

基岩-混凝土胶结面剪切强度 JRC-JCS 模型研究

陈 记 ,徐卫亚 ,朱珍德 ,杨庆刚

(河海大学土木工程学院 ,江苏 南京 210098)

摘要 通过室内直剪试验 ,系统地研究了粗糙度、正应力对混凝土与基岩胶结面抗剪强度的影响 ,从而提出微风化花岗岩-混凝土胶结面剪切强度的 JRC-JCS 模型 ,并给出了该模型的粗糙度适用范围 .该模型考虑了粗糙度和正应力对胶结面剪切强度的影响 ,解释了剪切试验结果 .此外 ,讨论了胶结面剪切强度的尺寸效应 ,给出粗糙度系数 JRC 与胶结面尺寸的关系式 ,为工程设计提供参考依据 .

关键词 胶结面 ;JRC-JCS 模型 ;粗糙度 ;尺寸效应 ;岩石 ;混凝土

中图分类号 :TU45 文献标识码 :A 文章编号 :1000-1980(2003)04- 0407- 04

基岩与混凝土胶结面的抗剪强度 ,主要取决于胶结面的粗糙度(凸起体的大小、数量和形状)、混凝土与基岩的强度(包括混凝土与基岩的“ 胶结力 ”和所施加的正应力大小等等 .

粗糙度和正应力对抗剪强度的影响 ,国内外有过许多研究 ,但大都针对岩石节理问题 .Jaeger ,Lane 和 Heck ,Barton 和 Byerlee 是最早研究岩体结构面抗剪强度的专家 ,他们用 Coulomb 线性关系式 $\tau = C + \sigma_n \tan \varphi$ 描述岩体结构面的抗剪强度 .20 世纪 70 年代初 ,Ladanyi 和 Archambault ,Jaeger ,Barton 和 Goodman 等人通过大量的理论研究和工程实践 ,提出了具有齿凸的粗糙结构面双直线强度准则^[1] :

σ 较低时

$$\tau_p = \sigma \tan(\varphi_u + i)$$

(1)

σ 较高时

$$\tau_p = S_j + \sigma \tan \varphi_r$$

(2)

式中 : φ_u ——光滑结构面的摩擦角 ; φ_r ——结构面残余摩擦角 ; i ——结构面齿凸角(爬坡角) ; τ_p ——结构面的峰值抗剪强度 ; S_j ——齿凸抗剪强度截距 ; σ ——作用于结构面上的法向应力 .

Barton 在 100 多条人工拉断节理研究的基础上 ,总结出一种可估算结构面峰值抗剪强度的方法 ,即 JRC-JCS 模型 ,其表达式为^[2]

$$\tau = \sigma_n \tan \left[A_{JRC} \lg \left(\frac{A_{JCS}}{\sigma_n} \right) + \varphi_r \right]$$

(3)

式中 : τ ——峰值抗剪强度 ; σ_n ——有效法向应力 ; A_{JRC} ——节理粗糙度系数 ; A_{JCS} ——结构面壁的抗压强度 ; φ_r ——结构面的残余摩擦角 .

考虑到岩石节理与基岩-混凝土胶结面的相似性 ,笔者将 Barton 提出的岩石节理剪切强度 JRC-JCS 模型应用到基岩-混凝土胶结面的剪切强度上来 .JRC-JCS 模型中的结构面为胶结面 , A_{JCS} 则为混凝土壁的抗压强度 .在 Barton 提出的半定量、半经验确定 A_{JRC} 方法的基础上 ,作者按照 Barton 提供的典型节理剖面糙度 ,人工制作多组不同粗糙度下的岩石-混凝土胶结面试件 ,进行直剪试验 ,通过试验结果反算该试件的理论 A_{JRC} ,与实际的 A_{JRC} 相比较 ,得出该模型的适用范围 .

影响抗剪强度的最重要的外部因素是垂直于胶结面的有效法向应力值 .在许多岩石工程问题中 ,对于结构稳定性起关键作用的有效法向应力一般在 0.1 ~ 5.0 MPa 范围内 .伴随着法向应力的提高 ,在剪摩擦过程中 ,结构面表层会出现擦痕 ,或局部挤压破坏 .当法向应力提高到一定程度后 ,结构面上、下盘之间沿表面的相对滑移逐步过渡到局部或大面积的峭断凸起部分 .所以 ,对于结构面和胶结面的抗剪试验 ,其有效法向应力应有明确的要求^[3~6] .

尺寸效应是影响岩体力学性质的一个重要因素,其本质在于岩体内存在结构面.如何解决岩体尺寸效应问题,许多不同领域的研究者曾对其进行了长期的研究,取得一系列成果.其中比较有意义的研究工作可综述如下^[7~9]:

孙广忠等 1979 年提出岩体强度结构效应法则如式(4),山口梅太郎提出平均强度与尺寸的关系如式(5).

$$\sigma = \sigma_m + (\sigma_0 - \sigma_m)N^{-\alpha}$$

(4)

$$\sigma_m = KV^{-1/m}$$

(5)

式中: α ——结构效应指数; N ——岩体内所含的结构体数; V ——岩样体积.

为研究混凝土与基岩胶结面的抗剪强度,结合某具体工程,在微风化花岗岩与混凝土胶结面上进行了 8 组共 128 个试件的室内直剪试验.根据试验结果,提出了岩石-混凝土胶结面 JRC-JCS 模型,研究了胶结面剪切强度的尺寸效应.

1 试样制作及试验方法

1.1 试样的制作

将钻孔取得的花岗岩岩芯截成 $\varnothing 70\text{ mm} \times 150\text{ mm}$ 的岩样,放于 $150\text{ mm} \times 150\text{ mm} \times 150\text{ mm}$ 的浇注盒中,与强度为 C30 的混凝土浇注成 $150\text{ mm} \times 150\text{ mm} \times 150\text{ mm}$ 的立方体试块,养护 28 d 后再沿花岗岩岩芯直径剖开,在剖开的花岗岩平面上人工制成不同的粗糙度.图 1 给出了典型的剖面糙度.将剖开的具有不同粗糙度的花岗岩-混凝土试块再浇上 C30 混凝土,养护 28 d 后进行试验.

1.2 试验方法

采用 RMT-150 多功能刚性伺服试验机,根据岩石力学试验规程要求,将试件放入剪切盒中,施加一定的法向应力,并以位移控制方式施加剪切荷载,直至试件破坏.

2 胶结面剪切破坏机理

混凝土与基岩胶结面的抗剪强度,一般被认为是由混凝土粘结于岩石的“胶结强度”和两壁间的摩擦强度组成.在完整的混凝土或花岗岩中,具有较高的强度指标:粘聚力 c 和内摩擦角 φ .粘聚力由原生粘聚力、胶结粘聚力和毛细管粘聚力组成.原生粘聚力是指材料颗粒之间的相互作用力.颗粒密度越大,颗粒间距越小,则原生粘聚力越大.显然,单相完整介质的原生粘聚力较双相介质胶结面的大.胶结粘聚力为所含的胶结物所提供,毛细管粘聚力是由毛细管压力引起的.3 类粘聚力中以原生粘聚力所占比重最大.对于内摩擦角而言,剪切面越粗糙,内摩擦角则越大,剪切时受到的内摩阻力也就越大.

笔者根据大量直剪试验后的剪切面观察,发现 (a)粗糙度较大的胶结面,花岗岩凸起体粗大,表面光滑,凸起体未见被剪断,且顶部无混凝土粘附,说明剪断是沿混凝土与基岩凸起体接触面发生的 (b)粗糙度较小的胶结面,花岗岩凸起体完好并粘附有混凝土碎屑,剪切面基本上较平整,说明剪切是沿胶结面进行的并剪断混凝土凸起体.

3 关于胶结面 JRC-JCS 模型

岩石-混凝土胶结面直剪试验结果及应用 JRC-JCS 模型反算得到的粗糙度如表 1 所示.

由表 1 可看出粗糙度对抗剪强度的影响.随着 A_{JRC} 的增大,强度参数中的粘聚力有明显增大的趋势,内摩擦角也有不同程度的增加.通过反算所得的 A_{JRC} 与给定的 A_{JRC} 作比较,可看出应用 JRC-JCS 模型计算胶结面抗剪强度有一定的适用范围.本文建议 JRC-JCS 模型适用的粗糙度范围是:当正应力为 0.1~1 MPa 时粗糙度范围为 12~20;当正应力为 1~2 MPa 时粗糙度范围为 10~20.究其原因,是不同的粗糙度使胶结面的破坏机制发生了转变.

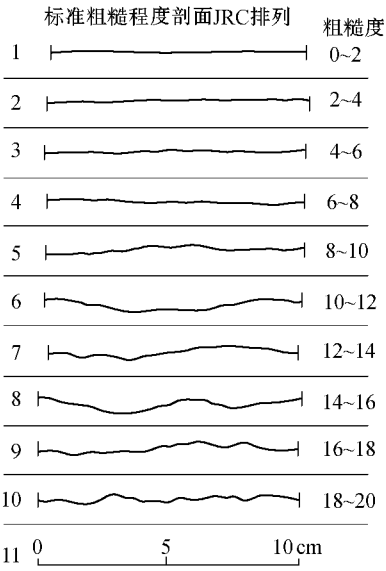


图 1 标准粗糙程度剖面的 A_{JRC}
Fig.1 A_{JRC} for standard roughness section

表 1 岩石-混凝土胶结面直剪试验及 A_{JRC} 反算结果

Table 1 Shear experiment on rock-concrete cement plane and back-calculated results of A_{JRC}

试件组号	A_{JRC}	σ_n /MPa	τ /MPa	A_{JCS} /MPa	φ_r ($^{\circ}$)	反算所得 A_{JRC}	误差 /%	剪切强度参数	
								c /MPa	φ ($^{\circ}$)
1	4	0.444	1.600	35.4	51.3	12.4		1.07	50
		0.888	2.150			10.3			
		1.333	2.634			8.5			
		1.777	3.202			7.6			
2	8	0.444	1.820	34.4	51.7	13.0	62.5	1.25	52.4
		0.888	2.400			11.3	41.2		
		1.333	3.020			10.2	27.5		
		1.777	3.540			9.1	13.7		
3	10	0.444	2.010	35.1	52	13.4	34.0	1.37	54
		0.888	2.560			11.8	18.0		
		1.333	3.243			11.0	10.0		
		1.777	3.830			10.1	1.0		
4	12	0.444	2.300	34.8	52.4	13.9	15.8	1.77	57
		0.888	3.213			13.9	15.8		
		1.333	3.874			13.1	9.1		
		1.777	4.455			12.3	2.5		
5	14	0.444	2.400	33.6	52	14.6	4.3	1.87	58.5
		0.888	3.465			14.9	6.4		
		1.333	4.122			14.3	2.1		
		1.777	4.680			13.4	4.3		
6	15	0.444	2.610	31.4	50.5	16.1	7.3	1.96	58.5
		0.888	3.465			16.2	8.0		
		1.333	4.222			16.0	6.7		
		1.777	4.776			15.3	2.0		
7	17	0.444	2.690	30	50	16.7	1.7	2.07	59.4
		0.888	3.654			17.2	1.0		
		1.333	4.543			17.5	3.0		
		1.777	4.900			16.3	4.0		
8	19	0.444	2.750	27.2	49	17.8	6.3	2.13	60.1
		0.888	3.864			18.8	1.0		
		1.333	4.530			18.8	1.0		
		1.777	5.100			18.4	3.0		

注 :每对正应力和剪应力的实验数据均为 4 个试样试验结果的平均值。

4 胶结面尺寸效应

双相材料胶结面尺寸效应主要体现在双相材料对尺寸的敏感性上.对于花岗岩和混凝土这两类材料而言,岩石的尺寸效应要比混凝土的明显得多.岩石由于其生成条件及其在地质构造作用下形成各种类型的空隙、微裂隙以及宏观可见的各种缺陷,影响到其物理力学性质.因此,岩样大小不同,常表现出其力学性质的差异.图 2 为天然岩体中采取不同尺寸岩样性质示意图.图示最小岩样 1 不含任何天然缺陷,强度最高;图示岩样 2 中包含 1 个单一缺陷(节理),强度低于岩样 1;图示岩样 3 包含 1 组缺陷,强度更低;图示岩样 4 所包含的缺陷密度和形态可代表整个岩体,强度最低.

从胶结面抗剪强度的尺寸效应研究来看, A_{JRC} 是产生尺寸效应的关键因素. JRC-JCS 模型各参数中,法向应力 σ_n 和残余摩擦角 φ_r 是不受节理规模影响的常数,强度参数的尺寸效应是由粗糙度系数 A_{JRC_n} 和壁岩强度 A_{JCS_n} 的尺寸效应引起的.在运用 JRC-JCS 模型预测基岩-混凝土胶结面的力学参数时,必须通过 A_{JRC} 尺寸效应分析,确定实际胶结面的粗糙度系数.实际工程中,直接测量完整胶结面的粗糙度系数很困难,因此,根据试验室尺寸结构面(取样长度为 10 cm,

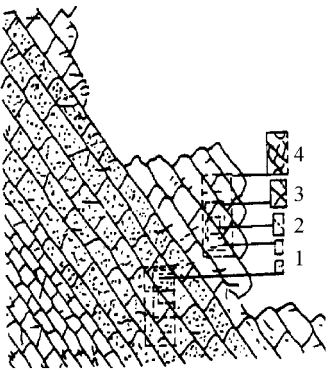


图 2 岩体中不同尺寸的岩样
Fig.2 Rock sample of different sizes

以 L_0 表示)按 A_{JRC} 尺寸效应规律换算实际胶结面的粗糙度系数 (A_{JRC_n})不失为理想的选择.

分析 JRC-JCS 模型可知 粗糙度系数不是纯粹几何意义上的参数 ,而是反映表面粗糙起伏形态对结构面抗剪强度影响程度的力学系数 , A_{JRC} 尺寸效应实质上体现了表面粗糙起伏形态对结构面抗剪强度的贡献随结构面规模增大而减小的特性.

笔者分别在胶结面长度为 50 ,75 ,100 ,125 和 150 mm 的 5 组微风化花岗岩-混凝土试样(人为加工成粗糙度 A_{JRC} 为 14 的试样)上进行室内直剪试验 ,见表 2.

建立 A_{JRC} 尺寸效应修正公式 :

$$A_{JRC_n} = A_{JRC_0} [L_n/L_0]^{-\alpha A_{JRC_0}}$$
式中 : A_{JRC_n} ——实际结构面的粗糙度系数 ; A_{JRC_0} ——取样长度为 10 cm 的标准粗糙度系数 ; L_n ——实际结构面的长度 ; L_0 ——标准长度 , $L_0 = 10$ cm ; α ——修正系数.

用最小二乘法对表 2 中的数据进行处理 ,可得到 $\alpha = 0.022$.

不同粗糙度下的修正系数 α 不同 ,所以实际应用时要根据不同的现场情况来取 α 值.

5 结 论

- a. 在基岩和混凝土强度都相对较高时 ,基岩-混凝土双相材料的剪断是沿胶结面发生的.粗糙度较大时 ,剪断纯粹沿胶结面发生 ,粗糙度较小时 ,剪断主要沿胶结面发生 ,但伴随有混凝土凸起体的剪断.
- b. 进行基岩-混凝土胶结面直剪试验时 ,法向应力必须控制在一个合理的范围 ,本文建议取 0.1 ~ 5 MPa.
- c. 由表 1 的粗糙度反算结果比较 ,可看出基岩-混凝土胶结面的 JRC-JCS 模型较适合用于模拟粗糙度在 10 ~ 20 的剪切试验结果.
- d. 花岗岩-混凝土胶结面抗剪强度的尺寸效应主要体现为花岗岩强度和粗糙度系数 A_{JRC} 的尺寸效应.文中给出了粗糙度系数的尺寸效应修正公式 ,具有一定的参考价值.

参考文献 :

[1] 杜时贵.岩体结构面的工程性质[M].北京 :地震出版社 ,1999. 48—82.
[2] BARTON N ,CHOUBEY V.The shear strength of rock joints in theory and practice[J]. Rock Mech ,1977. 10 :1—54.
[3] 林伟平 ,田开圣 ,曾广平.影响混凝土与基岩胶结面抗剪强度的主要因素研究[J].水利学报 ,1985 (10) 8—16.
[4] 贺有富.胶结面抗剪分析[J].岩土工程学报 ,1986 (3) :1—6.
[5] 陈愈炯.对“胶结面抗剪分析”一文的讨论[J].岩土工程学报 ,1986 (5) 91—92.
[6] 郭志.法向压力对岩体抗剪力学特性的影响[J].水文地质工程地质 ,1994 (2) :14—16.
[7] 尤明庆 ,邹友峰.关于岩石非均质与强度尺寸效应的讨论[J].岩石力学与工程学报 ,2000 ,19 (3) 391—395.
[8] 刘宝琛 ,张家生 ,杜奇中 ,等.岩石抗压强度的尺寸效应[J].岩石力学与工程学报 ,1998 ,17 (6) 611—614.
[9] 章仁友 ,杜时贵.岩体结构面力学行为的尺寸效应研究[J].地质科技情报 ,1993 ,12 (2) 97—104.

Study on JRC-JCS model for shear strength of bedrock-concrete cement planes

CHEN Ji , XU Wei-ya , ZHU Zhen-de , YANG Qing-gang
(College of Civil Engineering , Hohai Univ. , Nanjing 210098 , China)

Abstract :Based on a systematical study of the effects of roughness and normal stress on the shear strength of bedrock-concrete cement planes through laboratory direct shear tests , a JRC-JCS model is developed for slightly weathered granite-concrete cement planes , and the scope of roughness in which the model can be used is given . With the model , the results of shear tests can be explained . Besides , the size effect of the shear strength of cement planes is discussed , and the relationship between the coefficient of roughness and size of cement planes is also derived , providing a basis for reference for engineering design .

Key words : cement plane ; JRC-JCS model ; roughness ; size effect ; rock ; concrete