

# 一种特制混凝土的双向拉伸强度试验研究

陈积光,陈乐求,童小龙

(湖南理工学院 土木建筑工程学院,湖南 岳阳 414006)

**摘要:**以粒径为 5~7 mm 的石灰岩碎石为粗骨料,拌制成一种特制混凝土试件.采用机械式双向拉伸仪进行材料试验,得到了这种混凝土的单、双向拉伸强度试验值;同时,根据 Hill 理论推导的计算式进行了理论计算.结果表明,混凝土的双向拉伸强度比其单向拉伸强度低 15%~30%,计算值与试验值吻合良好,最大差别在 11% 以内.这对于复杂应力作用下的混凝土板、壳结构设计来说,具有重要意义.

**关键词:**机械式双向拉伸仪;材料试验;特制混凝土;双向拉伸强度;Hill 理论;计算式

**中图分类号:**TP528.1,TU039      **文献标志码:**A      **文章编号:**1672-9102(2017)02-0047-05

## Study on the biaxial tensile strength of special made concrete

Chen Jiguang, Chen Leqiu, Tong Xiaolong

(Department of Construction & Engineering, Hunan Institute of Science and Technology, Yueyang 414006, China)

**Abstract:** Special concrete specimens were made of coarse aggregate consisted of crushed limestone whose particle diameters ranged from 5 to 7mm. The uniaxial and biaxial tensile strength testing results were obtained by material tests using mechanical biaxial stretching equipment; meanwhile, theoretical values were calculated using the formula derived from the Hill Theory. The results show that the specimens' biaxial tensile strength is 15%–30% lower than that of uniaxial. Theoretical values fit well with testing results, with maximum difference lower than 11%. This conclusion is of great significance to the design of plate and shell concrete structure which is used under complex stresses.

**Keywords:** mechanical biaxial stretching equipment; material test; special concrete; biaxial tensile strength; Hill theory; formula

水泥混凝土简称砼,俗称人造石头.水泥混凝土是大宗建筑工程结构材料.混凝土的开裂最一般情况是由于荷载或环境变化产生的拉应力所致<sup>[1-2]</sup>.实际工程中,许多混凝土结构是在复杂应力作用下工作的;然而,人们对混凝土在任意荷载作用下的力学行为了解并不多,特别是在双向拉伸下混凝土强度的弱化现象知之甚少.有美国学者早在文献[3]中提出:关于混凝土在双轴应力状态中软化的问题,建议规划研究;但因试验仪器没有解决好,混凝土双向拉伸强度研究进展依然缓慢,令人满意的研究成果仍然不多.多年来,国内外许多学者一直注意如何根据单向拉伸试验结果来计算混凝土的双向拉伸强度,有代表性的如 Kupfer 计算式<sup>[4]</sup>,Tasuji 计算式<sup>[5]</sup>,Liu,Nilsont 和 Slate 计算式<sup>[6]</sup>等.这些公式几乎都认为混凝土的双向拉伸强度与其单向拉伸强度相差不大,试验表明,这不符合客观实际.

如今,材料的双(多)轴力学性能测试设备及方法都有了很大改进和完善<sup>[7-10]</sup>.本文在文献[11-14]研究的基础上,以粒径为 5~7 mm 的石灰岩碎石为粗骨料,拌制成一种特制混凝土试件,采用试验研究与理论计算相结合的方法,研究混凝土的双向拉伸强度.

收稿日期:2016-02-27

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51308210)

通信作者:陈积光(1961-),男,湖南郴州人,硕士,教授,主要从事材料的双向强度理论及应用研究. E-mail:chenjiguang168@163.com

# 1 材料试验

## 1.1 试验材料

混凝土混合料的粗集料取用湖南岳阳临湘白云矿出产的石灰岩碎石,细集料为标准砂,水泥采用岳阳市水泥厂生产的君山牌水泥.混合料用水为饮用自来水.材料配合比见表1.

表1 试验材料及其配合比

混凝土设计强度等级	水泥等级	粗骨料粒径/mm	配合比 C : W : S : G
C20	42.5	5~7	1.00 : 0.50 : 2.49 : 4.07
C30	42.5	5~7	1.00 : 0.50 : 1.96 : 3.21
C40	42.5	5~7	1.00 : 0.40 : 1.34 : 2.48
C50	52.5	5~7	1.00 : 0.40 : 1.36 : 2.53

## 1.2 主要仪器

双向拉伸仪:采用授权的专利产品——机械式双向拉伸试验仪的第三代产品(中国专利号 87205653.8),其  $\sigma_1 : \sigma_2 = 1 : 1$ .加荷装置为自制手动螺旋杆加载器.“双向仪”见图1.



图1 双向拉伸仪

电测仪器:YJ-22 静态应变测量处理仪,YZ-22 转换箱,BX120-20AA 电阻应变片.

试件模具:自制.

## 1.3 试件与贴片

根据“双向仪”的加载方式和预计的应力分布情况,设计了条形(单向)和十字形(双向)2种试件.试件的形状、几何尺寸(厚度均为20 mm)及贴片情况见图2.

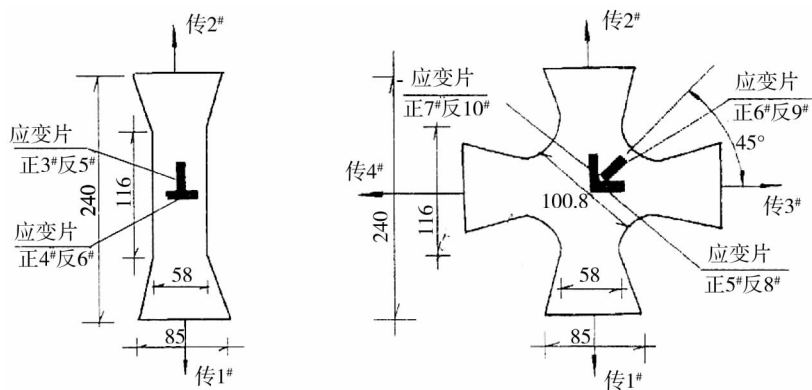


图2 试件及贴片图

本次试验共有4个强度等级(C20,C30,C40,C50),4个龄期(28 d,60 d,90 d,120 d)的特制水泥混凝土有效试件160个(分4批).单向拉伸试件(条形)和双向拉伸试件(“十”字形)各80个.

# 2 试验结果及计算分析

## 2.1 试件破坏模式

试验过程中观察到试件的破坏情况如图3.

## 2.2 试验过程中的应力-应变曲线

现摘录 C30,28d 试件的试验数据,绘制出单、双向拉伸应力-应变曲线如图4.试验表明,混凝土是具有准弹塑性各向异性的脆性材料,塑性变形不明显,弹性极限即接近破坏.

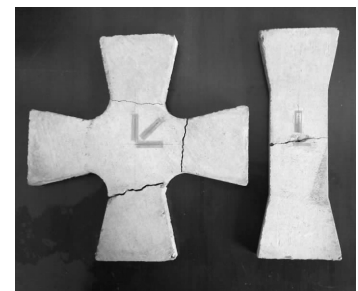


图3 试件破裂图

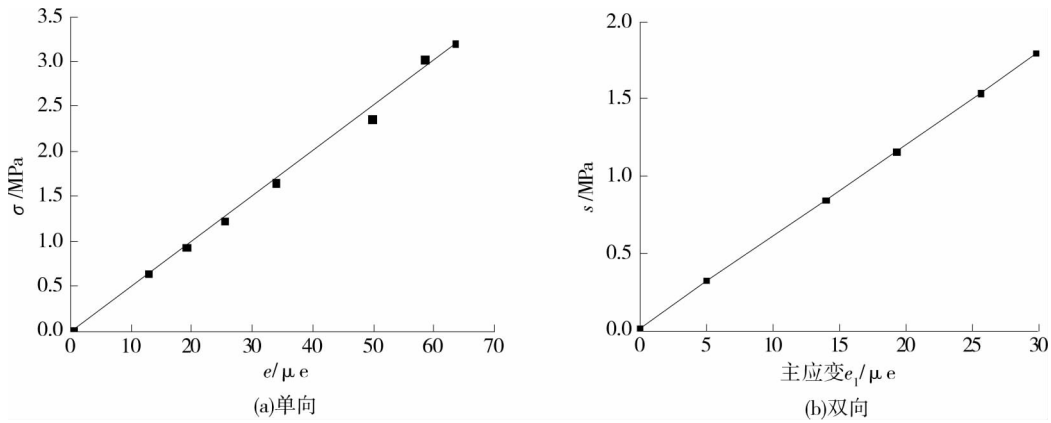


图 4 试验过程应力-应变曲线

### 2.3 双向试验应力计算

计算公式:

$$\text{主应变: } \varepsilon_{1,2} = \frac{\varepsilon_{0^\circ} + \varepsilon_{90^\circ}}{2} \pm \frac{1}{2} \sqrt{(\varepsilon_{0^\circ} - \varepsilon_{90^\circ})^2 + (2\varepsilon_{45^\circ} - \varepsilon_{0^\circ} - \varepsilon_{90^\circ})^2} \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} E_x^b &= \frac{\alpha}{\alpha - \mu_y \beta} E_x; \\ \text{双向弹模: } E_y^b &= \frac{\beta}{\beta - \mu_x \alpha} E_y; \\ \beta &= \frac{E_x}{E_y} = 1, \mu_x = \mu_y = \mu. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$$\text{双向试验应力: } \sigma_x^b = E_x^b \varepsilon_1, \sigma_y^b = E_y^b \varepsilon_2. \quad (3)$$

双向拉伸试验强度计算结果见表 2.

表 2 混凝土双向拉伸强度综合计算表

设计 强度 等级	龄期 /d	单向拉 伸强度 f <sub>t</sub> /MPa	塑性 应变比 R	双向拉伸试验 强度/MPa		双向弱化 程度/%		双向拉伸计算 强度/MPa		误差值/%	
				σ <sub>x</sub> <sup>b</sup>	σ <sub>y</sub> <sup>b</sup>	$\frac{\sigma_x^b - f_t}{f_t}$	$\frac{\sigma_y^b - f_t}{f_t}$	σ <sub>1,2</sub> <sup>b</sup>	$\frac{\sigma_x^b - \sigma_{1,2}^b}{\sigma_{1,2}^b}$	$\frac{\sigma_y^b - \sigma_{1,2}^b}{\sigma_{1,2}^b}$	
C20	28	1.790	0.498	1.534	1.297	-14.3	-27.5	1.415	8.4	-8.3	
	60	2.137	0.406	1.585	1.517	-25.8	-29.0	1.657	-4.0	-8.4	
	90	2.374	0.356	1.619	1.650	-31.8	-30.4	1.822	-11.0	-9.4	
	120	2.392	0.496	1.770	1.885	-26.0	-21.2	1.890	-6.3	-0.3	
C30	28	2.466	0.485	1.929	2.082	-21.8	-15.6	1.944	-0.8	7.1	
	60	2.616	0.496	2.277	2.042	-13.0	-21.9	2.066	10.2	-1.2	
	90	2.669	0.465	2.288	2.141	-14.4	-19.8	2.095	9.2	2.2	
	120	2.790	0.487	2.224	2.147	-20.3	-23.0	2.200	1.1	-2.4	
C40	28	2.940	0.491	2.265	2.259	-23.0	-23.2	2.320	2.4	-2.6	
	60	3.422	0.491	2.787	2.616	-18.6	-23.6	2.700	3.2	-3.1	
	90	3.740	0.444	2.878	2.727	-23.0	-27.1	2.923	-1.8	-6.7	
	120	3.750	0.399	3.188	2.950	-15.0	-21.3	2.904	9.8	1.6	
C50	28	3.055	0.494	2.374	2.328	-22.3	-23.8	2.412	-1.6	-3.5	
	60	3.317	0.375	2.553	2.486	-23.0	-25.0	2.556	-0.1	-2.7	
	90	3.787	0.489	2.984	3.142	-21.1	-16.9	2.984	0.0	5.3	
	120	4.007	0.364	3.156	3.102	-21.2	-22.6	3.080	2.5	-0.7	

### 2.4 双向应力理论计算式的推导

由 Hill 各向异性判据<sup>[15]</sup>:

$$H(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + F(\sigma_2 - \sigma_3)^2 + G(\sigma_3 - \sigma_1)^2 = 1. \tag{4}$$

式中:  $H, F$  和  $G$  为各向异性参数. 引入塑性应变比:

$$R = \frac{d_2}{d_1 + d_2}. \tag{5}$$

式中:  $d_1, d_2$  为单向拉伸时长度和宽度方向的自然塑性应变比. 考虑各个方向  $R$  值的变化, 再引入平均塑性应变比  $R_a$  [11]:

$$R_a = \frac{R_0 + 2R_{45} + R_{90}}{4}. \tag{6}$$

式中:  $R_{0^\circ}, R_{45^\circ}$  和  $R_{90^\circ}$  为  $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$  方向的  $R$  值. 显然, 一旦确定了  $R_a$ , 即可视为平面各项同性, 对于  $\sigma_3 = 0$  的平面应力状态, 式(1)可以简化为

$$\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \frac{2R_a}{1 + R_a} \sigma_1 \sigma_2 = f_t^2. \tag{7}$$

对于双向等拉 ( $\sigma_1 = \sigma_2$ ), 式(7)变成:

$$\sigma_{1,2}^b = f_t \sqrt{\frac{1 + R_a}{2}}. \tag{8}$$

由此可见, 只要通过拉伸试验确定混凝土的平均塑性应变比  $R_a$ , 就可以由单向拉伸强度  $f_t$  计算混凝土的双向拉伸强度.

由试验数据和式(8)计算出混凝土的双向拉伸强度  $\sigma_{1,2}^b$ , 双向拉伸计算强度的计算结果列于上表 2.

### 2.5 代表曲线

据表 2, 作强度-龄期和强度-等级的代表曲线如图 5 和图 6.

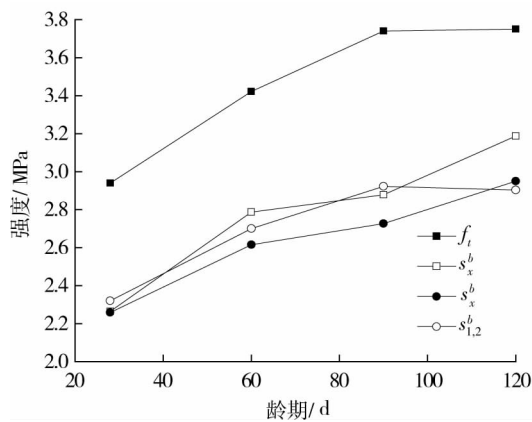


图 5 C40 的  $f_t, \sigma_x^b, \sigma_y^b, \sigma_{1,2}^b$  与龄期曲线

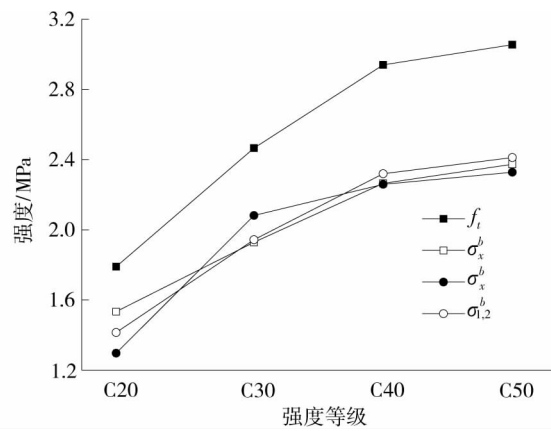


图 6 28 d 的  $f_t, \sigma_x^b, \sigma_y^b, \sigma_{1,2}^b$  与强度等级曲线

### 2.6 结果分析

1) 由图 5, 图 6 可见,  $f_t, \sigma_x^b, \sigma_y^b, \sigma_{1,2}^b$  都随混凝土强度等级的增大而增大, 同时也随龄期的增长而增大, 且它们的增长规律相似;  $\sigma_x^b, \sigma_y^b, \sigma_{1,2}^b$  曲线基本吻合.

2) 由表 2 可以看出, 这种混凝土的双向拉伸强度比其单向拉伸强度低 15%~30% 左右, 表现为明显的双向拉伸弱化效应. 文献[13, 14, 16]研究了普通混凝土的双向拉伸强度, 得到了相近的结果. 同时, 由式(8)计算得到的双向拉伸强度  $\sigma_{1,2}^b$  与试验结果  $\sigma_x^b, \sigma_y^b$  基本一致, 最大差别未超过 11%. 说明采用的试验器、试验方法和计算理论符合混凝土双向拉伸客观实际.

## 3 结论

1) 特制混凝土的双向拉伸强度比其单向拉伸强度低 15%~30%, 与普通混凝土双向拉伸强度的弱化程度基本一致.

2) 据 Hill 理论推导出的混凝土双向拉伸强度计算式, 可由单向拉伸试验结果计算出混凝土双向拉伸

强度,且计算结果与试验结果吻合较好,最大差别在11%以内。

3)机械式“双向仪”结构简单、使用方便,不需昂贵复杂的专用设备即可进行双向加载,试验方法合理,试验结果可靠,可用于混凝土和岩石类材料的双向拉伸强度试验。

#### 参考文献:

- [1] 洪雷.混凝土性能及新型混凝土技术[M].大连:大连理工大学出版社,2005.
- [2] 钟进章.混凝土裂缝成因及控制措施[J].混凝土,2004(10):14-17.
- [3] Carpinteri A, Ingrassia A R.混凝土断裂力学—材料特性与试验[M].杨煜惠,黄政宇,万良芬,等译.长沙:湖南大学出版社,1989.
- [4] Kupfer H B, Hilsdorf H D, Rusch H. Behavior of concrete under biaxial stresses [J], ACI Journal, 1969, 66(8): 656-666.
- [5] Tasuji M E, Slate F O, Nilson A H. Stress-strain response and fracture of concrete in biaxial loading [J]. ACI Journal, 1978, 75(7): 306-312.
- [6] Liu T C A, Nilson A H, Slate F O. Biaxial stress-strain relations for concrete [J]. Magazine of Concrete Research, 1972, 31(109): 1025-1034.
- [7] 贺传兰,温茂萍,庞海燕,等.双(多)轴力学性能测试设备及应用[J].工程与试验,2012,52(2):1-6.
- [8] Merklein M, Biasutti M. Development of a biaxial tensile machine for characterization of sheet metals [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2013, 213(6): 939-946.
- [9] Abbassi F, Mistou S, Zghal A. Failure analysis based on microvoid growth for sheet metal during uniaxial and biaxial tensile tests [J]. Materials and Design, 2013(49): 638-646.
- [10] 鲁帅.双轴拉伸原位力学测试装置的设计分析与试验研究[D].长春:吉林大学,2015.
- [11] Li G L, Luo Z H, Xue R. Biaxial tensile weakening studies on inorganic materials [J]. Mechanical Behaviour of Material, 1991(4): 53-56.
- [12] 任家陶,陈积光,李冈陵.双向拉伸试验研究[J].湘潭大学(自然科学学报),1998,20(2):92-96.
- [13] 陈积光,肖四喜,曾文德,等.碎石混凝土与卵石混凝土双向拉伸强度研究[J].混凝土,2007(8):61-64.
- [14] 陈积光.普通混凝土抗拉强度试验[J].工业建筑,2008,38(1):84-87.
- [15] Hill R. The mathematical theory of plasticity [M]. London: oxford University Press, 1950.
- [16] 张盛东.混凝土与钢纤维混凝土双向拉伸与抗压作用试验研究[J].哈尔滨建筑大学学报,1997,30(6):34-39.