.8$ 。根据土介质和手册上的经验公式可求得爆腔内壁上的压力时程为

$$t_d = t_a = R/C = \frac{2}{300} = 6.7\text{ ms}$$

$$t_r = 0.1 t_a = 0.1 t_d = 0.67\text{ ms}$$

$$p_{\max} = 57.4\text{ MPa}$$

爆炸荷载的时程和经 FFT 技术求得的频谱特性分别如图 1、2 所示。

2.2 模型参数的确定

研究地下箱型结构在常规武器爆炸作用下的动力反应。用大量的数值模拟最终确定计算模型:总尺寸为 $21\text{ m} \times 16\text{ m} \times 15\text{ m}$,因模型关于 xz 面对称,取原结构的 $1/2$ 模拟,爆心位于地表下 7 m ,离右侧边界 6 m 。结构外边长为 $5.2\text{ m} \times 8\text{ m} \times 3.6\text{ m}$,厚度为 0.6 m ,结构中心离地表面 7 m ,离左侧边界 7.4 m ,其迎爆面距离爆心 5 m 。左右后下 4 面边界设置粘-弹性人工边界,以减少边界反射波对结构反应的影响。上表面为自由面,前面设置为对称边界。有限元模型如图 3,共计节点 155 197,单元 143 464,其结构单元数为 5 280。据波动理论,取单元的最大尺寸 $\Delta x_{\max} = (1/6 - 1/12)\lambda_{\min}$, $\lambda_{\min} = c/f_{\text{cv}} = 300/200 = 1.5\text{ m}$ (f_{cv} 为截止频率),由于加载附近区域荷载所含的高频成分较多,故网格剖分得较密,根据上述方法确定尺寸为 0.2 m ,其他部分尺寸均为 0.5 m 。土介质与结构之间采用共用节点处理。

土介质与钢筋混凝土均采用弹粘塑性模型^[13]来进行模拟。本文中选用 LS-DYNA3D 中的 Model 3(MAT-PLASTIC-KINEMATIC)来模拟。应变率效由 Cowper-Symonds 模型考虑。

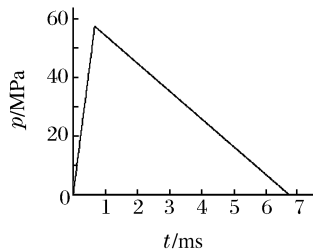


图 1 爆腔内壁压力时程
Fig. 1 Pressure history of explosion-cavity inner wall

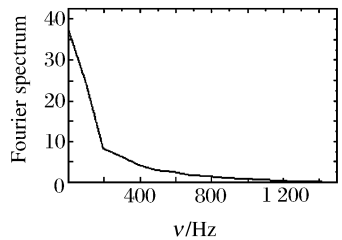


图 2 压力频谱
Fig. 2 Spectrum of the pressure

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

式中： σ_0 为初始屈服应力；塑性强化模量 $E_p = E_{\text{tan}} E / (E - E_{\text{tan}})$ ， E 为杨氏弹性模量， E_{tan} 为切线模量， C 、 P 为考虑应变率效应的参数。具体参数见表 1。

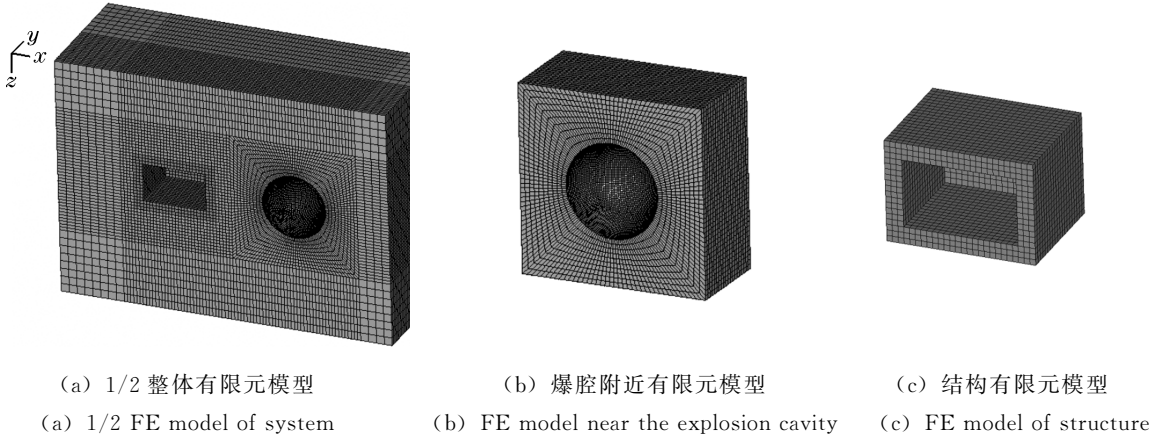


图 3 三维有限元模型

Fig. 3 Three dimension FE model

表 1 介质计算参数

Table 1 Parameters of the medium

介质	密度 $\rho / (\text{kg}/\text{m}^3)$	动能弹模量 E / MPa	泊松比 μ	初始屈服应力 σ_0 / MPa	$E_{\text{tan}} / \text{MPa}$	C	P
钢筋混凝土	2 500	3.78×10^4	0.2	35	378	99	1.94
土介质	1 950	70	0.42	4.5	4.0	0	0

3 数值模拟与 TM5-855-1 经验公式的比较

3.1 结构周围土中爆炸所产生的自由场应力与地运动参数比较

基于大量的试验数据，在 TM5-855-1 手册中给出了一套计算炮航弹在遮弹层上或在其内部、或在结构周围土中爆炸所产生的自由场应力和地运动参数的经验公式。图 4 为本文的数值模拟结果与 TM5-855-1 手册的经验关系的土中自由场峰值压力、峰值速度及峰值加速度计算结果的比较。对比的位置为离爆心 2.6~4.6 m 之间，由图可见，各参数的数值模拟值与经验值吻合较好。产生各计算值之间误差的原因是：(1) 爆炸荷载定义基于经验公式带来的误差；(2) 土介质动荷载作用下的特性复杂多变；(3) 数值模拟无法真实地模拟土中爆炸的鼓包和成坑效应。总之，本文计算模型与 TM5-855-1 手册中的经验关系计算的结果基本上是一致的，表明本文的计算模型是合理的。

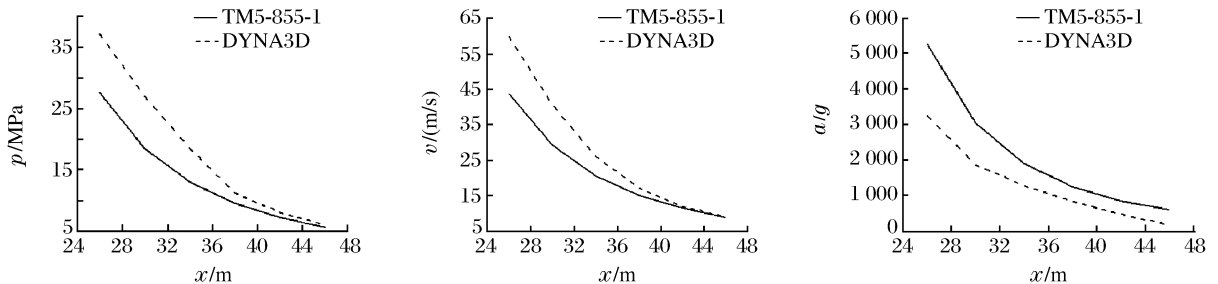


图 4 自由场中各参数峰值的比较图

Fig. 4 Comparison of peak responses in the free fields

3.2 结构内部整体冲击响应比较

根据 TM5-855-1 手册中侧爆加载情况下矩形埋设结构的经验公式^[12]求得自由场平均加速度及平均速度,然后用该值乘以折减系数获得结构内部的平均加速度及平均速度。本文的数值方法求得的平均加速度和平均速度可近似取为迎爆面中点与背爆面中点二者的均值。二者的比较如表 2。

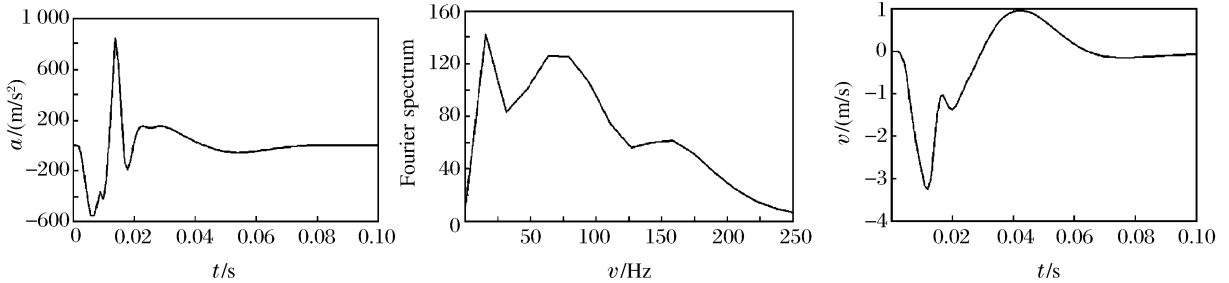
表 2 结构内部平均响应对比表

Table 2 Comparison of average response inside of structures

计算方法	a_{av}/g	$v_{av}/(m/s)$
TM5-855-1	106	2.21
DYNA3D	64.5	3.12
二者误差	39.2%	41.2%

由表 2 可得出,数值模拟的结果与 TM5-855-1 上的经验公式求得的结果之间的误差在 40%左右,表明所采用的方法和计算模型是合理的。

图 5 为结构迎爆面中点各参数的时程图。由文献[14]可知,结构上的响应波形与土中自由场的波形是大致相类似的。本文中求的结构速度波形可用三角函数近似描述,波形含有位移恢复部分,且有反相作用部分,其加速度与文献[15]所描述的波形类似,也进一步验证此结果是合理的。由上图分析可以得出:结构内部迎爆面的加速度峰值非常大,可高达 86g,其主频域(幅谱分量大于其峰值 0.707 倍所对应的频率集合)分布在 10~30 Hz 与 50~100 Hz 两个区域。加速度波形含有高频成份,且持续时间短,一般仅几十毫秒,震动幅值和频率变化大。因此,应在结构与介质之间加软回填层等来降低结构内部的冲击响应。



(a) 加速度时程 (b) 加速度频谱特性 (c) 速度时程
 (a) Acceleration history (b) Spectrum of acceleration (c) Velocity history

图 5 迎爆面各参数响应时程

Fig. 5 Responses time-history of side subjected to explosion

4 软回填层的隔震效果分析

为提高地下结构的抗爆性能,往往在介质与结构之间夹一层软回填层。这些材料在本质上均有弹塑性的应力应变特性曲线,并能在应变强化开始之前经受较大的应变。研究表明^[4]:软回填层尽量选用低弹性模量,低密度的大变形弹塑性材料,且在屈服应力基本不变的情况下,应能产生很大的应变。

4.1 软回填层的材料模型及参数

根据上述原则选择了低弹模、低密度的泡沫混凝土作为隔震层。其准静态下典型的应力-应变曲线如图 6 所示。在 DYNA3D 中用 Model 63 (MAT-CRUSHABLE-FOAM)来模拟此材料。材料具体参数参照文献[3, 14]取值,见表 3。

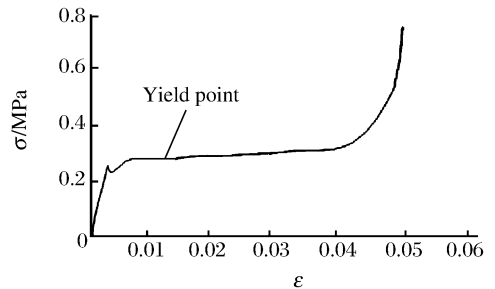


图 6 软回填层应力-应变曲线

Fig. 6 Stress-stain curve of crushable backpacking

表 3 软回填层参数表

Table 3 Parameters of foam concrete

介质	$\rho/(kg/m^3)$	E/MPa	μ
软回填层	788	40	0.1

表中 E 为动能弹模量

4.2 对结构上各参数响应的影响

在结构迎爆面一侧加上厚度为 0.6 m 的软回填层以后,经计算可得到以下结果。图 7 为软回填层

的屈服强度为 0.30 MPa 时,结构迎爆面中点的各参数动力响应。

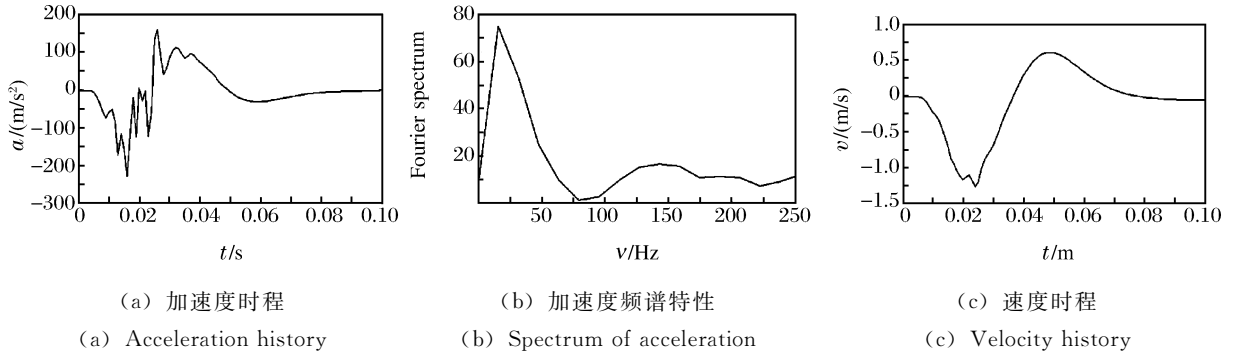


图 7 结构迎爆面的各参数时程

Fig. 7 History of different responses of side subjected to explosion

通过与无隔震层时所计算的结果对比,可得出加速度峰值由 86g 降低到 23g,减小了 73.1%;速度由原来的 3.24 m/s 降低到 1.26 m/s,减小了 61.1%。加速度的主频域分布在 10~35 Hz 之间。可见加了隔震层后对于降低结构的加速度和速度效果非常明显。其原因是由于软回填层材料的大塑性变形大量吸收冲击和震动能量,造成岩土介质-回填材料-结构之间的阻抗失配而产生有利的反射波,使冲击震动能量在回填材料中急剧衰减,减少了衬砌内部震动效应^[4]。

表 4 局部隔震与整体隔震效果比较表

Table 4 Comparison of local and whole shock isolation effects

隔震范围	a/g		v/(m/s)		加速度主频域/Hz
	计算值	降低率	计算值	降低率	
局部隔震	23	73.1%	1.26	61.1%	10~35
整体隔震	12	86%	0.76	76.5%	10~32

除了在结构迎爆面一侧设置隔震层外,还可在结构四周均设置隔震层。两种情况的隔震效果比较如表 4,整体隔震效果优于局部隔震,对于抗爆级别较高的工事,应采取整体隔震。

4.2.1 软回填层的屈服强度对其隔震效果的影响

通过改变软回填层的屈服强度,计算各屈服强度下所对应的隔震率(定义为加速度的减小量与无隔震层时的加速度的百分比),得到的屈服强度与隔震率的关系如图 8 所示。由图可得出,屈服强度在 0.5 MPa 以下,其隔震率 η 才能够达到 70% 以上。对于实际工程应用时,应根据实际结构附近的压力峰值与所要达到的隔震率确定软回填层的屈服强度,这一点在实际工程中是非常重要的。

4.2.2 软回填层的厚度对其隔震效果的影响

回填层存在一个合理厚度的选择,Newmark 等通过假设回填层所吸收的应变能至少等于形成岩洞时被挖掉的岩石所吸收的应变能,导出了计算回填层最小厚度的公式^[14]。上述方法适用于岩石介质,对于土介质不一定适用,本文中通过改变软回填层的厚度,计算各厚度下所对应的隔震率。得到的厚度与隔震率的关系如图 9 所示。由上图可知,当隔震

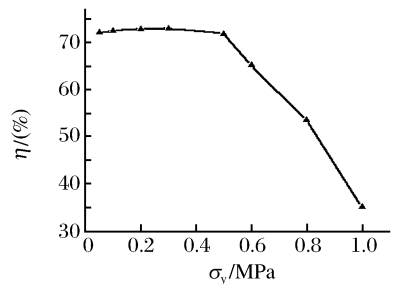


图 8 屈服强度与隔震率关系图

Fig. 8 Relationship of σ_y and shock isolation ratio

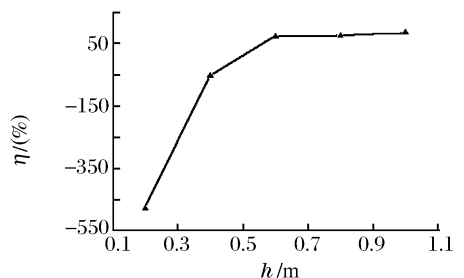


图 9 厚度与隔震率关系图

Fig. 9 Relationship of thick and shock isolation ratio

层的厚度小于 0.5 m 时,非但没有起到隔震效果,反而使结构内部的加速度峰值变大,当大于 0.6 m 时,隔震效果基本处于稳定值。

5 结 论

通过本文的研究,可以得到以下结论:

(1) 基于 LS-DYNA3D 和粘弹性人工边界条件建立的爆腔-地下结构-岩土介质系统三维弹粘塑性动力响应分析模型能合理地模拟常规武器爆炸作用下地下结构的动力响应。

(2) 算例表明当不采用隔震措施时,结构迎爆面加速度峰值高达 86g 以上,足以给结构内部的人员和设备造成致命的危害,这说明地下结构的冲击隔震问题是地下结构防常规武器危害研究必须考虑的问题。

(3) 软回填层能有效地降低结构加速度峰值,隔震率可达 75%,其隔震效果主要取决于软回填层的屈服强度。此外,回填层必须足够厚,以便能吸收周围介质给予的大部分能量,取值太小起不到隔震效果,反而使结构内部的加速度响应变大。

(4) 虽然软回填层可大幅降低结构的加速度峰值,但是隔震后的加速度峰值仍可达 12~23g 左右,大大超出了人员和设备的耐震界限,必须进行进一步的结构内部隔震。

参考文献:

- [1] O'Daniel J L, Krauthammer T. Assessment of numerical simulation capabilities for medium-structure interaction systems under explosive loads[J]. Computers and Structures, 1997, 63(5): 875—887.
- [2] Krauthammer T, Ku C K. Backfill effects on partially-buried shelter response under close-in conventional explosions[A]. Proceedings of the 3rd International Conference on Structures under Shock and Impact III[C]. Madrid, Spain:Computational Mechanics Publications LTD,1994: 349—356.
- [3] 田志敏,钱七虎,吴步旭.大压力爆炸动载作用下高抗力复合圆形结构研究 [J].特种结构,1997,14(3):40—43. TIAN Zhi-min, QIAN Qi-hu, WU Bu-xu. Study on composite cylindrical structure in rock subjected to explosion induced intense dynamic loading [J]. Special Structures, 1997, 14(3): 40—43.
- [4] 方秦,钱七虎.应力波与带软衬垫的地下结构动力相互作用 [J].爆炸与冲击,1988,8(4):289—298. FANG Qin, QIAN Qi-hu. Dynamic interaction between stress waves and underground structure with crushable backpacking [J]. Explosion and Shock Waves, 1988, 8(4): 289—298.
- [5] 田志敏,赵秦晋,周丰峻.常规武器爆炸作用下浅埋结构内部的冲击环境[A].中国土木工程学会防护工程学会第三次年会暨抗爆结构学术交流会议论文集[C].山东烟台:[s. n.],1992:245—252.
- [6] 冯进技,谢清粮,赵大勇.常规武器爆炸条件下工事底板震动预测[A].第二届全国工程结构安全防护学术会议[C].绵阳:[s. n.],1997:107—111.
- [7] 杜修力.局部解耦的时域波分析方法[J].世界地震工程,2000,16(3):22—26. DU Xiu-li. A partially decoupling analytical method for wave propagation problem in time domain [J]. World Information on Earthquake Engineering, 2000, 16(3): 22—26.
- [8] 赵密.粘弹性人工边界及其与透射人工边界的比较研究[D].北京:北京工业大学,2004.
- [9] John O Hallquist. LS-DYNA Theoretical Manual[Z]. California: Livermore Software Technology Corporation, 1998.
- [10] Livermore Software Technology Corporation. LS-DYNA Keyword User's Manual(Version 970)[Z]. California: Livermore Software Technology Corporation, 2003.
- [11] 亨利奇 J. 爆炸动力学及其应用[M].熊建国,等译.北京:科学出版社,1987:234—240.
- [12] U. S. Department of the Army. 美陆军技术手册 TM5-855-1 常规武器防护设计原理[M].方秦,等译.中国人民解放军工程兵工程学院,1997.
- [13] 李铮,金福青,蔡中民.混凝土板自振特性及动力响应[A].中国土木工程学会防护工程分会第九次学术年会论文集[C].吉林长春:[s. n.],2004:415—420.

- [14] Crawford R E, Higgins C J, Bultmann E H. 美国空军防护结构设计与分析手册[M]. 空军后勤部工程设计局, 译, 1980.
- [15] 严东晋. 爆炸冲击震动下隔震问题研究[R]. 南京: 解放军理工大学, 1999.

Dynamic response analysis of underground structures under explosion-induced loads

DU Xiu-li^{1*}, LIAO Wei-zhang¹, TIAN Zhi-min², LI Liang¹

(1. *Beijing Laboratory of Earthquake Engineering and Structural Retrofit, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China;*

2. *The Beijing Canbao Institute of Architectural Design, Beijing 100850, China*)

Abstract: Based on the explicit FEM code LS-DYNA3D and the viscous-spring boundary, the 3D elastic-viscous-plastic dynamic response model composed of explosion cavity, an underground structure, a shock isolation material and geologic backfills were established. The empirical relation was used during the simulation of the explosion cavity. By comparing with the results of the empirical relation of technical manuals—TM5-855-1 of the USA Army, it can be see that the proposed model and method are reasonable. The shock isolation effect of the crushable backpacking was also discussed.

Key words: solid mechanics; explosion; underground structures; dynamic response; crushable back-packing

* Corresponding author: DU Xiu-li
E-mail address: duxiuli@bjut.edu.cn
Telephone: 010-80999479