

平面冲击载荷下不同形式含柱壳结构的防护性能

高光发^{1a,1b,2}, 李永池², 黄瑞源², 段士伟²

(1. 安徽理工大学 a. 煤与瓦斯共采重点实验室; b. 能源与安全学院, 安徽 淮南 232001;

2. 中国科学技术大学 近代力学系, 合肥 230027)

摘要:以防护工程中新型分配层的设计为背景,对含单层和两层柱壳的混凝土结构中应力波的衰减和演化规律进行理论和数值分析,经过大量的计算发现,柱壳的纵向位置、层间距和排列形式对结构的削波性能有着较大的影响。计算结果表明:含单层柱壳时,柱壳距离被保护区域越近,结构的削波性能越好;当含双层结构时,被保护区域的应力时程曲线呈现明显的“驼峰”状,柱壳的层间距越小,结构对应力波的隔离效应越明显,且两层柱壳错开结构防护效果优于对齐结构。

关键词:抗爆设计;爆炸力学;防护工程;分配层;柱壳;应力波;结构

中图分类号:TU927;O383.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2012)01-0007-05

Protection Performance of the Various Structures with Cylindrical Shells under Plane Impact Loadings

GAO Guang-fa^{1a,1b,2}, LI Yong-chi², HUANG Rui-yuan², DUAN Shi-wei²

(1a. Key Laboratory of Integrated Coal Exploitation and Gas Extraction; 1b. School of Energy and Safety, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, Anhui, P. R. China; 2. Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, P. R. China)

Abstract: Aiming at the design for distribution layer in defense works, attenuation mechanism and evolution law of stress waves in distribution layer with cylindrical shells were focused on. It was found that dispersion and diffraction effect of stress waves were occurred in the concrete medium on the basis of theoretical analysis and numerical simulations, which significantly weakened the strength of stress waves behind the shells. The position, interlayer spacing and the arrangement forms of the shells had great influence on the protection performance of the structures. The results show: in the structures with single-layer cylindrical shells, the smaller the space between the shells and the protected area is, the better the protection performance is; in the structure with two-layer cylindrical shells, the smaller the interlayer spacing is, the better the protection performance is, and the protection performance of the stagger structure is better than that of the aligned structure.

Key words: anti-explosion design; explosion mechanics; defense works; distribution layer; cylindrical shell; stress waves; structure

完善的防护工程是一个国家提供生存能力和保存战争实力的重要手段。然而,在高技术战争实施的高速度、高精度、高强度打击下,即使人防指挥工程的遮弹层能有效拦截来袭弹药,使其在工程表面爆炸,爆炸产生的巨大的冲击波仍很有可能对地下工程顶

板造成震塌破坏。典型的成层式人防工程结构主要有伪装土层、遮弹层、分配层和支撑结构4部分,其中分配层的主要作用是对爆炸波削弱、吸收、屏蔽即抗爆防震。在实际工程中,由于受到经费和地质条件的限制,不可能通过无限制地增加分配层厚度来达到抗

收稿日期:2011-05-26

基金项目:武器装备探索研究(7131013);国家自然科学基金项目(50802092);国家人防科研“十一·五”规划项目;安徽理工大学博士科研基金(2011yb007)

作者简介:高光发(1980-),男,博士,副教授,主要从事应力波理论及应用、工程安全及防护技术研究,(E-mail) gfgao@ustc.edu.cn。

爆要求。因此,研究新型分配层从而有效地提高地下防护结构对各类航弹、炮弹、穿地弹及导弹的抗御能力,延长其生存寿命并保证其安全工作,是防护工程领域的核心研究课题,具有极其重要的价值。

然而,在人防工程特别是掘开式人防工程中,绝大部分研究主要针对怎样提高遮弹层的抗侵彻性能,而对新型分配层的研究国内外未见报道。对此,近些年来本课题组王肖钧等^[1-2]和李永池等^[3-10]在国家人防科研“十·五”和“十一·五”项目基金资助下率先进行了大量的研究,其中后者利用孔穴的绕射屏蔽效应来提高分配层的吸波耗能效果,试验证明该结构能很大程度上提高分配层的防护强度。然而,不管在分层结构中加入细孔的泡沫混凝土还是在其中设置大的孔穴,其削波的效果虽然明显,但是其强度明显不够,很可能一个强度较小的冲击波就能够促使孔穴坍塌。前期的研究表明,含柱壳的防护结构(后称柱壳结构)的防护性能从工程意义上讲比嵌入孔穴的防护性能明显强得多,抵抗二次冲击的能力也远强于孔穴结构。

本文主要是研究在结构中设置 1 层和 2 层有一定强度且厚度较小的柱壳时,结构对入射应力波的阻尼耗散、削弱及隔离作用,为科学设计新型防护层提供一定的理论依据。

1 柱壳对波的隔离效应的理论分析

如图 1 所示,当强度为 σ_1 的压缩波从波阻抗为 $\rho_1 c_1$ 的介质入射到波阻抗为 $\rho_2 c_2$ 的介质,当入射角为直角时,如图中(a)所示,其入射波和反射波皆为平面 P 波,其强度分别为:

$$\sigma_F = \frac{1-\lambda}{1+\lambda}, \sigma_T = \frac{2}{1+\lambda}, \lambda = \frac{\rho_1 c_1}{\rho_2 c_2}$$

$\lambda > 1$ 时反射波为拉伸波,而 $\lambda < 1$ 时则为压缩波。

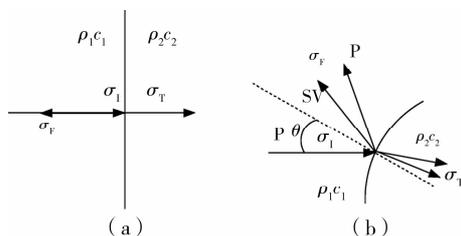


图 1 平面应力波在界面上的反射与透射

当入射角角度为 $\theta \neq \frac{\pi}{2}$ 且入射到自由界面时(入射到其它界面时类似),如上图中(b)所示,根据弹性波场理论可知,其反射波为一个 P 波(拉伸波)和一个 SV 波(剪切波)。

由上可知,虽然此 2 种情况都能起到削波的作用,但弧形界面能够产生漫射效应,对于有限空间,后者所反射的应力波明显经过更长的路线,其反射波场明显大于前者,如反射的波强度大于介质的破

坏强度,后者的耗能作用明显大于前者,所以,在分配层中布置弧形界面即圆孔的耗能效果应该强于矩形孔穴。这个结论与文献[10-11]的现场化爆试验结果完全吻合。

2 数值模型及本构模型

LS-DYNA 是一个显式非线性动力学分析的通用有限元软件,可以求解各种二维和三维结构的高速碰撞、爆炸等大变形问题。作者的前期研究^[12]对利用 LS-DYNA 进行数值计算和现场试验结果进行的对比分析,结果表明数值计算所得的结果能够与试验结果很好的吻合。该研究利用 LS-DYNA 对柱壳和孔穴对应力波的隔离、绕射和耗散效应进行研究。

2.1 数值计算模型

研究主要针对核弹空爆产生的应力波在防护层中传播问题进行研究,空爆能量加载可视为在分配层上方施加一个脉冲载荷。根据相关资料知,以 2 万 t 核爆炸为例,其最大超压值为 1.2 GPa,其卸载过程符合指数关系,为简化起见,以三角形脉冲载荷模拟核弹爆炸。如图 2 所示。

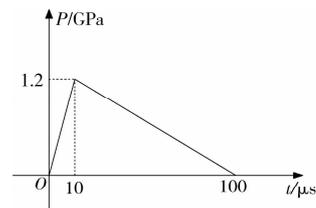


图 2 三角形脉冲载荷

为了对比研究在分配层中加入柱壳与其他类似方式对应力波的耗散效应,对 3 类模型进行数值计算,如图 3 所示,此 3 个模型从上到下分别为:原始模型、嵌入单层柱壳模型和嵌入 2 层柱壳模型。模型高 400 mm、宽 1 200 mm,柱壳外径为 50 mm、厚度为 1 mm。对于单层柱壳结构,柱壳间距取 75 mm,柱壳中心点纵坐标 H 分别取 -100、-150、-200 mm;对于双层柱壳结构,上面一层柱壳的纵坐标 H 和 2 层柱壳间距 s 分别取 -100、100、-105、90、-110、80、-115、70 mm,而且分别取上下层对齐和错开 37.5 mm 2 种情况分析。数值计算主要是针对这 12 个模型计算结果进行对比研究。

因为计算中模型是轴对称的,所以取 1/2 模型进行计算,同时也可认为柱壳足够长,取 1 mm(即一个单元)的厚度进行研究。计算中对法向方向为 x 轴和 z 轴方向的表面进行位移约束,底面(法向方向为 y 轴负方向)取为无反射边界。图中点 A0—A6 为距离上表面 300 mm 的表面上所布置的测点,其水平间距为 50 mm。

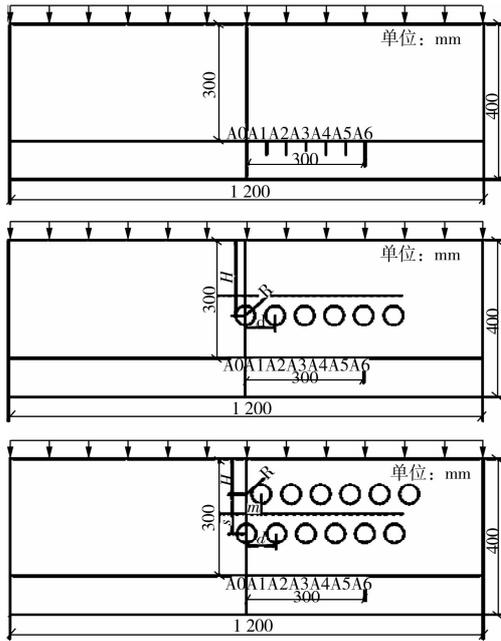


图 3 数值计算模型示意图

2.2 混凝土本构模型

数值分析中混凝土的本构模型取 HJC 模型^[13], 计算中所采用的 HJC 模型本构参数见表 1 所示。

表 1 混凝土 HJC 本构参数

参数名称	参数值	参数名称	参数值
密度/(g·cm ⁻³)	2.44	压碎体压力/GPa	0.016
剪切模量/GPa	14.86	压碎体应变	0.001
A	0.79	压实应力/GPa	0.80
B	1.60	压实应变	0.10
C	0.007	D ₁	0.04
压力硬化指数 N	0.61	D ₂	1
f' _c /GPa	0.048	K ₁ /GPa	85
T/GPa	0.004	K ₂ /GPa	-171
归一化最大强度	7.0	K ₃ /GPa	208
损伤常数	0.01	参考应变率	0.000 001

2.3 钢的本构模型

模型中柱壳所用的材料钢采用随动硬化模型, 其本构参数见表 2 所示。

表 2 钢的本构参数

参数	密度/(g·cm ⁻³)	弹性模量/GPa	泊松比	屈服强度/MPa	切线模量/MPa
值	7.83	207	0.29	215	20.7

3 计算结果及分析

为更明确的比较各结构的削波性能, 文中定义一个参数 DF(decaying factor)为削波因子:

$$DF = \frac{\sigma_{\text{original}} - \sigma}{\sigma_{\text{original}}}$$

其中: σ_{original} 表示该测点在原始结构中的应力峰值; σ 表示所分析的结构中相应位置测点的应力峰值。

从削波因子的定义可以看出, 当其值较大时, 结构的削波效果好, 且越大越好, 特别地, 削波因子为 1 时表示结构后方应力峰值为 0, 即完全屏蔽; 削波因子为 0 时, 结构后方应力峰值与原始结构一致, 即没有任何效果。

3.1 原始结构的计算结果

对于原始的分配层模型来讲, 当脉冲载荷的值大于材料的屈服极限和破坏应力时, 材料发生塑性变形和破坏, 随着塑性加载波的向下传播, 材料一直处于塑性或破坏状态中, 而材料的塑性变形和破坏能够在很大程度上减小侵入的能量, 使得通过材料的应力波得到衰减。如图 4 所示, 计算中所设置的 7 个测点所得的应力时程曲线基本重合, 其应力峰值约为 0.35 GPa, 而入射的脉冲载荷应力峰值为 1.2 GPa, 这说明应力波在混凝土介质中得到很大的衰减, 其衰减比例约为 30%。其达到峰值的时间为 152 μs 。

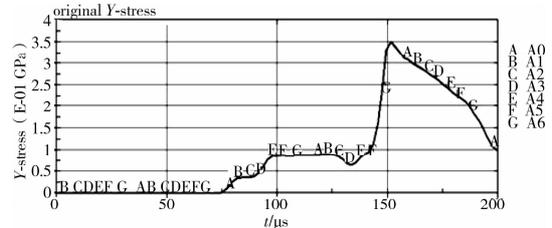


图 4 原始模型中测点的应力时程曲线

3.2 设置单层柱壳时的计算结果及分析

如上理论分析一样, 应力波到达柱壳表面上会反射压缩波和剪切波, 因柱壳的外表面为圆形, 所以对如上波会产生漫射现象, 从而大大加长了塑性加载波和剪切波在柱壳上方混凝土中的传播路径, 使得更大范围内的混凝土破坏从而更多的入射能量被吸收; 同时柱壳也对周围一定范围内的应力波路径产生影响, 使得经过柱壳结构的应力波发生绕射。因此, 理论上在分配层中嵌入柱壳有利于提高结构的防护性能。

图 5 表示此 3 种情况时测点的应力时程曲线, 其相应的削波因子如图 6 所示。从图中可见, 这 3 种情况的应力峰值远小于原始结构时的应力峰值 0.35 GPa, 削波因子都大于 0, 说明此 3 种结构都具备较好的削波性能。且随着柱壳的下移, 结构的削波性能越强, 这主要是因为: 当柱壳下移时, 应力波在柱壳表面反射后应力波场逐渐增大, 从而使爆炸所产生的能量充分得到吸收, 更大程度上减小应力波的强度; 然而, 当柱壳下移一定量时, 结构的削波性能增加速度逐渐减缓, 而且此后各测点的应力峰值相差逐渐增大, 即保护层位置应力不均匀, 这样影响下方支撑结构的安全。因此, 当采用单层柱壳结构时, 应从实际情况出发, 综合考虑削波吸能和下方保护层的应力均匀性, 从而设计出柱壳的合理设置位置。

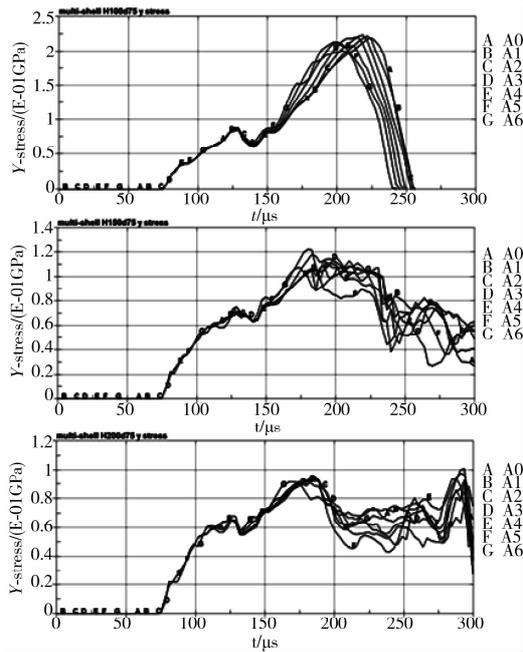


图 5 不同 H 时模型中测点的应力时程曲线

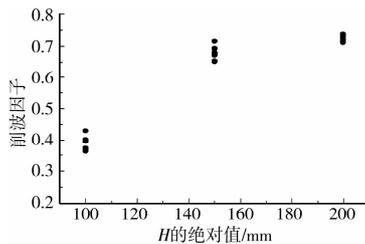


图 6 不同 H 时测点削波因子

3.3 设置对齐双层柱壳时的计算结果及分析

当在分配层中布置平行等间距且对齐的 2 排柱壳时,根据计算得到不同层间距柱壳结构对冲击载荷的削波性能,如图 7 所示。从图中各测点的应力时程曲线可以看出,此时测点的最大应力峰值约为 0.08 GPa,其值小于单层柱壳结构时的应力峰值(0.1 GPa 左右),这说明 2 层柱壳结构比单层柱壳结构具备更强的削波性能。同时,从图 7 可以看出:

1) 测点的应力成驼峰状,即当应力波到后测点的应力逐渐增加,直到到达 1 个应力极值(后称为第 1 应力峰值),然后,应力逐渐下降,但下降到一定值时,应力不仅不下降,反而逐渐上升而到达第 2 个应力峰值点(后称为第 2 应力峰值)。

2) 随着层间距的减小,测点的第 1 应力峰值逐渐减小,且减小速度较缓慢(都接近于 0.08 GPa),但其第 2 应力峰值变化并不明显,且各测点的第 2 应力峰值差别较大。

可见,过大的层间距使得第 1 应力峰值较大,不利于结构的削波,而过小的层间距随使得第 1 应力峰值减小,但当层间距小于一定值时第 2 应力峰值

并不随之改变,反而影响整个结构的整体力学性能(如抗静压性能等)。

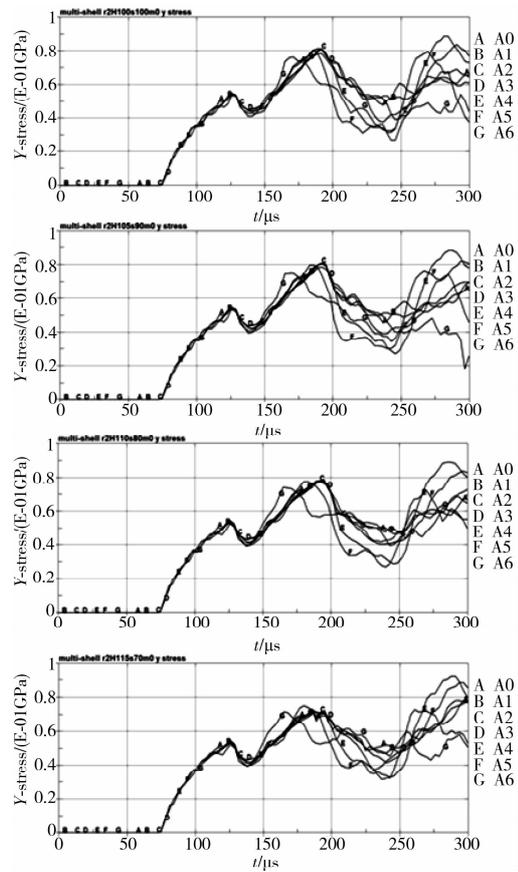


图 7 不同层间距测点的应力时程曲线

3.4 设置错开双层柱壳时的计算结果及分析

当在分配层中布置平行等间距且错距为 37.5 mm 的两排柱壳时,根据计算得到不同层间距柱壳结构对冲击载荷的削波性能,如图 8 所示。从图中各测点的应力时程曲线可以看出,此时测点的最大应力峰值约为 0.06~0.08 GPa,其应力时程曲线具备 2 层柱壳对齐时同样的特征,即应力呈驼峰状,同时,从图 8 可以看出本类型结构还具备以下基本特征:

1) 随着层间距的减小,第 1 应力峰值逐渐减小,且减小的速度大于双层柱壳对齐时的情况;但与上一种结构类似,其第 2 应力峰值变化不大。

2) 当层间距大约为 70~80 mm 时,其第 1 应力峰值最小,约为 0.06 GPa,此时,再缩小层间距,其第 1 应力峰值和第 2 应力峰值都基本没有变化。

可见,同等层间距,错开结构(即图 3 中第 3 图中 m 值不为零)的削波性能强于对齐结构(即 m 值为零)。

4 结论

从文中计算和分析可以看出,在分配层中嵌入柱壳结构对入射应力波的衰减、耗散和隔离起到很

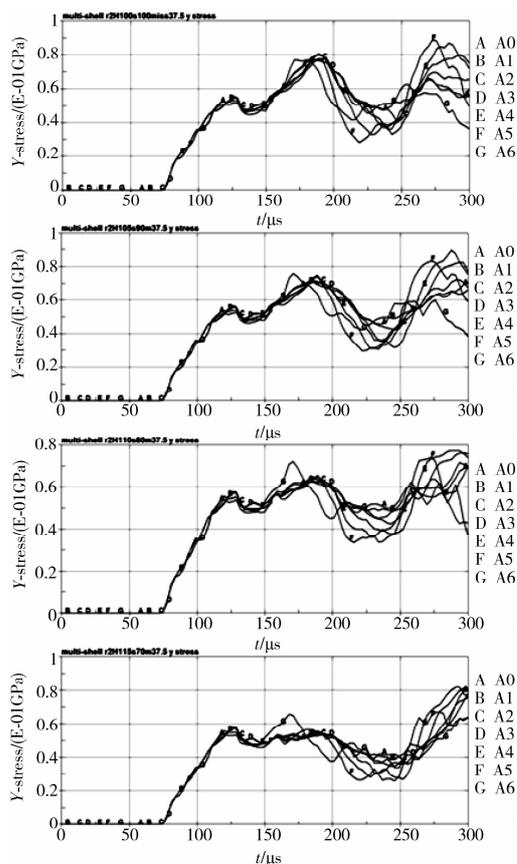


图 8 不同层间距时测点的应力时程曲线

大的作用,其削波性能远远强于原始结构。含柱壳的防护结构的防护性能从工程意义上讲比嵌入孔穴的防护性能明显强得多。

对于单层含柱壳结构来讲,当柱壳距离被保护层较远时,其距离越小保护效果越好,但当其距离小于一定值时,其效果的变化随距离的变化并不明显,而且此时随着距离的缩小,被保护层上的应力不均匀性越来越明显。因此,选择合理的柱壳位置对于提高结构的防护效果有着重要的影响。

当在防护结构中间隔布置 2 层柱壳时,测点的应力时程曲线呈现明显的“驼峰”状,且随着层间距的减小,第 1 应力峰值逐渐减小,但其趋势逐渐减缓;而第 2 应力峰值当间距达到一定值时并不随层间距的减小而变化,应综合考虑结构的整体强度选取适当的层间距,以提高结构的强度和防护效果。

其它条件相同时,双层结构错开布置时其防护效果强于 2 层对齐时的情况。

参考文献:

- [1] 李砚召,王肖钧,吴祥云,等. 分配层分层结构对核爆炸载荷的防护效果试验研究[J]. 中国科学技术大学学报, 2009, 39(9): 931-935.
LI YAN-ZHAO, WANG XIAO-JUN, WU XIANG-YUN, et al. Test study on layered structure's defense

effect of distribution layer against nuclear explosive loadings [J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2009, 39(9): 931-935.

- [2] 劳俊,肖卫国,王肖钧,等. 地下空腔解耦爆炸的数值模拟[J]. 爆炸与冲击, 2009, 29(5): 535-541.
LAO JUN, XIAO WEI-GUO, WANG XIAO-JUN, et al. Numerical simulation on underground cavity-decoupling explosion [J]. Explosion and Shock Waves, 2009, 29(5): 535-541.
- [3] 李永池,姚磊,沈俊,等. 空穴的绕射隔离效应对后方应力波的削弱作用[J]. 爆炸与冲击, 2005, 25(3): 193-199.
LI YONG-CHI, YAO LEI, SHEN JUN, et al. Insulation effect of the cavity on stress wave [J]. Explosion and Shock Waves, 2005, 25(3): 193-199.
- [4] WANG ZHI-LIANG, WANG J G, LI YONG-CHI, et al. Attenuation effect of artificial cavity on air-blast waves in an intelligent defense layer [J]. Computers and Geotechnics, 2006, 33: 132-141.
- [5] WANG ZHI-LIANG, LI YONG-CHI, WANG J G. Study of stress waves in geomedia and effect of a soil cover layer on wave attenuation using a 1-D finite-difference method [J]. Computers & Geosciences, 2006, 32: 1535-1543.
- [6] WANG ZHI-LIANG, LI YONG-CHI, WANG J G, et al. A study of tensile damage and attenuation effect of perforated concrete defense layer on stress waves [J]. Engineering Structures, 2007 (29): 1025-1033.
- [7] WANG ZHI-LIANG, LI YONG-CHI, WANG J G. Numerical analysis of attenuation effect of EPS geofoam on stress-waves in civil defense engineering [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2006, 24: 265-273.
- [8] 穆朝民,任辉启,李永池,等. 爆炸波在高饱和度饱和土中传播规律的研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(3): 875-880.
MU CHAO-MIN, REN HUI-QI, LI YONG-CHI, et al. Propagation laws of blast wave in saturated soils with high saturation degree [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(3): 875-880.
- [9] 王林,胡秀章,李永池. 不同介质中集团装药爆炸混凝土冲击响应的数值模拟[J]. 工程爆破, 2010, 16(4): 5-8.
WANG LIN, HU XIU-ZHANG, LI YONG-CHI. Numerical simulation of dynamic response for concrete under group charge explosion in different mediums [J]. Engineering Blasting, 2010, 16(4): 5-8.
- [10] 高光发,李永池,姚磊,等. 核爆炸载荷下孔穴结构防护性能的试验研究[J]. 土木工程学报, 2010, 43(S): 490-494.
GAO GUANG-FA, LI YONG-CHI, YAO LEI, et al. Test study on cavity structure's defense effect against nuclear explosion loadings [J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(S): 490-494.

2)应对无粘结材料的脱层能力进行测试,以确保其脱层效果。

3)应选用低屈服点钢材,如 Q235,并进行材性试验,确保核心钢管具有足够的延性性能。

参考文献:

- [1] 周云. 防屈曲耗能支撑结构设计与应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.
- [2] XIE Q. State-of-the-art of buckling-restrained braces in Asia[J]. Journal of Construction Steel Research, 2005, 61(6):727-748.
- [3] 汪家铭, 中岛正爱, 陆焯. 屈曲约束支撑体系的应用与研究进展(I)[J]. 建筑钢结构进展, 2005, 7(1):1-12. WANG CHIAMING, NAKASHIMA M ASAYOSHI, LU YE. The practice and research development of buckling-restrained braced frames (I) [J]. Progress in Steel Building Structures, 2005, 7(1):1-12.
- [4] JUAN ANDRES OVIEDO A, MITSUMASA MIDORIKAWA. Optimum strength ratio of buckling-restrained braces as hysteretic energy dissipation devices installed in R/C frames [C]//The 14th World Conference on Earthquake Engineering, October 12-17, 2008, Beijing, China.
- [5] Mario D'Aniello, Gaetano delia corte, Federico M MAZZOLANI. Experimental tests of a real building seismically retrofitted by special buckling-restrained braces[J]. AIP Conference Proceedings, 2008, 1020(1):1513-1520.
- [6] TAKEUCHI T, HAJJAR J F, MATSUI R, et al. Local buckling restraint condition for core plates in buckling restrained braces[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2010 (66): 139-149.
- [7] 加藤基規, 葛西昭, 等. 二重鋼管型座屈拘束ブレースの繰り返し弾塑性挙動[C]//構造工学論文集, 50, 2004:103-112.
- [8] 石井匠, 藤澤一善, 清水孝憲, 等. 二重鋼管ブレースを用いた既存 RC 構造物の制振補強構法[J]. JFE 技報, 2005, 12:66-72.
- [9] YUJI KOETAKA, TOMOHIRO KINOSHITA, KAZUO INOUE, et al. Criteria of buckling-restrained braces to prevent out-of-plane buckling [C]// The 14th World Conference on Earthquake Engineering, October 12-17, 2008, Beijing, China.
- [10] 钱洪涛. 新型防屈曲耗能支撑性能研究及其在钢结构中的应用研究[D]. 广州: 广州大学, 2008.
- [11] 杨叶斌, 邓雪松, 钱洪涛, 等. 二重钢管防屈曲支撑的性能研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2010, 32(2):75-80. YANG YE-BIN, DENG XUE-SONG, QIAN HONG-TAO, et al. Study on the performance of double-steel tube buckling-restrained brace [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2010, 32 (2):75-80.
- [12] 贾建坡. 双管式屈曲约束支撑力学性能的试验研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2008.
- [13] 赵根田. 双套管防屈曲支撑的抗震性能的实验研究[J]. 内蒙古科技大学学报, 2009, 28(3):233-237. ZHAO GEN-TIAN. Research on the antiseismic behavior of the sleeved colum of buckling-restrained brace [J]. Journal of Inner Mongolia University of Science and Technology, 2009, 28 (3):233-237.
- [14] American Institute of Steel Construction (AISC). Seismic Provisions for Structural Steel Buildings [S]. Chicago: AISC, 2005.
- [15] 石亦平, 周玉蓉. ABAQUS 有限元分析实例详解[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006:51-58.

(编辑 胡 玲)

(上接第 11 页)

- [11] 高光发, 李永池, 罗文超, 等. 集团装药爆炸下新型结构的削波性能[J]. 土木工程与环境工程, 2011, 33(3):57-62. GAO GUANG-FA, LI YONG-CHI, LUO WEN-CHAO, et al. Clipping performance of advanced structure under explosion of mass ammunition [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2011, 33(3):57-62.
- [12] 高光发, 李永池, 赵凯, 等. 柱壳结构的屏蔽效应及对应力波的削弱作用[J]. 振动与冲击, 2011, 30(12):195-200. GAO GUANG-FA, LI YONG-CHI, ZHAO KAI, et al. Screening and attenuation effects on stress waves of cylindrical shell in defense layer [J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(12):195-200.
- [13] HOLMQUIST T J, JOHNSON G R, COOK H W. A computational constitutive model for concrete subjected to large strains, high strain rates, and high pressures [C]//Proceedings of 14th International Symposium on Ballistics, Que., Canada, 1993: 591-600.

(编辑 胡英奎)