

柔性混凝土的抗拉特性及其破坏准则研究

顾强生¹, 张小平¹, 施 斌¹, 张青林²

(1. 南京大学地球科学系, 江苏 南京 210093; 2. 中国十三冶十公司, 天津 300301)

摘要 通过极限抗拉强度试验和围压作用下的拉伸试验, 研究了柔性混凝土的抗拉破坏特性. 研究表明, 柔性混凝土与普通混凝土相比, 抗压强度比、极限拉应变明显增大; 围压对抗拉强度影响较小, 对拉应变影响较大, 当发生拉断破坏时, 应以抗拉强度作为破坏准则, 当发生剪断时, 应以莫尔-库仑理论作为破坏准则.

关键词 柔性混凝土; 抗拉特性; 破坏准则

中图分类号 : TU528

文献标识码 : A

文章编号 : 1000-1980(2002)02-0030-05

柔性混凝土是针对三峡二期围堰工程防渗墙而开发研制的一种新材料. 它是利用当地废料风化砂及石屑粉研制出的新型防渗材料——废料柔性混凝土, 性能与塑性混凝土类似, 具有一定的强度和较小的弹性模量以及较大的极限拉应变, 从而使墙体变形能适应堰体的较大变形. 与普通混凝土相比, 可节省大量的水泥, 因而能大大降低工程造价, 同时还具有就地取材、易建、易拆、有一定寿命、能适应较大变形而不破坏等优点, 非常适用于围堰防渗墙体.

混凝土防渗墙在国内外已广为应用, 它的设计标准一般是根据第一强度理论进行强度校核, 而柔性(塑性)混凝土防渗墙在围压作用下, 柔性(塑性)混凝土的强度显著增加, 若采用第一强度理论显然是不合适的.

本文进行了柔性混凝土的抗拉特性试验研究, 探讨了考虑材料性质的莫尔-库仑理论的适用条件, 即拉剪破坏的临界应力状态, 并确定了柔性混凝土的破坏判别指标.

1 柔性混凝土的原材料组成

柔性混凝土主要是由建筑开挖废料风化砂或制造人工骨料的弃渣石屑粉与水泥、膨润土、外加剂配制而成的. 由水泥、风化砂、膨润土、外加剂和水配制的为风化砂柔性混凝土, 由石屑粉代替风化砂制成的称为石屑粉柔性混凝土. 它们的力学性质的最大特点是具有较高的强度和较低的弹性模量, 模强比一般小于 250, 28 d 抗压强度为 4.5 MPa 左右, 弹性模量约为 1 000 MPa.

风化砂为三峡坝区花岗岩全风化带风化石料, 其天然状态的粒径一般小于 20 mm, 其中大于 5 mm 者约占 1/3, 小于 0.1 mm 的细粒料含量(俗称含泥量)通常小于 5%, 不均匀系数 $C_u = 8 \sim 12$.

石屑粉为三峡坝区左岸古树岭人工骨料加工系统生产碎石后剩下的大量石屑弃料, 由于云母含量较高, 不能用于混凝土建筑物. 根据对古树岭弃料进行实地查勘和样品采集, 对不同方位和不同高程的石屑弃料取样检测其细度模数, 并确定各项指标为: 细度模数为 3.02(平均值); 含石量(粒径大于 5 mm)为 9.87%; 石粉含量(粒径小于或等于 0.16 mm)为 10.4%; 视比重为 2.64, 吸水率为 2.0%.

膨润土粉系采用湖南澧县生产的二级膨润土粉, 其中蒙脱石含量为 80.4%. 所用水泥为 425 矿渣硅酸盐水泥. 外加剂采用木钙, 用量为水泥的 0.5%.

2 极限拉伸试验

2.1 试件形状及试验设备

试验参照《水工混凝土试验规程》^[3], 试件形状为翼形, 试件长 600 mm, 两端宽 196 mm, 中间断面为 100 mm × 100 mm. 试验是在万能机上进行的.

2.2 试验结果

分别进行风化砂柔性混凝土(WSPC)和石屑粉柔性混凝土(WRPC)的极限拉伸试验,按照不同龄期做两组试验,一组为 70 d,一组为 210 d,试验结果见图 1、图 2。由图可见,极限拉伸应力应变曲线为近似线性曲线。由表 1 可知,石屑粉柔性混凝土的抗压强度小于风化砂柔性混凝土,但它的抗拉强度、极限拉伸应变和抗拉弹性模数皆比风化砂的大,WRPC 的抗拉强度与抗压强度之比为 0.134,WSPC 的抗拉强度与抗压强度之比为 0.198,说明石屑粉柔性混凝土的抗拉性能较风化砂的好。分析表 1 还可得出,风化砂柔性混凝土,随龄期的增长,抗拉强度的增长幅度很大,由 70 d 到 210 d 抗拉强度增长了 58%,而抗压强度增长了 16.7%,而且极限拉应变也有显著的增长,70 d 时为 1.13×10^{-4} ,到 210 d 时达到 1.86×10^{-4} ,增长了 65%,抗拉弹性模数减小,这是柔性混凝土不同于普通混凝土的一个显著特点。普通混凝土^[1]的极限拉应变为 $0.80 \times 10^{-4} \sim 1.00 \times 10^{-4}$,抗压强度比约为 0.1,可见柔性混凝土的极限拉应变和抗压强度比都明显大于普通混凝土。

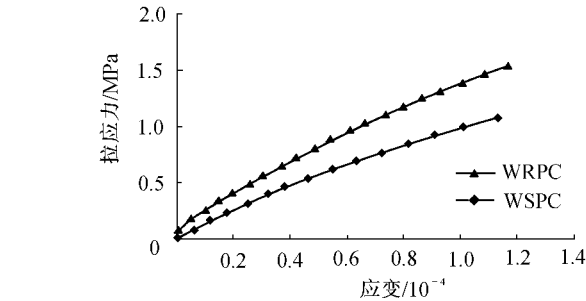


图 1 70 d 极限拉伸曲线
Fig.1 Ultimate tensile curves for 70 d

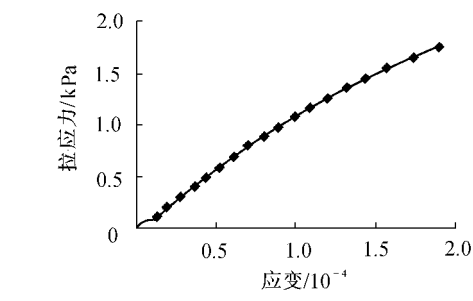


图 2 WSPC 210 d 极限拉伸曲线
Fig.2 Ultimate tensile curve of WSPC for 210 d

表 1 柔性混凝土的极限拉伸试验成果
Table 1 Result of ultimate tensile test of flexible concrete

材料类型	龄期 /d	抗拉强度 R_t /MPa	极限拉应变 $\epsilon_p/10^{-4}$	抗拉弹性模数 E_a / GPa	抗压强度 R /MPa	R_t/R
风化砂柔性混凝土	70	1.12	1.13	14	8.35	0.134
	210	1.77	1.86	9	9.75	0.182
石屑粉柔性混凝土	70	1.60	1.16	16	8.05	0.198

注 : $E_a = \sigma_{0.5} / \epsilon_{0.5}$.

3 有围压作用的拉伸试验研究

3.1 试验仪器的改装

有围压作用的拉伸试验,还没有现成的试验仪器,因此,为了研究柔性混凝土在围压作用下的抗拉性质,笔者对三轴压缩试验仪进行了改进,使其能够满足围压作用下拉伸试验的要求。具体做法是 (a)对量力环进行改进,将量力环上的受力杆上部与量力环接触部位改用销钉固定,下部改成螺丝,以便与试样连接 (b)制作两个圆形铁夹具,用来固定试样的两端 (c)制作两个铁夹具来连接压力室与试样的底座。改装后的试验装置见图 3。

3.2 围压作用下的拉伸试验结果

试件尺寸为 $\varnothing 6.18 \text{ cm} \times 14 \text{ cm}$,加荷速率分别为 0.18 mm/min、0.036 mm/min,围压分别为 0 MPa、0.2 MPa、0.4 MPa、0.6 MPa。试样破坏形式为拉断破坏,如图 4 所示。围压作用的拉伸试验结果见图 5。

由试验结果可以看出,围压的大小对抗拉强度的影响很小,但对应变的影响较大,在围压较大时会出现压应变,且破坏时的拉应变较小,从图 5 可以看出,当围压小于 0.6 MPa 时,破坏时的拉应变随围压的增大而增大,当围压等于 0.6 MPa 时,破坏时的拉应变反而减小。由图可见,随围压的变化,破坏强度变化很小,与单轴抗拉强度接近,说明当围压小于 0.6 MPa 时,破坏是由抗拉强度控制的。由于围压对拉应变影响较大,因此,破坏判别应使用抗拉强度,而不能用拉应变。从图 5 中还可看出,加荷速率不同时,破坏时的抗拉强度和拉应变也不同,加荷速率为 0.18 mm/min 时的抗拉强度和拉应变都较加荷速率为 0.036 mm/min 时的大。

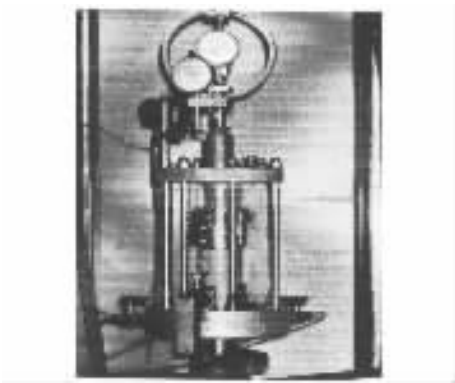


图 3 围压作用的拉伸试验装置
Fig.3 Equipment for tensile test under confining pressure



图 4 试样破坏情况
Fig.4 Sample failure

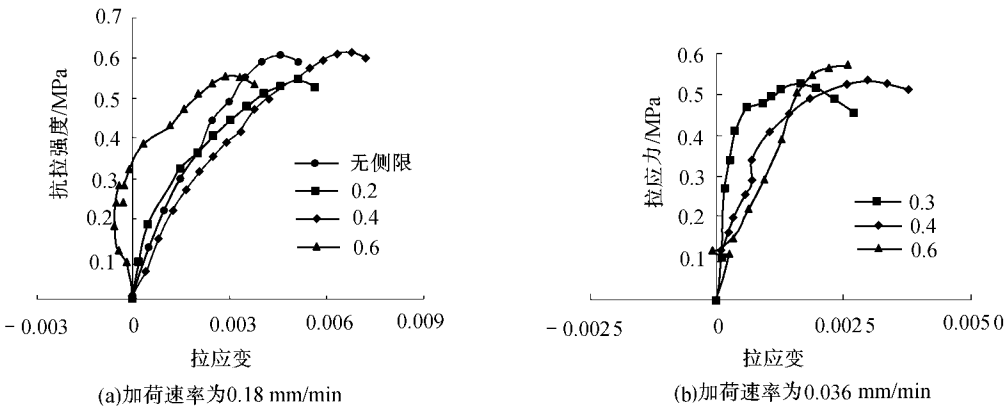


图 5 围压作用下拉伸试验应力应变曲线
Fig.5 Tensile stress versus strain under confining pressure

4 拉剪破坏的临界应力状态研究

由上述试验知,柔性混凝土拉断破坏时显然不适合莫尔-库仑定律,极限拉伸试验和围压情况的拉伸试验,破坏皆是由单轴抗拉强度控制的,当发生剪切破坏时,破坏是由莫尔-库仑准则控制的,因此,必然存在一个拉断和剪切破坏的临界应力状态,当应力小于临界应力时,发生拉断破坏,大于临界应力时发生剪切破坏。

根据^{2,3]}破坏面上正应力 σ_n 大于0时发生剪切破坏, σ_n 值小于0时发生拉断破坏,即 $\sigma_n=0$ 时即为拉断、剪切之间的临界状态,推导出拉、剪破坏的临界应力状态为 $(0.5\sigma_c, \sigma_t)$,其中 σ_c 为单轴抗压强度, σ_t 为单轴抗拉强度。即当 $\sigma_1 > 0.5\sigma_c$ 时发生剪切破坏,由莫尔-库仑抗剪理论控制,当 $\sigma_1 < 0.5\sigma_c$ 时,发生拉断破坏,由抗拉强度控制,如图6所示。文献^{2]}生铁、石膏等一些脆性材料的拉压联合作用时的试验结果与之非常吻合。

以上推导得出的拉剪破坏的临界应力 σ_1 仅与材料的最大抗压强度有关,而没有反映材料的弹塑性特征。脆性材料的试验结果与之吻合,但是塑性材料则不一定适合。材料的弹塑性性质可用拉压强度比 α 来表示,即 $\alpha = \sigma_t / \sigma_c$ (σ_t 为单轴抗拉强度, σ_c 为单轴抗压强度)。一般而言, α 值越大,说明材料的塑性越强; α 值越小,说明材料的脆性越强。

现从另一个角度来探讨材料的临界状态。首先引进极限剪应力强度的概念^[3],即没有法向应力作用时受力面的破坏剪应力,也称纯剪强度 τ_0 ,也常用内聚力 c 来表示。因此,假定当剪应力大于极限剪应力强度 τ_0 时,用抗剪强度控制,当剪应力小于 τ_0 时,用抗拉强度控制。拉、剪破坏的临界圆如图7所示,破坏时的最小主应力即为抗拉强度 σ_t ,最大主应力 σ_0 可根据三角形AOB和三角形OBC的关系推导得出:

$$\sigma_0 = \frac{\tau_0}{\sigma_t} \tag{1}$$

式中： σ_0 ——拉剪破坏的临界最大主应力； τ_0 ——极限剪应力，在数值上等于内聚力 c 。

这样，就确定出破坏时的临界应力条件为：

a. 当最大主应力 $\sigma_1 > \tau_0^2/\sigma_t$ 时，材料的破坏由抗剪强度控制；

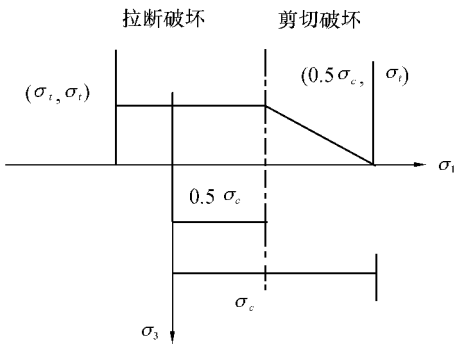


图 6 临界应力状态

Fig.6 Critical stress state

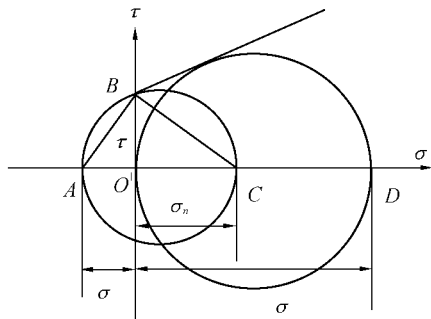


图 7 拉剪破坏区

Fig.7 Region of failure by tension and shear

b. 当最大主应力 $\sigma_1 \leq \tau_0^2/\sigma_t$ 时，材料的破坏由抗拉强度控制。

由莫尔-库仑定律可以得出

$$\sigma_c = \frac{2\tau_0 \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} \tag{2}$$

将式 (6) 代入式 (5) 并用 c 代替 τ_0 得

$$\sigma_0 = \frac{c(1 - \sin \varphi)}{2\alpha \cos \varphi} \tag{3}$$

由式 (3) 可以看出，按照这种方法确定的临界应力条件的好处是，能够反映材料的性质。因为这个式子里包含了库仑定律的两个抗剪指标，因此，充分考虑了材料的性质。对于不同性质的材料，产生拉剪破坏的临界应力状态不同。由式 (3) 可见， α 越大，即材料的塑性越强时，拉剪破坏的临界应力越小，反之 α 越小，材料的脆性越强时，拉剪破坏的临界应力越大。

由图 7 可见，当临界圆与包络线相切时， $\alpha = 0.5\alpha_a$ (α_a 是由莫尔-库仑定律推导的拉压强度比)，此时， $\sigma_0 = \frac{1}{2}\sigma_c$ 。根据以上研究，可以认定，当材料的 $\alpha \leq 0.5\alpha_a$ 时，属于脆性材料， $\sigma_0 = \frac{1}{2}\sigma_c$ ；当材料的 $\alpha > 0.5\alpha_a$ 时，属于塑性材料， $\sigma_0 = \tau_0^2/(\alpha\sigma_c)$ 。

5 柔性混凝土的破坏准则及其验证

5.1 柔性混凝土的破坏准则

根据以上研究，柔性混凝土属于塑性材料，发生拉断破坏时采用抗拉强度判别，发生剪切破坏采用莫尔-库仑理论，可用剪应力水平来判别。首先根据拉剪破坏的临界应力状态判定可能的破坏形式，具体判别如下：当最大主应力 $\sigma_1 > \tau_0^2/(\alpha\sigma_c)$ ，采用摩尔-库仑理论，用剪应力水平来判别；当最大主应力 $\sigma_1 \leq \tau_0^2/(\alpha\sigma_c)$ ，采用抗拉强度判别。

柔性（塑性）混凝土多应用于防渗墙，往往底部受到较大的拉应力，可能在底部产生拉断破坏。在其他部位，有可能受到较大的压应力或者剪应力而发生剪切破坏。应分别根据受力情况采取不同的准则判别其是否发生破坏。此外，防渗墙在上游水荷载的作用下产生弯曲变形，它在空间上就像一个固端梁的变形，平面上如受弯梁，如果弯曲变形过大超过自身的抗弯能力，则产生折断破坏。因此，还应考虑整个墙体的抗弯变形是否满足要求，即墙体的最大挠跨比应小于材料的破坏挠跨比。

5.2 试验验证

根据前面推导的临界应力状态条件，分析柔性混凝土有围压作用的拉伸试验结果（图 5）。该试样的单轴抗压强度为 3.54 MPa， $C = 0.81$ MPa， $\varphi = 31.8^\circ$ ，由莫尔-库仑理论计算得 $\alpha_a = 0.307$ ，单轴抗拉强度 $\sigma_t = 0.603$ MPa，则 $\alpha = 0.170$ ， $\alpha > 0.5\alpha_a$ ，可以认定为塑性材料，故由式 (1) 计算得拉剪破坏时的最大主应力 $\sigma_0 = 1.08$ MPa。

MPa. 根据上述研究, 当最大主应力大于 1.08 MPa 时, 破坏由抗剪强度控制, 当最大主应力小于 1.08 MPa 时破坏由抗拉强度控制. 图 6 中塑性混凝土三轴拉伸试验时所加的围压最大的为 0.6 MPa, 破坏都是由单轴抗拉强度控制的. 此围压作用的拉伸试验由于受试验条件的限制(围压最大只能加到 0.6 MPa)而没有确定出临界应力, 但是验证了最大主应力小于某一应力状态时, 其破坏皆是由单轴抗拉强度控制的.

6 结 论

由极限拉伸试验得出柔性混凝土的抗拉强度、极限拉应变以及拉压强度比, 随龄期的增长显著增大. 与普通混凝土相比, 拉压强度比、极限拉应变明显增大.

由围压作用的拉伸试验知, 围压对抗拉强度影响较小, 但对拉应变影响较大, 因此, 当发生拉裂破坏时, 应以抗拉强度作为破坏判别; 应变速率对抗拉强度和破坏拉应变都有比较显著的影响.

已有的强度理论都不适合柔性混凝土的破坏判别, 莫尔-库仑理论仅适合剪切破坏, 而不适合拉断破坏. 材料的破坏形式主要取决于应力组合, 对于复杂应力作用表现出的破坏形式, 是学术界讨论一直比较活跃的领域. 本文提出了考虑材料性质的拉剪破坏临界应力状态, 并由围压作用的拉伸试验得到验证, 进而提出了柔性混凝土的破坏判别准则.

参考文献:

- [1] SD 105—82 水工混凝土试验规程[S].
- [2] 陶纪南. 莫尔-库仑准则的应用范围及临界应力状态探讨[J]. 岩土工程学报, 1990, 12(6): 76~83.
- [3] 李宏, 刘西拉. 基于混凝土破坏准则的抗剪强度计算[J]. 工程力学, 1993, 10(1): 52~60.

Experimental Study on Tension Resistance and Failure Criterion of Flexible Concrete

GU Qiang-sheng¹, ZHANG Xiao-ping¹, SHI Bin¹, ZHANG Qing-lin²

(1. Dept. of Earth Sciences, Nanjing Univ., Nanjing 210093, China;

2. The Tenth Corporation of the Thirteenth Metallurgy Building Company, Tianjin 300301, China)

Abstract: Based on the ultimate tensile strength test and extension test under confining pressure, the characteristics of flexible concrete are studied. The results show that the tension-compact strength ratio and ultimate tensile strain of flexible concrete are clearly larger than those of normal concrete, that the confining pressure has little effect on tensile strength but much effect on tensile strain, and that the tensile strength should be taken as the failure criterion when tensile failure occurs, and the Mohr-Coulomb theory should be taken as the failure criterion when shear failure occurs.

Key words: flexible concrete; characteristics of tension resistance; failure criterion