

## 混凝土劈裂抗拉强度与轴心抗拉强度关系研究

丁晓唐,袁存,郑艳

(河海大学 土木与交通学院,江苏 南京 210098)

**摘要:**国内外学者对混凝土劈拉与轴拉强度的强度关系的研究结论并不一致,为更好地研究两者强度关系,基于黏聚裂纹模型理论,进行了的圆柱体试件尺寸为150 mm×300 mm,垫条宽度变化范围为5~20 mm共8个级别的劈拉试验和尺寸为100 mm×100 mm×550 mm的棱柱体轴拉试验。建立了劈拉强度和直拉强度关系比 $f_{ts}/f_t$ 与圆柱体试件直径和特征长度比 $D/L_{ch}$ 的回归方程,并给出了公式中参数的取值,对大体积混凝土结构的设计及检测有一定的参考价值。

**关键词:**混凝土;劈拉强度;轴拉强度;垫条宽度;黏聚裂纹模型;

中图分类号:TU375.4

文献标识码:A

### Study on relationship between concrete splitting tensile strength and axial tensile strength

DING Xiao-tang, YUAN Cun, ZHENG Yan

(College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Jiangsu Nanjing 210098, China)

**Abstract:** Conclusions of researches on the relationship between concrete splitting tensile strength and axial tensile strength are inconsistent. To study the relationship, splitting tensile test with loading strip width ranging from 5mm-20mm and axial tensile test were conducted. The size of splitting tensile test cylindrical specimens is 150mm×300mm and size of the axial tensile test specimens is 100mm×100mm×550mm. Based on cohesive crack model of fracture mechanics theory, this paper builds a regression equation between  $f_{ts}/f_t$  and  $D/L_{ch}$ . The parameter's values of the formula are also given. It can be proved that the formula is acceptable and can be applied in design and detection of massive concrete structures.

**Key words:** concrete; splitting tensile strength; axial tensile strength; strip width; cohesive crack model

抗拉强度是混凝土的一个重要性能指标,在测定大体积混凝土或已有建筑物的抗拉强度时,一般通过钻芯取样,测定圆柱体的劈拉强度来间接获得混凝土的抗拉强度。因此,探究劈拉强度与抗拉强度真实关系至关重要。但由于混凝土劈拉试验时受到垫条宽度的影响较大,导致现有文献<sup>[1-3]</sup>中关于混凝土劈拉强度与轴向抗拉强度的关系未有统一结论。针对以上问题,T. Tang<sup>[4]</sup>提出当垫条宽度与试件直径之比 $b/D \leq 0.5$ 时,圆柱体试件劈裂抗拉强度的关系为: $f_t/f_{ts} = [1 - (b/D)^2]^{3/2}$ ,式中: $b$ 为垫条宽度; $D$ 为圆柱体试件直径。C. Rocco<sup>[5]</sup>将黏聚裂纹模型引入到圆柱体混

凝土劈裂抗拉有限元分析中,通过有限元分析,得到了劈裂强度与直接拉伸强度、试件尺寸、垫条宽度及混凝土特征长度参数 $L_{ch}$ 的理论关系。尽管已有学者做出大量的研究,但多以有限元分析计算分析为主,且试件形式多采用立方体试件,却甚少有研究者从试验角度探讨垫条宽度对劈拉强度与直拉强度关系的影响。本文从C. Rocco<sup>[5]</sup>基于黏聚裂纹模型的角度研究两强度间关系中获得启发,利用圆柱体混凝土劈拉试验与直拉试验结果,探究了垫条宽度对劈拉强度与轴向抗拉强度的影响,建立了圆柱体劈裂抗拉强度与直接拉伸强度、试件尺寸、垫条宽度及混凝土特征长度参数 $L_{ch}$ 的

收稿日期:2015-10-12

基金项目:国家自然科学基金项目资助(项目编号:51279052)

作者简介:丁晓唐(1961-),女,吉林长春人,博士,副教授,从事混凝土结构基本理论及近代计算方法研究。

关系式,并验证了其合理性。

## 1 混凝土劈裂抗拉试验与直接拉伸试验

### 1.1 试件尺寸与垫条宽度

圆柱体劈裂试件的尺寸为  $\phi 150 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ , 设 5、8、10、12、15、16、18、20mm 共 8 组不同的垫条宽度,编号为 STA 组。另外,设置一组尺寸为  $\Phi 100 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ ,垫条宽度为 3 mm 的试件为 STB 组,用于论文拟合公式的验证。每组 3 个试件,共计 27 个试件。直拉试验试件尺寸为  $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 550 \text{ mm}$ ,预埋件埋入试件两端 130 mm,数量共计 6 个。同时,设置了一组边长 150 mm 的立方体标准试件,用于测定抗压强度。

### 1.2 试件的浇筑及加载

混凝土的设计强度为 C30,采用水泥:P. O. 32.5 普通硅酸盐水泥;粗骨料:粒径 5 ~ 20 mm,碎青石;细骨料:中砂。圆柱体试件的模板采用材质较轻的木板制作木模;棱柱体试件和立方体试件采用立方体试件均借用河海大学结构实验室的成品钢模。试件均采用自拌混凝土一次性浇筑,混凝土浇注成型后 24 h 开始浇水养护,7 d 始拆模。持续浇水养护 28 d 后,圆柱体试件采用钻芯取样机,由专业取样工人在木模中取样并用混凝土切割机将圆柱体试件切割至所需尺寸,继续养护 3 个月。圆柱体劈裂抗拉试验及立方体标准试件抗压试验在河海大学结构实验室现有的四柱液压式压力机上进行,为获得更稳定的试验数据,在劈裂试验时垫条下放置  $350 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$  的橡胶垫层。试验加载速率控制在  $0.02 \sim 0.05 \text{ MPa/s}$ 。直拉试验采用文献<sup>[6]</sup>中推荐的试验装置。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 劈拉试验结果

由表 1 中 STA 组的结果可以看出,垫条宽度对劈拉强度确实有影响,随着垫条宽度的增加,圆柱体混凝土试件的劈裂抗拉强度随之上升,但上升幅度并不大。垫条宽度每增加 2 mm,混凝土的劈裂抗拉强度大约增加  $0.02 \sim 0.03 \text{ MPa}$ 。

表 1 劈拉试验结果

Tab. 1 Results of splitting test

试件编号	垫条宽度 $b/\text{mm}$	$\beta = b/D$	平均劈拉 强度/MPa
STA - 1	5	0.033 3	2.14
STA - 2	8	0.053 3	2.17
STA - 3	10	0.066 7	2.185
STA - 4	12	0.080 0	2.21
STA - 5	14	0.093 3	2.23
STA - 6	16	0.106 7	2.245
STA - 7	18	0.120 0	2.27
STA - 8	20	0.133 3	2.29
STB - 1	5	0.033 3	2.51

### 2.2 直拉试验结果

根据本文直接拉伸试验获得的混凝土应力 - 应变软化曲线如图 1 所示。

为验证准确性并为下文推求混凝土拉伸软化曲线提供所需数据,本文根据过镇海<sup>[1]</sup>给出的建议应力 - 应变曲线数学表达式,对实测数据进行拟合,建立应力 - 应变曲线公式,如图 2 所示。

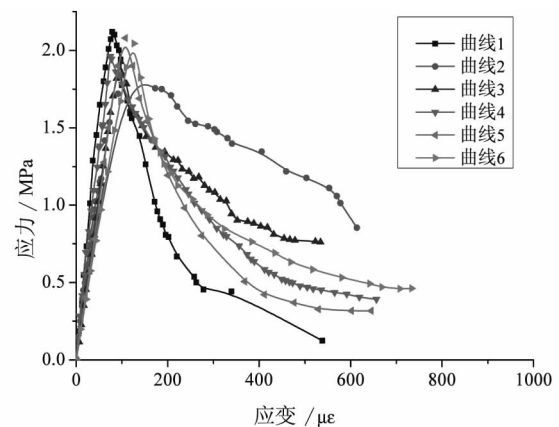


图1 试验测得的混凝土应力-应变曲线

Fig. 1 The Stress - strain curve by the axial tensile test

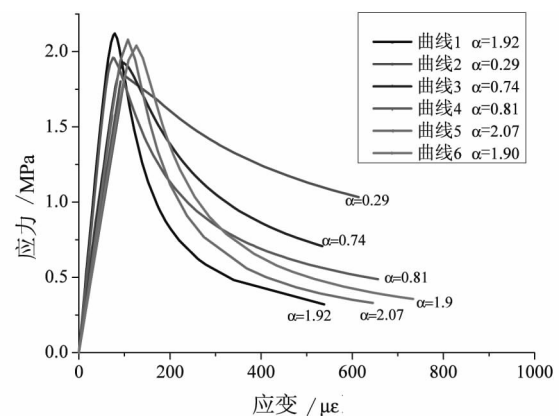


图2 混凝土应力-应变拟合曲线

Fig. 2 The fitting stress - strain curve

本文得到的应力 - 应变拟合曲线,按照过镇

海<sup>[1]</sup>,拟合系数  $\alpha$  值分别为 1.92、0.2、0.74、0.81、2.07、1.9,其中因曲线 2 系数  $\alpha$  未在有效范围内,因次本文将曲线 2 剔除。

### 2.3 劈拉强度与轴拉强度关系

断裂力学的黏聚裂缝模型相比于传统的 Weibull 强度统计理论能够更好地描述混凝土和其他准脆性材料的断裂行为<sup>[7]</sup>,该模型由 Hillerborg 首次提出,并被 C. Rocco<sup>[5]</sup>引入到圆柱体混凝土劈裂分析中,该模型假定裂纹在垂直于最大应力的方向上产生后,裂缝应力不会立即消失,将在黏聚区域发生转移,对于混凝土材料,基于混凝土拉伸软化曲线,Hillerborg<sup>[7]</sup>又提出特征长度参数,并认为特征长度  $L_{ch}$ 用于表征混凝土脆性,是重要的混凝土属性。 $L_{ch}$ 可由公式(1)简化计算<sup>[8]</sup>。

$$L_{ch} = \frac{Ew_1}{2f_t} \quad (1)$$

其中, $w_1$ 为拉伸软化曲线应力在  $f_t$  处的切线与裂缝发展宽度  $w$  坐标轴的交点,如图 3 所示, $f_t$ 为混凝土抗拉强度,E为弹性模量。

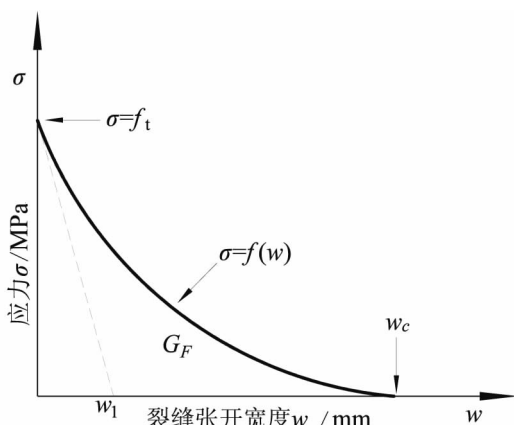


图3 拉伸软化曲线示意图

Fig.3 Diagrammatic sketch of softening curve

因次,基于能更好地描述混凝土断裂行为的黏聚裂缝模型,本文将轴拉试验得到的应力-应变曲线逆推拉伸软化曲线,求得特征长度  $L_{ch}$ ,结合劈拉试验,探究考虑特征长度  $L_{ch}$ 、圆柱体混凝土直径  $D$ 、垫条宽度  $d$  在内的劈拉强度与轴拉强度的关系,建立形如公式(2)的函数关系。

$$\frac{f_{ts}}{f_t} = H(D/L_{ch}, b/D) \quad (2)$$

其中,函数  $H$  为依存于试件几何尺寸与垫条宽度的无量纲函数。

本文采用朱敏敏<sup>[9]</sup>提出的由直接拉伸试验测得的混凝土受拉应力-应变全曲线推求混凝土拉伸软化曲线的方法,并依据公式(1)计算得到混凝土特征长度  $L_{ch}$ 。计算结果表 2 所示。

表 2  $w_1$  和  $L_{ch}$  的计算结果

Tab.2 Results of  $w_1$  and  $L_{ch}$

编号	曲线 1	曲线 3	曲线 4	曲线 5	曲线 6
$w_1$	0.055 5	0.156 0	0.100 7	0.094 3	0.144 9
$L_{ch}$	431	839	751	474	638

依据不同垫条宽度的劈拉试验获得的数据,建立不同垫条宽度下圆柱体混凝土劈裂抗拉强度与直拉强度的比值  $f_{ts}/f_t$  同  $D/L_{ch}$  的关系,见图 4。

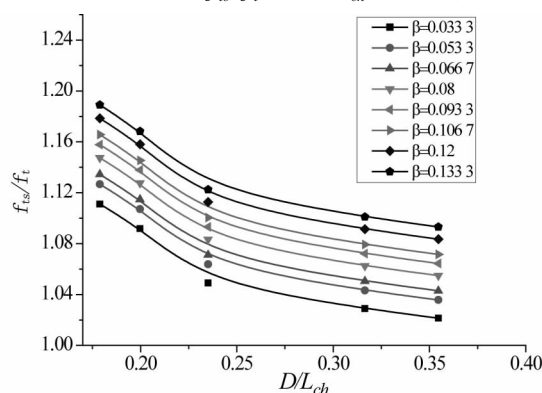


图4  $f_{ts}/f_t$  与  $D/L_{ch}$  的关系图

Fig.4 The Relationship between  $f_{ts}/f_t$  and  $D/L_{ch}$

对图 3 所示曲线进行回归分析,可得到函数公式如下所示:

$$\frac{f_{ts}}{f_t} = \frac{1}{c_1 + c_2 D/L_{ch}} + c_3 \quad (3)$$

式中, $c_1$ 、 $c_2$ 、 $c_3$  的取值如表 3 所示(上式中  $D/L_{ch}$  应大于等于 0.09)。

表 3 参数  $c_1$ 、 $c_2$ 、 $c_3$  取值表

Tab.3 The Value of parameters  $c_1$ 、 $c_2$ 、 $c_3$

$\beta = b/D$	$c_1$	$c_2$	$c_3$
0.033 3	-11.011 46	104.071 97	0.98 96
0.053 3	-10.859 23	102.633 17	0.995 72
0.066 7	-10.784 68	101.928 58	1.002 60
0.08	-10.64 74	100.447 5	1.014 73
0.093 3	-10.567 04	99.871 69	1.023 25
0.106 7	-10.496 44	99.204 38	1.030 14
0.12	-10.380 83	98.111 81	1.041 61
0.133 3	-10.290 17	97.254 92	1.050 78

### 2.4 劈拉与直拉强度比值的关系公式合理性验证

为验证公式(3)的合理性,本文将从曲线对比与量值分析两方面进行验证。

(1) 曲线对比方面 (下转第 34 页)

混凝土梁的极限承载力没有明显差异,但是对型钢混凝土梁的裂缝间距及裂缝发展有一定影响。

4)型钢再生混凝土梁截面基本符合平截面假定。

#### 参考文献:

- [1]肖建庄.再生混凝土[M].北京:中国建筑工业出版社,2008.
- [2]马辉,薛建阳,高亮,等.水平荷载作用下型钢再生混凝土柱受力性能非线性分析[J].建筑结构,2015(5):63-68.
- [3]薛建阳,马辉,刘义.反复荷载下型钢再生混凝土柱抗

- 震性能试验研究[J].土木工程学报,2014(1):36-46.
- [4]赵鸿铁.钢与混凝土组合结构[M].北京:科学出版社,2004.
- [5]安新正,郭恒,李莎莎,等.再生粗骨料粒径对再生混凝土早期开裂影响研究[J].河北工程大学学报:自然科学版,2014,31(1):1-5.
- [6]张军.再生混凝土研究及再生混凝土柱力学性能分析[D].成都:西南交通大学,2007.
- [7]姜新佩,李莹,张胜彦.邯郸地区再生骨料在混凝土和砂浆中应用[J].河北工程大学学报:自然科学版,2013,3(3):49-53.

(责任编辑 王利君)

(上接第26页)将本文依据试验结果拟合的曲线与C. Rocco的曲线图<sup>[5]</sup>进行对比,可以认为,本文试验获得的 $f_{ts}/f_t$ 与 $D/L_{ch}$ 的曲线走势与C. Rocco通过有限元计算得到的曲线走势基本相同,随着 $D/L_{ch}$ 的增大, $f_{ts}/f_t$ 的逐渐减小;随着 $\beta$ 增大,对于相同的 $D/L_{ch}$ , $f_{ts}/f_t$ 的值逐渐增大。

#### (2)量值分析方面

利用STB组尺寸为 $\varphi 100\text{ mm} \times 200\text{ mm}$ ,垫条宽度与直径之比 $\alpha = 0.0333$ 的圆柱体试件劈裂抗拉强度实测值,同按式(3)推得的劈裂抗拉强度理论值作对比,具体计算过程见文献<sup>[10]</sup>。结果表明,本文推导公式求出的劈裂抗拉强度理论值略小于试验中获得的实测劈裂强度,两者相差16%,在工程允许范围内。

### 3 结论

1)根据混凝土劈拉试验结果可以看出,随着垫条宽度的增加,圆柱体混凝土试件的劈裂抗拉强度随之上升,但上升幅度并不大。垫条宽度每增加2 mm,混凝土的劈裂抗拉强度大约增加0.02~0.03 MPa。

2)基于黏聚裂纹模型,对 $f_{ts}/f_t$ 与 $D/L_{ch}$ 曲线进行回归分析,得到了不同的垫条宽度下 $f_{ts}/f_t$ 与 $D/L_{ch}$ 的回归方程: $\frac{f_{ts}}{f_t} = \frac{1}{c_1 + c_2 D/L_{ch}} + c_3$ ;并通过曲线对比与量化分析两个角度证明了回归方程的合理性,对大体积混凝土结构的设计及检测具有一定的参考意义。

#### 参考文献:

- [1]过镇海.混凝土的强度和变形:试验基础和本构关系[M].北京:清华大学出版社,1997.
- [2]中国建筑科学研究院.普通混凝土力学性能试验方法[M].北京:中国铁道出版社,1985.
- [3]徐积善.强度理论及其应用法[M].北京:水利电力出版社,1984.
- [4]TANG T. Effects of load - distributed width on split tension of unnotched and notched cylindrical specimens [J]. Journal of Testing and Evaluation, 1994, 22(5): 401 - 409.
- [5]ROCCO C, GUINEA G V, PLANAS J, et al. Review of the splitting - test standards from a fracture mechanics point of view[J]. Cement and concrete research, 2001, 31(1): 73 - 82.
- [6]丁晓唐,王磊,刘海霞,等.确定混凝土受拉应力-应变全曲线的一种新型试验方法[J].水电能源科学, 2013, 31(12): 126 - 129.
- [7]HILLERBORG A, MODERER M, PETERSSON P E. Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements [J]. Cement and concrete research, 1976, 6(6): 773 - 781.
- [8]ELICES M, PLANAS J, GUINEA G V. Fracture and damage of concrete and rock [M]. London: Rossmannith, 1993.
- [9]朱敏敏.大坝混凝土和湿筛混凝土直接拉伸断裂特性研究[D].杭州:浙江工业大学, 2011.
- [10]郑艳.混凝土劈拉强度影响因素及与轴拉强度的关系研究与应用[D].南京:河海大学, 2015.

(责任编辑 李军)