

Influence Law of Level Contact Stiffness on Stress Distribution of Laminated Rock Beam

Li Cao^{1,2}, Haifeng Lu^{1,2}, Duoxi Yao^{1,2}, Zedong Xu^{1,2}, Le Zhou^{1,2}

¹School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui

²Mine Water Prevention Engineering Research Center, China National Coal Association, Huainan Anhui

Email: 1368725932@qq.com

Received: Jul. 15th, 2018; accepted: Aug. 2nd, 2018; published: Aug. 9th, 2018

Abstract

In order to investigate the influence of contact stiffness parameters on the stress distribution of laminated beams, a numerical model of double deck laminated beams under different contact stiffness parameters is established by FLAC3D, and the influence of shear stiffness K_s and normal stiffness K_n on the distribution of stress distribution on both ends of the laminated beam under uniform load conditions is analyzed. The results show that the stress distribution of the double deck fixed rock beam under uniform load is obviously related to the contact stiffness of the layer. When the shear stiffness K_s increases, the maximum tensile stress and the maximum compressive stress in the horizontal direction of the rock beam decrease, and the tensile stress in the horizontal direction increases gradually with the normal stiffness K_n , and the compressive stress gradually decreases. At the same time, when K_n and K_s increase to a certain value, the stress distribution of rock beam changes slightly with the change of contact stiffness, and tends to be stable. Through the research in this paper, it can provide some reference for selecting reasonable contact stiffness parameters in numerical calculation.

Keywords

Laminated Rock Beam, Shear Stiffness, Normal Stiffness, Stress Distribution

层面接触刚度对叠合岩梁应力分布的影响规律

曹力^{1,2}, 鲁海峰^{1,2}, 姚多喜^{1,2}, 徐泽栋^{1,2}, 周乐^{1,2}

¹安徽理工大学地球与环境学院, 安徽 淮南

²煤炭工业协会矿井水害防治工程研究中心, 安徽 淮南

Email: 1368725932@qq.com

收稿日期: 2018年7月15日; 录用日期: 2018年8月2日; 发布日期: 2018年8月9日

摘要

为探讨层面接触刚度参数对叠合梁应力分布的影响规律, 采用FLAC3D建立不同层间接触刚度参数下的双层叠合梁数值计算模型, 分析了在均布荷载条件下剪切刚度 K_s 和法向刚度 K_n 对两端固定叠合岩梁应力分布的影响。研究表明: 双层叠合固定岩梁在均布荷载作用下, 应力分布与层面接触刚度关系明显。当剪切刚度 K_s 增大, 岩梁水平方向最大拉应力和最大压应力相应减小; 增大法向刚度 K_n , 水平方向拉应力逐渐增加, 而压应力逐渐减小。同时当 K_n 和 K_s 增大到一定值时, 岩梁应力分布受接触刚度改变而变化微小, 趋于稳定。通过本文的研究, 可对数值计算时合理选取接触刚度参数提供了一定的借鉴。

关键词

叠合岩梁, 剪切刚度, 法向刚度, 应力分布

Copyright © 2018 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

层状岩体在自然界中分布十分广泛, 由于其存在着一组优势贯穿结构面, 与完整岩石相比, 其结构面上的抗剪强度较低, 易发生倾倒、弯折以及离层等变形破坏[1] [2] [3] [4] [5]。求解上述层状岩体力学问题时, 一般可将岩体简化为岩梁进行分析计算。目前, 大部分学者针对均质梁分析较多, 而对于非均质梁的研究主要集中在层间无滑动的组合梁方面。梁运培等[6]提出了采场上覆岩层移动的组合模型, 对组合岩梁模型在岩层移动规律研究及地表沉降控制方面进行了深入分析。黄菊华等[7]讨论了不同叠合方式的叠合梁的应力分析问题, 得出不同材料、不同叠合方式对应力的影响规律。徐铎等[8]对岩梁材料拉压弹性模量不尽相同的横向叠加组合岩梁分层截面应力大小分布情况作了分析。而分析层间有滑动的叠合梁方面, 运用数值计算的方法研究时一般需要到层间接触刚度参数, 即剪切刚度和法向刚度[9] [10]。而目前在鲜有文献讨论接触刚度参数对叠合梁应力分布的影响规律, 鉴于此, 本文以两端固定叠合岩梁为例, 运用FLAC3D数值计算软件, 建立叠合岩梁在均布外荷载作用下的不同接触刚度参数时的应力求解模型。研究成果可为争取选取接触刚度参数提供一定的借鉴与参考。

2. 层面的变形性质

在不同地质作用中, 岩体中形成了不同的结构面, 比如层理、岩层面、不整合面和软弱夹层。在荷载作用下, 岩体中的应力分布受结构面及其性质的影响[11]。在此主要研究岩层之间的接触面即层面的变形性质对应力分布的影响。

2.2. 法向变形性质

当结构面法向力 σ_n 为压应力时, 结构面产生法向压缩变形。开始先为点或线接触, 经挤压, 局部破碎或劈裂, 接触面增加。结构面压缩量呈指数曲线特征[12] [13], 其指数函数为:

$$u = u_0 \left(1 - e^{-\frac{\sigma_n}{K_n}} \right) \quad (1)$$

式(1)中 u 为结构面法向压缩量, cm; u_0 为法向压应力, Mpa; K_n 为结构面法向刚度, Mpa/cm。

法向刚度 K_n 是反映结构面法向变形性质的重要参数。其定义为在法向应力作用下, 结构面产生单位法向变形所需要的应力, 数值上等于法向变形曲线上的一点的切线斜率, 即:

$$K_n = \frac{\partial \sigma_n}{\partial \Delta V_j} \quad (2)$$

2.2. 剪切变形性质

在一定的法向压应力作用下, 结构面在剪应力作用下产生沿层面方向的滑移形成层间剪切带。结构面在剪力作用下产生塑型变形和脆性破坏。可用应力—变形曲线关系表征其变形规律, 用剪切刚度 K_s 表示其变形性质, 剪切刚度 K_s 是反映结构面剪切变形性质的重要参数[11]。剪切刚度 K_s 是剪切变形曲线斜率:

$$K_s = \frac{\partial \tau}{\partial u_s} \quad (3)$$

式(3)中 K_s 为结构面剪切刚度, MPa/cm。对于结构面的抗剪强度, 可以用库伦—莫尔准则来表达:

$$\tau_n = \sigma_n \tan \phi + C \quad (4)$$

式(4)中 τ_n 为平行结构面的剪应力, MPa; σ_n 为垂直结构面的正应力; ϕ 为结构面内摩擦角, ($^\circ$); C 为结构面的凝聚力, MPa。

3. 数值模型的建立

3.1. 模型概述

为寻找岩层层面接触刚度, 即层面的剪切刚度和法向刚度对叠合岩层应力分布和位移的影响, 采用弹性力学模型[14], 通过 FLAC3D 进行数值模拟。建立如图 1 所示模型, 双层叠合固定梁由两层岩性不同的岩层上下自然叠合而成, 叠合梁的两端为固定端, 梁的跨度为 1, 上下层的高度分别为 h_1 和 h_2 , 宽度 b 为 1; 两岩层的弹性模量为 E_1 和 E_2 , 泊松比为 ν_1 , ν_2 ; 梁表面受均布荷载 q 作用, 上下岩层之间存在接触层面, 接触面剪切刚度 $K_s/\text{Mpa}\cdot\text{cm}^{-1}$, 法向刚度 $K_n/\text{Mpa}\cdot\text{cm}^{-1}$ 。

3.2. 参数的选取

计算模型中上层岩梁的弹性模量 E_1 , 泊松比 ν_1 ; 下层岩梁的弹性模量 E_2 , 泊松比 ν_2 。叠合梁的跨度 1, 梁的上表面承受的均布荷载 q , 上层高度 h_1 , 下层高度 h_2 , 梁的宽度 b , 参数取值见表 1。在上、下层之间设置接触面, 接触面初始剪切刚度 $K_s = 5 \text{ Mpa/cm}$, 初始法向刚度 $K_n = 10 \text{ Mpa/cm}$ 。

当保持接触层面法向刚度 K_n 初始值不变时, 改变层面剪切刚度 K_s ($K_s = 5 + 5i, i = 0 \sim 9$), 当保持接触层面剪切刚度 K_s 初始值不变时, 改变层面法向刚度 K_n ($K_n = 10 + 10i, i = 0 \sim 9$)。

3.3. 监测点的布置

Flac3d 模拟中把模型分为 240 个单元体, 监测单元体应力和位移, 选取 A、B 两个单元体作为监测点, 监测其水平方向应力和垂直方向应力, 监测 A 和 B 单元体垂向位移。A 单元体坐标为(x, y, z), ($x = 15, 16; y = 0, 1; z = 2, 3$), B 单元体坐标为(x, y, z), ($x = 15, 16; y = 0, 1; z = 6, 7$), A、B 单元体在叠合岩梁模型中位置如图 2。

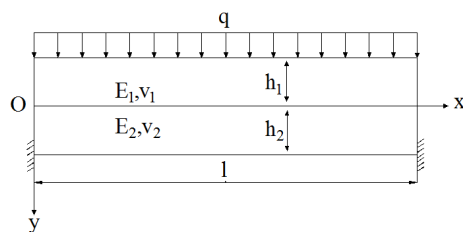


Figure 1. Analysis model of laminated rock beam
图 1. 叠合岩梁分析模型

Table 1. Parameter value table for analysis model of laminated rock beam
表 1. 叠合岩梁分析模型参数取值表

弹性模量/Gpa		泊松比		跨度/m	均布荷载/Mpa	高度/m		宽度/m
E_1	E_2	ν_1	ν_2	l	q	h_1	h_2	b
30	18	0.3	0.21	30	2	3	5	1



Figure 2. Location of monitoring points A and B
图 2. 监测点 A、B 位置

4. 模拟结果分析

4.1. 应力分析

通过 FLAC3D 对初始条件下双层叠合岩梁的应力模拟，在接触面剪切刚度 $K_s = 5 \text{ Mpa/cm}$ ，法向刚度 $K_n = 10 \text{ Mpa/cm}$ 时，岩梁水平方向和垂直方向应力分布如图 3(a)、图 3(b)所示。在上覆均匀荷载 q 作用下，简支岩梁上、下层水平方向应力最大值集中在梁的两端，上下层的上缘和下缘分别处于受压和受拉状态，垂直方向应力由上到下分布，均匀减小，上层应力通过接触面传递到下层，通过接触面时由于接触面变形性质作用，传递到下层的应力减小。

1) 改变剪切刚度

当改变接触面剪切刚度 K_s 时，叠合岩梁应力分布发生变化，随着剪切刚度 K_s 的增大，岩梁上、下层两端应力向跨中集中，岩梁水平方向最大拉应力和最大压应力都减小，岩梁上、下层最大应力与剪切刚度 K_s 呈负相关；当剪切刚度 K_s 小于 15 Mpa/cm 时，岩梁垂直方向的最大应力随着 K_s 的增大而减小，当 K_s 大于 15 Mpa/cm 时，岩梁垂直方向的最大应力不变，如图 4(a)、图 4(b)所示。

叠合岩梁上层 B 单元体应力大于下层 A 单元体，岩梁上层跨中应力较集中，随着层面剪切刚度 K_s 的变化，单元体 A 和 B 的水平方向和垂直方向应力发生变化，如图 5(a)、图 5(b)所示。随着 K_s 的增大，单元体 A 的水平和垂直方向应力减小，当 K_s 大于 15 Mpa/cm 时，单元体 A 水平应力方向发生变化并随着 K_s 的继续增大而增大，垂直方向应力减小趋势变缓，当 K_s 大于 30 Mpa/cm 时垂直应力不变；单元体 B 的水平方向应力随着 K_s 的增大而增大，增速逐渐变缓，垂直方向应力增加，当 K_s 大于 15 Mpa/cm 时不变。

2) 改变法向刚度

当叠合岩梁层面剪切刚度 K_s 不变，改变法向刚度 K_n 时，叠合岩梁上、下层水平和垂直应力分布发

生变化, 随着法向刚度 K_n 增大, 叠合岩梁水平方向最大拉应力逐渐增加并趋于稳定达到 14.15 Mpa, 最大压应力逐渐减小到 17.65 Mpa (图 6(a)), 其垂直方向最大拉应力和压应力均减小(图 6(b)), 当 K_n 大于 30 Mpa/cm 时, 减速变缓。

随着层面法向刚度 K_n 的增大, 单元体 A 和 B 的水平 and 垂直方向应力发生轻微变化, 如图 7(a)、图 7(b)

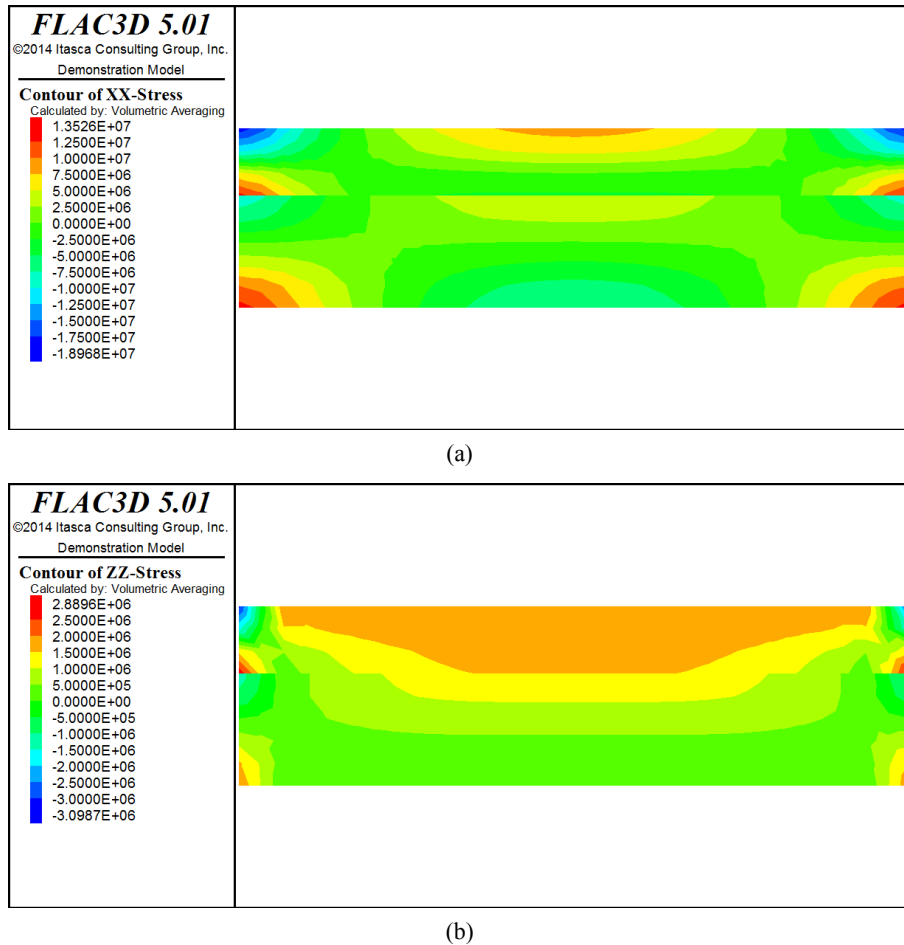


Figure 3. Stress distribution of laminated rock beams
图 3. 叠合岩梁应力分布

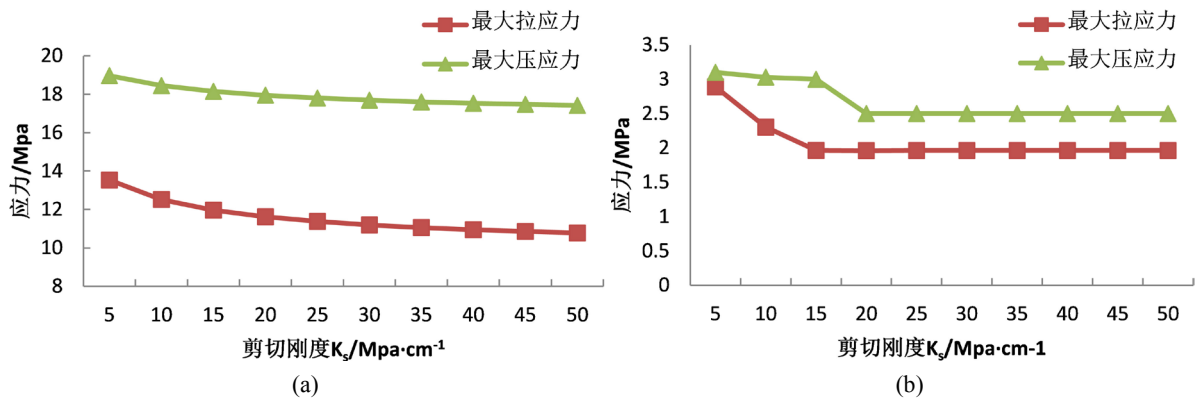


Figure 4. Maximum stress change of laminated rock beam
图 4. 叠合岩梁最大应力变化

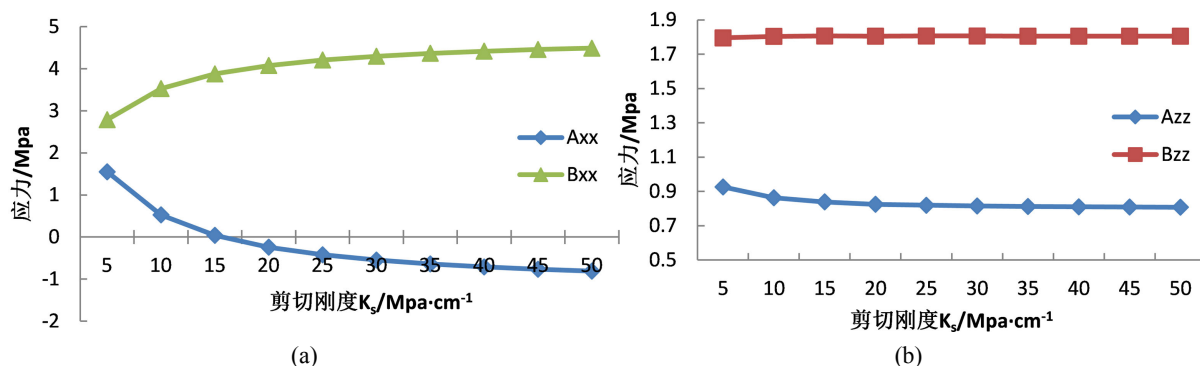


Figure 5. Stress change of cell body A and B

图 5. 单元体 A、B 应力变化

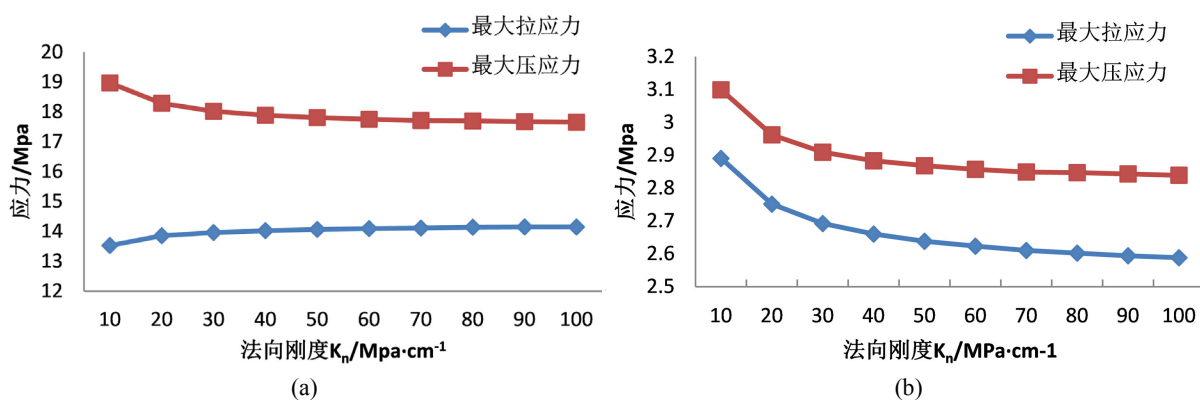


Figure 6. Maximum stress change of laminated rock beam

图 6. 叠合岩梁最大应力变化

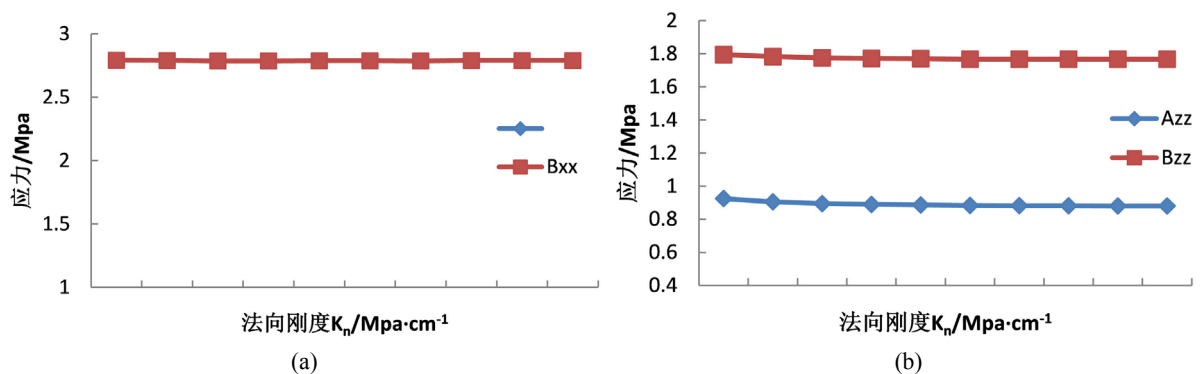


Figure 7. Stress change of cell body A and B

图 7. 单元体 A、B 应力变化

所示, 随着 K_n 的增大, 当 K_n 小于 30 Mpa/cm 时, 单元体 A 的水平应力增大, 垂直应力减小, 当 K_n 大于 30 Mpa/cm 时, 单元体 A 应力基本不变。随着 K_n 的增大, 单元体 B 的应力基本不变。

4.2. 位移分析

由于叠合岩梁两端为固定端, 所以岩梁两端没有垂直位移, 岩梁垂直位移由跨中向两端均匀减小。在接触面初始剪切刚度 $K_s = 5$ Mpa/cm, 初始法向刚度 $K_n = 10$ Mpa/cm 的条件下, 岩梁跨中最大垂直位移 14.743 mm, 如图 8。由于上下层接触面接触刚度的作用, 距跨中等距时上层位移大于下层位移。

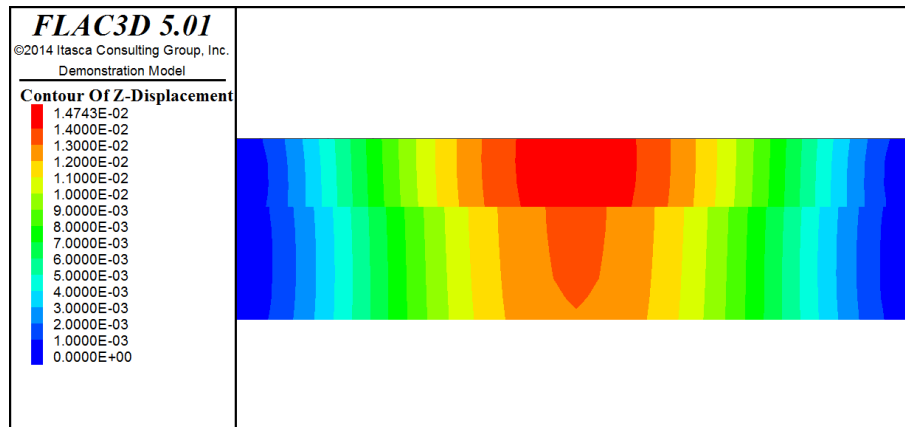


Figure 8. Vertical displacement of laminated rock beams
图 8. 叠合岩梁垂直方向位移

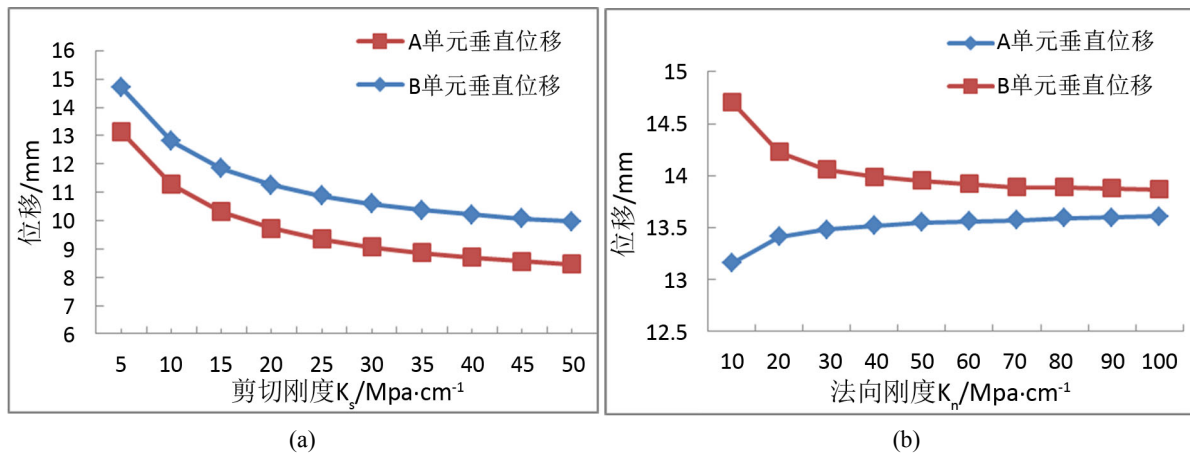


Figure 9. Vertical displacement of element A and B
图 9. 单元体 A、B 垂直位移

A 单元位于叠合岩梁下层，B 单元位于岩梁上层，随着层面接触刚度的变化，在上覆均匀荷载作用下，岩梁垂直方向位移有较大变化，其水平方向位移忽略不计。

当保持法向刚度 K_n 不变，改变剪切刚度 K_s ，岩梁垂直位移变化如图 9(a)所示。当剪切刚度 K_s 增大时，A 单元和 B 单元的垂直位移都减小，A 单元位移小于 B 单元。改变切向刚度 K_s 时，叠合岩梁上下层弯曲均减小。

当保持剪切刚度 K_s 不变，改变法向刚度 K_n ，岩梁垂直位移变化如图 9(b)所示。当剪切刚度 K_n 增大时，A 单元垂直位移增大，B 单元垂直位移减小，A 单元位移小于 B 单元。当 K_n 大于 30 Mpa/cm 时，A 和 B 垂直位移增速和减速变缓。改变法向刚度 K_n 时，叠合岩梁上层弯曲减小，下层弯曲增加。

5. 结论

a) 双层叠合简支岩梁在上覆均匀荷载作用下，内部应力分布受中间层面接触刚度的影响，上层应力大于下层应力，上层应力通过接触面时减弱。层面变形性质包括层面的剪切刚度 K_s 和法向刚度 K_n ，二者的变化对于双层叠合岩梁内部应力分布有着很大的影响。

b) 当增加接触面剪切刚度 K_s 时，岩梁水平方向最大拉应力和最大压应力都减小，岩梁上、下层最大应力与剪切刚度 K_s 呈负相关；当剪切刚度 K_s 小于 15 Mpa/cm 时，岩梁垂直方向的最大应力随着 K_s 的增

大而减小,反之则不变。随着剪切刚度 K_s 的增大,岩梁下层内部的水平和垂直方向应力减小,上层内部的应力增大。当 K_s 大于 15 Mpa/cm 时,岩梁内部应力变化趋势变缓直至趋于稳定值。

c) 当增加接触面法向刚度 K_n 时,叠合岩梁水平方向最大拉应力逐渐增加并趋于稳定达到 14.15 Mpa,最大压应力逐渐减小到 17.65 Mpa;其垂直方向最大拉应力和压应力均减小,当 K_n 大于 30 Mpa/cm 时,减速变缓。岩梁内部上、下层的水平和垂直方向应力发生轻微变化,当 K_n 小于 30 Mpa/cm 时,岩梁下层的水平应力增大,垂直应力减小,反之则基本不变。岩梁上层内部应力基本不变。

d) 岩梁垂直位移由跨中向两端均匀减小。由于上、下层接触面接触刚度的作用,距跨中等距时上层位移大于下层位移。当增加剪切刚度 K_s 时,岩梁上下层垂直位移都减小,下层位移小于上层。当增加法向刚度 K_n ,岩梁下层垂直位移增大,上层垂直位移减小,A 单元位移小于 B 单元。当 K_n 大于 30 Mpa/cm 时,下层和上层垂直位移增速和减速变缓并趋于稳定。

基金项目

国家自然科学基金面上项目(51471008)。

参考文献

- [1] 贾蓬,唐春安,王述红. 巷道层状岩层顶板破坏机理[J]. 煤炭学报, 2006, 31(1): 11-15.
- [2] 李德海. 近水平层状岩层移动规律的探究[J]. 采矿与安全工程学报, 1996(2): 39-42.
- [3] 卜庆为,高阳,常瑞. 水平应力作用下层状顶板回采巷道围岩失稳机理及支护分析[J]. 煤炭技术, 2017, 36(11): 12-14.
- [4] 王洪建,刘大安,黄志全,等. 层状页岩岩石力学特性及其脆性评价[J]. 工程地质学报, 2017, 25(6): 1414-1423.
- [5] 徐嘉谟,马凤山,曹家源,等. 岩体在工程状态下间断面的力学效应[J]. 工程地质学报, 2018, 26(1): 10-23.
- [6] 梁运培,孙东玲. 岩层移动的组合岩梁理论及其应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002(5): 654-657.
- [7] 黄菊华,钱应平,李厚民. 不同形式叠合梁的应力分析[J]. 湖北工业大学学报, 2008(3): 87-89.
- [8] 徐铎,赵建峰,田慧强,等. 横向叠加岩梁截面应力分析[J]. 煤炭工程, 2011(10): 113-116.
- [9] 孟召平,陆鹏庆,贺小黑. 沉积结构面及其对岩体力学性质的影响[J]. 煤田地质与勘探, 2009, 37(1): 33-37.
- [10] 孙宗顺. 不连续面应力-变形性质的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1987(4): 287-300.
- [11] 刘佑荣,唐辉明. 岩体力学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1999.
- [12] 孙广忠. 岩体结构力学[M]. 北京: 科学出版社, 1988.
- [13] 谭学术. 复合岩体力学理论及其应用[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1994.
- [14] 苗丹,刘一华. 双材料叠合简支梁受均布载荷作用时的解析解[J]. 应用力学学报, 2016, 33(4): 589-595, 735.

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: 2163-3967, 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: ag@hanspub.org