

PFC3D Simulation Study of Rockfall Impact to Shed Tunnel Structure

Junjie Li¹, Junlong Li², Yusuo Wang³

¹China Harbour Engineering Company Ltd., Beijing

²CCCC Mechanical & Electrical Engineering Co. Ltd., Beijing

³School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan

Email: lij@chec.bj.cn

Received: May 6th, 2019; accepted: May 21st, 2019; published: May 28th, 2019

Abstract

Based on the discrete element theory, a particle model was made to simulate the process of rockfall impact to shed cave under with and without backfill soil and the impact effect of different parts of the shed structure was studied and analyzed. The results drew conclusions as below: The stress response of the same part was different and meanwhile, the dynamic response of different parts was neither different under the action of rockfall impact. The shear stress is taken as the control stress near the impact position of the falling rock, and the failure form is shear failure. At the end of the roof, the normal stress is used as the control stress, and the failure form is extrusion failure. The impact effect of backfill is less than that of non-backfill, which indicates that backfill has very good buffering effect on rockfall impact, and the layout of backfill has an effect on the stress distribution of roof under rockfall impact.

Keywords

Rockfall Impact, Shed Tunnel, Discrete Element Method, Numerical Simulation

落石冲击棚洞结构的PFC3D数值模拟研究

李俊杰¹, 李俊隆², 王玉锁³

¹中国港湾工程有限责任公司, 北京

²中交机电工程局有限公司, 北京

³西南交通大学土木工程学院, 四川 成都

Email: lij@chec.bj.cn

收稿日期: 2019年5月6日; 录用日期: 2019年5月21日; 发布日期: 2019年5月28日

摘要

以离散元理论为基础,采用颗粒流软件PFC建立落石冲击棚洞模型,在有回填土和无回填土两种工况下,模拟山体落石冲击框架棚洞,并对框架棚洞不同部位的冲击效应进行研究。研究表明:在落石冲击作用下,棚洞结构同一部位的动力响应不同,不同部位的动力响应也不相同,靠近落石冲击部位附近以剪应力为控制应力,破坏形式是剪切破坏,顶板端部则以正应力为控制应力,破坏形式是挤压破坏;有回填土情况下落石冲击效应小于无回填土,说明回填土对落石冲击具有非常好的缓冲作用;回填土的布置对顶板在落石冲击作用下的受力情况有影响。

关键词

落石冲击, 棚洞, 离散单元法, 数值模拟

Copyright © 2019 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

落石灾害在我国山区铁路建设、运行过程中经常发生,导致列车受损,轨道损毁,人员伤亡。业界人士针对落石对结构的冲击效应展开系统研究。在研究初期,落石冲击效应的研究多以试验模型为主,如隧道设计技术手册[1]、公路路基设计规范[2],西南交通大学(杨其新等)[3]、日本道路协会[4]和瑞士学者[5]都是基于试验提出了落石冲击力的计算方法,由于这些方法有局限性,计算结果差异较大;后来,很多学者引入了有限单元法来模拟落石冲击过程;近几年,越来越多的学者开始采用离散元(Discrete Element Method, DEM)模拟落石冲击过程。

近年来,很多学者对于棚洞结构的落石冲击效应方面的研究有了很大的进展。裴向军,刘洋,王东坡等[6]通过有限元数值模拟落石冲击砂土垫层,得出砂土垫层可以有效减小落石对棚洞顶板冲击效应的结论,并经过优化得到合理垫层厚度;杨建荣、白羽、杨晓东等[7]提出了一种由金属柔性网和弹簧撑杆组成的柔性棚洞并采用有限元方法进行数值模拟,计算动力响应;王静峰、赵鹏、袁松等[8]基于大尺度模型试验和有限元数值模拟相结合的方法,对EPS和砂土垫层组成的复合垫层钢棚洞抗落石冲击性能展开了研究,得出复合垫层可以有效提高钢棚洞对落石的抵抗能力的结论;吴佳楠[9]同样以钢棚洞模型冲击试验和有限元数值模拟相结合的方法,对钢棚洞在EPS-细砂复合垫层下对落石的冲击效应展开研究,得出峰值加速度、最大应变与下落高度成正比的结论;王永东,周天跃,柴伦磊等[10]基于能量分析方法对落石冲击棚洞结构进行研究,考虑垫层弹塑性、垫层与落石之间摩擦力、棚洞自身耗能三方面影响因素,得到了冲击深度以及冲击压力的计算公式,还得出垫层成坑变形耗能最大达到50%、垫层与落石摩擦力耗能次之,达到30%以及棚洞自身耗能占比20%的结论;闫帅星,何思明,李新坡等[11]基于冲击动力学、修正的混凝土塑性特性及永久变形分阶段弹性接触理论,构建了钢筋混凝土棚洞在落石冲击作用下动力响应的一般解析方法,并通过有限元进行验证。

本文采用ITASCA公司开发的软件PFC来建立落石、框架棚洞、回填土等模型,模拟落石垂直落在有回填土和无回填土两种情况下,对棚洞结构的冲击过程,通过在棚洞不同部位(如顶板、立柱、纵梁等)布置监测点来获取相应部位的应力-应变时程曲线,从而对框架棚洞的冲击效应展开研究并总结。

2. 落石冲击棚洞结构的力学模型和本构模型

本次建模包括物理模型和本构模型。物理模型包括山体、棚洞结构、回填土层、落石等分模型，棚洞结构组成部分主要有顶板、盖梁、支柱、基础等；本构模型主要讲述不同物理模型之间的相互作用，比如落石与回填土、回填土与棚洞结构之间的相互作用。本次建模主要采用接触本构模型，包括颗粒与颗粒之间的粘结和滑移模型以及颗粒与墙体之间的接触刚度模型[12]。

2.1. 物理模型

1) 棚洞结构模型

PFC3D 模型中颗粒间通过平行粘结方式粘结，平行粘结模式有五个参数，其中平行粘结法向刚度 pb_kn 和平行粘结切向刚度 pb_ks ，单位是 Pa/m ，代表颗粒间经过平行粘结后的法向和切向刚度，影响粘结模型的变形特性，而平行粘结法向强度 pb_ns 和平行粘结切向强度 pb_ss 单位是 Pa ，代表的是颗粒间法向和切向粘结强度，影响粘结模型的强度特性；平行粘结半径放大系数 pb_rad ，代表的是平行粘结半径放大系数，粘结半径等于最小颗粒半径乘以这个半径放大系数。

棚洞结构由顶板、盖梁、支柱、基础组成，全部用球体颗粒单元通过平行粘结来模拟。平行粘结主要有五个微观参数，分别是 pb_kn 、 pb_ks 、 pb_ns 、 pb_ss 和 pb_rad ，使得模拟材料的参数属性与钢筋混凝土接近。

2) 回填土、山体和落石模型

回填土以及落石都用球体颗粒来模拟，山体坡面采用墙体单元模拟。

2.2. 力学本构关系

本次离散元数值模拟采用接触刚度模型，回填土颗粒单元采用接触粘结本构模型，棚洞颗粒单元采用平行粘结结构模型。

3. 棚洞结构建模

采用离散元颗粒流数值模拟软件 PFC 建模，模拟工况是有回填土($t = 1\text{ m}$)和无回填土($t = 0$)两种情况，落石重量 2.0 t ，垂直下落冲击棚洞结构。落石冲击时，需要考虑落石重力、回填土的摩擦力、回填土对落石的粘滞阻尼力和落石与回填土以及棚洞结构的碰撞力，阻尼选用粘滞阻尼，粘滞阻尼系数取值 0.2 。

落石冲击棚洞结构的物理模型和数值建模

1) 模型概述

棚洞结构设计图如图 1 所示，颗粒流 PFC3D 建模如图 2 所示。

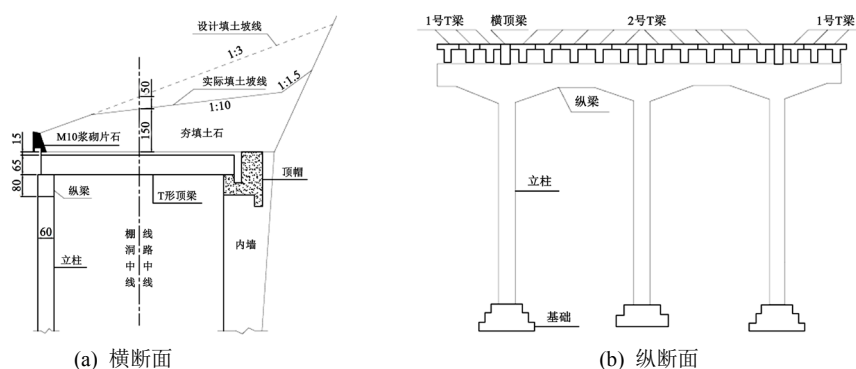


Figure 1. Design drawing of shed tunnel structure [13]

图 1. 棚洞结构设计图[13]

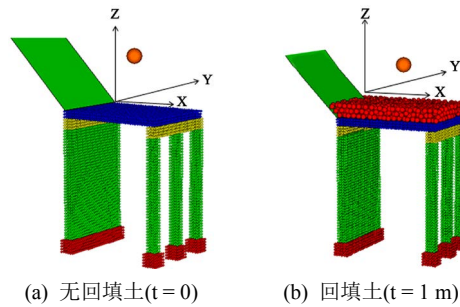


Figure 2. PFC3D model of rockfall and shed tunnel
图 2. 落石、棚洞 PFC3D 模型

2) 离散元模型单元微观参数

模型微观参数[14]设置如表 1 所示。

Table 1. Micro parameter of model
表 1. 模型微观参数

项目	单元类型	密度	摩擦系数	颗粒法向刚度	颗粒切向刚度
		Dens (kg/m ³)	fric	Kn (N/m)	Ks (N/m)
落石	ball	2600	0.5	1e8	1e8
回填土	ball	2000	0.5	1e8	1e8
棚洞	ball	2500	0.5	1e15	1e15

项目	单元类型	平行粘结法向刚度	平行粘结切向刚度	平行粘结法向强度	平行粘结切向强度	平行粘结半径系数
		pb_kn (Pa/m)	pb_ks (Pa/m)	pb_ns (Pa)	pb_ss (Pa)	pb_rad
棚洞	ball	1e15	1e15	1e15	1e15	1

3) 回填土参数标定

根据土力学[15]、工程地质手册[16]、弹性力学[17]、以及相关学术论文[18] [19]的方法进行回填土参数标定，标定结果如表 2 所示。

Table 2. PFC3D numerical simulation macroscopic parameter results of Triaxial test [8]
表 2. 三轴试验 PFC3D 数值模拟宏观参数结果[8]

弹性模量 E_0 (MPa)	压缩模量 E_s (MPa)	泊松比 ν	粘聚力 c (kPa)	内摩擦角 φ (°)
22.0	38.1	0.366	40	21

4) 工况组合

本次数值模拟工况组合表 3。

Table 3. Combination of working conditions [8]
表 3. 工况组合[8]

变量	H (m)	坡度(°)	重量(t)	回填土厚(m)
取值	5	90	2.0	0
	5	90	2.0	1

4. 棚洞结构的落石冲击效应研究

监测点布置情况见图 3(a)~(b)，单元三维空间应力符号说明见图 4，图中所示应力均是应力正方向，其中三个正应力 σ_{xx} 、 σ_{yy} 、 σ_{zz} 正值表示拉应力，负值表示压应力[11]。通过测量球(measure sphere)获取每个监测点的六个应力分量，分别是三个正应力分量 σ_{xx} 、 σ_{yy} 、 σ_{zz} 和三个切应力分量 τ_{xy} 、 τ_{yz} 、 τ_{zx} ，绘制不同监测部位的应力时程曲线，从而得出该部位的控制应力(最大应力值)。

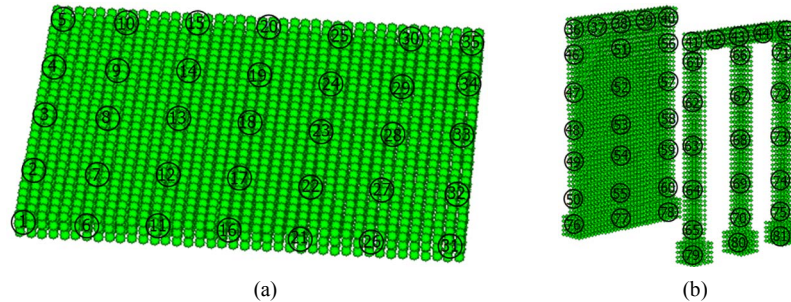


Figure 3. (a) Layout of monitoring points for roof; (b) Layout of monitoring points for Stringer, pillar and base
图 3. (a) 顶板监测点布置图; (b) 纵梁、支柱和基础监测点布置图

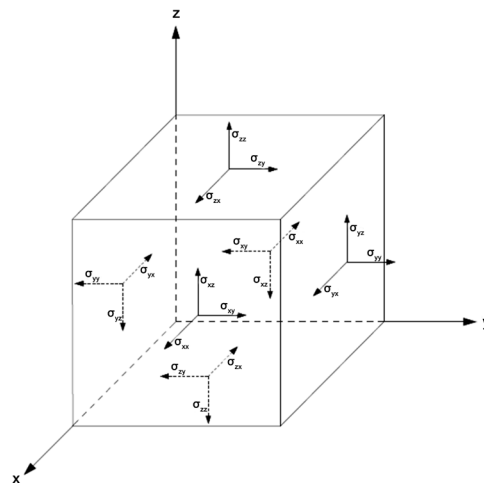


Figure 4. Symbol of three-dimensional space stress [11]
图 4. 单元三维空间应力符号[11]

用三种方法研究落石冲击效应，三种方法介绍如下：

1) 单个监测点位应力时程曲线

在离散元数值模拟软件 PFC 中用 fish 语言可以实现用测量小球(measure sphere)读取监测点部位(例如选取监测点 18 冲击部位顶板中心)的六个应力分量，在模拟计算的过程中自动记录应力分量，绘制应力时程曲线，进而可以对该监测点的最大应力进行分析。

2) 条带峰值应力曲线

在框架棚洞结构选取顶板中心横向条带(监测点 3, 8, 13, 18, 23, 28, 33)和纵梁纵向条带(36, 37, 38, 39, 40)，在 PFC 中通过 Fish 语言记录、读取并导出条带上各监测点的应力值，从中找出各监测点各应力分量的最大值(正值/负值)。

3) 应力峰值云图

在 PFC 软件中用 fish 语言记录、读取、导出所有监测点的应力数值，提取出各应力分量的最大值，

在 origin 软件中导入相应数据绘制框架棚洞的峰值应力云图，进而在应力云图上找到在落石冲击下最大应力发生的部位，即危险部位。

4.1. 监测点应力-时程曲线

选取框架棚洞顶板横向条带几个监测点(3, 8, 13, 18, 23, 18, 33)进行分析和研究。框架棚洞顶板结构横向条带各监测点应力 - 时程曲线如图 5 所示。



Figure 5. Stress-time history dynamic curve of each monitoring point in the horizontal plane of the roof of the frame shed tunnel
图 5. 框架棚洞顶板横向条带各监测点应力 - 时程动态变化曲线

从图 5 中可以得出以下结论:

1) 棚洞结构在落石冲击下，同一部位各个应力分量变化情况不一致，例如图 5(a) 中显示，监测点 3 在落石冲击作用下 Y 向正应力突变最大，其他应力分量变化较小，说明该部位落石冲击效应以 Y 向正应力 σ_{yy} 为控制应力，同时为负值，如发生破坏就是受压破坏；

2) 棚洞结构在落石冲击下，不同部位的冲击效应不一致，如图 5(a)、图 5(c)、图 5(k)、图 5(m) 中显示，顶板靠近端部位置(监测点 3、8、28、33)都是 Y 向正应力 σ_{yy} 突变最大，而图 5(e)、图 5(g)、图 5(i) 中显示，顶板靠近中间(监测点 13、18、23)落石冲击部位附近，则是 τ_{xy} 表现增大比较明显，说明顶板靠近冲击部位范围内，切应力 τ_{xy} 是控制应力，如果发生破坏则是剪切破坏，即顶板被落石砸穿或者砸破。

3) 回填土对落石冲击具有很大的缓冲作用。分别对比回填土厚土 $t = 0$ 和 $t = 1$ m 各监测点的应力曲线，如图 5(a) 和图 5(b)，有回填土时的最大应力明显小于无回填土，可以说明回填土对落石冲击效应有很大的缓冲作用。

4.2. 棚洞结构峰值应力分布

选取框架棚洞结构顶板结构横向条带几个监测点(3, 8, 13, 18, 23, 18, 33)进行分析和研究。框架棚洞顶板结构横向条带各监测点最大应力曲线见图 6 所示。

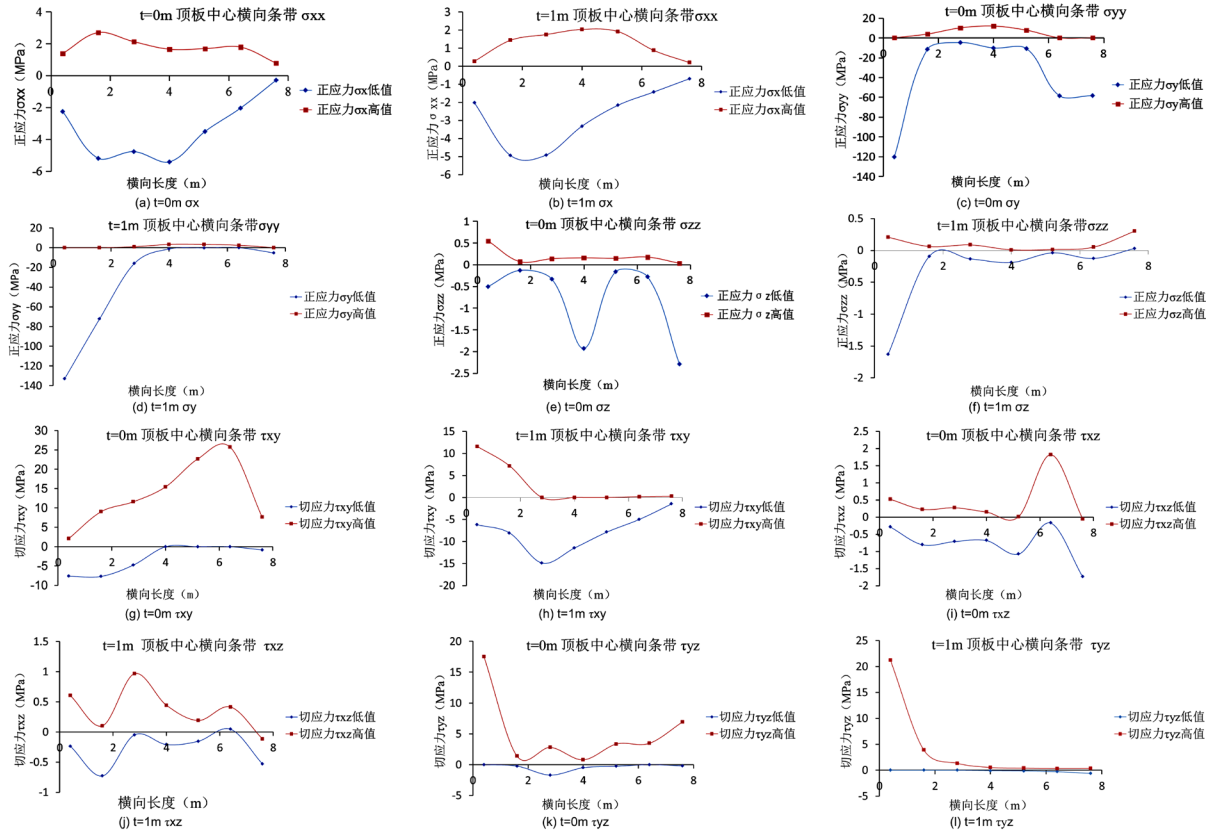


Figure 6. Maximum stress distribution curve of each monitoring point in the horizontal strip of the roof of the shed tunnel
图 6. 顶板横向条带各监测点最大应力分布曲线

从图 6 中可以得出以下结论:

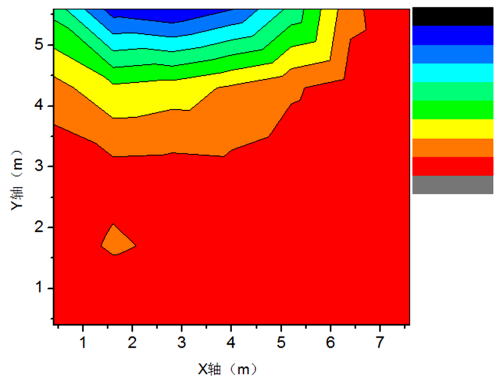
1) 在落石冲击下, 棚洞结构不同部位的动力响应不一致。如图 6(a)、图 6(c)、图 6(e)中显示, 正应力分量突变最大的是 Y 向正应力 σ_{yy} 突变最大, 最大值达到 $\sigma_{yy} = 120$ MPa, 发生在顶板端部位置; 而图 6(g)、图 6(i)、图 6(k)中显示; 切应力突变最大的则是 XY 方向切应力 τ_{xy} , 发生在顶板中间靠近落石冲击部位附近, 最大值达到 $\tau_{xy} = 25$ MPa, 破坏形式将是剪切破坏, 即顶板被落石砸穿或者砸破。该结论与 4.1 章的结论吻合。

2) 回填土对落石冲击具有很大的缓冲作用。分别对比回填土厚土 $t = 0$ 和 $t = 1$ m 各部位峰值应力分布情况, 如图 6(a)和图 6(b), 有回填土时最大应力明显小于无回填土, 说明回填土对落石冲击具有很好的缓冲作用。该结论与 4.1 章的结论吻合。

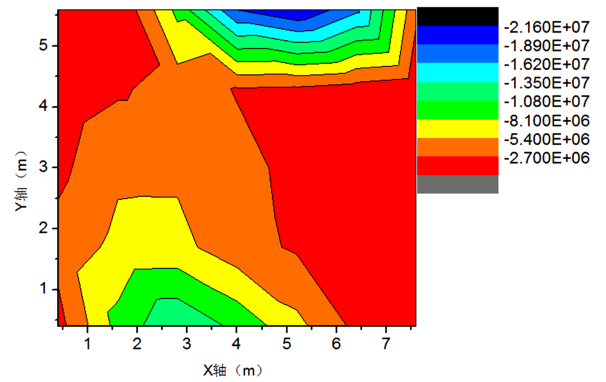
4.3. 棚洞结构峰值应力云图

选取框架棚洞顶板结构(监测点 1-35)进行分析, 顶板的应力峰值云图见图 7(a)~(x)。

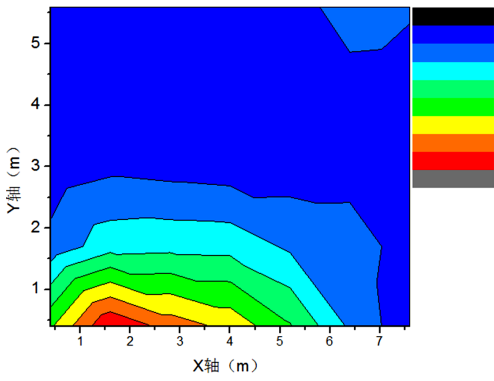
从 PFC3D 软件中导出监测点的应力, 再将数据导入 Origin 软件中进行处理, 绘制应力云图, 目前这种方法还在探索阶段。如何能更高效、准确地绘制离散元颗粒流的应力云图, 是今后应该努力探索一个方向。



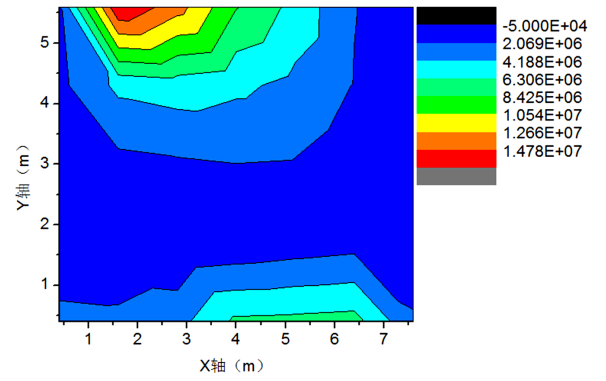
(a) $t = 0$ m 顶板 σ_x 低值



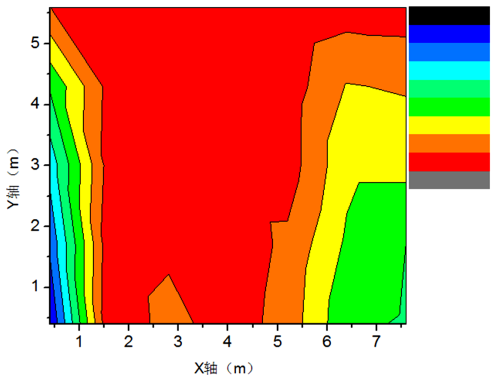
(b) $t = 1$ m 顶板 σ_x 低值



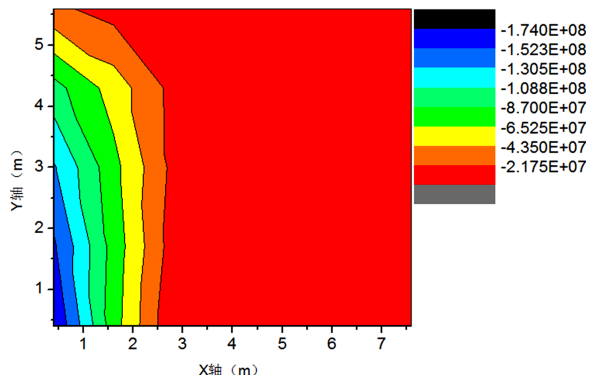
(c) $t = 0$ m 顶板 σ_x 高值



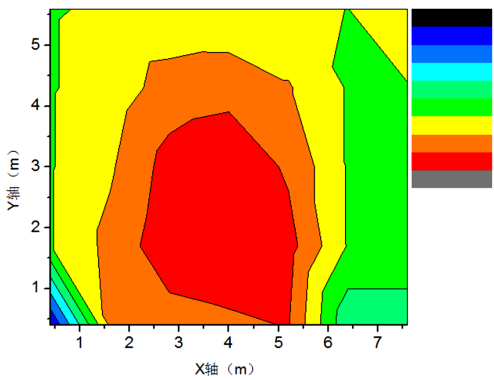
(d) $t = 1$ m 顶板 σ_x 高值



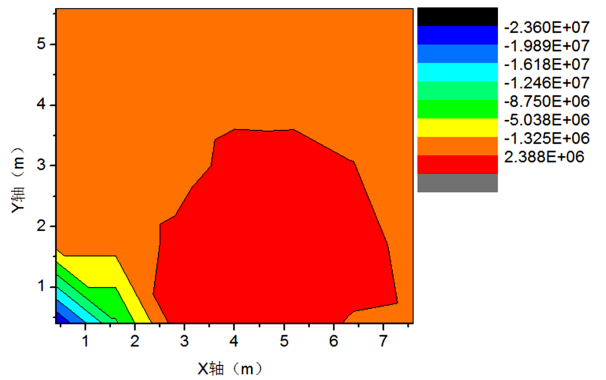
(e) $t = 0$ m 顶板 σ_y 低值



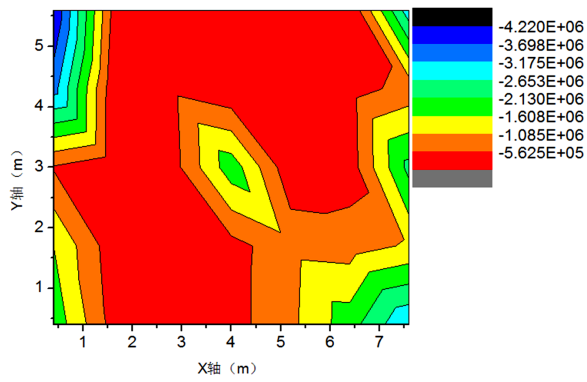
(f) $t = 1$ m 顶板 σ_y 低值



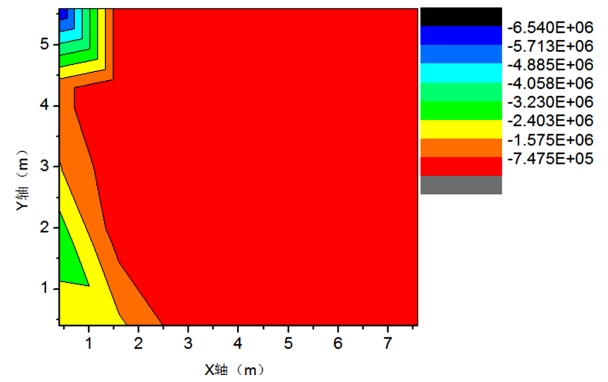
(g) $t = 0$ m 顶板 σ_y 高值



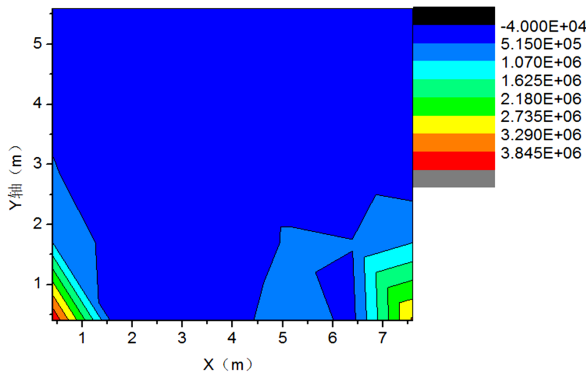
(h) $t = 1$ m 顶板 σ_y 高值



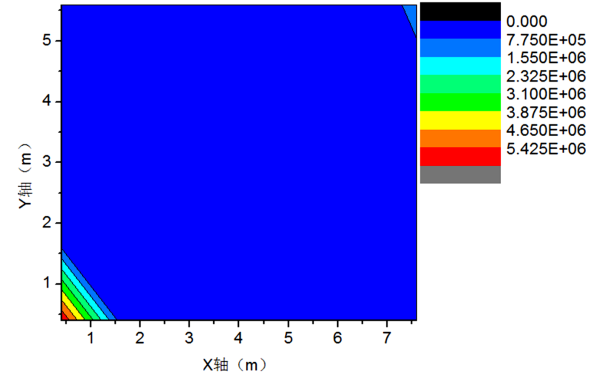
(i) $t = 0$ m 顶板 σ_z 低值



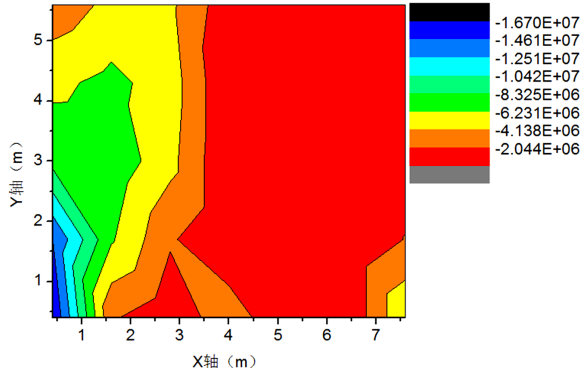
(j) $t = 1$ m 顶板 σ_z 低值



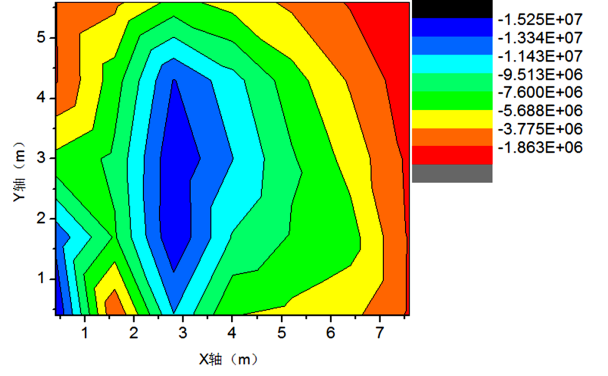
(k) $t = 0$ m 顶板 σ_z 高值



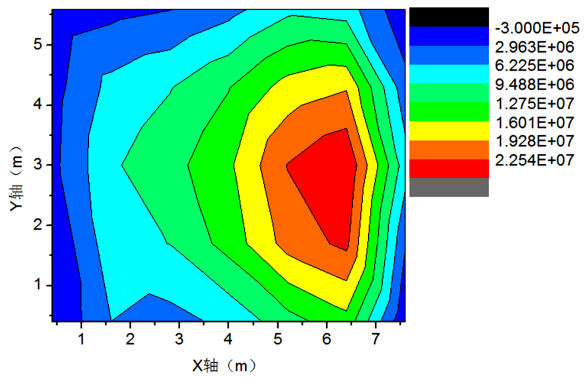
(l) $t = 1$ m 顶板 σ_z 高值



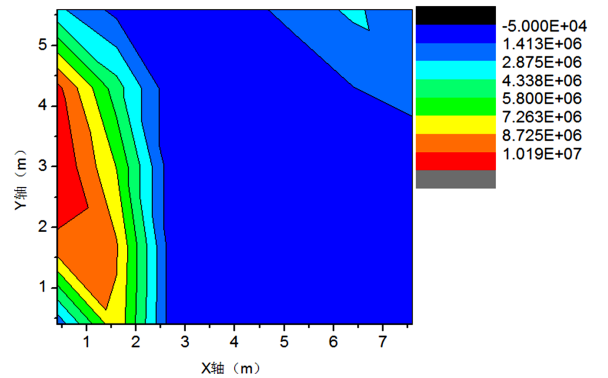
(m) $t = 0$ m 顶板 t_{xy} 低值



(n) $t = 1$ m 顶板 t_{xy} 低值



(o) $t = 0$ m 顶板 t_{xy} 高值



(p) $t = 1$ m 顶板 t_{xy} 高值

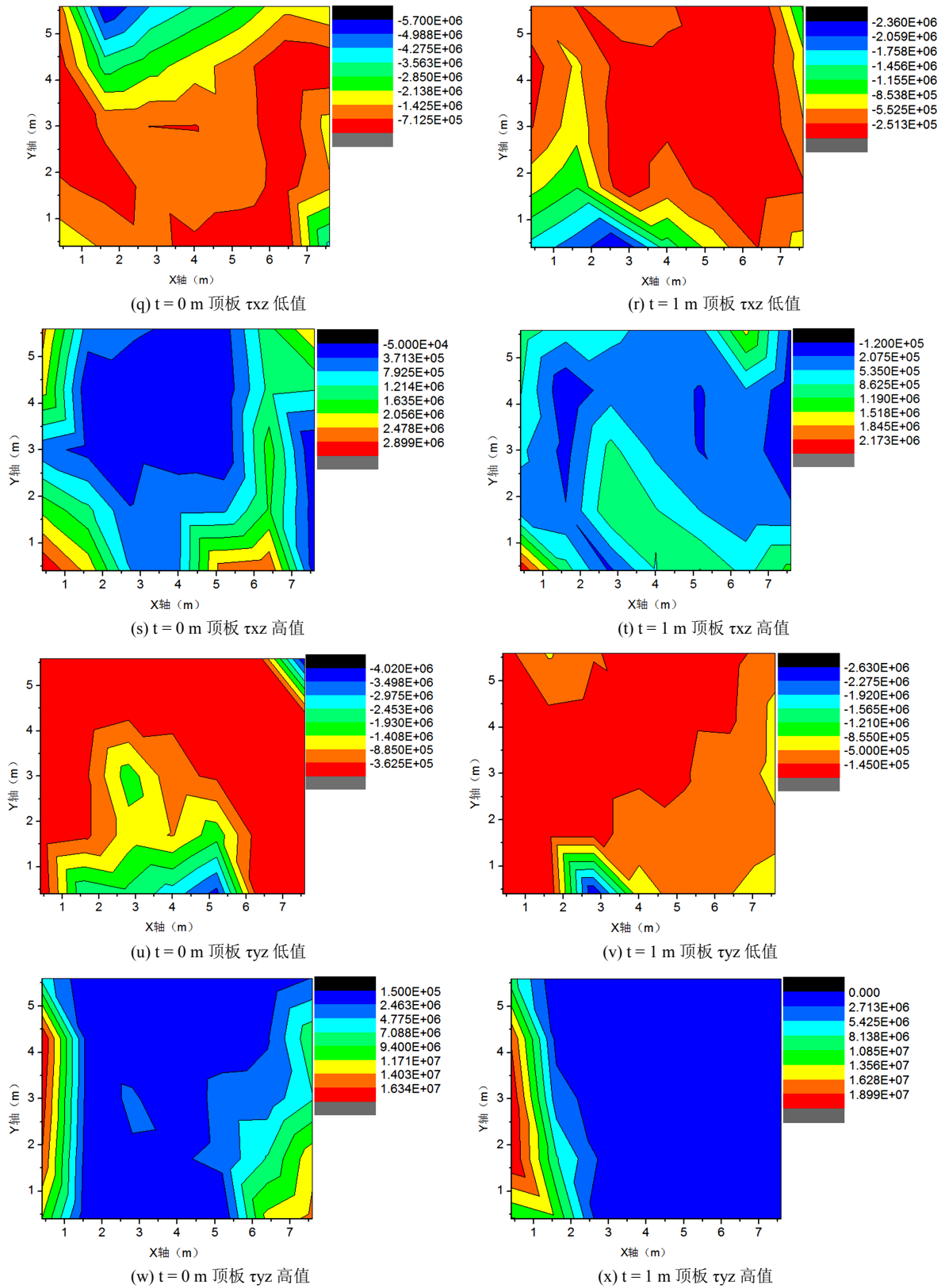


Figure 7. Peak stress cloud chart of roof of shed tunnel

图 7. 顶板峰值应力云图

5. 结论

本文使用 PFC3D 软件建立落石冲击棚洞模型, 模拟落石冲击过程, 用 Fish 语言记录冲击过程中不同部位的应力分量, 分别绘制了单个监测点位的应力时程曲线、条带应力峰值分布曲线、顶板结构峰值应力云图, 在落石冲击下, 研究棚洞结构的动态应力响应。可以得出以下结论:

- 1) 棚洞结构在落石冲击下, 同一部位的正应力和切应力变化趋势不一致; 不同部位的动态响应不同; 具体分析见本文 4.1、4.2。
- 2) 框架棚洞顶板在落石冲击作用下, 落石冲击部位控制应力是 XY 方向剪切应力 τ_{xy} , 破坏形式是剪切破坏; 顶板端部控制应力是 Y 向正应力 σ_{yy} , 破坏形式是受压破坏; 具体分析见本文 4.1、4.2。
- 3) 回填土对落石冲击棚洞结构具有非常明显的缓冲作用, 具体分析见本文 4.1、4.2; 填筑回填土会影响棚洞顶板在落石冲击作用下的应力分布规律, 见本文图 7。

参考文献

- [1] 铁道第二勘测设计院. 铁路工程设计技术手册-隧道[M]. 第 2 版, 北京: 中国铁道出版社, 1995.
- [2] 交通部第二公路勘察设计研究院. JTJ013-95 公路路基设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 1995.
- [3] 杨其新, 关宝树. 落石冲击力计算方法的试验研究[J]. 铁道学报, 1996, 18(1): 101-106.
- [4] Kawahara, S. and Muro, T. (2006) Effects of Dry Density and Thickness of Sandy Soil on Impact Response Due to Rockfall. *Journal of Terramechanics*, **43**, 329-340. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2005.05.009>
- [5] Labiouse, V., Descoedres, F. and Montani, S. (1996) Experimental Study of Rock Sheds Impacted by Rock Blocks. *Structural Engineering International*, **3**, 171-175. <https://doi.org/10.2749/101686696780495536>
- [6] 裴向军, 刘洋, 王东坡. 滚石冲击棚洞砂土垫层耗能缓冲机理研究[J]. 四川大学学报, 2016, 48(1): 15-22.
- [7] 杨建荣, 白羽, 杨晓东, 等. 柔性棚洞结构落石冲击数值模拟与试验研究[J]. 振动与冲击, 2017, 36(9): 172-178+246.
- [8] 王静峰, 赵鹏, 袁松, 等. 复合垫层钢棚洞抵抗落石冲击性能研究[J]. 土木工程学报, 2018(S2): 7-13.
- [9] 吴佳楠. 钢棚洞结构 EPS-细砂复合缓冲层性能[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2018.
- [10] 王永东, 周天跃, 柴伦磊. 基于能量分析的落石对棚洞垫层冲击力学研究[J]. 地下空间与工程学报, 2018, 14(z1): 148-153.
- [11] 闫帅星, 何思明, 李新坡. 滚石冲击作用下钢筋混凝土棚洞板动力学响应及冲切[J]. 兰州大学学报, 2019, 55(241): 64-72.
- [12] 刘汉龙, 杨贵. 土石坝振动台模型试验颗粒流数值模拟分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2009, 29(5): 479-484.
- [13] 郑智能, 张永兴, 董强, 等. 边坡落石灾害的颗粒流模拟方法[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2008, 19(3): 46-49.
- [14] 王玉锁, 李俊杰, 李正辉, 冯高飞, 吴浩, 何俊男. 落石冲击力评定的离散元颗粒流数值模拟[J]. 西南交通大学学报, 2016, 51(1): 22-29.
- [15] 李广信. 高等土力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 114-130.
- [16] 工程地质手册[M]. 第 4 版, 中国建筑工业出版社, 2006: 192.
- [17] 王光钦. 弹性力学[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2008: 131.
- [18] 王玉锁, 王明年, 童建军, 等. 砂类土体隧道围岩压缩模量的试验研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(6): 1607-1617.
- [19] 王玉锁. 砂质土隧道围岩力学参数及分级方法研究[D]: [博士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2008.

知网检索的两种方式：

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2326-3458，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：hjce@hanspub.org