

# 红砂岩强度的试验研究

姚 环

(福州大学资源工程系)

**摘 要** 通过室内试验的方法,研究了红砂岩的抗压(拉)强度、抗剪强度等特性.揭示与分析了红砂岩的工程力学性能及变化特征和规律;评价与探讨了影响红砂岩强度特性的主要因素.

**关键词** 红砂岩;强度参数;软化系数;库仑强度方程;各向异性系数

红砂岩是我国华东、华南及西南等地区分布较广泛的“红层”中代表性岩石之一,形成于白垩纪至第三纪早期(K-E)<sup>[1]</sup>,常塑造成巍峨绮丽的地貌景观.近年来,“红层”地区的工程建设迅猛发展,遇到由红砂岩构成的地基、围岩介质(洞室)及边坡工程等方面的问题日益增多,同时红砂岩常被大量开发为建筑石料,这些都要求对红砂岩的工程力学性能进行深入的评价研究,而强度问题又是其重要内容.因此,笔者采用室内试验的方式对红砂岩的强度特性与规律进行了研究.

## 1 抗剪强度

岩石抗剪强度的试验测定法有 10 多种,其中三轴试验被认为是最能反映实际受力状况的方法.但是,需要昂贵的设备且操作技术繁杂、费工时.因此,作者选择了常用的设备简单,操作方便,精度与三轴试验相近似(偏差 10%,偏差系数为 10~15%)的斜角板间加压单面剪切法,如图 1 所示<sup>[2]</sup>.采用了 5 cm × 5 cm × 5 cm 的立方体和径高比为 5:5 的圆柱两种试样块.将试样放在压力机上的—对斜角板间,使用角度不同的系列楔形角(钢板).以调整加荷轴向与预定剪坏面的夹角  $\theta$ (图示 1).

压力机施加的垂直荷载自动分解为垂直和平行于剪坏面的正应力和剪应力分量.为消除对角板水平移动的阻力,在角板与试验机承压板之间放置了系列滚轴.笔者采用的  $\theta$  角分别为 30°、35°、40°、45°,试样分为饱和和干燥两种情况,试验成果数汇于表 1,它表明红砂岩剪断面上的剪断力  $\tau_f$  与正应力  $\sigma_n$  明显随  $\theta$  角值的增加而增大.而且,随含水量的不同,红砂岩的  $\tau_f$  和  $\sigma_n$  有剧烈的变化.从所得的软化系数看,饱和水时红砂岩的  $\tau_f$  和  $\sigma_n$  值分别仅为干燥时的一半(47~52%)和三分之一(30~31%)还少.这说明,含水量具有明显降低红砂岩

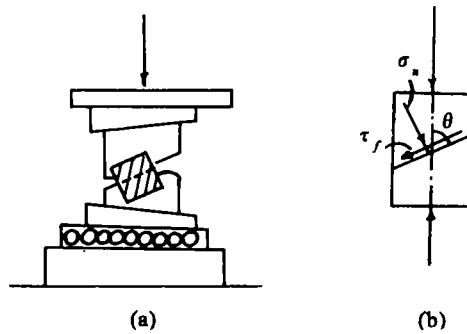


图 1 变角板间单面剪切示意图

本文收到日期: 1994-02-25

姚 环,男,1949 年出生,讲师

抗剪强度的作用。

另外, 从表 1 数据可以看出, 圆柱形试样的平均剪断力 $\bar{\tau}_f$ 值和平均压应力 $\bar{\sigma}_n$ 值不论是在干燥情况下, 还是在饱和情况下, 都远小于立方体试样的平均剪断力和正应力( $\tau_f$ 和 $\sigma_n$ ), 前者分别仅为后者的 69%(干燥)和 42~44%(饱和时)。它表明, 试样尺寸大小及其有限的误差对岩石抗剪强度的影响或许很小, 可不考虑(Ilnitskaya)<sup>[2]</sup>。但是, 试样形态对红砂岩的抗剪强度的影响是显著的, 尤其在饱和情况下不容忽视。

表 1 剪断面上的剪断力  $\tau_f$  与正应力  $\sigma_n$  数据表

试样形态	含水情况	$\theta$ 角值	剪断力 $\tau_f$ / MPa		软化系数	正应力 $\sigma_n$ / MPa		软化系数
			数值范围	平均值 $\bar{\tau}_f$		数值范围	平均值 $\bar{\sigma}_n$	
立方体	干燥	30°	16.64	25.59	0.46	9.61	20.64	0.52
		35°	25.61			19.93		
		40°	31.63			26.53		
		45°	28.49			28.49		
	饱和	30°	9.11	12.02		6.37	10.64	
		35°	14.92			14.92		
		40°	11.38			6.57		
		45°	16.58			11.61		
圆柱形	干燥	30°	11.38	17.59	0.29	18.21	14.28	0.31
		35°	16.58			20.73		
		40°	21.69			18.21		
		45°	20.73			20.73		
	饱和	30°	2.69	5.26		1.53	4.38	
		35°	4.72			3.31		
		40°	5.95			4.99		
		45°	7.69			7.69		

采用“普氏”图解法<sup>[2]</sup>和库仑强度方程( $\tau_f = \sigma_n \lg \varphi + C$ )数解法分别对试验数据进行求解, 分别求得饱和时和干燥时的红砂岩的抗剪强度指标, 即内聚力( $C$ )和内摩擦角( $\varphi$ )值。

1) “普氏”图解法 采用绘制直线型包线法<sup>[2]</sup>, 即通过两点绘一直线并延长交于纵轴( $\tau_f$ 值轴)。据此量测出一系列的内聚力( $C$ )和内摩擦角( $\varphi$ )值, 经整理计算所得的结果列于表 2 中。

表 2 红砂岩的抗剪强度指标

试样形态	含水情况	内聚力 $C$ / $10^2$ kPa			内摩擦角 $\varphi$		
		变化范围	平均值 $\bar{C}$	软化系数	变化范围	平均值 $\bar{\varphi}$	软化系数
立方体	干燥	95.6~142.5	124.5	0.301	19.5°~39.5°	33°	1.25
	饱和	37.5	37.5		41.5°	41.5°	
圆柱形	干燥	105.0~145.0	124.5	0.344	16.5°~28°	22.5°	1.17
	饱和	18.5~51.50	32.5		19.5°~46.5°	33°	

2) 用库仑强度方程求解法 采用库仑强度方程( $\tau_f = \sigma_n \lg \varphi + C$ )并依据上述的“普氏”图解法绘制直线型包线时的点的组合关系, 构成一系列二元一次方程组, 通过求解这些系列方程组, 得到相应的红砂岩的抗剪强度参数即内聚力( $C$ )和内摩擦角( $\varphi$ )值, 其结果汇于表 3 中。

表 3 抗剪强度参数表

试样形态	含水情况	内聚力 $C / 10^2 \text{ kPa}$			内摩擦角 $\varphi$		
		变化范围	平均值 $\bar{C}$	软化系数	变化范围	平均值 $\bar{\varphi}$	软化系数
立方形	干燥	82.0~207.0	132.0	0.36	15.5°~41.5°	31°	1.10
	饱和	47.2	47.0		34.5°	34°	
圆柱形	干燥	99.8~148.2	125.6	0.23	11.5°~28.5°	21.5°	1.63
	饱和	15.0~49.7	28.3		15.5°~52.7°	35°	

从上述的表 2、3 中可看出红砂岩的抗剪指标即内聚力  $C$  值和内摩擦角  $\varphi$  值受含水量的影响很显著。饱和时红砂岩的  $\bar{C}$  仅为干燥时的三分之一或甚至低于四分之一。但是，饱和时红砂岩的  $\bar{\varphi}$  却为干燥时的 1.10 倍甚至 1.63 倍，内摩擦角  $\varphi$  值随含水量的增加而显著增大。它表明，红砂岩浸水饱和后，其中的钙质及其它可溶性胶结物大量被溶失与软化，因而显著地降低了红砂岩颗粒间的联结力即  $C$  值。相反地，由于粒间胶结物的溶失与软化，使得在荷载力作用下，原是发生在胶结物微粒间的摩擦阻隔变成红砂岩颗粒间的直接摩擦阻隔，因此，内摩擦角必然会明显地增大。但是，表 1 显示饱和时红砂岩抗剪强度低于干燥时的二分之一(49%)甚至三分之一(30%)。它说明，构成红砂岩抗剪强度的关键因素是  $C$  值，即红砂岩的抗剪强度主要取决于其中的胶结物的溶解性和软化程度，这是红砂岩明显有别于其它一般砂岩的重要特性之一。

## 2 抗拉强度

拉伸断裂是岩石破坏的主要类型之一，抗拉强度是岩石的重要特性之一，而且岩石的抗拉强度比抗压，抗剪强度都小很多<sup>(3)</sup>。测定岩石抗拉强度的方法有两类 10 多种<sup>(2)</sup>。本文选用了目前广为使用且较有代表性的两种方法：一是立方形块径向压裂试验法<sup>(2)</sup>；二是劈裂法<sup>(3)</sup>。

### 2.1 立方形块径向压裂试验研究

采用 5 cm × 5 cm × 5 cm 的立方块试样(烘干)，在压力机与试样接触面之间分别放置球形钢珠(直径为 1 cm)钢线( $\varphi$  0.15 cm)与钢条宽(0.82 cm)垫物，用以传递垂向荷载力，而且分为单面与双面施放垫置物的不同做法，分别称 B 型和 A 型试验放置，如图 2 所示。加荷方向均为垂直红砂岩层面。

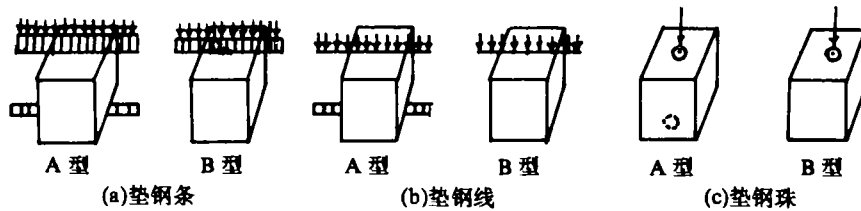


图 2 立方形块径向压裂试验试样的 A 型和 B 型垫物装置

试验数据见表 4。从表 4 看出红砂岩的抗拉强度受垫置物形态及垫置型式的影响较为明显。总的规律是 B 型的极限荷载和抗拉强度都大于 A 型，为 A 型的 1.10~1.48 倍，这与 Davies 和 Stayg(1970 年)用一般砂岩作的试验结果即  $B/A = 1.40 \sim 1.48$ <sup>(2)</sup> 是相近似的。另

外,表 4 说明红砂岩的极限荷载和抗拉强度受垫置物的尺寸大小及形状的影响是很突出的. 钢线垫置时的极限荷载和抗拉强度最小,钢条垫置时最大,钢珠垫置时介于二者之间. 而且最大的为最小的 2.48 倍,中间的为最小的 1.6 倍. 它证明红砂岩的抗拉强度随垫置物宽度(或直径)加大而增加. 这与长江科学院所作的黑云母石英内长岩试验成果<sup>[3]</sup>一致. 但是,贝伦鲍姆和布罗迪(Brodic)1959 年用煤试块作的试验结果是抗拉强度与垫置物的尺寸无关<sup>[2]</sup>,这种相反的结论,似乎说明岩石的抗拉强度的尺寸效应与岩石类型、性质特征、试验技术及试样尺寸误差等因素有关.

表 4 红砂岩抗拉强度试验数据

垫物形态	垫置类型	极限荷载 / kN	B / A	抗拉强度 $\sigma_t / 10^2$ kPa			B / A
				变化范围	平均值 $\bar{\sigma}_t$	总平均值 $\bar{\sigma}_t$	
钢珠 (1 cm)	B 型	8.85	1.48	33.21~35.3	34.3	28.66	1.49
	A 型	6.00		21.7~24.4	23.1		
钢线 (0.15 cm)	B 型	4.90	1.10	17.5~19.5	18.5	17.84	1.10
	A 型	4.50		17.1~17.2	17.5		
钢条 (0.83 cm)	B 型	12.80	1.24	47.5~50.5	48.99	44.20	1.28
	A 型	10.30		38.5~40.4	39.4		

## 2.2 劈裂法试验研究

依据 DLJ204-81, SLJ-81<sup>[3]</sup> 对红砂岩进行劈裂法试验. 压力机的加荷方向与红砂岩层面的关系分别为垂直的和平行的两种,试样分为饱和和干燥的两组. 试验所得的结果数据汇于表 5 之中. 从表中可以看出,红砂岩的抗拉强度受含水情况及加荷方向与岩层面的夹角关系的影响显著. 饱和时的抗拉强度仅为干燥时的一半或近五分之三. 这是因为,岩石的抗拉强度仅由其基质即胶结物或颗粒间联结的粘结力构成<sup>[3]</sup>. 而当红砂岩浸水饱和后,其中的钙质或其它可溶性胶结物的溶解与软化从而使红砂岩的抗拉强度锐减. 同时,红砂岩的抗拉强度具有明显的各向异性,载荷方向与层面的关系为垂直时的抗拉强度是平行时的 1.2~1.3 倍(平均值). 它说明了红砂岩层理面间的联结强度小于层理内部的粘聚联结强度.

表 5 红砂岩的劈裂法试验成果表

含水情况	荷载方向与 岩层面的关系	抗拉强度 $\sigma_t / \text{MPa}$		软化系数	各向异性系数
		变化范围	平均值 $\bar{\sigma}_t$		
干燥	垂直	1.39~2.83	2.180	(垂直)0.58	1.20
	平行	1.18~2.56	1.860		
饱和	垂直	1.09~1.95	1.270	(平行)0.495	1.40
	平行	0.54~1.240	0.920		

另外,将干燥时垂直型的平均抗拉强度与上述的立方块压裂法中的钢线垫置型的平均抗拉强度相比较,前者是后者的 1.22 倍. 说明试样的厚度及垫置物的材料性质形态和类型对红砂岩的抗拉强度有明显的影响. 这是因为垫置物(条)使施加的压力变为线布荷载,使试样中产生垂直于加荷方向的拉应力(张应力),一旦垫置物不同,应力转变情况及特性不同. 试样厚度不同时,包含的微裂缝就不同,因而抵抗拉伸破坏的能力就不同,即抗拉强度就不同.

### 3 红砂岩抗压强度的试验研究

抗压强度是岩石的重要力学性质. 测定岩石的抗压强度常被认为是较简单的事, 但实际上并非如此. 因为影响岩石抗压强度的因素多而复杂, 除了试样自身的岩性之外, 还有试样的形态、尺寸、测试条件与技术都可能产生显著的影响, 因此, 所测定的抗压强度一般仅是-定条件下的特征值. 这里采用常规的单轴抗压试验法<sup>[3]</sup>, 对红砂岩进行饱和与干燥两种条件下的抗压强度试验, 并使施加荷载的方向与红砂岩层理面的关系为平行和垂直两种. 试验结果数据汇于表 6<sup>[1]</sup>. 它显示了红砂岩的抗压强度随含水量的增大而显著降低. 这与红砂岩的特殊岩性组份及结构有密切关系. 其次, 垂直于红砂岩层理面方向的抗压强度大于平行层理面方向的, 前者为后者的 1.25 倍(平均值). 它表明红砂岩的抗压强度具有明显的各向异性特点, 与多数一般砂岩的情况是一致的<sup>[1]</sup>.

表 6 红砂岩的抗压强度参数表

含水情况	荷载方向与岩层面的关系	抗压强度 $\sigma_c$ / MPa		软化系数	各向异性系数
		变化范围	平均值 $\bar{\sigma}_c$		
干燥	垂直	2.743~4.867	38.42	(垂直)0.43	1.41
	平行	1.356~4.495	2.731		
饱和	垂直	1.43~1.996	1.654	(平行)0.55	1.11
	平行	1.22~1.824	1.491		

### 4 结语

1) 红砂岩的抗压强度  $\sigma_c$ 、抗剪强度  $\tau_f$  及抗拉强度  $\sigma_t$  相差悬殊. 三者的关系是  $\sigma_c > \tau_f > \sigma_t$ , 如表 7 所示. 这与多数一般砂岩或其它类型的岩石的强度情况是基本一致的. 但是,  $\sigma_c / \sigma_t > 14$ ,  $\tau_f / \sigma_c > 8$ ;  $\sigma_c / \tau_f > 1.8$  这样的比例关系是非同一般的. 因此, 在实践中正确选用红砂岩的强度试验研究方法和强度参数极为重要, 否则偏差或错误将很大.

2) 含水情况对红砂岩的强度影响很大. 饱和时的强度仅为干燥时的一半, 甚至三分之一还少, 如表 7 所示的软化系数. 它说明水对红砂岩的作用效应极为敏感, 其中尤以抗剪强度  $\tau_f$  随含水量增长而降低的幅度最大. 但是, 红砂岩的抗剪强度参数  $C$  (即内聚力) 随含水量增加而剧减, 可是其内摩擦角  $\varphi$  却随含水量的增长而明显提高. 这是与多数一般砂岩或其它岩石所不同的, 它反映了红砂岩的抗剪强度主要是由其基质或颗粒间的胶结粘聚力构成的, 而摩擦阻力所占的比例很小.

3) 红砂岩的强度呈明显的各向异性. 其中抗压强度和抗拉强度的平均各向异性系数为 1.26~1.28, 如表 7 所示. 抗剪强度也具突出的各向异性. 总之, 都显示出垂直于层理面方向上的强度高于平行于层理面方向上的; 这是与多数一般砂岩或其它层状或含结构面岩石的情况相一致<sup>[1]</sup>.

4) 试样的形状对红砂岩的抗剪强度有明显的影响. 立方体试块的抗剪强度是圆柱形的 1.45~2.30 倍. 其次, 试验方法及试样垫置物类型尺寸和组合方式等对红砂岩的抗拉强度都有明显的影响, 一般是  $\bar{\sigma}_t$  随垫置物尺寸的增大而提高. 且劈裂法测得的红砂岩的抗拉强度  $\sigma_t$  值较大, 是正方形块径向压裂法测得的  $\sigma_t$  的 1.22 倍.

表 7 红砂岩强度特性参数表

红砂岩	抗压强度 $\sigma_c$	抗拉强度 $\sigma_t$	抗剪强度 $\tau_f$	内聚力 $C$	内摩擦角 $\varphi$
强度参数	27.43~48.67 MPa ( $\bar{\sigma}_c = 38.40$ MPa)	1.78~4.42 MPa ( $\bar{\sigma}_t = 2.60$ MPa)	17.59~25.59 MPa ( $\bar{\tau}_f = 21.59$ MPa)	9.56~14.82 ( $\bar{C} = 12.67$ MPa)	21.5° ~ 33° ( $\bar{\varphi} = 28.5^\circ$ )
软化系数	0.43~0.55 (平均: 0.48)	0.495~0.58 (平均: 0.54)	0.299~0.47 (平均: 0.38)	0.27~0.36 (平均: 0.32)	1.1~1.63 (平均: 1.28)
各向异性系数	1.11~1.41 (平均: 1.26)	1.2~1.4 (平均: 1.3)	1.64~2.86		
一般砂岩 强度参数	20~200 MPa ( $\bar{\sigma}_c = 40\sim 50$ MPa)	4~25 MPa ( $\bar{\sigma}_t = 8\sim 12$ MPa)			

5) 与一般砂岩或其它类型岩石的强度参数相比较<sup>(2)</sup>, 红砂岩的强度较低, 工程性能较不稳定, 如表 7 所示. 这主要与它的组份结构特征有密切关系. 同时也与红砂岩的形成时代较新, 成岩过程时间较短, 及成岩后环境较特殊等因素有关.

本工作得到李隽莲教授的指导与帮助, 徐建平同志参加了部份试验工作, 特此致谢.

### 参考文献

- 1 蒋爵光, 李隽莲, 钱惠国等. 红砂岩工程性质的研究. 西南交通大学学报, 1984(4): 24~27
- 2 沃特里, 拉马 V S, R D 萨鲁加 S S. 岩石力学性质手册. 水利水电岩石力学情报网译. 北京: 水利出版社, 1981. 65~67, 82~86, 90~91
- 3 水利水电工程岩石试验规程(DLJ204-81.SLJ2081)(试行). 北京: 水利出版社, 1982. 13~14; 28~29; 199~200

## A Testing Study of the Strength of Red Sandstone

Yao Huau

(Department of Resources Engineering, Fuzhou University, Fuzhou, 350002)

**Abstract** The strength properties of red sandstone, such as compressive strength, shear strength and tensile strength, have been measured in the laboratory. On the basis of the tests, red sandstone's engineering mechanics properties and their laws of change have been revealed and analysed. The main factors controlling the strength properties of red sandstone have been also appraised and discussed.

**Keywords** red sandstone; strength parameter; softening coefficient; Clulomb equation; anisotropy coefficient