文章编号:1673-0062(2016)01-0088-05

节理倾角对岩体冲击力学特性影响试验研究

孙 冰¹,高 照¹,曾 晟²,谭 均¹,邓显石¹

(1.南华大学城市建设学院,湖南衡阳 421001;2.南华大学核资源工程学院,湖南衡阳 421001)

摘 要:地下岩体工程经常承受动态荷载,进行岩体的动态力学特性研究迫不及待.本文以 落锤冲击试验机进行动态加载,通过相似材料预制试验岩石模型,开展了不同节理倾角与 无节理岩体模型试件共四组冲击加载试验,对比分析岩石试验样品冲击过程中的力时程 曲线与压缩位移时程曲线,得出在落锤冲击荷载作用下节理的存在降低了岩体所能承受 的冲击力峰值,增加了其动态压缩位移,岩体节理倾角越小其动态压缩位移越大. 关键词:岩石力学;节理倾角;冲击荷载;力学特性 中图分类号: TU45 文献标识码:B

Research on the Influence of Joint Inclination Angle on the Mechanical Properties of Rock Mass

SUN Bing¹, GAO Zhao¹, ZENG Sheng², TAN Jun¹, DENG Xian-shi¹

(1.School of Urban Construction, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China;2.School of Nuclear Resources Engineering, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China)

Abstract: Underground rock mass engineering is often subjected to dynamic loads, and the dynamic mechanical properties of rock mass are studied. The paper is under dynamic loading by drop hammer impact test machine and prefabricates test rock model with similar material. The impact loading test of four groups of different joint inclination and non jointed rock mass model is carried out. The stress time history curve and the curve of the compression displacement in the impact process of rock samples are analyzed comparatively. It is drawn that under drop impact loading joint has reduced the peak impact force of rock and increased the dynamic compressive displacement. The smaller the rock mass joint inclination angle, the larger the dynamic compressive displacement is.

key words: rock dynamics; joint inclination angle; impact load; mechanical properties

收稿日期:2015-10-10

基金项目:国家级大学生创新创业训练计划基金资助项目(20140555004);国家自然科学基金资助项目(51204098); 湖南省科技厅重点研发计划基金资助项目(2015SK2058-4)

作者简介:孙 冰(1979-),女,河南平顶山人,南华大学城市建设学院副教授,博士.主要研究方向:岩石力学与工程 检测.

近年来,随着国民经济的持续发展,地下岩体工 程的规模也越来越大,而这些工程大都涉及到爆破 技术.爆炸应力波是炸药在介质内爆炸时所产生,并 伴随着质点运动,由此形成的动力作用严重地影响 了岩体结构的稳定性.所以对岩体的动力学研究非常 必要.并且,自然形成的岩体中存在着大量缺陷,如层 理、裂隙、节理等,这些缺陷对岩体的力学性质及破 坏机理有着重要的影响^[14],使得无法用均质材料来 描述岩体的组成性质及力学特性.同时,在工程爆破 中发现岩体中存在的节理等缺陷严重影响了冲击荷 载和爆炸应力波的传播和衰减规律^[58],因此,复杂 节理岩体冲击载荷下的力学性能研究成了当今地下 岩体工程中亟待解决的问题之一.

对于冲击荷载和爆炸应力波在节理岩体中的传播规律的研究,国内外主要从理论推导和室内试验两个方面展开.Wu^[9]和 Hao^[10]通过现场试验分析了 岩体中节理的存在对爆炸应力波传播的影响.李夕兵等^[11]提出岩体冲击动力学新概念,并采用基于 SHPB 装置自行研制的岩石动静组合加载试验系统,研究了一维动静组合加载下岩石的破坏特征.

栗东平等^[12]利用数值模拟软件 UDEC 对单条 不同倾角节理的岩体试件进行抗压强度试验,发现 围压一定时,岩体抗压强度整体呈线性变化,可拟合 为一次函数,宋林等^[13]利用 FLAC3D 软件,运用数 学、力学理论推导和数值模拟,系统的研究了节理和 非线性因素对应力波传播的影响.廖志毅等[14] 通过 模拟实验分析了刀具动态荷载作用下破岩过程,探 讨了岩体中节理间距以及节理倾角对刀具下岩体破 坏的影响.张秀丽^[15]、梁正召等^[16]对断续节理岩体 的强度和破坏特性进行了数值模拟,并将模拟与实 验相比较,清晰地获得节理岩体的应力场分布,裂缝 起裂及扩展情况.专家学者的研究主要集中在对单条 节理岩体和非线性法向变形节理岩体中应力波的传 播规律方面,对应力波在含有多条不同倾角节理的 岩体中传播与衰减规律以及岩体破坏机理等相关方 面的理论研究还有待逐步展开.本试验通过对节理岩 体模型进行冲击加载,着重研究节理岩体在冲击荷 载作用下破坏的力学性能,并对比分析完整岩体试 件与含不同倾角节理岩体试件的力学行为,对地下 岩土工程中岩体爆破破坏以及岩体工程的安全稳定 方面提供一定的参考.

1 理论分析

冲击过程中忽略空气阻力,冲击前落锤做自

由落体运动,根据动能定理,初始冲击能量 *E* 如 式(1),冲击过程中能量转换如式(2).

$$E = mgh = \frac{1}{2}mv_0^2 \tag{1}$$

$$E = P \cdot S + \frac{1}{2}mv_1^2 + E_1$$
 (2)

式(1)中 m 为落锤质量,g 为加速度,h 为下落高度,v₀为初始冲击速度.式(2)中 v₁为残余速度,P 为冲击荷载,S 为压缩位移,E₁为耗散能量.依据式(1)和式(2)分析不同倾角节理对岩体动态压缩位移影响和各节理倾角岩体能量耗散情况.

假设落锤完全没有回弹的情况,根据动量定 理的冲击过程中冲量如式(3),冲击过程中动量 与落锤冲量关系如式(4).

$$mv_0 = m\sqrt{2gh} \tag{3}$$

$$mv_0 = Pt + mv_1 \tag{4}$$

式(4)中,t为冲击时间.根据式(3)和式(4)通过 分析比较冲击过程中冲击力峰值大小及其随时间 得变化情况,研究节理对岩体冲击过程中岩体抗 冲击强度的影响.

2 模型试验

2.1 试验样品制作

由于真实岩体的缺陷具有复杂性,无法利用 天然岩体准确把握,因此,基于相似原理,试验选 用标号为 32.5 的普通硅酸盐水泥,含水率为 3% 的河砂以及自来水,采取质量比为水泥:砂:水= 1:3.9:1 配置成强度为 M15、边长为 150 mm 的立 方体水泥砂浆试件来模拟岩体.待水泥砂浆试件 浇筑振捣后,立即将 3 条厚为 0.3 mm 尺寸为 150 mm×100 mm 的不锈钢片沿与加载面成一定 的角度以 20 mm 的间距平行的插入试件中.节理 布置情况如图 1.试件初凝后,将不锈钢片取出,形 成节理.第二天脱模,运至标准养护室内养护 28 d 之后进行试验.



2.2 试验方法

试验采用 XJL-98 落锤式冲击实验机.本试验 采用 5 kg 钢制重锤,球形锤头,为保证足够冲击 力,下落高度取 2 m.试件测点布置如图 2.试验运 用动态数据采集系统电荷放大器和动态信号分析 仪连接加速度传感器与力传感器,来分析试件的 动态力学性能.动态采集系统如图 3.其中,动态信 号分析仪可同时采集 8 通道实时信号,使用 96 kHz采样频率.制作节理倾角分别为 0°、30°、 45°各三个试件,并制作三个无节理的完整试件作 为对照.



图 2 加载面测点布置 Fig.2 Arrangement of measuring points in loading surface



图 3 试验数据动态采集系统 Fig.3 Dynamic test data acquisition system

2.3 实验结果及分析

1)试件冲击过程中力时程曲线

通过力传感器采集得冲击力的时程曲线与无 节理完整试件进行比较.采用力传感器测得的各 试件的力时程曲线如图 4.

从图4中可以得到在相同的冲击能量作用下 无节理的完整岩体试件的冲击力时程曲线高而 窄,冲击力迅速增大到峰值后,又迅速衰减为0, 且均大于含不同倾角的岩体试件.而含不同倾角

节理的岩体试件冲击力达到峰值后的衰减相对较 平缓.可知不含节理的完整岩体试件脆性及抗冲 击能力均大于含不同节理倾角的岩体试件,这是 因为岩体试件的预制节理有一定的厚度,在落锤 冲击过程中节理有个闭合时间阶段,使得节理上 边的部分岩体试件在受到冲击后能有个自由位 移,从而延缓了冲击过程中的作用时间.而且节理 的存在还会使岩样在冲击过程中,节理两侧部分 会产生相对滑动的趋势,产生摩擦阻力,当节理两 侧部分岩石受外荷载大于摩擦阻力时,岩石内部 产生相对位移,随即破坏.同时分析图4可知当节 理倾角为0°和30°时试件的冲击力时程曲线比较 接近,但当节理倾角为45°时试件的冲击力峰值 相对较小,衰减较缓.这是在冲击过程中,节理两 边的试件部分有相对滑动趋势而产生摩擦阻力, 可以看出在此落锤冲击作用下节理倾角为 30°时 节理面的摩擦阻力大于节理倾角为45°和节理倾 角为0°时节理面的摩摩擦阻力.因为在节理面倾 斜角度达到一定数值时,节理面两边岩体试件会 产生相对滑动从而使之破坏,并较大的延缓冲击 荷载衰减时间.



2)试件冲击过程中的加速度时程曲线

通过加速度传感器采取动态采集系统测得的 完整岩体试件及不同倾角的节理岩体试件加速度 时程曲线如图 5.

分析图 5 可知,从无节理完整岩体试件的加速度时程曲线可得出此试件在冲击过程中存在一段稳定的自由振动阶段,加速度的变化周期约为 0.125 ms,频率为 8 000 Hz.根据振动幅值的衰减 过程按式(5) 计算系统振动阻尼比,能得到完整 岩体试件的阻尼比.



Fig.5 Acceleration-time curve

$$\xi = \frac{1}{2\pi j} \ln \frac{a_i}{a_{i+j}} \tag{5}$$

含不同节理倾角的岩体试件加速度时程曲线

均经过一次幅值变换后迅速衰减,没有明显的振动周期,这是由于试验是采用均匀拌制的水泥砂浆来模拟岩体试件,当没有节理等完整岩体试件 在试验过程中可以等效成一个刚度较大均质的质量块在冲击荷载下的自由振动.而含节理的岩体 试件,由于节理的存在破坏了试件整体的均匀性, 当冲击应力波传播至节理面时,经历了复杂的透 反射过程,导致加速度激振信号杂乱.

3)试件动态压缩位移时程曲线

将图 5 的加速度时程曲线通过两次积分而得 的岩体试件动态压缩位移时程曲线如图 6.



从图 6 中可得出无节理完整岩体试件的动态 压缩位移最小,节理倾角为 0°的岩体试件动态压 缩位移最大,这是因为试验预制节理有一定厚度, 分析图 1 的节理面受力模型.得出在同样的冲击 能量下含节理的岩体试件在节理闭合过程存在一 段无约束位移,当节理倾角为 0°时节理闭合位移 约为预制节理厚度 0.3 mm,而节理倾角为 30°、 45°时,试件在冲击荷载作用下,节理闭合的竖向 位移小于预制节理厚度 0.3 mm.由试验结果可知 当冲击荷载较小时,含张开节理岩体的动态压缩 位移主要来自节理闭合.随着冲击荷载逐渐增大, 岩体沿节理面破坏.

3 结 论

1)通过对各试件落锤冲击过程中的力时程 曲线分析可知在冲击作用下岩体中节理能降低冲 击过程中的冲击力峰值,从而降低了冲击荷载对 岩体试件的破坏强度值.岩体中含有的节理会延 缓冲击荷载的衰减时间,当节理倾角达到某一数 值时,能较大的减少冲击荷载的幅值的和延缓衰 减时间. 2) 对加速度时程曲线分析得出, 岩体中含有 的节理会影响其在冲击动载作用下冲击应力波的 传递, 而完整均质的岩体在冲击作用下, 应力波的 传递均匀, 岩体内部存在一段稳定的自由振动阶 段, 还能通过公式定量得出其阻尼比.

3) 岩体中一定厚度节理的存在,会增大其冲 击作用下的动态压缩位移,当冲击荷载较小时,岩 体试件压缩位移主要来源于节理闭合.根据节理 面的受力模型得出,当节理倾角越小其节理闭合 位移越大,动态压缩位移越大.

参考文献:

- [1] 刘红岩,邓正定,王新生,等.节理岩体动态破坏的 SHPB 相似材料试验研究[J].岩土力学,2014,35 (3):659-665.
- [2] 李超,刘红岩,阎锡东.动载下节理岩体破坏过程的数 值实验研究[J].岩石力学,2015,36(S2):655-664.
- [3] Cai J G, Zhao J. Effects of multiple parallel fractures on apparent attenuation of stress waves in rock masses
 [J]. International journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2000, 37(4):661-682.
- [4] Arzúa J, Alejano L R, Walton G.Strength and dilation of jointed granite specimens in servo controlled triaxial tests
 [J].International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2014,69(3):93-104.
- [5] 宋林,邵珠山,吴敏哲.应力波在节理岩体中的传播特 性探析[J].煤炭学报,2011,36(S2):241-246.
- [6] 宋全杰,李海波,李俊如,等.层理对爆破振动传播规 律的影响[J].岩石力学与工程学报,2012,31(10): 2103-2108.
- [7] Li J C, Ma G W. Experimental study of stress wave propa-

gation across a filled rock joint [J]. International journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2009, 46(1): 471-478.

- [8] Li J C, Ma G W.Analysis of blast wave interaction with a rock joint [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2010,43(6):777-787.
- [9] Wu Y K, Hao H, Zhou Y X, et al. Propagation characteristics of blastinduced shock waves in a jointed rock mass [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1998, 17(6):407-412.
- [10] Hong H, Wu Y K, Ma G W, et al. Characteristics of surface ground motions induced by blasts in jointed rock mass[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2001,21:85-98.
- [11] 李夕兵,宫凤强,高科,等.一维动静组合加载下岩石 冲击破坏实验研究[J].岩石力学与工程学报,2010, 29(2):251-260.
- [12] 栗东平,王超圣,薛东杰,等.单节理岩体抗压强度的 数值模拟[J].辽宁工程技术大学学报,2015,34(2): 150-154.
- [13] 宋林.节理岩体中应力波传播的动力特性研究[D]. 西安:西安建筑科学大学,2012.
- [14] 廖志毅,梁正召,杨岳峰,等.刀具动态作用下节理岩 体破坏过程的数值模拟[J].岩体工程学报,2013,35 (6):1147-1155.
- [15] 张秀丽.断续节理岩体破坏过程的数值分析方法研究[D]. 武汉:中国科学院武汉岩体力学研究所,2007.
- [16] 梁正召,肖东坤,李聪聪,等.断续节理岩体强度与破 坏特征的数值模拟研究[J].岩石工程学报,2014,36 (11):2086-2095.