

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20220625

# 变幅循环荷载下胶凝砂砾石材料的动强度特性研究

黄 虎,熊衍来,曹克磊,张献才

(华北水利水电大学水利学院,河南 郑州 450046)

**摘要:** 动强度是大坝稳定安全分析的重要参数,对工程设计具有重要意义。采用大型动三轴仪,开展变幅循环加卸载试验,探究了不同围压和水泥含量对胶凝砂砾石(CSG)材料动应力—动应变关系的影响;基于摩尔—库伦强度准则,以动应变为塑性内变量,研究了CSG材料在经历塑性变形时其动强度参数的演化规律。结果表明,动粘聚力和动内摩擦角随水泥含量增大而增加;随着动应变增加,动粘聚力下降较快,动内摩擦角增加,骨料间的剪切滑移产生的摩擦力起主导作用;达到峰值动应力时,骨料间的有效受力面明显减小,动粘聚力下降平缓,动内摩擦角减小,具有一定的滞后性。动粘聚力随动应变变化的规律符合幂函数关系;动内摩擦角与动应变变化的规律符合二次函数关系。研究结果可为CSG坝的抗震设计优化提供理论参考。

**关键词:** 胶凝砂砾石材料; 变幅循环荷载; 塑性阶段; 动粘聚力; 动内摩擦角

**中图分类号:** TV43

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-7709(2023)03-0161-04

## 1 引言

胶凝砂砾石(CSG)坝作为一种安全性高、漫顶不溃、施工便捷的新坝型,越来越受到广泛关注<sup>[1]</sup>。由于CSG坝在实际运行过程中可能受波浪、地震等循环荷载的作用,产生不可恢复的永久变形,因此开展CSG材料的动强度特性试验对CSG坝的地震反应分析尤为重要<sup>[2]</sup>。动抗剪强度指标不仅可为摩尔库仑软化模型提供重要的计算参数,同时为CSG坝的抗震设计论证提供科学依据。目前关于CSG材料静力特性研究较完善,在动力性能方面,明宇等<sup>[3]</sup>开展了不同围压的CSG材料动三轴试验,分析了不同围压对材料动力特性影响;蔡新等<sup>[4]</sup>针对循环荷载下CSG材料的动本构关系和动模量进行研究,提出了一种动模量衰减模型;黄虎等<sup>[5]</sup>通过等幅循环试验,在分析CSG材料滞回圈形态的基础上,从能量角度讨论了阻尼比的演化规律。上述研究主要侧重于动弹性模量、阻尼比等方面,而对动力强度指标方面的研究相对较少。为此,本文制备了CSG试件,利用大型动三轴仪,在变幅循环荷载作用下,进行了一系列动强度特性试验,分析了不同水泥含量、

不同围压条件下CSG材料的动应力—动应变曲线关系,基于摩尔—库仑强度准则,以动应变作为塑性内变量,探讨了其塑性变形阶段动抗剪强度指标变化规律。

## 2 试验

### 2.1 试验材料及试样制备

参考《胶结颗粒料筑坝技术导则》<sup>[6]</sup>,本文试验采用了3种不同胶凝配比,试验方案见表1。试验用水为自来水,水泥采用P.O42.5水泥,粉煤灰选取干排F类Ⅱ级粉煤灰,试验所用的砂砾料取自河南省汝州市汝河河道内。

表1 试件不同配合比方案

Tab. 1 Different mix proportion schemes of test pieces

配合比 / %	砂率 / %	水胶比	胶凝材料		用水量 / kg	砂含量 / %	不同粒径骨料含量		表观密度 / kg/m <sup>3</sup>
			水泥含量 / %	粉煤灰含量 / %			5~20 mm	20~40 mm	
							mm	mm	
S1	0.2	1.0	40	50	90	434	694	1 042	2 350
S2	0.2	1.0	50	40	90	434	694	1 042	2 350
S3	0.2	1.0	60	30	90	434	694	1 042	2 350

注:表中水泥含量、粉煤灰含量、用水量、砂含量、骨料含量、表观密度单位均为kg/m<sup>3</sup>。

三轴试验采用 $\phi 150\text{ mm} \times 300\text{ mm}$ 的圆柱体铸铁模具,首先将砂砾料进行筛分,按配比将骨

收稿日期: 2022-03-31, 修回日期: 2022-05-02

基金项目: 河南省科技攻关项目(192102310224); 国家自然科学基金项目(52109154)

作者简介: 黄虎(1981-),男,博士、副教授、硕导,研究方向为筑坝新材料的力学试验和数值分析, E-mail: huang-hu1006@163.com

料、砂、胶凝材料、水依次倒入搅拌机拌和均匀后，将 CSG 材料分 2 层装入模具，每层均采用振捣棒与振动台结合的振捣方式，振捣压密后表层抹 1~2 cm 厚砂浆，静置于实验室内常温 48 h 初凝后，脱模放入标准养护室养护至 28 d 龄期。

### 2.2 测试方法

采用 STX-600 大型动三轴仪进行循环荷载下不同配比试样的动抗剪强度试验测试，STX-600 最大轴向荷载为 300 kN，可承受最大围压为 1 MPa。本次试验在不固结不排水条件下进行，试验中分别设置 200、400、600 kPa 三种围压。试验中动荷载选用正弦波<sup>[7]</sup>，加载频率为 1.0 Hz，即每 1 s 完成一次循环加载，每级应力仅循环一次，第一级循环应力幅值为 0.2 MPa，之后每级循环应力幅值比前一级增加 0.2 MPa，直至试件失效或破坏。图 1 为变幅循环加载路径示意图( $\sigma_3$  为侧向围压， $\sigma_1$  为动荷载)。

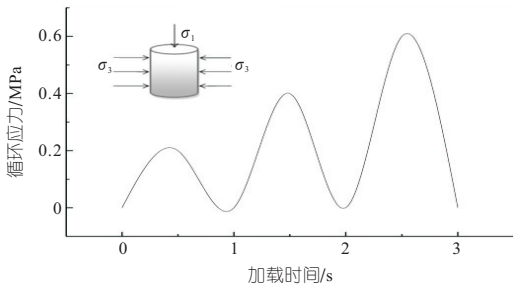


图 1 变幅循环加载路径示意图

Fig. 1 Schematic diagram of luffing cyclic loading path

## 3 试验结果与分析

### 3.1 动应力—动应变曲线分析

在变幅循环荷载作用下，不同水泥含量、不同围压下 CSG 材料的动应力—动应变曲线见图 2，其试验结果见表 2。为进一步研究 CSG 材料的应力—应变关系，在图 2 中绘制了循环荷载作用下应力—应变曲线的骨干曲线。图 3 为 CSG 试件变幅循环荷载应力—应变规律分布图。由图 2、3 及表 2 可知：①CSG 试件变幅循环荷载全过程可分为 5 个阶段<sup>[8,9]</sup>，OA 段为弹性阶段，峰值应力达到极限承载力约 70% 以前，CSG 动应力—动应变骨干曲线呈线性增长，试件表面无裂纹出现；AB 段为微裂纹扩展阶段，当 CSG 材料受到的峰值应力超过 70% 后，其动应力—动应变骨干曲线呈非线性递增趋势，试件内部开始有裂纹产生，由内而外不断扩展，直至达到峰值点并出现大裂缝；BC 段为宏观裂纹扩展阶段，应力下降至峰值应力 8% 左右<sup>[9]</sup>，宏观裂纹不断向周围扩展，并

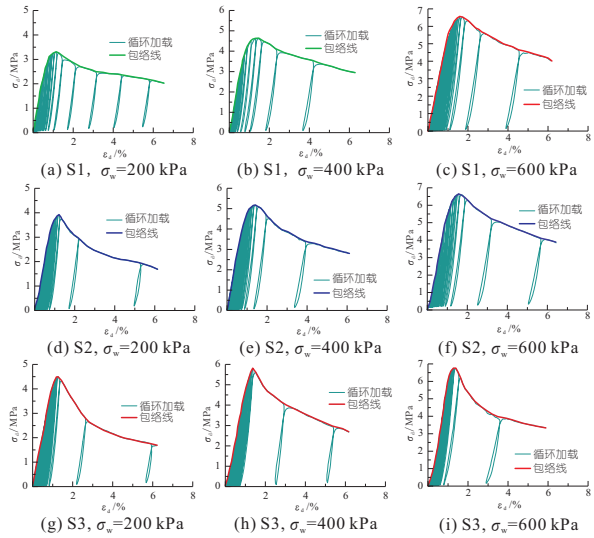


图 2 不同试件在变幅循环荷载作用下动应力—动应变曲线

Fig. 2 Dynamic stress-dynamic strain curves of different specimens under variable amplitude cyclic loading

表 2 循环加载试验结果

Tab. 2 Cyclic loading test results

试件	围压 /kPa	屈服点强度 /MPa	屈服点应变 /%	峰值点强度 /MPa	峰值点应变 /%	屈服强度与峰值强度比值 /%
S1	200	2.18	0.48	3.30	1.13	0.66
	400	3.52	0.68	4.62	1.29	0.76
	600	4.52	0.81	6.53	1.72	0.69
S2	200	2.86	0.70	3.91	1.22	0.73
	400	3.55	0.67	5.16	1.42	0.69
	600	4.42	0.80	6.64	1.55	0.67
S3	200	3.35	0.78	4.49	1.29	0.75
	400	4.06	0.87	5.78	1.37	0.70
	600	5.07	0.86	6.74	1.37	0.75

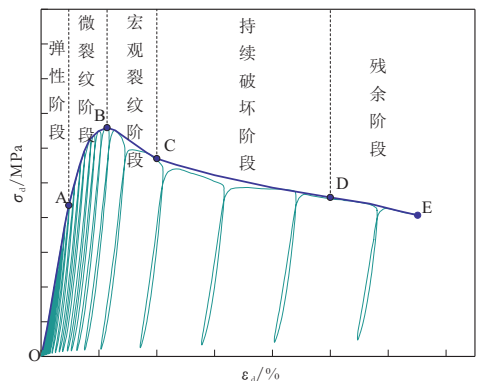


图 3 CSG 试件变幅循环荷载应力—应变规律分布图

Fig. 3 Distribution diagram of stress-strain law of CSG specimen under variable amplitude cyclic load

开始贯穿成主裂缝；CD 段为持续破坏阶段，试件中主裂缝形成的斜截面逐步形成破裂带。在轴向力和侧向力共同作用下，破裂带宽度不断增加，部分胶结块和骨料松散、脱落；DE 段为残余阶段，此时 CSG 试件的胶结能力基本丧失，靠骨料本身的刚度支撑，随着循环荷载的增加，试件的承载力逐渐下降，最终达到整体失效破坏。②在同一水泥含量下，试件的屈服强度、峰值强度随围压的增加而增大；曲线峰部随围压的增加而不断抬高，但

整体轮廓并未发生改变;峰值强度的增大主要是因为试件在循环加载过程中,侧向围压限制了试件的变形,有效缓解骨料黏结界面等薄弱区的应力集中现象,减缓裂缝的增长速度,提高试件承载性能。③在同一水泥含量下,试件的屈服应变、峰值应变随围压的增加而增大;这是由于胶凝砂砾石骨料粒径不一致,胶凝材料对骨料的包裹度不足,使其黏结界面的裂缝快速扩展;当围压增大后,围压对黏结界面的增强作用会逐渐减小骨料胶结体间的强度差异,从而提高 CSG 材料的抗压强度。④当侧向围压相同时,试件的屈服应力、峰值应力随水泥含量的增加而增大;当围压达到 600 kPa 时,水泥含量对试件的峰值强度的作用并不明显,这是因为当围压较大时,围压对裂缝的发展起到了抑制作用,CSG 试件已经到达一个极限状态,此时水泥含量的增加对其强度影响较弱。⑤S3 试件与 S1、S2 相比,动应力—动应变骨干曲线在峰后阶段更加陡峭。动应力在达到峰值强度后快速下降,曲线下凹,呈现更为明显的软化特征;这是因为水泥含量的增加,对骨料的包裹力更强,试件内部的胶结状态更加紧密,增强了试件的脆性能力。

### 3.2 动抗剪强度指标分析

根据试验结果,CSG 材料在循环荷载作用下会产生不可逆的塑性应变,从塑性破坏理论出发,结合摩尔—库伦强度准则<sup>[10]</sup>,为求得 CSG 材料在塑性变形阶段的动强度指标变化规律;首先根据卸载后有无塑性变形来确定初始屈服点,由表 2 可知,屈服应变为 67%~86%,可将动应变 0.8% 作为初始屈服点,试件在达到 D 点时,试件开始出现宏观破坏,因此 CSG 材料屈服点后的塑性变形阶段主要出现在动应变 0.8%~2% 区间内,即图 3 中 BD 阶段。采用动应变作为塑性内变量,利用不同围压下同一动应变值对应的动应力,绘制摩尔库伦圆,由 3 个应力圆包络线得到不同水泥含量、不同动应变下的动抗剪强度指标  $c_d$ 、 $\varphi_d$ 。

#### 3.2.1 动粘聚力与动应变关系曲线

图 4 为动粘聚力与动应变关系曲线。由图 4

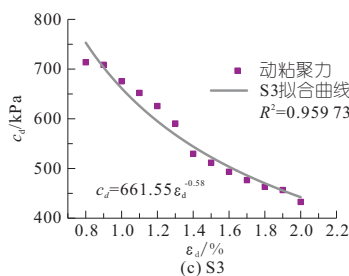
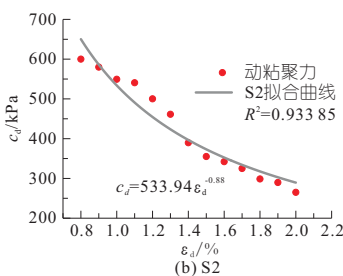
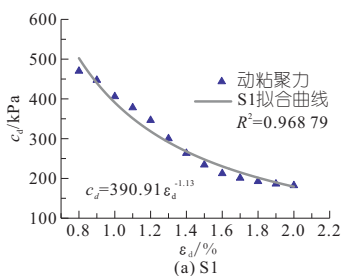


图 5 各试件动粘聚力拟合曲线  
Fig. 5 Fitting curve of dynamic cohesion of each specimen

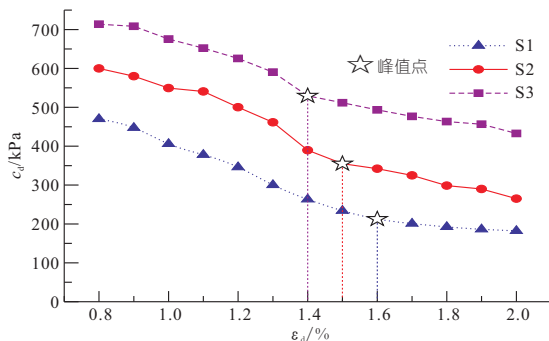


图 4 动粘聚力与动应变关系曲线  
Fig. 4 Relation curve between dynamic cohesion and dynamic strain

可知,动粘聚力随水泥含量增加而增大,曲线可分为峰前和峰后 2 个阶段,在峰前阶段,S1、S2、S3 的动粘聚力分别下降了 206.00、244.88、220.32 kPa,下降幅值较大。而动应变大于峰值动应变后,动粘聚力降低缓慢,S1、S2、S3 的动粘聚力分别下降了 81.25、90.12、60.65 kPa,曲线逐渐趋于平缓。这是因为动粘聚力主要靠骨料之间的胶结力来提供,从屈服点开始,试件表面开始出现细小裂缝,骨料之间的胶结状态开始出现破坏,随动应变不断增大,试件裂缝的数量不断增加,裂缝宽度增大;达到峰值应力后,由于骨料之间剪切滑移产生内摩擦力起主导作用,动粘聚力下降,该研究结果与文献[8]一致。

根据试验数据,拟合得  $c_d$ 、 $\varphi_d$  到动粘聚力  $c_d$  与动应变  $\epsilon_d$  之间的关系:

$$c_d = a\epsilon_d^{-b} \quad (1)$$

式中, $c_d$  为动粘聚力; $\epsilon_d$  为动应变; $a$ 、 $b$  均为参数。

动粘聚力  $c_d$  与动应变  $\epsilon_d$  之间拟合关系曲线见图 5。由图 5 可看出,随着水泥含量增加,参数  $a$  增大,参数  $b$  减小,呈规律性变化,其相关系数  $R^2$  均大于 0.93,拟合效果较好。尽管试验所得参数与拟合参数  $a$ 、 $b$  相关性不大,但可在实际工程应用中通过拟合关系对 CSG 材料的动粘聚力进行大致预测,为相关工程稳定性分析提供参考。

#### 3.2.2 动内摩擦角与动应变关系曲线

图 6 为动内摩擦角与动应变关系曲线。由图 6 可知,动内摩擦角随水泥含量增加而减小,曲线

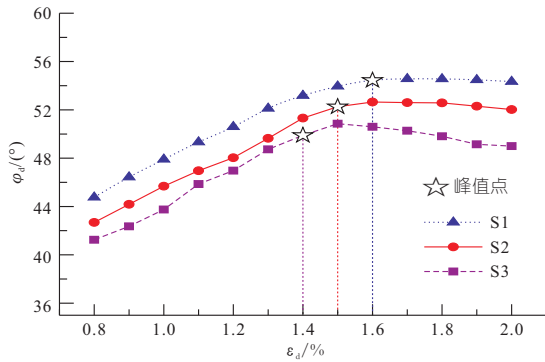


图 6 动内摩擦角与动应变关系曲线

Fig. 6 Relation curve between dynamic internal friction angle and dynamic strain

可分为上升与下降 2 个阶段,在上升阶段,S1、S2、S3 的动内摩擦角分别增加了 9.69°、9.58°、8.64°,增幅依次减小,动内摩擦角的最大值出现在峰值点后,具有一定的滞后性。当超过最大值时,曲线开始下降,S1、S2、S3 的动内摩擦角分别下降了 0.11°、0.23°、0.89°,降幅逐级增加。根据静力加载下的微观破裂过程<sup>[9]</sup>,这是由于宏观裂缝的出现,导致试件出现贯穿性裂缝,试件的整体结构已经破坏,有效受力面明显减小,主要依靠裂缝之间产生的摩擦力来承载,由于受到侧向围压的作用,试件表现为明显的软化现象。

根据试验数据,拟合得到动内摩擦角与动应变之间的关系:

$$\varphi_d = a\varepsilon_d^2 + b\varepsilon_d + c \quad (2)$$

式中, $\varphi_d$  为动内摩擦角; $\varepsilon_d$  为动应变值; $a$ 、 $b$ 、 $c$  均为拟合参数。

动内摩擦角  $\varphi_d$  与动应变  $\varepsilon_d$  之间拟合关系曲线见图 7。由图 7 可知,随着水泥含量增加,参数  $a$  减小,参数  $b$  增大,参数  $c$  减小,呈规律性变化,其相关系数  $R^2$  均大于 0.97,拟合效果良好,尽管

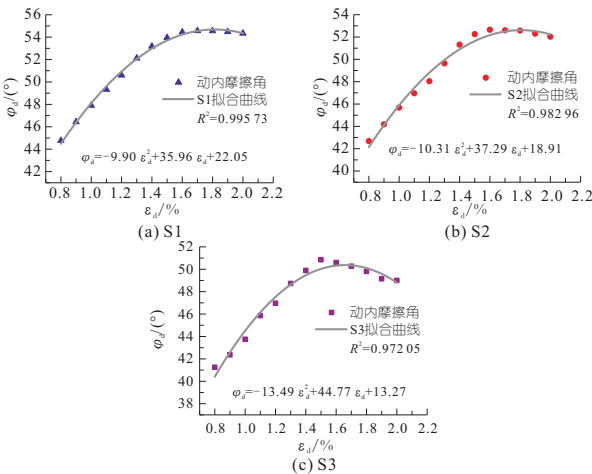


图 7 各试件动内摩擦角拟合曲线

Fig. 7 Fitting curve of dynamic internal friction angle of each specimen

试验所得参数与拟合参数  $a$ 、 $b$ 、 $c$  相关性不大,但可在实际工程应用中通过拟合关系对 CSG 材料的动内摩擦角进行大致预测,为相关工程稳定性分析提供参考。

## 4 结论

a. 水泥含量对 CSG 材料动强度指标有显著影响,动粘聚力和动内摩擦角均随水泥含量增大而明显增加。

b. 在塑性变形阶段,随动应变不断增加,动粘聚力明显减小,动内摩擦角先增大后减小,具有一定的滞后性。

c. 在塑性变形阶段,动粘聚力、动内摩擦角与动应变之间存在非线性相关关系;CSG 材料的动粘聚力随动应变变化的规律符合幂函数关系;而动内摩擦角与动应变变化的规律符合二次函数关系,方程参数与水泥含量呈规律性变化。

### 参考文献:

- [1] 贾金生,刘宁,郑瑞莹,等.胶结颗粒料坝研究进展与工程应用[J].水利学报,2016,47(3):315-323.
- [2] 杨冬升,凌静,蒋君.三维胶凝砂砾石材料百米级高坝的稳定性分析[J].水电能源科学,2019,37(9):71-73,107.
- [3] 明宇,蔡新,郭兴文,等.胶凝砂砾石料动力特性试验[J].水利水电科技进展,2014,34(1):49-52.
- [4] 蔡新,宋小波,明宇,等.胶凝堆石料动本构关系及动模量衰减模型[J].水电能源科学,2013,31(12):94-97.
- [5] 黄虎,黄凯,张献才,等.循环荷载下胶凝砂砾石材料的滞后及阻尼效应[J].建筑材料学报,2018,21(5):739-748.
- [6] 中华人民共和国水利部.胶结颗粒料筑坝技术导则:SL678-2014[S].北京:中国水利水电出版社,2014.
- [7] 闫东明,林皋,王哲.变幅循环荷载作用下混凝土的单轴拉伸特性[J].水利学报,2005(5):593-597.
- [8] 张献才.循环荷载下胶凝砂砾石材料的非线性行为及损伤试验研究[D].西安:西安理工大学,2019.
- [9] HU HUANG, WENLONG HUO, XIANCAI ZHANG, et al. Microscopic failure mechanism of cemented sand and gravel materials under uniaxial compression[J]. Science of advanced materials, 2019, 11(11):1614-1622.
- [10] 孙明权,彭成山,李永乐,等.超贫胶结材料三轴试验[J].水利水电科技进展,2007(4):46-49.

- [2] HE ZIMING, SHEN AIQIN, WU HANSONG, et al. Properties and mechanisms of brick-concrete recycled aggregate strengthened by compound modification treatment[J]. Construction and building materials, 2020, 315:125678.
- [3] 付兵彬,熊勃勃,卢晓春. 混凝土多尺度模型构建[J]. 水电能源科学, 2021, 39(3): 116-119, 49.
- [4] 姚泽良,段东旭,党发宁,等. 基于随机骨料模型的再生混凝土单轴压缩数值模拟[J]. 西安理工大学学报, 2018, 34(4): 475-480.
- [5] 汪奔,王弘,张志强,等. 基于网格生成的随机凹凸型混凝土骨料细观建模方法[J]. 计算力学学报, 2017, 34(5): 591-596.
- [6] 徐福卫,田斌,徐港. 界面过渡区厚度对再生混凝土损伤性能的影响分析[J]. 材料导报, 2022, 36(4): 122-128.
- [7] 金浏,蒋轩昂,杜修力. 轻骨料无腹筋混凝土梁剪切破坏及尺寸效应: 细观模拟[J]. 工程力学, 2020, 37(7): 57-67.
- [8] 刘超,余伟航,刘化威,等. 再生砖骨料混凝土力学性能及破坏机理研究[J]. 材料导报, 2021, 35(13): 13025-13031.
- [9] 杨莹莹. 砖粒含量对再生混凝土基本性能影响试验研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2018.
- [10] 张翠霞. 破碎卵石再生混凝土力学性能及无损检测试验研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2021.
- [11] 陈杰,耿悦,王玉银,等. 含碎红砖再生混凝土基本力学性能及其应力-应变关系[J]. 建筑结构学报, 2020, 41(12): 184-192.
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范:GB50010-2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.

## Numerical Simulation of Mesoscopic Damage Mechanism of Recycled Concrete Containing Brick

YAO Ze-liang<sup>1,2</sup>, QI Ya-lun<sup>1,2</sup>, LINGHU Tian-jing<sup>1,2</sup>, DANG Fa-ning<sup>1,2</sup>, CUI Ting-ting<sup>1,2</sup>, WEN Shuo<sup>1,2</sup>

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** In order to study the mechanical properties and damage mechanism of recycled brick concrete, the shape of recycled aggregate was regarded as a random concave convex polygon. Recycled brick concrete was regarded as seven-phase heterogeneous composite materials such as waste brick aggregate, waste concrete aggregate, new and old mortar, waste brick-new mortar, aggregate-old mortar, new and old mortar. Based on the ABAQUS development program of PYTHON, the numerical model of recycled concrete with different aggregate rate and different brick quantity was established. The meso-mechanical properties of recycled concrete containing brick with 45% coarse aggregate content were analyzed. The damage and failure patterns of recycled concrete containing bricks under load were studied. The results show that the algorithm is efficient in modeling, and can establish the mesoscopic model of recycled concrete containing bricks with different aggregate rates and different brick quantities, which can meet certain engineering requirements; The peak stress and elastic modulus of recycled brick concrete gradually decrease with the increase of brick quantity, while the peak strain increases with the increase of brick quantity; The damage and failure patterns of concrete with different brick quantities are basically the same.

**Key words:** recycled concrete; brick; failure mode; microscopic performance; mechanical index

\*\*\*\*\*  
(上接第 164 页)

## Dynamic Strength Characteristics of Cemented Sand and Gravel Material Under Variable Amplitude Cyclic Loading

HUANG Hu, XIONG Yan-lai, CAO Ke-lei, ZHANG Xian-cai

(School of Water Conservancy, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China)

**Abstract:** Dynamic strength is an important parameter for dam stability and safety analysis, which is of great significance to engineering design. Variable amplitude cyclic loading and unloading test was carried out to explore the effect of different confining pressure and cement content on the dynamic stress-strain relationship of cemented sand gravel (CSG) material by large dynamic triaxial instrument. Based on the Mohr Coulomb strength criterion, the evolution law of dynamic strength parameters of CSG materials during plastic deformation was studied by taking the dynamic strain as the plastic internal variable. The results show that the dynamic cohesion and dynamic internal friction angle increase with the increase of cement content. As the dynamic strain increases, the dynamic cohesion decreases rapidly, the dynamic internal friction angle increases, and the friction force generated by the shear slip between the aggregates dominates. When the peak dynamic stress is reached, the effective stress surface between aggregates decreases obviously, the dynamic cohesion decreases gently, the dynamic internal friction angle decreases with a certain hysteresis. The law of dynamic cohesion with dynamic strain conforms to the power function relationship. The law of dynamic internal friction angle and dynamic strain change conforms to the quadratic function relationship. The research results can provide a theoretical reference for the optimization of seismic design of CSG dam.

**Key words:** cemented sand and gravel material; variable amplitude cyclic loading; plastic stage; dynamic cohesion; dynamic internal friction angle