

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2018.07.006

早龄期持续拉力对混凝土性能的影响

庄金平^{1,2}, 张三鹏¹, 蔡雪峰^{1,2}, 邱豪¹

(1. 福建工程学院 土木工程学院, 福州 350118;

2. 福建省土木工程新技术与信息化重点实验室, 福州 350118)

摘要:为研究早龄期持续拉力对混凝土后期力学性能的影响,设计了 7 个系列共 77 个混凝土试件,探讨早龄期持荷轴拉比、持荷时间、混凝土强度等 3 个因素对混凝土后期轴心抗压性能的影响规律。为此,制作了对 6 个混凝土试件同时施加持续拉力的试验装置,龄期 1.5 d 时开始施加轴向拉力,持荷一定时间后卸载,龄期 28 d 时进行轴心抗压试验。持荷轴拉比和持荷时间对混凝土后期轴心抗压性能有一定的影响;持荷时间为 7 d 时,轴拉比为 0.15 和 0.3 试件后期轴心抗压性能基本没有劣化,而轴拉比为 0.5 时试件产生了不可自愈的损伤,初始弹性模量、轴压峰值应力下降、峰值应变增大;轴拉比为 0.3 的试件持荷时间增加到 14 d,混凝土后期性能产生了劣化。混凝土强度等级越低,早龄期持续拉力对其弹性模量的影响较大,但峰值应力和峰值应变的影响相对较小。在试验结果的基础上,采用最小二乘法回归得到了持荷时间和持荷轴拉比对混凝土初始弹性模量、峰值应力与峰值应变的早龄期持荷影响系数。最后,在普通混凝土的应力-应变关系的基础上考虑早龄期持荷影响因数,得到了受早龄期持荷影响的混凝土应力-应变关系。

关键词:早龄期混凝土;持荷轴拉比;持荷时间;轴心抗压性能;影响系数

中图分类号:TU755.7

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2018)07-037-11

Experimental study of early continuous tension influence on concrete properties

ZHUANG Jinping^{1,2}, ZHANG Sanpeng¹, CAI Xuefeng^{1,2}, QIU Hao¹,

(1.College of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118,P.R.China;

2. Fujian Provincial Key Laboratory of Advanced Technology and Informatization in Civil Engineering, Fuzhou 350118,P.R.China)

Abstract: In order to study the influence of early continuous tension on the mechanical properties of concrete in the later period including concrete's axial compressive properties and cleavage strength, the tensile test of 7 series of concrete specimens which bear early continuous load is carried out, with three factors of the axial tension ratio, loaded time and concrete strength in consideration. Meanwhile, test device is designed that applied continuous tensile load on 6 prism specimens at the same time when the early age is

收稿日期:2017-12-27

基金项目:国家自然科学基金(51478119);福建省科技厅项目(2015J01182);福建工程学院科研发展基金(GY-Z15098)。Supported by National Natural Science Foundation of China(51478119), Fujian Natural Science Foundation(2015J01182), Fujian University of Technology Research Development Foundation(GY-Z15098).

作者简介:庄金平(1978—),男,博士,副教授,主要从事混凝土力学性能和复杂施工技术研究,(E-mail)yixiong1978@163.com。

蔡雪峰(联系人),女,教授,主要从事混凝土力学性能和复杂施工技术研究,(E-mail)cx0591@163.com。

1.5 days. The tensile load is applied for some time then unloaded and at 28 days age the test of prism specimens' axial compressive strength is carried out. The results show that the ratio of axial tension and continuous time of load have some effects on concrete's axial compressive properties in later days. When loaded time of is 7 days, there is no obvious influence on concrete's axial compressive properties no matter what the ratio of axial tension is 0.15 or 0.3. However, when the ratio of axial tension is 0.5, prism specimens' damage is irreversible, with its initial elastic modulus, peak compressive strength decreasing and peak strain increasing. When loaded time is 14 days, the properties of the prism specimens whose axial tension ratio is 0.3 deteriorate. The lower the strength grade of concrete, the larger the early age continuous tension influence on elastic modulus, but the influences on peak stress and peak strain is relatively small. The least square method is used to get the influence coefficient, which bases on loaded time and loading conditions' effect on concrete's initial elastic modulus, peak stress and peak strain. Based on the stress-strain formula of ordinary concrete, the stress-strain formula of concrete that bear continuous loading at early ages are proposed.

Keywords: early-age concrete; ratio of axial tension; loaded time; axial compressive properties; influence coefficient

早拆模板支撑体系具有周转速度快,节约施工成本的特点,如铝合金早拆模板支撑体系一般为72 h左右,拆除梁板底模板,通过预留的晚拆支撑系统及多层早龄期混凝土结构共同承担施工荷载。然而,施工中的楼面堆载是否会引起来龄期混凝土结构的损伤已成为工程人员极度关注的问题,也是早拆模板体系推广运用亟需解决的问题。已有学者研究了振动、冲击、疲劳对早龄混凝土及后期力学性能的影响^[1-6],而对龄期为72 h左右,承受施工荷载的混凝土结构及对后期力学性能的研究较少见。文献[7]也指出,混凝土试件在受到外荷载作用,内部产生裂纹后,如果给予较好的养护条件,混凝土裂缝能得到较好的自愈合。然而,施工现场早龄期混凝土结构的养护条件一般为自然浇水养护,环境温度也是随机的,施工荷载作用下早龄期混凝土结构裂缝自愈程度与标养条件下存在一定差异。

混凝土楼板属于受弯构件,在荷载作用下一般分为受拉和受压区,受文章篇幅的限制文中仅考虑持续受拉对早龄期混凝土性能的影响。为此,设计了C20、C30、C40等3个强度等级混凝土试件,在试验室自然养护的条件下,施加早龄期持续拉力,探讨了混凝土强度、持荷轴拉比、持荷时间等混凝土后期力学性能的影响规律,提出了早龄期持续拉力对混凝土后期弹性模量、峰值应力、峰值应变的影响系数。在普通混凝土的应力-应变关系的基础上考虑早龄期持拉影响因数,得到了受早龄期持拉影响的混凝土应力-应变关系,为多层早拆模板支撑与早龄期混凝土结构共同受力体系的设计和非线性分析提供依据。

1 试验概况

1.1 试验原材料及配合比

采用海螺牌PO425普通硅酸盐水泥;碎石粒径为10~25 mm;砂子表观密度和含泥量分别为 2.6 kg/m^3 和0.2%,细度模数为2.7;水为自来水;福建省建科高效减水剂,减水率为25%~35%;宁德大唐电厂Ⅱ级粉煤灰。混凝土配合比如表1所示。

表1 混凝土配合比

Table 1 Mix ratio of concrete

试件	kg/m ³					
	水泥	砂	石	水	减水剂	粉煤灰
C20	333	777	1 165	233	0.025	37.0
C30	330	726	1 088	202	1.550	36.5
C40	366	709	1 063	220	0.400	40.7

1.2 试验方案

为探讨早龄期持续拉力对混凝土后期力学性能的影响,共设计 7 个系列的混凝土试件,每个系列包括 3 个早龄期持续受拉的棱柱体抗压试件、2 个常规对比抗压试件,每个系列中早龄期施加持续拉力试件组号和参数如表 2 所示,各组中每个试件的编号如表 2 和表 3 所示。另外,预留 3 个立方体试件在龄期 1.5 d 进行劈裂试验,作为早施加早龄期持续拉力的依据,预留 3 个立方体试件在龄期 28 d 时进行轴心抗压试验,确定混凝土的强度等级。

早龄期施加持续拉力试件组号中各符号依次表示混凝土强度、轴拉比 k_T 、开始持荷龄期 d 、持荷时间 D 。其中,轴拉比 k_T 按式(1)确定:

$$k_T = N_{LT}/N_1, \quad (1)$$

式中: N_{LT} 为施加持续拉力的大小, N_{dT} 为龄期为 d 天的立方体劈裂承载力。

混凝土的抗拉强度较低,龄期太早难以准确施加拉力,考虑到目前早拆模板体系最早可能的拆模时间为 36 h,因此,各试件均在龄期为 1.5 d 时,开始施加拉力,轴拉比 k_T 为 0.15~0.5,持荷时间 D 为 7 d 或 14 d。早龄期持荷试件的具体参数如表 2 所示。

表 2 早龄期持续受拉试件参数一览表

Table 2 The parameters of early age continuous tension specimens

持久拉力组	轴拉比 k_T	持荷时间 D	$N_{1.5T}/\text{kN}$	N_{LT}/kN	$f_{cu,28}$
C20-0.3T-1.5-7	0.3	7	20.7	6.2	22.9
C20-0.5T-1.5-7	0.5	7	21.57	10.8	23.2
C30-0.15T-1.5-7	0.15	7	21.9	3.3	32.1
C30-0.3T-1.5-7	0.3	7	20.8	6.5	31.4
C30-0.5T-1.5-7	0.5	7	22.18	11	31.3
C30-0.3T-1.5-14	0.3	14	18.9	5.7	30.6
C40-0.5T-1.5-7	0.5	7	20.18	10	38.5

1.3 早龄期持续轴拉力加载方案

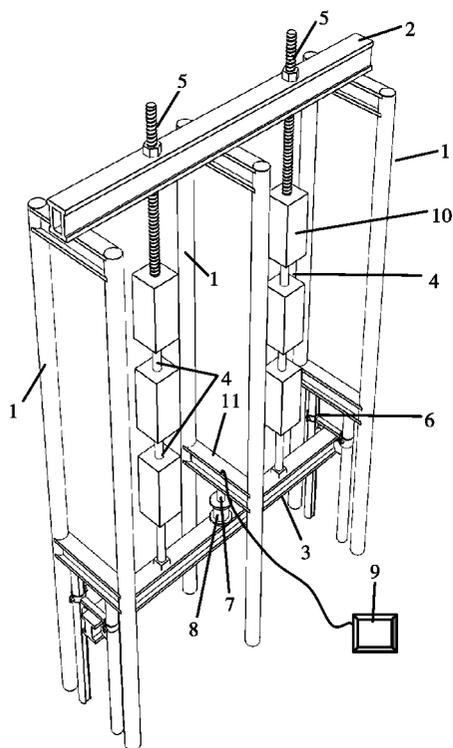
考虑对单个试件逐一施加轴拉力工作量巨大,设计了 1 套可以同时给 6 个试件施加持续恒定拉力的试验装置。该装置包括:3 个反力架、1 个上横梁、1 个下横梁、1 个加载分配梁、6 个串接连接杆、2 个螺纹连接杆、4 个限位扣件、1 个齿轮式千斤顶、1 个压力传感器,如图 1 所示。

将多个试件串联施加轴拉力,在试件中预埋连接卡槽,如图 2(a)所示。采用 1 个十字型固定架将连接卡槽定位固定在棱柱体试模中,卡槽边缘距棱柱体试模端面的距离为 60 mm,设置钢套筒成孔,如图 2(b)所示。当混凝土振捣密实后,随即抽掉十字型固定架并将混凝土表面修补平整。在混凝土初凝后,经常转动钢套筒,养护 24 h 后拔出钢套筒并脱模,如图 2(c)所示。考虑到预埋连接卡槽可能带来的影响,所有的试件包括常规试件均预埋连接卡槽。当试件养护到 1.5 d 时,通过连接杆与预埋的连接卡槽将多个试件连接成串,并对称悬挂在整体装置的两侧,与加载分配梁连接。在加载分配梁中部安放齿轮式千斤顶和压力传感器,将数显读数仪和压力传感器连接,通过齿轮式千斤顶对两串试件施加恒定的拉力,试验装置如图 1(b)所示。

先施加大小为 $0.1N_{dt}$ 的拉力,查看装置是否正常工作,然后卸载。根据拟定的荷载大小,采用以上相同的方法施加荷载并利用压力传感器及其数显读数仪直接读得施加的荷载大小,且保持该荷载恒定直至达到预定的持荷时间。

1.4 混凝土后期力学性能试验

卸载后,继续养护到 28 d 后进行轴心抗压试验,测得加载过程中的应力-应变关系。采用 YAW-3000 型微机控制电液伺服压力试验机进行加载,DH3816 静态应变东华测试系统采集试件的应变,如图 3 所示。



(a) 持续受拉装置示意图

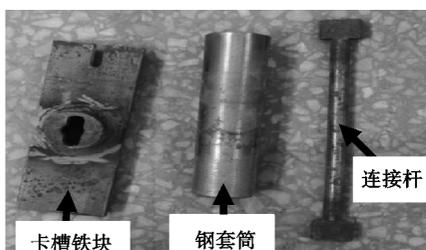


(b) 持续受拉试验装置局部图

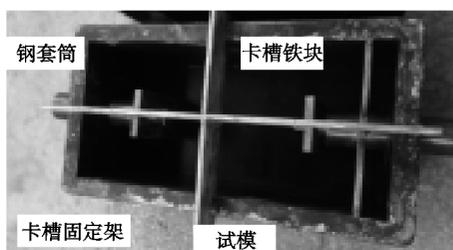
注:1 反力架;2 上横梁;3 加载分配梁;4 串接连接杆;5 螺纹连接杆;6 分配梁限位装置;7 齿轮式千斤顶;8 压力传感器;9 压力读数仪;10 带预埋连接卡槽的混凝土试件;11 下横梁。

图 1 多个混凝土试件持续受拉装置

Fig.1 Uniaxial continuous tensioning device of pris specimens



(a) 卡槽铁块、套筒与连接杆



(b) 连接卡槽固定装置

图 2 试件制作预埋件

Fig.2 The embedded parts of continuous tensile prism specimens



图 3 棱柱体单轴受压应力-应变试验

Fig.3 Uniaxial compression stress-strain test

2 轴心受压试验结果及分析

2.1 各试件的轴心受压性能

表 3 给出了各系列试件的特征参数,主要包括持荷大小、持荷时间,各试件 28 d 轴心受压的弹性模量、受压峰值应力、受压峰值应变等。

表 3 各系列试件典型特征参数

Table 3 Typical characteristic parameters of each series of specimens

系列号	试件编号	$k_T F_{1.5t} /$ kN	$D /$ d	$E_0 /$ MPa	$f_{cp} /$ MPa	ϵ_{cp}	E_0 平均值/MPa	f_{cp} 平均值/MPa	ϵ_{cp} 平均值
	C20- I -1	—	—	22 472	20.92	2 528	28 921	20.53	2 235
	C20- I -2			35 370	20.14	1 942			
C20- I	C20-0.5T-1.5-7-1			19 653	19.13	2 584			
	C20-0.5T-1.5-7-2	10.76	7	15 673	18.12	2 823	19 316	19.21	2 643
	C20-0.5T-1.5-7-3			22 624	20.38	2 523			
	C20- II -1	—	—	19 183	18.67	2 583	20 181	18.55	2 368
	C20- II -2			21 179	18.43	2 152			
C20- II	C20-0.3T-1.5-7-1			19 330	18.35	2 969			
	C20-0.3T-1.5-7-2	6.2	7	19 729	18.2	2 449	19 950	18.35	2 540
	C20-0.3T-1.5-7-3			20 792	18.51	2 202			
	C30- I -1	—	—	35 840	28.54	2 108	33 132	26.71	2 028
	C30- I -2			30 424	24.89	1 949			
C30- I	C30-0.5T-1.5-7-1			28 095	24.42	2 551			
	C30-0.5T-1.5-7-2	11	7	27 467	25.74	2 844	28 537	25.09	2 652
	C30-0.5T-1.5-7-3			30 051	25.12	2 561			
	C30- II -1	—	—	25 592	24.7	2 328	25 604	24.10	2 283
	C30- II -2			25 615	23.5	2 237			
C30- II	C30-0.15T-1.5-7-1			25 917	25.2	2 497			
	C30-0.15T-1.5-7-2	3.28	7	25 582	24.8	2 430	25 420	25.40	2 502
	C30-0.15T-1.5-7-3			24 762	26.2	2 579			
	C30- III -1	—	—	30 743	28.3	2 733	30 720	28.50	2 557
	C30- III -2			30 697	28.7	2 380			
C30- III	C30-0.3T-1.5-7-1			29 545	28.1	2 761			
	C30-0.3T-1.5-7-2	6.51	7	30 434	28.7	2 465	29 852	28.43	2 660
	C30-0.3T-1.5-7-3			29 577	28.5	2 754			

续表 3

系列号	试件编号	$k_T F_{1.5t} /$ kN	$D /$ d	$E_0 /$ MPa	$f_{cp} /$ MPa	ϵ_{cp}	E_0 平均值/MPa	f_{cp} 平均值/MPa	ϵ_{cp} 平均值
	C30-IV-1	—	—	29 761	25	2 704	29 287	24.10	2 570
	C30-IV-2			28 813	23.2	2 435			
C30-IV	C30-0.3T-1.5-14-1			26 204	22	2 665			
	C30-0.3T-1.5-14-2	5.67	14	27 095	20.7	2 385	26 793	21.60	2 512
	C30-0.3T-1.5-14-3			27 079	22.1	2 487			
	C40-I-1	—	—	30 370	31.18	2 561	31 605	30.17	2 283
	C40-I-2			32 841	29.16	2 006			
C40-I	C40-0.5T-1.5-7-1			28 365	27.22	2 619			
	C40-0.5T-1.5-7-2	10	7	27 428	24.65	2 960	28 660	26.18	2 705
	C40-0.5T-1.5-7-3			30 188	26.67	2 536			

图 4 给出了各件 28 d 的轴心受压应力-应变关系曲线,其中,纵坐标为纵向压应力,横坐标为纵向微应变。各试件的应力-应变曲线形状大体上相似,在受压峰值应力 30%~40%左右,受压应力-应变曲线大体上呈直线,之后切线模量逐渐降低,直至达到峰值。早龄期施加持续拉力试件的受压应力-应变曲线总体上处于常规对比试件的下方,即试件的受压力学性能产生了一定程度的劣化。但各系列试件的劣化程度存在差异,其中,轴拉比小于 0.3 且持荷时间小于 7 d 的试件 C30-0.15T-1.5-7、C30-0.3T-1.5-7 和 C20-0.3T-1.5-7 系列的劣化程度较小,早期施加持续拉力试件和常规试件的轴心受压应力-应变关系基本重合。

2.2 早龄期持续拉力对混凝土后期轴心受压力学性能影响

2.2.1 早龄期持续受拉力对不同强度等级混凝土后期力学性能的影响

为考察早龄期持续拉力对不同强度等级混凝土试件后期力学性能的影响规律,针对轴拉比为 0.5,持荷时间为 7 d 的 3 组不混凝土强度系列试件进行研究,即 C20-I 系列、C30-I 系列、C40-I 系列。

结合表 3 可以看出:1)早龄期施加持续拉力试件的弹性模量均小于相对应的常规试件。相比于常规试件,C20-I 系列试件弹性模量 E_0 由 28 291 MPa 降低到 19 316 MPa,降低了 33%;C30-I 系列混凝土弹性模量 E_0 由 33 132 MPa 降低到 28 537 MPa,降低了 14%;C40-I 系列试件弹性模量 E_0 由 31 605 MPa 降低到 28 660 MPa 降低了 10%。2)早龄期施加持续拉力试件的受压峰值应力均小于对相应的常规试件。相比于常规试件,C20-I 系列试件峰值应力由 20.53 MPa 降低到 19.21 MPa,降低了 6%;C30-I 系列试件混凝土峰值应力由 26.71 MPa 降低到 25.09 MPa,降低了 6%;C40-I 系列试件峰值应力由 30.17 MPa 降低到 26.18 MPa,降低了 13%。3)早龄期施加持续拉力试件的峰值应变均大于相应的常规试件。相比于常规试件,C20-I 系列试件峰值应变由 2 235 $\mu\epsilon$ 提高到 2 643 $\mu\epsilon$,提高了 18%;C30-I 系列试件混凝土峰值应变由 2 028 $\mu\epsilon$ 提高到 2 652 $\mu\epsilon$,提高了 31%;C40-I 系列试件峰值应变由 2 283 $\mu\epsilon$ 提高到 2 705 $\mu\epsilon$,提高了 18%。

一般而言,混凝土的弹性模量受裂缝的影响较大,而受压峰值应力和峰值应变相对较小。主要是因为受压峰值应力,除了受未愈合裂缝的影响,还受骨料本身强度、骨料与砂浆界面等的影响。而受压峰值应变一般由弹性应变和塑性应变组成,弹性应变一般取决于骨料和水泥砂浆的粘结程度,塑性应变取决于水泥凝胶体和微裂缝,但是,早龄期受拉未愈合裂缝使得混凝土的密实度下降^[8],加载过程塑性应变增加,从而导致峰值应变增加。C20-I 系列试件的弹性模量降低了 33%,主要是因为混凝土强度越低,水灰比越大,水泥颗粒间水膜较厚,达到固相网络完整联结及固化需要生成较多的固相产物,相比强度高的混凝土,强度低的混凝土早期强度发展较为缓慢。因此,在相同轴拉力和持荷时间内,C20-I 系列试件所受到的实际轴拉比相对较大,裂缝的自愈功能也较差,弹性模量降低最多。

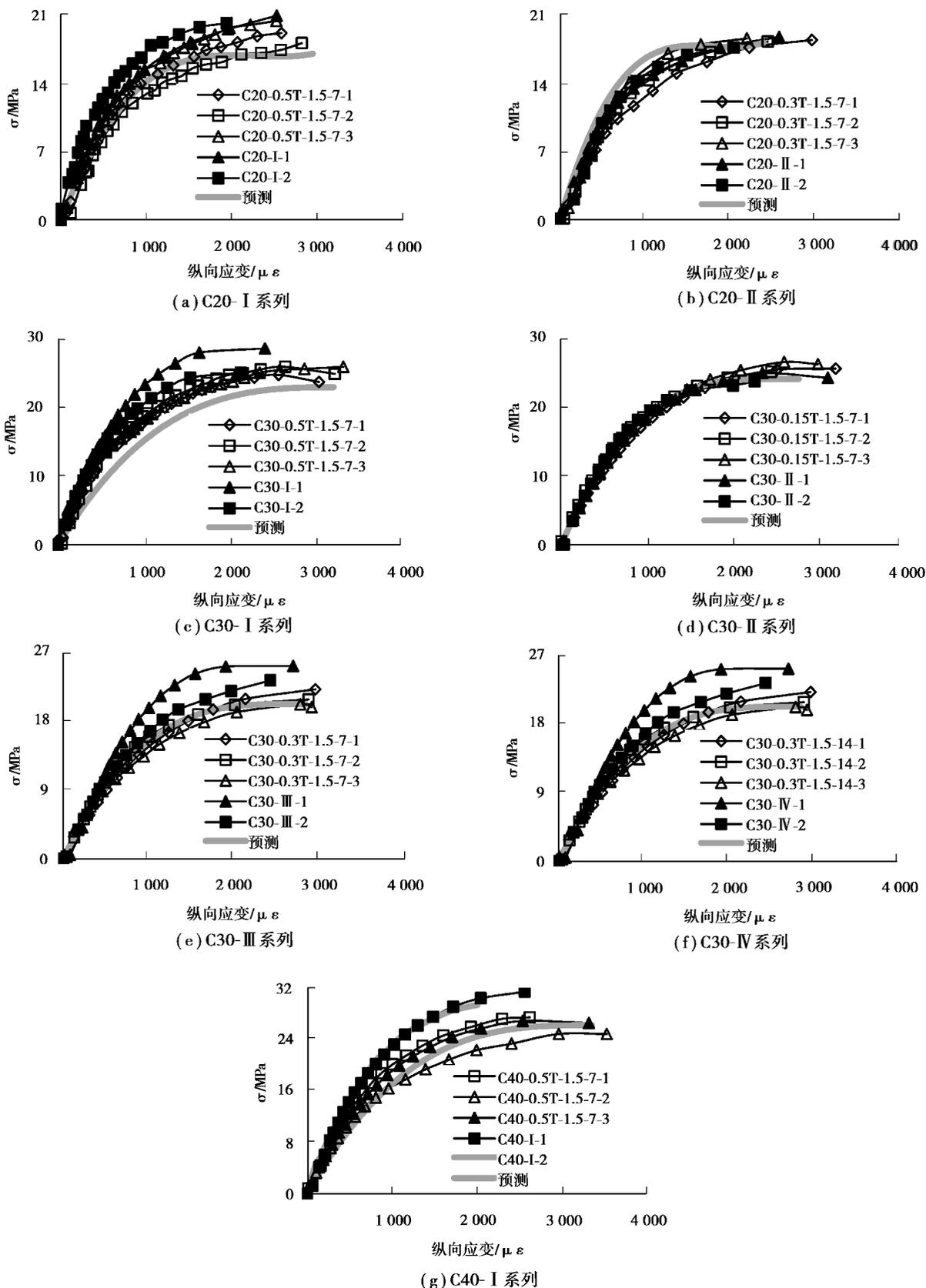


图 4 各试件的受压应力-应变关系曲线图

Fig.4 The curve diagram of constitutive relationship between test specimens and contrast test specimens

2.2.2 持荷轴拉比对混凝土后期力学性能的影响

为考察早期持荷轴拉比对混凝土后期力学性能的影响规律,考虑早龄期结构主要承受的是施工荷载,一般不会太大,针对 C30-I 系列,增加了 C30-II、C30-III 2 个系列试件;针对混凝土强度 C20-I 系列,增加了 C20-II 系列试件。

可以看出:相比于常规试件,轴拉比为 0.15 的 C30-II 系列试件弹性模量 E_0 由 25 604 MPa 降低到 25 420 MPa,仅降低了 0.7%,轴拉比为 0.3 的 C30-III 系列试件弹性模量 E_0 由 30 720 MPa 降低到 29 852 MPa,仅降低了 2%;而轴拉比为 0.5 的 C30-I 系列试件弹性模量 E_0 由 33 132 MPa 降低到 28 537 MPa,降低了 14%。轴拉比为 0.3 的 C20-II 系列试件的弹性模量 E_0 由 20 181 MPa 降低到 19 316 MPa,也仅降低了 1%;轴拉比为 0.5 的 C20-I 系列试件弹性模量 E_0 由 28 291 MPa 降低到 19 316 MPa,降低了 33%。

轴拉比为 0.15 和 0.3 的 C30-II 和 C30-III 试件的轴心受压峰值应力均与相对应的常规试件仅相差 0.07~1 MPa 之间,而轴拉比为 0.5 的 C30-I 试件的轴心受压峰值应力与对应的常规试件降低了 1.62 MPa,约占 6%。轴拉比为 0.3 的 C20-II 系列试件的受压峰值应力与相对应的常规试件仅相差 0.2 MPa,降低了 1%;而轴拉比为 0.5 的 C20-I 系列试件峰值应力由 20.53 MPa 降低到 19.21 MPa,降低了 6%;

相比于无加载组试件,轴拉比为 0.15 的 C30-II 试件峰值应变 ϵ_{cp} 由 2 283 $\mu\epsilon$ 提高到 2 502 $\mu\epsilon$,提高了 9%;轴拉比为 0.3 的 C30-III 试件峰值应变由 2 557 $\mu\epsilon$ 提高到 2 660 $\mu\epsilon$, ϵ_{cp} 提高了 4%;而轴拉比为 0.5 的 C30-I 试件的试件峰值应变由 2 028 $\mu\epsilon$ 提高到 2 652 $\mu\epsilon$,提高了 31%。轴拉比为 0.3 的 C20-II 试件峰值应变由 2 368 $\mu\epsilon$ 提高到 2 540 $\mu\epsilon$, ϵ_{cp} 提高了 7.2%;而轴拉比为 0.5 的 C20-I 系列试件峰值应变由 2 235 $\mu\epsilon$ 提高到 2 643 $\mu\epsilon$,提高了 18%。

在轴拉比为 0.15 和 0.3 的情况下,混凝土试件变形还是处于弹性阶段,混凝土可以通过内部粗骨料与水泥基体之间的界面咬合力来抑制内部裂缝的产生,粗骨料和水泥集体还都处于弹性阶段。此外,轴拉力是恒定不变的,随着混凝土强度的增长,实际轴拉比逐渐减小,所以,早龄期持续拉力小于 0.3 时,不会影响到混凝土后期的力学性能。当早期持续拉力的轴拉比达到 0.5 时,轴拉力使混凝土的变形进入了塑性阶段,虽然,随着混凝土强度的增长,实际轴拉比也变小,但是,水泥砂浆和粗骨料加载初期的徐变差会使混凝土内部发生较大的应力重分布,导致粗骨料与水泥砂浆粘结界面出现较多微裂缝^[9],因此,早期较大塑性变形造成后期很多裂缝无法复原,从而影响到混凝土后期的力学性能。

2.3 持荷时间对混凝土后期力学性能的影响

由于混凝土的水化过程主要集中在前面 14 d,早期施加持续拉力 14 d,卸载后,由于后期水化反应很少,微裂缝自愈的可能性也变小。文献[7]也指出,持荷时间对混凝土后期性能的影响比持荷大小更为显著。此外,施工荷载的持续时间一般均在 14 d 以内。为此,针对 C30 系列混凝土试件增加了 1 组轴拉比为 0.3,持荷时间为 14 d 的试件(C30-IV)来考察早龄期持荷轴拉比较小,但持荷时间较长的情况对混凝土后期性能的影响规律。

可以看出:相比于常规试件,持荷 14 d 的 C30-IV 试件弹性模量 E_0 由 31 605 MPa 降低到 28 660 MPa,降低了 9%;峰值应力 f_{cp} 由 3 017 MPa 降低到 26.18 MPa,降低了 10%;峰值应变 ϵ_{cp} 由 2 570 $\mu\epsilon$ 降低到 2 512 $\mu\epsilon$,下降了 2%;而持荷 7 d 的 C30-I 系列试件弹性模量 E_0 仅降低了 2%、峰值应力 f_{cp} 基本没有降低,仅降了 0.2%;峰值应变 ϵ_{cp} 提高了 4%。说明轴拉比为 0.3,持荷时间为 7 d,对其后期受压性能的影响较小,但持荷 14 d 对其后期受压性能的影响变大。

从渗出理论可知,胶凝粒子表面的吸附水层和这些粒子之间的层间水,在荷载作用下的流动会影响徐变大小,即水泥浆体承受拉、压荷载后,凝胶粒子之间的吸附水和层间水都会缓慢排除而产生变形,产生沿拉、压方向的徐变。水泥浆体承受拉荷载后,胶凝粒子之间的挤压力减小从而延缓层间水的排除^[10],由于持续拉力作用使胶凝粒子之间间距扩大,从而使胶凝材料分子之间范德华力下降。由于层间水存在以及胶凝粒子间距扩大,造成了水化反应后粒子之间的密实度下降。持荷时间越长,凝胶孔保持扩张状态的时间也越长,持荷 14 d 后,胶凝材料分子之间范德华力以及间距由于试件已进入硬化中后期而趋于稳定,与持续 7 d 相比,不管是分子之间范德华力,还是卸载后胶凝材料之间密实度恢复率都下降了。因此,持荷时间对混凝

土裂缝后期“自愈”能力有较大的影响。

3 早龄期持续拉力对混凝土后期抗压性能的影响系数

试验结果表明,早龄期持荷大小和时间对混凝土后期弹性模量 E_0 、峰值应力 f_{cp} 和峰值应变 ϵ_{cp} 有一定的影响。为此,分别定义了弹性模量影响系数 δ_T 、峰值应力影响系数 α_T 和峰值应变影响系数 β_T , δ_T 为施加持续拉力试件的 E_0 与相对应常规试件 E_0 的比值; α_T 为早龄期施加持续拉力试件的 f_{cp} 与相对应常规试件 f_{cp} 比值, β_T 为早龄期施加持续拉力试件的 ϵ_{cp} 与相对应常规试件 ϵ_{cp} 比值。其中,各试件的峰值应力 f_{cp} 与峰值应变 ϵ_{cp} 可详表 3 所示。表 4 为各早期施加持续拉力试件的 δ_T 、 α_T 、 β_T 汇总表。

施工活荷载一般按 2.5 kN/m^2 考虑,持荷时间一般小于 14 d。在试验的基础上,针对持荷轴拉比 k_T 小于 0.5 和持荷时间 D 小于 14 d 的情况,采用最小二乘法对, δ_T 、 α_T 、 β_T 与持荷时间 D 和持荷轴拉比 k_T 的关系进行拟合,分别如式(2)~式(4)所示:

当 $k_T < 0.3$, 且 $D \leq 14$ 时:

$$\begin{cases} \delta_T = 1, \\ \alpha_T = 1, \\ \beta_T = 1. \end{cases} \quad (2)$$

当 $0.3 \leq k_T \leq 0.5$, 且 $D \leq 7$ 时:

$$\begin{cases} \delta_T = [1 - 0.7 \times (k_T - 0.3)], \\ \alpha_T = [1 - 0.25 \times (k_T - 0.3)], \\ \beta_T = [1 + 1.58 \times (k_T - 0.3)]. \end{cases} \quad (3)$$

当 $0.3 \leq k_T \leq 0.5$, 且 $7 < D \leq 14$ 时:

$$\begin{cases} \delta_T = [1 - 0.7 \times (k_T - 0.3)] \times [1 - 0.01 \times (D - 0.7)], \\ \alpha_T = [1 - 0.25 \times (k_T - 0.3)] \times [1 - 0.014 \times (D - 0.7)], \\ \beta_T = [1 + 1.58 \times (k_T - 0.3)] \times [1 + 0.02 \times (D - 0.7)]. \end{cases} \quad (4)$$

表 4 各损伤影响系数 δ_T 、 α_T 、 β_T

Table 4 Influence coefficient of δ_T , α_T , β_T

试件编号	试验值			计算值			计算值/试验值		
	δ_T	α_T	β_T	δ_T	α_T	β_T	δ_T	α_T	β_T
C20-0.3T-1.5-7-1	0.96	1.00	0.99				1.042	1.000	1.010
C20-0.3T-1.5-7-2	0.98	0.99	1.08	1	1	1	1.020	1.010	0.926
C20-0.3T-1.5-7-3	1.03	1.01	0.97				0.971	0.990	1.031
C20-0.5T-1.5-7-1	0.68	0.93	1.16				1.265	1.022	1.138
C20-0.5T-1.5-7-2	0.54	0.88	1.26	0.86	0.95	1.32	1.593	1.080	1.048
C20-0.5T-1.5-7-3	0.78	0.99	1.13				1.103	0.960	1.168
C30-0.15T-1.5-7-1	1.01	1.01	1.02				0.990	0.990	0.980
C30-0.15T-1.5-7-2	1.00	0.99	0.99	1	1	1	1.000	1.010	1.010
C30-0.15T-1.5-7-3	0.97	1.05	1.05				1.031	0.952	0.952
C30-0.3T-1.5-7-1	0.96	0.99	1.08				1.042	1.010	0.926
C30-0.3T-1.5-7-2	0.99	1.01	0.96	1	1	1	1.010	0.990	1.042
C30-0.3T-1.5-7-3	0.96	1	1.08				1.042	1.000	0.926

续表 4

试件编号	试验值			计算值			计算值/试验值		
	δ_T	α_T	β_T	δ_T	α_T	β_T	δ_T	α_T	β_T
C30-0.5T-1.5-7-1	0.85	0.91	1.26				1.012	1.044	1.048
C30-0.5T-1.5-7-2	0.83	0.96	1.40	0.86	0.95	1.32	1.036	0.990	0.943
C30-0.5T-1.5-7-3	0.91	0.94	1.26				0.945	1.011	1.048
C30-0.3T-1.5-14-1	0.89	0.91	1.15				1.045	0.989	0.991
C30-0.3T-1.5-14-2	0.93	0.86	1.12	0.93	0.9	1.14	1.000	1.047	1.018
C30-0.3T-1.5-14-3	0.92	0.92	1.08				1.011	0.978	1.056
C40-0.5T-1.5-7-1	0.90	0.90	1.15				0.956	1.056	1.148
C40-0.5T-1.5-7-2	0.87	0.82	1.30	0.86	0.95	1.32	0.989	1.159	1.015
C40-0.5T-1.5-7-3	0.96	0.88	1.11				0.896	1.080	1.189
计算值与试验值之比的平均值							1.047	1.017	0.047
计算值与试验值之比的均方差							0.143	0.047	0.079

通过式(2)~式(4)计算得到的弹性模量影响系数 δ_T , 峰值应力影响系数 α_T 和峰值应变影响系数 β_T 如表 4 所示。其中, δ_T 、 α_T 、 β_T 拟合公式计算值与试验值比值的平均值为 1.047、1.017 和 1.029, 均方差为 0.143、0.047 和 0.079, 拟合程度较好。

目前, 混凝土受压应力-应变关系的形式较多, 文献[11]提出的分段式应力-应变关系, 是现行混凝土结构设计规范所采用的形式。根据早龄期持续拉力对混凝土后期峰值应力和峰值应变上的影响, 对文献[11]中应力-应变关系的上升段进行修正, 提出了早龄期受到持续拉力的混凝土受压应力-应变关系, 如式(5)所示。

上升段:

$$y = ax + (3 - 2a)x^2 + (a - 2)x^3, \quad (5)$$

式中: $x = \frac{\varepsilon}{\beta_T \varepsilon_c}$; $y = \frac{\sigma}{\alpha_T f_c}$ 。

公式(5)计算的曲线与试验曲线的对比如图 4 所示, 预测曲线与试验曲线吻合较好。

4 结 论

1) 在相同轴拉比和持荷时间内, 低强混凝土水灰比较大, 早期强度发展较为缓慢, 试件所受到的实际轴拉比相对较大, 因此, 弹性模量降低比高强度混凝土大。而受压峰值应力, 除了受未愈合裂缝的影响, 更主要受骨料本身强度、骨料与砂浆界面粘结强度等的影响, 各种强度混凝土在相同轴拉比和持荷时间条件下, 峰值应力的降低和峰值应变的增加的幅度并不明显。

2) 持荷轴拉比和持荷时间对后期混凝土的轴心抗压性能有一定的影响。持荷时间为 7 d 时, 轴拉比为 0.15 和 0.3 的试件后期轴心抗压性能基本没有劣化, 而轴拉比为 0.5 的试件产生了不可自愈的损伤, 初始弹性模量降低了 14%~33%、轴压峰值应力降低了 6%~13%、峰值应变增大了 18%~31%。随着持荷时间的增加到 14 d 时, 轴拉比为 0.3 的试件也产生了不可自愈的损伤, 初始弹性模量降低了 9%、轴压峰值应力降低了 10%。

3) 根据试验结果及各因素的影响大小, 通过采用最小二乘法回归方法得到了基于持荷时间和持荷大小对混凝土峰值应力与峰值的影响系数, 拟合的影响系数公式与试验结果吻合较好。在普通混凝土的应力-应

变关系进行修正,得到早龄期持续拉力的混凝土应力-应变关系。

参考文献:

- [1] 徐仲卿,袁泉,杨振坤,等.早龄期混凝土力学性能试验及其单轴本构模型[J].沈阳工业大学学报,2015,37(1):92-96.
XU Zhongqing, YUAN Quan, YANG Zhenkun, et al. Mechanical property experiment and uniaxial constitutive model for concrete at early age[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2015, 37(1):92-96.(in Chinese)
- [2] 金臻丽.余震对早龄期混凝土强度及损伤影响的试验研究[D].杭州:浙江工业大学,2011.
JIN Zhenli. The experimental research about the influence of aftershock to the strength and damage of early-age concrete [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology,2011. (in Chinese)
- [3] 金南国,金贤玉,钱在兹.早龄期混凝土静力与动力损伤特性的试验研究[J].浙江大学学报(自然科学学报),1997,31(3):372-379.
JIN Nanguo, JIN Xianyu, QIAN Zaizi. Experimental research on the damaged characteristics of concrete at early age and subjected to static or dynamic load [J]. Journal of Zhejiang University (Natural Science), 1997, 31 (3): 372-379. (in Chinese)
- [4] Hulshizer A J. Acceptable shock and vibration limits for freshly placed and maturing concrete [J]. ACI Materials Journal, 1996, 93(6), 524-533.
- [5] Faria R, Oliver J, Cervera M. A strain-based plastic viscous-damage model for massive concrete structures [J]. International Journal of Solids and Structures, 1998, 35(14): 1533-1558.
- [6] Emmanuel R, Rachid C, Ahmed L. Tensile behaviour of early age concrete: New methods of investigation[J]. Cement & Concrete Composites, 2015,55: 153-161.
- [7] 金贤玉,沈毅,李宗津,等.混凝土早龄期受力对后期性能的影响[J].混凝土,2003,7(165):35-37.
JIN Xianyu, SHEN Yi, LI Zongjin, et al. Influence of preload concrete on its latter performance[J]. Concrete, 2003, 7(165):35-37. (in Chinese).
- [8] Neville A M. Properties of Concrete[M]. New York: John Wiley and Sons, 1995.
- [9] L'Hermite R.混凝土工艺问题[M].于宏,译.北京:中国建筑工业出版社,1964.
L'Hermite R. Concrete technology problems[M]. YU Hong translated. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese)
- [10] 惠荣炎,黄国兴,易冰岩.混凝土的徐变[M].北京:中国铁道出版社,1988.
HUI Rongyan, HANG Guoxing, YI Bingyan. Creep of concrete[M]. Beijing: China Railway Press, 1998. (in Chinese).
- [11] 过镇海,时旭东.钢筋混凝土原理和分析[M].北京:清华大学出版社,2003.
GUO Zhenhai, SHI Xudong. Prinple and analysis of reinforced concrete [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003. (in Chinese).
- [12] 惠荣炎,黄国兴,易冰岩.混凝土的徐变[M].北京:中国铁道出版社,1988.
HUI Rongyan, HUANG Guoxing, YI Bingyan. Creep of concrete [M]. Beijing: China Railway Press, 1998. (in Chinese).
- [13] 过镇海,时旭东.钢筋混凝土原理和分析[M].北京:清华大学出版社,2003.
GUO Zhenhai, SHI Xudong. Prinple and analysis of reinforced concrete [M]. BeiJing: Tsinghua University Press, 2003. (in Chinese).

(编辑 陈移峰)