

文章编号:1007-9629(2022)01-0031-06

三轴应力下卵石混凝土力学性能与本构关系

陈宇良^{1,2}, 吉云鹏¹, 陈宗平^{1,3,*}, 刘杰¹, 晏方¹

(1. 广西科技大学 土木建筑工程学院, 广西 柳州 545006; 2. 华南理工大学 土木与交通学院, 广东 广州 510641; 3. 广西大学 工程防灾与结构安全教育部重点实验室, 广西 南宁 530004)

摘要:为研究卵石混凝土的三轴受压力学性能,进行了 27 个卵石混凝土试件的常规三轴试验,观察了试件的破坏形态,获取了其应力-应变全过程曲线及特征点参数,深入分析了围压对卵石混凝土力学性能的影响.结果表明:随着围压的增大,卵石混凝土试件破坏形态先由轴向劈裂破坏转变为斜向剪切破坏,再转变为横向剪切破坏;围压越大,峰值应力、峰值应变、初始模量越大,峰值应力后其应力-应变全过程曲线越平缓;提出的卵石混凝土三轴受压时相关力学指标计算公式及参数化本构方程的计算结果与试验结果拟合良好.

关键词:卵石混凝土;三轴受压;力学性能;本构关系

中图分类号:TU528.01

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2022.01.005

Mechanical Properties and Constitutive Relation of Pebble Concrete under Tri-axial Stress

CHEN Yuliang^{1,2}, JI Yunpeng¹, CHEN Zongping^{1,3,*}, LIU Jie¹, YAN Fang¹

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University of Science and Technology, Liuzhou 545006, China; 2. School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China; 3. Key Laboratory of Disaster Prevention and Structure Safety of the Ministry of Education, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: In order to study the mechanical properties of pebble concrete under tri-axial compression, the conventional tri-axial test of 27 pebble concrete specimens were carried out. The failure patterns of specimens were observed, the whole stress-strain curves and their characteristic point parameters were obtained. The influence of confining pressure on the mechanical properties of pebble concrete was deeply analyzed. The results show that with the increase of confining pressure, the failure pattern of pebble concrete specimens changes from axial splitting failure to oblique shear failure, and then to transverse shear failure. The greater the confining pressure, the greater the peak stress, peak strain and initial elastic modulus, and the smoother and plumper the whole stress-strain curve after the peak stress. The calculation formula of mechanical indexes and parametric constitutive equation of pebble concrete under tri-axial compression are proposed, and the calculated results fit well with the test results.

Key words: pebble concrete; tri-axial compression; mechanical property; constitutive relation

卵石作为水工混凝土常用的组成材料之一,在水利工程与公路建设中应用广泛^[1-2].然而,天然卵石与水泥基体之间的界面黏结力较弱,导致混凝土

收稿日期:2020-09-15; 修订日期:2020-10-30

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51908141);中国博士后科学基金资助项目(2021M693854);广西科技基地和人才专项项目(AD19110068);广西重点实验室开放课题资助项目(2019ZDK038);广西科技大学博士基金资助项目(校科博 18Z09)

第一作者:陈宇良(1987—),男,广西贵港人,广西科技大学副教授,硕士生导师,博士.E-mail: ylchen@gxust.edu.cn

通讯作者:陈宗平(1975—),男,广西玉林人,广西大学教授,博士生导师,博士.E-mail: zpchen@gxu.edu.cn

力学性能下降.

邓勇军等^[3]通过研究卵石与水泥基体的黏结强度发现,其仅为混凝土抗拉强度的1/3;秦明强等^[4]采用天然卵石作为集料配制出了各项性能均满足要求的C50梁混凝土;苏益声等^[5]通过高温后破碎卵石混凝土的三轴试验发现,卵石混凝土的峰值应力与弹性模量随温度升高而下降;李树山等^[6-8]研究了骨料粒径对卵石混凝土抗压强度的影响,发现骨料的粒径随着卵石混凝土强度的降低而逐渐增大;陈宗平等^[9-10]通过对再生卵石骨料混凝土的力学性能进行研究,提出了再生卵石骨料混凝土各强度指标之间的换算关系式及本构方程.目前有关卵石混凝土三轴受压力学性能的研究报道尚不多见,现有文献也未能揭示该类混凝土多轴应力状态下的力

学性能.

本文拟开展卵石混凝土常规三轴试验,研究卵石混凝土在三轴受压状态下的破坏形态与力学性能,提出卵石混凝土围压与峰值应力、峰值应变、初始模量的函数关系式,建立卵石混凝土的三轴受压参数化本构方程,以期为卵石混凝土的相关研究与应用提供依据.

1 试验

1.1 原材料

粗骨料为天然河卵石(P),粒径为5~25 mm,连续级配,其基本物理性能见表1;水泥(C)为鱼峰牌42.5R普通硅酸盐水泥;细骨料为普通河沙(S),细度模数为2.38;拌和水(W)为城市自来水.

表1 粗骨料基本物理性能

Table 1 Basic physical properties of coarse aggregate

Water absorption (by mass)/%	Moisture content (by mass)/%	Bulk density / ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	Apparent density / ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	Crush index/%	Roundness
0.259	0.065	1 615	2 619	11.03	1.08-1.44

1.2 试件设计

设计并制作了27个直径 $D=100\text{ mm}$ 、高度 $H=200\text{ mm}$ 的卵石混凝土圆柱体试件用于常规三轴试验,试件分为9组,每组3个,同时制备了3个 $150\text{ mm}\times 150\text{ mm}\times 150\text{ mm}$ 标准立方体试件用于立方体抗压强度测试.所有试件浇筑、脱模,置于室内养护28 d后进行加载.卵石混凝土的目标强度等级为C30,实测立方体抗压强度为26.3 MPa,水灰比(m_w/m_c)为0.55,配合比为 $m_c:m_p:m_s:m_w=353.9:1\ 184.7:666.4:195.0$.

1.3 加载制度

设计围压 $\sigma_w=0, 3, 6, 9, 12, 18, 24, 30, 42\text{ MPa}$.采用配备有围压泵、荷载-位移传感器、三轴压力室等装置的RMT-301试验机对试件进行加载.试件正式加载前,先对其进行预加载(荷载控制),使围压与轴向荷载 σ_1 同步等速率加载至静水压力状态^[11]($\sigma_1=\sigma_w$,见图1),即达到设计围压 σ_w 前,轴向荷载与围压相等;随后加载方式由荷载控制转为位移控制,保持围压不变,继续以 0.02 mm/s 的加载速率对试件施加轴向荷载,至轴向荷载下降至峰值荷载的85%或由于试件变形过大而不利于继续加载,停止试验.

2 结果与分析

2.1 破坏形态

图2为不同围压下卵石混凝土的典型破坏形态.

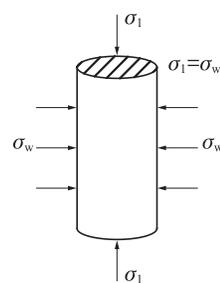


图1 试件的静水压力状态

Fig. 1 Hydrostatic pressure state of specimen

由图2可见,围压对试件破坏形态的影响较大:当 $\sigma_w=0\text{ MPa}$ 时,由于无侧向约束,试件内部裂缝在卵石骨料黏结界面率先产生,并沿试件轴向发展,导致其破坏形态为典型的轴向劈裂破坏,试件破坏时表面存在1条或多条平行于加载方向的主裂缝,各主裂缝发展时均绕开卵石骨料;当 $3\text{ MPa}\leq\sigma_w\leq 12\text{ MPa}$ 时,由于围压的约束作用限制了卵石混凝土的横向变形,试件内部裂缝由轴向发展转为斜向发展,导致试件发生斜向剪切破坏,破坏面的水平夹角基本在 $55^\circ\sim 70^\circ$,且随围压增大略减小;当 $18\text{ MPa}\leq\sigma_w\leq 24\text{ MPa}$ 时,较高的围压限制了斜向裂缝的发展与贯通,裂缝由斜向发展过渡为近似水平发展,破坏形态转变为横向剪切破坏,破坏面多集中于试件中部,此阶段破坏面卵石骨料上附着有少量被挤碎的灰白色水泥基粉末,但破坏截面仍未有卵石骨料被剪断的迹象;当 $\sigma_w\geq 30\text{ MPa}$ 时,在三轴应力的作用下,试件表现出

较大的挤压流动性,此时围压对裂缝的抑制效果减弱,试件破坏时裂缝的发展更加分散,最终部分试件

在破坏时表现为一端粉碎性破坏且开始出现骨料断裂现象.

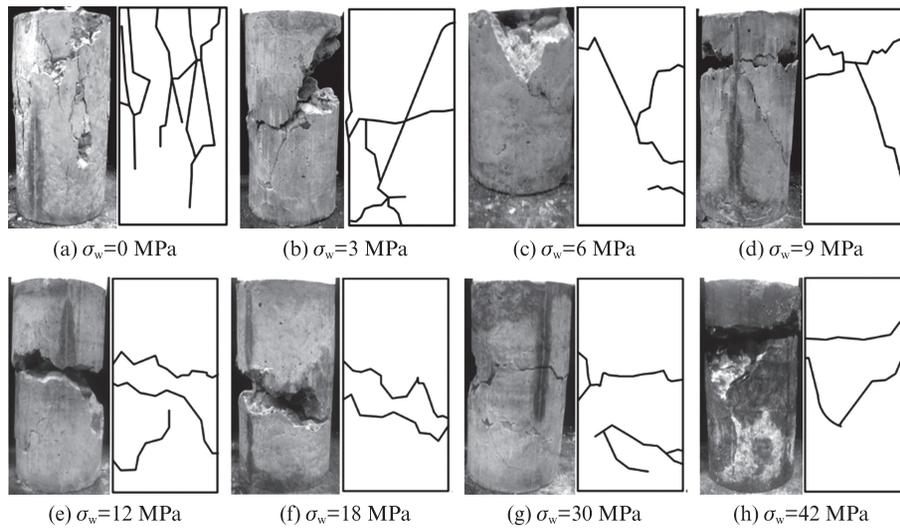


图2 不同围压下卵石混凝土的典型破坏形态

Fig. 2 Failure modes of pebble concrete under different confining pressures

通过对比观察试件的破坏面发现:无围压或围压较小时,试件破坏面卵石骨料表面附着有少量水泥基体,且卵石骨料没有剪断现象; σ_w 增至18 MPa后,卵石骨料表面开始出现轻微划痕,且附着的水泥基体及其粉末开始增多,表明围压可以有效抑制骨料脱黏,提高骨料黏结界面强度; $\sigma_w \geq 30$ MPa时,部分卵石骨料被剪断,由于试件发生挤压流动现象,试件加载结束后的裂缝发展更加均匀细密,试件的破坏程度更加严重.

2.2 应力-应变全过程曲线

图3为不同围压下卵石混凝土的应力-应变($\sigma-\epsilon$)

全过程曲线($\sigma_w=0, 42$ MPa时,各有1个试件的数据离散性较大,予以剔除).由图3可见,随着围压的增大,卵石混凝土的强度与塑性变形能力均有很大提高:当 $\sigma_w=0$ MPa时,试件处于单轴受压状态,应力-应变全过程曲线存在明显的峰值点,且峰值后曲线的下降段较为陡峭,试件破坏时的轴向变形较小,脆性显著;当 $\sigma_w > 0$ MPa时,由于围压的约束作用,曲线峰部随围压增大逐渐抬高,并趋于平缓与丰满,试件的变形能力不断提高;当 $\sigma_w = 18$ MPa时,应力-应变全过程曲线峰值点开始模糊,表明曲线在达到峰值后,试件在侧向应力的约束下,破坏速率缓慢;当 $\sigma_w \geq$

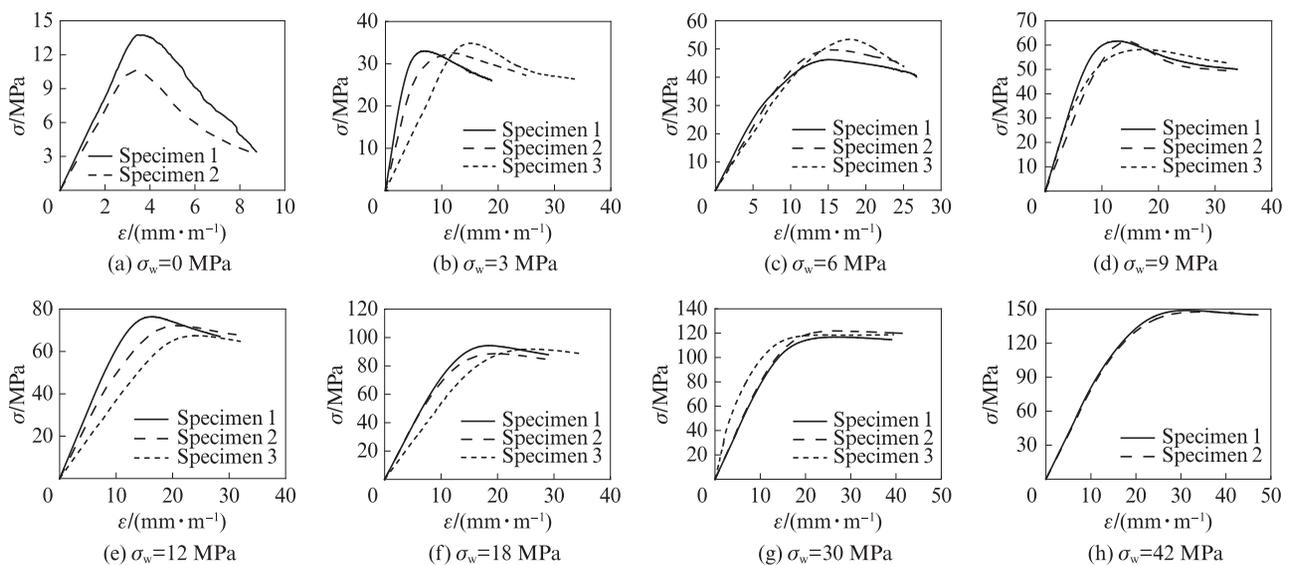


图3 不同围压下卵石混凝土的应力-应变全过程曲线

Fig. 3 Complete stress-strain curves of pebble concrete under different confining pressures

24 MPa时,应力-应变全曲线的峰值点基本消失,曲线在达到峰值后趋于水平,而文献[5]中破碎卵石混凝土的应力-应变全过程曲线下降段在 $\sigma_w = 15$ MPa时便已趋于水平,这表明天然卵石混凝土需要更大的侧向约束才能阻止其黏结界面的破坏,保证混凝土的强度与变形能力.

2.3 影响因素分析

从图3可以得到三轴应力下卵石混凝土的特征点参数峰值应力 σ_v 、峰值应变 ε_v 、初始模量 E ,并由此分析不同围压对卵石混凝土特征点参数的影响.下文中 σ_0 、 ε_0 、 E_0 分别为围压 $\sigma_w = 0$ MPa时的峰值应力、峰值应变、初始模量.

2.3.1 围压对峰值应力的影响

围压与峰值应力的关系见图4(a).由图4(a)可

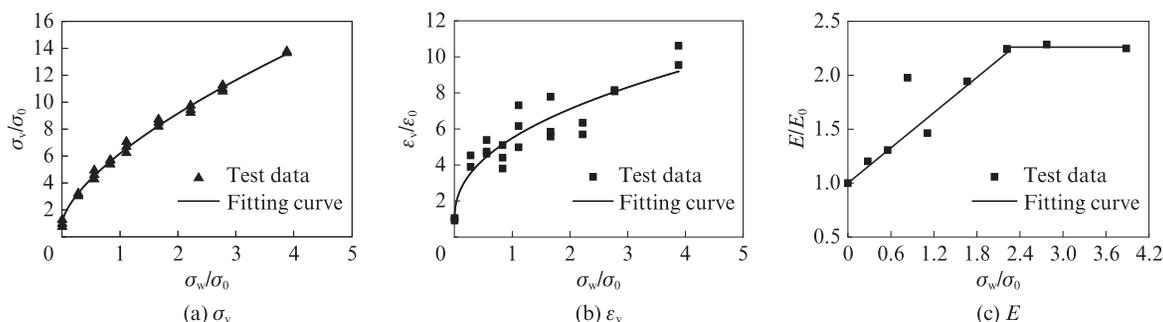


图4 围压与特征点参数的关系

Fig. 4 Relationship between confining pressure and characteristic point parameters

根据试验数据,拟合得到卵石混凝土围压 σ_w 与峰值应力 σ_v 的关系:

$$\frac{\sigma_v}{\sigma_0} = 5.19 \left(\frac{\sigma_w}{\sigma_0} \right)^{0.65} + 1, R^2 = 0.99 \quad (1)$$

2.3.2 围压对峰值应变的影响

围压与峰值应变的关系见图4(b).由图4(b)可见:围压与峰值应变之间为非线性增长关系;随着围压的增大,前期($\sigma_w \leq 9$ MPa)峰值应变增长迅速,随后增速放缓,但仍保持稳定的上升趋势.这是因为天然卵石骨料表面光滑且圆度接近于1,导致其比表面积偏小,对水泥基体的握裹力不足,使其黏结界面的裂缝发展具有先导性.另外,卵石粒径偏大也导致相邻黏结界面间的裂缝更易连通,当试件单轴受压或侧向约束力较小时,会由于黏结界面的提前破坏而影响混凝土其余组分变形性能的发挥.围压增大后,围压对黏结界面的补强作用会逐渐缩小黏结界面同混凝土其余组分间的强度差异,从而在提高试件抗压强度的同时,改善卵石混凝土的变形能力.

见:随着围压的增大,卵石混凝土的峰值应力显著增大,这是因为试件在加载时,围压约束了其横向变形,此时试件内部薄弱区的应力集中现象得到缓解,导致裂缝发展速率放缓,试件的承压性能提高;峰值应力与围压之间不满足线性关系,峰值应力的增幅随着围压的增大而逐渐减小.峰值应力增幅减小的原因:一方面,当围压较小时,围压对骨料黏结界面等薄弱区的增强效果明显,导致混凝土峰值应力增长较快,但当围压较大时,极限状态下混凝土的变形能力也大幅提高,超出材料自身变形的部分将以裂缝发展的形式弥补,此时,围压对裂缝的限制作用开始减弱,导致混凝土峰值应力增幅减小;另一方面,当围压较大时,试件在正式加载前的静水压力状态下便已承受较大荷载,微裂缝的提前发展也对峰值应力产生影响.

根据试验数据,拟合得到卵石混凝土围压 σ_w 与峰值应变 ε_v 的关系:

$$\frac{\varepsilon_v}{\varepsilon_0} = 4.49 \left(\frac{\sigma_w}{\sigma_0} \right)^{0.44} + 1, R^2 = 0.87 \quad (2)$$

2.3.3 围压对初始模量的影响

围压与初始模量的关系见图4(c).由图4(c)可见:随着围压的增大,卵石混凝土的初始模量 E 整体呈增大趋势; $\sigma_w = 24$ MPa时,初始模量较 $\sigma_w = 0$ MPa时增大了124.3%;围压继续增大,试件的初始模量趋于稳定,保持在8 GPa左右.

根据试验数据,拟合得到 $\sigma_w \leq 24$ MPa时卵石混凝土围压 σ_w 与初始模量 E 的关系:

$$\frac{E}{E_0} = 0.54 \frac{\sigma_w}{\sigma_0} + 1, R^2 = 0.98 \quad (3)$$

2.4 本构关系

2.4.1 参数化本构方程

图5为不同围压下卵石混凝土的本构关系曲线(σ/σ_0 - $\varepsilon/\varepsilon_0$).由图5可见:卵石混凝土的本构关系曲线主要由上升段与下降段组成;随着围压的增大,本构

关系曲线上升段斜率存在一定的波动,但整体呈增大趋势,下降段在缩短的同时逐渐趋于平缓.这说明增大围压可以提高卵石混凝土的刚度,延缓峰值应力点的出现.

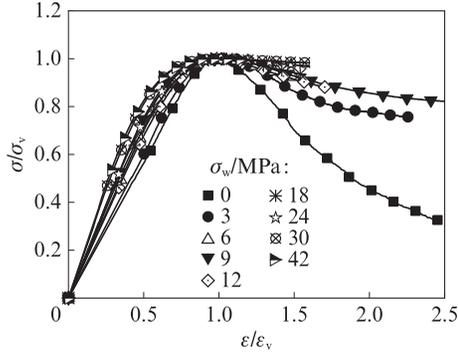


图5 不同围压下卵石混凝土的本构关系曲线
Fig. 5 Constitutive relation curves of pebble concrete under different confining pressures

参照文献[12],提出了分段式应力-应变本构方程:

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

式中: y 为 σ/σ_v ; x 为 $\varepsilon/\varepsilon_v$; a 、 b 均为拟合参数.

图6为拟合参数 a 、 b 的散点图.由图6可见,单轴受压与三轴受压状态下 a 、 b 相差较大,具体表现为:单轴受压时, a 为0.36, b 为2.21;三轴受压时, a 的均值为1.95, b 的均值为0.33.此外,三轴受压时,虽然随

着围压的增大, a 略有增大, b 略有减小,但二者整体的增减幅度较小.

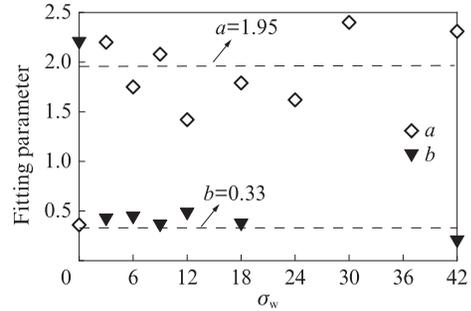


图6 拟合参数 a 、 b 的散点图
Fig. 6 Scatter plot of fitting parameters a and b

将三轴受压状态下($3 \text{ MPa} \leq \sigma_w \leq 42 \text{ MPa}$)试件的应力-应变本构曲线进行统一拟合,得到 $a=1.99$ 、 $b=0.39$,并将其代入式(4)得到卵石混凝土三轴受压时的参数化本构方程:

$$\begin{cases} y = 1.99x - 0.98x^2 - 0.01x^3, 0 \leq x \leq 1, R^2 = 0.94 \\ y = \frac{x}{0.39(x - 1)^2 + x}, x > 1, R^2 = 0.76 \end{cases} \quad (5)$$

2.4.2 本构方程验证

图7给出了不同围压下卵石混凝土本构关系拟合曲线与试验曲线的对比,其中当 $\sigma_w=0 \text{ MPa}$ 时, $a=0.36$ 、 $b=2.21$;当 $3 \text{ MPa} \leq \sigma_w \leq 42 \text{ MPa}$ 时, $a=1.99$ 、 $b=0.39$.由图7可见,拟合曲线与试验应力-应变本构曲线的整体吻合程度较高.

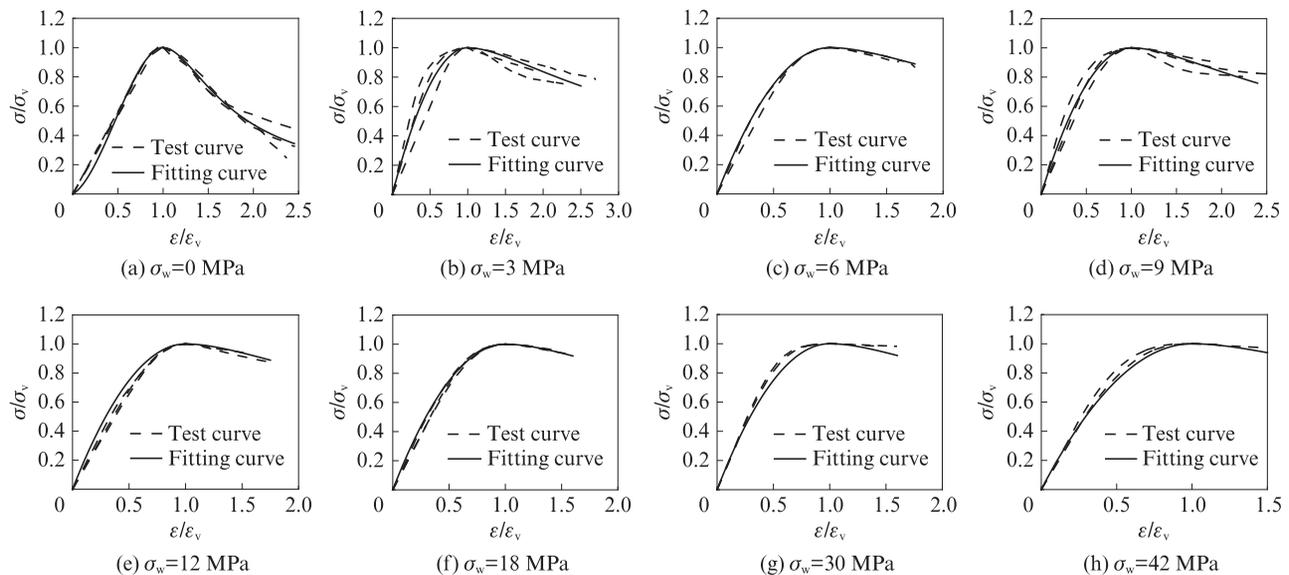


图7 不同围压下卵石混凝土本构关系拟合曲线与试验曲线的对比
Fig. 7 Comparison of constitutive relation between fitting curves and test curves of pebble concrete under different confining pressures

3 结论

(1)随着围压的增大,卵石混凝土试件破坏形态先由轴向劈裂破坏转变为斜向剪切破坏,再转变为横向剪切破坏.当围压 $\sigma_w \geq 30$ MPa,部分试件破坏时呈一端粉碎性破坏.

(2)单向应力状态下,卵石混凝土的应力-应变全过程曲线存在明显的峰值点与下降段,随着围压的增大,应力-应变全过程曲线开始逐渐抬高并趋于饱满,围压达到24 MPa后,峰值点基本消失,曲线峰部近似水平.

(3)围压增大时,卵石混凝土的峰值应力、峰值应变、初始模量均显著增加;峰值应力与峰值应变均为非线性增长,增速随围压增大而逐渐放缓,初始模量在围压达到24 MPa后保持在8 GPa左右.

(4)提出的三轴应力状态下卵石混凝土相关力学指标的计算公式及其参数化本构方程的计算结果与测验结果拟合良好.

参考文献:

- [1] 刘其亮,王振江,王兆辉.“绿色材料”破碎卵石在高等级沥青混凝土路面中的应用[J].施工技术,2016,45(增刊1):379-381.
LIU Qiliang, WANG Zhenjiang, WANG Zhaohui. Application of green material fragmented pebbles on high level asphalt concrete pavement [J]. Construction Technology, 2016, 45 (Suppl 1) :379-381.(in Chinese)
- [2] GAO Y L, MA B G, ZHOU S Q. Production and engineering application of C60 high-performance pump pebble concrete containing ultra-fine fly ash [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2008, 35(8):757-763.
- [3] 邓勇军,姚勇,陈代果,等.卵石骨料-砂浆界面黏结强度试验方法研究[J].西南科技大学学报,2016,31(2):39-43.
DENG Yongjun, YAO Yong, CHEN Daiguo, et al. Experimental method study of the interface bonding strength between peddle and slurry of concrete[J]. Journal of Southwest University of Science and Technology, 2016, 31(2):39-43. (in Chinese)
- [4] 秦明强,陈梦义,叶志坤,等.天然卵石集料配制C50梁混凝土研究[J].建材世界,2015, 36(6):25-28.
QIN Mingqiang, CHEN Mengyi, YE Zhikun, et al. Study on preparing C50 beam concrete with natural pebble[J]. The World of Building Materials, 2015, 36(6):25-28. (in Chinese)
- [5] 苏益声,孟二从,陈宗平,等.火灾(高温)后破碎卵石混凝土三轴受力性能研究[J].建筑材料学报,2015,18(4):647-651, 657.
SU Yisheng, MENG Ercong, CHEN Zongping, et al. Triaxial mechanical performance of broken pebble concrete after fire (high temperature) [J]. Journal of Building Materials, 2015, 18(4): 647-651, 657. (in Chinese)
- [6] 李树山,高丹盈.粗骨料粒径对卵石混凝土抗压强度影响的试验研究[J].混凝土,2013(2):59-61, 64.
LI Shushan, GAO Danying. Experimental research on the influence of coarse aggregate size on boulder concrete compressive strength[J]. Concrete, 2013(2):59-61, 64. (in Chinese)
- [7] 王立久,刘莎,张立卿,等.集料性质对卵石混凝土性能影响的试验研究[J].混凝土,2014(4):1-4.
WANG Lijiu, LIU Sha, ZHANG Liqing, et al. Study of the influence of coarse aggregate properties on the performance of pebble concrete[J]. Concrete, 2014(4):1-4. (in Chinese)
- [8] XIE W, JIN Y N, LI S S. Experimental research on the influence of grain size of coarse aggregate on pebble concrete compressive strength [J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 208: 133-137.
- [9] CHEN Z P, ZHOU C H, YE P H, et al. The compressive strength and flexural strength test of recycled pebble aggregate concrete[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 357-360: 1433-1436.
- [10] 陈宗平,周春恒,陈宇良,等.再生卵石骨料混凝土力学性能试验研究[J].建筑材料学报,2014,17(3):465-469, 506.
CHEN Zongping, ZHOU Chunheng, CHEN Yuliang, et al. Mechanical properties of recycled pebble aggregate concrete[J]. Journal of Building Materials, 2014, 17(3):465-469, 506. (in Chinese)
- [11] 陈宗平,陈宇良,应武挡.再生混凝土三向受压试验及强度准则[J].建筑材料学报,2016,19(1):149-155.
CHEN Zongping, CHEN Yuliang, YING Wudang. Mechanical behavior and strength criterion of recycled aggregate concrete (RAC) under triaxial compression [J]. Journal of Building Materials, 2016, 19(1):149-155. (in Chinese)
- [12] 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,2003:20-400.
GUO ZhenHai, SHI Xudong. Reinforced concrete theory and analyse[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003:20-400. (in Chinese)