

文章编号:1673-2049(2018)06-0010-11

后掺骨料混凝土柱大偏心受压性能

贾金青,叶 浩,周佳玉,李 璐

(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)

摘要:为研究后掺骨料混凝土柱的大偏心受压性能,对粗骨料后掺率分别为 0%,10%,20%,25%,30%的 5 根后掺骨料钢筋混凝土柱进行了大偏心受压试验,分析了其破坏形态、承载力、延性、混凝土应变、钢筋应变等;利用试验结合公式的方法得到后掺骨料混凝土的应力-应变全曲线。结果表明:后掺骨料混凝土柱在破坏形态、钢筋及混凝土应变趋势、裂缝发展过程等方面与普通混凝土柱相似;在 20%骨料后掺率下,柱的极限承载力最大,而在其他后掺率下,柱的极限承载力相对于普通混凝土柱都有所降低;大型有限元分析软件 ABAQUS 数值模拟结果与试验结果吻合良好;在一定的后掺率下,后掺骨料混凝土柱的受力性能和变形性能均得到了改善。

关键词:后掺骨料混凝土;受力性能;大偏心受压;粗骨料后掺率;破坏形态;极限承载力;应力-应变曲线

中图分类号:TU375

文献标志码:A

Large Eccentric Compression Behavior of Post-filling Coarse Aggregate Concrete

JIA Jin-qing, YE Hao, ZHOU Jia-yu, LI Lu

(State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology,
Dalian 116024, Liaoning, China)

Abstract: In order to study the large eccentric compression performance of the post-filling coarse aggregate concrete column, 5 tests on the large eccentric compression of reinforced concrete columns were carried out. The post-filling ratios of the coarse aggregate were 0%, 10%, 20%, 25% and 30%, respectively. The failure mode, bearing capacity, ductility, strain of concrete and strain of steel bar were analyzed by the test results. The stress-strain curve of the post-filling coarse aggregate concrete was obtained by the method of combining the experiment with the formula. The results show that the post-filling coarse aggregate concrete columns were similar to the ordinary concrete columns in terms of failure mode, strain trend and crack development process of reinforcement and concrete. The ultimate bearing capacity of the column is the highest with 20% post-filling ratio, while the ultimate bearing capacity of the column is lower than that of the ordinary concrete column with other post-filling ratios. The numerical simulation results of the large-scale finite element analysis software ABAQUS are in good agreement with the experimental results. The mechanical properties and deformation properties of the post-filling coarse aggregate concrete columns are improved under a certain post-filling ratio.

Key words: post-filling coarse aggregate concrete; mechanical property; large eccentric compression

收稿日期:2018-01-11

基金项目:国家自然科学基金项目(51678112,51078059,51178078)

作者简介:贾金青(1962-),男,河北沧州人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:keyknown@163.net。

sion; post-filling ratio of coarse aggregate; failure mode; ultimate bearing capacity; stress-strain curve

0 引言

泵送混凝土已逐渐成为土木工程、水利工程混凝土施工中的一个常用施工工艺。它具有施工速度快、施工质量好、效率高等诸多优点,因此被广泛应用于结构混凝土、道桥混凝土、大体积混凝土、高层建筑等工程施工中。由于泵送混凝土需要通过泵送管道到达浇注面,因此为了满足工作性的要求,泵送混凝土相对于普通混凝土而言,具有骨料粒径更小、胶凝材料用量更大、需要掺外加剂、水胶比和坍落度大等特点,这也使得裂缝控制尤其是早期塑性收缩裂缝控制的技术难度非常大^[1-7]。裂缝的存在不仅影响美观,而且使混凝土容易受到碳化和氯离子侵蚀的影响,破坏钢筋表面本来起到保护作用的钝化膜,使混凝土内部的钢筋受到腐蚀,导致结构的承载力受到影响^[8-11]。泵送混凝土因为其中胶凝材料占比较大,所以造价也相对较高,水泥制作是混凝土中环境负担最大的部分,因此普通泵送混凝土也不符合绿色混凝土的理念。

为解决这一问题,国内外的相关学者开展了相当多的研究工作,沈卫国等^[12]运用在模板中预置集料的方法制备出骨料之间相互嵌锁的混凝土,从而可以发挥骨料的强度骨架作用,并且可以改善骨料和浆体之间的界面过渡区,研究表明,这种方法生产出的混凝土弹性模量高于同等级混凝土,抗氯离子渗透性和抗冲击性也优于普通混凝土^[12]。

后掺骨料混凝土是近些年有关学者提出的针对泵送混凝土早期开裂严重和造价相对较高以及水泥生产过程中环境污染严重问题的有效方法。后掺骨料是指在基准混凝土(泵送混凝土)中后掺部分粗骨料,然后进行二次搅拌,从而获得工作性和受力性能良好的混凝土。贾金青等^[13]对后掺骨料混凝土进行了研究,结果表明混凝土的抗压强度随着后掺率的增加而增加,而劈裂抗拉强度和抗折强度先增大后降低。邹波^[14]对后掺骨料混凝土抗裂性进行了研究,结果表明当养护条件能够保证时,粗骨料的二次添加能够很好抑制混凝土的塑性收缩,从而改善泵送混凝土的抗裂性能。胡玉龙^[15]对后掺骨料的混凝土无腹筋梁进行了抗剪性能试验研究,结果表明在15%后掺率下,泵送混凝土的抗压强度及梁的抗剪承载力均有较大提高,且混凝土的工作性也能

得到保证。栾兰^[16]对后掺骨料混凝土的荷载-位移曲线进行了研究,结果表明后掺骨料混凝土与基准混凝土的轴心受压破坏过程基本一致。

后掺骨料混凝土作为一种新兴的施工工艺,不仅仅可以在一定程度上解决泵送混凝土存在的早期开裂严重的问题,而且还具有巨大的经济价值与社会环境价值。因为可以降低混凝土中胶凝材料的占比,从而可以降低混凝土的生产成本,而且节约成本数量随着混凝土强度等级的提高而增加;同样,混凝土中胶凝材料的占比降低,可以减少生产过程中CO₂的排放,更符合绿色混凝土的理念^[17]。由此可见,后掺骨料工艺在改善泵送混凝土性能、节省建筑造价以及环境保护等方面都有重要意义。

目前关于后掺骨料混凝土构件受压性能的研究还较少,本文以5根后掺骨料混凝土柱为对象,对其大偏心受力破坏形态、应变特征、延性性能、承载力特征等进行了研究。

1 试验概况

1.1 试验简介

本试验的水泥采用大连小野田水泥厂生产的P. O42. 5R级普通硅酸盐水泥,密度为3 100 kg·m⁻³。为了增加基准混凝土的流动性,并且一定程度上减少混凝土搅拌物的泌水和离析,在搅拌混凝土的过程中掺入合适比例的粉煤灰,本试验所用粉煤灰采用大连地区某电厂生产的Ⅰ级粉煤灰,表观密度为2 140 kg·m⁻³。基准混凝土中的粗骨料采用大连某石场生产的粒径为5~16 mm的连续级配石灰石碎石(后掺粗骨料粒径为10~20 mm),表观密度为2 600 kg·m⁻³。试验拌合用水采用符合国家标准的生活饮用水,并添加聚羧酸高性能减水剂。

1.2 后掺骨料混凝土基本力学性能

1.2.1 不同后掺率混凝土工作性能测定

本试验按照《混凝土质量控制标准》(GB 50164—2011)^[18]附录A的坍落度及坍落度经时损失试验方法进行测定,分别测定拌合物搅拌结束和1 h后的坍落度,测定现场如图1所示。混凝土搅拌物搅拌结束后即进行坍落度试验,在坍落度试验后立即将拌合物装入不吸水的容器内密闭静置1 h,静置结束后将混凝土拌合物倒入搅拌机内搅拌



图 1 坍落度试验
Fig. 1 Slump Test

20 s,将混凝土二次拌合物倒出后再次测定其坍落度,从而模拟在真实施工环境中混凝土生产到浇筑振捣的间隙和坍落度的损失情况。

本文通过测定不同后掺率的混凝土坍落度和坍落度经时损失得到了后掺骨料混凝土工作性能的变化情况,试验结果如表 1 所示。由表 1 可以看出,随着后掺率 γ 的增加,混凝土的坍落度和经时坍落度都逐渐降低,这是因为后掺粗骨料会吸收基准混凝土中的水分,导致其工作性的降低,但是当基准混凝土的坍落度达到 200 mm 时,即使后掺率达到 30%,也能在 1 h 后保持 100 mm 的坍落度,可以满足施工要求。

表 1 C50 混凝土坍落度试验结果

Tab. 1 Test Results of C50 Concrete Slumps

后掺率/%	0	10	20	25	30
坍落度/mm	245	210	180	150	110
1 h 坍落度/mm	220	180	150	125	100

1.2.2 不同粗骨料后掺率时的抗压强度

立方体抗压强度是混凝土最基本的一项力学性能,本试验参照《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2002)^[19]中的标准试验方法进行后掺骨料混凝土立方体抗压强度试验(图 2),根据试验结果分析不同后掺率下混凝土的标准抗压强度。按照式(1)计算混凝土的立方体抗压强度

$$f_{cu}=\frac{F}{A}$$

(1)

式中: f_{cu} 为混凝土立方体抗压强度; F 为试件破坏荷载; A 为试件承压面积。

在测定混凝土立方体抗压强度时,以 3 个试件试验值的算术平均值作为该组试件的抗压强度值。3 个试验值中的最大值或最小值中如有一个与中间值的差值超过中间值的 15%,则把最大及最小值一并舍除,取中间值作为该组试件的抗压强度值,如有



图 2 抗压强度试验
Fig. 2 Compressive Strength Test

2 个测定值与中间值的差值均超过中间值的 15%,则该组试件的试验结果无效^[19]。本试验各后掺率下试件的抗压强度如表 2 所示,其中 E_c 为抗压弹性模量。

表 2 混凝土力学性能指标

Tab. 2 Mechanical Performance Indexes of Concrete

混凝土设计等级	后掺率/%	f_{cu} /MPa	E_c /MPa
C50	0	53.35	35 455
	10	63.08	39 556
	20	66.39	41 251
	25	64.29	38 622
	30	59.34	38 187

图 3 为各后掺率下后掺骨料混凝土的抗压强度变化趋势。从试验结果可以看出,后掺粗骨料后混凝土的立方体抗压强度均得到了不同程度提高,且当后掺率为 20%时立方体抗压强度取得最大值,此时混凝土立方体抗压强度比普通混凝土立方体抗压强度大 24.4%。

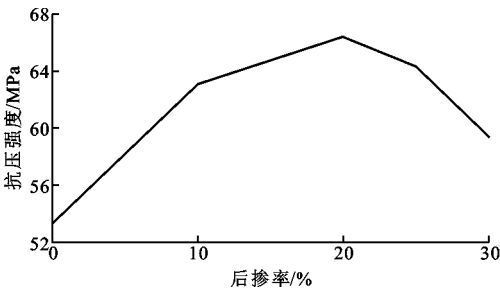


图 3 试件抗压强度
Fig. 3 Compressive Strengths of Specimens

1.2.3 不同粗骨料后掺率弹性模量

弹性模量是衡量材料变形能力的一个重要指标,由于后掺骨料混凝土在后期又进行了粗骨料的二次抛填,因此有必要测量其弹性模量。混凝土弹性模量能表征材料抵抗弹性变形的能力和应力-应变曲线之间的关系,同时也是计算钢筋混凝土结构

变形、裂缝开展和进行非线性分析所必备的参数之一^[20]。弹性模量试验采用棱柱体试块,尺寸为 150 mm×150 mm×300 mm。采用粘贴应变片方式一次性测定各试块弹性模量,试验进行之前进行棱柱体的打磨与粘贴应变片准备工作,试件采用 100 mm 长的应变片。

混凝土弹性模量计算公式如下

$$E_c = \frac{F_a - F_0}{A} \cdot \frac{L}{\Delta n} \tag{2}$$

$$\Delta n = (\epsilon_{a1} + \epsilon_{a2})/2 - (\epsilon_{o1} + \epsilon_{o2})/2 \tag{3}$$

式中: F_0 为应力 0.5 MPa 时的初始荷载; F_a 为应力 1/3 轴心抗压强度时的荷载; L 为测量标距; Δn 为最后一次加荷时试件两侧在 F_a 和 F_0 作用下变形差平均值; $\epsilon_{a1}, \epsilon_{a2}$ 为 F_a 时标距间试件的变形; $\epsilon_{o1}, \epsilon_{o2}$ 为 F_0 时标距间试件的变形。

棱柱体抗压弹性模量按 3 个试件实测值的算术平均值计算,若其中有任一试件的轴心抗压强度值与用以确定检验控制荷载的轴心抗压强度值相差超过后者的 20%,则弹性模量值按另 2 个试件实测值的算术平均值计算;如有 2 个试件不满足上述规定,则试验无效^[21]。棱柱体抗压弹性模量试验结果如表 2 所示。

图 4 为各后掺率下后掺骨料混凝土的弹性模量趋势。从图 4 可以看出,后掺骨料混凝土的弹性模量高于普通混凝土,20% 后掺率下的混凝土弹性模量最高,比普通混凝土提高了 16.35%。由于粗骨料是混凝土内部弹性模量最大的组分,因此随着粗骨料后掺率的增加,混凝土的弹性模量得到了提高;当后掺率超过 20% 时,由于后掺的粗骨料会产生气泡等缺陷,因此混凝土的弹性模量出现了下降趋势。

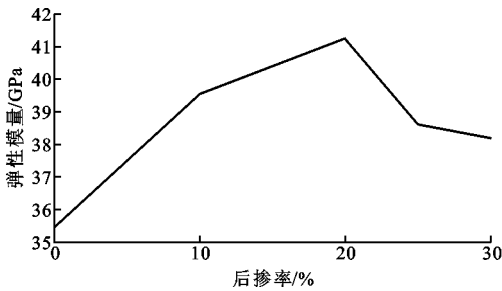


图 4 试件弹性模量
Fig. 4 Elastic Moduli of Specimens

1.3 模型设计

本试验试件的几何尺寸、配筋见图 5。设计的主要变量为粗骨料后掺率,设计了 5 个截面尺寸均为 200 mm×200 mm 的混凝土方柱,柱高均为 1 200 mm,各试件加载的偏心距为 100 mm。各试

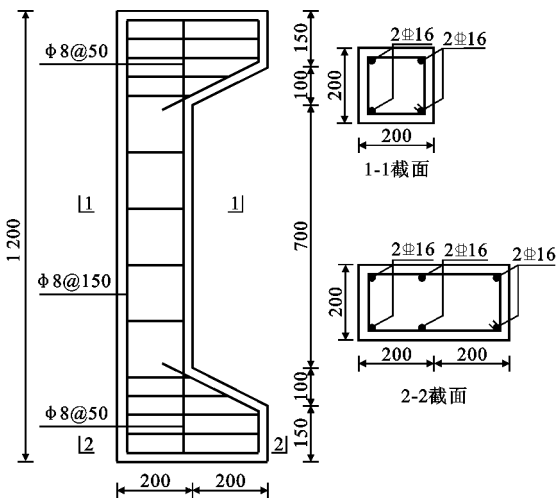


图 5 试件配筋(单位:mm)

Fig. 5 Reinforcement of Specimens (Unit:mm)

件的主要设计参数见表 3。为防止加载端发生局部受压破坏,在柱两端 500 mm 区域内进行箍筋加密处理。在柱两端设计牛腿以方便加载,牛腿中附加斜筋进行加固,防止加载过程中牛腿处发生剪切破坏,斜筋直径和主筋相同。本试验中试件制作过程采用机械搅拌,浇筑成型后表面覆盖草帘子进行保湿养护,5 d 后试件拆模,在室内环境下每天进行浇水养护,对于每种后掺率,都要预留立方体和棱柱体与构件同条件养护。

表 3 试件设计参数

Tab. 3 Design Parameters of Specimens

试件编号	纵筋型号	柱箍筋型号	混凝土强度	后掺率/%
PPZ50-0	4 Φ16	Φ8@150(Φ8@50)	C50	0
PPZ50-1	4 Φ16	Φ8@150(Φ8@50)	C50	10
PPZ50-2	4 Φ16	Φ8@150(Φ8@50)	C50	20
PPZ50-3	4 Φ16	Φ8@150(Φ8@50)	C50	25
PPZ50-4	4 Φ16	Φ8@150(Φ8@50)	C50	30

注:柱中方箍 Φ8 钢筋屈服强度为 420.25 MPa,极限强度为 441.35 MPa;Φ8@50 配筋为两端牛腿加密值;柱纵筋 Φ16 屈服强度为 440.37 MPa,极限强度为 621.82 MPa。

2 加载方式及测点布置

2.1 加载方式

试验在大连理工大学结构试验大厅的 1 000 t 电液伺服万能试验机上进行。试件上端为球铰支座,下端为刀口铰支座,利用吊车梁将试件就位后,首先进行对中,然后进行预加载 2 kN,预加载期间检查支座是否平整以及各仪表工作是否正常,安装位移计并粘贴应变片,将各设备归零。试件的加载制度分为 2 个阶段,首先进行力加载,逐级加载,当

荷载接近极限荷载时降低加载速率,当荷载超过极限荷载时采用位移控制加载,试件承载力显著下降时结束试验,整个试验过程约为 2.5 h。试验期间主要测量数据为侧向位移、侧向挠度、钢筋应变、混凝土应变等。加载装置见图 6。



图 6 加载装置

Fig. 6 Loading Device

2.2 位移计和应变测点布置

本试验根据规范《混凝土结构试验方法标准》^[22](GB/T 50152—2012)中关于应变及位移测量的相关内容,在截面侧面沿高度方向布置 3 个 10 cm 长应变片,间距为 5 cm;在受拉侧和受压侧中部粘贴 2 个相互垂直的 10 cm 长应变片,用来测量跨中截面边缘的拉压应变值。由于当截面变形较大时,应变片会断裂而退出工作,因此在截面侧面安装 3 个高精度位移计(LVDT),用来测量截面变形较大后的变形。为测量柱的侧向挠度,在柱的侧面布置 3 个高精度位移计。

图 7 为试验中各试件应变片和位移计布置。本试验采用 IMC 动态数据采集系统自动采集试验中的应变和位移数据。

3 试验结果分析

3.1 破坏特征

(1)PPZ50-0:该试件粗骨料后掺率为 0%,为普通 C50 混凝土柱。当荷载较小时,试件的荷载-跨中位移曲线呈直线变化,说明试件此时处于弹性工作阶段,加载至 216.17 kN 左右,受拉侧出现横向裂缝,受压侧并未发现裂缝。随着加载的继续,受拉区裂缝逐渐增多,出现较早的裂缝变宽,并向受压侧扩展。继续加载,跨中的主裂缝逐渐变宽,随着塑性变

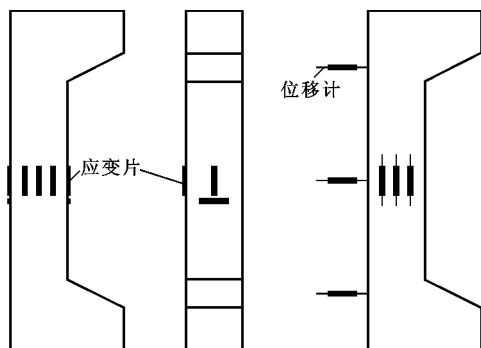


图 7 应变片和位移计布置

Fig. 7 Layout of Strain Gauges and Displacement Gauges

形的发展,受压侧逐渐出现裂缝,受压区边缘应变达到极限压应变而出现混凝土被压碎,纵筋屈服,试件承载力明显降低。竖向承载力下降到极限承载力的 85%(583.52 kN)时,跨中侧向位移为 7.167 mm。试件的最终破坏形态见图 8(a)。

(2)PPZ50-1:该试件粗骨料后掺率为 10%,试件的刚度退化过程及裂缝发展与 PPZ50-0 相似,竖向荷载为 239.33 kN 左右时,柱跨中出现第 1 条水平裂缝。随着加载的继续进行,试件裂缝发展与后期塑性发展明显,极限承载力为 615.0 kN,此时跨中位移为 4.733 mm,承载力快速下降。当承载力降至极限荷载的 85%(522.75 kN)时,跨中侧向位移为 5.431 mm。受压侧混凝土被压碎,柱中纵筋屈服,试件破坏,试件的最终破坏形态见图 8(b)。

(3)PPZ50-2:该试件粗骨料后掺率为 20%,荷载较小时试件中没有裂缝出现,当竖向荷载为 398 kN 时受拉侧出现第 1 条水平裂缝,随着加载的继续,受拉侧水平裂缝逐渐增多,主裂缝变宽并向受压侧延伸。极限荷载为 705 kN 时,跨中位移为 3.072 mm,继续加载,受压区出现裂缝,试件塑性发展明显,承载力下降到极限荷载的 85%(599.25 kN)时,跨中侧向位移为 5.828 mm。随着受压区混凝土被压碎,混凝土逐渐掉落,钢筋屈服,试件破坏。试件的破坏状态见图 8(c)。

(4)PPZ50-3:该试件粗骨料后掺率为 25%,试件的破坏过程和裂缝的出现、开展与 PPZ50-2 相似,受拉区在 279.25 kN 时出现水平裂缝且裂缝随荷载增加而逐渐增多,极限承载力为 609 kN,跨中侧向位移为 3.31 mm。破坏过程比前面的试件更为短暂,可以看到延性在变差,在加载后期承载力下降较快。当承载力下降至极限荷载的 85%(517.65 kN)时,跨中侧向位移为 4.733 mm。试件的破坏形态见图 8(d)。

(5)PPZ50-4:该试件粗骨料后掺率为 30%,试件的破坏过程和裂缝的出现、开展与 PPZ50-3 基本一致,受拉区在 368.55kN 时出现水平裂缝且裂缝随荷载增加而逐渐增多,逐级施加荷载,到达极限承载力时荷载值为 568 kN,跨中侧向位移为 3.861 mm,试件的破坏是上部出现保护层脱落,受压区混凝土被压碎,钢筋屈服,试件破坏。当承载力下降至极限荷载的 85%(482.8 kN)时,跨中侧向位移为 5.483 mm。试件的破坏形态见图 8(e)。

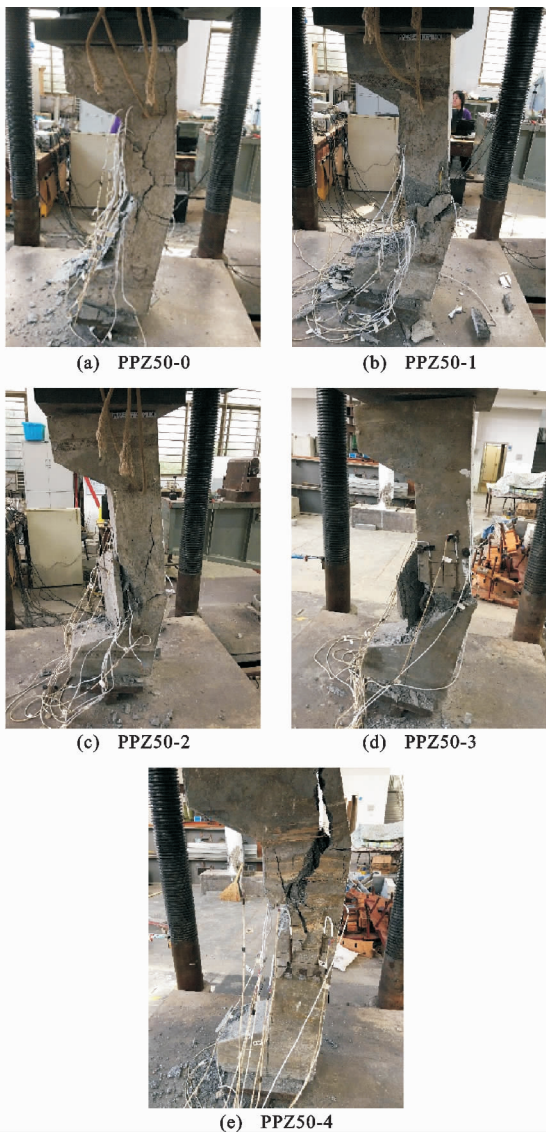


图 8 各试件破坏形态

Fig. 8 Failure Modes of Specimens

3.2 各试件极限承载力

图 9 为各后掺骨料混凝土试件大偏心受压极限承载力随后掺率的变化曲线。由图 9 可以看出,在 20%骨料后掺率下,柱的极限承载力最大,而其他后掺率下,承载力相对于普通混凝土柱都有所降低。

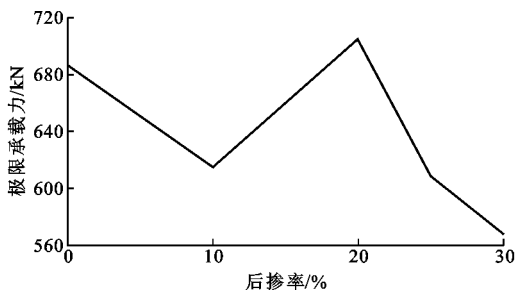


图 9 各试件极限承载力

Fig. 9 Ultimate Bearing Capacities of Specimens

3.3 荷载-侧向位移曲线

图 10 为各试件的荷载-侧向位移($F-\Delta$)曲线。从图 10 可以看出,各试件在加载初期,曲线基本重叠并呈线性,说明各试件均处于弹性阶段,随着竖向荷载的增大,各试件的曲线逐渐分离,试件进入弹塑性工作阶段。对于极限承载力而言,20%后掺率下,试件的极限承载力最大,其次为 0%后掺率。各后掺率下,混凝土的下降段均较为平缓,表明各试件均具有较好的延性。

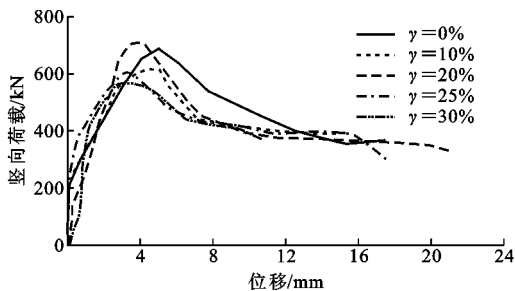


图 10 各试件荷载-位移曲线

Fig. 10 Load-displacement Curves of Specimens

3.4 应变规律

3.4.1 平截面假定

在加载区间平均取 5 级荷载,分析截面各点在各级荷载下的应变值,图 11 为各试件跨中截面应变分布规律。从图 11 可以看出,各试件在大偏心受压状态下,截面应变分布基本呈直线,但是随着后掺率的增加,试件的裂缝开展、塑性发展出现差别,因此当后掺率达到 20%时,各试件的分布规律出现明显差别。由图 11 还可以看出,各后掺骨料混凝土柱跨中截面混凝土应变分布基本呈直线,跨中截面混凝土应变分布规律基本符合平截面假定。由于构件的破坏形态符合大偏心受压破坏模式,且截面的应变分布符合平截面假定,具备规范中相关公式推导的前提条件和必要特征,因此构件的承载力计算可以参照《混凝土结构设计规范》^[23]中的相关公式进行。

3.4.2 混凝土应变

图 12 为各试件混凝土受压受拉荷载-侧应变曲

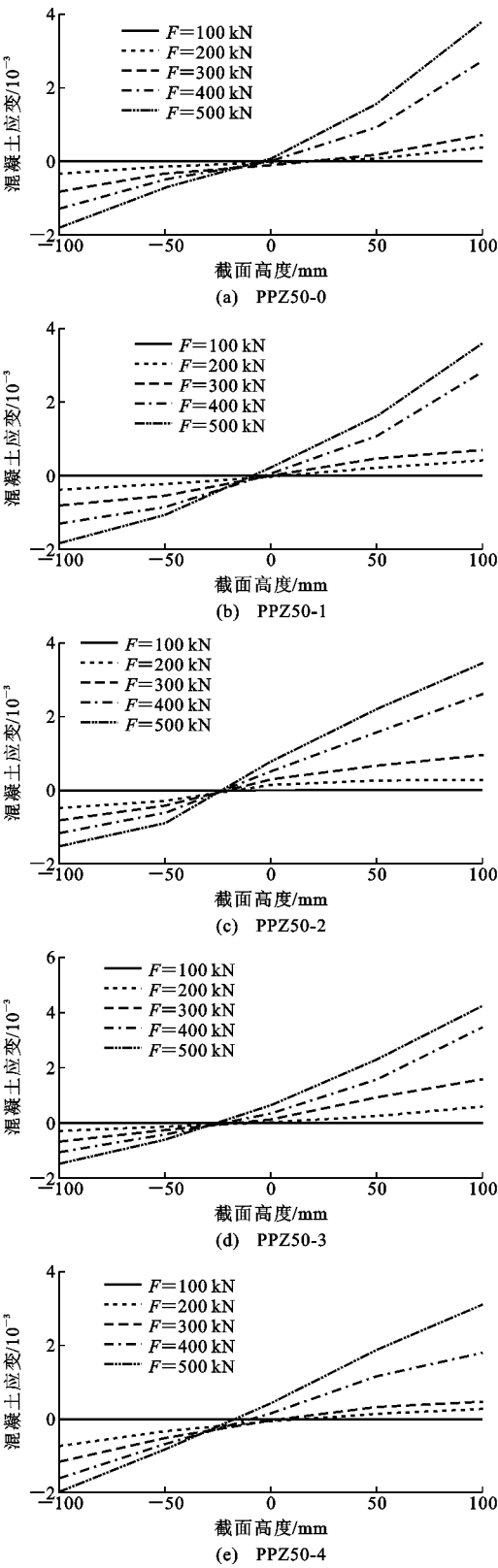


图 11 跨中截面混凝土应变分布

Fig. 11 Concrete Strain Distributions of Cross-section

线。由图 12 可以看出,曲线和试验现象相似,各试件受压荷载-侧向应变曲线基本重合,都是开始为直线,表明试件处于线弹性工作阶段,在荷载增大到一

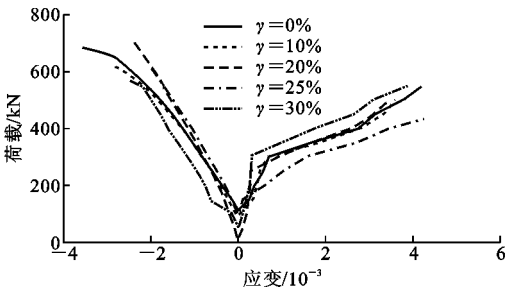


图 12 各试件荷载-应变曲线

Fig. 12 Load-strain Curves of Specimens

定程度时,曲线开始弯曲,混凝土开裂前,试件进入弹塑性工作阶段。在受拉侧,各试件均较早地进入了弹塑性工作阶段,这和试验现象的观察相吻合。当混凝土开裂时,受拉侧混凝土应变增长迅速加快,大于荷载的增加速度。受拉受压侧的应变都超过了 2×10^{-3} ,即受拉受压侧混凝土都发生了开裂;25% 后掺率的混凝土柱开裂荷载较小,且应变增长速率较大。

3.4.3 钢筋应变

图 13 为 5 个后掺骨料混凝土柱受拉区、受压区纵筋应变随荷载增加的变化情况。由图 13 可知,后掺骨料混凝土钢筋应变发展和普通混凝土柱钢筋相似,都经历了线弹性发展阶段和弹塑性发展阶段。竖向荷载较小时,钢筋应变呈线性变化,钢筋应变随荷载增长的速度较缓慢,随着混凝土开裂,柱各截面应力重分布,钢筋的应变增长速度加快。对比各试件的曲线后发现,在相同荷载下后掺骨料混凝土柱的拉应变较大,这是因为后掺骨料混凝土柱的内部由于浆体较少,受拉下内部更容易出现混凝土塑性损伤,从而钢筋承担更多应力。受压侧由于在荷载较小时钢筋和混凝土变形协调,因此应变增长呈线性,后期由于混凝土开裂退出工作,钢筋的应力变大,应变增长速率也变大。

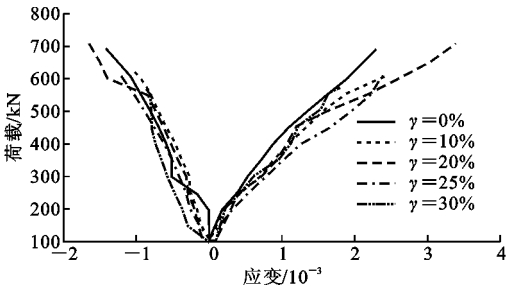


图 13 钢筋应变

Fig. 13 Strain of Steel Bar

3.5 延性分析

延性是衡量结构或构件在破坏过程中的变形能

力,本文采用延性系数 μ 来表征构件的延性,延性系数为试件承载力下降为极限承载力的 85%时构件跨中挠度与构件屈服时跨中挠度的比值。各试件的变形值和延性系数见表 4。

表 4 各试件延性指标
Tab. 4 Ductility Indexes of Specimens

试件编号	屈服荷载 F_y/kN	屈服位移 Δ_y/mm	极限位移 Δ_u/mm	延性系数 μ
PPZ50-0	650.91	4.058	7.167	1.77
PPZ50-1	550.96	2.778	5.431	1.96
PPZ50-2	639.45	2.792	5.828	2.09
PPZ50-3	579.76	2.664	4.733	1.78
PPZ50-4	481.49	2.736	5.483	2.00

从表 4 可以看出,延性最好的为 20%后掺率的柱,25%后掺率的柱和 0%后掺率的柱相近。

4 有限元分析

有限元数值模拟是现阶段对结构进行设计及验算的有效方式和常用方法,本文从研究后掺骨料混凝土的本构模型入手,讨论使用有限元软件对后掺骨料混凝土进行设计的可行性。

4.1 本构模型的建立

后掺骨料混凝土由于在基准混凝土中添加了一定比例的粗骨料,因此其本构关系会发生改变,本文采用试验测量结合相关经验公式的方法得出后掺骨料混凝土的本构关系。

首先,根据设计试验测得构件的受压应力-应变曲线,试验设备如图 14 所示。试验在大连理工大学结构实验室进行,在试验前半段采用力控制,后半段采用位移控制。在试件表面贴竖向应变片(长 100 mm),通过试验获得了各试件一部分较为稳定的下降段,但是由于试验条件限制,塑性变形较大部分的下陷段不是很稳定,本文结合已经测得的下陷段数据,利用过镇海^[24]提出的公式对本构模型进行补充^[25]。文献[24]提出的针对混凝土本构的数据主要由以下公式获得

$$y = \begin{cases} ax + (3 - 2a)x^2 + (a - 2)x^3 & 0 \leq x < 1 \\ \frac{x}{b(x - 1)^2 + x} & x \geq 1 \end{cases} \quad (4)$$

式中: a, b 为系数; $x = \epsilon/\epsilon_{pr}$, ϵ_{pr} 为峰值应变; $y = \sigma/f_{pr}$, σ 为应力, f_{pr} 为混凝土的棱柱体强度。

本文利用各试件的试验数据,采用最小二乘法进行计算,得出不同比例后掺骨料混凝土的系数值,由于 ABAQUS 模拟仅需输入构件屈服后的本构,因此本文前半段采用试验值,后半段采用部分试验

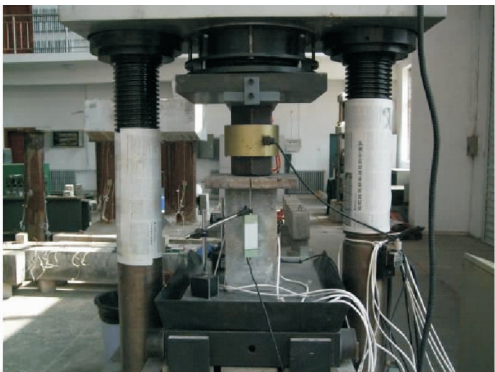


图 14 应力-应变曲线测量装置

Fig. 14 Measuring Device of Stress-strain Curve

值结合模拟值的形式。由于前半段采用试验数据,因此仅需计算出系数 b 的值,得出的系数 b 见表 6。

表 5 本构模型系数

Tab. 5 Coefficients of Constitutive Model

后掺率/%	0	10	20	25	30
b	3.09	6.45	9.10	18.19	21.23

利用试验值与计算值相结合的方式得出的后掺骨料混凝土应力-应变曲线见图 15。由图 15 可以看出,随着后掺率的增加,后掺骨料混凝土的应力-应变曲线下陷段变陡,说明试件变脆。

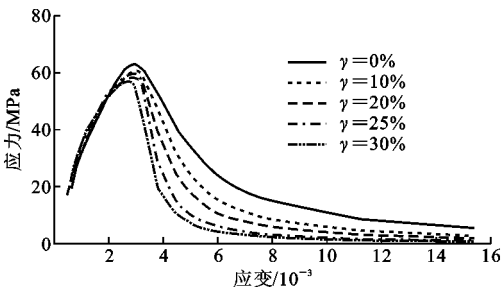


图 15 受压应力-应变曲线

Fig. 15 Compressive Stress-strain Curves

受拉应力-应变本构模型采用丁发兴等^[26]建议的公式参数计算方法,受拉应力-应变曲线也由弹性阶段、弹塑性上升阶段、弹塑性下降阶段以及破坏断裂阶段组成^[26]。

对应于曲线上上升段和下降段的公式如式(5)所示,即

$$y = \begin{cases} \frac{A'x - x^2}{1 + (A' - 2)x} & 0 \leq x < 1 \\ \frac{x}{T(x - 1)^{1.7} + x} & x \geq 1 \end{cases} \quad (5)$$

式中: $y = S_t/f_t$, S_t 为拉应力, f_t 为极限抗拉强度; $x = e/e_{tp}$, e 为拉应变, e_{tp} 为受拉峰值应变; A', T 为系数。

文献[26]建议 $A' = 1.306$, $T = 1 + 3.4f_{cu}^2 \times$

10^{-4} , 本文的 T 值见表 7。

表 6 本构模型系数

Tab. 6 Coefficients of Constitutive Model

后掺率/%	0	10	20	25	30
T	1.97	2.35	2.50	2.40	2.20

采用上述公式(5)计算的后掺骨料混凝土受拉应力-应变曲线如图 16 所示。

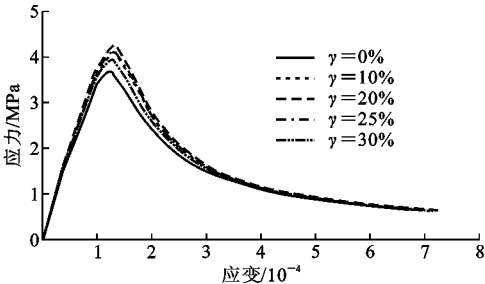


图 16 受拉应力-应变曲线

Fig. 16 Tensile Stress-strain Curves

4.2 有限元模型的建立

本文利用大型有限元分析软件 ABAQUS 进行建模并分析, ABAQUS 提供了专门针对混凝土的本构模型输入接口 Concrete Damage Plastic, 在这个模块里将上面试验结合计算得到的本构模型中塑性部分进行输入, 混凝土的泊松比取 0.2。由于试验加载中两端为刀口铰支座加球铰的形式, 因此本文在模型两端通过支座的形式进行模拟。

混凝土单元类型为八节点三维减缩积分单元 C3D8R, 钢筋单元类型为三维桁架单元 T3D2, 混凝土与钢筋之间采用绑定的连接形式, 钢筋和混凝土网格划分后的模型如图 17 所示。

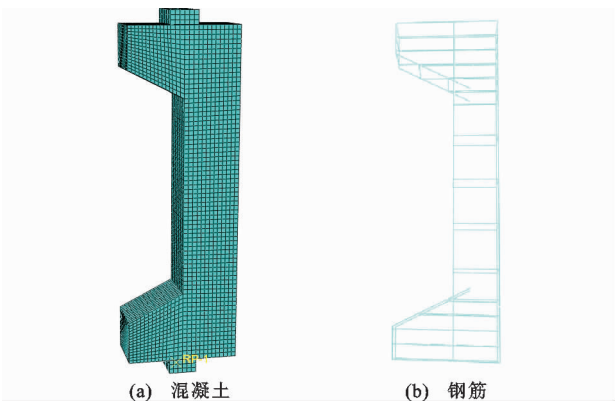


图 17 钢筋和混凝土网格划分模型

Fig. 17 Meshing Model of Rebar and Concrete

4.3 试件受力模拟与试验结果对比

通过数值模拟分析得出的后掺骨料混凝土柱 Von Mises 应力云图如图 18 所示。从图 18 可以看出, 各试件都呈现了对应大偏心破坏的应力分布及

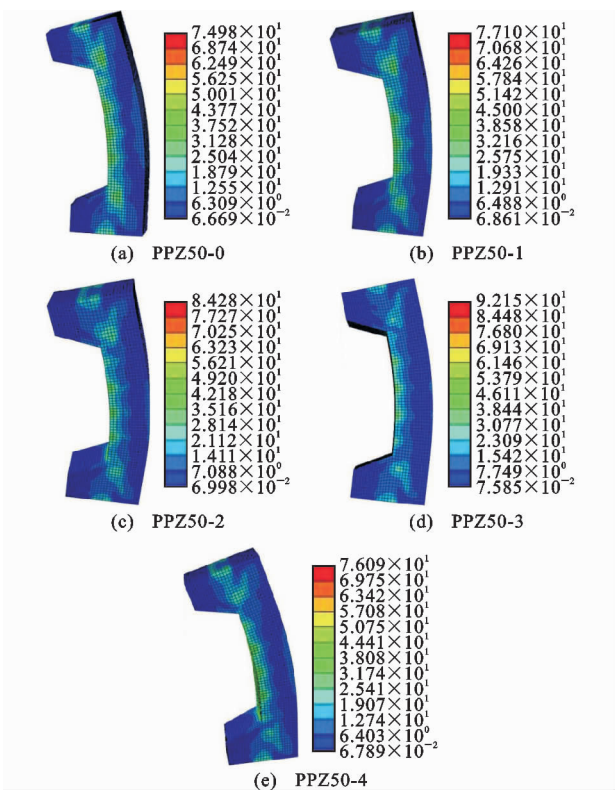


图 18 Von Mises 应力云图(单位:MPa)

Fig. 18 Von Mises Stress Cloud Maps (Unit:MPa)

形态。在受拉区中部及受压区应力较大, 这与试验观察到的现象相符。

在有限元分析后处理模块的 XY-Data 里获取试件的竖向荷载与跨中侧向挠度, 并与试验结果进行对比, 各组结果绘制于图 19。

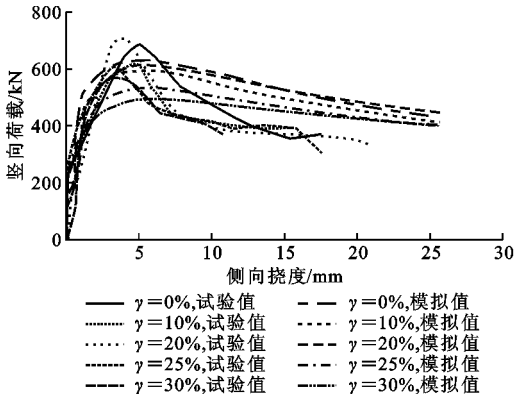


图 19 荷载-挠度曲线

Fig. 19 Load-deflection Curves

2 组试验结果分别为试验测量值和数值模拟值。由图 19 可以看出, 在弹性阶段, 各试件的试验曲线与模拟曲线基本重合, 弹性阶段数值模拟效果较好。通过对比可以看出, 相对于试验结果, 数值模拟出的试件荷载-挠度曲线更为平缓, 即试件的延性较好, 这是因为相对于实际中的混凝土试件,

ABAQUS 模型的塑性变形能力更好。

将试验测得的试件极限承载力与数值模拟所得极限承载力列于表 7,并计算其相对误差。由表 7 可以看出,当后掺率达到 20%及以上时,试件极限承载力模拟值与试验值偏差稍大,这是因为在模型建立中无法考虑因粗骨料含量变化导致的骨料与钢筋咬合情况改变。模拟值均小于试验值,因此利用有限元模拟后掺骨料混凝土构件的破坏是偏于安全的,可以使用试验值加公式值得出本构模型进行后掺骨料混凝土构件的有限元设计及验算。

表 7 各试件试验极限承载力与数值模拟极限承载力
Tab.7 Bearing Capacities of Specimens by Experiment and Numerical Simulation Ultimate

后掺率/%	0	10	20	25	30
极限承载力试验值/kN	686.5	615.0	705.0	609.0	568.0
极限承载力模拟值/kN	630.1	591.9	611.1	530.0	491.2
相对误差/%	8.9	3.9	15.4	14.9	15.6

5 结 语

(1)大偏心受压后掺骨料混凝土柱在受力过程、裂缝发展、应力-应变发展等方面在后掺率小于等于 20%时与普通混凝土柱相近。

(2)后掺骨料混凝土柱在大偏心受压下应变分布符合平截面假定,且各构件均符合大偏心受压构件的破坏模式,因此设计时可参考《混凝土结构设计规范》。

(3)20%后掺率下混凝土柱在大偏心受压时具有较好的延性和较高的极限承载力,建议对于大偏心受压的后掺骨料混凝土构件采用 20%后掺率。

(4)试验测量结合经验公式建立的后掺骨料混凝土本构模型用于有限元模拟时,其模拟结果与试验结果吻合良好,因此可以使用有限元模拟进行后掺骨料混凝土构件的设计及验算。

参考文献:

References:

[1] 曹秀丽,夏冰青,刘正保.泵送混凝土裂缝成因及控制[J].建筑技术开发,2011,38(12):30-33.
CAO Xiu-li,XIA Bing-qing,LIU Zheng-bao. Analysis on Causes and Control of Pumping Concrete Cracks [J]. Building Technique Development,2011,38(12): 30-33.

[2] 周建宇,于新民.泵送混凝土裂缝成因分析与防治措施[J].内蒙古公路与运输,2007(6):17-22.
ZHOU Jian-yu,YU Xin-min. Cause Analysis and Pre-

vention Measures of Pump Concrete Cracks[J]. Highways & Transportation in Inner Mongolia,2007(6): 17-22.

[3] 方国华.泵送混凝土裂缝的原因分析与防治措施[J].低温建筑技术,2010(4):121-122.
FANG Guo-hua. The Cause Analyses and Prevention Measures of the Pumped Concrete Crack [J]. Low Temperature Architecture Technology,2010(4):121-122.

[4] 汪留松,王 俊.泵送混凝土现浇楼板裂缝原因分析及预防措施[J].混凝土,2007(5):83-85.
WANG Liu-song,WANG Jun. Analyzing the Course of the Crack of Cast-in-place Concrete Slab Delivered by Pump and Summarizing the Preventive Measure [J]. Concrete,2007(5):83-85.

[5] 杨绍凯.泵送混凝土裂缝产生的机理分析及应对措施[J].山西建筑,2010,36(28):130-131.
YANG Shao-kai. On Mechanic Analysis of Cracks on Pumping Concrete and Its Treatments[J]. Shanxi Architecture,2010,36(28):130-131.

[6] 王 生.浅谈泵送混凝土的裂缝成因及控制方法[J].宁夏电力,2006(6):65-67.
WANG Sheng. Discussion on Crack Cause and Control Method of Pump Feeding Concrete [J]. Ningxia Electric Power,2006(6):65-67.

[7] 阮炯正.泵送混凝土塑性裂缝的成因及防治[J].混凝土,2000(5):20-22.
RUAN Jiong-zheng. The Causes and Precautions of the Concrete Plastic Cracking[J]. Concrete,2000(5): 20-22.

[8] 濮成堂.混凝土裂缝的危害及处理措施[J].山西建筑,2009,35(21):127-128.
PU Cheng-tang. Hazards of Concrete Cracks and Treatment Measures [J]. Shanxi Architecture, 2009, 35(21):127-128.

[9] 穆 松,刘建忠.基于混凝土裂缝特征的氯离子传输性质研究进展[J].硅酸盐学报,2015,43(6):829-838.
MU Song,LIU Jian-zhong. Review of Chloride Transport Properties in Concrete Featured with Different Cracking Characteristics [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society,2015,43(6):829-838.

[10] 金祖权,赵铁军,陈惠苏,等.海洋环境下裂缝混凝土氯盐腐蚀[J].中南大学学报:自然科学版,2012,43(7):2821-2826.
JIN Zu-quan,ZHAO Tie-jun,CHEN Hui-su, et al. Chloride Corrosion of Splitting Cracked Concrete Under Marine Environment[J]. Journal of Central South

- University: Science and Technology, 2012, 43 (7): 2821-2826.
- [11] 唐先习,尹月西,国伟.混凝土裂缝宽度和深度对裂缝表面碳化的影响[J].广西大学学报:自然科学版, 2015,40(1):121-126.
TANG Xian-xi, YIN Yue-you, GUO Wei. Influence of Crack Width and Depth on Surface Carbonization of Concrete Cracks[J]. Journal of Guangxi University: Natural Science Edition, 2015, 40(1): 121-126.
- [12] 沈卫国,崔啸宇,李家胜,等.预置集料高强高性能混凝土的实验研究[J].武汉理工大学学报, 2011, 33 (10): 24-29.
SHEN Wei-guo, CUI Xiao-yu, LI Jia-sheng, et al. Experimental Investigation on the High Strength and High Performance Preplaced Aggregate Concrete[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2011, 33 (10): 24-29.
- [13] 贾金青,王东来,叶浩,等.后掺粗骨料工艺对高性能泵送混凝土性能影响研究[J].水利与建筑工程学报, 2017, 15(3): 1-7.
JIA Jin-qing, WANG Dong-lai, YE Hao, et al. Experimental Study on Properties of High Performance Pumping Concrete with After-mixing Coarse Aggregate and Its Application Prospect[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2017, 15 (3): 1-7.
- [14] 邹波.一种新型混凝土的强度及抗裂性试验研究[D].大连:大连理工大学, 2015.
ZOU Bo. Experimental Study on Strength and Cracking Resistance of a New Type Concrete[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2015.
- [15] 胡玉龙.一种新型混凝土梁抗剪性能研究[D].大连:大连理工大学, 2015.
HU Yu-long. Study on Shear Performance of Beams of a New Type of Concrete[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2015.
- [16] 栾兰.一种新型混凝土基本力学性能的试验研究[D].大连:大连理工大学, 2014.
LUAN Lan. Experimental Study on Mechanical Properties of a New Type of Concrete[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2014.
- [17] 吴中伟.高性能混凝土——绿色混凝土[J].混凝土与水泥制品, 2000(1): 3-6.
WU Zhong-wei. High Performance Concrete — Green Concrete[J]. China Concrete and Cement Products, 2000(1): 3-6.
- [18] GB 50164—2011,混凝土质量控制标准[S].
GB 50164—2011, Standard for Quality Control of Concrete[S].
- [19] GB/T 50081—2002,普通混凝土力学性能试验方法标准[S].
GB/T 50081—2002, Standard for Test Method of Mechanical Properties on Ordinary Concrete[S].
- [20] 陈昭怡,吴桂英.材料力学[M].北京:中国建材工业出版社, 2005.
CHEN Zhao-yi, WU Gui-ying. Mechanics of Materials [M]. Beijing: China Building Materials Press, 2005.
- [21] SL 352—2006,水工混凝土试验规程[S].
SL 352—2006, Test Code for Hydraulic Concrete[S].
- [22] GB/T 50152—2012,混凝土结构试验方法标准[S].
GB/T 50152—2012, Standard for Test Method of Concrete Structures[S].
- [23] GB 50010—2010,混凝土结构设计规范[S].
GB 50010—2010, Code for Design of Concrete Structures[S].
- [24] 过镇海.混凝土的强度与变形:试验基础和本构关系[M].北京:清华大学出版社, 1997.
GUO Zhen-hai. Strength and Deformation of Concrete: Experimental Foundation and Constitutive Relationship [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1997.
- [25] 肖建庄.再生混凝土单轴受压应力-应变全曲线试验研究[J].同济大学学报:自然科学版, 2007, 35(11): 1445-1449.
XIAO Jian-zhuang. Experimental Investigation on Complete Stress-strain Curve of Recycled Concrete Under Uniaxial Loading[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2007, 35(11): 1445-1449.
- [26] 丁发兴,余志武.混凝土受拉力学性能统一计算方法[J].华中科技大学学报:城市科学版, 2004, 21(3): 29-34.
DING Fa-xing, YU Zhi-wu. Unified Calculation Method of Mechanical Properties of Concrete in Tension [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Urban Science Edition, 2004, 21(3): 29-34.