

高强箍筋约束高强混凝土柱在轴压下的力学性能研究综述

司炳君¹, 胡 钟¹, 孙治国², 王东升²

(1. 大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024; 2. 大连海事大学 道路与桥梁工程研究所, 辽宁 大连 116026)

摘 要: 采用高强度箍筋约束高强混凝土柱以保证其延性是混凝土结构的重要发展方向,为研究高强箍筋约束高强混凝土柱在轴压下的力学性能,统计了国内外的研究情况并对结果进行总结分析,发现在高强箍筋约束作用下,高强混凝土的脆性减小,强度和延性增加。同时介绍了几种有代表性的约束混凝土模型,分析了影响高强箍筋约束高强混凝土柱的延性和强度的主要因素为混凝土强度、体积配箍率、箍筋屈服强度、箍筋间距、混凝土保护层、纵筋配筋率以及箍筋约束形式等,并对各影响因素的作用进行总结。

关键词: 高强箍筋; 高强混凝土; 轴压; 延性; 强度; 约束模型; 综述

中图分类号: TU528.01 文献标志码: A 文章编号: 1002-3550(2010)11-0039-04

Review of studies on the behavior of high-strength concrete columns with high-strength transverse reinforcement under concentric compression

SI Bing-jun¹, HU Zhong¹, SUN Zhi-guo², WANG Dong-sheng²

(1. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. Institute of Road and Bridge Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

Abstract: It has become an important topic to obtain ductile behavior in high-strength concrete (HSC) columns through proper confinement with high-strength transverse reinforcement. A comprehensive study of the experimental results for HSC columns is undertaken to evaluate the compression behavior of HSC columns with high-strength transverse reinforcement in this paper. It is found that the brittleness of HSC will be decreased and the strength and ductility of HSC could be improved by using high-strength transverse reinforcement. Also, some confining models for HSC with high strength transverse reinforcement are introduced in this paper. Based on analysis of the test results, it is found that the key variables that have significant effects on the ductility and strength of HSC columns are the concrete compressive strength, the volumetric ratio of transverse reinforcement, the tie yield strength, tie spacing, concrete cover thickness, the longitudinal reinforcement ratio and the tie configuration.

Key words: high-strength transverse reinforcement; high-strength concrete; concentric compression; ductility; strength; confining models; review

0 引言

当代土木工程结构向大跨、高耸、重载和承受恶劣环境的方向发展,而高强混凝土在工作度、强度、抗渗性与耐久性等方面具有的显著优势,使其在土木工程领域得到推广应用^[1]。目前,多数工业化国家已能广泛供应强度高达 100 MPa 的预拌混凝土,如有需求,更高强度的混凝土(150 MPa)也能提供。近年来随着我国城市建设高潮兴起,国内在高强混凝土的应用上也已出现了新的局面,高强混凝土越来越多的得到运用^[2-3]。

随着混凝土强度的提高,脆性愈为显著,从而影响了结构的延性和耗能能力,限制了高强混凝土结构在强震区的使用。而采用高强箍筋约束高强混凝土,对柱形成有效约束,从而提高其延性抗震能力,为高强混凝土结构在强震区的推广应用提供了新的解决途径^[4]。目前我国土木工程界大力推广的 HRB400 级与 HRB500 级钢筋正适应了这种发展趋势,具有广泛的应用前景^[5]。

由于较高的抗压强度和弹性模量,明显的脆性以及较低的侧向膨胀能力,造成高强混凝土与普通混凝土力学性能存在明显差别。先前所进行的混凝土力学性能的研究主要针对普通混凝土,对于高强混凝土的研究则相对较晚。本文在总结国内外相关试验研究的基础上,对高强箍筋约束高强混凝土柱在轴压下的力学性能进行介绍。

1 国内外的研究情况

高强混凝土是在 20 世纪 70 年代发展起来的,相应的研究则是从 80 年代开始。目前国内学者所做的研究大多以拟静力试验手段研究高强箍筋高强混凝土柱的抗震性能,而对于高强箍筋约束高强混凝土柱在轴压下的力学性能研究较为缺乏,至于确定高强箍筋约束高强混凝土的合适本构关系模型更是很少涉及。国外学者针对高强箍筋约束高强混凝土柱进行了较多的试验研究,得出了一些有价值的结论,但理论分析目前还不够完善。

收稿日期: 2010-06-12

基金项目: 国家自然科学基金资助(50978042)

天津大学戴自强等^[6-7]对 18 根各种不同配箍率无纵向钢筋的约束混凝土柱以及 12 根具有高强纵向钢筋和相应配箍率的约束混凝土短柱进行了强度试验,其中混凝土强度为 54.1 MPa,箍筋屈服强度为 663 MPa,纵筋抗压条件屈服强度为 1 788.5 MPa,试验主要研究配箍率对混凝土强度及变形的影响以及高强纵向钢筋在约束混凝土中的作用。试验结果表明密排复合箍筋对混凝土具有很好的约束作用,使混凝土强度和延性均有很大改善,当配箍率达到一定量时,可使脆性的高强混凝土接近理想的弹塑性材料。在密排箍筋的混凝土柱中配置纵向高强钢筋可增加对混凝土的约束作用。

Martinez 等^[8]对一批混凝土强度在 20.7~69 MPa 的圆形截面柱进行轴压试验,柱由螺旋箍筋约束,屈服强度在 380~414 MPa,未配置纵向钢筋。试验结果表明,柱的强度和延性随着侧向约束的增强而有所提高,但提高幅度与混凝土强度未发现明显关系。相对于普通混凝土柱来说,高强混凝土柱在最大轴向应力时所对应的轴向应变要小,同时在最大应力之后,柱子的承载力下降的越快。

Yong 等^[9]对 24 根方形截面柱进行了试验研究,混凝土强度范围在 83.6~93.5 MPa 之间,纵筋屈服强度为 424 MPa 的 3 号钢筋,箍筋屈服强度为 500 MPa。试验结果表明使用箍筋进行约束会使高强混凝土的应力-应变关系得到改善,且随着箍筋体积率的增加改善效果越明显。由于箍筋间距较大时(等于柱的横向尺寸)约束效果已不明显,因此建议箍筋间距应小于柱的横向尺寸。同时试验研究还发现,纵筋的合理分布会提高柱的延性。

Bjerkeli 等^[10]对 4 组不同尺寸、不同骨料密度的柱进行了试验研究,混凝土强度在 65~115 MPa 之间,箍筋的屈服强度在 506~613 MPa 之间。试验结果表明通过约束作用高强混凝土的延性得到提高,大直径纵筋的使用对延性基本没有影响,但是纵筋的数量对柱的延性影响很大,纵筋数量越多,延性越好,随着混凝土强度的提高,箍筋的约束效果将会被削弱。同时试验结果还表明受螺旋箍筋约束的圆形柱比受方形箍筋约束的方形柱的力学性能要好。

Nagashima 等^[11]对 26 根方形柱进行了单调轴向受压试验,混凝土强度在 59~118 MPa 之间,箍筋屈服强度在 784~1 372 MPa 之间。试验结果显示普通强度混凝土柱的延性比高强混凝土柱的延性要好,当配置相同的箍筋且纵筋的量相同时,纵筋的屈服强度对核心混凝土的强度和延性基本没有影响,试验结果还表明箍筋约束作用下混凝土柱强度的增加量和素混凝土强度没有直接关系,而和有效侧向约束承载力的平方根成正比,受约束混凝土的延性和箍筋的承载力成正比,和混凝土的强度成反比。

Cusson 和 Paultre^[12-13]对 27 根大比例尺的方形截面柱进行了轴压试验,混凝土强度范围在 53~116 MPa 之间,箍筋屈服强度在 392~770 MPa 之间。试验结果显示,混凝土保护层在试验过程中过早脱落,因此建议在计算高强混凝土的轴向承载力时仅计算核心混凝土的面积。试验发现约束箍筋用量是影响混凝土应力-应变关系最重要的因素,只有在受到大量箍筋约束效果很好的混凝土柱中,提高箍筋的屈服强度才会增加混凝土柱的强度和延性。

Razvi 和 Saatcioglu^[14-15]对混凝土强度在 60~124 MPa 之间的 26 根方形截面柱和 20 根圆柱分别进行了轴压试验,试验考虑的参数包括混凝土强度、体积配箍率、箍筋的屈服强度、箍筋

间距、纵筋的分布等。试验结果表明,混凝土强度越高,柱的延性越差,对于高强混凝土,只有使用箍筋并提供足够的侧向约束,才不会显示出极大的脆性,增加侧向约束力,既可以通过增大箍筋体积率,也可以通过提高箍筋屈服强度。对于方形柱,试验结果显示,当达到非约束性混凝土强度的 70%左右时,混凝土保护层开始脱落,对于箍筋排列越紧密的柱子这种破坏越明显。对于圆形柱,结果显示,在约束作用下,高强混凝土强度的增加量不随混凝土强度的改变而改变,因此,若要使强度增加的比率相同,高强混凝土比普通混凝土则需要更多的约束,此外,当配箍率相同时,配有纵筋的圆柱比无纵筋的圆柱在约束效果上要好的多。

Liu 等^[16]对 12 根圆形柱进行了轴压试验,这些柱子受到圆形箍筋或螺旋筋约束,混凝土强度在 60~96 MPa 之间。试验结果表明,对于受到较好约束的高强混凝土柱,当混凝土保护层为零或很薄时,增加高强混凝土柱的有效约束应力,柱子的承载力也会提高,而对于约束效果不好的的高强混凝土柱,则无此结论。

Tan 和 Nguyen^[17]对 30 根方形截面柱进行了轴压和轴向偏心受压试验,混凝土强度范围在 46~101 MPa 之间。试验结果显示,当受到箍筋约束时,混凝土柱的强度和延性都有所提高。研究发现箍筋的约束形式对于混凝土柱的抗弯能力有着较大的影响,同时还发现选择屈服强度高箍筋比普通屈服强度的箍筋在对高强混凝土的约束效果上更有效。

2 约束混凝土模型介绍

随着对约束混凝土力学性能的研究,人们也提出了很多相应的材料模型,而目前应用广泛的几种模型如 Mander 模型、张秀琴模型、Park 模型、Saatcioglu 模型等都是基于普通强度混凝土的试验研究下获得的^[18],这些模型应用于高强箍筋约束高强混凝土这一新技术上还有待进一步的改进,甚至需要提出新的模型。国外学者对于高强箍筋约束高强混凝土的约束模型做了一些研究,并提出了几种相应的应力-应变模型,本文将对这几类模型加以介绍。

用 f'_{cc} 、 ε_1 表示约束混凝土抗压强度及对应的应变, f'_{co} 、 ε_{01} 表示素混凝土抗压强度及对应的应变, f_{085} 、 ε_{050} 表示素混凝土中抗压强度为 0.85 f'_{co} 和 0.50 f'_{co} 时所对应的应变, f_{85} 、 ε_{50} 表示约束混凝土中抗压强度为 0.85 f'_{cc} 和 0.50 f'_{cc} 时所对应的应变, E_c 表示混凝土的弹性模量。

2.1 Saatcioglu 模型^[19]

1992 年 Saatcioglu 在大量的试验基础上,建立了普通强度约束混凝土的应力-应变关系。1999 年 Saatcioglu 和 Razvi 通过试验在原先模型的基础上提出了高强混凝土的应力-应变模型如图 1 所示,主要公式如下:

(1) 上升段曲线公式为:

$\varepsilon_c \leq \varepsilon_1$ 时:

$$f'_c = f'_{cc} \left[\frac{k(\varepsilon_c/\varepsilon_1)}{k-1+(\varepsilon_c/\varepsilon_1)^k} \right]$$

式中 $k = \frac{E_c}{E_c - (f'_{cc}/\varepsilon_1)}$

(2) 下降段曲线公式为:

$\varepsilon_c > \varepsilon_1$ 时:

$$f'_c = 0.15f'_{cc} \left[\frac{\varepsilon_c - \varepsilon_1}{\varepsilon_1 - \varepsilon_{85}} \right] + f'_{cc}$$

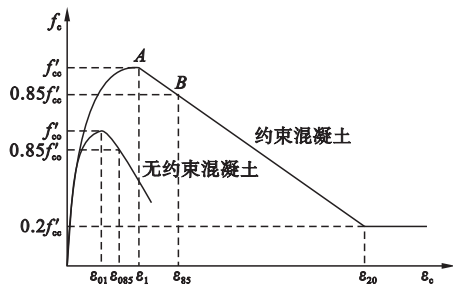


图1 Saatioglu模型

Saatioglu模型考虑了箍筋与纵筋布置形式、箍筋间距、箍筋屈服强度以及素混凝土强度和延性对约束混凝土力学性能的影响,该模型的优点在于参数较少,物理意义明确,但没有考虑配筋率对约束混凝土力学性能的影响。

2.2 Cusson模型^[12-13]

1995年Cusson和Paultre在对50根高强箍筋约束高强混凝土柱的试验中,对不同配筋率的约束混凝土柱在轴向荷载下的应力-应变曲线进行了试验研究,提出了相应的方程。模型如图2所示,主要公式如下:

(1)上升段曲线公式为:

$\epsilon_c \leq \epsilon_1$ 时:

$$f_c = f'_{cc} \left[\frac{k(\epsilon_c/\epsilon_1)}{k-1+(\epsilon_c/\epsilon_1)^k} \right]$$

式中 $k = \frac{E_c}{E_c - (f'_{cc}/\epsilon_1)}$

(2)下降段曲线公式为:

$\epsilon_c > \epsilon_1$ 时:

$$f_c = f'_{cc} \cdot \exp[k_1(\epsilon_c - \epsilon_1)^{k_2}]$$

式中 $k_1 = \frac{\ln 0.5}{(\epsilon_{s0} - \epsilon_1)^{k_2}}$ $k_2 = 0.58 + 16(f'_{cc}/f'_{co})^{1.4}$

f'_{cc} ——有效约束应力;

f'_{cc}/f'_{co} ——有效约束指标。

其中 f'_{cc} 的计算较为繁琐,详见参考文献[13]。

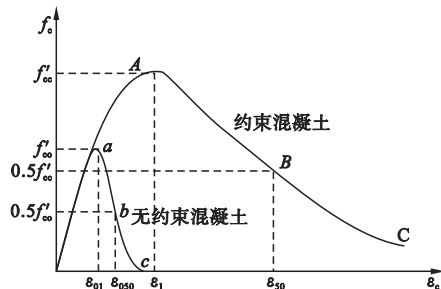


图2 Cusson模型示意图

Cusson模型考虑了箍筋与纵筋布置形式、箍筋间距、箍筋屈服强度、体积配筋率、配筋率以及素混凝土强度和延性对约束混凝土力学性能的影响,因素考虑全面,并提出了有效约束指标的概念,但参数计算较为烦琐,不便于工程界的应用。

2.3 Han模型^[20]

2003年Han,Shin和Bahn完成了21个足尺寸的轴心受压柱试验,其中混凝土强度在50~85MPa之间,箍筋屈服强度在330~500MPa之间。在此试验基础上,Han等人提出模型如图3所示,主要公式如下:

(1)上升段曲线公式为:

$\epsilon_c \leq \epsilon_1$ 时:

$$f_c = f'_{cc} \left[\frac{k(\epsilon_c/\epsilon_1)}{k-1+(\epsilon_c/\epsilon_1)^k} \right]$$

式中 $k = \frac{E_c}{E_c - (f'_{cc}/\epsilon_1)}$

(2)下降段曲线公式为:

$\epsilon_c > \epsilon_1$ 时:

$$f_c = f'_{cc} \left[0.85 - 0.5 \frac{\epsilon_c - \epsilon_{s5}}{\epsilon_{s0} - \epsilon_1} \right] \geq 0.3f'_{cc}$$

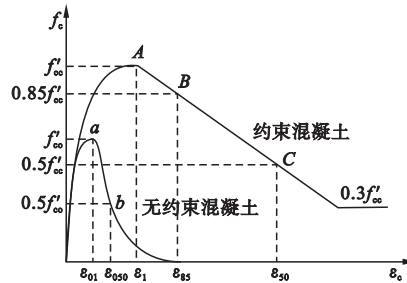


图3 Han模型示意图

Han模型考虑了箍筋与纵筋布置形式、箍筋间距、箍筋屈服强度以及素混凝土强度和延性对约束混凝土力学性能的影响,该模型的优点在于物理意义明确,形式简洁,但参数较多,且没有考虑配筋率对约束混凝土力学性能的影响。

3 高强箍筋约束高强混凝土柱的强度和延性影响因素分析

3.1 混凝土强度的影响

混凝土强度愈高,脆性愈为显著。材料的脆性会影响结构的延性,尤其会削弱用来发挥高强混凝土抗压性能的受压构件延性。Cusson和Paultre^[12-13]的试验结果,Razvi和Saatioglu^[14-15]等进行试验结果均表明,随混凝土抗压强度增大,柱的延性变形能力减少。同时还应注意即使在相同配筋特征下,柱的延性仍随混凝土强度的不断提高而有所降低^[21]。

3.2 配箍率的影响

对于普通混凝土,增加配箍率,柱子的强度和延性都会提高,这个结论同样适用于高强混凝土,但是程度相对要小,一些学者认为是高强混凝土中的微裂缝间的体积增长小,所以侧向膨胀小,从而降低了箍筋的约束效果^[22]。提高高强混凝土柱的体积配筋率可有效增加对核心混凝土的约束,增大混凝土的强度和延性,并提高了对纵筋的侧向约束能力,有效防止纵筋屈曲,从而增大高强混凝土柱的延性变形能力。Yong等^[9]、Cusson、Paultre^[12]和Razvi等^[14]进行的矩形截面柱的试验结果均表明了体积配筋率对柱延性变形能力的有益作用。而在Bjekeli等^[10]学者的试验报告中显示,当配箍率很小的时候,高强混凝土柱的强度和延性基本上得不到改善。图4为承受轴向压力的高强混凝土柱在箍筋用量由低到高的荷载-位移变形示意图^[22]。

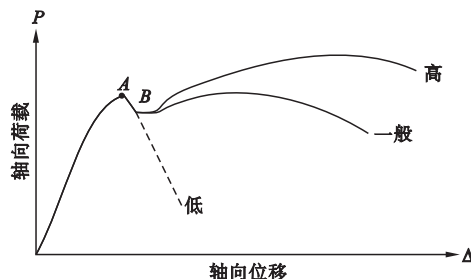


图4 高强混凝土柱在不同配箍率下的荷载-位移变形示意图

3.3 箍筋屈服强度的影响

箍筋对核心混凝土提供有效约束应力,使核心混凝土的强度和延性提高,而箍筋的屈服强度则决定了有效约束应力的上限值,因此,采用高强箍筋可提高对核心混凝土的有效约束,并增强纵筋抵抗抗曲的能力,从而增加高强混凝土柱的延性变形能力。Cusson 和 Paultre^[12]进行了不同箍筋屈服强度,其余条件相同的 4 组高强混凝土柱的对比试验,每组中箍筋约束形式不同,试验结果表明提高箍筋强度可有效提高高强混凝土柱的延性。

同时应注意,当体积配箍率很小的时候,仅仅提高箍筋的屈服强度,对柱子的强度和延性的影响很小,可以忽略;只有当配置足够量的箍筋时,提高箍筋的屈服强度才会使高强混凝土柱的强度和延性得到很大提高。

3.4 箍筋间距的影响

减小箍筋间距,可以提高柱子的延性。当箍筋间距等于或大于柱子的横向尺寸的时候,对高强混凝土柱的约束效果不明显,因此提议箍筋间距要小于柱子的横向尺寸。Sungjoong Kim^[21]对不同箍筋间距,其余条件相同的柱子进行试验,试验结果表明,当箍筋间距过大时,不能对核心混凝土提供有效约束;当箍筋间距减小时,对高强混凝土柱强度的影响不大,但可以提高高强混凝土柱在最大荷载作用之后的残余强度,增加柱子的延性。

3.5 混凝土保护层的影响

通常情况下,在高强混凝土柱达到轴向承载力之前,混凝土保护层就已脱落。其中高强混凝土柱的轴向承载力 P_0 由下式确定:

$$P_0 = 0.85f'_c(A_g - A_{st}) + A_{st}f_y$$

式中 f'_c ——混凝土的抗压强度;

A_g ——柱子的横截面积;

A_{st} ——纵筋的总截面积;

f_y ——纵筋的屈服强度。

图 4 显示了受箍筋约束的高强混凝土柱在轴压下的轴向变形示意图,图中 A 点显示加载过程中混凝土保护层脱落,在次之后高强混凝土柱的性能由柱的有效面积、核心混凝土及箍筋量所决定。在混凝土保护层脱落之后,柱子的轴向承载力一般会下降到图示中的 B 点。

3.6 纵筋配筋的影响

在高强混凝土柱中配置一定量的纵筋可以改善柱子的延性,但纵筋的屈服强度以及纵筋量对柱的延性性能影响不大。Yong 等^[9]的试验结果,Razvi 和 Saatcioglu^[15]进行的试验研究结果均表明,在高强混凝土中配置纵筋可以更好的约束核心混凝土,改善柱子的延性。Nagashima 等^[11]的试验结果中表明,在箍筋配置相同且纵筋量相等的情况下,提高纵筋的屈服强度对核心混凝土的强度和延性基本没有影响,同时在柱中配置不同数量的纵筋,高强混凝土柱的强度和延性也没有显示太大的差别。

3.7 箍筋约束形式的影响

箍筋的排列形式对于高强混凝土柱的强度和延性有着重要的影响。合理的配箍方式对核心混凝土有着更好的约束,使约束应力更均匀的分布,并提高约束效果。对于方形柱来说,一般有以下几种箍筋形式(如图 5)。使用 a 类型的普通方形四肢箍,在柱破坏时箍筋仍未屈服,难以有效发挥约束作用,和其他复合箍筋形式相比较,用 a 类型约束的高强混凝土柱的强度和延性几乎没有提高。复合箍筋的约束效果较好,这是由于复合箍筋的分布使得受约束的混凝土区域变多、相应的面积变小,减小了混凝土之间的压应力,相应的高强混凝土柱的抗压承载力

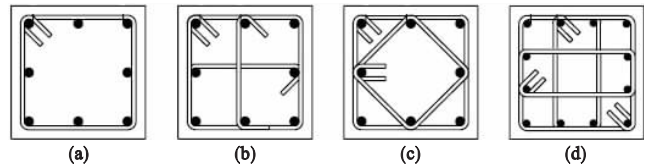


图 5 箍筋常见的几种约束形式

变大,因此,采用复合箍筋约束形式的高强混凝土柱在强度和延性上都有所提高^[23]。其中 b 和 c 类的复合箍筋约束效果相似。

另外,螺旋箍筋比起方形箍筋在约束高强混凝土时更有效,当配箍率相同的时候,受螺旋箍筋约束比受方形箍筋约束的高强混凝土柱的强度和延性都要提高。

4 结束语

随着高强混凝土在现代土木工程中的应用与推广,发挥其高强度等优良性能,减小其脆性等不足之处是推广高强混凝土的技术关键。而采用高强箍筋约束高强混凝土,对柱形成有效约束并提高其延性,是目前推广高强混凝土结构在地震区的应用的基本技术途径之一。

目前国内外学者对高强混凝土柱进行的诸多研究,尚处于对高强箍筋高强混凝土柱的力学性能的探讨之中,形成的理论不够完善,设计规范不够健全。因此,有必要对高强箍筋约束高强混凝土柱做进一步的研究,为其确定合适的本构模型,明确各主要影响因素对高强箍筋高强混凝土柱的强度和延性的影响,为设计提供理论基础。

参考文献:

- [1] 陈肇元. 高强与高性能混凝土的发展及应用[J]. 土木工程学报, 1997, 30(5): 3-11.
- [2] 李惠. 高强混凝土及其组合结构[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [3] 蒲心诚, 王勇威, 蒲怀京, 等. 千米承压材料与制取途径[J]. 土木工程学报, 2004, 37(7): 35-40.
- [4] 司炳君, 孙治国, 王东升, 等. 高强箍筋约束高强混凝土柱抗震性能研究综述[J]. 土木工程学报, 2009, 42(4): 1-9.
- [5] 徐有邻. 我国混凝土结构用钢筋的现状与发展[J]. 土木工程学报, 1999, 32(5): 3-9.
- [6] 戴自强, 陆继贇, 张祖光, 等. 高强约束混凝土短柱强度研究[J]. 天津大学学报, 1988(4): 109-115.
- [7] 戴自强, 陆继贇, 张祖光, 等. 约束混凝土柱强度和变形的试验研究[J]. 天津大学学报, 1984(4): 16-24.
- [8] MARITINEZ S. Spirally-reinforced high-strength concrete columns[D]. Cornell University, Ithaca, 1983.
- [9] YONG Y, NOUR M G, NAWY E G. Behavior of laterally confined high strength concrete under axial loads[J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1988, 114(2): 332-351.
- [10] BJERKELI L, TOMASZEWICZ A, JENSEN J J. Deformation properties and ductility of high-strength concrete[J]. High-Strength Concrete: Second International Symposium, ACI SP-121-12, Detroit, 1990: 215-238.
- [11] NAGASHIMA T, SUGANO S, KIMURA H et al. Monotonic axial compression test on ultra-high-strength concrete tied columns[J]. Earthquake Engineering Tenth World Conference, Madrid, Spain, Proceedings, 1992(7): 2983-2988.
- [12] CUSSON D, PAULTRE P. High-strength concrete columns confined by rectangular ties[J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1994, 120(3): 783-804.

· 下转第 46 页

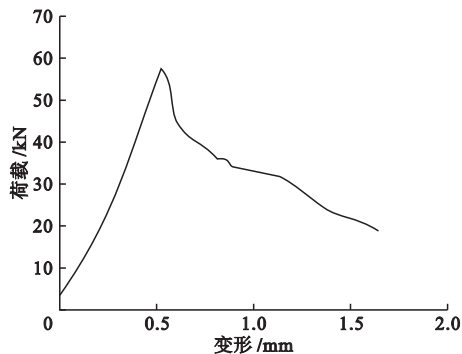


图7 聚丙烯腈纤维海工混凝土劈拉试验荷载-变形曲线

基材迅速达到极限拉应力而破坏,裂缝迅速拓展贯通全截面,混凝土试件在荷载达到最大值后,荷载-位移接近垂直下降。

由此看出,在海工混凝土开裂时,聚丙烯腈在其微裂缝处承担拉应力,消耗能量,从而起到阻裂的效果。它对混凝土韧性的提高主要是通过增强混凝土断裂变形能力来实现的。

3 结论

(1)聚丙烯腈纤维对海工混凝土具有很好的韧化效果,它的加入可降低海工混凝土脆性,减小由内应力产生的裂缝,提高混凝土的耐久性和使用的安全性。

(2)聚丙烯腈纤维对海工混凝土抗拉性能具有增强效果,纤维长度在6~24 mm的范围内变化时,较长的聚丙烯腈纤维增强效果更为明显。在使用24 mm的聚丙烯腈纤维时,掺量选用1.0 kg/m³左右为最佳,超过此掺量后随着纤维掺量的增加,聚丙烯腈纤维对海工混凝土劈拉强度增强效果减弱。

(3)聚丙烯腈纤维的加入会使海工混凝土弹性模量降低,使混凝土在相同应力条件下具有较大应变,从而提高混凝土断裂变形能力。

致谢:本课题的试验与研究得到了同济大学土木工程学院地下建筑与工程系薛亚东教授的指导及帮助,特此向其表示衷心的感谢。

参考文献:

[1] 眭少峰.超长箱梁海工高性能混凝土抗裂研究及现场监测[D].上海:

·上接第42页

[13]CUSSON D, PAULTRE P.Stress-strain model for confined high-strength concrete[J].ASCE Journal of Structural Engineering, 1995, 121(3): 468-477.
 [14]SAATCIOGLU M, RAZVI S R.High-strength concrete columns with square sections under concentric compression[J].Journal of Structural Engineering, ASCE, 1998, 124(12): 1438-1447.
 [15]RAZVI S R, SAATCIOGLU M.Circular high-strength concrete columns under concentric compression[J].ACI Structural Journal, 1999, 96(5): 817-825.
 [16]LIU J, FOSTER S J, ATTARD M M.Strength of tied high-strength concrete columns loaded in concentric compression[J].ACI Structural Journal, 2000, 97(1): 149-156.
 [17]TAN T H, NGUYEN N.Flexural behavior of confined high-strength concrete columns[J].ACI Structural Journal, 2005, 102(2): 198-205.
 [18]周文峰, 黄宗明, 白绍良.约束混凝土几种有代表性应力-应变模型及其比较[J].重庆建筑大学学报, 2003, 25(4): 121-127.

上海大学, 2008.

[2] 吴科如, 张雄.土木工程材料[M].上海: 同济大学出版社, 2003.
 [3] 盛松涛, 方坤河.聚丙烯纤维在水工高性能混凝土中的作用[J].混凝土, 2003(11): 51-59.
 [4] 陆文雄, 周海文, 庄燕, 等.改性纤维复合掺和料对混凝土性能的影响[J].建筑材料学报, 2009, 12(3): 315-317.
 [5] 王力厅.工程纤维改善混凝土性能试验研究[D].上海: 同济大学土木工程学院地下工程系, 2009: 11-18.
 [6] 王冬松.杭州湾跨海大桥高性能海工混凝土配合比设计[J].公路, 2009(7): 299-303.
 [7] GB/T 50081-2002, 普通混凝土力学性能试验方法标准[S].北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
 [8] 刘数华, 方坤河, 曾力, 等.混凝土抗裂性能评价指标综述[J].公路, 2004(5): 104-106.
 [9] 张东, 刘娟, 吴科如.高强混凝土断裂特性的试验研究与分析[J].混凝土与水泥制品, 1998, 10(5): 5-9.
 [10]李航.隧道新型衬砌材料室内试验研究[D].上海: 同济大学土木工程学院, 2009.
 [11]龚爱民, 孙海燕, 彭玉林.聚丙烯纤维对新拌混凝土性能的影响[J].建筑材料学报, 2007, 10(4): 488-492.
 [12]薛亚东, 黄宏伟, 车平.巷道底板泥化纤维增强固化体特性试验研究[J].岩石力学与工程学报, 2008, 27(3): 505-510.
 [13]SONG P S, HWANG S, SHEU B C.Strength properties of nylon and polypropylene-fiber-reinforced concrete[J].Cement and Concrete Research, 2005, 35(8): 1546-1550.
 [14]SOROUSHIAN P, KHAN A, HSU J W.Mechanical properties of concrete materials reinforced with polypropylene or polyethylene fibers[J].ACI Materials Journal, 1992, 89(6): 535-540.
 [15]KOCABEYLER M F, SAGLIK A.Performance characteristics of polypropylene fiber reinforced concrete (PFRC) used for irrigation channel linings in hot climatic conditions[C].International Conference on Engineering Materials, Ottawa, Canada, 1997: 76-83.

作者简介: 梁霆浩(1988-)男。

单位地址: 上海市四平路1239号 同济大学 200755 信箱(200092)

联系电话: 15800727376

[19]RAZVI S, SAATCIOGLU M.Confinement model for high-strength concrete[J].Journal of Structural Engineering, ASCE, 1999, 125(3): 281-289.
 [20]HAN B S, SHIN S W, BAHN B Y.A model of confined concrete in high-strength reinforced concrete tied columns[J].Magazine of Concrete Research, 2003, 55(3): 203-214.
 [21]SUNGJOONG Kim.Behavior of high-strength concrete columns [D].Raleigh, North Carolina: North Carolina State University, 2007.
 [22]ACI-ASCE Committee 441.High-strength concrete columns: state of the art[J].ACI Structural Journal, 1997, 94(3): 323-335.
 [23]CHUNG H S, YANG K H, LEE Y H et al.Strength and ductility of laterally confined concrete columns[J].Can.J.Civ.Eng. 2002(29): 820-830.

作者简介: 司炳君(1971-)男, 博士, 副教授。

单位地址: 辽宁省大连市大连理工大学 土木水利学院结构工程研究所(116024)

联系电话: 0411-84708298