

第二届全国青年岩石力学与工程 学术研讨会论文集

北京 • 1993年7月6~8日

中国岩石力学与工程学会
青年工作委员会编



中国科学技术出版社

• 北京 •

第二届全国青年岩石力学与工程 学术研讨会论文集

北京 · 1993年7月6~8日

中国岩石力学与工程学会
青年工作委员会编

中国科学技术出版社

· 北京 ·

(京)新登字 175 号

图书在版编目 (CIP) 数据

第二届全国青年岩石力学与工程学术研讨会论文集 /
中国岩石力学与工程学会青年工作委员会编. — 北京:
中国科学技术出版社, 1993.7

ISBN 7-5046-1080-1

I . 第…

II . 中…

III . 岩石力学 — 文集

IV . TU45-53

第二届全国青年岩石力学与工程学术研讨会论文集

中国岩石力学与工程学会青年工作委员会编

中国科学技术出版社出版

北京海淀白石桥路 32 号 邮政编码: 100081

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

清华大学印刷厂印制

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 26.5 字数: 500 千字

1993 年 7 月第一版 1993 年 7 月第 1 次印刷

印数: 1-300 册 定价: 40.00 元

主办单位: 中国岩石力学与工程学会青年工作委员会

指导委员会:

潘家铮 孙 钧 哈秋龄 于学馥 周维垣 傅冰骏

筹备委员会:

李仲奎 李永盛 白雁北 杨 同 聂晓燕 李效甫
邓金根 贾秀梅 杜若超 罗光福 李庆斌

论文审查编辑委员会:

周维垣 傅冰骏 李仲奎 李效甫 聂晓燕 杨 庆

责任编辑: 关 兵

封面设计: 李仲奎

正文设计: 李仲奎, 贾秀梅

内 容 提 要

第二届全国青年岩石力学与工程学术研讨会, 于 1993 年 7 月 6 ~ 8 日在北京清华大学召开。本论文集收集了大会选送的约 60 篇论文, 反映了工作在水电、煤炭、矿山、铁道、交通、建筑等各部门、各领域第一线的青年岩石力学工作者最新研究和实践成果。

编 者 短 语

中国岩石力学与工程学会青年工作委员会主办的第二届全国青年岩石力学与工程学术研讨会, 于 1993 年 7 月 6 ~ 8 日在北京清华大学召开。

这次会议为各行业、各领域从事岩石力学科学和工程实践的青年学者和工程技术人员提供了一个交流、学习和提高的机会, 将为本学科的发展、青年人才的成长和培养起到积极作用。本论文集收集的约六十篇论文, 反映了工作在水电、煤炭、矿山、铁道、交通、建筑等各领域第一线的青年岩石力学工作者的最新研究和实践成果。他们大多具有博士、硕士和学士学位, 有较坚实的理论基础和实践经验。他们学术思想活跃, 开拓性强, 论文内容涉及本学科中许多重要的前沿领域。论文集收集的论文均经过有关专家评审, 具有较高的学术水平及参考价值。

中国岩石力学与工程学会潘家铮理事长专门为本论文集题词, 勉励青年岩石力学工作者顽强开拓。在论文编辑过程中, 得到了周维垣、傅冰骏等专家和白雁北同志的具体指导, 以及在京青年工作委员会委员的帮助; 清华大学李仲奎、贾秀梅、杜若超等同志做了很多工作, 在此一并表示感谢。

中国岩石力学与工程学会青年工作委员会对给予本届学术研讨会支持和赞助的同济大学地下工程系、清华大学水利水电工程系、金川镍钴研究设计院科研所等单位表示衷心的感谢。

中国岩石力学与工程学会青年工作委员会

1993.7

英才辈出 前程似锦
頑強开拓 乘风勇进

题第二届全国古年岩石力学与
工程学术研讨会文集

潘家铮

一九九三年四月

序 言

随着我国经济及科学技术的发展,青年科技工作者已逐渐形成一支强大的力量,他们的学术活动日趋活跃,学术水平日渐提高,值此第二届全国青年岩石力学与工程学术研讨会召开之际,我谨向大会致以热烈的祝贺!

青年人朝气蓬勃,精力旺盛,思想敏锐,无所畏惧,在历史上永远是创造性进展的有力推动者。青出于蓝而胜于蓝。此次会议推出了一批科技论文。包括基本理论,工程技术及试验研究。不少论文接触到岩石力学的前沿课题并取得了优异的成果。这又一次生动地说明我们的事业后继有人,在我国已形成了一支颇具实力的青年岩石力学科技队伍!

岩石力学涉及多种学科,近代发展极快,我国在岩石力学领域就工程技术规模与学术水平而言,已进入了国际先进行列。在水利、煤炭、采矿、交通、能源和国防等诸多国民经济领域内,岩石力学日益显出其重要性。

岩石力学是建立在工程实践基础上的学科。当前世界科技的进步必然带来岩石力学的快速发展。将高科技引入岩石力学是我们的重要任务。近年来,青年人接受了许多新学科、新技术,使岩石力学在工程实践中有了新的进展。本次会议的论文就反映了这方面的成果。

我们承认,在岩石力学的某些领域与国际先进水平相比还有一定的差距,这就要求青年科技工作者要积极向国内外先进技术学习,进行广泛的交流,不断提高。

本论文集基本上反映了我国岩石力学的新进展,这次会议为青年科技工作者创造了一个相互交流、共同提高的机会。我预祝大会圆满成功!

青年朋友们,愿你们积极投身到工程实践及科学研究的大潮中去,推进岩石力的研究和发展的任务已历史地落在了你们的身上,任重道远,奋斗拼搏,勇往直前!

周维垣

1993年7月

目 录

一. 综述与专题报告篇

1. 岩体的结构特征与巷道底臃类型的关系研究 姜耀东 孙永联 刘 亮 (003)
2. 不连续岩体斜坡稳定性分析的统计岩体力学方法 .. 罗 伟 高国强 伍法权 (009)
3. 层状岩体滑落的分形模型 张子新 华安增 (015)
4. 地铁隧道埋深对列车运行引起地面振动以及对洞室围岩长期稳定性的影响分析
..... 陶履彬 王怀忠 (023)
5. 城市深基坑边坡及坡顶建筑物的稳定性评价与治理措施
..... 李小春 许东俊 章 光 (033)
6. 隧道设计施工全过程专家系统的研制 何 川 (043)
7. 巷道表面岩爆的围压效应 唐春安 费鸿禄 徐小荷 (049)
8. 人工边坡与天然边坡之异同 杨 同 (055)
9. 应变强度准则及其应用 金立平 (061)
10. 煤体 — 瓦斯耦合理论研究 赵阳升 胡耀青 康天合 (069)
11. 金川矿山地下巷道岩石力学研究与维护措施 包四根 (075)
12. 隧道仰拱受力分析及设计方法的研究 王明年 关宝树 (081)
13. 德兴铜矿露天采场滑坡调查及 C 、 ϕ 值反算 余清仔 (089)
14. 煤岩体底板比压对轴向不同端面压模的形状效应 刘扬贤 高京泽 (097)
15. 坚硬煤层放顶煤综采顶煤破坏机理研究 田利军 (105)
16. 岩石边坡的分形分析方法 李华斌 (111)

二. 本构模型与数值方法篇

1. 考虑围压影响的岩体损伤本构模型 李庆斌 王光纶 张楚汉 (117)
2. 随机场中结构分析的随机特解边界元法 董耀星 王 博 (123)
3. 大柳树坝区松动岩体形成机制的数值模拟计算 朱济祥 孙 湄 张玉峰 (129)
4. 防水板的一种实用有限元模型 陈寿根 关宝树 (135)
5. 煤层瓦斯压力对煤岩力学特性的影响 张广洋 许 江 杜云贵 胡耀华 (141)

6. 软岩巷道围岩流变循环变形理论及其应用 赵国堂 陈庆敏 (147)
7. 层状岩体三维边界元应力分析中的面力不连续问题 李仲奎 陈振声 (153)
8. 用已知位移反求平面应变问题的弹性模量 王昌明 (161)
9. 砂岩的物理力学特性及相关关系的研究 陈咏梅 (167)
10. 高应变率对岩石动力学特性影响的研究 王 林 (173)
11. 裂隙渗流与离散单元耦合分析 王恩志 (179)
12. 用弹塑性—损伤本构关系及岩石流变力学原理对边坡锚固进行有限元分析
..... 张宏伟 麦家煊 (185)
13. 随机有限元在锚杆—围岩结构可靠度分析中的应用 曹策慧 (193)
14. 热冲击后花岗岩微观破裂特征及力学机制分析
..... 李 华 杨宝怀 石振明 (199)
15. 不规则齿形结构面的力学特性研究 沈明荣 (205)
16. 深部开采时支承压力变化规律的有限元模拟 刘保国 刘先贵 (213)
17. 应力控制法维护巷道的数值模拟研究 鞠文君 (221)
18. 予应力锚索锚固段受力状态的三维有限元分析 蒋楚生 李聚金 (227)

三 . 工程技术与应用篇

1. 煤矿深部开采的开拓巷道变形破坏模型及布置处理准则 杜计平 姜学云 (235)
2. 大同煤矿坚硬顶板物理力学性质研究与工程应用探讨 张占海 (241)
3. 两种常用地应力测量方法 陈桂忠 (247)
4. 煤矿深井地压显现特征与岩层控制 李效甫 李化敏 (255)
5. 近地表隧道开挖引起的地表下沉及其控制 马明军 方祖烈 (263)
6. 关于喷射混凝土支护的柔性 谷学东 (269)
7. 声波测井在地层压力预测中的应用 黄贺雄 吕桂英 (275)
8. XRF 法在岩石力学试验样品现场快速区分中的应用
..... 李 林 钟长江 王 龙 (283)
9. 矿山排土场滚石的运动特征及其对边坡稳定的贡献 李 林 (287)
10. 北京地铁浅埋暗挖法施工时荷载分布及变位的预测方法 孙建华 (291)
11. 清江高坝洲工程坝基岩体结构研究 徐卫亚 (301)

四. 监测与模型实验篇

1. 隧道围岩稳定模糊监控方法及其工程应用 梅志荣 (313)
2. 金属矿山采场顶板稳定性的声发射监测技术 曹庆林 桑玉发 (321)
3. 长江三峡黄腊石滑坡深部位移监测研究 曹荣祥 (331)
4. 工程岩体超声测试技术的研究 孙永联 姜耀东 余学东 (337)
5. 用测氦技术在地表探测隐伏断层位置的研究 刘鸿福 白春明 刘志刚 (343)
6. 岩体裂隙渗流与应力耦合关系的实验研究 于 冰 陈兴华 (347)
7. 岩质工程离心模型试验的若干问题 周顺华 张师德 (353)
8. 岩石试件刚度及压力机刚度对岩石主破裂前声发射相对平静的影响
..... 徐东强 李玉英 周昌达 许昭永 (359)
9. 地形偏压隧道的模型试验研究 何 川 (365)
10. 具有软弱结构面的边坡破坏机理试验研究 孙志恒 杜永廉 刘汉东 (371)
11. 顺层透水机理的模拟研究 刘长武 赵海云 (377)
12. 隧道仰拱在支护与围岩交互作用中机理的试验研究 仇文革 (385)
13. 边坡岩体表面及其内部位移相关性实验研究 刘汉东 王思敬 (391)
14. 膨胀岩巷道地压显现与控制模拟研究 吴顺川 杨 庆 廖国华 丁延棱 (397)
15. 北京广宁路立交桥路基加固试验研究 朱永全 张海龙 马培德 (403)

一、综述与专题报告篇

岩体的结构特征与巷道底臃类型的关系研究*

姜耀东 孙永联 刘 亮

(中国矿业大学采矿系 江苏徐州 221008)

提要 如何有效地控制巷道的底臃是煤矿生产中的一个重要问题,近年来该课题的研究取得了一些进展,但仍不能满意地解决生产问题。本文运用岩体结构力学方法,根据现场工程实践和实验室模型研究,讨论了岩体的结构特征与巷道底臃类型的关系以及采取防治底臃措施时的决策原则。本文的研究说明了在岩体力学分析中考虑岩体结构特征的重要性。

关键词: 岩体结构 巷道底臃 岩体力学

1 问题的提出

在煤矿生产中传统习惯上巷道的底板通常处于敞开不支护状态,但随着开采深度和广度的扩大,巷道的底板稳定性问题日益突出起来,在我国几乎每个矿井都有巷道底臃现象,每年需要大笔的款项花在卧底上。近年来通过岩体力学理论和新奥法技术的学习,人们已经充分认识到只有保证巷道底板的稳定性才能保证整个巷道的稳定性,开展了巷道底臃机理认识与防治措施的研究^{[1]~[4]},目前现有的研究大都是从底板岩体的组成成分、力学性质及其赋存条件方面着手来研究底臃问题,在分析中把岩体假设为连续介质或考虑节理影响引进损伤变量时弱化的连续介质,而忽略了岩体的结构效应影响。事实上底板围岩的稳定性除了受岩体的组成成分(例如当底板为膨胀岩时遇水膨胀而底臃)、岩体的强度指标、赋存条件(水的影响、地应力的大小)和工程因素(支护方式、断面形状)控制外,还与底板岩体的结构效应有很大关系,这主要表现在:(1)底板岩体的结构特征决定了底臃的类型及机理;(1)底板岩体的结构特征决定了选择那一种防治巷底臃的措施。

2 岩体的结构特征与巷道底臃类型的关系

2.1 岩体的结构特征

岩体和一般固体一样都具有微观缺陷,但它与一般固体的根本区别在于存在宏观的节理、断裂等不连续面,从而形成了自己独特的割裂结构,这就意味着地下峒室、巷道的稳定性问题有时不只是取决于岩体本身的材料特性,而且还取决于峒室、巷道围岩的结构特征,Hoek、Brown、Farmer、孙广忠等学者对此都进行了深入研

• 国家教委博士点基金、煤炭系统优秀青年基金资助项目

究。根据孙广忠的研究，岩体结构一般分为5种：（1）完整结构，（2）散体结构，（3）碎裂结构，（4）板裂结构，（5）块裂结构。不同的岩体结构具有不同的力学变形机制，详细论述参见文献〔6〕。

2.2 底板岩体结构类型的确定

煤矿巷道一般位于沉积岩中，层状赋存是沉积岩的基本特征之一，但同时又被裂隙和节理所分割。根据底板岩层的厚度及裂隙、节理所分割的程度以及和巷底板度的相对关系，对底板稳定性影响较大的是三类岩体结构：

① 连续体结构（厚层状结构），底板岩层的分层厚度大于巷道宽度的三分之一以上，且岩层基本上不被裂隙、节理切割贯通。

② 梁或板裂结构（薄层状结构），底板岩层的分层厚度小于巷道宽度的三分之一，岩层基本上不被裂隙、节理切割贯通。

③ 破碎结构，底板岩层的分层厚度小于巷道宽度的八分之一，且被大量的裂隙、节理所切割贯通。

2.3 底臌的类型

当巷道发生底臌时，不同的底板岩体结构决定了不同的底臌方式。

① 破碎结构→挤压流动性底臌

一种情况是当直接底板为破碎软弱岩层（例如粘土岩或煤），两帮和顶板的强度大大高于底板的强度，（例如两帮和顶板为砂岩并进行有效支护），在两帮岩柱的压模效应和远场地应力的作用下，底板软弱破碎岩层挤压流到巷道内，其力学模型如图1所示，底臌的特征表现为恒速度长时间的流动变形，图2为实验室相似材料模型试验的验证。

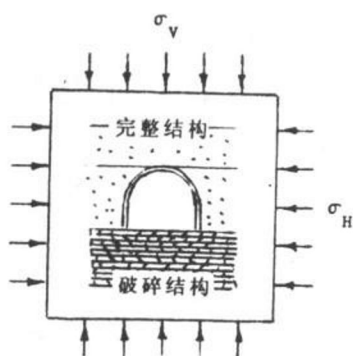


图1 挤压流动性底臌

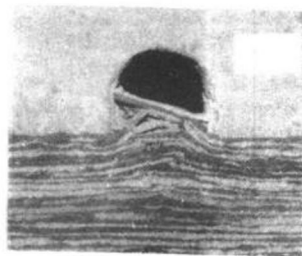


图2 挤压流动性底臌模型试验

淮北芦岭矿二水平6号交岔点顶邦用29kg/mU型钢加砌碇的支护方式，底板不支护。由于直接底为6m厚、水理作用后强度极低的粘土岩，在两帮岩柱的压模和远场地应力的挤压作用下，破碎巷道开掘后3个月内底板岩体以13mm/d速度向巷道内

流动变形。图 3 为该交岔点卧底时的底板岩层剖面，该剖面清楚地说明了破碎岩体的流动状态。

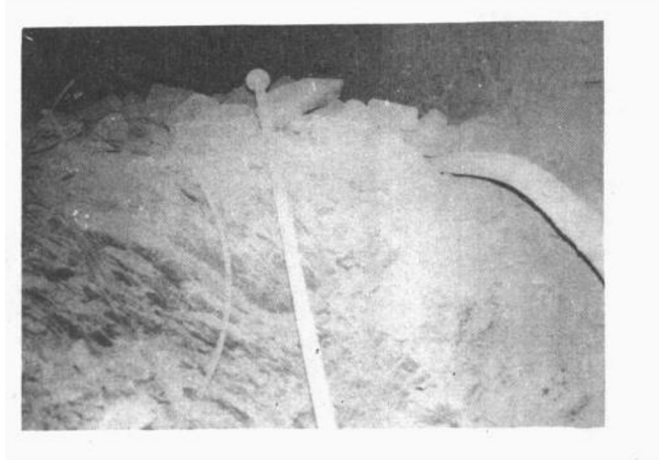


图 3 卢岭矿二水平 6 号交叉点底臆剖面照片

另一种情况是整个巷道都位于松软破碎的岩体中，这时巷道周边的围岩松动圈很大，两帮的应力集中区转移到岩体深部，从而不存在压模效应。底臆主要是由远场地应力作用下挤压周边破坏岩体向巷道内流动。不封底时底臆速度通常比顶邦收敛速度大得多，封底时底臆速度要小一些，但却增加了顶邦的收敛速度。

图 4 为徐州柳新矿 1 2 1 1 工作面运输巷巷道断面变形素描。该巷道局部位于 F 1 6 断层附近，围岩破碎，在远场地应力的作用下挤压破碎岩体向巷道内流动，在短短一个月内，巷道断面形状由开始时的正梯形变为矩形及最终呈倒梯形，巷道断面收缩率达 50% 左右。

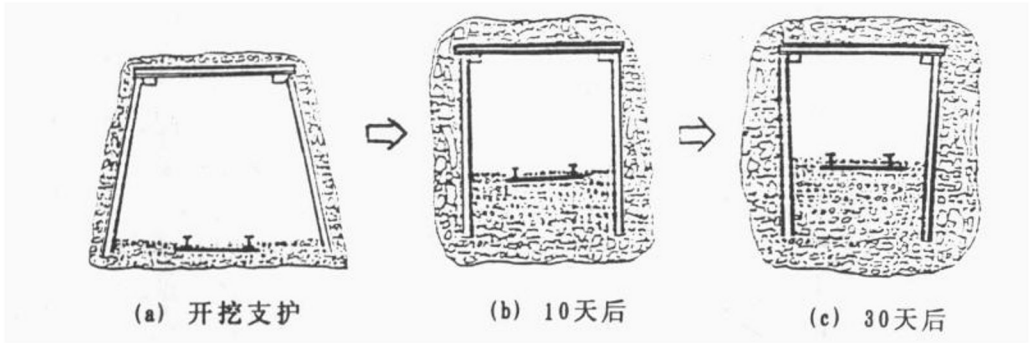


图 4 柳新矿 1211 运输巷变形素描

② 薄层状结构—→ 挠曲褶皱性底臆

当底板岩层为层状岩体时，即使是中硬岩体，如果底板与应力状态满足一定的

关系时也可能发生底臌。这种底臌的机理是由于底板岩层在平行于层理方向的压力作用下向底板临空方向挠曲褶皱而失稳，其力学模型如图5所示。

洼里矿-250回风暗斜井直接底板厚为30~50cm的层状砂质页岩，受采动影响时挠曲褶皱失稳，底臌量达1.3m，图6为实验室模型试验结果。

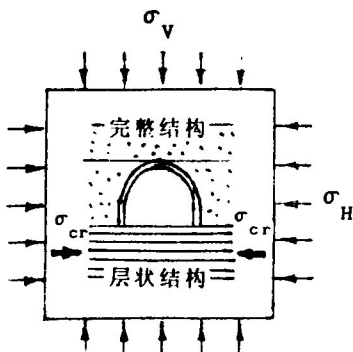


图5 挠曲褶皱性底臌

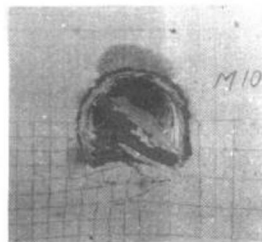


图6 挠曲褶皱性底臌模型试验

设巷道宽度为 B ，底板岩层厚度为 t ，研究表明当满足下列条件，就有可能发生挠曲褶皱性底臌。

$$\begin{cases} t \leq (1/15 \sim 1/3)B \\ P_{cr} \geq \beta (4\pi^2 EI/B^2) \end{cases}$$

式中 P_{cr} ——平行层理方向的挤压力；

β ——与节理发育程度有关的系数；

EI ——岩梁的抗弯刚度。

显然岩层的分层越薄，巷道宽度越大，所需的临界失稳载荷 P_{cr} 越小，就越容易发生挠曲底臌，值得注意的是临界载荷 P_{cr} 要比岩体的抗压强度小得多。

③ 厚层状结构——剪切错动性底臌

当巷道底板为完整岩层厚度大于三分之一巷道宽度时，底板岩体可以作为连续体介质来处理，巷道开掘后在底角处形成应力集中，如果这个应力集中超过岩体的强度，则发生剪切破坏并形成剪切破坏楔块，受采动影响时楔块岩体在水平应力挤压下产生错动使底板臌出。

巷道围岩为完整结构时剪切破坏现象在许多煤矿巷道中都有出现，剪切破坏面出现在底板时会发生底臌，出现两帮时会发生侧墙片帮，例如在淮南潘集二号井西翼石门巷道就出现过大型剪切破坏带，剪切裂缝出现在巷道壁腰线以下，延伸距离达60余米。

3 岩体结构特征支巷道底臌防治措施决策之间的关系

正如前面分析，巷道底板的岩层结构和巷道底臌的机理及方式之间有着密切的

关系,显然,要选择可靠的防治巷道底臃的措施就必须考虑底板岩层的结构特征和与之相应的底臃机理。

目前防治底臃的方法主要从加固底板岩体,降低底板围岩应力或整个巷道围岩的应力以及建立有效的防排水措施着手。用加固法防治巷道底臃的措施主要有:底板锚杆、底板注浆、封闭式支架以及混凝土反拱等;用卸压法防治巷道底臃的措施主要有底板围岩切缝、钻孔、松动爆破等。工程师们最关心的是所有上述措施的适用范围和条件以及如何根据具体的地质条件选择经济可靠的防治措施。

① 当底板岩体为破碎结构时,由于破碎岩体的承载能力差可能发生挤压流动性底臃,这时应采取封闭式支架或混凝土反拱等具有较大支护阻力的防治措施。

② 当底板岩体为薄层状结构时,可采用底板打锚杆的方法来提高层状岩体的抗弯刚度而阻止挠曲褶皱性底臃。

③ 当底板岩体为厚层状时,可采用卸压法如底板切缝、钻孔来释放底板围岩中的应力,使应力峰值向围岩深部转移从而提高底板岩体的稳定性。

上面所述只是一个指导性原则,但必须肯定的是在决定防治底臃措施时除了考虑岩石的物理力学性质赋存条件等因素外还必须考虑岩体的结构效应。否则所采取的方法就有可能失败造成巨大的经济损失,下面的工程实例很好地说明了这个问题。

淮南矿区在进行软岩巷道支护改革试验时,首先在潘集三号井巷道锚喷网全断面支护,巷道断面高4m宽5.6m,锚喷网参数为:管铰式锚杆长1.8m,间排距 $500 \times 500\text{mm}$, $\Phi 6\text{m}$ 的钢筋网,顶帮砂浆喷层厚20mm,底板砂浆层厚100mm,支护巷道约1500多米,从1991年5月至今一年半的时间里巷道基本上稳定,取得了显著的经济效益。1992年3月在谢桥东风井用上述相同的支护参数进行锚喷试验,谢桥东风井巷道的埋深、室内岩石力学性质和潘集三号井基本上相似,但巷道开挖后70天的底臃量高达1000mm,顶帮收敛量为300mm,巷道的破坏主要是底臃所造成试验未获成功,造成了很大的经济损失。后来的工程地质调查发现,尽管两个试验段的埋深、室内岩石力学性质基本相似,但岩体结构上存在很大差异,潘集三号井为比较完整的层状岩体,打底锚杆时把底板岩层连接在一起成为一个组合梁,既增加了岩层的抗挠曲褶皱能力又增加了岩层之间的抗剪切能力从而阻止了底臃;而谢桥东风井的围岩为层理极为发育、裂隙贯通的破碎岩体,打底锚杆后虽然对底板围岩施加了预应力和摩擦力,提高了承载能力,但是由于锚杆太短、仍然不能阻止破碎岩体在远场地应力作用下的挤压流动变形。实验室内的相似材料模型试验结果也证实了这一点,如图7所示。

4 简短的结语

本文运用岩体结构力学的观点,通过现场工程实例和模型试验讨论了岩体的结构特征与巷道底臃类型的之间的关系,说明了在岩体力学分析中考虑岩体的地质特征的重要性。正如许多岩体力学专家一再强调的那样:在地下工程围岩稳定性分析