文章编号:1007-9629(2021)05-0961-09

分级等荷循环受压下橡胶水泥砂浆的 疲劳损伤演化

杨荣周,徐颖,郑强强,陈佩圆,王佳

(安徽理工大学土木建筑学院,安徽淮南232001)

摘要:为探究橡胶水泥基材料的疲劳及损伤演化特性,以橡胶水泥砂浆为研究对象,对其分别进行 10、20、30 kN荷载等级下的10次(低次/限次)等荷循环加-卸载试验,并对试件产生的加载应变、加 载应变差、累积残余应变、累积残余应变差、不闭合度、累积残余应变损伤(塑性损伤),以及加载和卸 载变形模量进行分析.结果表明:试件的加载应变和累积残余应变均随着循环荷载等级的增大而增 大;试件的加载应变差和累积残余应变差随着循环次数的增加以互相交错波动的形式逐渐减小至0 附近;随着循环次数的增加,试件的不闭合度减小,塑性损伤增大,且两者均随循环荷载等级增大而 增大;试件的加载和卸载变形模量随着循环次数的增加以分段线性波动的形式增大,也随着循环荷 载等级的增大而增大.同时建立了基于临界塑性损伤假定条件下的塑性损伤模型和刚度变化模型,对 试件在高次/不限次等荷循环加-卸载过程中的疲劳塑性损伤和刚度演化特征进行了初步预测和表征. 关键词:橡胶水泥砂浆;循环加-卸载;循环荷载等级;不闭合度;塑性损伤 **中图分类号:**TB332 **文献标志码:**A **doi**:10.3969/j.issn.1007-9629.2021.05.009

Fatigue and Damage Evolution Characteristics of Rubber Cement Mortar under Graded Constant Load Cyclic Compression

YANG Rongzhou, XU Ying, ZHENG Qiangqian, CHEN Peiyuan, WANG Jia

(School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract : To explore the fatigue and damage evolution characteristics of rubber cement-based materials, 10 (low/finite cycles) equal load cyclic loading-unloading cycle tests were carried out on rubber cement mortar under 10, 20, 30 kN load grades respectively. The loading strain, the loading strain difference, the cumulative residual strain, the cumulative residual strain difference, the degree of non-closure, the cumulative residual strain damage (plastic damage), and the modulus of deformation under loading and unloading were analyzed. The results show that both the loading strain and the cumulative residual strain increase with the increase of the cyclic load grade, and the loading strain difference and the cumulative residual strain difference gradually decrease to about 0 with the increase of the number of cycles. With the increase of the number of cycles, the degree of non-closure decreases, and the plastic damage increases, and both the degree of non-closure and plastic damage increases in the form of piecewise linear fluctuation with the increase of the number of cycles, and also increases with the increase of the cyclic load grade. Finally, both the plastic damage model and stiffness change model based on critical plastic damage assumption were established to predict the fatigue plastic damage and stiffness evolution

收稿日期:2020-06-24;修订日期:2020-10-19

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52008003、52074009);安徽省重点研究与开发项目(201904a07020081)

第一作者:杨荣周(1993—),男,安徽淮南人,安徽理工大学博士生.E-mail:Rongzhouy@outlook.com

通讯作者:徐 颖(1965-),男,安徽泗县人,安徽理工大学教授,博士生导师,博士.E-mail:yxu@aust.edu.cn

characteristics of specimens in the process of loading-unloading with high/unlimited cycles.

Key words: rubber cement mortar; cyclic loading-unloading; cyclic load grade; degree of non-closure; plastic damage

橡胶水泥砂浆/混凝土是由柔软的废旧橡胶颗 粒和硬脆的砂浆/混凝土复合而成的特殊水泥基材 料,在一定程度上集聚了橡胶材料和普通水泥基材 料的性能^[1].橡胶混凝土因表现出良好的抗疲劳、抗 裂、阻尼耗能以及形变等性能而具有广阔的工程应 用前景[1-6].循环荷载下的疲劳破坏行为是结构材料 在长期振动荷载作用下的安全评价问题[7],橡胶水泥 基材料的抗疲劳性能在工程应用中起到至关重要的 作用.为此,国内外学者进行了大量的试验研究.王 龙等^[5]采用有限元和小梁试验分析了橡胶混凝土的 阻尼及疲劳性能,发现阻尼比提高了30%.邢颖等[8] 对橡胶混凝土-钢组合梁进行了疲劳试验,结果表明 橡胶能够有效减小裂缝宽度.Lü等^[7]研究了自密实橡 胶轻骨料混凝土的单轴压缩疲劳性能,并用双参数 Weibull分布分析了混凝土的疲劳寿命.Zhang等¹⁹研 究发现在室温下的橡胶混凝土比普通混凝土具有更 长的疲劳寿命.Liu等^[10]分析表明橡胶颗粒能提高混 凝土的疲劳寿命,并且当橡胶掺量达到20%时,增强 效果最为显著.

鉴于此,本文对橡胶水泥砂浆试件在3种循环荷载等级下的低次等荷循环加-卸载试验中产生的形变、变形模量以及塑性损伤进行了系统且全面的分析,并根据低次循环疲劳试验结果到高次循环疲劳理论分析的过程,建立了基于临界塑性损伤假定条件下橡胶水泥砂浆的塑性损伤模型和刚度变化模型.

1 试验

1.1 原材料及试件制备

水泥为P·O 52.5级普通硅酸盐水泥;细集料为 天然河砂,密度为2 600 kg/m³,细度模数为2.60;橡 胶粉为废旧轮胎橡胶颗粒,密度为1 120 kg/m³,粒度 为883 µm(20目);拌和水为自来水.试验以等体积橡 胶颗粒替换河砂,浇筑制备得到橡胶掺量(体积分 数)为30%的圆柱体试件,尺寸为 ϕ 50×98 mm.试件 配合比m(x):m(x泥):m(砂):m(橡胶)=1.00:2.00:2.80:0.52.1 d后脱模,将脱模的试件置于(20±2)℃、相对湿度大于90%的环境下养护28 d.

1.2 试验方法及测试曲线

试验采用RMT-150B电液伺服岩石力学测试系 统进行加-卸载,加载和卸载速率均为0.50 kN/s,加

载波形为斜坡.先分别以0~10、0~20、0~30 kN这3 种荷载等级区间对试件进行10次循环加-卸载试验, 再继续加载至试件破坏.加载方式列于表1,加载路 径如图1所示.试件轴向力-轴向位移曲线及典型 加-卸载滞回曲线见图2.图2表明,测试数据比较稳 定、较为可靠.

表1 循环加-卸载方式 Table 1 Cyclic loading-unloading method

Specimen No.	Cyclic load grade interval/kN	Number of cycle/ times
F-0	—	0
F-10	0-10	10
F-20	0-20	10
F-30	0-30	10

Note:F-0-Uniaxial compression.





2 试验分析原理及变量定义

结合文献[11-13]中的研究方法,从形变和模量 的角度分析等荷循环加-卸载作用下橡胶水泥砂浆 试件的疲劳性能及损伤演化,具体分析原理如图3所 示.为了能够更清楚地描述,对图3中涉及的主要变 量进行了定义,并列于表2.

3 试验结果与分析

在外载荷作用下,水泥基材料往往不可避免地产 生可逆形变(弹性形变)和不可逆形变(塑性形变/残 余形变)^[11].为了更好地探究橡胶水泥砂浆在等荷循环 加-卸载作用下的疲劳性能与损伤演化,对其在试验 过程中产生的加载应变、加载应变差、累积残余应变、





图3 循环加-卸载下疲劳性能分析原理图

Fig. 3 Schematic diagram of fatigue performance analysis under cyclic loading-unloading

表 2 循环加-卸载作用下主要变量的定义 Table 2 Definition of main variables under cyclic loading-unloading

Variable	Name	Equation	Definition
$\epsilon_{\rm A}$	Loading strain	$\epsilon_{\mathrm{A}i}$	The strain caused by the process from the initial loading origin to the maximum load value of the <i>i</i> -th cyclic loading
$\Delta \varepsilon_{\rm A}$	Loading strain difference	$\varepsilon_{\mathrm{A}i} - \varepsilon_{\mathrm{A}(i-1)}$	The loading strain difference between the maximum load values of the <i>i</i> -th and $(i-1)$ -th cycles
$\epsilon_{ m B}$	Cumulative residual strain	$arepsilon_{\mathrm{B}i}$	The strain caused by the process from the initial loading origin to the minimum unload value of the <i>i</i> -th cyclic unloading
$\Delta \varepsilon_{\rm B}$	Cumulative residual strain difference	$\boldsymbol{\varepsilon}_{\mathrm{B}i} = \boldsymbol{\varepsilon}_{\mathrm{B}(i-1)}$	The unloading strain difference between the minimum unload values of the i -th and $(i-1)$ -th cycles
Δε	Unclosed degree	$\varepsilon_{\mathrm{B}i} - \varepsilon_{\mathrm{O}i}$	The strain caused by this process when the <i>i</i> -th cycle loading-unloading is completed
$E_{\rm L}$	Loading deformation modulus	$\frac{\sigma_{\mathrm{A}i} - \sigma_{\mathrm{O}i}}{\varepsilon_{\mathrm{A}i} - \varepsilon_{\mathrm{O}i}}$	The secant modulus between the start point and the end point when the <i>i</i> -th cycle loading is completed
$E_{\rm U}$	Unloading deformation modulus	$\frac{\sigma_{\mathrm{A}i} - \sigma_{\mathrm{B}i}}{\varepsilon_{\mathrm{A}i} - \varepsilon_{\mathrm{B}i}}$	The secant modulus between the start point and the end point when the <i>i</i> -th cycle unloading is completed
D	Cumulative residual strain damage	$\frac{\varepsilon_{\mathrm{B}}}{\varepsilon_{\mathrm{P}}}$	The ratio of cumulative residual strain to peak strain

累积残余应变差、不闭合度、累积残余应变损伤(以下 简称塑性损伤),以及加-卸载变形模量进行分析.

3.1 加载应变和累积残余应变

图4为试件的累积残余应变与加载应变的关系.

由图4可知:各试件的累积残余应变均随着加载应变的增大而增大,两者存在良好的正线性关系(R²= 0.816~0.985);试件的累积残余应变和加载应变均因循环荷载等级的增大而增大.



Fig. 4 Relationship between cumulative residual strain and loading strain of specimens

3.2 加载应变差和累积残余应变差

964

图 5 为试件加载应变差、累积残余应变差与循环 次数的关系.由图 5 可知,试件在 3 种荷载等级循环加一 卸载下的加载应变差、累积残余应变差表现出了相同 的变化趋势,说明试件的形变性能在等荷循环加-卸载 下具有良好的稳定性;第1次循环加-卸载下的加载应 变差大于累积残余应变差,且两者均明显大于其后循 环的加载应变差和累积残余应变差,说明试件在第1 次循环加-卸载下产生了明显的塑性变形.对在其后 循环加-卸载下的加载应变差和累积残余应变差进行 放大后可以发现,试件的加载应变差和累积残余应变 差随着循环次数的增加,以互相交错波动的形式逐渐 减小至0附近,说明试件的结构随着循环次数的增加 逐渐密实,塑性变形逐渐减小.





3.3 不闭合度和塑性损伤

试件每次循环加-卸载下的加-卸载曲线都是不 闭合的(见图2(b)),其不闭合度能够直观地衡量试 件在每次循环加-卸载下所产生的塑性变形大小.试 件的峰值应变是其恰好发生结构破坏的标志性应变 (破坏应变),将累积残余应变与峰值应变的比值作 为试件在循环加-卸载下的损伤变量,以此来衡量试 件在每次循环加-卸载下产生的疲劳塑性损伤.

图 6 为试件不闭合度、塑性损伤与循环次数的关 系.由图 6 可知:(1)在3种荷载等级循环加-卸载下试 件的不闭合度、塑性损伤具有基本一致的变化规律, 即随着循环次数的增加,试件的不闭合度不断减小, 塑性损伤不断增加.(2)第1次循环加-卸载下试件的 不闭合度明显大于其后循环的不闭合度,相应地,第1 次循环加-卸载下试件的塑性损伤增长速率也明显大 于其后循环的塑性损伤增长速率.(3)试件的不闭合度 和塑性损伤均因循环荷载等级的增大而增大.

图7为试件塑性损伤与循环次数的非线性拟合曲线.由图7可见:Cubic和ExpDec1函数均能够较好地反映试件塑性损伤与循环次数之间的变化关系,相关系数*R*²均大于0.94.其拟合关系式列于表3.

3.4 加载和卸载变形模量

材料的变形模量是反映材料抵抗变形能力的指标, 探究橡胶水泥基材料在循环加-卸载下加载和卸载变形 模量的变化情况,对揭示其力学特征具有重要意义.

图 8 为试件加载和卸载变形模量与循环次数的关 系.由图 8 可知:(1)试件在3种荷载等级循环加-卸载 下的加载和卸载变形模量具有相同的变化趋势,即随 着循环次数的增加以分段线性波动的形式不断增大, 反映出了试件的力学性能在等荷循环加-卸载下具有 良好的稳定性.(2)在整个循环加-卸载过程中,试件 的卸载变形模量总是大于加载变形模量,这是因为试





Fig. 6 Relationship between degree of non-closure, cumulative residual strain damage and number of cycles of specimens



Fig. 7 Nonlinear fitting curves of cumulative residual strain damage and number of cycles of specimens

	表 3	试件塑性损伤与循环次数的拟合关系式
Table 3	Fitting relation formu	la between cumulative residual strain damage and number of cycles

Equation type	Specimen type	Fitting relation formula	R^2
	F-10	$D = 0.09562 + 0.01145n - 0.00137n^2 + 7.34817 \times 10^{-5}n^3$	0.946
Cubic	F-20	$D = 0.18548 + 0.01447n - 0.00108n^2 + 3.21461 \times 10^{-5}n^3$	0.990
	F-30	$D = 0.24165 + 0.03098n - 0.00336n^2 + 1.54727 \times 10^{-5}n^3$	0.993
	F-10	$D = 0.17362 - 0.07279\exp(-n/10.95871)$	0.941
ExpDec1	F-20	$D = 0.2661 - 0.08154 \exp(-n/5.2342)$	0.992
	F-30	$D = 0.39122 - 0.14299\exp(-n/5.71494)$	0.989

Note: n is number of cycle.

第5期





件在加-卸载过程中产生了不可恢复的残余变形,进 而导致加-卸载曲线无法闭合.(3)第1次循环的加载 变形模量明显小于其后循环的加载变形模量,说明试 件的内部结构在第1次循环加载过程中产生了明显的 压密效应,进而提高了试件的结构刚度.

由图8还可见:(1)除第1次循环的加载变形模量

外,试件F-10、F-20、F-30的加载和卸载变形模量均高 于单轴压缩荷载分别为10、20、30kN时的变形模量 (2.64、3.13、3.47GPa).(2)试件的加载和卸载变形模量 随着循环荷载等级的增大而增大.需要说明的是,当循 环荷载等级过大时,试件结构会产生明显损伤并削弱 结构承载力,反而会降低试件的加载和卸载变形模量.

综上所述,在不造成明显结构损伤的前提下,循 环荷载等级的增大和循环次数的增加可在一定程度 上对橡胶水泥砂浆试件的加载和卸载变形模量起到 增强作用.

4 机理分析与讨论

上述试验结果表明,在等荷循环加-卸载过程 中,橡胶水泥砂浆试件同时体现出塑性损伤增大和 刚度强化这一看似互相矛盾的现象.为此,结合循环 加载过程中橡胶颗粒在水泥砂浆中的作用机制,对 试件疲劳塑性损伤机理和变形模量增强机理进行如 下分析和讨论.

4.1 循环加载过程中橡胶颗粒在水泥砂浆中的作用 机制

图9为普通水泥砂浆和橡胶水泥砂浆局部切割 区域的细观形貌.由图9可见,相比普通水泥砂浆,橡 胶水泥砂浆基体内分布着较多不规则的孔隙和橡胶 颗粒;在循环荷载下,孔隙和橡胶颗粒因应力集中致 使材料发生塑性压密变形,这一过程会消耗、吸收外 界输入的循环、振动能量.与此同时,橡胶颗粒本身 良好的阻尼特性在循环荷载下能够起到柔性缓冲的 作用,可将外力功部分转化为橡胶内部阻尼摩擦热 能而耗散,进而减小水泥砂浆基体因耗能而导致的 损伤^[14].因此,橡胶水泥砂浆的抗疲劳性能优于普通 水泥砂浆,使其在路面^[5,10]、组合结构^[8]及地下结构^[15]





4.2 疲劳塑性损伤机理和变形模量增强机理

探究疲劳塑性损伤机理和变形模量增强机理, 需要从细观角度理解塑性损伤和结构性损伤这2个 概念.图10为橡胶颗粒、砂和水泥浆体三者之间相 互作用的示意图.由图10可见,在循环加-卸载过 程中,试件内部的橡胶颗粒、砂及硬化的水泥浆体 之间以挤压、错位和摩擦的形式相互作用,进而导 致试件塑性变形损伤.然而,这并不代表试件的骨





架发生破坏,即试件未发生结构性损伤.只有当塑 性变形接近或恰好达到了破坏变形,即塑性损伤值 D接近或等于1时,试件才会发生较大程度或完全 的结构性损伤.本次试验中,试件在3种荷载等级 的10次等荷循环加-卸载下的塑性损伤值DQ为 0.103~0.369,说明试件在整个循环加-卸载过程中 主要发生了塑性压密变形,并未对试件内部骨架造 成明显的破坏.与此同时,塑性压密作用反而在一 定程度上增大了试件结构的密实度,进而导致其变 形模量有所增大.因此,橡胶水泥砂浆试件在低次 循环加一卸载过程中所体现出的塑性损伤增大和刚 度强化现象是合理存在的.需要指出的是,由于疲 劳损伤累积效应的存在[16-17],在较大荷载等级的多 次等荷循环加-卸载下,塑性损伤值会不断增大,并 逐渐达到结构性损伤,试件的变形模量必然会降 低,即出现刚度退化现象.

4.3 塑性损伤模型和刚度变化模型

结合本次试验结果及橡胶水泥砂浆试件疲劳塑 性损伤机理和变形模量增强机理,对橡胶水泥砂浆 在高次循环及不同荷载水平(F_c,循环荷载与峰值荷 载之比)下的塑性损伤和刚度变化进行初步预测,并 建立相应的演化模型.

对10次等荷循环加-卸载试验来说,必然存在1个 荷载水平临界值F_{c-10}(0.8<F_{c-10}<1).若F_c大于此值时

试件结构发生损伤;若Fc小于等于此值时试件结构不 发生损伤.因此,必然存在1个临界损伤D_{C-10}(0.369< Dc-10<1).同样的,对高次等荷循环加-卸载试验来说, 是否也存在1个荷载水平临界值F_{CH}呢?根据一维疲 劳损伤理论,试件在循环荷载水平较低的高次循环下 的变形主要为弹性变形^[17].因此,可以假定存在F_{CH},那 么也就存在1个临界损伤DcH:换句话说,在理想状态 下,当荷载水平合适的时候(不难理解,这个荷载水平 F_{CH}很小),随着循环次数的不断增加,试件结构保持稳 定并基本上不发生任何损伤,初始弹塑性变形可以完 全向线弹性变形转化.然而,从Peng等^[18]、Zheng等^[19] 及Wang等^[20]对岩盐、岩石和金属材料的试验及理论模 拟研究结果来看,似乎更有一种情况:尽管循环荷载 水平较小,但材料最终都会在不限次的等荷循环加载 下,因疲劳耗能的不断累积,依次以循环软化一循环 硬化一循环软化的形式而破坏.实际上,以上试验及 模拟中采用的循环荷载水平并不是很小,那么,关键问 题就在于是否存在FcH能够使材料在不限次的循环加 载下不发生结构性损伤.因此,需要分别对以上几种情 况下的塑性损伤模型和刚度变化模型进行讨论分析.

图 11 为等荷循环加-卸载模式示意图.图 11 中将 F_c > F_{CH}情况下的等荷循环加-卸载称之为加载模式 I(荷载水平为F_{CI}),将F_c ≤ F_{CH}情况下的等荷循环 加-卸载称之为加载模式 II(荷载水平为F_{CI}).





因此,在高次等荷循环加-卸载下的疲劳塑性 损伤模型可以划分为增长型-I和增长型-II-①/②. 相应地,以加载模量为代表,刚度变化模型可以划 分为先增后减型-I和先增后稳型-II-①/先增后减 型-II-②.结合 3.3 和 3.4 的分析,选用 ExpDec1 和一 次函数分别反映橡胶水泥砂浆试件塑性损伤和加 载变形模量的变化,由此可以得到高次等荷循环 加-卸载下的塑性损伤模型和刚度变化模型,如图 12 所示.由图 12 可知,试件在高次等荷循环加-卸 载下塑性损伤和加载变形模量在不同阶段具有不 同演化特征.

(1)在OA阶段 即在第1次循环加-卸载下,试 件发生了明显的压密变形,其塑性损伤和变形模量 因压密效应而快速增加,但未产生结构性损伤.

(2)在AB阶段 在第1次循环加-卸载后,压密 效应明显减弱,变形模量明显增大,试件处于弹塑性 变形阶段.随着循环次数的增加,塑性损伤和变形模 量继续增大,但增长速率明显减小.此阶段,依然未



图 12 塑性损伤模型和刚度变化模型的示意图 Fig. 12 Schematic diagrams of plastic damage model and stiffness change model

产生明显的结构性损伤.

(3)在BD阶段 对于加载方式 [[-①,基于临界 损伤假定可以认为,由于循环荷载水平较小,试件不 发生结构性损伤;与此同时,压密效应因循环次数的 增加而逐渐减小至消失,使得塑性损伤累积效应逐 渐减小至消失,即试件由弹塑性变形阶段进入了线 弹性变形阶段.此阶段塑性损伤和变形模量基本上 均分别保持为某一常数值 Dc-1和 Etc-1.对于加载方 式 I 和加载方式 [[-②,由于循环荷载水平较大或者 较小的循环荷载水平在高次循环下产生了较大的塑 性累积损伤,使得塑性损伤逐渐转化为结构性损伤, 导致结构骨架产生损伤;损伤快速增大,变形模量因 水泥基材料本身所具有的脆性失效效应而快速减 小,发生了明显的刚度退化现象,尤其体现在 CD阶 段.此阶段塑性损伤值最终达到了最大值1,变形模 量基本上减小为0.

本研究仅是对橡胶水泥砂浆疲劳损伤演化特性的初步探讨.在后续研究中还需结合工程实际,深入 探究橡胶掺量、循环加-卸载方式等因素对橡胶水泥 砂浆疲劳损伤演化特性的影响;通过实际或者数值 模拟高次等荷循环加-卸载试验,对本研究的预测模型做进一步的判断与验证.

5 结论

(1)在10次等荷循环加-卸载作用下,橡胶水泥 砂浆试件的加载应变和累积残余应变均随着循环荷 载等级的增大而增大;其加载应变差和累积残余应 变差随着循环次数的增加以互相交错波动的形式逐 渐减小至0附近;随着循环次数的增加,试件的不闭 合度不断减小,塑性损伤不断增大,两者均随着循环 荷载等级的增大而增大.

(2)在10次等荷循环加-卸载下的加载和卸载变 形模量具有相同的变化趋势,即随着循环次数的增 加以分段线性波动的形式不断增大,且随着循环加 载等级的增大而增大.

(3)在10次等荷循环加-卸载下的塑性损伤仅为 0.103~0.369,说明试件在整个循环加-卸载过程中 主要发生了塑性压密变形,并未对试件内部骨架造 成明显的破坏.塑性压密作用反而一定程度上增大 了试件结构的密实度,进而导致变形模量有所增大. (4)基于临界塑性损伤假定条件下建立的塑性 损伤模型和刚度变化模型表明,高次等荷循环加-卸 载下的塑性损伤和加载变形模量在不同的阶段具有 不同的演化特征.所建立的模型能够对橡胶水泥基 材料在高次等荷循环加-卸载过程中的疲劳塑性损 伤和刚度演化特征进行有效地初步预测和表征.

参考文献:

- [1] 冯文贤,刘锋,郑万虎,等.橡胶混凝土疲劳性能的试验研究
 [J].建筑材料学报,2012,15(4):469-473.
 FENG Wenxian, LIU Feng, ZHENG Wanhu, et al. Test of fatigue performance of rubberized concrete [J]. Journal of Building Materials, 2012, 15(4): 469-473. (in Chinese)
- [2] 王立燕,王超,张亚梅,等.运用声发射技术研究橡胶混凝土 疲劳损伤过程[J].东南大学学报(自然科学版),2009,39
 (3):574-579.

WANG Liyan, WANG Chao, ZHANG Yamei, et al. Study on fatigue damage process of rubberized cement concrete by acoustic emission technique[J].Journal of Southeast University (Natural Science), 2009, 39(3): 574-579. (in Chinese)

- [3] 亢景付,任海波,张平祖.橡胶混凝土的抗裂性能和弯曲变 形性能[J].复合材料学报,2006,23(6):158-162.
 KANGJingfu, RENHaibo, ZHANGPingzu.Cracking-resistance and flexural property of rubberized concrete[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2006,23(6):158-162.(in Chinese)
- [4] 刘春生,朱涵,李志国,等.橡胶细集料水泥砂浆基本性能研究[J].混凝土,2005(7):38-42.
 LIU Chunsheng, ZHU Han, LI Zhiguo, et al. Research in the fundamental characteristics of crumb rubber mortar [J]. Concrete, 2005(7):38-42. (in Chinese)
- [5] 王龙,范璐璐.橡胶颗粒水泥混凝土与基质混凝土路用性能 对比分析[J].哈尔滨工业大学学报,2016,48(3):77-81.
 WANG Long, FAN Lulu. Analysis of road performance between rub-concrete and general concrete materials[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2016, 48(3):77-81. (in Chinese)
- [6] SEGRE N, JOEKES I. Use of tire rubber particles as addition to cement paste[J].Cement and Concrete Research, 2000, 30 (9):1421-1425.
- [7] LÜ J, ZHOU T H, DU Q, et al. Experimental and analytical study on uniaxial compressive fatigue behavior of self-compacting rubber lightweight aggregate concrete [J]. Construction and Building Materials, 2020, 237:117623.
- [8] 邢颖,徐杰,韩庆华,等.部分剪力连接的橡胶集料混凝土 钢组合梁疲劳性能试验研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2016,43(7):32-42.

XING Ying, XU Jie, HAN Qinghua, et al. Experiment study on the fatigue behavior of partial shear connected composite beam with crumb rubber concrete[J].Journal of Hunan University(Natural Science), 2016, 43(7):32-42. (in Chinese)

[9] ZHANG Y M, ZHAO Z. Internal stress development and fa-

tigue performance of normal and crumb rubber concrete [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2015, 27 (2) : A4014006.

- [10] LIU F, MENG L Y, NING G F, et al. Fatigue performance of rubber-modified recycled aggregate concrete (RRAC) for pavement[J]. Construction and Building Materials, 2015, 95: 207-217.
- [11] 姜德义,刘文浩,陈结,等.分级不连续循环载荷作用下混凝
 土的疲劳特性[J].东南大学学报(自然科学版),2019,49
 (4):631-637.

JIANG Deyi, LIU Wenhao, CHEN Jie, et al. Fatigue performance of ordinary concrete subjected to stepwise discontinuous cyclic loading[J]. Journal of Southeast University(Natural Science), 2019, 49(4): 631-637. (in Chinese)

- [12] 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.
 HUANG Hu, HUANG Kai,ZHANG Xiancai, et al. Hysteresis and damping effect of cemented sand and gravel material under cyclic loading[J]. Journal of Building Materials, 2018, 21 (5): 739-748. (in Chinese)
- [13] ZHOU Y Q, SHENG Q, LI N N, et al. Numerical analysis of the mechanical properties of rock materials under tiered and multi-level cyclic load regimes [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2020, 135:106186.
- [14] 杨荣周,徐颖,陈佩圆,等.干、湿养护下橡胶细集料水泥砂浆 压缩破裂及能量演化特性[J].材料导报,2020,34(4): 4049-4055.

YANG Rongzhou, XU Ying, CHEN Peiyuan, et al. Compressive rupture and energy evolution characteristics of rubber fine aggregate cement mortar under dry and wet curing conditions[J]. Material Reports, 2020, 34(2):4049-4055. (in Chinese)

- [15] NEHDI M, KHAN A. Flexible crumb tire rubber-filled cement mortars as a protective system for buried infrastructure [J].Journal of ASTM International, 2005,2(1):1-15
- [16] ZHOU X, LU D C, DU X L, et al. A 3D non-orthogonal plastic damage model for concrete [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2020, 360:112716.
- [17] 余寿文,冯西桥.损伤力学[M].北京:清华大学出版社, 1997:32-35.
 YU Shouwen, FENG Xiqiao. Damage mechanics [M]. Bei-

jing: Tsinghua University Press, 1997:32-35. (in Chinese)

- [18] PENG H H, FAN J Y, ZHANG X, et al. Computed tomography analysis on cyclic fatigue and damage properties of rock salt under gas pressure [J]. International Journal of Fatigue, 2020, 134:105523.
- [19] ZHENG Q S, LIU A L, SUN P, et al. Dynamic and damage properties of artificial jointed rock samples subjected to cyclic triaxial loading at various frequencies [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2020, 128:104243.
- [20] WANG Z L, XIAO H. Direct modeling of multi-axial fatigue failure for metals[J]. International Journal of Solids and Structures, 2017, 125(15):216-231.