

岩体特性对围岩与结构动力相互作用影响

孔大庆^{1,2}, 孙惠香^{3*}, 康婷³, 马涛²

(1.北京交通大学土木建筑工程学院,北京,100044;2.空军后勤部机场营房部,北京,100720;

3.空军工程大学航空航天工程学院,陕西西安,710038)

摘要 通过研究岩石特性,进一步对围岩与结构动力耦合机理进行分析。爆炸荷载原型实验研究困难较大,因此应用 ANSYS/LS-DYNA 非线性显式动力有限元程序和流固耦合计算方法,对垂直爆炸不同岩石类别、不同跨度地下拱形结构进行数值模拟,得到了岩石类别对于不同跨度结构影响的不同规律。研究表明:岩石硬度越大,拱顶动力相互作用显著增大,远距离爆炸对大跨硬岩结构拱肩和拱脚产生明显的反复拉压作用;岩石越软,跨度越小,近距离爆炸对整个结构动力相互作用影响越大。

关键词 爆炸荷载;地下拱形结构;动力相互作用;数值模拟 岩石特性

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2014.06.017

中图分类号 TU93 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2014)06-0077-05

The Influence of Rock Characteristics on Dynamic Interaction between Adjoining Rock and Structure Subjected to Blast Loading

KONG Da-qing^{1,2}, SUN Hui-xiang^{3*}, KANG Ting³, MA Tao²

(1.School of Civil Engineering of Beijing Jiaotong University, Beijing 10044, China;

2. Air Force Logistics Airport and Barracks Department, Beijing 100720, China; 3. Aeronautics and Astronautics Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: The study of the dynamic interaction between adjoining rock and structure is important to decide the load of underground structure scientifically and to analyze the dynamic stability of adjoining rock. The rock characteristics are important factors. And it is difficult to study through prototype test because the blast loading is a destructive load. The nonlinear dynamic finite element procedure of ANSYS/LS-DYNA is applied and the fluid-solid coupling algorithm is selected to study with different spans and the detonating distances constantly changing. The result shows that the mechanics status of big-span is completely changed compared with that of the structure of small-span. And different laws of rock types for structures with different spans are obtained. The study shows that dynamic interaction is remarkable between large span structure and surrounding rock of remote explosion.

Key words: blast load; underground arch structure; dynamic interaction; numerical simulation; rock characteristics

收稿日期: 2014-03-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51208506, 51308540)

作者简介: 孔大庆(1969-),男,北京人,高级工程师,主要从事洞库施工方向的研究。

* **通信作者:** 孙惠香(1975-),女,副教授,主要从事结构工程方向的研究. E-mail: sunhx7504@sina.com

引用格式: 孔大庆,孙惠香,康婷,等. 岩体特性对围岩与结构动力相互作用影响[J]. 空军工程大学学报:自然科学版,2014,15(6):77-81. KONG Da-qing, SUN Hui-xiang, KANG Ting, et al. The influence of rock characteristics on dynamic interaction between adjoining rock and structure subjected to blast loading[J]. Journal of air force engineering university: natural science edition, 2014, 15(6): 77-81.

爆炸荷载是防护工程设计中的重要荷载,爆炸冲击波作用下,岩体和结构的运动产生相互干扰与限制,属于多种介质的动力耦合问题,影响到精确计算围岩与结构的变形特征和作用在结构上的荷载特性,进而影响到精确考虑爆炸冲击波的动力效应和围岩的稳定性。

国内外很多学者都对冲击波与结构动力相互作用进行了大量的研究^[1-7],但是由于赋存环境的特殊性,围岩与结构动力相互作用机理并不明确。目前研究多为静力分析,动力相互作用则主要集中在冲击波与岩石单一介质之间,对岩石类别的影响研究甚少,又由于爆炸荷载的破坏性,实验实现的难度也很大。本文应用数值模拟方法研究非接触爆炸时不同岩体类别对围岩与结构动力相互作用的影响。

1 模型和参数

地下工程多为直墙拱结构,现对石英岩、砾岩、花岗岩和砂岩4种岩石中的地下拱形结构在垂直起

爆情况进行数值模拟。埋深50 m,结构跨度 l 分别为6 m、40 m,直墙高为2 m,拱高 f 分别为5 m、12 m。为便于对比,锚杆为直径22 mm的早强砂浆锚杆,支护结构为厚50 cm的C40混凝土,混凝土内铺间距250 mm×250 mm直径16 mm钢筋网,具体参数见表1。集中装药203.75 kg,参数见表2,采用中心起爆。应用ANSYS/LS-DYNA有限元非线性动力分析程序,采用流固耦合算法,进行了1 m和4 m爆距的数值模拟。

岩石、混凝土和炸药采用SOLID164单元,钢筋采用梁单元BEAM161。炸药单元选用*MATHIGH_EXPLOSIVE_BURN模型,岩石和钢筋选用塑性动力学MAT_PLASTIC_KINEMATIC模型,按弹塑性材料考虑。混凝土采用MAT_JOHNSON_HOLMQUIST_CONCRETE材料模型^[8]。由于岩体是无限大的,边界在无限远处,为了和实际相符,将无反射边界条件实现于计算模型中,计算模型及单元划分见图1。

表1 材料参数

Tab.1 Material parameter

材料	$\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^3)$	$E / \text{pa}(10^{10})$	ν	$f_c / \text{pa}(10^8)$	ϵ_u	$f_t / \text{pa}(10^6)$
石英岩	3 000	8.75	0.24	2.50	0.03	3.00
砾岩	2 950	7.80	0.25	2.10	0.03	2.80
花岗岩	2 600	5.50	0.27	1.17	0.03	2.45
砂岩	2 360	2.62	0.32	0.85	0.03	1.2
混凝土	2 400	4.00	0.21	0.48	0.001 5	4.00
钢筋	7 850	20.00	0.27	3.00	6.75	300

表2 炸药材料参数

Tab.2 Material parameter of dynamite

$\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$D / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	A / GPa	B / GPa	R_1	R_2	ω	E_0 / GPa	$P_{C,J} / \text{GPa}$
1 630	6 717	371	7.43	4.15	0.95	0.3	7.0	18.5

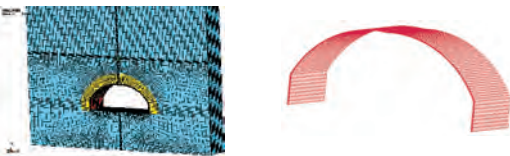


图1 模拟模型及钢筋单元

Fig.1 The simulation model and steel elements

2 数值模拟验证

无限岩土介质自由场球形或柱状装药爆炸时,爆轰波以相同的波速向外传播,周围岩石受到强烈挤压完全挤压粉碎,形成爆炸空腔,在距爆心 $10R_0 \sim 15R_0$ 范围内形成冲击波,随着能量的消耗,波速、压力、能量随着距离的增加而很快衰减,冲击波空腔外围岩石受到环向拉伸应力作用,将产生裂隙区,此冲击波范围外逐渐衰减为没有陡峭波阵面应力波。

400 R_0 范围以外进一步衰减为弹性地震波。

图2为距爆心 $12R_0$ 和 $20R_0$ 处A、B 2单元的波形, A质点为具有陡峭波阵面的冲击波,而B点则为没有陡峭波阵面的应力波,数值模拟与理论分析相符。

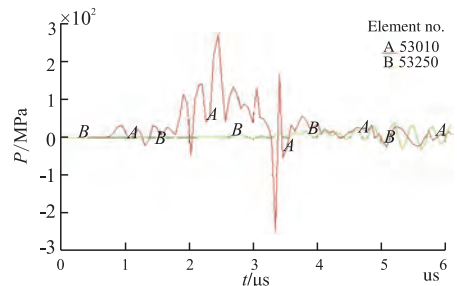


图2 单元波形

Fig.2 Element waveform

3 围岩与结构相互作用分析

3.1 相互作用机理

炸药爆炸时,爆炸冲击波传到支护结构,围岩和结构产生内撞击,引起波在 2 种材料间的透射和反射,在遇到结构自由边界时,在结构和空气之间又产生反射和透射,这是一个冲击波在围岩、支护结构和空气多层介质之间来回传播的过程,见图 3。

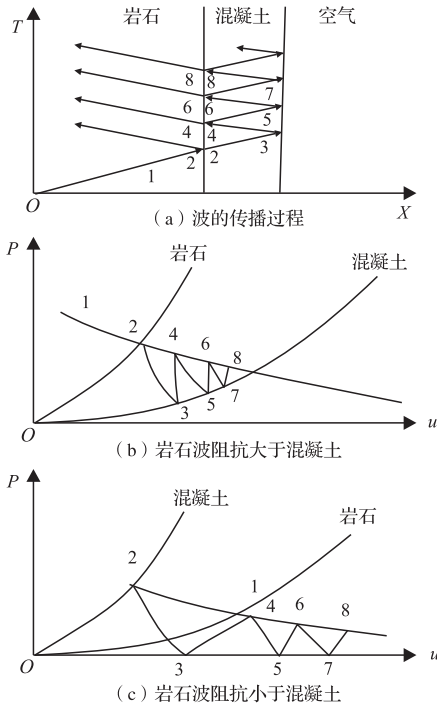


图 3 冲击波在岩石和结构中的传播

Fig3 The shock wave communication in rock and

根据文献[9]的分析,当压缩波从一种材料向另一种材料传播时,透射波和反射波的性质主要取决于材料的波阻抗 $\rho_0 c_e$ 的大小。岩石的波阻抗大于混凝土的波阻抗时,发生卸载反射,对应于状态点 2,混凝土中的透射冲击波传到结构边界时,空气波阻抗显著小于混凝土的波阻抗,反射波再一次卸载,对应于状态点 3。混凝土中的反射冲击波再传到岩石中时,将发生增强透射与加载反射,对应于状态点 4,混凝土中将持续传播右行强度减弱冲击波和左行稀疏波。岩石中则传播着在混凝土界面发生的卸载反射波和混凝土中透射的增强冲击波。传播过程见图 3(b)。当岩石的波阻抗小于混凝土的波阻抗时,见图 3(c),混凝土中传播着岩石传来的增强透射冲击波(如状态 2),以及自由表面的卸载反射波。空气的波阻抗远小于混凝土的波阻抗,看作自由端反射,波速加倍,波在混凝土表面混凝土反射一次,波速就增加一倍,混凝土不断被震塌。

材料的波阻抗见表 3,4 m 爆距时 6 m 跨砂岩

的波阻抗小于混凝土的波阻抗,冲击波从岩石向混凝土中传播时,反射波和透射波都是压缩波,混凝土的第一个应力峰值和岩石的第二个压应力峰值都高于岩石的第一个应力峰值,见图 4。应力小于混凝土的抗压强度。在自由表面,空气波阻抗远小于混凝土,反射拉伸波使自由面混凝土受拉。超过混凝土抗拉强度,产生震塌现象。

表 3 岩石波阻抗

Tab. 3 Wave impedance of rock

岩石类别	纵波波速/(m·s ⁻¹)	波阻抗/(10 ⁷ kg·(m ² ·s ⁻¹))
石英岩	5 500	1.65
砂岩	3 100	0.73
混凝土	3 500	0.84

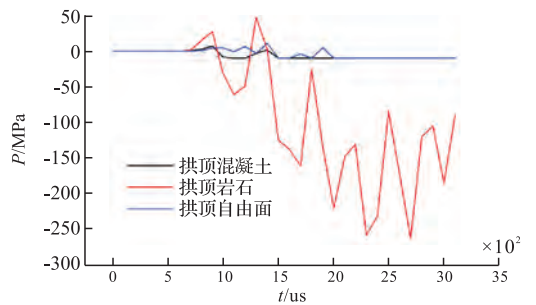


图 4 砂岩 6 m 压力时程曲线(4 m 爆矩)

Fig.4 The sandstone pressure-time curve of 6 m (4m distance)

图 5 为 4 m 爆距石英岩的压力时程曲线,石英岩的波阻抗大于混凝土的波阻抗,应力波从岩石传向混凝土时,反射波是拉伸波,强度减弱,对围岩卸载,超过岩石的压应力,岩石受拉,透射波减弱,混凝土的应力小于岩石。岩石自由面反射拉伸波应力加倍,造成岩石拉应力显著增大,形成拉应力峰值。

由以上分析可见,模拟结果与理论分析结果基本一致,说明数值模拟方法正确。

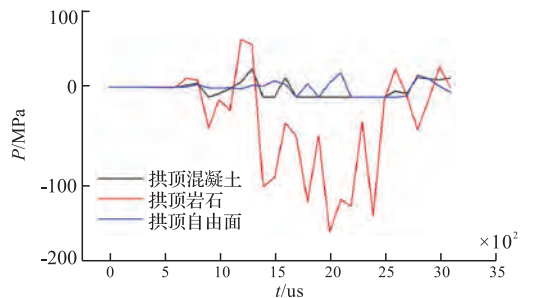


图 5 石英岩 6 m 压力时程曲线(4 m 爆矩)

Fig.5 The quartzite pressure-time curve of 6 m (4 m distance)

3.2 岩石类别对相互作用影响分析

1 m 爆距时冲击波很快传到拱顶,拱顶岩石基本处于破碎裂隙区,挤压岩石破碎,结构承担较大的围岩压力,在经历一次反射达到最大冲击压力后,拱

顶结构受压破坏。压应力随着岩石的密度的增大而增大,砂岩最小,石英岩最大,见图6。4 m爆距时,由于传播距离增大,冲击波的强度迅速衰减,拱顶第一个压力峰值随岩石的硬度减小出现滞后现象,砂岩的峰值应力出现最晚,见图7。此时拱顶围岩处于裂隙区。

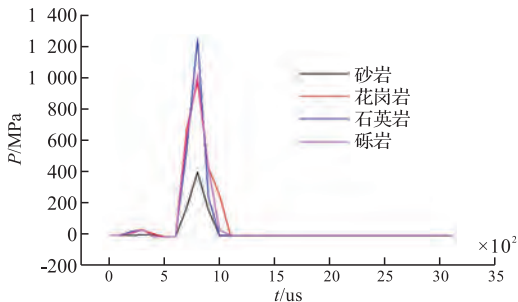


图6 6 m跨拱顶压力时程曲线(1 m爆距)

Fig.6 The vault pressure-time curve of 6 m (1 m distance)

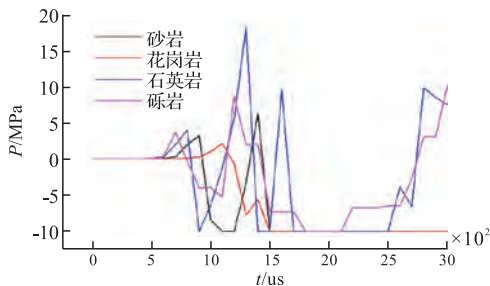


图7 6 m跨拱顶压力时程曲线(4 m爆距)

Fig.7 The vault pressure-time curve of 6 m (4 m distance)

当爆距增大到4 m时,围岩压力的第一个峰值与硬度成正比,硬度越大,相互作用力越大。第二个峰值大小与岩石的波阻抗有很大关系,由前面分析可知,石英岩的第二个峰值压力最大,砾岩次之,砂岩由于波阻抗要小于混凝土的波阻抗,第二个峰值压力要小于第一个峰值压力。

当跨度增大到40 m,爆距为1 m时,相互作用变化趋势和图7相同,岩石密度越大,刚度越大,相互作用力越大。当爆距增大到4 m时,由于自由临空面增大,最大相互作用力明显增大,石英岩由18.2 MPa增大到160.2 MPa,增加了8.8倍。砾岩增加了14.1倍,花岗岩增加了14.5倍,见图8,说明大跨结构动力相互作用比小跨结构明显增大。

图9~10为6 m跨结构拱与直墙连接处简称拱肩和直墙根简称拱脚部位的围岩压力。在爆距为1 m时,拱肩和拱脚处砂岩的围岩压力最大,拱发生了整体破坏,软岩与结构的动力相互作用非常显著,振动周期显著增大。当爆距增大到4 m时,在拱肩和拱脚部位依然是软岩的动力相互作用力显著,振动周期增大,砂岩围岩压力最大,花岗岩次之。

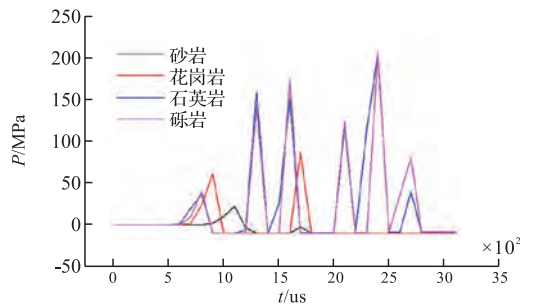


图8 40 m跨拱顶压力时程曲线(4 m爆距)

Fig.8 The vault pressure-time curve of 40m (4 m distance)

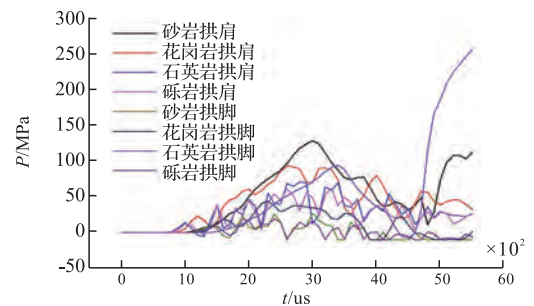


图9 6 m跨压力时程曲线(1 m爆距)

Fig.9 The pressure-time curve of 6 m (1 m distance)

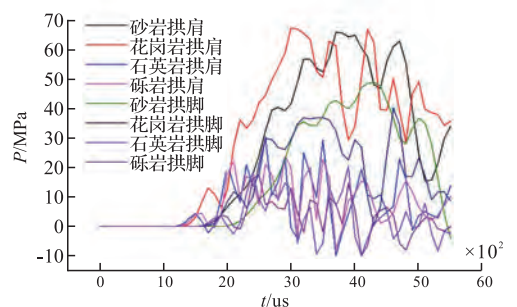


图10 6 m跨压力时程曲线(4 m爆距)

Fig.10 The pressure-time curve of 6 m (4 m distance)

图11~12为40 m跨结构拱肩和拱脚部位的围岩压力。当爆距为1 m时,拱肩和拱脚处围岩压力较小,动力相互作用与岩石硬度成反比,砂岩的围岩压力最大,石英岩的最小。

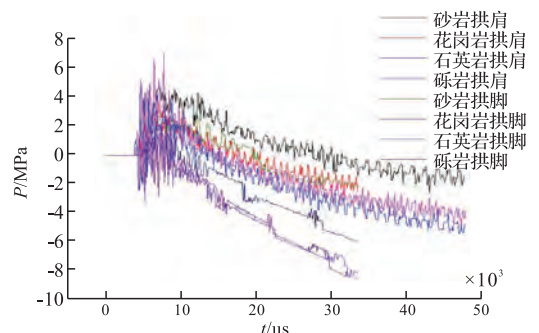


图11 40 m跨压力时程曲线(1 m爆距)

Fig.11 The pressure-time curve of 40m (1 m distance)

当爆距增大到4 m时,拱肩和拱脚处的围岩压力显著增大,4种岩石压力增幅均在10倍以上,硬岩均经受反复拉压作用,后续峰值压力也在不断增

大,峰值压力随硬度增大成反比,而砂岩的反复拉压作用虽不明显,但是第一个峰值压力较大。对拱脚而言,第一个峰值压力随岩石的硬度成反比例增长,砂岩峰值压力最大,但是硬岩石英岩的后续峰值压力最大。说明远距离爆炸对硬岩类大跨结构动力相互作用明显增强。

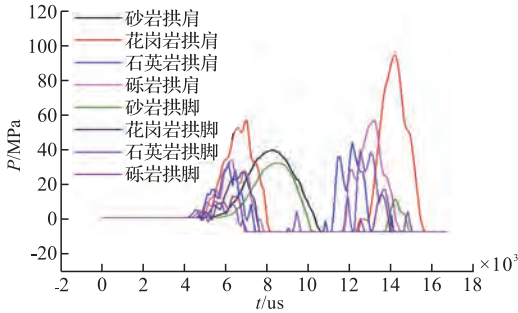


图12 40 m跨压力时程曲线(4 m爆矩)

Fig.12 The vault pressure-time curve of 40 m (4 m distance)

4 结论

经过 ANSYS/LS-DYNA 非线性数值模拟,根据以上分析,得到主要结论如下:

1)应用波动理论分析了冲击波在围岩、结构与空气中的传播过程,数值模拟和理论分析结论一致,说明数值模拟模型建立、材料参数和算法合理。

2)1 m 近距离爆炸时,拱顶相互作用与岩石硬度成正比,岩石越硬,围岩压力越大。40 m 跨结构与 6 m 跨结构相比,围岩压力显著增大,增幅与岩石硬度成反比。4 m 远距离爆炸时,拱顶围岩压力同岩石与结构的波阻抗关系密切,岩石波阻抗大于结构波阻抗时,由于波的反射,后续峰值压力会显著增强。

3)1 m 近距离爆炸时,对于小跨结构,软岩砂岩的拱肩和拱脚围岩压力均远远大于其他硬岩的围岩压力,说明近距离爆炸对软岩的地下结构产生显著的不利效应。而大跨结构则在 4 m 远距离爆炸时在拱肩与拱脚部位围岩与结构动力相互作用力均明显。说明远距离爆炸对大跨结构及围岩整体稳定性更为不利。

参考文献(References):

[1] Wormley D N, Tinianow M A, Rotelli R L, et al. Geological formation-drill string dynamic interaction finite-element program (GEODYN). phase 1. theoretical description[R]. Microfiche products, 1984.

[2] Giltner S G. Response of rock to intense dynamic stresses[C]//4th international symposium. Vienna: Rock fragmentation by blasting, 1993: 545-352.

[3] 方秦.爆炸荷载作用下钢筋混凝土结构的动态响应与破坏模式的数值分析[J].工程力学, 2007(12): 135-144.

FANG Qin. Numerical investigation for dynamic response and failure modes of RC structure to blast loading[J]. Engineering mechanics, 2007(12): 135-144. (in Chinese)

[4] 曹志远,张耀勤.计入结构-介质动力相互作用的地下结构抗爆计算[J].爆炸与冲击, 1985, 5(1): 16-23.

CAO Zhiyuan, ZHANG Yaoqin. The semi-analytical element method for dynamic interaction problems in buried structures[J]. China civil engineering journal, 1986, 19(3): 11-26. (in Chinese)

[5] 曹志远,曾三平.爆炸波作用下地下防护结构与围岩的非线性动力相互作用分析[J].爆炸与冲击, 2003, 23(5): 385-390.

CAO Zhiyuan, ZENG Sanping. Nonlinear dynamic interaction between underground structure and surrounding medium under blast loading[J]. Explosion and shock waves, 2003, 23(5): 385-390. (in Chinese)

[6] 房营光,孙钧.在冲击波下非线性岩土与圆柱结构的相互作用[J].地震工程与工程振动, 1992, 12(3): 55-64

FANG Yingguang, SUN Jun. Interaction between nonlinear soil and cylindrical structure due to shock wave[J]. Earthquake engineering and engineering vibration, 1992, 12(3): 55-64. (in Chinese)

[7] 房营光,孙钧.冲击环境下非线性岩土与相邻多个结构的相互作用[J].地震工程与工程振动, 1993, 13(2): 38-46.

FANG Yingguang, SUN Jun. Interaction between nonlinear geo-medium and multiple structures due to shock wave [J]. Earthquake engineering and engineering vibration, 1993, 13(2): 38-46. (in Chinese)

[8] LS-DINA. Keyword user's manual[S]. 2003.

[9] 孙惠香,许金余.爆炸作用下围岩与地下结构的动力相互作用[J].爆炸与冲击, 2013, 33(5): 519-524.

SUN Huixiang, XU Jinyu. Dynamic interaction study between adjoining rock and underground structure subjected to blast loading[J]. China civil engineering journal, 2013, 33(5): 519-524. (in Chinese)

[10] 康婷,白应生.水平弹性支撑圆拱的动力特性研究[J].力学与实践, 2013, 35(2): 50-55.

KANG Ting, BAI Yingsheng. Studying on the dynamic characteristics of the horizontal elastic support circular arch[J]. Mechanics in engineering, 2013, 35(2): 50-55. (in Chinese)