

文章编号: 0253 - 9993 (2005) 04 - 0414 - 04

层状岩石锚固体全过程变形性质的试验研究

杨建辉, 夏建中

(浙江科技学院 建筑工程学院, 浙江 杭州 310012)

摘 要: 用物理模拟方法研究了层状岩石锚固体全过程变形性质, 得到了锚固体纵、横向载荷与挠度全程的关系曲线, 两条曲线都存在峰值前和峰值后两个变形阶段, 横向载荷首先达到峰值, 破坏进一步发展后纵向载荷达到峰值. 锚固作用表现为锚固体层间离层和错动量减小, 提高了锚固体峰值后承载力, 可变形性也得到了改善.

关键词: 层状结构; 锚杆支护; 支护机理; 回采巷道

中图分类号: TD353.6 **文献标识码:** A

Test study on the complete deformation property of bolted stratified surrounding rockmasses

YANG Jian-hui, XIA Jian-zhong

(Department of Civil Engineering, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou 310012, China)

Abstract: The deformation and failure mechanism of bolted stratified surrounding rockmasses with physical modeling was studied. The curves of transverse load vs. deflection and axial load vs. deflection of bolted stratified surrounding rockmasses were got. Both have pre-peak stage and post peak stage, transverse load reaches the peak at first, then the axial load reaches the peak, the shear displacement manifest that combined voussoir beams interbedded absciss layer and displacement are decreased, the post peak strength of the combined voussoir beams was increased, the toughness was improved.

Key words: stratified rock; bolting; working mechanisms of the rock bolting; roadway

运用物理模拟方法制作锚固分离体, 测得此分离体的全程应力 - 应变曲线, 对曲线进行分析可以确定分离体的多项力学参数, 如峰值强度、残余强度、变形模量和泊松比等, 据此分析锚杆支护作用. 应用此方法对断续节理岩体、连续岩体锚固效应进行了研究^[1-3], 研究结论深化了对锚杆支护作用的认识. 层状岩石是地下工程围岩中常见结构类型^[4,5], 以往开展的层状围岩锚固分离体力学性质物理模拟主要研究了锚杆参数 (长度、密度等) 对锚固体破坏形式、极限承载力等方面的影响规律, 对其变形全过程的研究较少. 本文以煤巷顶板锚杆支护为工程背景开展层状围岩锚固分离体全程变形性质试验研究.

1 试验方案

在煤巷顶板中取锚固分离体, 如图 1 所示. 分离体长度由原型巷道跨度来确定, 厚度根据实际工程锚固体厚度与顶板岩层的构成来确定. 一般工程锚固体厚度为 1.9 ~ 2.3 m. 实际探测表明, 煤巷顶板岩石

收稿日期: 2004 - 11 - 04

作者简介: 杨建辉 (1965 -), 男, 河北安国人, 博士, 教授. Tel: 0571 - 85124601, E-mail: mxyxr@163.com

分层厚度不等，锚固体承载力主要来自于较厚岩层，因此在试验时只考虑厚度超过一定值的岩层，略去较薄岩层，锚固分离体厚度按工程锚固体厚度的 1/2 左右确定。根据试验条件，确定几何相似比为 1/10，试验锚固分离体长度为 448 mm，厚度为 128 mm。为了降低试验难度，共分为 4 层，分层厚度为 32 mm。每个分层由两块长度为 224 mm 的石膏块对接而成，这样只考虑了跨中节理的影响，忽略了其它节理的影响，对于节理较少情况下是可行的。

用石膏模拟岩层，石膏单轴抗压强度为 4.18 MPa。经试验在石膏层间夹了一层 80 g 蓝色封面纸，它与石膏块体间的摩擦因数为

0.42，可满足试验要求。模型中锚杆预拉力取为 40 N，按端锚锚杆刚度相似选择模型锚杆材质和直径，用直径 1.5 mm 的铝丝模拟锚杆。需要说明的是，此次试验石膏密度取值不满足相似理论^[6]，这减小了试件的自重载荷，为此在数据处理时，将横向载荷加上减轻的自重可以近似考虑此影响。

工程中锚固体作用有水平地应力，它对锚固体力学性质有直接的影响，试验中也应沿试件层面方向施加初始载荷模拟水平地应力，该载荷称为初始纵向载荷，为此设计了如图 2 所示的纵向加载装置。该装置由 4 根拉杆和两侧挡板组成，每根拉杆配两个螺母和一个拉力传感器。试件置于左右挡板之间，通过拧紧外侧螺母对试件施加初始纵向载荷。试件的纵向载荷与拉杆拉力相等，即等于 4 个传感器读值之和。

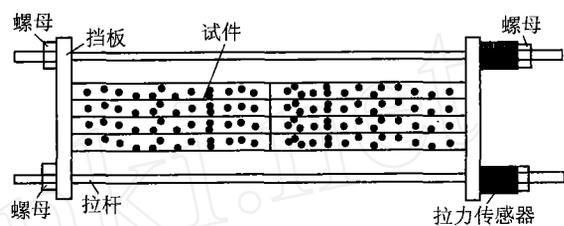


图 2 纵向加载装置

Fig. 2 Axial loading set

试件初始纵向载荷为 8 kN，形成的初始压应力与试件材料单轴抗压强度比值约为 0.2，对单轴抗压强度为 40 ~ 50 MPa 的砂页岩而言，若侧压力系数为 0.8 ~ 1.0，此初始压应力相当于巷道埋深为 400 ~ 500 m 时的水平地应力。

在试件上对接放置两块厚度为 10 mm、长度为 220 mm 的钢板。试件横向载荷由伺服式压力机施加，压力机集中载荷经一级均压后作用在钢板上，再经钢板均压作用在试件的上表面。

模型试验锚杆锚固方式为端锚和全锚两种，全锚锚杆用石膏胶结。完成了 6 个试验，分别为无锚固模型、端锚模型、全锚模型各 2 个。

将试件固定于纵向加载装置的挡板之间，均匀旋紧螺母对试件施加初始纵向载荷，然后施加横向载荷，记录横向载荷与挠度的关系曲线，读取纵向载荷并记录，同时观察试件变形与破坏情况。

2 试验结果与分析

2.1 试件的破坏过程

施加横向载荷后试件发生下沉，每层两个石膏块体发生反向旋转，当位移达到一定值后每层都形成铰接拱，跨中拱较下部和两侧拱较的上部张开，纵向载荷在拱较处形成局部挤压应力。随着挠度的增大，拱较挤压面高度减小，挤压应力也不断增大。观察试件破坏情况发现，在横向载荷峰值前拱较处出现了长度较小的裂纹，试件出现小规模破坏，破坏进一步发展后纵向载荷达到峰值。拱较破坏的不断加剧导致试件的最终破坏。

图 3 (a) 为试验结束后全锚模型跨中拱较的形态，可以看出拱较的破坏与下侧的张开。有、无锚杆支护模型变形与破坏情况有两点不同：在峰值后阶段无支护模型有明显的离层，锚杆支护模型离层不明显；无支护情况下试件的下部分层发生了垮落，有支护情况下没有此类现象。图 3 (b), (c) 反映了全锚和无锚模型试验的最终情况，无锚模型最下两层发生垮落。

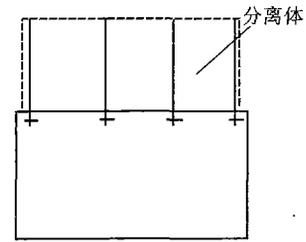


图 1 分离体

Fig. 1 Detached body

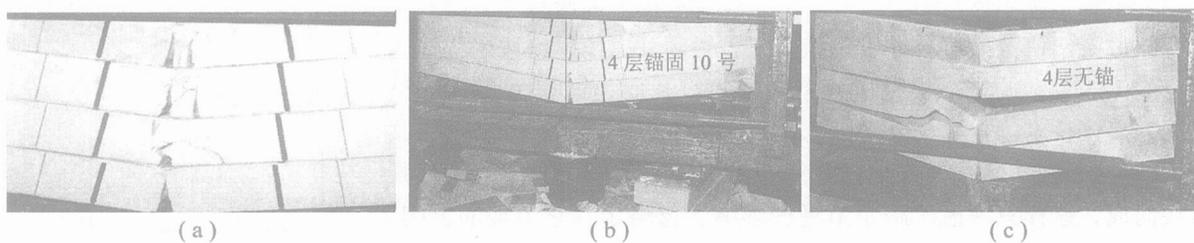


图 3 模型形态

Fig. 3 Model configuration

(a) 支护模型跨中形态; (b) 支护模型最终形态; (c) 无锚模型最终形态

2.2 层间错动分析

试件层间错动量随挠度的增大而增大, 图 3 (a) 直观地显示了全锚模型的层间错动情况, 拱铰两侧台阶排列的黑色线段在施加横向载荷前是两条直线, 层间错动导致了图 3 所示的分布形态. 观测表明, 相同横向载荷情况下无支护模型层间错动量是施加锚杆支护模型的 1.7~2.0 倍, 说明锚杆起到了锚固作用, 但层间错动说明锚固层不是一个完整岩层.

2.3 模型变形阶段分析

试验测得各种模型的横、纵向载荷与挠度的关系曲线形态相似, 以全锚为例, 关系曲线如图 4 所示. 由图 4 可见, 横、纵向载荷与挠度的关系曲线均存在峰值, 变形全过程分为峰值前和峰值后两个阶段, 锚固体大部分挠度是在峰值后形成的. 横向载荷与纵向载荷不是同时达到峰值, 横向载荷首先达到峰值, 然后是纵向载荷.

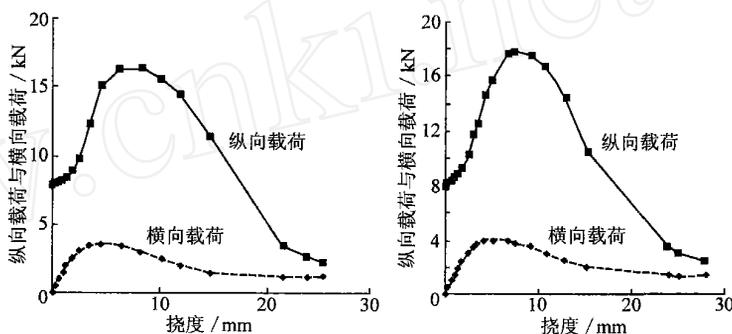


图 4 纵向载荷、横向载荷与挠度的关系曲线

Fig. 4 The relation curves of deflection and axial thrust, transverse load

综合各模型关系曲线共同特点, 总结出横、纵向载荷与挠度的关系曲线, 并进行阶段划分, 如图 5 所示. 纵向载荷与挠度的关系曲线可分为 4 个阶段: 在 ab 段纵向载荷增长缓慢; bc 段为一直线段, 纵向载荷增加较快; cd 段为一下弯段, 载荷增长变缓; de 段为峰值后的变形阶段. 横向载荷变形与挠度的关系曲线可分为 3 个阶段: of 段为一直线段, 横向载荷迅速增加, f 点挠度为 u_1 ; fg 段曲线下弯, 横向载荷增长变缓, 峰值点挠度为 u_2 ; gh 为峰值后变形阶段.

g 点与 c 点挠度接近, 即纵向载荷增长变缓起点与横向载荷峰值点接近. 从开始施加横向载荷到 u_1 阶段, 试件处于弹性变形阶段, 各分层形成铰接拱, 挠度超过 u_1 后拱铰在纵向挤压力作用下出现塑性破坏, 导致横向载荷增长变缓、下降, 纵向载荷增长变缓, 随着挠度增大和拱铰压碎破坏的进一步发展, 铰接拱承载能力进一步下降, 纵向载荷也开始下降.

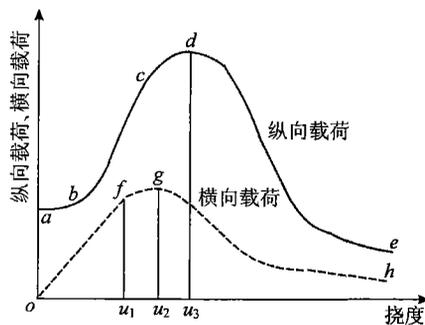


图 5 纵、横向载荷与挠度的关系曲线阶段分析

Fig. 5 The phase analysis relation curves of deflection and axial thrust, transverse load

2.4 试件承载能力分析

分别计算无支护、端锚和全锚支护情况下的纵、横向载荷平均值，绘出载荷平均值与挠度的关系曲线，如图 6 所示。由图 6 可看出，锚固作用有以下两个特点：

(1) 锚杆支护显著提高了模型峰值后承载能力，对横向载荷峰值和峰值前变形性质影响很小，纵向载荷峰值略有提高。在挠度为 13 mm 时（峰值后），无支护模型横向承载力为 0.75 kN，端锚支护为 1.8 kN，全锚支护为 2.13 kN；无支护、端锚支护和全锚支护横向载荷峰值分别为 3.72、3.70 和 3.85 kN，三者基本持平；无支护、端锚支护和全锚支护纵向载荷峰值分别为 15.1、15.9 和 17.1 kN，和无支护相比，端锚支护和全锚支护纵向载荷峰值提高了 5% 和 13%。有支护和无支护模型承载力的差别取决于锚杆支护作用发挥的大小，峰值前试件离层和层间错动较小，锚杆受到的拉力与剪力都较小，锚杆支护作用也就较小，有、无支护模型间变形性质差别较小，与此相反，峰值后锚杆支护作用得到发挥，试件承载力差别较大。

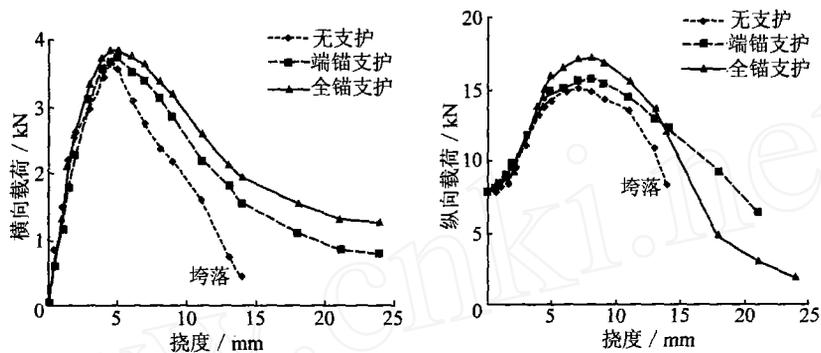


图 6 载荷均值与挠度的关系曲线

Fig. 6 The relation curves of deflection and mean load

(2) 施加锚杆支护有效地提高了围岩的可变形性。无支护模型挠度达到 14 ~ 15 mm 时横向载荷已降至 0.4 ~ 0.5 kN，端锚和全锚模型挠度达到 20 mm 时横向载荷仍保持在 1 kN 左右。

3 结 论

(1) 层状结构顶板岩层变形过程中形成铰接拱，拱铰不断被压碎，导致锚固体挠度不断增大和最终失稳。

(2) 层状岩石锚固体纵、横向载荷与挠度的关系曲线都分峰值前和峰值后两个变形阶段，分层铰接拱出现小规模破坏后横向载荷达到峰值，破坏进一步发展后纵向载荷达到峰值。

(3) 试验表明，施加锚杆支护后分层间仍存在层间错动，说明锚固层不能看作完整岩层。

(4) 锚杆受拉力和剪力作用，控制了分层间离层和剪切错动，改善了岩层的力学性质。锚固作用表现为提高了锚固体峰值后承载力和锚固层韧性，对峰值前力学性质影响较小。

参考文献：

- [1] 朱维申, 何满潮. 复杂条件下围岩稳定性与岩体动态施工力学 [M]. 北京: 科学出版社, 1995. 413 ~ 418.
- [2] 张有天, 周维垣. 岩石高边坡的变形与稳定 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999. 273 ~ 292.
- [3] 侯朝炯, 勾攀峰. 回采巷道锚杆支护围岩强度强化机理研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19 (3): 342 ~ 345.
- [4] 孙广忠. 岩体结构力学 [M]. 北京: 科学出版社, 1988. 56 ~ 63.
- [5] 杨建辉, 王育德. 煤巷顶板结构类型及锚杆支护设计原则 [J]. 煤矿设计, 1999 (12): 18 ~ 20.
- [6] 李鸿昌. 矿山压力的相似模拟试验 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1988.