

混凝土单轴直接拉伸受力分析

黄 俊 姜弘道

(河海大学土木工程学院,江苏 南京 210098)

摘要 对 3 种直接拉伸试验方式(内埋式、外夹式和粘贴式)下混凝土试件各点的应力分布状况进行了有限元数值分析,对获得混凝土单轴直接拉伸应力-应变全曲线所需的条件进行了探讨,并对试件在两端粘贴受力方式下辅以刚性架装置后刚性架拉杆刚度、位置对试件受力的影响进行了研究.结果表明:两端粘贴加载方式可使试件各点应力分布更加均匀,应力集中程度较低;减小刚性架的高度、增大刚性架的截面积有利于获得完整的应力-应变全曲线.

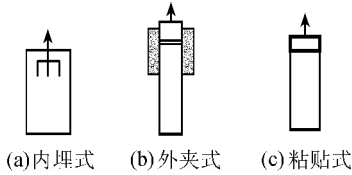
关键词 混凝土;直接拉伸;应力分析;刚性架

中图分类号: TU501 文献标识码: A 文章编号: 1000-1980(2006)03-0306-05

混凝土拉伸力学性能的研究一直被众多研究者所关注,目前研究多采用劈裂拉伸试验^[1-3],也有一些学者采用材料的弯曲试验来分析混凝土的拉伸性能.但这些都是间接拉伸试验,试件内部的应力状况比较复杂,间接拉伸试验不能真实地反映材料的抗拉强度.直接拉伸相对间接拉伸来讲,材料内部应力分布简单、均匀.窦庆峰等^[4]对直接拉伸试验和劈裂试验进行了对比,得出直接拉伸试验较劈裂试验优越的结论.目前,国内外学者进行单轴直接拉伸试验主要采用 3 种加载方法:内埋式^[5-9]、外夹式^[10-13]和粘贴式^[14-18].除此之外,一些学者^[19-21]也采用其他类型的直接拉伸试验方法,但不常见.为了得到材料在纯拉情况下应力-应变全曲线,刚性架一直被广大研究者所采用,但很少有学者分析刚性架的刚度对材料受力性能的影响.事实上,刚性架的刚度若太小,不能达到增加试验机刚度的要求,也就无法得到拉伸曲线的下降段;刚性架的刚度若太大,则其所承受的荷载也越大,这对一些试验机的吨位来讲是不允许的.另外刚性架拉杆的大小和位置也对试件的受力有影响.

1 混凝土单轴直接拉伸下的应力分析

实际加载时,无论采用何种加载方式,都会造成一定程度的应力不均匀.下面仅就 3 种常见的直接拉伸受力进行有限元分析,并将分析结果与理论值进行对比.图 1 是常见的 3 种直接拉伸试验模型.



(a)内埋式 (b)外夹式 (c)粘贴式

图 1 直接拉伸试验模型

Fig.1 Models for direct tensile tests

1.1 内埋式与粘贴式直接拉伸

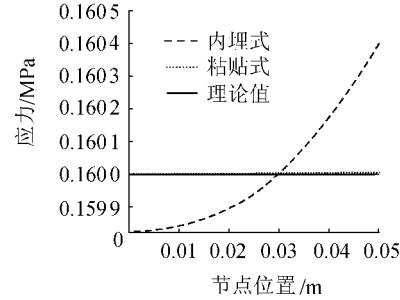


图 2 内埋式与粘贴式模型试件中部各点的应力分布

Fig.2 Stress distribution in central section of specimen in embedded bar manner and glued plated grip manner

对于柱状试件,其直接拉伸试验常采用内埋式和粘贴式模型,图 2 和图 3 是在这 2 种拉伸方式下试件中部和侧边的应力分布与理论值的比较.内埋式拉伸试件采用图 1(c)模型,粘贴式拉伸试件采用图 1(c)模型,模型尺寸为 100 mm × 500 mm,取模型的 1/4 为研究对象,采用平面应变单元进行分析.设试件所受的力为 16 kN;钢棒和钢板的弹模均为 210 GPa,泊松比为 0.315;混凝土的弹模为 21 GPa,泊松比为 0.25.假定钢筋(钢板)与混凝土之间为完全黏结.

由图 2 可知,采用粘贴钢板的方式对试件进行加力,应力值与理论值 0.16 MPa 极为接近,比内埋式中部各点的应力分布均匀得多.图 3 为试件沿加载方向各点的应力分布情

况,对于内埋式模型试件,应力离中部不远处就发生偏移,并且与理论值的差值逐渐增大,而对于粘贴式模型试件,只有当靠近粘贴钢板时,应力才与理论值有一定的误差,采用粘贴式模型试件对试件进行拉伸,即使在粘贴处应力集中也比内埋式小得多.因此这 2 种单轴直接拉伸方式比较而言,两端粘贴钢板的加载方式较好.

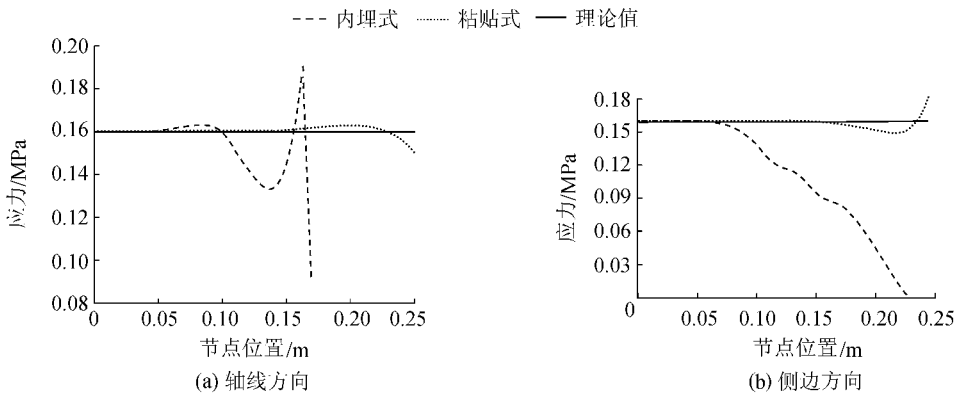


图 3 内埋式与粘贴式模型试件中部至端部各点应力分布

Fig.3 Stress distribution from central section to end of specimen in embedded bar manner and glued plated grip manner

1.2 外夹式与粘贴式直接拉伸

下面分别采用两侧外夹钢板和两端粘贴钢板的方法对薄板状试件进行受力分析.薄板的外形尺寸为 300 mm × 100 mm × 30 mm,弹模为 21 GPa,泊松比为 0.25,外夹钢板或粘贴钢板的弹模为 210 GPa,泊松比为 0.315,采用三维有限元模型.由于薄板对称,可取模型的 1/4 作为研究对象.

图 4 是混凝土试件分别在两侧外夹钢板和两端粘贴钢板的单向加载方式下中部各点应力值与理论值的比较情况.通过直接拉伸,粘贴式试件受力与理论值 5.333 MPa 极为接近,而外夹式试件各点的应力分布则极不均匀.图 5(a)是试件轴线中部沿轴线由中部至端部各点的应力分布情况,图 5(b)为试件侧边沿轴向由中部至端部各点的应力分布情况.由图 5 可知,采用两端粘贴方式进行加载产生的应力集中程度较低.

因此,无论从试件内部的应力均匀性还是从试件与外部装置接触处产生的应力集中程度看,采用两端粘贴式的加载方式比内埋式和外夹式加载方式更合理.

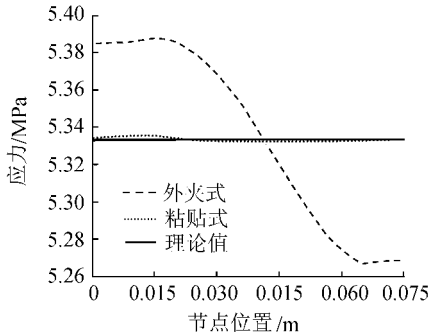


图 4 外夹式与粘贴式模型试件中部各点应力分布

Fig.4 Stress distribution in central section of specimen in steel plates connecting manner and glued plated grip manner

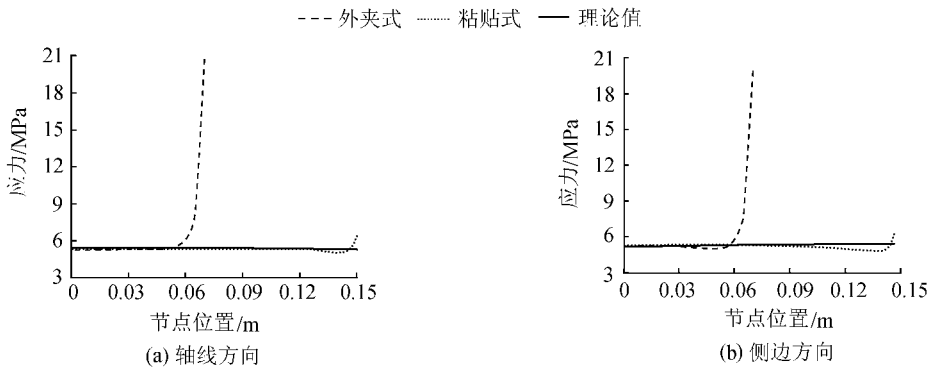


图 5 外夹式与粘贴式模型试件中部至端部各点处应力分布

Fig.5 Stress distribution from central section to end of specimen in steel plates connecting manner and glued plated grip manner

2 试验装置的刚度分析与应力计算

好的试验方法不仅能减小试件内部的应力集中程度,而且能使应力的分布尽可能均匀.姚武等^[22-23]分

别对混凝土单轴应力-应变全曲线试验测定的条件和方法进行了介绍. 伺服万能试验机已用于获得混凝土全曲线的下降段. 但目前使用最多的仍然是普通液压万能试验机和电子万能试验机. 一些学者利用刚性架在普通万能试验机上得到了完整的应力-应变全曲线^[14]. 而要得到应力-应变全曲线, 应注意以下两个方面: 一是试件和刚性架之间的辅助装置不能太长; 二是由于刚性架承担一部分荷载, 刚性架的刚度形状对所承受的荷载有影响, 因此提高了对万能试验机吨位的要求. 因此对一般的试验装置进行应力分析, 了解刚性架的刚度与刚性架所承担的荷载之间的关系是极为重要的.

图 6 是采用带有刚性架装置的直接拉伸模型. 设试件的刚度为 K_0 , 加在试件上的粘贴钢板等附加装置的刚度为 K_3 , 刚性架的刚度为 K_2 , 加力装置的刚度为 K_1 , 要想得到稳定的试验曲线, 必须使试验装置的回弹变形小于试件的拉伸变形, 从而试验装置的刚度必然要大于试件的刚度.

K_2 与 K_3 和 K_0 组成的系统是并联连接, 可以近似认为它们具有相同的位移, 由公式 $K = F/X$ 可以得到 K_1 和 K_2 的总体刚度为 $K_1 + K_2$. 下面从能量角度分析, 为获得稳定的应力-应变全曲线下降段, 整个系统需要满足的刚度要求.

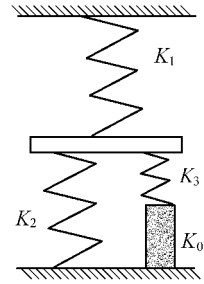


图 6 刚性架拉伸试验装置模型

Fig. 6 Tensile test model with stiff frame

假设试件达到最大荷载后, 变形由 0 增大到 ω , 所需能量为 Q_0 , 则有

$$Q_0 = \int_0^\omega F(\omega) d\omega \quad (1)$$

加力装置、刚性架、粘贴钢板等附加装置材料一般为金属, 其变形范围都在线弹性范围内变化, 所以均可按弹性试件来计算它们所消耗的能量. 设加力装置和刚性架的整体刚度为 K_{12} , 其消耗的能量为 Q_{12} , 粘贴钢板等附加装置所消耗的能量为 Q_3 , 则有下列关系式成立:

$$Q_{12} = \frac{F(\omega)^2}{2(K_1 + K_2)} \quad (2)$$

$$Q_3 = \frac{F(\omega)^2}{2K_3} \quad (3)$$

要想获得稳定的应力-应变全曲线下降段, 则所有装置及试件所消耗的能量对 ω 的导数必须大于 0, 即

$$\frac{\partial (Q_{12} + Q_3 + Q_0)}{\partial \omega} > 0 \quad (4)$$

联立式(1)(2)(3)(4), 可得

$$\frac{F(\omega)F'(\omega)}{K_1 + K_2} + \frac{F(\omega)F'(\omega)}{K_3} + F(\omega) > 0 \quad (5)$$

化简得

$$F'(\omega) > \frac{-K_3(K_1 + K_2)}{K_1 + K_2 + K_3} \quad (6)$$

实际上, 在试件拉伸处于下降段时, $F(\omega)$ 为一负值, 可令其为 $-K_0$, 故有

$$\frac{K_3(K_1 + K_2)}{K_1 + K_2 + K_3} > K_0 \quad (7)$$

$$K_1 = \frac{E_1 A_1}{l_1} \quad K_2 = \frac{E_2 A_2}{l_2} \quad K_3 = \frac{E_3 A_3}{l_3} \quad K_0 = \frac{E_0 A_0}{l_0} \quad (8)$$

设式(7)左边为整个试验装置的刚度, 用 K_M 表示, K_1, K_2, K_3 的增大都会使试验机的刚度增大, 这对获得稳定的全曲线是有利的. 事实上, 在实际拉伸装置中, K_1, K_2, K_3 可由拉伸变形公式得到.

在弹模一定时, 钢板和刚性架的长度越长, 其刚度越小, 而截面积越大, 刚度越大. 因此在配置辅助刚性架时, 应尽量减小刚性架的高度, 增大截面积. 对于试件来讲, 长度越大, 截面积越小, 式(7)越容易满足.

从上述分析可知, 当试验装置采用上下粘贴钢板的加载方式时, 应力分布最均匀, 应力集中程度最低. 下面对带有辅助刚性架装置并采用两端粘贴钢板加载方式的混凝土试件进行直接拉伸受力分析.

同样利用对称性, 可以取整个加载装置的 1/4 进行研究, 有限元模型如图 7 所示. 由式(8)可知, 当粘贴钢板等附加物高度越大时, 其刚度就越小, 沿高度方向变形就越大, 而当试件达到极限荷载之后, 弹模成为负值, 因此钢板要回缩, 若回缩的变形越大, 试件产生冲击的可能性就越大, 也就越不易得到稳定的全曲线. 仍

假设刚性架、粘贴钢板等的弹模为210 GPa,泊松比为0.315,混凝土的弹模为21 GPa,泊松比为0.25.由数值分析可知,当粘贴钢板等附加物的高度为试件高度的26.7%时,其变形为试件变形的4.8%;当粘贴钢板的厚度增加1倍时,其变形为试件变形的13%.一般采用两端粘贴钢板的方式,其截面面积保持与试件相同.刚性架的拉杆高度一般可由试件和粘贴钢板共同决定,当其截面面积增大时,虽然刚性架的刚度增大了,其所承担的荷载也增大了,但对试件的应力和变形影响不是太大.从应力的分析看,在保持刚性架横杆材料和截面尺寸不变的情况下,刚性架拉杆位置对试件的受力影响较大,当拉杆与试件中心的距离增大为原来的1.89倍时,刚性架与试件所承受力的比值由原来的6.274变为2.034.由此可见,刚性架的拉杆与试件的距离越近,则其所承担的拉力越大.当试验机的吨位不太大时,可以考虑将拉伸试验的刚性架拉杆与试件的距离增大一些.

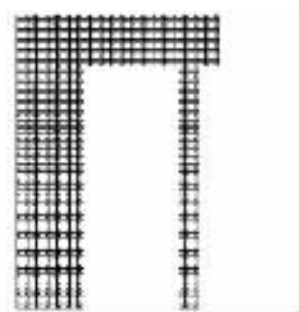


图7 带刚性架装置有限元网格
Fig.7 FEM model with stiff frame

3 结 论

本文重点对内埋钢棒、外夹钢板、粘贴钢板这3种混凝土直接拉伸加力方式下试件的受力情况进行了分析,分析结果表明:两端粘贴钢板的加载方式较其他2种加载方式更合理,采用该种加载方式不仅可以保证试件内部应力分布均匀,而且试件与加载装置粘贴处应力集中程度也比其他2种加载方式低得多.为了利用辅助刚性架来获得稳定的应力-应变全曲线,本文采用能量方法推导了装置需满足的刚度条件,并利用有限元方法进行了应力和变形计算,得到了一些有益的结论.

参考文献:

- [1] 易成,谢和平,鞠杨,等.混凝土与纤维混凝土的劈裂试验及损伤描述[J].实验力学,2003,18(4):529-537.
- [2] 缪群,朱晓峰.利用楔劈拉伸试验研究混凝土的断裂特性[J].建筑材料学报,1999,2(3):212-217.
- [3] 宣国良.混凝土圆柱体劈拉强度的尺寸效应[J].河海大学学报,1996,24(2):92-97.
- [4] 窦庆峰,岳顺,代高飞.岩石直接拉伸试验与劈裂试验的对比研究[J].地下空间,2004,24(2):178-181.
- [5] 霍洪媛,车黎明,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):26-31.
- [6] 陈萍,梁正平,黄书秦,等.三峡三级配混凝土轴向拉伸应力变形全曲线[J].河海大学学报:自然科学版,2001,29(5):38-42.
- [7] 梁正平,陆海荣,黄书秦,等.一种简易的混凝土轴向拉伸试验装置[J].水利学报,1999,30(8):73-75.
- [8] 梁正平,陆海荣,黄书秦.三峡工程原级配混凝土单向拉压性能试验[J].河海大学学报,1992,20(5):105-111.
- [9] SWADDIWUDHIPONG S, LU Hai-rong, WEE T H. Direct tension test and tensile strain capacity of concrete at early age[J]. Cement and Concrete Research, 2003, 33(12):2077-2084.
- [10] LI Zong-jin, SURENDRA P S. Localization of microcracking in concrete under uniaxial tension[J]. ACI Materials Journal, 1994, 91(4):372-381.
- [11] LI Zong-jin. Microcrack characterization in concrete under uniaxial tension[J]. Magazine of Concrete Research, 1996, 48:219-228.
- [12] LI Z, KULHARNI S M, SHAH S P. New test method for obtaining softening response of unnotched concrete specimen under uniaxial tension[J]. Experimental Mechanics, 1993, 33(3):181-188.
- [13] PHILLIPS D V, ZHANG Bin-sheng. Direct tension tests on notched and un-notched plain concrete specimens[J]. Magazine of Concrete Research, 1993, 45:25-35.
- [14] GUO Zhen-hai, ZHANG Xiu-qin. Investigation of complete stress deformation curves for concrete in tension[J]. ACI Materials Journal, 1987, 84(4):278-285.
- [15] WANG Y J, LI V C, BACKER S. Experimental determination of tensile behavior of fiber-reinforced concrete[J]. ACI Materials Journal, 1990, 87(5):461-468.
- [16] 董振英,李庆斌,王光纶,等.钢纤维混凝土轴拉应力-应变特性的试验研究[J].水利学报,2002(5):47-50.
- [17] 尚仁杰,赵国藩,黄承逵.低周循环荷载作用下混凝土轴向拉伸全曲线的试验研究[J].水利学报,1999(7):82-86.
- [18] 彭勃,郑伟.混凝土单轴直接拉伸强度试验方法的研究[J].湖南大学学报:自然科学版,2004,31(2):79-83.
- [19] 祝明桥.混凝土间接轴向拉伸应力-应变全曲线的测试[J].工业建筑,2001,31(7):39-41.
- [20] MAZARS J, BERTHAUD Y, RANTANI S. The unilateral behavior of damaged concrete[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1990, 35

(4) 629-635.

- [21] LUONG M P. Tensile and shear strengths of concrete and rock[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1990, 35(1): 127-135.
- [22] 姚武, 吴科如. 混凝土拉伸应力-应变全曲线实验测定的条件[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 1996, 24(2): 142-145.
- [23] 顾惠琳, 彭勃. 混凝土单轴直接拉伸应力-应变全曲线试验方法[J]. 建筑材料学报, 2003, 6(1): 66-71.

Stress analysis of concrete in uniaxial direct tension

HUANG Jun, JIANG Hong-dao

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

Abstract Stress distribution at different points of concrete specimens was analyzed with FEM in 3 kinds of direct tension, i.e. embedded bar manner, steel plates connecting manner, and glued plated grip manner, and the conditions for obtaining the complete stress-strain curve of concrete in uniaxial direct tension were discussed. Moreover, the mechanical behaviors of concrete specimens in glued plated grip manner which was supported by a stiff frame were analyzed, with the effects of stiffness and location of the stiff frame taken into account. The results show that the glued plated grip manner makes the stress distribution in concrete more uniform, and that decreasing the height and increasing the cross section of the stiff frame make it easy for obtaining the complete stress-strain curve.

Key words concrete; direct tension; stress analysis; stiff frame

《河海大学学报(哲学社会科学版)》征订启事

(CN32-1521/C, ISSN1671-4970, 季刊, 自办发行)

本刊以马列主义、毛泽东思想、邓小平理论和“三个代表”重要思想为指导, 坚持实事求是的思想路线, 贯彻“双百”方针, 弘扬时代主旋律, 理论联系实际, 为社会主义物质文明与精神文明建设服务。

本刊为哲学与社会科学类学术期刊, 主要刊登哲学、政治学、文学、史学、语言学、法学、社会学、心理学、经济学、管理学、高等教育学等社会科学方面的研究成果、学术论文、综述等学术性文章。本刊可供上述有关专业的研究人员、管理人员和大专院校师生阅读与参考。本刊为中国学术期刊(光盘版)入编期刊与中国学术期刊网入编期刊。

本刊由河海大学主办, 每季末出版, 国内外公开发行, 每本定价5元, 每本邮费1元, 全年订费24元。欢迎广大读者直接向编辑部订阅。联系地址: 南京市西康路1号《河海大学学报(哲学社会科学版)》编辑部, 邮政编码210098, 联系电话(025)83786376。