

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20230205001

基于势接触连续-非连续方法的双层叠梁开裂过程模拟*

王学滨¹, 李继翔², 杜轩², 郑一方²

(1. 辽宁工程技术大学计算力学研究所, 辽宁 阜新 123000; 2. 辽宁工程技术大学力学与工程学院, 辽宁 阜新 123000)

摘要: 弱黏结岩层容易发生滑动和离层, 进而引发灾害。为了检验自主开发的势接触连续-非连续方法中的无黏结叠梁模型并深入了解其破坏后的力学行为, 针对三点弯双层叠梁开展研究, 并考察了势接触力求解中法向刚度系数的影响。通过将两个岩层叠合在一起建立叠梁模型, 二者发生嵌入, 因而存在相互作用的势接触力。通过改变单梁叠放顺序, 分别形成了上砂岩下泥岩叠梁和上泥岩下砂岩叠梁。除了考察了载荷一位移曲线、最大主应力云图, 还考察了裂纹区段数目的演化规律, 以深化对叠梁复杂力学行为的理解。研究表明: (1) 双层叠梁的载荷一位移曲线能与有关的实验结果吻合。(2) 上泥岩下砂岩叠梁的各单梁裂缝出现时刻晚于上砂岩下泥岩叠梁的; 前者的第1次硬化和第1次软化阶段比后者的长; 前者的第2次硬化阶段不如后者的明显; 前者的第2次软化阶段不如后者的明显, 呈明显脆性。(3) 对于上硬下软叠梁, 随着法向刚度系数的减小, 第1和第2峰值载荷对应的位移均增大。(4) 对于上软下硬叠梁, 随着法向刚度系数的减小, 载荷一位移曲线由双峰或多峰向单峰转变。

关键词: 弱黏结; 三点弯; 叠梁; 开裂过程; 势接触; 连续非连续方法

中图分类号: TU457 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2024)05-1011-09

Simulation of Fracturing Process in Double-Laminated Beams Based on the Potential Contact Continuum-Discontinuum Method

WANG Xuebin¹, LI Jixiang², DU Xuan², ZHENG Yifang²

(1. Institute of Computational Mechanics, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China;

2. College of Mechanics and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

Abstract: Weakly bonded rock layers are prone to sliding and delamination, causing geological hazards. To test the self-developed unbonded laminated beam model based on the potential contact continuum-discontinuum method and obtain a deeper understanding of its mechanical behavior after failure, a study was conducted in three-point bending double-laminated beams, examining the influence of the normal stiffness coefficient in the potential contact force solution. By stacking two rock layers together, a laminated beam model was established, where embedding occurred between the two layers, resulting in interactive potential contact forces. By changing the stacking order of individual beams, laminated beams with sandstone on top and mudstone on the bottom and laminated beams with mudstone on top and sandstone on the bottom were formed. In addition to examining the load-displacement

* 收稿日期: 2023-02-05; 修回日期: 2023-03-21

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52074142)资助

作者简介: 王学滨(1975—), 男, 教授, 博导, 博士。主要从事工程材料变形、破坏及稳定性研究。E-mail: wxbbb@263.net

curves and maximum principal stress contour maps, the evolution of the number of crack segments was also studied to better understand the complex mechanical behavior of the laminated beams. The research results indicated that: (1) The load-displacement curves of the double-laminated beams matched the relevant experimental results. (2) The moment of crack appearance in each individual beam of the mudstone-on-top laminated beam occurred later than that in the sandstone-on-top laminated beam; the first hardening and softening stages of the former were longer than those of the latter; the second hardening stage of the former was less pronounced than the latter; the second softening stage of the former was less obvious, showing clear brittleness. (3) For the hard-on-top, soft-on-bottom laminated beam, as the normal stiffness coefficient decreased, the displacements corresponding to the first and the second peak loads increased. (4) For the soft-on-top, hard-on-bottom laminated beam, as the normal stiffness coefficient decreased, the load-displacement curve changed from double peaks or multiple peaks to a single peak.

Keywords: weak bonding; three-point bending; laminated beam; fracturing process; potential contact; continuum-discontinuum method

0 引言

自然界中的层状岩体分布广泛,矿物沉积、矿物入侵和矿物定向迁移等地质作用是形成其结构面的主要原因^[1]。土木、建筑、水利水电、采矿等工程均会遇到层状岩体。以土木工程为例,层状岩体的连续性和稳定性较差,容易引发塌方等灾害。因此,对层状岩体力学行为的研究具有重要的理论和实际意义。

对于层状岩体,岩层之间的结构面往往是关注的重点。按照岩层之间结构面的性质,可以将岩层分为弱黏结岩层(容易发生滑动和离层^[2])和强黏结岩层。实践表明,弱黏结顶板更容易引发灾害。例如,2011年4月20日,兰新铁路第二双线山丹军马场隧道发生坍塌事故,造成10人失踪,2人死亡,其主要原因是该隧道岩层节理发育,岩层间的黏聚力较小,渗水后结构面软化导致围岩强度降低。因此,弱黏结岩层的变形-开裂过程研究具有重要的理论和实际意义。

材料破坏研究是国际上包括湍流在内的两大学术难题之一。岩石类材料的破坏过程(例如,应变软化、局部化)研究是国际岩土力学、土木工程等领域的热点研究问题之一。目前,多关注于单个岩样的研究而非组合岩样。单梁的破坏过程相对比较简单,载荷-位移曲线仅呈现一个峰值,即发生一次破坏及随后的失稳。在实际中,单梁的应用场景

较少,更多的是组合梁。组合梁的力学行为将更加复杂,深入探索其破坏过程对于正确认识结构的破坏过程及制定灾害预防对策大有裨益。为了突出主要矛盾,一些研究人员常将层状岩体高度抽象成简单的双层叠梁或叠板进行研究。刘金辉^[3]采用抽条法开展了上硬下软叠梁和上软下硬叠梁离层和垮落规律实验研究。S.R. Wang等^[4]在类似三点弯条件下开展了上厚下薄叠板开裂过程实验研究。徐殿富^[5]采用PFC^{3D}开展了厚度和岩板之间的强度等对双层叠板开裂过程影响的数值模拟研究。代树红等^[6-7]开展了三点弯上砂岩下泥岩叠梁和上泥岩下砂岩叠梁开裂过程实验研究,并采用RFPA开展了初步的数值模拟研究,并未针对实验条件开展模拟,因而未能达到数值结果与实验结果相吻合的程度。在以往的实验研究中,对于载荷-位移曲线关注较多,限于观测手段,并不能获得全面的认识,例如,缺乏对裂纹的演化规律、应力场的时空分布的定量了解。

采用连续方法(例如,FLAC^{3D}等)或非连续方法(例如,PFC^{3D}等)开展叠梁或叠板力学行为研究,不能克服连续方法难以处理裂缝扩展和非连续方法对介质应力、应变描述粗糙等局限性。

在力学上,岩层之间结构面的处理方法主要包括三种。其一是采用软弱的实体单元模拟结构面,即采用连续方法近似处理非连续问题,这种方法的原理简单,但不具有广泛的适用性^[8]。其二是采用节理单元等单元模拟两连续体之间的结构面^[9]。其

三是采用非连续方法(例如,离散元方法和非连续变形分析方法)的固有功能处理结构面,无需引入其他方法。在非连续方法中,两相邻块体单元之间即为结构面。在离散元方法中,允许块体单元之间发生嵌入,通过嵌入深度和滑移量计算法向接触力和摩擦力^[10-13]。在非连续变形分析方法中,结构面两侧的块体可以发生滑动、开裂与分离,但不可以发生嵌入,且结构面不能承受拉应力^[14]。目前,兼具连续方法和非连续方法优势的连续-非连续方法正在快速发展^[15-20]。基于势接触连续-非连续方法的叠梁力学行为研究尚十分少见。

本文首先介绍了自主开发的基于势接触力计算方法的拉格朗日元与离散元耦合连续-非连续方法。然后,开展了三点弯双层无黏结叠梁的变形-开裂过程模拟,并与实验结果进行了比较,以检验该方法中的无黏结叠梁模型,同时深入了解了叠梁的力学行为。最后,探究了法向刚度系数对叠梁变形-开裂过程的影响。

1 势接触连续-非连续方法简介

本文采用的自主开发的拉格朗日元与离散元耦合连续-非连续方法^[15-17]由4个模块组成,分别为应力-应变模块、开裂模块、接触-摩擦模块和运动模块。

应力-应变模块用于计算单元的应力和应变。运动模块用于计算节点的速度和位移。采用中心差分方法在已知节点所受各种力(弹性力、外力、摩擦力等)的情况下求解运动方程。

开裂模块用于处理节点的分离,以模拟介质的开裂。当节点应力满足强度理论(最大主应力准则和莫尔-库仑准则)时,节点即发生分离,即介质开裂。在介质开裂前,单元之间没有界面,介质为连续介质,无需引入接触刚度,因而能确保应力、应变的求解精度。应当指出,介质开裂不是指介质的完全分离,是指在一些单元边界上出现微裂纹带(相当于应变局部化带),即虚拟裂纹。当裂纹的位移达到一定值时,虚拟裂纹才转化成真实裂纹,这对应于残余阶段。虚拟裂纹上存在由断裂能和应力水平决定的黏聚力,这对应于应变软化阶段。

接触-摩擦模块用于处理单元的接触和摩擦,其中,利用基于势的接触力计算方法^[18]计算法向接触力。该方法的优势是单元之间角-角接触无需特殊

处理,接触力的求解格式统一。在离散元方法中,不能很好地处理这一问题,一般采用将角点圆角化的方法近似处理。

在基于势的接触力计算方法中,假定在单元中存在一种势,能够抵御外来单元侵入。越靠近单元中心,外来单元嵌入的面积越大,则势越大,抵抗侵入的能力就越强。

假设两个单元发生了接触。两个单元分别被称为接触单元 S_c 和靶单元 S_t ,它们的公共区域就是实际发生嵌入的区域,即互嵌区域(图1中浅灰色区域)。下面,推导 S_c 受到的法向势接触力的计算公式。

P 点(微元面积为 dA)位于互嵌区域,既处于 S_c 之中,又处于 S_t 之中。当 P 是 S_c 中一点, S_c 嵌入 S_t , P 作为外来者,受到来自 S_t 的排斥力为

$$dF_c = -\nabla\varphi_t(P)dA \quad (1)$$

式中, φ_t 为 S_t 的势, $\bar{N}\varphi_t$ 为 φ_t 的梯度。

目前, S_t 的势的作用已考虑完毕。现在,考虑 S_c 的势的作用,当 P 是 S_t 中一点, S_t 嵌入 S_c , P 作为外来者,受到来自 S_c 的排斥力为

$$dF_t = -\nabla\varphi_c(P)dA \quad (2)$$

式中, φ_c 为 S_c 的势, $\bar{N}\varphi_c$ 为 φ_c 的梯度。

应当指出, dF_t 是 S_t 上 P 点受到的力,现在要求的是 S_c 上 P 点受到的力,即 S_c 受到的力。考虑到, S_t 上 P 点的力和 S_c 上 P 点的力是一对作用力和反作用力的关系(图1),即满足牛顿第三定律。所以, S_c 上 P 点受到的力为 $-dF_t$ 。目前, S_c 的势的作用已考虑完毕。

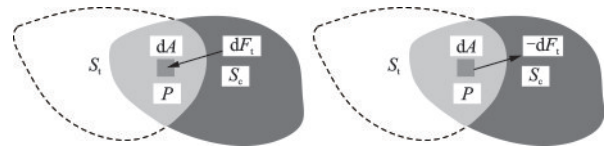


图1 S_t 上 P 点的力和 S_c 上 P 点的力

Fig.1 Force at point P on S_t and S_c

所以,在两种势的作用下, S_c 上 P 点受到的总作用力为

$$dF = dF_c - dF_t \quad (3)$$

随后,利用高斯定理,通过将互嵌区域的面积分转化为边界上的线积分,即可得到 S_c 的接触力 F 的精确的计算公式。 S_t 的接触力的计算过程类似,不再赘述。

应当指出,在本文方法中,通过两单元之间的

嵌入来反映相互接触。当两单元嵌入后,单元之间存在的嵌入会对数值计算造成误差。为了减小该误差,需要人为地控制嵌入深度。文献[18]指出,两单元之间的嵌入深度与法向刚度系数 K_n 成反比,为了限制两单元之间的嵌入深度,需要选择一个足够大的 K_n ,其与单元的弹性模量 E 成正比例:

$$K_n = \alpha E \quad (4)$$

式中, α 为比例系数。

2 叠梁开裂过程及叠放顺序的影响

2.1 计算模型

建立了双层叠梁如图2所示。上单梁的长和高分别为20 cm和3 cm,下单梁的长和高分别为20 cm和4 cm。两单梁之间无任何黏结作用。上、下单梁分别被剖分成 160×24 个和 160×32 个正方形单元,单元边长为0.125 cm。在叠梁下端面,设置两个铰支座,其中,固定铰支座距叠梁左侧3 cm;活动铰支座距叠梁右侧3 cm。在上单梁上端面中点,施加垂直向下的速度 v ,其大小为 3.4×10^{-4} m/s。在下单梁跨中下部,设置长度为1 cm的预置裂缝。通过分离指定位置左、右两侧节点以实现裂缝的预置。

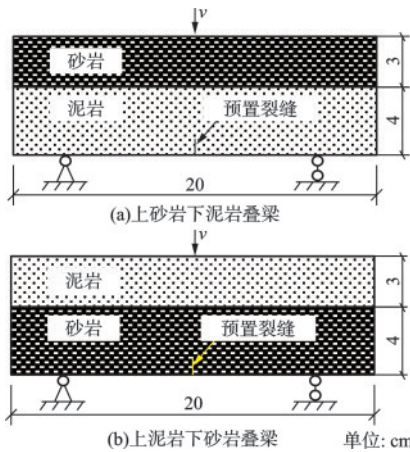


图2 双层叠梁的几何模型及边界条件

Fig.2 Geometry model and boundary conditions of double-laminated beams

对于上砂岩下泥岩叠梁,各种计算参数取值如下:砂岩和泥岩的面密度 ρ 分别取为2 700和2 650 kg/m², E 分别取为12.7和7.23 GPa,抗拉强度 σ_t 分别取为1.1和1.05 MPa,I型断裂能 G_I^I 分别取为4.5和1 N/m,II型断裂能 G_I^{II} 均取为0 N/m,泊松比 μ 分别取为0.166和0.26, K_n 取为18 GPa/m,局部自适应阻尼系数 α 均取为0.2,时间步长 Δt 取为

$1.379 51 \times 10^{-7}$ s。对于上泥岩下砂岩叠梁,砂岩和泥岩的 σ_t 分别取为1.7和1.6 MPa,泥岩的 G_I^I 取为3 N/m,其余参数均与上砂岩下泥岩叠梁的相同,上、下单梁之间无摩擦。应当指出,在两个模型中,砂岩的 σ_t 取值不同,泥岩的 σ_t 取值不同,泥岩的 G_I^I 取值不同,这是为了使数值结果与文献[6]的实验结果更为吻合。不同模型中相同材料的某些力学参数取值不同考虑了力学参数的离散性。计算条件为平面应变、大变形。

2.2 计算结果及分析

图3和图4分别给出了上砂岩下泥岩叠梁和上泥岩下砂岩叠梁的载荷-位移曲线的数值结果和文献[6]的实验结果,同时,还给出了上、下单梁的裂缝区段数目(当节点应力满足开裂判据时,节点将分离,两个单元之间的新增加裂缝称之为1个裂缝区段,裂缝区段的形状为四边形,若干裂缝区段连在一起构成裂缝)随位移的演变规律。由此可见,数值结果与实验结果较为吻合;二者均呈现双峰特征(第1峰值大于第2峰值),且两个峰值之间存在一个低谷。应当指出,上泥岩下砂岩叠梁的实验结果并不完整,后期曲线缺失。此外,本文将双层叠梁简化为二维问题,叠梁厚度方向并无尺寸,然而,这会造成一些困难。众所周知,载荷除以面积是应力,载荷的单位是N,应力的单位是Pa。在二维情况下,若不计厚度,没有面积之说,所以,可以认为模型厚度为1 m,即通过二维计算得到的载荷是模型厚度为1 m时的结果。如果模型有一定的实际厚度,还需将模型厚度为1 m时的结果折算成实际厚度的结果。图3和图4中的载荷是以模型实际厚度(2 cm)折算后的结果。

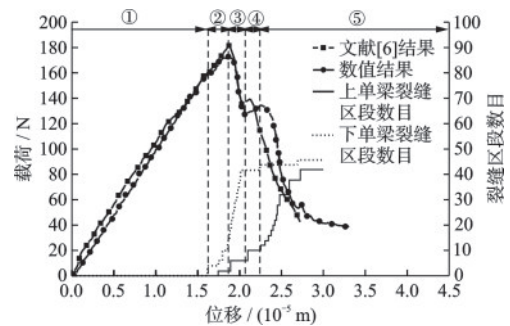


图3 上砂岩下泥岩叠梁的载荷-位移曲线与裂缝区段数目-位移曲线

Fig.3 Load-displacement curves and evolution of the number of crack segments with displacement for the sandstone-on-top laminated beam

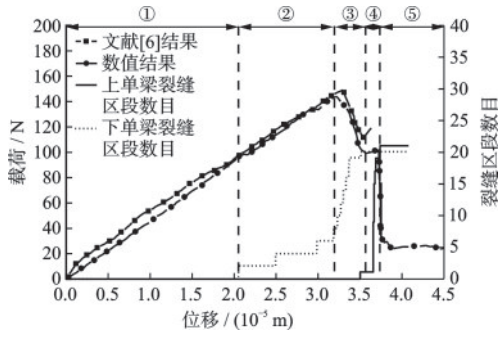


图4 上泥岩下砂岩叠梁的载荷-位移曲线与裂缝区段数目-位移曲线

Fig.4 Load-displacement curves and evolution of the number of crack segments with displacement for the mudstone-on-top laminated beam

根据载荷-位移曲线数值结果的特点(例如,两个峰值及之间低谷的位置)和上、下单梁的裂缝区

段数目随位移的演变规律的特点(例如,裂缝区段数目非零时的位置),现将载荷-位移曲线数值结果划分为阶段①~阶段⑤。

图5和图6分别给出了上砂岩下泥岩叠梁和上泥岩下砂岩叠梁的变形-开裂过程,图5(a)~(e)和图6(a)~(e)分别为阶段①~阶段⑤某一时刻的结果,图5(f)和图6(f)为上、下单梁均已几乎完全开裂(并非指裂缝完全贯穿上、下单梁,而是上、下单梁左、右两部分仍有少量节点相连)时的结果。其中,单元颜色代表最大主应力 σ_3 ,正、负分别代表拉、压,节点位移的放大倍数为100。

上砂岩下泥岩叠梁和上泥岩下砂岩叠梁的变形-开裂过程具有较大的类似性,除了在上泥岩下砂岩叠梁的开裂后期(图6(e)~(f)),两梁之间出现了离层。下面,以上砂岩下泥岩叠梁为例进行分析。

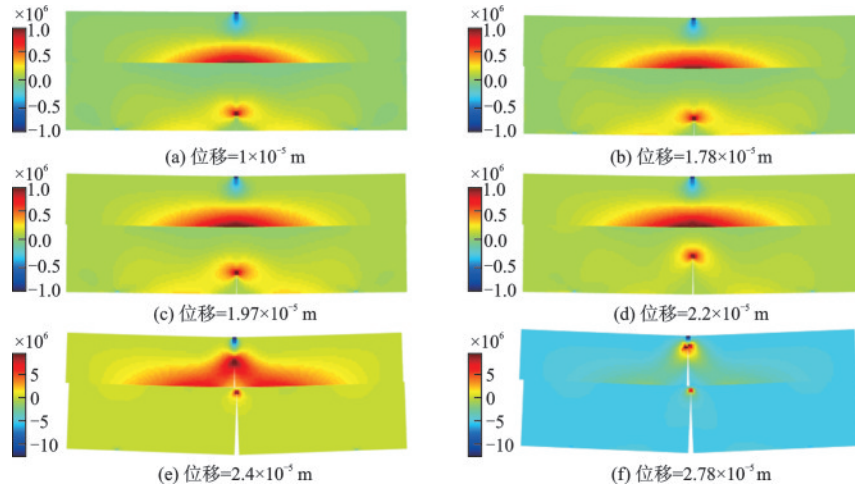


图5 上砂岩下泥岩叠梁变形-开裂过程中 σ_3 的时空分布

Fig.5 Spatiotemporal distribution of σ_3 during deformation-cracking process of the sandstone-on-top laminated beam

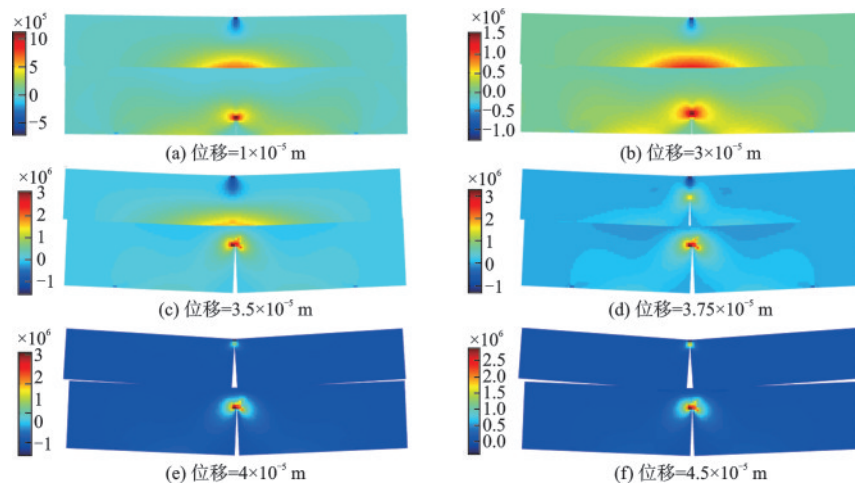


图6 上泥岩下砂岩叠梁变形-开裂过程中 σ_3 的时空分布

Fig.6 Spatiotemporal distribution of σ_3 during deformation-cracking process of the mudstone-on-top laminated beam

阶段①:载荷-位移曲线经历近似线弹性阶段。在此阶段,载荷随位移的增加呈近似线性增加;上、下单梁的裂缝区段数目均等于零。当位移为 1×10^{-5} m时(图5(a)),下单梁预置裂缝尖端附近存在 σ_3 集中现象;上单梁中性层下方明显受拉区呈直立的等腰钝角三角形。

阶段②:载荷-位移曲线经历第1次硬化阶段。在此阶段,载荷随位移的增加而增加,但载荷-位移曲线的斜率随位移的增加而减小;下单梁首先出现裂缝,然后上单梁出现裂缝,下单梁的裂缝区段数目由0增至7,上单梁的裂缝区段数目由0增至1。当下单梁的裂缝区段数目达到7时,载荷达到第1峰值。当位移为 1.78×10^{-5} m时(图5(b)),下单梁裂纹尖端附近存在明显的 σ_3 集中现象;上单梁中性层下方明显受拉区呈直立的等腰钝角三角形,上单梁裂纹尖端附近未出现 σ_3 集中现象,尽管上单梁已发生少量开裂,这意味着上单梁裂纹尖端处法向黏聚力较高并接近砂岩的 σ_t 。上述结果说明,叠梁的第1次硬化主要是由下单梁少量开裂引起的。

阶段③:载荷-位移曲线经历第1次软化阶段。在此阶段,载荷随位移的增加而减小;下单梁的裂缝区段数目由7增至21,上单梁的裂缝区段数目由1增至3;当下单梁的裂缝区段数目达到21时,载荷达到低谷。当位移为 1.97×10^{-5} m时(图5(c)),下单梁裂纹尖端附近存在明显的 σ_3 集中现象;上单梁中性层下方明显受拉区仍呈直立的等腰钝角三角形,上单梁裂纹尖端附近的现象与阶段②的基本相同。上述结果说明,叠梁的第1次软化主要是由下单梁大量开裂引起的。

阶段④:载荷-位移曲线经历第2次硬化阶段。在此阶段,载荷随位移的增加再次增加;下单梁裂缝区段数目由21增至22,下单梁已几乎完全开裂,而上单梁的裂缝区段数目由3增至7;当上单梁的裂缝区段数目达到7时,载荷达到第2峰值。当位移为 2.2×10^{-5} m时(图5(d)),下单梁的 σ_3 几乎为零,这是由于下单梁已几乎完全开裂;上单梁中性层下方明显受拉区仍呈直立的等腰钝角三角形,上单梁裂缝尖端附近已存在微弱的 σ_3 集中现象。上述结果说明,叠梁的第2次硬化主要是由上单梁少量开裂引起的。

阶段⑤:载荷-位移曲线经历第2次软化阶段。在此阶段,载荷随位移的增加再次减小;下单梁的裂缝区段数目由22增至23,而上单梁的裂缝区段数

目快速增加,直至上单梁几乎完全开裂。上单梁裂缝尖端附近已存在较为明显的 σ_3 集中现象,随着裂缝的逐渐发展,上单梁的 σ_3 逐渐减小(图5(e)~(f))。上述结果说明,叠梁的第2次软化几乎是由上单梁大量开裂引起的。

下面,对两种双层叠梁相同阶段的力学行为进行比较。

阶段①:上泥岩下砂岩叠梁的弹性阶段比上砂岩下泥岩叠梁的长,这是由于下单梁砂岩的 σ_t 大,裂缝不易产生。

阶段②:上泥岩下砂岩叠梁的第1次硬化阶段比上砂岩下泥岩叠梁的长,这是由于下单梁砂岩的 σ_t 大,裂缝不易产生,且 G_t^I 大,虚拟裂缝面之间的法向黏聚力不易丧失。

阶段③:上泥岩下砂岩叠梁的上单梁裂缝出现比上砂岩下泥岩叠梁的晚,这是由于上砂岩下泥岩叠梁的下单梁已几乎完全开裂,只有上单梁砂岩承担载荷。而上泥岩下砂岩叠梁的下单梁仍有一定承载力,下单梁对上单梁具有一定的承托作用,上单梁泥岩和下单梁砂岩共同承担载荷。上泥岩下砂岩叠梁的第1次软化阶段比上砂岩下泥岩叠梁的长,这是由于下单梁砂岩的 G_t^I 大,虚拟裂缝面之间的法向黏聚力不易丧失。

阶段④:上泥岩下砂岩叠梁的上单梁裂缝扩展速度比上砂岩下泥岩叠梁的快,且第2次硬化阶段不明显,这是由于上单梁泥岩的 σ_t 小,裂缝容易产生,且 G_t^I 小,虚拟裂缝面之间的法向黏聚力容易丧失。

阶段⑤:上砂岩下泥岩的上单梁仍持续开裂,第2次软化阶段长,而上泥岩下砂岩叠梁的上单梁又发生少许开裂,第2次软化阶段不明显,呈明显脆性,这是由于上单梁泥岩的 σ_t 小,裂缝容易产生,且 G_t^I 小,虚拟裂缝面之间的法向黏聚力容易丧失。

根据上述结果,表1总结了两种双层叠梁的载荷-位移曲线不同阶段的特点。

3 法向刚度系数的影响

3.1 计算模型

为了使本文结果具有一般性,建立了硬岩和软岩组合双层叠梁模型,其中,预置裂纹长度为1.5 cm,且上、下单梁分别被剖分成 80×12 个和 80×16 个正方形单元,单元边长为0.25 cm。

表1 两种双层叠梁的载荷-位移曲线不同阶段的特点总结

Table 1 Characteristics of different stages of load-displacement curves for two types of double-laminated beams

阶段	上砂岩下泥岩叠梁	上泥岩下砂岩叠梁
阶段①	上、下单梁无裂缝;弹性阶段短	上、下单梁无裂缝;弹性阶段长
阶段②	上、下单梁出现裂缝;下单梁裂缝区段数目少量增加;第1次硬化阶段短	只下单梁出现裂缝;下单梁裂缝区段数目少量增加;第1次硬化阶段长
阶段③	下单梁裂缝区段数目大量增加,直至下单梁几乎完全开裂;上单梁裂缝区段数目少量增加;第1次软化阶段短	下单梁裂缝区段数目大量增加,直至下单梁几乎完全开裂;上单梁出现裂缝;第1次软化阶段长
阶段④	上单梁裂缝区段数目少量增加;第2次硬化阶段长	上单梁裂缝区段数目大量增加,直至上单梁几乎完全开裂;第2次硬化阶段短,且不明显
阶段⑤	上单梁裂缝区段数目大量增加,直至上单梁几乎完全开裂;第2次软化阶段长	上单梁又发生少许开裂;第2次软化阶段呈明显脆性

硬岩和软岩的各种计算参数取值如下: ρ 分别为2 650和2 000 kg/m²,弹性模量 E 分别为12.7和7.23 GPa,泊松比 μ 分别为0.26和0.30,抗拉强度 σ_t 分别为1.7和1.2 MPa, G_t^I 分别为2.0和1.0 N/m, G_t^{II} 均取为0 N/m, α 为0.2, Δt 取为 $1.379\ 51 \times 10^{-7}$ s。应当指出, α 的取值并不背离常识^[21]。

文献[11]共设计了10个计算方案,其中,方案1~方案5和方案6~方案10分别为上硬下软叠梁和上软下硬叠梁。各方案中 K_n 的取值见表2。

表2 各方案中 K_n 的取值

Table 2 K_n value for each scheme

方案	$K_n / (\text{GPa} \cdot \text{m}^{-1})$
1和6	30
2和7	10
3和8	20
4和9	40
5和10	50

3.2 计算结果及分析

图7给出了各方案的载荷-位移曲线。由图7(a)可以发现:

(1)上硬下软叠梁的载荷-位移曲线均呈现双峰特征。

(2)随着 K_n 的减小,第1峰值载荷对应的位移增大。这是由于当加载点位移相同时, K_n 的减小使上、下单梁之间的作用力减小,这导致了下单梁开裂变晚。

(3)随着 K_n 的减小,第2峰值载荷对应的位移增大。这是由于 K_n 的减小使下单梁开裂变晚,导致两

单梁之间的作用力持续时间延长,从而延缓了上单梁的开裂。

(4)第1峰值载荷大于第2峰值载荷;随着 K_n 的减小,第2峰值载荷基本不变。

图7(a)和(b)有一些类似之处,不再赘述。由图7(a)可以发现,随着 K_n 的减小,上软下硬叠梁的载荷-位移曲线由双峰或多峰向单峰转变。对于方案7,载荷-位移曲线呈现单峰特征,上单梁开裂且下单梁未开裂。

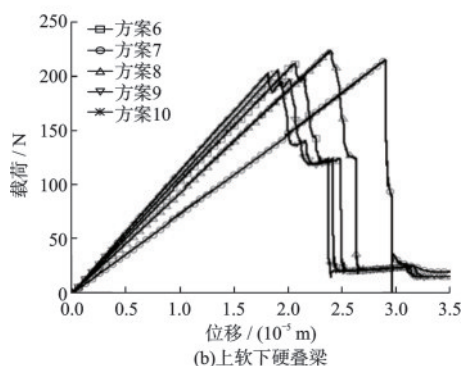
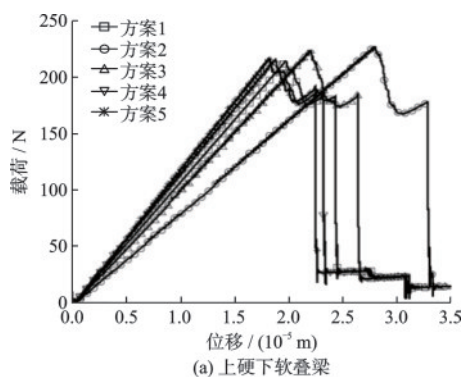


图7 方案1~10中叠梁的载荷-位移曲线

Fig.7 Load-displacement curves of double-laminated beams (schemes 1~10)

4 结 论

(1)上泥岩下砂岩叠梁和上砂岩下泥岩叠梁的共性包括:载荷-位移曲线均呈现双峰特征和5个阶段(近似线弹性阶段、第1次硬化阶段、第1次软化阶段、第2次硬化阶段和第2次软化阶段);下单梁均先于上单梁开裂。

(2)上泥岩下砂岩叠梁和上砂岩下泥岩叠梁的差异包括:前者各单梁裂缝出现的时刻晚于后者;前者的第1次硬化阶段和第1次软化阶段比后者的长;前者的第2次硬化阶段不如后者的明显;前者的第2次软化阶段比后者的脆。

(3)对于上硬下软叠梁,随着法向刚度系数的减小,第1和第2峰值载荷对应的位移均增大,下单梁开裂变晚。对于上软下硬叠梁,随着法向刚度系数的减小,载荷-位移曲线由双峰或多峰向单峰转变。

参考文献:

- [1] 王燧钊,崔振东,李明,等. 三点弯曲条件下薄层状岩体单层厚度对裂缝扩展路径的影响[J]. 工程地质学报, 2018, 26(5): 1326-1335.
Wang Y Z, Cui Z D, Li M, et al. Effect of layer thickness of flaggy rock on crack propagation path subjected to three-point bending[J]. Journal of Engineering Geology, 2018, 26(5): 1326-1335. (in Chinese)
- [2] 王妍,姚多喜,鲁海峰,等. 两端固支各向同性叠合岩梁受均布荷载的弹性力学解[J]. 应用力学学报, 2019, 36(2): 431-437.
Wang Y, Yao D X, Lu H F, et al. Elastic solution of clamped laminated rock beam under uniformly distributed load [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2019, 36(2): 431-437. (in Chinese)
- [3] 刘金辉. 双层岩梁组合结构研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2011.
Liu J H. Study of double-layer rock beams structure [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2011.
- [4] Wang S R, Xu D F, Hagan P, et al. Fracture characteristics analysis of double-layer rock plates with both ends fixed condition[J]. Journal of Engineering Science and Technology Review, 2014, 7(2): 60-65.
- [5] 徐殿富. 加载作用下层状岩板失稳破坏特征分析[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2014.
- Xu D F. Fracture characteristics analysis of layered rock plates under loading condition [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2014. (in Chinese)
- [6] 代树红. 基于数字图像相关方法的断层破裂扩展实验研究[D]. 北京: 中国地震局地质研究所. 2013.
Dai S H. Experimental studies on fault propagation based on digital image correlation method [D]. Beijing: Institute of Geology, China Earthquake Administrator, 2013. (in Chinese)
- [7] 代树红,王召,马胜利,等. 裂纹在层状岩石中扩展特征的研究[J]. 煤炭学报, 2014, 39(2): 315-321.
Dai S H, Wang Z, Ma S L, et al. Study on characteristics of crack propagation in stratified rock [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(2): 315-321. (in Chinese)
- [8] 皮晓清,李亮,唐高朋,等. 基于有限元极限上限法的含软弱夹层边坡稳定性分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2019, 16(2): 351-358.
Pi X Q, Li L, Tang G P, et al. Stability analysis for soil slopes with weak interlayers using the finite element upper bound limit analysis [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2019, 16(2): 351-358. (in Chinese)
- [9] 张广超,朱合华,蔡永昌. 采用独立覆盖无网格法模拟盾构隧道衬砌结构[J]. 力学季刊, 2017, 38(1): 81-93.
Zhang G C, Zhu H H, Cai Y C. Simulation of the shield tunnel based on the independent cover meshless method [J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2017, 38(1): 81-93. (in Chinese)
- [10] Lisjak A, Grasselli G. A review of discrete modeling techniques for fracturing processes in discontinuous rock masses [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2014, 6(4): 301-314.
- [11] 严成增,孙冠华,郑宏,等. 三维FEM/DEM中摩擦力的实施及验证[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(6): 1248-1256.
Yan C Z, Sun G H, Zheng H, et al. Implementation and verification of friction in 3D FEM/DEM [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(6): 1248-1256. (in Chinese)
- [12] 莫品强,胡裕琛,王宽君,等. 基于离散元法的温度静力触探贯入与传热研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2022, 42(5): 913-921.
Mo P R, Hu Y S, Wang K J, et al. Penetration and heat transfer of T-CPT based on DEM simulation [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2022, 42(5): 913-921. (in Chinese)

- [13] 刘澜, 李新平, 孙吉主, 等. 随机粗糙充填节理对S波传播影响的数值研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2021, 41(2): 385-393.
Liu L, Li X P, Sun J Z, et al. Numerical study on the effect of a random rough filled joint on S-wave propagation[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2021, 41(2): 385-393. (in Chinese)
- [14] Fan H, He S M. An angle-based method dealing with vertex-vertex contact in the two-dimensional discontinuous deformation analysis[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2015, 48(5): 2031-2043.
- [15] 王学滨. 拉格朗日元方法、变形体离散元方法及虚拟裂纹模型耦合的连续-非连续介质分析方法研究[R]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2015.
Wang X B. A method for continuum-discontinuum medium based on the coupled Lagrangian element method, deformation discrete element method and fictitious crack model [R]. Beijing: China University of Mining and Technology (Beijing), 2015. (in Chinese)
- [16] 郭翔, 王学滨, 白雪元, 等. 加载方式及抗拉强度对巴西圆盘试验影响的数值模拟[J]. 岩土力学, 2017, 38(1): 214-220.
Guo X, Wang X B, Bai X Y, et al. Numerical simulation of effects of loading types and tensile strengths on Brazilian disk test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(1): 214-220. (in Chinese)
- [17] 王学滨, 岑子豪, 陈双印, 等. 基于岩层运动并行计算系统的锚杆单元原理、实现及巷道支护效果分析[J]. 煤炭学报, 2023, 48(8): 3020-3029.
Wang X B, Cen Z H, Chen S Y, et al. Principle, realization and analysis of roadway support effect of bolt element based on parallel computing system of strata motion[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(8): 3020-3029. (in Chinese)
- [18] Munjiza A. The combined finite-discrete element method[M]. London: John Wiley & Sons, 2004.
- [19] Farsi A, Xiang J, Latham J P, et al. Packing simulations of complex-shaped rigid particles using FDEM: An application to catalyst pellets[J]. Powder Technology, 2021, 380: 443-461.
- [20] Farsi A, Bedi A, Latham J P, et al. Simulation of fracture propagation in fibre-reinforced concrete using FDEM: An application to tunnel linings[J]. Computational Particle Mechanics, 2020, 7(5): 961-974.
- [21] 张楚汉, 金峰, 侯艳丽, 等. 岩石和混凝土离散-接触-断裂分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.
Zhang C H, Jin F, Hou Y L, et al. Discrete-contact-fracture analysis of rock and concrete[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008. (in Chinese)

(本文编辑:赵霞)