

水文地质工程地质选辑



岩石点荷载实验

地质出版社

岩石点荷载试验

水文地质工程地质选辑第十二辑

地质出版社

岩石点荷载试验

水文地质工程地质选辑第十二辑

成都地质学院水文地质及工程地质系

点荷载试验研究小组编译

国家地质总局书刊编辑室编辑

地质出版社出版

张家口地区印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

1979年10月北京第一版·1979年10月北京第一次印刷

印数1—4,190册·定价0.80元

统一书号：15038·新451

目 录

国外对岩石点荷载试验的研究概况	(1)
用不规则岩样的抗张强度快速试验	(32)
为测定岩石抗拉强度的圆盘试验、圆环试验、矩形板试验 和不规则试样试验	(46)
受轴向双点荷载的圆柱状岩石圆盘的应力分析	(58)
点荷载强度试验	(68)
地质技术实践中的点荷载试验	(100)
为测定脆性材料抗拉强度和相对脆性的点荷载试验	(112)
以引张强度作为花岗岩类风化程度的物理指标的研究 ——花岗岩风化研究报告——	(137)

国外对岩石点荷载试验的研究概况

成都地质学院水文地质及工程地质系
点荷载试验研究小组

一、引言

将岩石试样置于上下两个球端圆台之间，利用球端圆台状加荷器对试样施加压力，直至试样破坏，通过计算求得试样强度。这就是岩石的点荷载试验。

过去，在工程实践中，对于测定脆性材料（如混凝土、岩石、陶瓷、玻璃等）的抗拉强度在技术上遇到很大困难，直接测定法由于试样的夹持部分应力集中常导致过早的破坏，而各种间接测定法也各自存在着这样或那样的问题。后来发现，脆性材料在一点荷载作用下发生破坏具有明显的拉断特征。因而早在三十年代即有人开始探索利用点荷载试验测定混凝土的抗拉强度。但由于利用这种方法测定抗拉强度还缺乏理论依据，而且在试验方法和计算公式上也缺乏大量试验数据加以验证，所以在四十年代和五十年代中，并未在生产实践中正式应用。直到六十年代以来，由于生产大规模发展的需要，对点荷载试验的研究者日众，不仅基本上解决了理论依据问题，使这种试验方法日臻完善，正式用于混凝土和岩石力学性质的试验，而且在其应用范围方面也有着很大的发展。特别值得指出的是，进行这种试验所利用的试样，已从规则形体的（圆盘状的、圆环状的，等等）发展到可以利用不规则形体的。这样，一方面可以解除过去常规试验中制备试样

这一沉重负担，使试验工作的时间大大缩短，成本降低；另一方面对那些强度很低或严重风化以致无法制备形体规则的试样的岩石，也有可能较容易地测定它们的强度。这就大大扩展了这种试验方法的应用范围和提高了它们的使用价值。

近年来，利用环氧胶合剂解决了脆性材料直接抗拉试验中试样夹持部分的应力集中问题，利用点荷载试验这种间接方法以测定抗拉强度，已退居次要地位。但是，它的实用价值并没有因此而降低。由于在这种受力情况下试样中的应力状态比较复杂，七十年代以来，欧美各国又开始了对点荷载试验多方面的应用和研究，其中包括确定岩石的抗压强度，并从而作为岩石强度分类的标准和估算岩石的三轴强度；作为划分基岩风化带的标志；研究岩石强度的各向异性以及岩石抗爆破和抗冲击破碎的能力。

点荷载试验之所以能够得到广泛发展，原因在于它具有两个主要优点：一是通过平台的球端部分对试样加荷，接触面积很小，使试样破坏所需要的总荷载比常规抗压试验所需要的小得多，故可采用小型轻便的试验机，便于携带，能够在工地进行试验；二是可以利用不规则形体的试样，试样无需进行机械加工，一定长度的钻探岩心以及从基岩露头上敲击下来的岩块，用地质锤略加修整后，都可直接用于试验，这样就大大降低了试验成本，缩短了试验时间，而且填补了用常规试验无法进行的低强度和严重风化岩石的强度测定这一空白。尽管用这种方法所测得的数值的分散性，一般高于常规方法，不过，实践证明，这一方面可用增加试验数量取得数学统计值的方法提高其精度；另一方面即使精度比用常规方法稍低，但从工程实用观点出发，也还是可以基本满足需要的。

国外关于点荷载试验的研究文献甚多，由于时间和条件的限制，我们只阅读到了其中的一部分（并择其重要者译编于后），加以我们的水平所限，因而在本文中错误和片面之处，在所难免，尚希读者批评指正。

二、点荷载作用下试样中的 应力状态和破坏机制

为了研究在点荷载作用下试样的破坏机制，首先必须了解在点荷载作用下试样中的应力状态。在这方面，国外研究者们已进行过不少工作，他们得出的结论基本一致，但也不完全相同。

关于应力状态的理论分析，对于径向受压的球体是比较容易的，但对点荷载试验更较广泛应用的不规则块体则困难较大。由于这一原因，日本研究者平松良雄和冈行俊首先利用三维光弹实验将球体和不规则块体试样在点荷载作用下的应力状态进行了对比，探讨能否通过对球体的分析说明不规则块体中的应力情况。他们对直径为9.4厘米的球体、边长为9.2厘米的立方体和 $15 \times 15 \times 8.8$ 厘米的矩形柱体三种模型进行了光弹实验。结果如图 1 所示。从图像中可以清晰看出，在加荷轴附近，三种形状试样中的应力状态基本相同，因而他们的上述设想得到了肯定。

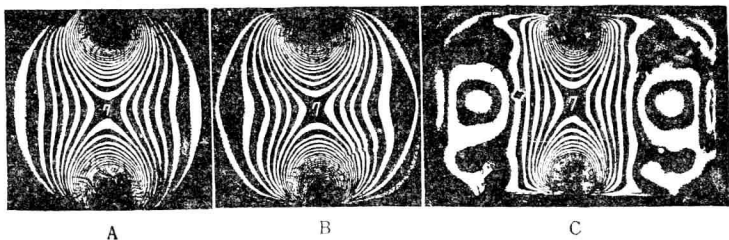


图 1 三维光弹实验的图象

(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

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进行了数学分析，导出了球体内任一点上各应力组份的计算公式。然后就加荷中心角 $2\theta_0$ 为 0° 、 6° 和 10° 三种情况，材料的

泊松数 m 为3和5，分别计算了球体内部加荷轴上的两个主应力 $(\sigma_\theta)_{\theta=0}$ 和 $(\sigma_r)_{\theta=0}$ ，将计算结果表示在图2中。从图2中可以看出：

1. 沿加荷轴 $(\sigma_\theta)_{\theta=0}$ 在距球心一半半径的范围内为大致相等的拉应力，超过此范围后，拉应力微微增大，然后即迅速减小而成为压应力；

2. $(\sigma_r)_{\theta=0}$ 在上述范围内为压应力，大约为 $(\sigma_\theta)_{\theta=0}$ 的5至10倍；

3. 上述二者基本上均与 θ_0 和 m 无关；

4. 在加荷点周围二者均为压应力，且随加荷点距离的减小而增大。

这样就提出了试样的破坏究竟是属于什么性质的问题。平松和冈后来又根据莫尔强度理论和弹性理论，用产生初始拉断的荷载与任何其它既定点引起破裂所需要的臆测荷载之比，对这一问题进行了分析

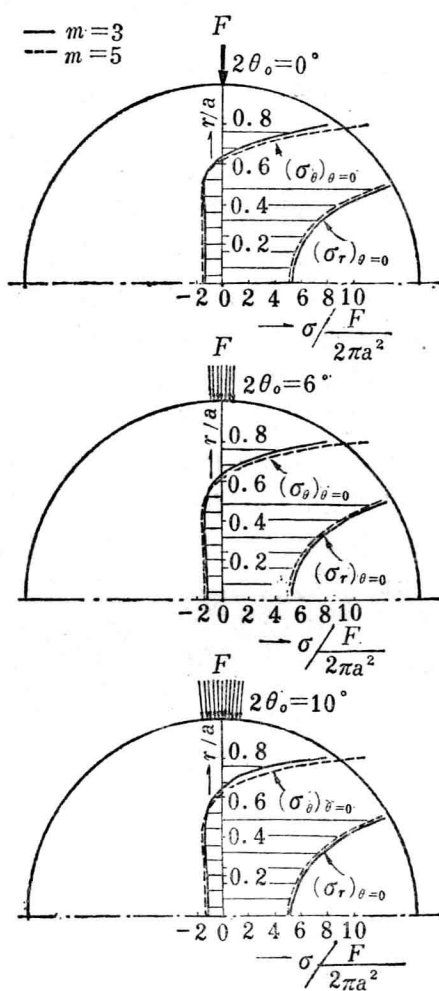


图2 $(\sigma_\theta)_{\theta=0}$ 和 $(\sigma_r)_{\theta=0}$ 沿加荷轴的分布
(根据平松良雄和冈行俊)

研究。结果认为，当加荷角不小时，加荷点附近的强烈压应力和破裂面上的双轴应力状态，都不会妨碍试样因分布在破裂面中央区的拉应力而发生拉断。遗憾的是，在他们后来的文章（1970）中对这个问题只提出了结论性意见，而没有作较为详细的说明。

S. S. 彭 (Peng) 利用有限单元法分析了圆盘状和圆柱状试样在点荷载作用下的应力场。他所采用的试样，厚度固定为 4 英寸，直径分别为 1、2、4 和 6 英寸。单元数目决定于试样的形状，但都为八节点正六面体。材料的杨氏模量为 2×10^6 磅/英寸²，泊松比为 0.25。所施加的压力为 16 磅。分析结果表明，无论是切向压应力或者径向压应力都只存在于试样的表面上或者距表面不深的一带，而在试样内部引起了广泛而颇高的拉应力。他认为，尽管在荷载作用点附近产生压碎现象，但引起试样整体破裂的起点是在荷载作用点之下某种深度的垂直轴上，这种破裂是因双轴（径向的和切向的）拉应力产生的。裂纹一旦形成，一方面裂纹的尖端就成为一种“应力升高器”，另一方面切向拉应力发挥了较大的作用，使裂纹沿径向发展。当其向加荷点方向发展而进入切向压应力区时，如果活动着的裂纹的动能不能大到足以克服切向压应力的影响，裂纹的发展即停止。从上述情况来看，彭的研究结论，就试样在点荷载作用下的破坏机制来说，与平松和冈的结论是一致的；但在应力状态上有较大的分歧，前者认为在试样内部 σ_θ 和 σ_r 都是拉应力，而后者却认为在加荷轴中间部分 σ_θ 是拉应力， σ_r 是压应力。

美国研究者 D. R. 赖克马特 (Reichmuth) 对材料在点荷载作用下的破坏机制，在 A. 纳代 (Nadai) 和 T. O. 马尔赫恩 (Mulhearn) 工作的基础上进行了进一步的观察研究。他的结论与平松和冈基本一致，可以作为后者理论研究的补充。赖克马特指出，在点荷载作用下，试样中发生两种独立的现象（图 3）。在距加荷点一定距离之外的一个范围内，介质中产生了垂直于加荷轴方向的弹性拉应力。在加荷点附近，发生雁行式(en échelon)

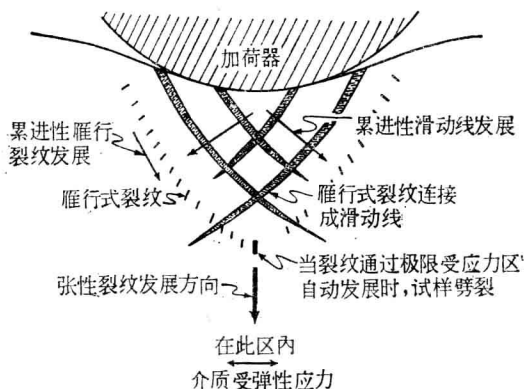


图3 D.R.赖克马特提出的破坏机制示意图

裂纹，它们呈弯曲状排列；荷载增大时，它们相互靠拢而形成滑动线。随着荷载进一步的作用，这种裂纹可在一个范围内产生，且在应力作用下自然地发展，直到与上述弹性拉应力区连接后，试样即在拉应力作用下发生劈裂。

三、试验机的设计

从目前所查阅到的文献中可以看出，无论在日本或者欧美各国所使用的点荷载试验机，其主要工作原理和结构基本相同，大致由三个部分构成，其主要特征如下：

1. 加荷部分

主要包括油压机、承载框架和加荷器。

考虑到点荷载试验所采用的试样尺寸不宜过大或过小，加荷点间距一般应在50毫米左右，加以尽量减轻试验机的重量以便于野外搬运也是设计这种仪器的重要前提，因而油压机的最大容量也应与之适应。容量过小就不可能对强度较高的岩石进行试验，过大则使试验精度降低，而且也必然增加油压机的重量。在欧美各国一般采用最大容量5吨的油压机。在平松良雄和冈行俊的试

验中，他们使用了市场上出售的最大荷载为8000公斤/厘米²的引张试验机，为了提高对较弱试样的试验精度，又加上了一个最大读数为1000、最小读数为20公斤/厘米²的压力计。

对承载框架的基本要求有三点。一是框架应有足够的刚度，勿使在加荷过程中发生变形；二是应能调节加荷点的间距，以容纳不同尺寸的试样；三是尽可能地减小框架的重量，因为它是仪器总重量的最重要的组成部分。

根据所查阅到的资料来看，各研究者所采用的加荷器的形状和尺寸是不一致的。赖克马特对平面试样采用了球端圆杆（直径为八分之三英寸），而对曲面则采用直径为八分之三英寸的辊子。在平松和冈的试验中则采用了具有曲率半径为7.5毫米球状突起的模板。E. 布劳奇（Broch）和J.A.富兰克林（Franklin）用球端圆台状和楔状两种加荷器进行了对比试验，认为球端圆台状加荷器具有较多的优点，并将其标准化，采用球端的曲率半径为5毫米，圆锥体的顶角为60°（图4）。这种标准化了的加荷器，已多为以后的研究者采用。此外，加荷器球端部分应有足够的硬度，以保证在多次试验中不发生变形和不受损伤。

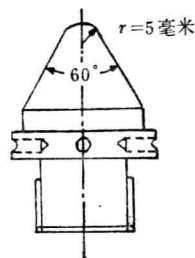


图4 标准化了的点荷载试验加荷器
（根据布劳奇等）

2. 荷载测量部分

一般都使用了压力表。布劳奇等提出，无论试样的强度如何，压力表都应保证破坏荷载读数的精度达到 $\pm 2\%$ 。在压力表上最好装一个最大值指针，以便在试样破坏后保留荷载数值，便于记录。

3. 距离测量部分

保证精确测量破坏时上、下加荷器之间的距离，对于计算强度值是十分重要的。一般采用最小刻度为1毫米的钢尺，以便使

读数的精度达到 ± 0.5 毫米。

四、关于试验方法和试验条件的研究

关于岩石点荷载试验的一般方法和步骤，在布劳奇和富兰克林以及其他研究者的著作中已有较详细的阐述，在这里不准备重复，仅将其中一些对试验结果有重要影响的问题简述如后。

1. 试样尺寸

过去在点荷载试验中，采用过以下形状的试样，如圆盘状的、圆环状的、立方体的、矩形板状的、矩形柱状的、圆柱状的和不规则形状的。前五种都属于规则形状的，需要专门加工制成；圆柱状试样实际上是直接利用钻探岩心，而两端并不需要加工磨平，所以严格说来也是不规则形状试样的一种。由于点荷载试验发展到目前阶段，利用需要专门加工的规则试样，实用意义已经不大，而这种试验方法的重要意义，正在于能够利用其它方法所无法利用的不规则形状试样。因此，下面只对圆柱状和不规则形状试样试验中的一些问题加以讨论。

在讨论这一问题之前，必须说明一点，即所谓尺寸变化，包括以下两种情况：一是对于圆柱状试样来说，长度 L 与直径 D 之比的变化；对于不规则试样来说，最长轴 L 与最短轴 D 之比的变化。二是在 L/D 比值不变的情况下， L 和 D 的变化。

(1) 圆柱状试样

按照加荷方向的不同又可分为径向试验和轴向试验。

根据研究，直径一定的试样在径向试验中，如果长度 $2L$ 足够大，则引起破坏的拉应力在试样内部达到最大值，因此破坏荷载 P 与试样长度和表面情况无关。为了确定能够保证破坏荷载不受影响的这一最小长度，布劳奇等利用直径为38毫米、长度不同的砂岩试样，进行了实验研究，结果表示在图5中。从图中可以看出，当 $L/D \geq 0.5$ 时， I_s ($I_s = P/D^2$ ， P 为破坏荷载， D 为加荷点

间距，在圆柱状试样的径向试验中即岩心直径。 I_s 称为点荷载强度指数）即基本保持在一个变化不大的水平上；如果 $L/D < 0.5$ ，则 I_s 值偏低，这显然是由于末端影响所致。所试验的砂岩是相对均质的，考虑到大多数岩石的各向异性所必然造成的影响，布劳奇建议，在一般情况下，可采用 $L = 0.7D$ 。

布劳奇和富兰克林以及Z. T. 别尼亚夫斯基

基 (Bieniawski) 在实验研究中发现，试样的强度值随尺寸的增加而降低。如前所述，当 $L/D \geq 0.7$ 时，试样长度就不会对强度数值发生影响；那末，这显然是因直径的变化而引起的。这样，在对利用不同直径岩心所测得的强度值进行比较时就遇到了严重的困难。为了解决这一问题，规定采用统一直径的岩心当然是不现实的，那末就必须采取适当的修正措施。赖克马特的意见是修正计算强度的基本公式（关于这一问题将在第五节中详述），别尼亚夫斯基则在利用点荷载试验确定单轴抗压强度时根据不同直径采用不同的换算系数（将在第五节中详述）。布劳奇和富兰克林的意见是将利用任何直径的岩心所得到的 I_s 值修正为一个“参考性直径”的强度指数。他们考虑到应将这个参考性直径的数值选在生产实践中最常见的岩心直径之间，故定为50毫米，并将其强度指数表示为 $I_s(50)$ 。这种修正，可利用他们所绘制的图解

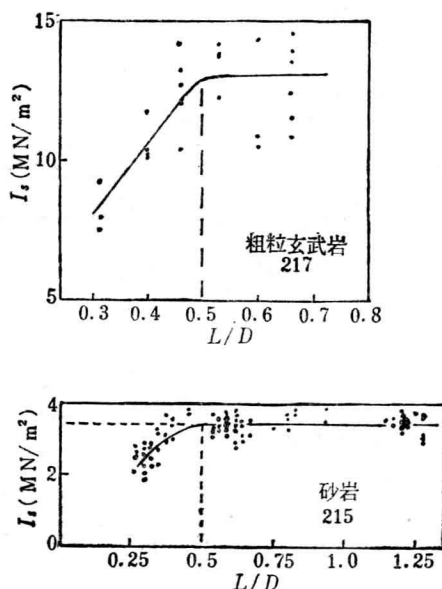


图5 破坏荷载与 L/D 的关系
(根据布劳奇等)

(图6) 进行。

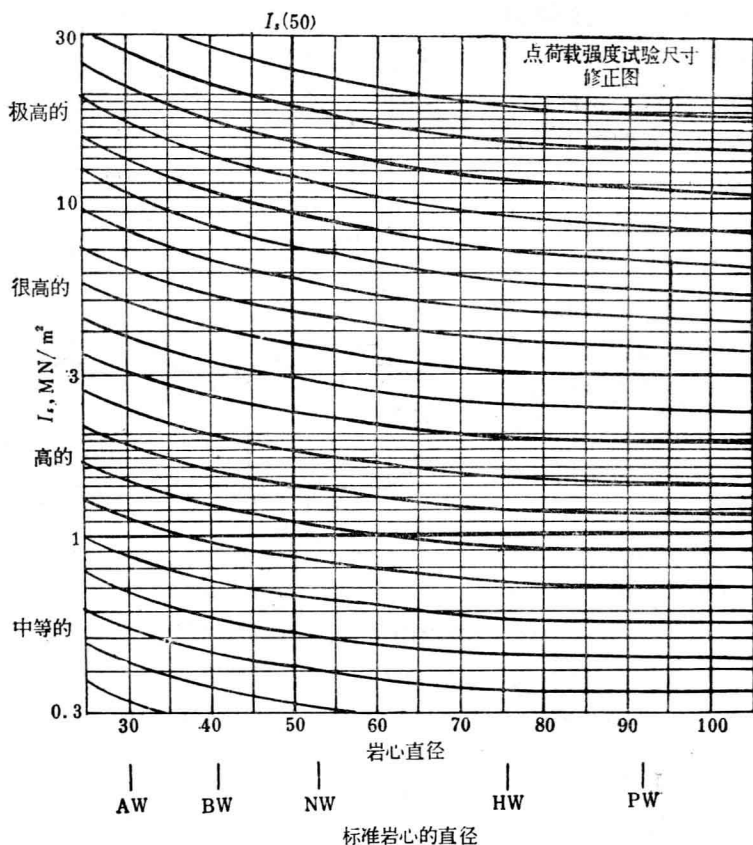


图6 布劳奇和富兰克林提出的尺寸修正曲线图

由于布劳奇和富兰克林所选定的参考性直径为50毫米，显然他们也推荐尽可能地采用50毫米或者近于50毫米直径的岩心进行试验，以减少修正问题。但是别尼亚夫斯基考虑到国际岩石力学协会 (ISRM, 1973) 和美国试验和材料协会 (ASTM, 1971) 所规定的标准的岩石强度试验，以及D.U.迪尔 (Deere) 所提出

的标准的岩石质量指标(RQD)，都采用了直径为54毫米的NX型岩心，他建议点荷载试验也应同它们统一标准。此外，上述研究者还从实验中发现，当试样的直径过小时，加荷点的大小相对于试样尺寸来说，与理论上的“点”相差太远，致使尺寸修正变得既大而又多变。因此布劳奇和富兰克林认为试样直径不应小于25毫米，而别尼亚夫斯基则主张不能小于42毫米（BX型岩心）。

为了研究在轴向试验中试样尺寸的影响，布劳奇和富兰克林对直径为25，38和54毫米的砂岩和石英粗玄岩岩心按六种长度（ D ）与直径（ d ）比锯成了大约160块试样，进行了轴向试验。试验结果列于图7中。图中表明，在 D/d 一定时， I_s 随 d 和 D 增大略有减小；但在 d 相同的条件下， I_s 随 D/d 的增加却显著降低。这

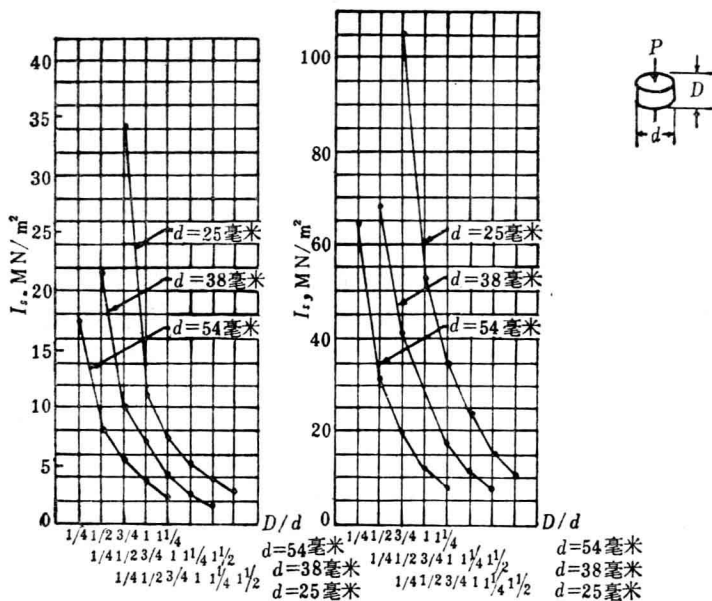


图7 在轴向试验中试样尺寸对强度的影响

(根据布劳奇等)

说明了规定 D/d 值对于轴向试验具有特别重要的意义。他们将这些试验结果与上述径向试验结果对比,发现在轴向试验中当 D/d 为 1.1 ± 0.02 时,两种试验的结果相同(表1)。 0.02 的公差大致相当于长度 ± 1.1 毫米,这样的精度实际上是难以达到的。因此他们建议在轴向试验中试样长度与直径之比采用 1.1 ± 0.05 (± 0.05 的公差相当于长度 ± 2.5 毫米,实验证明这一公差可使轴向和径向两种试验结果产生10%的最大偏差)。但是,S.S 彭应用有限单元法对试样内部应力状态的分析表明,当 $D/d < 1.00$ 时,试样内部的应力状态才能保持稳定,所以他建议最好的试样形状应当是 $D/d < 1.00$ 。

表 1 使轴向试验和径向试验结果相同的长度与直径之比

(根据布劳奇等)

岩 石 名 称	岩 心 直 径 (毫米)		
	25	38	54
达 雷 达 耳 砂 岩	1.10	1.07	1.08
石 英 粗 玄 岩	1.12	1.11	1.11

通过实验研究,布劳奇和富兰克林以及别尼亚夫斯基一致认为,由于在轴向试验中尺寸影响非常明显,除在对岩石强度各向异性的研究中仍是必要的试验方法之一以外,一般情况下不如采用径向试验。

(2) 不规则形状的试样

所谓不规则形状的试样,系指从岩石的天然或人工露头敲取下来的一定体积的石块,用锤头等简单工具略加修整即可用于试验的试样。用这种试样,比用圆柱状试样或规则形状试样,尺寸影响更为强烈。但是许多研究者的大量实验资料证明,如果对试样形状予以足够的注意并适当增加平行试验的数量,结果的精度仍然是能够满足实践需要的。

从目前查阅到的文献中发现,各研究者对试样加荷的方向的意见并不一致。日本研究者平松良雄和冈行俊、木宫一邦、法国研究者F.迪尔纳(Diernat)和P.迪福(Duffaut)、V.莫里(Maury)等人主张沿试样最短轴加荷,而且木宫一邦指出,只有如此才能使以加荷点间距为直径的理想球体完全包含在试样之中,以便试样内部应力的分布与该球体内的应力分布基本相同。但是苏联研究者M.M.普罗托佳科诺夫(Протодьяконов)以及布劳奇和富兰克林等人的实验却都是沿着试样的最长轴加荷的,在他们的文献中并没有说明这样进行试验的根据或优点。法国的研究者们曾经证明,在对花岗岩所进行的试验中,沿短轴加荷比沿长轴加荷,强度可增加一倍。因此,关于加荷方向的问题,今后必须研究统一。

关于不规则形状试样的尺寸,布劳奇和富兰克林是根据对圆柱状和正方柱状试样的试验对比得出的。由于圆柱试样轴向试验(因为他们主张沿最长轴加荷)中试样的长度与直径之比 D/d 采用1.1,而正方柱试样的相应比值为1.4,所以他们建议不规则试样的形状系数(系指受荷点之间的距离与同它正交方向上试样的最小尺寸之比)采用1.0—1.4。加荷方向上的试样长度(布劳奇等所指的长轴),他们建议尽可能接近50毫米,以便减少修正,而尺寸的允许误差以引起强度变化 $\pm 15\%$ 为限。国际岩石力学编辑部一九六四年所推荐的形状系数为1.5,与前者相似;对试样体积建议为100立方厘米左右,则比布劳奇等所建议的大得多,而与平松等所采用的最短直径为5厘米较为接近。此外,哈尼夫(Hanif)的试验多采用直径为22.5毫米的试样,而布鲁克(Brook)最近则提出试样的最小横断面积应为500平方毫米,这都低于宾尼亚斯基对圆柱状试样所提出的允许范围。因此,在这方面也还有待于更多的试验资料逐步论证。

对于点荷载试验来说,试样尺寸的影响非常重要,其中,对不规则试样的试验尤其明显,必须予以充分的重视。宾尼亚斯基