

# 轻-粗混合骨料混凝土的基本力学性能试验研究

王国业,李昶,倪志文,王凤池,程镇

(沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168)

**摘要** 目的 以硼泥陶粒等体积替换石子为粗骨料,研究陶粒的不同体积掺量对混凝土的基本力学性能及变形性能的影响规律. 方法 通过5组试验研究了陶粒体积掺量分别为0、25%、50%、75%和100%时,对混凝土28d的强度和应力-应变曲线的上升段的影响规律. 结果 随着陶粒体积掺量的增大,混凝土的立方体抗压强度、轴心抗拉强度和劈裂抗拉强度均呈减小的趋势,且当陶粒体积掺量超过50%时,混凝土强度大幅降低;混凝土的应力-应变曲线上升段的斜率和峰值应力随着陶粒体积掺量的增大而逐渐减小,但峰值应变增大. 结论 随着陶粒体积掺量的增大,混凝土的强度和弹性模量逐渐降低;提出了不同陶粒体积掺量的混凝土的本构方程建议.

**关键词** 陶粒混凝土;硼泥陶粒;力学性能;强度;应力-应变曲线

中图分类号 TU528

文献标志码 A

## Experimental Study on Basic Mechanical Properties of Light Coarse Aggregate Concrete

WANG Guoye, LI Chang, NI Zhiwen, WANG Fengchi, CHEN Zhen

(School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

**Abstract:** The effects of different volume of ceramist on the basic mechanical properties and deformation behavior of concrete were conducted to investigate by replacing the gravel as coarse aggregate with the volume of boron mud ceramist. The influence of the volume fraction of ceramist with 0, 25%, 50%, 75% and 100% on the strength and stress-strain curve of concrete at 28d was studied by 5 groups of experiments. The comprehensive strength, axial tensile strength and splitting tensile strength of concrete decrease with the increase of the volume fraction of ceramist, and the strength of concrete decreases greatly when the volume of ceramist is more than 50%. And the slope of the stress-strain curve and the peak stress decrease with the increase of the volume fraction of the aggregate, but the peak strain increases. The strength and elastic modulus of concrete decrease with the increase of the volume of ceramist, and this paper suggests the constitutive equation of concrete of different ceramist volume.

收稿日期:2017-03-11

基金项目:国家十二五科技支撑计划项目(2012BAJ11B02);沈阳市科技攻关计划项目(F10-144-9-00)

作者简介:王国业(1970—),男,高级工程师,主要从事结构工程、管理工程研究.

**Key words:**ceramist concrete;boron mud ceramist;mechanical properties;strength;stress-strain curve

近年来随着城市进程化的不断加快,建筑物的高层化、大跨度化越来越普遍。普通混凝土的高强度及优良的耐久性等优点虽然可以满足高层及大跨度建筑物对强度和稳定性的基本要求,但是其自身重量大等缺点在很大程度上严重的限制了建筑物向高层、大跨度的发展。可见,如何在保证混凝土强度的同时减小其自身的重量是解决这一问题的关键。美国、德国、挪威以及日本等国家很早就成功地把强度很高的页岩陶粒混凝土及粉煤灰陶粒混凝土等运用到民用住房、商业办公楼以及大跨度的道桥中。近年来,我国各高校对性能更好的轻骨料混凝土的研究也取得了重大的突破。如王鹏<sup>[1]</sup>对陶粒性能进行试验,根据试验结果和正交试验方法配制出抗压强度在20~40 MPa的结构陶粒混凝土,并通过对试验过程的观察和分析找到了有利于施工,防止陶粒上浮的养护方法;通过检验发现基准配合比符合强度、施工高性能和保温性能的要求,并找出陶粒堆积密度与强度、混凝土干表观密度与导热系数的关系;对陶粒混凝土劈裂抗拉强度与立方体抗压强度关系进行试验研究并探讨劈裂抗拉强度对钢筋陶粒混凝土粘结性能的影响。檀春丽<sup>[2]</sup>分析在北京市生产非黏土页岩陶粒的技术、资源、能耗、经济可行性;通过试验研究对比各种陶粒性能,提出了适合北京市发展的非黏土页岩陶粒;研究陶粒性能对混凝土拌和物流动性、稳定性及硬化混凝土的力学性能、体积稳定性和耐久性能的影响;借助 SEM 测试方法观察陶粒微观结构和陶粒混凝土界面区特征,分析轻集料与水泥石相互作用机理;分析了优选非黏土陶粒是否可以代替黏土和页岩陶粒。研究结果表明:粉煤灰陶粒和淤泥陶粒成本相当、煤矸石陶粒成本最高,煤矸石陶粒的能耗最高、粉煤灰陶粒其次、淤泥陶粒的综合能耗最小;通过陶粒性能对比,粉煤灰陶粒的堆积密度变异系数只有0.05左右,均质性最好,质量最

稳定,粒型系数最小,吸水率(包括常压吸水、劈开前后吸水率、连通率、压力吸水率)和筒压强度性能介于煤矸石陶粒和淤泥陶粒之间;经综合评价,确定以粉煤灰陶粒作为非黏土陶粒的代表进行混凝土试验。王帅<sup>[3]</sup>以实际工程为背景配制出满足要求的陶粒混凝土,进行了三种减水剂两种不同掺量的对比试验,分析减水剂不同品种和不同掺量对陶粒混凝土坍落度、扩展度及经时损失值的影响。利用课题组研究的改进后圆环试验模具研究橡胶集料对陶粒混凝土开裂性能的影响。结果表明:随着橡胶掺量的增加,陶粒混凝土的开裂时间有所延迟,当掺量达到15%时,在测定的时间范围内没有观测到裂缝的出现。采用破碎的方式得到破碎陶粒,利用破碎陶粒和粒径偏大的完整陶粒配制成混凝土进行对比试验。利用破碎陶粒和完整陶粒混凝土可泵性的对比试验得出:与完整陶粒混凝土相比,破碎陶粒混凝土的分层离析现象明显得到改善,明显提高了可泵性能。但是,还有很多新型的陶粒轻骨料的研究还处于起步阶段。基于此,笔者以不同体积掺量的轻骨料陶粒等体积替代普通混凝土原有的粗骨料,对这种轻-粗混合骨料混凝土的基本力学性能及变形性能进行研究,得出对混凝土强度和弹性模量随陶粒体积掺量增加呈见效的趋势以及可作为不同陶粒掺量混凝土的本构方程。

## 1 轻-粗混合骨料混凝土的受力模型

在普通混凝土中,石子本身具有很大的筒压强度和弹性模量,混凝土发生破坏的地方一般最先出现在石子和水泥砂浆这两相基体黏结的界面处。这表明石子与水泥砂浆两基体间的界面交结处是普通混凝土中最容易被破坏的区域,也就是说对普通混凝土的强度起关键性作用的是石子与水泥砂浆这两相基体之间的粘结力的大小。当不同体积掺量

的陶粒取代普通混凝土原有的粗骨料后,构成混凝土的构架结构发生了改变,此时混凝土构架中的粗骨料性能存在差异,混凝土受力后内力会根据其构架的特点进行重新分配和传导.因此,当混凝土中掺入不同体积的陶粒后,可以把以陶粒和石子组成的骨架结构看成一种“复合”的整体,并从复合材料的角度来分析不同体积掺量的陶粒对混凝土的受力特点及在压力作用下破坏的形态.

从复合材料的角度分析,可以把由分散相的陶粒和石子以及连续相的水泥砂浆组成的混凝土比作硬质复合材料.而硬质复合材料在受到外力作用时,力会在材料内部对其内力进行重新分布和传递,且内力的重新分布和传递与复合材料所构成的各个相的弹性模量和体积含量成正比关系,即在复合材料受力时,如果某个组成相的弹性模量和体积含量越多,则其“分担”的内力也越多.因此,硬质复合材料受力可借鉴图1所示的并联模型<sup>[4]</sup>.

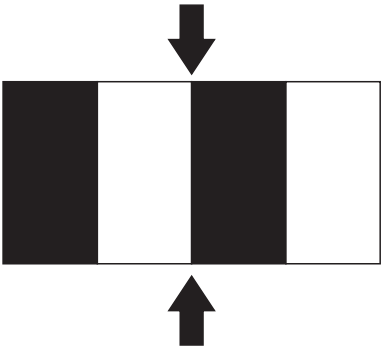


图1 硬质复合材料受力模型

Fig.1 Mechanical model of hard composite

在上述模型的理论基础上对硼泥陶粒混凝土的受力及破坏过程分析可知:当受到荷载作用时,弹性模量较大的连续相水泥砂浆以及弹性模量很大的分散相的石子承担较多的压力荷载,而弹性模量较小的分散相的陶粒则承受较少的荷载.当荷载增大到一定程度并超过水泥砂浆的极限承载力时,水泥砂浆所受的应力首先达到其屈服破坏值并开始破坏,待水泥砂浆开始破坏后,材料所受的内应力迅速重新分布.由于外部施加的荷载太大且水泥砂浆已破坏退出受力状态,此时弹性模量较小陶粒所承受的内力突然增大,陶粒迅速破裂,最终整个混凝土结构破坏.

2 试 验

2.1 试验材料

试验选用的水泥为 P. O32.5 矿渣硅酸盐水泥;普通碎石,体积密度为  $2\,650\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ,最大粒径为 20 mm;硼泥陶粒由辽宁省沈阳市灯塔市昌明墙体材料厂生产,普通型,粒径为 5~16 mm 的混合连续级配,1 h 的吸水率为 17.3%;普通河沙,细度模数为 2.7,表观密度为  $2\,620\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ .

2.2 配合比

试验共分 5 组,水灰比( $w/c$ )为 0.40,试验前对硼泥陶粒预湿处理 1 h. M25、M50、M75 及 M100 分别表示体积掺量为 25%、50%、75% 和 100% 的硼泥陶粒等体积代换石子配制的混凝土,基准配合比 M0 为普通混凝土.试验配合比如表 1 所示.

表1 试验配合比

Table 1 Test mixture ratio

组号	$w/c$	$\rho(\text{水泥})/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$\rho(\text{砂子})/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	陶粒掺量/%	$\rho(\text{陶粒})/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$\rho(\text{石子})/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$
M0	0.40	450	679.4	0	0	1 062
M25	0.40	450	679.4	25	101.4	796.5
M50	0.40	450	679.4	50	202.7	531
M75	0.40	450	679.4	75	304	265.5
M100	0.40	450	679.4	100	405.4	0

2.3 试验方法

混凝土的基本力学性能及变形性能试验依据相关试验规程设计<sup>[5-11]</sup>,主要试验项目如表2所示。

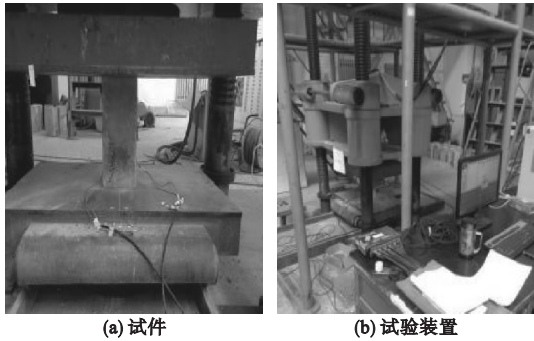
试块成型24 h后对其脱模,并对试块存在缺陷的位置用配合比相同的砂浆修补,在浇水养护过程中应避免直接对试件进行冲刷。待龄期达到28 d,将试块静置干燥后,准

备进行基本力学性能试验。

应力-应变试验中,试验前需对每个试件粘贴应变片。考虑试件制作过程中陶粒存在不同程度上浮的现象,应除去试件的成形面和底面,对两个侧面用无水酒精擦拭干净后,用502胶水沿纵向粘贴应变片。用万能表检测粘贴合格后进行变形试验,如图2所示。

表2 硼泥陶粒混凝土的基本力学性能项目  
Table 2 Basic mechanical properties of boron sludge

力学性能试验项目	测试龄期/d	长×宽×高/mm	每组数量/个
立方体抗压强度	7、14、28	150×150×150	3
劈裂抗拉强度	28	150×150×150	3
轴心抗压强度	28	150×150×300	3
应力-应变	28	150×150×300	3



(a) 试件 (b) 试验装置

图2 应力-应变试验

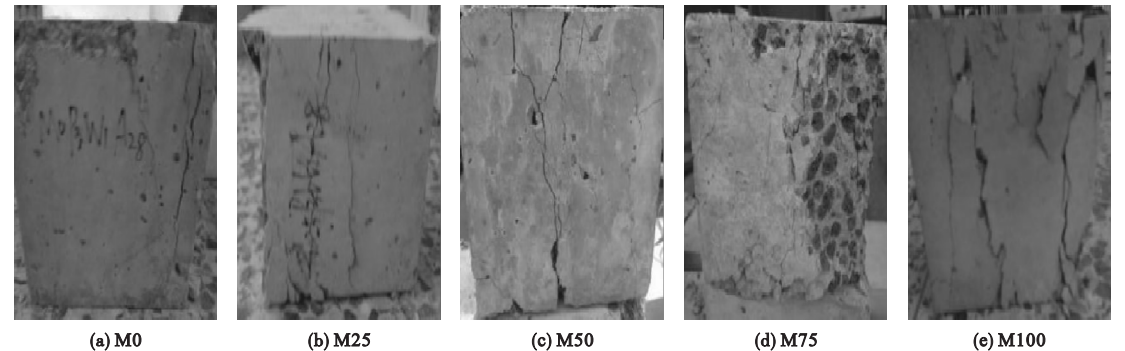
Fig. 2 The stress-strain test

3 基本力学性能

3.1 立方体抗压强度

3.1.1 试验现象

试块的破坏形态与普通混凝土完全不同,图3为不同体积掺量的陶粒混凝土受压破坏形态。通过试验发现,试件最终破坏时的特点为:裂纹较多且集中,多为上下贯通,试件整体裂而不散,无明显爆裂。随着陶粒掺量的增加,试件的破坏特征越显著。



(a) M0 (b) M25 (c) M50 (d) M75 (e) M100

图3 不同陶粒体积掺量的混凝土受压破坏形态

Fig. 3 Compressive failure of concrete with different volume of aggregate

M0组普通混凝土试件在破坏的过程中裂纹数量少、宽度小且扩展的速度慢,试件破坏后并未发现有石子被压碎;M25组和M50

组试件在受压过程中水泥砂浆的脱落减少,裂纹的出现相对延后,且裂纹在扩展的过程中出逐渐现较多分支;M75组和M100组试



件破坏时裂纹上下贯通且有较多分枝出现,甚至试块局部出现水泥砂浆脱落。

3.1.2 结果与分析

不同体积掺量的陶粒混凝土的立方体抗压强度随龄期的变化规律如图4所示。

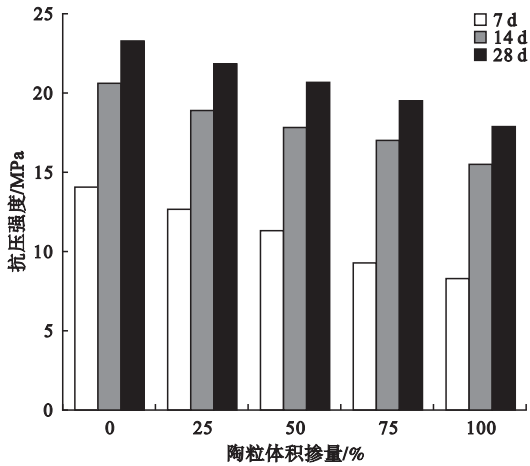


图4 陶粒掺量对混凝土立方体抗压强度的影响

Fig. 4 Effect of ceramist volume on the compressive strength of concrete

由图4可知:在不同龄期下各组混凝土的抗压强度均随着砌泥陶粒体积掺量的增加而减小。当陶粒的体积掺量大于50%时,各组混凝土与普通混凝土相比,其抗压强度均有较小幅度的降低;当陶粒体积掺量超过50%时,混凝土各龄期的抗压强度均显著降低,且中后期强度的增长也较缓慢。此外,还可以发现,每一组试件7d的抗压强度均能达到其28 d抗压强度的45%~64%,14 d的抗压强度能达到其28 d抗压强度的85%以上。

根据硬质复合材料受力模型可以得出上述现象的产生原因:当试件承受压力主要由连续相的水泥砂浆承担,即水泥砂为试件的整体受力构架的主要部分。随着压力的增大,裂缝首先在水泥砂浆相中产生并迅速扩展,最终试件破坏。因此陶粒体积掺量越多,连续相的砂浆体积含量越少,即承受压力的水泥砂浆也越少,试块所能承受的压力就越小;而此时强度和弹性模量较小的陶粒则会

被直接劈开破坏,裂缝则迅速扩张并呈贯通的趋势。

3.2 劈裂抗拉强度

3.2.1 试验结果

不同体积掺量的陶粒对混凝土28 d的立方体劈裂抗拉强度的变化规律如图5所示。

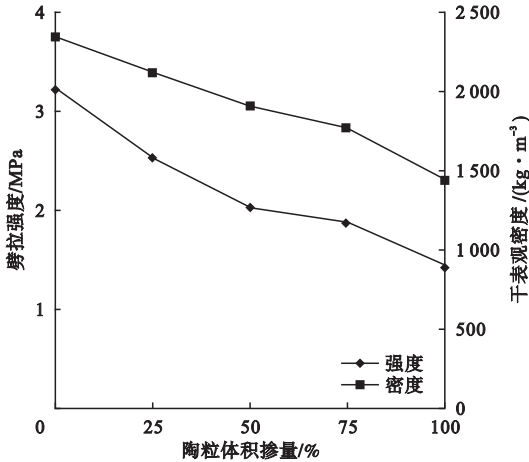


图5 陶粒体积掺量对混凝土劈裂抗拉强度的影响

Fig. 5 Effect of ceramist volume on concrete splitting tensile strength

由图5可知:随着陶粒体积掺量的增加,混凝土的劈裂抗拉强度和干表观密度呈现逐渐减小的趋势。当陶粒的体积掺量小于50%时,混凝土的劈裂抗拉强度和干表观密度都有较大幅度的减小。M25组和M50组混凝土相对M0组普通混凝土的劈裂抗拉强度分别减小了21%和37.3%,干表观密度则分别减小了9.8%和18.7%。当陶粒的体积掺量在50%~75%时,混凝土的劈裂抗拉强度和干表观密度的下降幅度相对缓慢,M75组混凝土的劈裂抗拉强度相对M50组的混凝土仅仅降低了7.5%,干表观密度下降了7.6%;而陶粒体积掺量为100%时,M100组混凝土的劈裂抗拉强度和干表观密度相对M50组混凝土分别降低了27.5%和24.3%,相对M0组的普通混凝土则分别降低了54.5%和38.5%。由此可见,等体积的陶粒替换普通混

凝土中的石子会严重地降低混凝土的强度,究其原因是因为陶粒的掺入改变了原有混凝土的构架结构及受力方式.

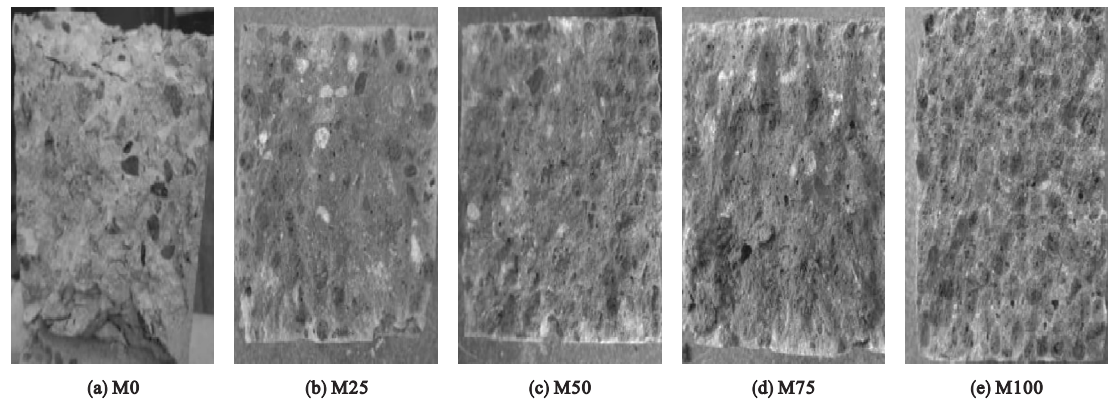


图6 不同陶粒体积掺量的混凝土劈裂抗拉破坏形态

Fig. 6 Splitting tensile failure of concrete with different volume fraction of aggregate

由图6可知,当用陶粒替换混凝土中的石子后,试件在劈裂抗拉破坏的过程中,破坏的界面会贯穿所经过路线的所有陶粒;而当破坏界面处有石子存在的M25、M50、M75组混凝土试件时,破坏界面会“绕过”石子,从石子和水泥砂浆的接触界面出经过,形成一个较为平整的断截面;而对于M0组的普通混凝土,其破坏界面的断截面所经过的位置主要是水泥砂浆发生破坏,而石子几乎都是完好的.

出现上述结果和现象的原因:普通混凝土的劈裂抗拉强度的大小主要取决于混凝土内部石子和硬化后的水泥砂浆的抗拉强度的大小以及石子与硬化后的水泥浆两基体间界面的粘结的牢固程度.在混凝土养护28d后,石子及硬化后的水泥砂浆的抗拉强度一般都要比石子与硬化水泥浆两基体间界面的粘结力要大,因此试件破坏界面的断截面几乎都是经过石子与水泥砂浆两基体间的界面处. 砌泥陶粒本身的强度很低,28 d后其强度甚至比陶粒与水泥砂浆两基体间界面处的粘结强度都要低,因此试件在劈裂抗拉破坏时陶粒最先被劈坏,破坏界面则直接贯穿陶粒.当陶粒掺量越多时,破坏界面的石子就

3.2.2 现象与分析

图6为不同体积掺量的陶粒混凝土试件劈裂抗拉的破坏形态.

越少,即强度较大的石子与水泥砂浆二者的接触界面就越少,试件的劈裂抗拉强度就越小.

3.3 轴心抗压强度

图7和图8分别为不同体积掺量的陶粒对混凝土28 d的轴心抗压强度变化规律及试件破坏形态.

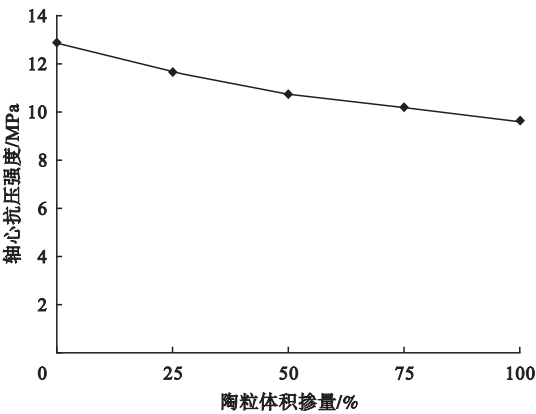


图7 陶粒体积掺量对混凝土轴心抗压强度的影响

Fig. 7 Effect of ceramist volume of concrete axial compressive strength

由图7可知,混凝土的轴心抗压强度随着陶粒体积掺量的增加呈减小的趋势.其中,M100组混凝土与M0组普通混凝土相比较

时,其轴心抗压强度约下降了 25%,但相比 M75 组仅仅下降了 5.0%,这说明了当大体

积陶粒掺入时,陶粒自身的强度是混凝土轴心抗压强度的减小的主要影响因素.

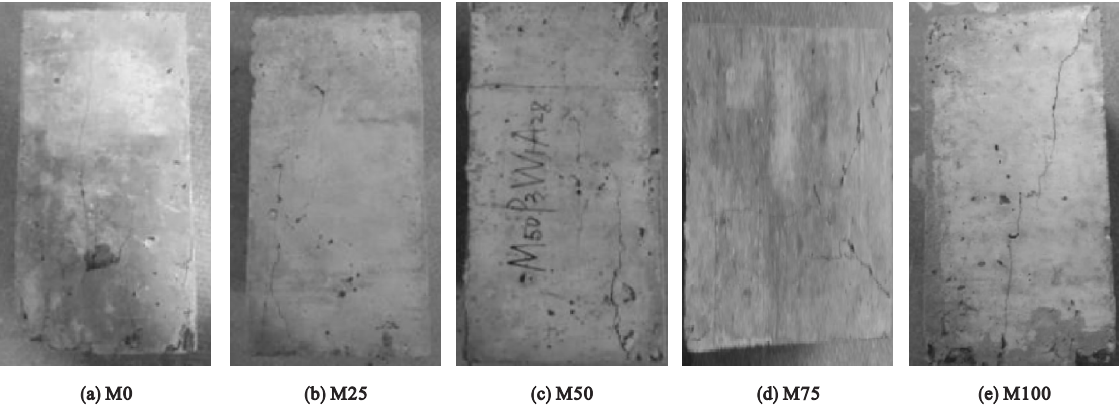


图 8 不同陶粒体积掺量的混凝土轴心抗压破坏形态

Fig. 8 Axial comprehensive failure of concrete with different volume content of aggregates

从图 8 可以看出,试件破坏时其表面都出现了裂纹,但没有出现被压碎或者水泥砂浆脱落的现象. 陶粒的体积掺量越大,试件表面的出现的裂纹的数量却越少,但是裂纹的走势明显;陶粒体积掺量越少,出现裂纹的数量相对越多,裂纹的扩张也相对分散,试件表面会出现 2 条甚至 3 条主裂纹. 实验过程中, M100 组混凝土试件开始没有明显的裂纹出现,在试件即将破坏前瞬间出现了一条主裂纹并迅速扩张,当试件破坏时裂纹上下贯穿. 而 M0 组的普通混凝土破坏时,其表面的裂纹只是一段,并没有上下贯穿试件,且裂纹细而小,在试验过程中能很清楚地观察裂纹扩展的过程. 沿裂纹砸开试验后的试件可以发现,试件内部的破坏形态与劈裂抗拉试验后的破坏形态相似,即裂纹经过的位置都贯穿陶粒,上述现象与文献[12-15]类似. 由此可见,出现上述破坏形态的原因与试件劈裂抗拉破坏一致.

3.4 变形性能

混凝土在受力状态下的变形特征是其各种基本力学性能最直观的综合体现,混凝土试件的应力-应变曲线试验在宏观上展现出来的变形及破坏特点不仅可以为实际工程中的结构设计提供主要参考特征值而且还可以

作为弹性模量取值的参照. 因此,研究分析陶粒混凝土的变形特点和破坏特征以及弹性模量不仅很有必要而且还可以为其在实际工程应用中提供不可或缺的依据[16-18].

3.4.1 结果与现象

图 9 和图 10 分别为不同体积掺量的陶粒对混凝土的应力-应变曲线上升段的影响规律及试件破坏形态.

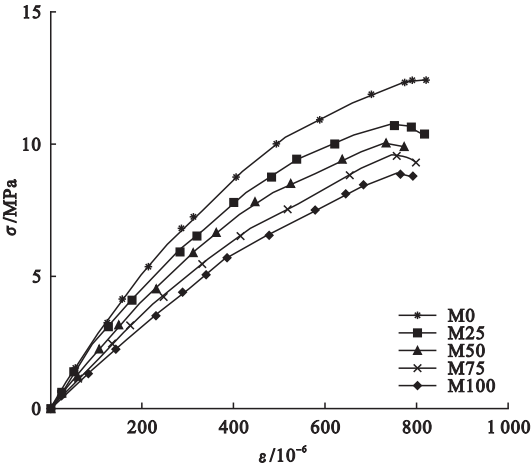


图 9 不同陶粒体积掺量混凝土的应力应变曲线

Fig. 9 The stress-strain curves of concrete with different ceramic volume

从图 9 可以看出:不同陶粒的体积掺量的混凝土应力-应变上的升段与普通混凝土类似存在比例极限点、临界应力点和峰值点,

当陶粒体积掺量的增加时,对应混凝土的应力-应变曲线上升段的斜率和峰值应力逐渐减小,但峰值应变增大,这说明混凝土的弹性模量伴随着陶粒体积掺量的增加而呈现减小的趋势,这与文献[19]的结论相似.一方面

是因为陶粒自身的强度和弹性模量太小,抑制水泥基体的变形能力差,混凝土中容易被破坏的薄弱区域变多;另一方面是因为当陶粒等体积替换石子掺入导致混凝土的骨架结构和性能被弱化.

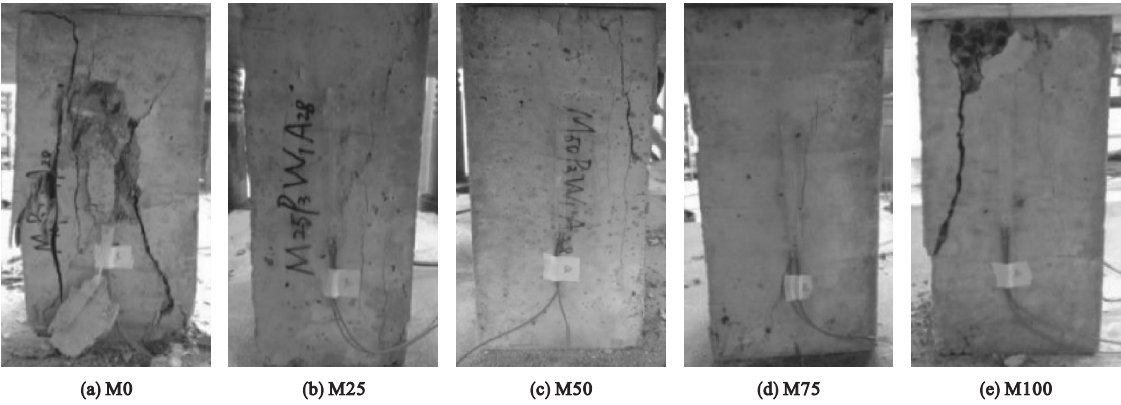


图 10 不同陶粒体积掺量混凝土试件的破坏形态

Fig. 10 Failure form of concrete prepared with different ceramist content

由图 10 并结合试验过程可以发现,当加压荷载接近试件的极限荷载时,试件表面开始出现可见的细小裂纹,且裂纹整体上沿着受力方向发展. M100、M75 和 M50 组混凝土试件在裂纹刚出现的时候,裂纹细小而均匀地分布在试件的上部,且陶粒的体积掺量越大,试件上裂纹的条数越多;而 M25 和 M0 组混凝土试件出现的裂缝少而细. 当加压荷载超过试件的峰值应力时, M100、M75 和 M50 组混凝土试件的沿着其中的一条裂缝迅速发展为纵向贯穿的主裂缝,试件瞬间破坏并能清晰地听到试件的劈裂声音,其中 M100 和 M75 组时间出现部分块体脱落;而 M25 和 M0 组混凝土试件则沿着原有裂纹迅速发展发展到 2 到 3 条的纵向贯穿的主裂缝,其中 M0 组试件破坏时试件脱落若干块体.

3.4.2 本构方程的推导

对试验数据进行无量纲化处理,如图 11 所示,其中 $\varepsilon$ 为陶粒混凝土的应变, $\varepsilon_0$ 为混凝土单轴受压时的峰值应变, $\sigma$ 为陶粒混凝土的应力, $f_c$ 为混凝土单轴受压时的峰值应力,横坐标  $x = \varepsilon/\varepsilon_0$ ,纵坐标  $y = \sigma/f_c$ . 可以明显看出,当陶粒的体积掺量不同时,混凝土应力应变曲线

的上升段有,较大的差异,此时《建筑结构可靠度设计统一标准》(GB500 68—2001)中给出的轻骨料混凝土上升段的本构方程将不适用. 因此需要选定一个合适的本构模型对掺入不同体积的陶粒混凝土应力-应变曲线的上升段进行研究,然后通过实验数据进行拟合、对比并最终确定<sup>[20]</sup>.

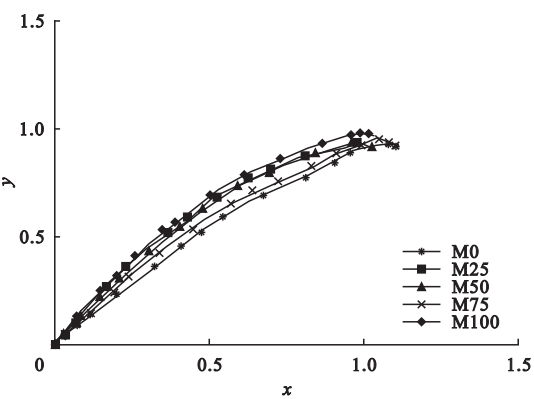


图 11 混凝土应力-应变曲线上升段无量纲化

Fig. 11 The concrete non dimensional stress-strain curves of ascending segment

通过观察图 11 可以发现:每组曲线的取值范围都在  $[0, 1]$  区间内;每组曲线经过原点,且在  $x = 1$  处可以近似认为曲线的峰值为



1;在上升段,每组曲线的斜率越来越小,在  $x=1$  处曲线斜率近似为趋近于 0. 上述三点特征可用图 12 及式(1)、(2)表示.

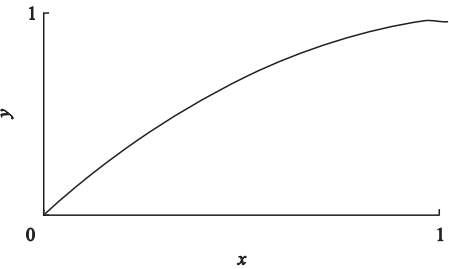


图 12 混凝土应力-应变上升段模型

Fig. 12 Model of concrete stress-strain curves of ascending segment

$$\frac{d^2x}{dx^2} < 0, x \in [0, 1], y \in [0, 1]. \tag{1}$$

$$\left. \frac{dy}{dx} \right|_{x=1} = 0, x \in [0, 1], y \in [0, 1]. \tag{2}$$

为方便在现实中的应用和推广,混凝土本构关系应该尽量简洁化. 根据上述曲线的特征可以假设用式(3)表示混凝土应力—应变曲线上的升段.

$$y = ax + bx^2 + cx^3. \tag{3}$$

其中,  $a, b, c$  为未知系数,且方程(3)满足式(1)、(2),整理得到的本构方程为

$$y = ax + (3 - 2a)x^2 + (a - 2)x^3. \tag{4}$$

根据弹性模量的定义及本构方程模型的特征可知:

$$\left. \frac{dy}{dx} \right|_{x=0} = \frac{d\left(\frac{\sigma}{f_c}\right)}{d\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}\right)} \Bigg|_{x=0} = \frac{\varepsilon_0}{f_c} \cdot \left. \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \right|_{\varepsilon=0} = \frac{E_0}{E_p}. \tag{5}$$

而当  $x=0$  时,由式(5)进一步得到式(6):

$$\left. \frac{dy}{dx} \right|_{x=0} = a. \tag{6}$$

由式(5)和(6)可知本构方程(4)内的待定系数  $a$  便具有了实际的物理意义,而切线弹性模量  $E_0$  及峰值弹性模量  $E_p$  与混凝土粗骨料的本身性质密切相关,进一步说明研究不同陶粒体积掺量对混凝土应力—应变

曲线的必要性. 由此  $a$  可用式(7)表示:

$$a = \frac{E_0}{E_p}. \tag{7}$$

其中,  $E_0 = \left. \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \right|_{\varepsilon=0}$  为混凝土切线弹性模量,即平常所用的弹性模量;  $E_p = \frac{f_c}{\varepsilon_0}$  为混凝土的峰值弹性模量.

3.4.3 本构方程的确定

用最小二乘法对试验数据进行拟合,得到当陶粒体积掺量不同时系数  $a$  的取值. 记  $r$  为陶粒的体积掺量,当  $r$  分别为 0、25%、50%、75%、100% 时,其对应的  $a$  分别为 1.907、1.632、1.495、1.314、1.132. 由此可以看出,伴随着陶粒体积掺量  $r$  的增加,系数  $a$  的值呈现出不断减小的趋势,这也可以说明混凝土的弹性模量伴随着陶粒体积掺量的增加而呈现出不断减小的趋势. 对参数  $r$  和系数  $a$  进行线性回归统计处理,最终得到系数  $a$  与陶粒体积掺量  $r$  的关系,其线性相关系数为 0.985,如式(8)所示.

$$a = 1.867 - 0.0075r. \tag{8}$$

在上述数据拟合的基础上利用式(4)和式(8)可以得到不同陶粒体积掺量的混凝土上升段的曲线图,并与试验时测绘的曲线图进行对比,以确定假设的本构模型是否可行. 笔者随机选取陶粒体积掺量为 25% 和 50% 为例,对其拟合计算处理的曲线图与实验测绘的曲线图进行对比计算后发现二者吻合良好,分别如图 13(a)、(b)所示.

通过以上比较可以知道假设的本构模型是可行的,对不同陶粒体积掺量的混凝土具有较好的适用性. 也就是说当混凝土中掺入不同体积的陶粒取代石子后,其上升段的本构关系可以用方程(9)表示:

$$\frac{\sigma}{f_c} = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} - (3 - 2a)\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}\right)^2 + (a - 2)\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}\right)^3. \tag{9}$$

其中,  $0 \leq \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \leq 1, a = \frac{E_0}{E_p}$ , 且  $\varepsilon_0$  和  $f_c$  均可

由试验测得.

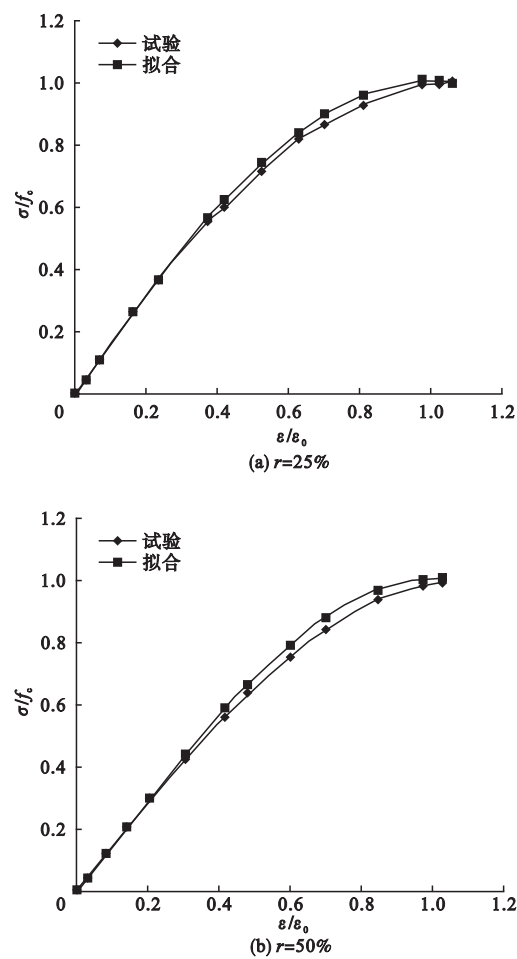


图 13 试验与拟合计算应力-应变曲线上升段的对比

Fig. 13 Comparison between test and calculation of the rising segment of stress-strain curve

4 结 论

(1)混凝土的强度随着陶粒体积掺量的增加呈现逐渐减小的趋势. 100% 体积掺量的陶粒取代普通混凝土中的粗骨料会严重地降低混凝土强度,但混凝土的干表观密度也会大幅下降.

(2)陶粒混凝土受压应力-应变曲线的上升段与普通混凝土的类似,也包括比例极限点、临界应力点和峰值点. 随着陶粒体积掺量的增加,混凝土应力-应变曲线上升段的

斜率和混凝土的峰值应力呈现出逐渐减小的趋势,而峰值应变却增大,说明混凝土的弹性模量随着陶粒体积掺量的增加而呈逐渐减小的趋势.

(3)根据试验数据得到的曲线的特征,由曲线模型及假设条件推导并验证了本构方程的可行性,推导的上升段本构方程(9)与过镇海教授给出的公式一致,说明了不同陶粒体积掺量的混凝土也可以用式(9)作为本构方程.

参考文献

[ 1 ] 王鹏. 陶粒混凝土基本力学性能的试验研究 [ D ]. 长沙:长沙理工大学,2008.  
( WANG Peng. Experimental research on the fundamental mechanical behavior of ceramsite concrete [ D ]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2008. )

[ 2 ] 檀春丽. 非粘土陶粒及混凝土性能研究 [ D ]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2009.  
( TAN Chunli. Research on non-clay ceramsite and its concrete performance [ D ]. Harbin : Harbin Institute of Technology, 2009. )

[ 3 ] 王帅. 陶粒混凝土的试验研究 [ D ]. 天津:天津大学,2012.  
( WANG Shuai. Experiment research on ceramsite concrete [ D ]. Tianjin : Tianjin University, 2012. )

[ 4 ] 孔丽娟. 陶粒混合骨料混凝土结构与性能研究 [ D ]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2008.  
( KONG Lijuan. Research on structure and performance of ceramsite combined aggregate concrete [ D ]. Harbin : Harbin Institute of Technology, 2008. )

[ 5 ] WEI Y L, LIN C Y, KO K W et al. Preparation of low water-sorption lightweight aggregates from harbor sediment added with waste glass [ J ]. Marine pollution bulletin, 2011, 63 ( 5 - 12 ): 135 - 140.

[ 6 ] 公德. 轻集料混凝土的应用现状 [ J ]. 建材世界, 2011, 32 ( 6 ): 29 - 31.  
( GONG De. Research of light aggregate concrete and existing condition of application [ J ]. The world of building materials, 2011, 32 ( 6 ) :

- 29-31.)
- [7] 陈金平,王维国. 掺合料对轻集料混凝土性能的影响研究[J]. 低温建筑技术,2010,32(3):14-15.  
(CHEN Jinping, WANG Weiguo. Study on the influence of admixtures on physical and mechanical properties of the lightweight aggregate concrete [J]. Low temperature architecture technology,2010,32(3):14-15.)
- [8] 程多松. 矿物掺和料对轻集料混凝土性能的影响[J]. 安徽建筑,2009,16(5):141-142.  
(CHENG Duosong. Influence of mineral admixture on the property of light-weight aggregate concrete[J]. Anhui architecture,2009,16(5):141-142.)
- [9] 彭丙杰. 陶粒自养护混凝土性能的研究[D]. 沈阳:沈阳建筑大学,2011.  
(PENG Bingjie. The study on self-curing with ceramsite for performance of concrete [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2011.)
- [10] 魏茂波,夏向峰,张桂祥. 轻骨料混凝土的耐久性研究[J]. 山西建筑,2009,35(27):170-171.  
(WEI Maobo, XIA Xiangfeng, ZHANG Guixiang. Study on durability of lightweight aggregate concrete[J]. Shanxi architecture,2009,35(27):170-171.)
- [11] 王晴,李琳,王宇,等. 高强页岩轻集料混凝土的力学性能[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2009,25(3):517-520.  
(WANG Qing, LI Lin, WANG Yu, et al. Research on mechanical property of high performance shale lightweight aggregate concrete[J]. Journal of Shenyang jianzhu university(natural science),2009,25(3):517-520.)
- [12] 张乔,习康. 骨料对混凝土质量影响的探讨[J]. 山西建筑,2008,34(17):175-176.  
(ZHANG Qiao, XI Kang. Study on the influence of the aggregate on the concrete quality [J]. Shanxi architecture,2008,34(17):175-176.)
- [13] ACHAL V, MUKHERJEE A, REDDY M S. Effect of calcifying bacteria on permeation properties of concrete structures[J]. Journal of industrial microbiology and biotechnology, 2010,38(9):1229-1234.
- [14] 靳瑞杰,闫亚杰. 不同粒径混合陶粒混凝土性能分析[J]. 混凝土,2017(4):87-90.  
(JIN Ruijie, YAN Yajie. Concrete mix different sizes of ceramic analysis [J]. Concrete, 2017(4):87-90.)
- [15] KAN A, DEMIRBOGA R. A novel material for lightweight concrete production [J]. Cement and concrete composites,2009,31(7):489-495.
- [16] 陈伟. 轻集料-基体协同作用对混凝土性能的影响[D]. 重庆:重庆大学,2013.  
(CHEN Wei. Synergic action of lightweight aggregate-matrix on performance of concrete [D]. Chongqing: Chongqing University, 2013.)
- [17] 陈伟,钱觉时,范英儒. 破碎陶粒表面处理与其对混凝土性能的影响[J]. 混凝土与水泥制品,2009(2):17-20.  
(CHEN Wei, QIAN Jueshi, FAN Yingru. Surface treatment and its effects of crushed ceramsite on the properties of concrete[J]. China concrete and cement products,2009(2):17-20.)
- [18] 李俊,石从黎. 预湿处理对破碎陶粒混凝土性能的影响[J]. 重庆建筑,2012(12):50-51.  
(LI Jun, SHI Congli. Impact of pre-wet on performance of crushing ceramsite concrete [J]. Chongqing architecture,2012(12):50-51.)
- [19] 罗杰. 轻集料的改性处理及其混凝土性能研究[D]. 重庆:重庆大学,2011.  
(LUO Jie. Research on ceramsite aggregate's surface modification and property for concrete [D]. Chongqing: Chongqing University, 2011.)
- [20] 于萍. 粉煤灰陶粒混凝土的性能研究[D]. 大连:大连交通大学,2009.  
(YU Ping. Property study on sintered fly-ash concrete [D]. Dalian: Dalian Jiaotong University,2009.)