

文章编号: 1000-7598-(2008)10-2833-05

岩体负泊松比试验研究

涂忠仁^{1,2}, 杨 强¹

(1.清华大学 水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084; 2.重庆交通大学, 重庆 400074)

摘 要: 高分子材料领域已经研制出一些具有负泊松比效应的材料, 而岩石材料中负泊松比现象十分罕见。基于国内首条在建海底隧道——厦门东通道海底隧道工程而开展的岩体室内动力测试和静力测试工作中, 均观察到了泊松比为负值的现象。利用晶粒转动模型, 对此特殊试验现象的成因给出了初步解释, 并得到了岩体试样泊松比值的合理计算方法。

关 键 词: 岩体; 负泊松比; 晶粒转动模型; 试验研究

中图分类号: TU 458⁺.2

文献标识码: A

Test research on negative Poisson's ratio of rock mass

TU Zhong-ren^{1,2}, YANG Qiang

(1. State Key Laboratory of Hydrosiences and Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: Some polymer materials with negative Poisson's ratio had been developed, but negative Poisson's ratio effect was seldom observed for rockmass. Based on the first underconstruction undersea tunnel as engineering background, a brief introduction of indoor test on the rockmass specimens was given; and negative Poisson's ratio effect was observed during test. A new microcosmic deformation mechanism—lattice-rotation model which could interpret the observed test phenomenon was proposed; and a credible data proceeding method to obtain the actual value of Poisson's ratio was proposed too.

Key words: rock mass; negative Poisson's ratio; lattice-rotation model; test research

1 前 言

泊松比是以法国著名数学家西蒙·泊松而命名的, 其定义为负的横向应变与纵向应变之比, 其理论上限值为 0.5 已经没有任何异议, 但下限理论值究竟是取 0 还是为 -1, 学术界在这个问题上长期以来存有争议。尽管有著名学者如钱伟长^[1]从理论上证明了各向同性材料泊松比的下限理论值为 -1, 可由于缺乏实物验证, 认为泊松比下限值为 -1 的观点始终未得到广泛认同。直到 1987 年, Lakes^[2]把一个 110 mm×38 mm×38 mm 的普通聚氨酯泡沫放入 75 mm×25 mm×25 mm 的铝制模具中, 进行三维压缩后再对其进行加热、冷却和松弛处理, 得到的泡沫单元呈内凹结构, 其泊松比测定值为 -0.7, 这是著名的首例有关于负泊松比材料的研究报告, 此后, 陆续有其他具有负泊松比的高分子材料研究进

展的相关研究报道^[3-6]。

纵观国内外关于岩石类材料在此方面的研究, 有关负泊松比的试验研究资料极其匮乏, 只是偶有零星报导, 王让甲^[7, 8]在对一组 7 块岩样进行测试时, 发现有泊松比为负的情况, 同文中另外提及 Gregory (1976 年) 在一套 20 块沉积岩样中, 得到大量负泊松比, 最小达 -0.3; 寇绍全在上世纪 80 年代初对 Stripa 花岗岩和 Avesta 片麻岩在经过 600℃ 处理后, 测得低压阶段泊松比也为负值, 但对该现象的出现原因, 尚无人开展相应研究。基于国内首条在建海底隧道——厦门翔安海底隧道工程, 笔者采用不同试验方法均发现某类岩样泊松比为负值。因此, 本文拟在简要介绍工程背景的基础上, 详细描述整个试验工作, 并对岩石类材料负泊松比现象的成因进行分析, 同时也得到较为合理的泊松比计算方法。

收稿日期: 2007-05-28

作者简介: 涂忠仁, 男, 1973 年生, 博士, 副教授, 主要研究领域为岩石力学和地下结构工程。E-mail: tuzrtj@126.com; tuzr@mail.tsinghua.edu.cn

2 工程背景

厦门东通道翔安海底公路隧道是我国第一条在建海底隧道，同时也是厦门市公路骨干网规划中的重要组成部分，是厦门岛连接大陆的第三条通道。工程位于厦门岛东北端的湖里区五通村与翔安区西滨村之间，呈北东向展布，隧道全长约 5.9 km，其中海域段长约 4.2 km，开挖方案主要采用海底钻爆法施工。

在该隧道设计时，为了确定海底隧道各级围岩的抗力系数，笔者研究并得出基于不同本构模型的围岩抗力系数解析计算公式^[9]，与此同时，为提供该工程中具体的围岩抗力系数数值，还进行了室内岩体常规试验来测定计算所需的工程岩体基本参数，具体包括常规三轴试验、单轴压缩试验以及岩石声波测试等试验项目。在利用超声波测试波速计算岩样泊松比时发现某级别岩样泊松比计算值全部为负值，为慎重起见，继续开展单轴压缩试验确认，通过认真、细致的静力试验，观察到了相同的试验结果——这类岩样在低压阶段确有呈现负泊松比的特殊性质。

3 室内试验研究

为获得较为准确的岩体基本参数，对采自厦门东通道海底隧道的海底岩样分别采用单轴压缩法和岩石声波测试法进行室内试验。

3.1 试验岩样

试验岩样由取自厦门东通道海底隧道前期地质勘察单位所获得的岩芯制备而得，分 I，II，III 级围岩共计 13 件，其中包含微风化花岗闪长岩、中粗粒黑云母花岗岩为灰白色，后者常见暗色包体，另外还有辉绿岩，辉绿岩脉呈灰绿色，表面可见有距离小于 10 cm 的多条胶结良好的节理，从岩样表面看，3 类岩石均属于硬质岩类，详见表 1。

测试工作中发现 XASD III 级围岩岩样（如图 1 所示）的泊松比出现负值，限于篇幅，下面主要介绍对该类岩样进行的试验工作。

3.2 试验方法及试验设备

按照规范规定，测定岩样的方法有单轴压缩变形试验和岩石声波测试试验两大类，具体而言，单轴压缩变形试验是利用应变片测出不同荷载水平下轴向和径向的应变值，然后按泊松比定义式计算得到泊松比；声波测试则是通过测定超声波在试验岩样中的纵波及横波传播波速，然后采用式（1）计算得到动泊松比值。

表 1 岩石试样一览表
Table 1 Rock mass specimens status

围岩级别	编号	直径 / mm	高度 / mm	岩石名称	备注
I 级围岩	XASD I-1	50	104		
	XASD I-2	50	104		
	XASD I-3	50	101		
	XASD I-4	50	101		
II 级围岩	XASD II-1	50	105		
	XASD II-2	50	102		
	XASD II-4	50	102	微风化辉绿岩	多条胶结良好平行结构面
	XASD II-5	50	100		
	XASD II-6	50	103		
	XASD II-3				胶结面破坏作废
III 级围岩	XASD III-1	50	101		
	XASD III-2	50	83	中粗粒黑云母花岗岩	端面有缺角、掉颗粒现象
	XASD III-3	50	91		
	XASD III-4	50	104		



图 1 XASD III-3 试验岩样
Fig.1 Picture of No. XASD III-3 specimen

$$\nu_d = \frac{\left(\frac{v_p}{v_s}\right)^2 - 2}{2\left[\left(\frac{v_p}{v_s}\right)^2 - 1\right]} \quad (1)$$

式中： ν_d 为动泊松比； v_p 为纵波波速； v_s 为横波波速。

完成两个试验项目除了万能液压机、电阻应变仪等常规实验设备外，还需要声波测试设备（分纵波和横波两大类），如图 2～图 3 所示。



图 2 试验岩样纵波测试图
Fig.2 Rock mass specimen P-wave test



图 3 试验岩样横波测试图

Fig.3 Rock mass specimen S-wave test

3.3 试验测试结果

考虑到声波测试对岩样基本无损伤，因此在安排试验工作时，首先进行声波测试，然后进行单轴压缩试验，测试结果分别见表 2 和表 3。

表 2 厦门海底隧道 III 级围岩弹性参数声波测试结果

Table 2 Ultrasonic testing result of elasticity parameters for III level rock mass specimens

岩样编号	密度 ρ / $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	动弹性模量 E_d / 10^4 MPa	动泊松比 ν_d
XASD III-1	2 558	0.99	-0.44
XASD III-2	2 408	1.75	-0.28
XASD III-3	2 499	0.85	-0.53
XASD III-4	2 592	3.00	-0.21

表 3 厦门东通道海底隧道 III 级围岩岩样单轴压缩测试结果

Table 3 Uniaxial compression test result for III level rock mass specimens

荷载 / kN	应力 / MPa	应变 / $\mu\epsilon$							
		XASD III-1		XASD III-2		XASD III-3		XASD III-4	
		纵向	横向	纵向	横向	纵向	横向	纵向	横向
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0.5			149	-3	196	4	48	-1
2	1.0	261	31	260	-6	355	11	91	1
3	1.5	352	44	374	-4	502	22	132	2
4	2.0	444	56	478	-2	641	30	169	5
5	2.5	531	70	576	1	760	41	209	7
6	3.0	616	87	677	5	925	51	246	9
7	3.6	691	99	788	10	1 060	65	284	11
8	4.1	763	112	887	17			320	14
9	4.6	835	125					360	16

注：表中所有纵向应变的原始实测数据全为负值，为作图方便表中列出数据为原始数据的相反数

从表 2 测试结果可看到，III 级围岩声波测试计算得到的泊松比值全部为负，最小达 -0.53。单轴压缩试验中，编号为 XASD III-2 和 XASD III-4 岩样的测试结果在试验开始的低压阶段也出现了负泊松比的特性：随着纵向压力的增大横向应变反而缩小，其中 XASD III-2 岩样尤为明显，如图 4 所示。

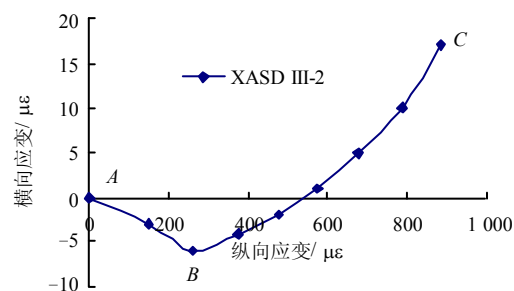


图 4 XASD III-2 泊松比测试曲线

Fig.4 Poisson's ratio test curve of No. XASD III-2 specimen

4 负泊松比现象形成机理分析

由于上述两类试验方法彼此独立，且试验过程无操作失误以及应变片贴片不当等人为因素影响，有理由相信试验过程中观察到的负泊松比现象并非偶然现象或者误操作所致。

如前言所述，不少学者已经研制出负泊松比材料，同时提出了不同的理论模型对其原因进行解释。Grima 和 Evans^[10, 11]在对一些无机晶体材料研究时发现，这些材料内部晶体通过彼此的铰链而作用在一起并呈方格状排列的微观结构，据此提出了解释晶体材料出现负泊松比效应时的“晶粒转动”模型，如图 5 所示。

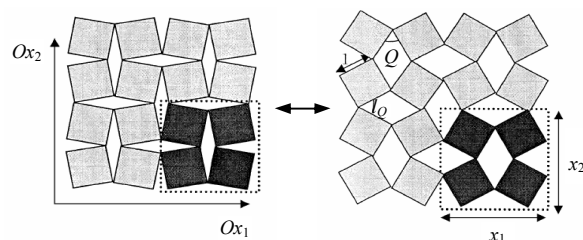


图 5 晶粒旋转模型示意图

Fig.5 Lattice-rotation model

假设每个粒子长度为 l ，晶粒之间夹角为 θ ，则在每个单元（虚框部分）内，有

$$X_1 = X_2 = 2l \left(\cos \frac{\theta}{2} + \sin \frac{\theta}{2} \right) \quad (2)$$

根据泊松比的定义：

$$\nu = - \frac{d\epsilon_j}{d\epsilon_i} \quad (3)$$

式中： $d\epsilon_i$ ， $d\epsilon_j$ 分别是应力施加方向和垂直于应力施加方向的应变增量，可按下式计算：

$$d\epsilon_i = \frac{dX_i}{X_i} = \frac{1}{X_i} \frac{dX_i}{d\theta} d\theta = \frac{1}{X_i} l \left(\cos \frac{\theta}{2} - \sin \frac{\theta}{2} \right) \quad (4)$$

联立求解式(2)~(4), 得材料的理论泊松比为-1。

基于上述晶粒转动理论模型, 假定 XASD III 级围岩具有图 5 所示的理论模型微观结构, 则可对试验中观察到的负泊松比现象进行合理解释:

首先, 对于岩石声波测试结果, 基于上述假定, XASD III 级围岩的岩样内部赋存大量孔隙。当声波发射探头发出声波信号时, 这些孔隙的存在使纵波信号在传播过程中不断被反射、衰减从而导致岩样纵波波速发生显著降低, 以 XASD III-2 和 XASD II-4 岩样为例, 纵波波速分别为 2 890 m/s 和 5 778 m/s, 降幅达 50 %, 代入公式(1)计算泊松比时, 纵波波速和横波波速比值小于 $\sqrt{2}$, 所以这类围岩由声波测试方法计算的泊松比全部为负值。岩样编号 XASD III-2 和 XASD II-4 的纵波波速波形图如图 6、图 7 所示。

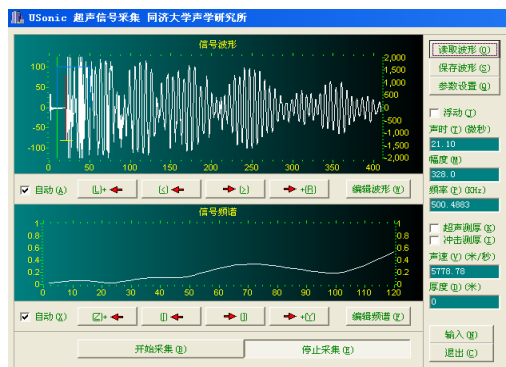


图 6 XASD III-2 岩样纵波波形图

Fig.6 P-wave waveform of No. XASD III-2 specimen

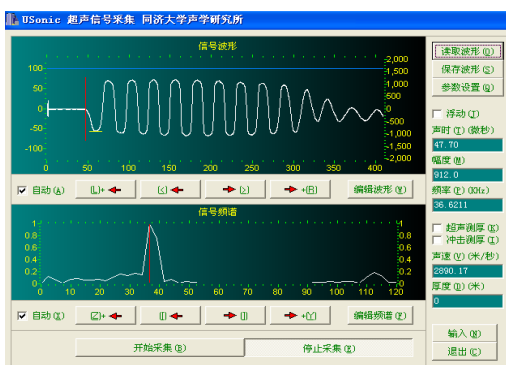


图 7 XASDII-4 岩样纵波波形图

Fig.7 P-wave waveform of No. XASD II-4 specimen

其次, 对于单轴压缩试验, 同样基于上述假定, 在试验初期阶段, 由于压力荷载数值较低, 岩样内部微观结构发生缓慢变化, 岩石颗粒发生错动, 大部分内部孔隙发生坍塌、密实, 这个阶段量测得到的横向变形主要以向内收缩为主, 因此量测得到的

横向应变相应的为负, 绘图时得到图 4 的 AB 段曲线; 继续加载, 当大部分内部孔隙密实后, 在荷载作用下, 岩样又呈现出正常的变形规律——随着纵向压缩应变的增大, 横向变形发生向外膨胀, 如图 4 中的 BC 段曲线所示。

基于上述岩样负泊松比形成机理的微观解释, 我们认为试验时初期阶段的试验结果并不是岩样弹性力学参数的真实反映, 而是岩样晶粒结构的性质, 所以对于上述测试中出现的负泊松比阶段数据可以舍去, 而取岩样后期正常阶段得到的数据计算确定泊松比较为妥当, 否则可能使计算值偏小。

5 结 论

综合上述试验工作以及理论分析可以得到以下结论:

(1) 基于前人的力学研究成果, 以及在两类完全不同试验过程中观察到岩样泊松比为负值的情况, 在排除各种人为失误的基础上, 有理由相信岩石类材料在某种特殊条件时泊松比可为负值, 包括微观结构包含大量孔隙以及较低荷载水平等特定条件。

(2) 对于出现负泊松比的岩样, 其实际泊松比值可按照试验后期在岩样呈现出正常变形规律后, 按照相应的计算方法进行确定, 以本次试验为例, XASDIII-2 的泊松比参考图 4 的 BC 段曲线求得。

(3) 晶粒转动模型尽管是为解释无机晶体材料负泊松比效应而提出的一个理论模型, 同时它也能合理地解释岩石类材料出现负泊松比的现象。由于缺少电子显微镜等关键设备, 本文遗憾地未对出现低压阶段负泊松比的岩样进行实物微观扫描分析, 建议将来在遇到类似情况时, 开展进行相应的微观显微结构分析, 对该模型进行验证也是一项极具意义的工作。

参 考 文 献

- [1] 钱伟长, 叶开沅. 弹性力学[M]. 北京: 科学出版社, 1956: 76—79.
 - [2] LAKES R. Foam structures with a negative Poisson's ratio[J]. *Science*, 1987, (235): 1 038—1 040.
 - [3] 史炜, 杨伟, 李忠明, 等. 负泊松比材料研究[J]. 高分子通报, 2003, (12): 48—57.
- SHI Wei, YANG Wei, Li Zhong-ming, et al. Advances in negative Poisson's ratio materials[J]. *Chinese Polymer Bulletin*, 2003, (12): 48—57.

- [4] 杨鸣波, 阳霞, 李忠明, 等. 负泊松比材料的结构和性能[J]. 高分子材料和工程, 2001, 17(6): 15—18, 24. YANG Wu-bo, YANG Xia, LI Zhong-ming, et al. The structure and properties of the material with negative Poisson's ratio[J]. **Polymer Materials Science and Engineering**, 2001, 17(6): 15—18, 24.
- [5] 黄智, 王万录, 廖克俊, 等. 具有负泊松比材料的研究进展[J]. 材料导报, 2002, 16(10): 49—51. HUANG Zhi, WANG Wan-lu, LIAO Ke-jun, et al. Advances in research on with negative Piosson's ratio materials[J]. **Materials Review**, 2002, 16(10): 49—51.
- [6] CHOI J B, LAKES R S. Fracture toughness of re-entrant foam materials with a negative Poisson's ratio: experiment and analysis[J]. **International Journal of Fracture**, 1996, (80): 73—83.
- [7] 王让甲, 樊冀安, 高学之. 岩石负泊松比的探讨[J]. 探矿工程, 1996, (4): 17—19. WANG Rang-jia, FAN Ji-an, GAO Xue-zhi. Note on rock with negative Poisson's ratio[J]. **Exploration Engineering**, 1996, (4): 17—19.
- [8] 王让甲. 声波岩石分级和岩石动弹性力学参数的分析研究[M]. 北京: 地质出版社, 1997: 96—101.
- [9] 涂忠仁, 孙钧, 蔡晓鸿. 海底隧道围岩抗力系数计算方法研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(8): 77—82. TU Zhong-ren, SUN Jun, CAI Xiao-hong. Researches on calculation methods of rock resistant coefficients of submarine tunnels[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2006, 28(8): 77—82.
- [10] GRIMA J N, EVANS K E. A novel mechanism for generating auxetic behaviour in reticulated foams: missing rib foam model[J]. **Journal of Material Science Lett**, 2000, (19): 1 563—1 565.
- [11] GRIMA J N, ALDERSON A, EVANS K E. An alternative explanation for the negative Poisson's ratios in α -cristobalite[C]//In Proceedings of the 4th International Materials Chemistry Conference, Dublin: [s. n.], 1999: 81—87.