

三峡三级配混凝土轴向拉伸应力-变形全曲线

陈 萍 ,梁正平 ,黄书秦 ,陈玉泉

(河海大学土木工程学院 ,江苏 南京 210098)

摘要 :采用自行组装的轴向拉伸装置成功地测得三峡三级配混凝土轴向拉伸应力-变形全曲线(试件截面尺寸为 250 mm×250 mm),并根据实测资料进行数学拟合,建立了形式较为简单、参数求解方便、具有工程实用价值的数学表达式。
关键词 :混凝土 ;轴向拉伸 ;应力-变形全曲线
中图分类号 :TU528.1 文献标识码 :A 文章编号 :1000-198X(2001)05-0038-05

混凝土在拉力作用下具有变形软化的特性,但该软化特性在钢筋混凝土结构或预应力混凝土结构设计计算中没有被充分考虑。然而,大体积混凝土的结构计算,特别是温控抗裂计算,考虑该软化特性非常必要。对混凝土轴向拉伸应力-变形全曲线进行研究,能为混凝土结构的准确计算提供重要的依据。由于混凝土轴向拉伸应力-变形全曲线的测试难度较大,国内外研究较少,且仅限于小试件(最大截面尺寸为 100 mm×100 mm)。另外,要使混凝土的轴向拉伸全曲线在混凝土结构的数值计算中得以推广和应用,用一个简单、实用的数学式将其表达出来,是非常必要的。目前,人们在考虑混凝土的软化特性而进行有限元计算时,一般将其简化为简单的单线型或双线型^[1],计算误差较大。

为了满足三峡工程全级配混凝土拉伸性能研究的需要,本文采用截面尺寸为 250 mm×250 mm 的无预设裂缝的等截面试件,并应用自行设计的轴向拉伸装置对混凝土的轴拉应力-变形全曲线进行测量。同时分别对实验曲线的上升段和下降段进行拟合,建立了形式较为简单、参数求解方便、实用性较强的数学表达式,以便于混凝土轴拉全曲线在工程计算中的应用。

1 混凝土的轴向拉伸试验

混凝土配合比见表 1。材料分别为荆门水泥厂生产的 425 号低热水泥,陕西神头火电厂的 I 级粉煤灰,三峡坝址花岗岩人工粉碎砂和三级配碎石,碎石最大粒径 80 mm。

表 1 混凝土配合比

Table 1 Mix proportion of concrete								kg/m ³
水	水泥	粉煤灰	砂	小石	中石	大石	ZB—1A	DH9
101	172	33	694	437	291	729	1.41	0.012

采用等截面轴向拉伸试件,尺寸为 250 mm×250 mm×1 400 mm,两端预埋带螺纹的组合杆件,用于传递荷载。

试件采用搅拌机搅拌原材料,插入式振捣棒振捣成型,于标准养护室中养护。共成型试件 3 个,分别记为 S1、S2、S3,养护 28 d 后取出,并立刻进行试验。

实验装置^[2]为自行设计组装的,如图 1 所示。

试件所受的轴向拉力通过与其相联的 BLR—1 型拉压传感器进行量测,试件四侧面的中部均布置一只电测千分表,用以记录变形,其量测标距 25 cm^[3],精度为 1/6 000 mm。

收稿日期 2000-07-03
作者简介 陈萍(1972—),女,山东青岛人,主要从事建筑材料研究。
①Cornelissen H A W, Hordijk D A, Reinhardt H W. Experiments and theory for the application of fracture mechanics to normal and lightweight concrete. In Wittmann F H eds. Fracture Toughness and Fracture Energy of Concrete. 1986.565~575.

本次实验的加载过程:先将荷载单调加至极限荷载,再采用控制变形增量的方法进行循环加载,即每次加载至一定的变形值后立即卸荷.资料表明,循环加载得到的应力-变形全曲线与单调加载得到的应力-变形全曲线没有什么区别^①.

2 试验结果

由于轴拉试件开裂面是惟一的,极限强度之后,裂缝的开展集中在某一小范围内,随着荷载的降低,该裂缝开展区的变形继续增加,而开裂区外其他部分的变形逐渐减小,所以用应力-变形关系曲线来表征混凝土的拉伸特性比用应力-应变关系曲线要妥当一些.

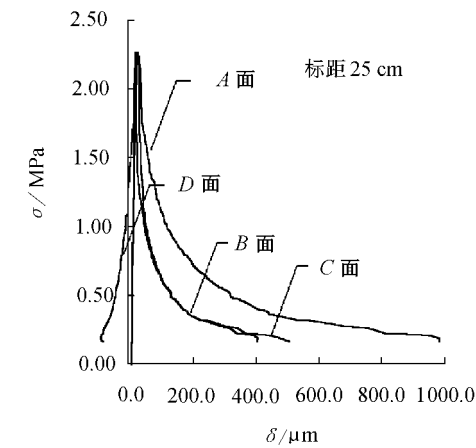


图 2 4 个侧面的应力-变形全曲线(S1)
Fig.2 Complete stress-deformation curves for four sides(S1)

下降段之后,由于试件的不规则开裂,偏心不可避免.

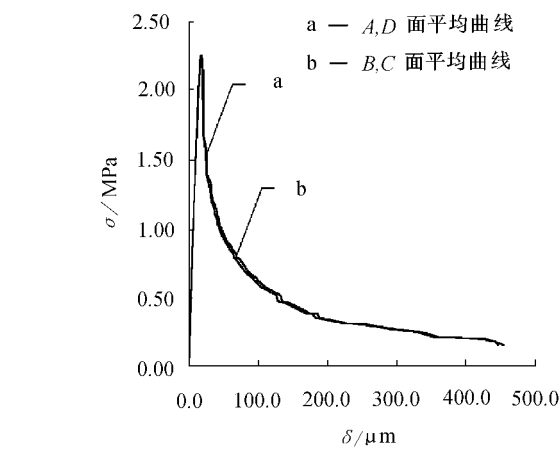


图 3 相对两侧面平均应力-变形全曲线(S1)
Fig.3 Average stress-deformation curves for two opposite sides(S1)

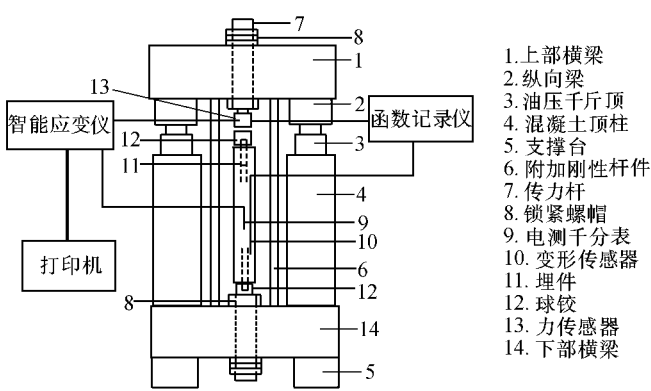


图 1 轴拉实验装置
Fig.1 Schematic diagram of axial tension test setup

图 2 为 S1 的应力-变形全曲线.试件的 4 个侧面分别用 A , B , C , D 来表示,其中 A , D 为对面, B , C 为对面,图中的 4 条曲线分别表示 4 个侧面的应力-变形关系.从图 2 可以看出:极限荷载之前,荷载偏心较小;极限荷载之后,试件出现了较大的偏心,有的侧面甚至出现了受压现象.

混凝土轴拉全曲线测试中的一个关键和难点是要求试件在受力过程中,物理轴心与实验机加荷轴线重合,以保证试件断面受力均匀.实验证明,要完全做到这一点是非常困难的.骨料分布的不均匀性使得试件的物理轴心与几何形心不完全重合,裂缝出现后,部分混凝土退出工作,该截面的承载区形状变得很不规则,其几何形心随着裂缝的发展不断地发生着变化,很难与加荷轴线保持一致,偏心必然存在.本实验中采取了一些克服偏心的措施,如尽量将两预埋拉件中心对中;采用了两个万向球铰,调整使实验机的加荷轴线与试件的物理轴心尽可能统一;实验前对试件进行预拉调整偏心等等.结果表明,只能尽量减小偏心,尤其是进入

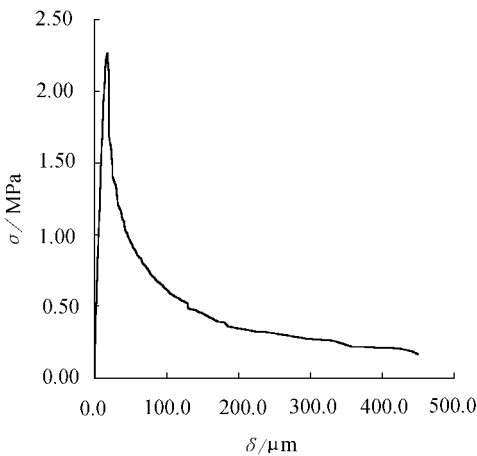


图 4 4 个侧面的平均应力-变形全曲线(S1)
Fig.4 Average stress-deformation curves for four sides(S1)

①Cornelissen H A W , Hordijk D A , Reinhardt H W . Experiments and theory for the application of fracture mechanics to normal and lightweight concrete . In : Wittmann F H , eds . Fracture Toughness and Fracture Energy of Concrete . 1986 . 565 ~ 575 .

图2反映的是试件4个侧面表面的应力-变形关系曲线,试件的截面越大,表面离形心轴的距离就越大,曲线受荷载偏心的影响亦越大.由于试件的相对两侧面受偏心影响的效果是相反的,将相对两侧面的变形相加平均,得到的曲线就能反映形心轴处的应力-变形关系,如图3所示.可以看出,相对两侧面平均的两条曲线形状非常接近.所以用形心轴处的应力-变形关系来表征混凝土试件的拉伸特性具有一定的统一性和规范性.

图4是图3两条曲线的平均结果,也就是S1的实测应力-变形全曲线.

3 轴拉应力-变形全曲线的拟合

3.1 上升段的拟合

上升段引用 David Z Yankelevsky 和 Gans W Reinhardt^[4]采用的上升段的表达式

$$\sigma = K_t \delta - (K_t \delta_t - f_t) \left(\frac{\delta}{\delta_t} \right)^A \quad (\delta \leq \delta_t) \tag{1}$$

式中: K_t ——应力变形曲线的初始斜率; f_t ——极限抗拉强度,即峰值应力; δ_t ——峰值处的变形; σ ——拉伸应力; δ ——标距内的变形; A ——大于1的常数,它表示上升段的非线性.

根据峰值处的斜率为0,即当 $\delta = \delta_t$ 时, $d\sigma/d\delta = 0$,得

$$A = \frac{K_t \delta_t}{K_t \delta_t - f_t}$$

该数学表达式有如下特点 (a) 初始斜率与实验值一致 (b) 极限抗拉强度处的变形值与实验值一致 (c) 曲线开始时线性很好,而当应力达到 f_t 时斜率很快降为0,这与实验情况吻合较好 (d) 参数 A 可以根据试验参数直接计算而得,非常方便.

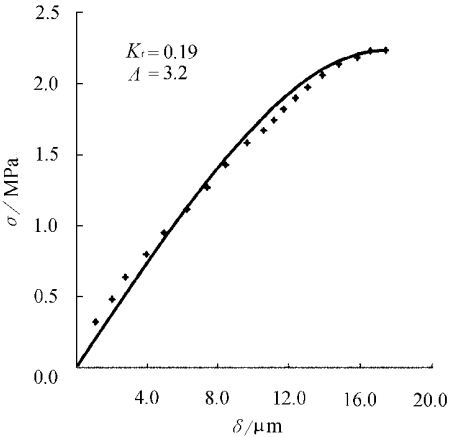


图5 上升段拟合曲线(S1)

Fig.5 Fitting curve for ascending section(S1)

图5是根据图4上升段的实验点用式(1)拟合的结果,可以看出拟合曲线与实验点吻合较好,且符合上述特点.

3.2 下降段的拟合

下降段的曲线形状较为复杂,将它简化为陡降段和平缓段两部分,建立的表达式为

$$\sigma = f_t \exp \left\{ -B \left(\frac{\delta}{\delta_t} - 1 \right)^C \right\} \quad (\delta \geq \delta_t) \tag{2}$$

式中 B, C 为参数, $f_t, \delta_t, \sigma, \delta$ 的物理意义同式(1).

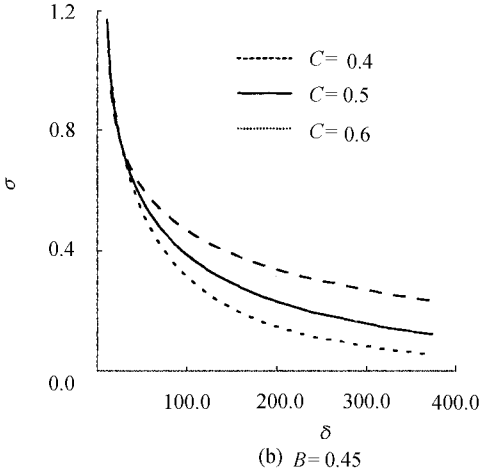
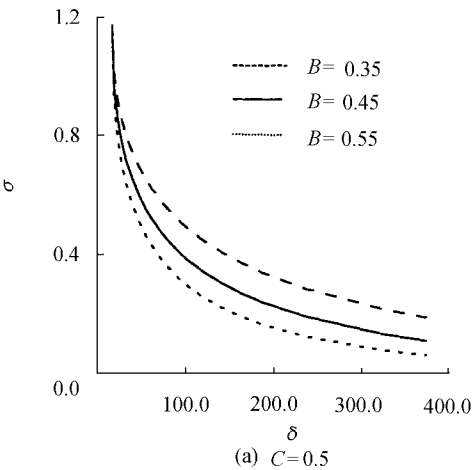


图6 参数 B, C 对曲线形状的影响

Fig.6 Influence of parameters B and C on curve shape

图6(a)和图6(b)分别反映了参数 B, C 值对下降段曲线形状的影响.从图6中可以看出,参数 B 控制了下降段曲线陡降部分的斜率,而参数 C 与平缓段的起点和高度有关.

式(2)的参数 B, C 可以按下述的线性最小二乘法求得.

a. 公式线性化. 对式(2)的两边求两次自然对数得

$$\ln(-\ln \frac{\sigma}{f_t}) = C \ln(\frac{\delta}{\delta_t} - 1) + \ln B$$

(3)

令 $Y = \ln(-\ln \frac{\sigma}{f_t}), X = \ln(\frac{\delta}{\delta_t} - 1), D = \ln B$ 则式(3)可简化为线性公式

$$Y = CX + D$$

(4)

b. 对下降段的实验点根据式(4)进行线性最小二乘法拟合, 就可得到参数 B 和 C . 图 7 是图 4 的下降段实验点线性拟合的结果, 从曲线上可以看出, 实验点符合上述线性要求.

将所得的参数代入式(2)即可得到下降段的拟合曲线. 图 8 是对图 4 下降段的实验点拟合的结果. 上述下降段的拟合公式, 形式简单, 参数较少, 而且参数的求解方法简便易行.

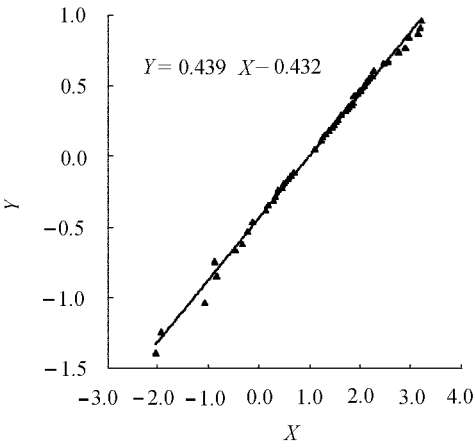


图 7 下降段的线性拟合结果(S1)
Fig.7 Result of linear fitting for descending section(S1)

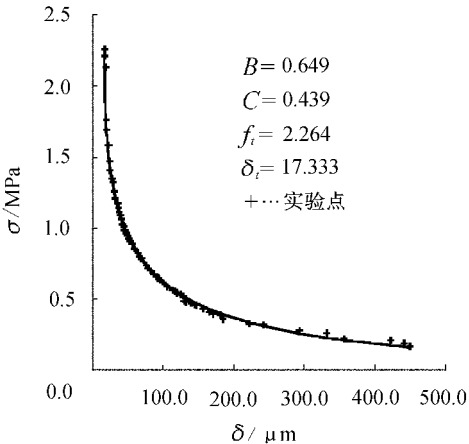


图 8 下降段拟合曲线(S1)
Fig.8 Fitting curve for descending section(S1)

c. 实验结果的拟合处理. 将 S2, S3 的试验曲线分别按式(1)和式(2)进行拟合, 所得拟合曲线如图 9 所示. 该数学表达式同样适应于其他配比的截面尺寸为 250 mm × 250 mm 的混凝土试件^[5].

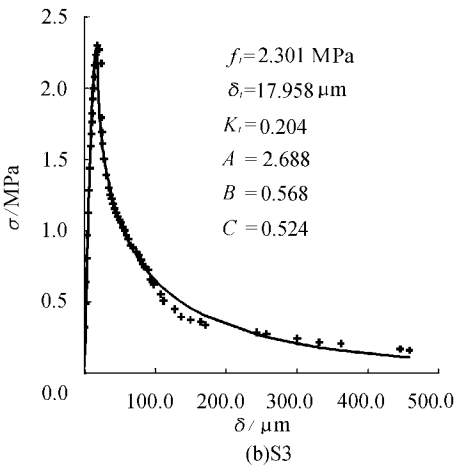
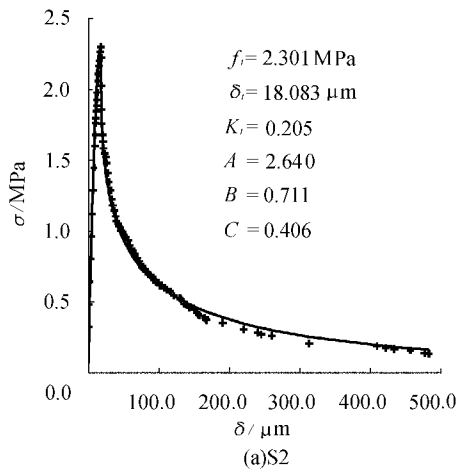


图 9 应力-变形全曲线
Fig.9 Complete stress-deformation curve

4 结 论

a. 混凝土拉伸软化特性可以用轴拉应力-变形全曲线比较全面地表达出来. 采用自行设计组装的轴向拉伸装置可测得截面尺寸为 250 mm × 250 mm 的混凝土试件的轴向拉伸应力-变形全曲线.

b. 轴拉试验不可避免地存在着偏心,尤其是极限强度之后,裂缝开展的不规则性,使得偏心更加明显. 试件形心轴处的变形受偏心的影响最小,用试件形心轴处的应力-变形关系来表征混凝土试件的拉伸特性具有一定的统一性和规范性. 形心轴处的变形可以用相对两侧面的变形相加平均得到.

c. 为了便于应用,本文分别对混凝土轴向拉伸应力-变形全曲线的上升段和下降段进行了拟合,建立的数学表达式形式比较简单、参数求解方便. 实测数据验证表明,本表达式比单线型或双线型等数学表达式的精度高,且更具有工程实用价值.

参考文献:

- [1] 江见鲸. 混凝土力学[M]. 北京:中国铁道出版社,1991. 253~255.
- [2] 霍洪媛,梁正平. 混凝土轴向拉伸全曲线试验及装置[J]. 河海大学学报,1995,23(5):26~30.
- [3] SD 105—82, 水工混凝土试验规程[S].
- [4] David Z, Yankelevsky Gans, Reinhardt W. Response of plain concrete to cyclic tension[J]. ACI Materials Journal, 1987, 84(1~6): 365~373.
- [5] 陈萍. 大尺寸混凝土试件轴向拉伸应力-变形全曲线的试验及其研究[D]. 南京:河海大学,1999.

Complete Curve of Axial Tensile Stress-Deformation of Three-Graded Concrete in Three Gorges Project

CHEN Ping, LIANG Zheng-ping, HUANG Shu-qin, CHEN Yu-quan
(College of Civil Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098, China)

Abstract The tensile performance of concrete can be reflected by the complete axial tensile stress-deformation curve. In this paper, the measurement of complete stress-deformation curves of axial tension of large-size concrete specimen (250 mm × 250 mm) for the Three Gorges Project is performed successfully by use of a self-designed tension apparatus. Then the measured curves are analyzed, and the formulae are established for practical use.

Key words concrete; axial tension; complete stress-deformation curve