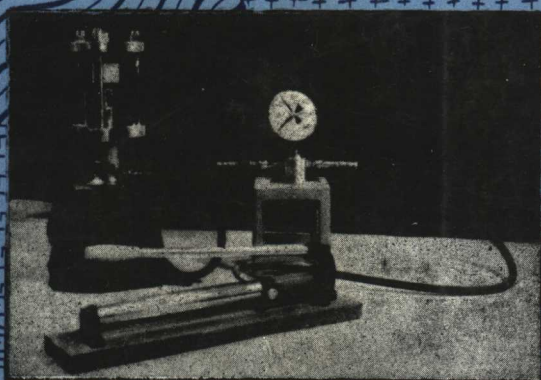


岩石点荷载测试及其应用

李茂兰 钟光宙 编著

西南交通大学出版社



岩石点荷载测试及其应用

李茂兰 钟光宙 编著

西南交通大学出版社

1994年3月

(川)新登字 018 号

岩石点荷载测试及其应用

李茂兰 钟光宙 编著

*

西南交通大学出版社出版发行

(成都 九里堤)

新华书店经销

西南交通大学出版社印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 1/32 印张: 4.5625

字数: 90 千字 印数: 1—1000 册

1994 年 3 月第一版 1994 年 3 月第一次印刷

ISBN 7—81022—662—2/P·014

定价: 3.80 元

前 言

岩石力学强度指标是涉及岩石的工程建筑物设计的主要技术参数之一，提供的试验数据是否准确，对工程安全和造价关系极大。岩石强度的测定过去一直是从工地选取少量岩芯或岩块送到试验室，按岩石试验规程的要求，用专门机械制备试件，在压力机上进行试验。它大量耗费人力、物力和财力，因而是很不经济的；并且，常规试验的试件数量有限，使测试数据的代表性和可靠性受到很大影响；特别是对于岩质软弱或严重风化或层理裂隙发育的岩石，由于取不出完整岩芯或虽然有岩样而无法加工成标准试件，不能用常规岩石试验测定其强度，这就成了岩石强度测试工作中的一大难题。

点荷载试验，仪器小型轻便，并可用不规则块体作试验，为在工地开展岩石力学强度测试开辟了道路，填补了岩质软弱或严重风化或层理裂隙发育岩石强度测定的空白，从而可获得显著的经济技术效益。因此，国际岩石力学协会已正式将点荷载测试技术列为测定岩石强度的建议方法之一。在国外，从70年代初期起，已逐渐将点荷载测试技术应用于生产实践。我国从70年代末期起，有些部门的一些单位先后开展岩石点荷载测试技术的应用研究，90年代此种测试方法已正式纳入我国的国家标准《岩石试验方法标准》，即将在全国范围内推广应用。因此，编写本书的目的在于为

从事岩石点荷载测试技术应用与研究的工程技术人员和科技工作者提供参考。

本书在简述国内外已有点荷载主要研究成果的基础上，总结了作者十余年来开展岩石点荷载测试技术应用研究的成果。选取含高（单轴饱和抗压强度 $R_s > 100 \text{ MPa}$ ）、中（ $50 \text{ MPa} \leq R_s \leq 100 \text{ MPa}$ ）、低（ $R_s < 50 \text{ MPa}$ ）三个强度等级的岩石，其岩性包括花岗岩、玄武岩、闪长岩、大理岩、片岩、板岩、石灰岩、石英砂岩、长石砂岩、粉砂岩和泥岩，制备点荷载及常规岩石强度试验的试件。作试件尺寸效应与形状系数效应对单轴抗压强度和点荷载强度指数影响的对比试验；作试件数量对基准强度指数影响的对比试验；作不规则块体与规则基准试件的点荷载对比试验；作轴向与径向点荷载对比试验；作烘干、烘干饱和及天然饱和试件的点荷载对比试验和作基准试件的点荷载与常规岩石强度试验的对比试验。主要研究内容包括：

1. 点荷载试验和单轴抗压试验的基准试件规格及不同规格试件强度测试值的修正方法。
2. 每组点荷载试验试件的最低数量。
3. 应用点荷载测试技术测定岩石单轴抗压强度和抗拉强度。
4. 应用点荷载测试技术测定岩石抗剪强度参数（含切层和顺层剪切）。
5. 应用点荷载测试技术测定岩石弹性模量（含静、动弹性模量）。
6. 应用点荷载测试技术测定岩石软化系数。
7. 研制“PM—2型点荷载仪”。

主要研究成果包括：

1. 拟定点荷载试验和单轴抗压试验的基准试件规格和提出不同规格试件强度测试值的修正公式。

2. 建立点荷载试验与常规岩石强度试验的相关关系，提出：

(1) 单轴抗压强度、抗拉强度与基准强度指数的相关式；

(2) 切层剪切和顺层剪切的抗剪强度参数与基准强度指数的相关式；

(3) 静、动弹性模量与基准强度指数的相关式；

(4) 岩石软化系数与基准强度指数的相关式。

3. 提出了PM—2型点荷载仪设计图及样机。

4. 编制了应用点荷载测试技术测定岩石单轴抗压强度、抗拉强度、抗剪强度参数、弹性模量及软化系数的PC—1500型和PB—700型袖珍机的计算程序（此两项程序未编入本书）。

1993年3月29日至30日，在成都，铁道部建设司和中国铁路工程总公司，联合组织孔德坊教授和蒋爵光教授等12名专家，对《应用点荷载试验测定岩石单轴抗压、抗拉、抗剪强度及弹性模量的研究》成果进行技术鉴定，对此项研究成果水平的评价是：“总体上达到了国际先进水平”（鉴定证书编号：(93)铁建科鉴字02号，(93)中铁程技鉴字05号）。

PM—2型点荷载仪，已于1988年10月10日通过院级技术鉴定，对该仪器研究成果水平的评价是：“本仪器达到了国内同行业的先进水平”（鉴定证书编号：铁二院8804

号)。并且，从1989年起已小批量生产推广应用。

本书由李茂兰执笔。主要取材于作者主持研究的三项点荷载科研成果：《应用点荷载试验测定岩石单轴抗压、抗拉强度的研究》（铁道部基建科研合同“铁基85—52号”）、《应用点荷载试验测定岩石抗剪强度及弹性模量的研究》（“铁基88—14号”）和《PM—2型点荷载仪的研制》（院控项目）。全书共五章，另有六个附录。

本书初稿写出后，得到黄炳文高级工程师的热情支持和帮助，他对全书的结构、内容编排和材料取舍等方面提出了宝贵意见。作者谨向黄炳文同志和允许引用其资料的单位与个人表示诚挚感谢！

作者水平有限，书中错误在所难免，恳请读者批评指正。

李茂兰 钟光宙

1993年10月

目 录

第一章 点荷载试验基础知识

- 第一节 点荷载试验基本概念和特点..... 1
- 第二节 点荷载试验理论说明..... 3
- 第三节 点荷载试验分类..... 6
- 第四节 点荷载试验研究成果简述..... 9
- 第五节 岩石强度分类及其意义.....13

第二章 点荷载仪

- 第一节 概 述.....14
- 第二节 仪器结构与特点.....14
- 第三节 仪器使用方法.....17
- 第四节 压力表简易缓冲装置.....19
- 第五节 硬质合金加荷珠.....21

第三章 点荷载基本问题试验研究

- 第一节 单轴抗压试验的试件尺寸效应与形状
系数效应.....23
- 第二节 点荷载试验的试件尺寸效应与形状
系数效应.....30
- 第三节 点荷载试验的试件加荷点间距取值.....47
- 第四节 点荷载试验的试件数量.....50

第五节	不规则块体点荷载试验结果的精度	53
第六节	加荷方向对强度指数的影响	56
第七节	不同含水状态下试件强度指数的修正	59

第四章 点荷载试验方法

第一节	概 述	67
第二节	试件制备	67
第三节	试验步骤	69
第四节	试验成果计算	70

第五章 点荷载测试技术的应用

第一节	概 述	73
第二节	测定岩石单轴抗压强度	74
第三节	测定岩石抗拉强度 (劈裂法)	77
第四节	测定岩石抗剪强度	80
第五节	测定岩石弹性模量	103
第六节	测定岩石软化系数	115
第七节	测定岩石强度各向异性指数	117

附录一	岩石按点荷载基准强度指数分类	119
-----	----------------	-----

附录二	按单轴饱和抗压强度 (R_s) 的百分数确定容许承载力	121
-----	---------------------------------	-----

附录三	莫尔应力圆包络线与公切线求法	122
-----	----------------	-----

附录四	点荷载仪标定	129
-----	--------	-----

附录五	回归方程显著性检验表	131
-----	------------	-----

附录六	点荷载试验记录计算表 (插表)	
-----	-----------------	--

参考文献		133
------	--	-----

第一章 点荷载试验基础知识

第一节 点荷载试验基本概念和特点

将具有一定尺寸和形状系数的岩石试件置于点荷载仪的上下两个加荷锥之间，通过机械装置施加集中荷载直至试件破坏，然后根据试件的破坏荷载和加荷点间距，计算试件材料的强度指数，这就是点荷载试验。这种加荷方式和所加的荷载称为点荷载。

上述的试件尺寸与形状系数，除自身固有的常识性涵义以外，更各有其特定的涵义：“尺寸”指的是包含两个加荷点在內的试件破坏截面在垂直于加荷轴方向上的平均宽度（径向试验指的是试件直径），它相当于常规压缩试验中圆柱状试件的直径，方柱状试件或立方体试件的边长；“形状系数”指的是试件加荷点间距对尺寸的比值，相当于常规压缩试验中的试件高径比或高边比。为了简明，本书有时候将两者合称为“试件规格”。试验证明：岩石试件的材料相同而规格不同，测试结果也不同。由于尺寸不同引起测试值不同，称为尺寸效应；形状系数不同造成测试值的差异则称为形状系数效应。为了比较各试件的强度测试结果，尺寸效应和形状系数效应都必须加以修正，作为修正依据的尺寸和形状系数，本书称为“基准”，有的文献则称为“参考”，如“参考直径”等。符合基准条件的试件称为“基准试件”，

其它则称为非基准试件。各国、各地区和各部门采用的基准，目前常不一致。

加荷锥是把荷载直接传到试件上的圆锥形器件，其顶端形状和尺寸将影响试件破坏荷载的大小，从而影响测试值的准确性。布劳奇和富兰克林在《点荷载强度试验》^{〔1〕}中建议的标准化加荷锥样式如图 1—1 所示，其球端曲率半径为 5 mm，锥顶角为 60°，目前已广泛采用。

点荷载试验的机械装置即点荷载仪，大致由三个部分构成^{〔1〕}：加荷系统、荷载测量系统和加荷点间距测量系统。本书将在第二章详细介绍一种由作者研制的“PM—2 型点荷载仪”。

点荷载试验的成果，用点荷载强度指数表示。强度指数 I ，是由试件破坏荷载 P 和加荷点间距 D 直接计算求得，不过不同的研究成果各有不同的表述和规定，本书采用最简单的形式 $I = P/D^2$ ，因为 P 和 D 的测定简单准确。非基准试件的强度指数称为原始强度指数，用 I_r 表示，以 MPa 计；用基准试件测试的强度指数或原始强度指数经过尺寸效应修正和形状系数效应修正后的强度指数均称为基准强度指数，用 $I_{r(n)}$ 表示，以 MPa 计，其下标括号中的 n 为基准尺寸，以 mm 计。 $I_{r(n)}$ 不仅容易通过试验和计算取得，而且与单轴抗压强度 R 、抗拉强度 σ_t 、抗剪强度参数 C 和 φ 、弹性模量 E 、和软化系数 K 等常用的岩石力学指标密切相关，它也许会成为岩石力学的一

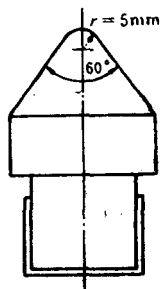


图 1—1 加荷锥形状

个通用测度。

点荷载试验的加荷方式与常规试验采用承压板施加均布荷载的加荷方式不同，因而形成了自身的诸多特点：

1. 加荷锥对试件施加荷载时接触面积很小，从而使试件破坏总荷载比常规试验所需的小得多，这样就可以把仪器轻型化，便于携带到工地作试验。

2. 由于接触面积很小，试件不需要作专门的机械加工（切和磨等），只需用地质锤等简单工具将工程钻探岩芯或取自露头的岩块进行粗略加工修整后便可作为试件使用（力学上的理论说明见本章第二节），从而为在工地开展岩石力学强度测试工作开辟道路，大大降低试验成本，缩短试验周期。

3. 点荷载试验由于可用不规则块体作试件，从而解决了常规试验工作中难以按规程要求加工成标准试件的软弱岩石或严重风化岩石强度测定难题，填补这类岩石强度测试的空白。

4. 利用点荷载与常规岩石强度对比试验研究得出的相关关系，在工地作一组点荷载试验便能同时提供几种有关的岩石力学数据。

由此看来，点荷载试验具有快速、简便、成本低并可弥补常规试验的不足等特点，这些特点也是它的优点。

第二节 点荷载试验理论说明

鉴于编制采矿计划和控制山体压力等实际工作需要及西方国家使用不规则试件寻求岩石压缩强度的试验研究，日本

研究者平松良雄、冈行俊和木山英郎进行了点荷载试验的研究，并于1965年发表论文《用不规则岩样的抗张强度快速试验》⁽¹⁾论证用点荷载试验迅速测定岩石抗张强度这一方法的可能性。

他们用环氧树脂做了一个直径9.4 cm的球、一个边长9.2 cm的立方体和一个8.8 cm × 15 cm × 15 cm的长方体作为试件，对这三个试件分别施加52.5 kg的点荷载并加以变温处理，然后切片作光弹效应观察对比。在包含两个加荷点的切片上观察到的等色条纹如图1—2所示。

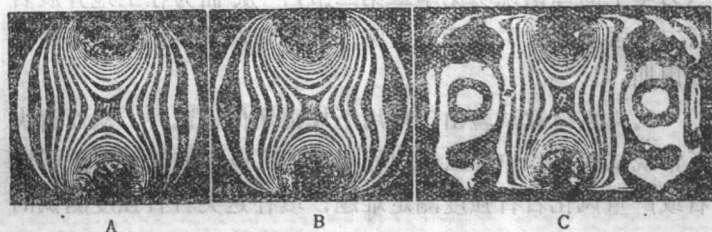


图1—2 三维光弹实验的图象（根据平松良雄和冈行俊）

A—球体的；B—立方体的；C—矩形柱体的

从图象中可以看出，三个不同形状的试件其应力状态在加荷轴附近基本相同，因而可以认为球体的弹性分析能说明不规则块体中的应力情况。平松等进一步对半径为 a 的弹性球体在点荷载作用下的应力状态作了应力分析，其结果如图1—3所示。从图中可以看出：

(1) 沿加荷轴的切向应力 $(\sigma_{\theta})_{\theta=0}$ ，在距球心 $1/2$ 半径的范围内为大致相等的拉应力，超过此范围后，拉应力略微增大，然后迅速减小而成为压应力；

(2) 径向应力 $(\sigma_r)_{\theta=0}$ ，在上述范围内为压应力，其数值约为切向应力的 5~10 倍；

(3) 上述两项应力基本上与加荷中心角 $2\theta_0$ 和材料泊松数 m 无关；

(4) 在加荷点周围都是压应力，其应力值距加荷点愈近愈大。

虽然光弹试验试件材料的均质状态与岩石试件大不相同，球体内的应力状态和不规则块体内的应力状态是否完全一致也尚未证实，而且在点荷载的加荷点附近的极狭窄范围内发生压碎破坏，但理论分析和宏观迹象仍使研究者作出谨慎而客观的结论：“姑且认为各种岩石的不规则试件进行点荷载试验时，……试件的破坏是由于 $(\sigma_r)_{\theta=0}$ 引起的结果。因而根据点荷载压裂试验确定抗张强度的可能性是存在的。”

1976 年，S.S 彭在《受轴向双点荷载的圆柱状岩石圆盘的应力分析》^{〔1〕}中，用有限单元法分析了圆盘状和圆柱状

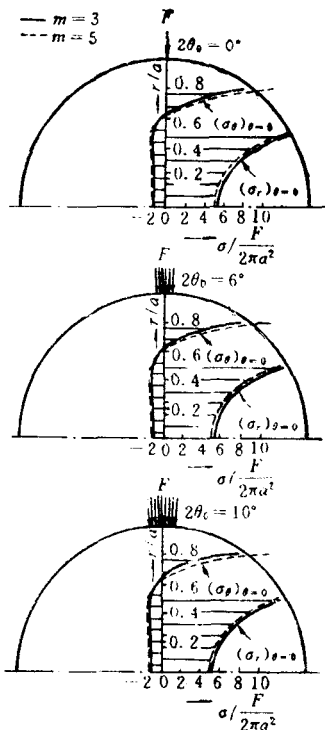


图 1—3 试件加荷轴上径向应力 (σ_r) 和切向应力 (σ_θ) 分布图
(据松良雄和冈行俊)

试件在点荷载作用下的应力场。结果表明，压应力“只存在于试件表面或者距表面不深的一带”，而试件的内部则出现“广泛而颇高的拉应力”。虽然荷载点附近产生压裂现象，而试件发生整体破裂的则是试件内距荷载点一定深度的加荷轴上的拉应力。

虽然 S·S 彭和平松等两者对试件内应力状态的分析结果有较大分歧，但对试件破坏机制的结论则完全一致：拉应力破坏。这就为点荷载试验中观察到试件断口上的拉断特征提供了理论说明。平松等的实验和分析为不规则试件的使用提供了理论依据。

第三节 点荷载试验分类

根据国际岩石力学协会的建议，点荷载试验分为径向试验、轴向试验、方块体试验和不规则块体试验，其加荷方向和试件形状要求如图 1—4 所示。上述分类含两个标准：试件几何形状和加荷方向，有直接意义的是加荷方向；方块体试验和不规则块体试验属轴向试验范畴，因为其原始强度指数需要进行同轴向试验一样的修正才能达到统一的基准强度指数。

一、径向试验

径向试验的加荷方向和试件形状要求如图 1—4(a) 所示，其特点是加荷方向与钻取岩芯的方向垂直。布劳奇和富兰克林的研究⁽¹⁾认为：当试件长度与直径之比不小于 1 时，“强度指数即不受（试件）末端面不规则的几何形状的影响”。因此，原始强度指数只需进行尺寸效应修正，而不必考虑形状系数效应的修正。

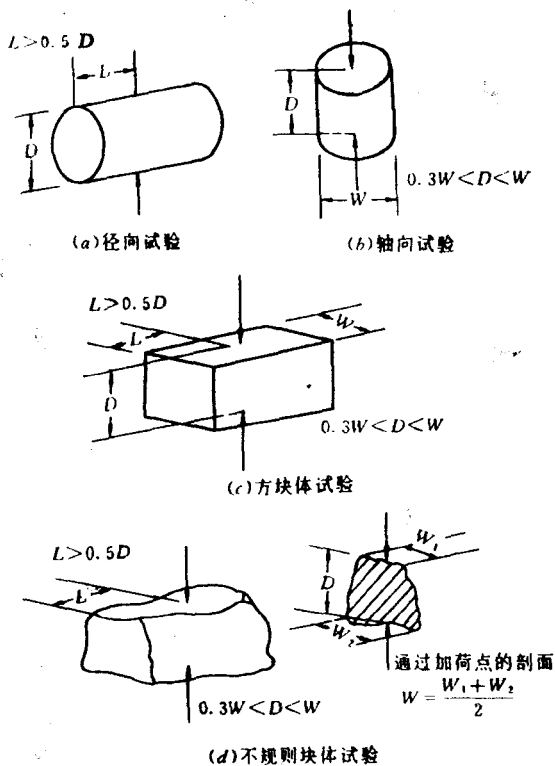


图 1-4 岩石点荷载试验分类及对试件形状的要求

径向试验影响因素虽然最少，但是它在工程实践中的应用十分有限，因为工程需要了解的往往是荷载方向上的岩石强度，而工程勘探钻取岩芯的方向往往与荷载方向一致，所以径向试验在加荷方向上不符合工程要求。只有各向同性

的均质岩芯，其径向试验结果可代替轴向试验结果应用于工程，不过工程实践涉及各向异性岩石的机会要比各向同性岩石多得多。当然，需要确定岩芯试件的强度各向异性指数时，径向试验是必不可少的。

二、轴向试验

轴向试验如图 1—4(b) 所示，其特点是加荷方向与钻取岩芯方向一致，布劳奇和富兰克林的研究结果⁽¹⁾：轴向试验原始强度指数除了受尺寸影响外还受形状系数的影响，这种尺寸影响远远小于试件长度与直径之比不同时所引起的形状系数的影响。换句话说，轴向试验的形状系数效应远远大于尺寸效应。

轴向试验的影响因素虽然比径向试验多，但是，由于试件的受力方向与工程建筑物的受力方向一致而被广泛应用，它既适用于各向同性的均质岩芯，也适用于各向异性的非均质岩芯。当然，它也是测定岩芯试件强度各向异性指数时不可缺少的手段。

三、方块体试验

方块体试验如图 1—4(c) 所示，它属于轴向加荷范畴，其原始强度指数可按轴向试验的修正方法进行修正。

这种试验的试件主要是作为工程材料的水泥砂浆试块。

四、不规则块体试验

不规则块体试验如图 1—4(d) 所示，所谓不规则块体，指的是从天然或人工露头敲取下来的，具有一定体积的岩块，用地质锤等简单工具略加修整达到基本成形（大致能测出三轴尺寸）即可用于试验的试件，它最能体现点荷载试验的特点和优点。