

持续力载条件下碎石混凝土的力学特性研究

王定波, 刘恺德*, 李永超, 胡涛, 周雨

西京学院, 陕西 西安

收稿日期: 2023年1月23日; 录用日期: 2023年2月13日; 发布日期: 2023年2月24日

摘要

混凝土的应力-应变全曲线在结构强度分析中有着极其重要的作用。本文对碎石混凝土(期龄28 d)、不同围压条件下碎石混凝土试块进行压缩试验, 并对试件的变形性能、应力-应变全曲线、特征参数等进行分析。分析得出: 围压对碎石混凝土的变形有一定的限制作用, 破坏形态由短轴向剪切发展为斜向剪切再转为轴向剪切, 且控制裂缝发展走向与延伸, 提高了碎石混凝土的强度与变形性能; 峰值应力、峰值应变、初始弹性模量也得到不同程度的提高。

关键词

碎石混凝土, 应力-应变全曲线, 强度试验

Study on Mechanical Properties of Crushed Stone Concrete under Continuous Load Conditions

Dingbo Wang, Kaide Liu*, Yongchao Li, Tao Hu, Yu Zhou

Xijing University, Xi'an Shaanxi

Received: Jan. 23rd, 2023; accepted: Feb. 13th, 2023; published: Feb. 24th, 2023

Abstract

The stress-strain curve of concrete plays an extremely important role in structural strength analysis. In this paper, the strength test of crushed stone concrete (age 28 d) and concrete blocks with different confining pressures is carried out, and the deformation properties, stress-strain curves and characteristic parameters of the specimens are analyzed. The analysis shows that the confining pressure has a certain limiting effect on the deformation of crushed stone concrete, and the

*通讯作者。

failure form develops from short axial shear to oblique shear and then to axial shear, and the crack development trend and extension are controlled, which improves the strength and deformation performance of crushed stone concrete. The peak stress, peak strain, and initial modulus of elasticity are also improved to varying degrees.

Keywords

Crushed Stone Concrete, Stress-Strain Full Curve, Strength Test

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

混凝土如今作为民用建筑、大坝工程应用最广的材料之一，时至今日已有 100 多年的历史，当前，以粉煤灰为原材料的预应力混凝土、钢筋混凝土在各个领域中得到了广泛的应用，钢纤维混凝土也有少量的应用[1]。二十世纪八十年代以来，混凝土所涉及的领域越来越广泛，尤其是在民用建筑领域，大规模的修建房屋，它作为主要的原材料，要确保其结构的安全性。由于科学的不断进步和对建筑材料的深入研究，建筑材料在其各个领域的进一步发展，其构件的耐久和建筑物的动力性质直接有关[2]。混凝土的物理力学愈好，就能增加混凝土结构的耐久性，不仅可以增加混凝土结构的安全性，还可以节约经济。煤矿大肆开采，大自然的不可再生资源逐渐减少，而这些不可再生资源又被运用到火力发电、供暖等领域，产生粉灰，以至于污染环境。利用粉煤灰且注重对其利用时对环境污染降到最低，是我国目前必须解决的问题之一。

2. 国内现状与研究目的

国内科学者用粉煤灰为原材料的混凝土，研究其结构强度、耐久性、极限承载力、抗腐蚀等试验，取得了重大研究成果。混凝土的抗压强度和劈裂抗拉强度基本维持同步增长的速率，且两者之间的比值较为稳定，对研究粉煤灰混凝土方面有了更进一步的知识[3]。李意[4]分析在应力 - 应变图时发现孔混凝土在单轴冲击荷载作用下的其破坏强度高于无孔洞混凝土且在的一定的孔洞尺范围内，随着孔洞直径的增大，其破坏强度也增大，但是在高应变率时，带预制孔洞的混凝土其破坏强度低于无孔洞的混凝土，其破坏强度又随孔洞直径的增大而减小与低应变率时恰好相反。在粉煤灰混凝土的创新和利用方面，郭东峰[3]粉煤灰对机制砂混凝土早期强度的影响研究，伴随着粉煤灰掺量不断增加，早期结构强度越来越小，但是粉煤灰掺量对中后期结构强度的影响不明显。王卓然在[5]对碳纤维加强混凝土梁的抗冲击特性研究中，发现掺入了玄武岩纤维和玻璃钢会减弱砼柱的刚性，而碳纤维则对砼柱的刚性影响不大。掺量的不同，会影响混凝土的结构强度。在对混凝土的物理力学性能的研究时，应力 - 应变是分析混凝土结构强度的关键方式之一。环境影响因素的不同，抗拉强度也会相应产生改变，因此本章主要也是运用应力 - 应变全曲线研究其碎石混凝土的劈裂抗拉强度、立方体的耐压性能、轴心抗压强度的极限承载力、不同围压下的混凝土极限强度变化等指标。

3. 试验的原材料

混凝土加水拌和制成塑性浆体，可胶结类砂，碎石等物料，又可在空气中的杂乱物质胶合硬化又可在空气中硬化的粉剂状胶凝物料。普通硅酸盐水泥是由硅酸盐水泥熟料、少数混入物料、适量石膏磨细制备的水硬性胶凝材料。粉煤灰硅酸盐水泥是由硅酸盐水泥熟料、粉煤灰水泥综合利用、适量的石膏磨出粉制

备的水硬性胶凝材料,其硬度等级分为 275、325、425、525、625 五个标号[6]。粗骨料的混凝土中,由沙、碎石起骨架作用,而其中颗粒超过 5 mm 的骨材,一般分为碎石和卵石二类。砾石指天然岩层、卵石经机械粉碎、筛选成的,粒度超过 5 mm 的石头颗粒。卵石则是通过自然风化、河流移动和分选积累而产生的。掺合料的功能有提高水泥稳定性,节省水资源,调整水泥硬度等级,在水泥搅拌中添加自然的或人造的能提高水泥稳定性的粉状矿物质。外加剂的品种很多,砼的制造过程中,砼外加剂掺量很少,对砼的机械性能影响很大,具有投入资金较小、技术经济性强的优点。外加剂在生活的各个方面已经得到了广泛运用。

由此此次强度测试的原料有:1) 水:采用普通自来水;2) 混凝土:42.5 级普通硅酸盐混凝土,密度 3000 kg/m³;3) 细骨料:中砂,级配齐全,表观密度 2650 kg/m³;4) 粗水泥:砾石,5~31.5 mm,表观密度 2700 kg/m³;5) 掺用料:I 级粉煤灰,掺量 20%,密度 2250 kg/m³;6) 外加剂:聚羧酸减水剂,含固量 20% (液态减水剂),掺量 0.8%,减水率 30%。

4. 试验方案

4.1. 试件尺寸

碎石混凝土试件尺寸见表 1。

Table 1. Dimensions of crushed concrete specimens

表 1. 碎石混凝土试件尺寸

试验方式	试验尺寸(mm)	单位(块)
轴心抗压试验	150 × 150 × 300	4
静态三轴抗压	100 × 150	6

4.2. 试验设备仪器

采用单轴拉、压试验机,可设置加载方式“位移”“负荷”“变形”三种控制方式,依照以往的试验经验[7],设置加载方式“位移”的控制方式可获取较为完整的、可靠度高的 C30 混凝土应力、应变试验数据。依据《混凝土物理力学试验方法标准》抗压强度试验 $\sigma = F/A$ 换算出应力 - 应变全曲线。碎石混凝土设计配合比见表 2。

Table 2. Design mix ratio of crushed stone concrete

表 2. 碎石混凝土设计配合比

编号	水胶比	砂率(%)	水泥 kg	水 kg	细砂 kg	碎石 kg	外加剂 kg	粉煤灰 kg
1	0.42	0.4	12.06	6.34	29.33	43.11	0.12	3.02

5. 碎石混凝土试验结果与分析

材料本身的应力 - 应变关系就是力学领域中最简单的本构关系[8]。混凝土强度试验是研究混凝土物理力学性能指标之一,是探索混凝土在受压下观察其表面状态变化,是混凝土结构强度分析的重要指标。碎石混凝土的试验结果及应力 - 应变全曲线见图 1。

混凝土轴心抗压强度分析:

1) 混凝土轴心抗压强度值(30~40 MPa)较低于立方体抗压强度值(35~45 MPa),应变值都处于 0.01~0.02 之间,试件形状的改变对混凝土的应变不会产生影响,但应力值的稍微降低与试件的形状、试件受压的方式有关。轴心抗压应力 - 应变上升段的曲线比立方体抗压应力 - 应变上升段的曲线更陡,耗时更短。

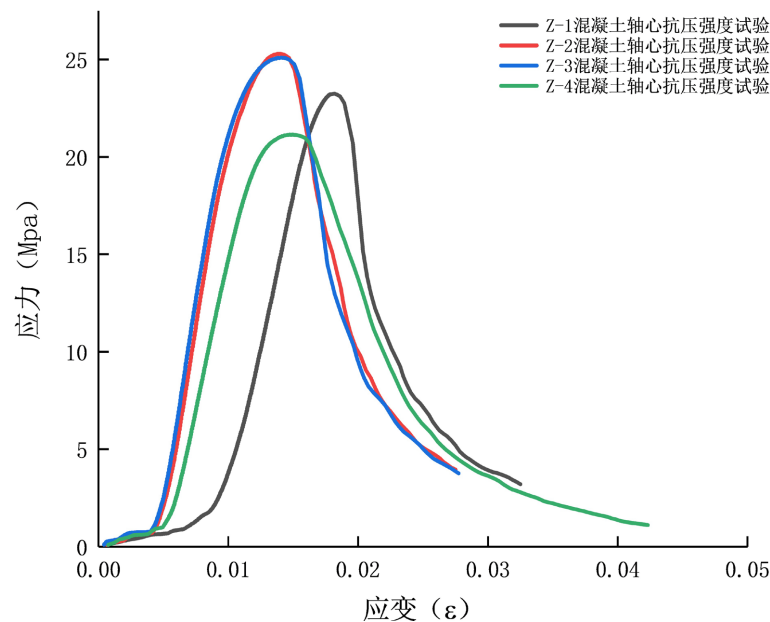


Figure 1. Full curve of crushed stone concrete axial compressive strength test
图 1. 碎石混凝土轴心抗压强度试验全曲线图

2) 四组全曲线在最大应变值时曲线趋势相似的, 在达到最大应力值之前, 弹性阶段表现得更为明显, 屈服阶段与强化阶段几乎没有, 并且试件断裂是一瞬间的, 断裂后的阶段下降得很快速, 轴心抗压比立方体抗压更能体现出混凝土的脆性。

3) 从试件受压开始到试件断裂之间, 应力 - 应变呈正相关, 存在两段不同曲线, 前一段的上升速率低于后一段的, 前一段在试件开始受压时, 主要体现在混凝土的压缩上, 内部有细微的间隙, 骨架与骨架之间通过掺合物的链接并不能达到真正意义上的连续, 减水剂的掺入提高了混凝土的抗压强度。

4) I 级粉煤灰掺合料以 20% 的加入, 混凝土在受到集中力时, 并不会影响其一瞬间的破坏。

6. 三轴压缩试验

本次试验采用三轴压缩试验[7], 使用仪器为 GCTS 三轴试验仪器设备, 见图 2, 该仪器可完成单轴静态、动态试验, 轴向加载可达到 2000 KN, 亦可完成三轴静态、动态试验, 轴向加载 2000 KN, 三轴围压试验围压最大加载 140 MPa, 环境温度最大加载到 150℃, 以及巴西劈裂试验、断裂韧性试验、水压致裂试验均可完成。

GCTS 试验仪器设备能够清楚得出, 试样围压保持不变的情况下, 轴压以 0.01 MPa/s 施压时的径向应变, 轴向应变以及应力等实时值, 直至试样被破坏。

该次试验共进行 6 次, 试块按照围压大小依次进行试验, 围压分别为 4 MPa、8 MPa、12 MPa、16 MPa、20 MPa、24 MPa。试样试验全曲线, 见图 3。

结果分析:

图 3 是不同围压强度的碎石混凝土的应力 - 位移变化全过程曲线图, 由图示得知, 由于围压强度的提高, 碎石混凝土的抗拉强度和塑性变形性能都有了较大增强: 当 $\sigma_3 = 4$ MPa 时, 由于垂直反应处在低围压受压位置, 应力 - 位移变化整个过程曲线出现了强烈的最大峰值点变化, 而超过最大峰值点的曲线方向变化也比较陡峭, 且垂直变形在破坏中的轴流式变化较小, 为球花断裂; 而当 $\sigma_3 = 8$ MPa 和 $\sigma_3 = 12$ MPa 时, 由于垂直反应受到低围压强化的约束影响, 曲线方向峰部随着低围压强度增加而逐步向右上方

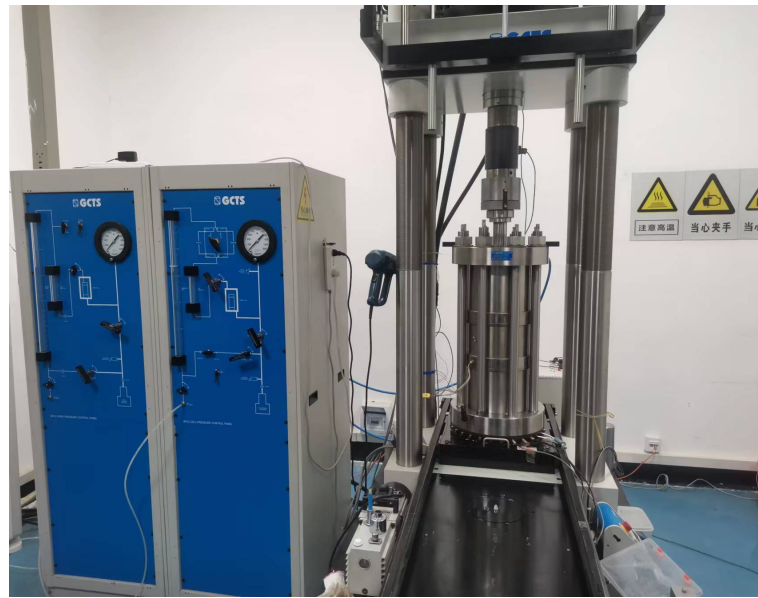


Figure 2. GCTS test instrument
图 2. GCTS 试验仪器

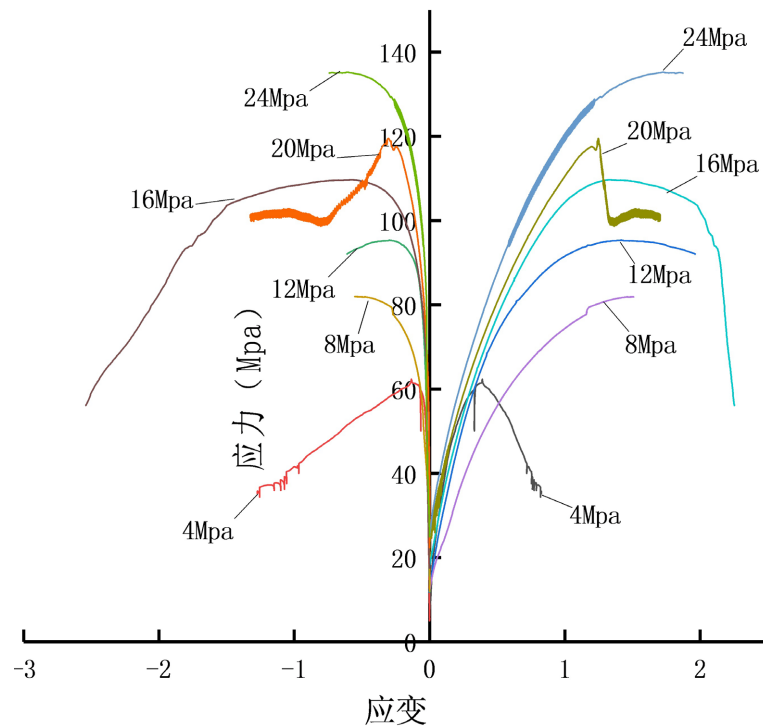


Figure 3. Full stress-strain curve of crushed stone concrete [7] [8] [9]
图 3. 碎石混凝土应力 - 应变全曲线图[7] [8] [9]

下移，且逐渐趋向平稳，试件的塑性变形性能也有所提升；当 $\sigma_3 = 16 \text{ MPa}$ 时，应力 - 应变的全过程中曲线峰值点出现了模糊，说明曲线在到达最高点后，垂直变形在低围压温度的控制下，破坏过程减缓了，但在 $\sigma_3 = 16 \text{ MPa}$ 时产生了明确的峰值点，在强度降低阶段后仍继续提高；而当 $\sigma_3 = 24 \text{ MPa}$ 时则已趋向正常水平，而且无明确的降低过程，说明垂直变形在高围压状态下仍能防止对其黏结面的进一步侵蚀，

使混凝土的强度和变形水平都有所提升。表 3 为各特征参数。

Table 3. Feature parameters
表 3. 特征参数

围压/MPa	峰值应力/MPa	峰值应变/ 10^{-3}	弹性模量/GPa
4	62.399	8.25	3.5
8	83.741	10.90	3.74
12	95.191	19.62	5.31
16	109.708	22.56	6.43
20	119.485	17.04	7.65
24	135.205	18.74	8.78

7. 特征参数分析

表 2 为不同围压下碎石混凝土的特征参数[7] [9], 并由峰值应力 σ 、峰值应变 ε 、初始弹性模量 E_0 分析碎石混凝土力学性能, 文中 σ 、 ε 、 E_0 各参数为试件的实测值。峰值应力取自应力 - 位移变化曲线的最高点, 峰值应力为峰值应力相对位移变化值, 最初始弹性模量取位置 - 位移变化曲线向上段的斜率。

7.1. 围压对峰值应力的影响

围压强度与峰值应力之间的关系, 见图 4(a): 由于围压强度的增大, 碎石混凝土的峰值应力提高, 归根结底在于围压强化影响了横向应变, 同时碎石混凝土中的一些应力聚集问题也得以解决, 从而导致产生裂纹的速率降低, 垂直应变的耐热性能也得以改善; 而峰值应力和围压强化之间是近似的线性关系, 峰值应力随着围压强化的增加而提高。其成因为: 由于围压强度的增加, 其对骨材黏结面和薄弱部分的削弱效应越来越明显, 从而使得碎石混凝土的应力逐渐增加。当外围压力进一步增大后, 在极端情况下碎石混凝土的应变性能将大大提高, 在其自身应变的区域也将以断裂生长的方式逐渐展开, 因此围压增强后对断裂生长的限制效果将不断提高, 不会受到材料的破坏形式而发生变化。

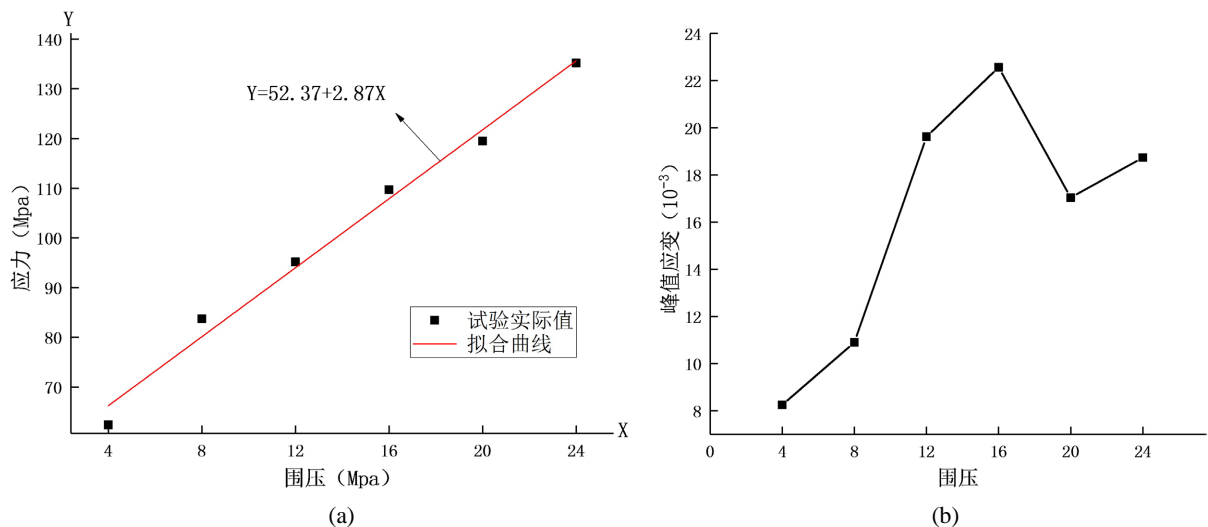


Figure 4. Relationship between characteristic parameters and lateral binding force: (a) The relationship between confining pressure and peak stress; (b) The relationship between confining pressure and peak strain

图 4. 特征参数与围压的关系: (a) 围压与峰值应力的关系; (b) 围压与峰值应变的关系

7.2. 围压对峰值应变的影响

图 4(b)为碎石混凝土在不同围压下,其峰值应变随围压的变化而变化。由图中可以分析出:由于围压的增加,碎石混凝土的峰值应力整体呈上升的态势。归咎此因:当围压强度相对较小时,与碎岩和水泥砂浆黏结界面的初始微裂缝发展得很快,当应变较小时裂缝向试块中部发展,从而引起了混凝土的破裂能力。而当围压强度相对较高时,对试块内部的约束力就会抑制初微裂纹的形成与发展,使骨材内部的动力学特点起到了更好的效果,进而影响碎岩的变形能力。另外,碎石外观呈不规则形态,导致相邻间碎石粘结面的裂缝连接更容易。围压较小时,会因为黏结界面的提前破坏致使混凝土薄弱区裂缝发展较快,围压增大后,其对黏结界面的作用会增大,黏结界面同混凝土受力区域不会产生过大差异,从而在提高试件抗压强度。

8. 结论

- 1、碎石混凝土在抗压与抗拉过程中,都是表现为脆性材料,适用于承重部位,粗骨料与粗骨料、粗骨料与细骨料之间是存在间隙的,并非连续。
- 2、由于单轴试验没有周围的约束力,应力-应变曲线在极限荷载处,表现出明显的应力峰值。
- 3、处于三轴状态下的碎石混凝土,由于围压的限制作用,阻止了内部裂缝的延伸与扩展,使得其峰值应力增大,塑性性能得到增强。
- 4、碎石混凝土的峰值应力、峰值应变、初始弹性模量随围压增大而增大,其中初始弹性模量在围压为 20 MPa 时达到最大,并在 16 MPa 后保持在 8 GPa 左右。

参考文献

- [1] 丁大均. 钢筋混凝土构件抗裂度裂缝和刚度[M]. 南京: 南京工学院出版社, 1987.
- [2] 陈伟. 基于单轴抗拉试验下粉煤灰混凝土的力学性能对比研究[D]: [硕士学位论文]. 银川: 宁夏大学, 2016.
- [3] 郭东峰. 粉煤灰掺量对机制砂混凝土耐久性能影响研究[J]. 粉煤灰综合利用, 2021, 35(4): 111-115.
- [4] 李意. 混凝土在单轴冲击荷载作用下的破坏准则研究[D]: [硕士学位论文]. 绵阳: 西南科技大学, 2012.
- [5] 王卓然. 碳纤维增强混凝土梁的抗冲击性能研究[D]: [硕士学位论文]. 太原: 太原理工大学, 2021.
- [6] 朋改非. 土木工程材料[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2006: 60
- [7] 李毅, 程桦, 张亮亮. 不同围压下 C60 混凝土三轴压缩过程能量分析[J]. 应用力学学报, 2020, 37(5): 2086-2093+2326.
- [8] 陈惠发. 土木工程材料的本构方程(上、下册) [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2001.
- [9] 王四巍, 孙逢涛, 吴华. 三轴应力下再生粗骨料塑性混凝土的力学性能和破坏准则[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(2): 454-459.