

珊瑚砂微生物固化体单轴损伤本构模型^{*}

方祥位^{1,2}, 李晶鑫¹, 李捷¹, 陈适¹, 姚志华³

(1. 陆军勤务学院 军事设施系, 重庆 401331; 2. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045;
3. 空军工程大学 机场建筑工程系, 西安 710038)

摘要: 利用 MICP 技术固化南海某岛礁吹填珊瑚砂, 对固化体试样进行了单轴抗压强度试验, 基于损伤力学理论建立了单轴压缩条件下的固化体损伤本构模型。结果表明: 利用 MICP 技术得到的珊瑚砂微生物固化体无侧限抗压强度均大于 5 MPa, 固化体单轴受压应力-应变曲线可大致分为压密阶段、弹性阶段、塑性阶段与破坏软化阶段。基于连续介质损伤力学理论, 假定固化体微元强度服从双参数的 Weibull 分布, 考虑应力-应变曲线特征进行参数简化后建立了单轴压缩条件下的损伤本构模型; 模型采用经验拟合方程与损伤本构方程结合的分段函数形式, 用试验资料初步验证了模型的合理性。

关键词: 珊瑚砂微生物固化体; 单轴受压; 损伤; 本构模型

中图分类号: TU443

文献标识码: A

文章编号: 1673-0836(2018)05-1234-06

Damage Constitutive Model of Biocemented Coral Sand Columns under Unconfined Compression

Fang Xiangwei^{1,2}, Li Jingxin¹, Li Jie¹, Chen Shi¹, Yao Zhihua³

(1. Department of Military Installations, Army Logistic University of PLA, Chongqing 401331, P.R. China; 2. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P.R. China; 3. Department of Airdrome Construction Engineering, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, P.R. China)

Abstract: Coral sand in island of South China Sea were biocemented by MICP method, unconfined compression tests of biocemented coral sand columns were conducted, and the damage constitutive model of biocemented coral sand columns under unconfined compression was proposed based on the theory of rock damage mechanics. The test and analysis results show that all unconfined compression strength of biocemented coral sand columns are more than 5 MPa, and the stress-strain curves of biocemented columns could be divided into approximate the compaction stage, elastic stage, plastic stage, failure and softening stage. Basing the theory of continuum damage mechanics and the assumption that the micro-unit strength of biocemented column obey Weibull distribution, the damage constitutive model under unconfined compression was established, and considering the characteristics of stress-strain curves. The model expression is piecewise function that made of empirical equation and damage constitutive equation. The rationality of model was preliminarily verified by tests data.

Keywords: biocemented coral sand columns; unconfined compression; damage; constitutive model

^{*} 收稿日期: 2018-04-06 (修改稿)

作者简介: 方祥位 (1975-), 男, 重庆铜梁人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事非饱和土与特殊土力学及岩土微生物技术研究。E-mail: fangxiangwei1975@163.com

基金项目: 国家自然科学基金 (51479208); 总后勤部基建营房部资助项目 (CY114C022); 国防科技项目基金 (2201059)

0 引言

微生物成矿学研究表明,某些特定碳酸盐矿化菌(如巴斯德芽孢杆菌)能够通过自身生命活动分解尿素生成碳酸根离子,与溶液环境中的钙离子快速结合生成碳酸钙沉淀,这一过程被称为微生物诱导碳酸盐沉淀(Microbially Induced Carbonate Precipitation,简称 MICP)^[1]。近年来,研究者发现 MICP 技术在岩土工程领域具有较好的应用前景,相关研究蓬勃发展,目前的研究成果主要集中于微生物固化砂土领域^[2]。方祥位等^[3-4]、欧益希等^[5-6]、李捷等^[7-9]率先利用 MICP 技术固化松散珊瑚砂,研究了菌液活性、溶液盐度及浓度配比、注入方式等对微生物固化珊瑚砂的影响规律,探讨了珊瑚砂的微生物固化机理,优化了固化工艺,初步研究了固化体的微观结构与基本力学特性等。在已有的研究成果中,有关珊瑚砂微生物固化体力学特性的分析还不够深入,特别是固化体本构模型方面仍未见报道。

连续介质损伤力学理论认为,材料内部存在诸多孔隙、裂纹等微小缺陷,在外荷载作用下将不断扩展合并,从而导致材料宏观力学性能的劣化,这一过程即为损伤演化^[10]。Kachanov 提出的“连续度”概念及 Lemaitre 提出的应变等效假设与“有效应力”概念,使得损伤演化在数学上的表征与计算得到简化,研究者得以自由选取不同的损伤变量,基于力学试验数据进行宏观唯象的损伤演化分析,各类岩土工程中的损伤本构模型应运而生^[11-13]。童小东等^[14]对水泥土进行了系列弹塑性损伤试验,得到了损伤关系曲线,探讨了水泥土的损伤机制。曹文贵等^[15]引入能够描述岩石微元强度的参量,基于岩石三轴试验结果建立了反映岩石破裂全过程的损伤软化本构模型。吴政等^[16]推导了岩石在单轴荷载作用下的损伤模型,讨论了岩石的临界损伤值对基本力学特性的影响。

珊瑚砂微生物固化体的应力-应变曲线具有明显的线弹性阶段,同时又会产生较大的塑性变形,因此其强度变形特性既有别于土又与岩石不同,很难用一般的线弹性或弹塑性模型描述其本构关系^[9]。考虑到珊瑚砂微生物固化体内部含有的大量孔隙,极易在荷载作用下发生损伤演化,从损伤力学的角度尝试建立本构模型便成为一条可行的思路。笔者分析了珊瑚砂微生物固化体的单轴受压应力-应变特性,运用损伤力学理论及基于

Weibull 分布的岩石微元强度理论建立了损伤本构模型,基于单轴抗压强度试验结果对模型进行初步验证,为深入认识珊瑚砂微生物固化体的工程力学特性和实际工程应用奠定基础。

1 试验方法

1.1 微生物固化试验材料

试验用珊瑚砂为我国南海某岛礁的陆域吹填珊瑚砂,主要成分为碳酸钙。为提高固化体强度均匀性,达到最佳固化效果,将其中的大块碎石与杂质挑出,蒸馏水冲洗后烘干,使用土工标准筛进行筛分后配制试样,其粒径组成如表 1 所示。

固砂用微生物选用从德国的国家菌种保藏中心购买的巴斯德芽孢杆菌(*Bacillus pasteurii*),将少量纯菌株加入 100 ml 液体培养基(配方:20 g/L 蛋白胨,5 g/L 氯化钠,20 g/L 尿素;调节 PH 值为 7.3)中,置于恒温(30℃)振荡培养箱中进行活化培养 48 h,菌液浑浊后进一步扩大培养得到脲酶活性约为 1.5 mmol/(L·min)的菌液,扩大培养得到的细菌液置于冷藏箱内在 4℃下保存,并在 10 d 内使用。底物溶液由浓度均为 2 mol/L 的尿素溶液与氯化钙溶液等体积混合配成。

表 1 试样粒径组成

Table 1 Partical gradation of specimens

粒径/ mm	2~5	1~2	0.5~1	0.25~0.5	0.075~0.25	<0.075
含量/ %	11.3	10.0	32.5	31.7	11.6	2.9

1.2 微生物固化试验

微生物固化试验装置如图 1 所示^[7,9]。试验时,将硅胶管插入楔形带孔橡胶塞孔中,并在橡胶塞四周缠上生料带(防止漏水)后插入模具的底部开口端,在试验模具底部放入 2 cm 厚的生化纤维棉,防止珊瑚砂通过橡胶塞塞孔流出;然后向试验模具中加入 330 g 珊瑚砂,装入模具后控制试样高度约 12 cm、干密度在 1.4 g/cm³左右;最后在珊瑚砂顶端放入 2 cm 厚的生化纤维棉,防止注入溶液时对珊瑚砂表面造成扰动。固化工艺为:首先由试样上端注入 100 ml 菌液,反复灌注 2~3 遍使菌体充分吸附于珊瑚砂颗粒表面;然后注入 200 ml 底物溶液,反复灌注 2~4 遍保证固化反应较为充分;更换菌液与底物溶液进行下次固化。为提高固化

均匀性,重复固化4次后将模具倒置,从原试样底部灌浆,重复固化2次确保原试样下端固化充分。珊瑚砂微生物固化体如图2所示。

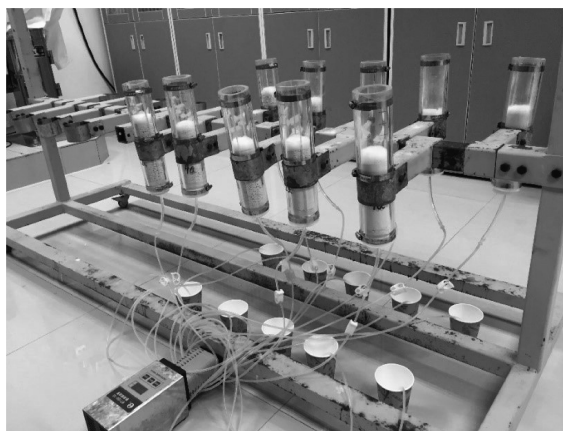


图1 试验装置

Fig.1 Test device

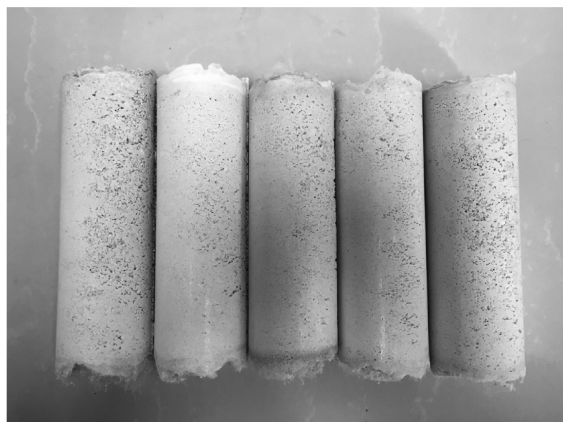


图2 珊瑚砂微生物固化体

Fig.2 Biocemented coral sand columns

1.3 单轴压缩试验

将试样烘干后切割打磨成直径50 mm、高100 mm的圆柱体,使用重庆科技学院的YSSZ-500A型岩石双轴流变测试仪进行单轴压缩试验,采用位移控制式加载,加载速率为0.1 mm/min,试验数据由试验机配套软件自动采集。

2 试验结果分析

珊瑚砂微生物固化体试样按干密度由小到大编号为U-1至U-5,其单轴受压应力-应变曲线如图3所示。为了便于数学分析,将曲线模型化如图4所示,应力-应变曲线可大致分为4个阶段:①OA段,固化体内孔隙被压密,应力-应变曲线斜率缓慢增大;②AB段,固化体产生线弹性变形,应力迅速增长至屈服极限B点;③BC段,固化体产生塑性变形,内孔隙与裂纹扩展加速,应力-应变曲线斜率

迅速减小直至达到强度极限C点;④CD段,固化体达到峰值强度后应变软化至残余强度。由于孔隙与裂纹的大量存在,珊瑚砂微生物固化体应力-应变曲线相较于岩石的最大区别在于压密阶段(OA段)较长,应变增长迅速而应力增长缓慢。

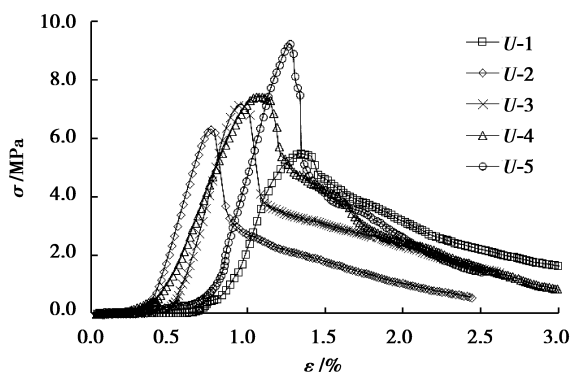


图3 珊瑚砂微生物固化体单轴应力-应变曲线

Fig.3 Stress-strain curves of biocemented coral sand columns under unconfined compression

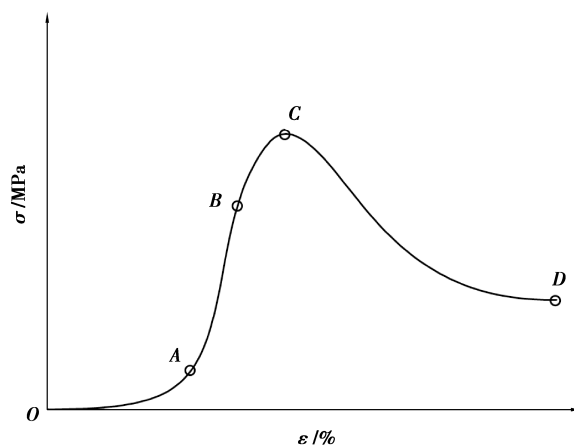


图4 应力-应变模型化曲线

Fig.4 Modeling stress-strain curve

从损伤力学的角度分析,OA段固化体内原生的孔隙被压密而产生“虚假变形”,并未有新的孔隙与裂纹产生,未发生损伤;AB段一般定义为线弹性变形阶段,实质上自A点后弹性模量开始小幅降低,表明已有细微损伤产生;BC段损伤演化迅速发展,模量急剧降低;CD段损伤进一步发展,内部裂隙大范围贯通。

3 损伤本构模型

3.1 模型基本形式

宏观上,损伤对材料变形特性的影响可通过弹性模量的衰减来表征^[10],即:

$$D_i = 1 - E_i/E_0 \quad (1)$$

式中: D_i 为材料任意 i 点的损伤变量; E_i 为材料受损后弹性模量; E_0 为材料无损伤弹性模量。

根据连续介质损伤力学中的应变等效假设,损伤并不改变材料的本构模型形式,将材料无损本构模型中的应力改为损伤后的有效应力即可得到损伤本构模型。据此,损伤本构模型的基本形式为:

$$\sigma_i = \varepsilon_i E_i = \varepsilon_i E_0 (1 - D_i) \quad (2)$$

式中: σ_i 、 ε_i 分别为材料在 i 点的应力与应变。本文将 A 点定义为损伤起始点,当 $\varepsilon_i \geq \varepsilon_A$ 时,采用式(2)作为损伤本构方程,当 $0 \leq \varepsilon_i < \varepsilon_A$ 时,根据试验数据拟合,本构方程由下式给出:

$$\sigma_i = m \varepsilon_i^2 \quad (3)$$

式中: m 为与固化体孔隙率及材料力学特性相关的经验参数。

3.2 损伤变量的定义与表征

为了克服岩石材料在宏观上的不连续性与各向异性,岩石统计损伤理论采用的方法是将岩石划分为无数个匀质微元,各微元强度满足虎克定律,且微元强度服从双参数的 Weibull 分布,其概率密度函数为^[15]:

$$p(F) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{F}{\alpha} \right)^{\beta-1} \exp \left[- \left(\frac{F}{\alpha} \right)^{\beta} \right] \quad (4)$$

式中: F 为微元强度的随机分布变量; α 、 β 为分布参数。

可用材料内部微元破坏的程度反应损伤演化的进程,设总微元数为 N_0 ,在 i 点已破坏的微元数为 N_i ,则损伤变量可定义为:

$$D_i = N_i / N_0 \quad (5)$$

从而,应力加载到 F 时破坏的微元总数为:

$$N_i(F) = \int_0^F N_i p(x) dx = N_i \left\{ 1 - \exp \left[- \left(\frac{F}{\alpha} \right)^{\beta} \right] \right\} \quad (6)$$

联立式(5)、式(6)可建立损伤演化方程:

$$D_i = 1 - \exp \left[- \left(\frac{F}{\alpha} \right)^{\beta} \right] \quad (7)$$

由于目前并没有适宜的珊瑚砂微生物固化体强度准则,考虑本试验应力状态为最简单的单轴压缩变形,采用轴向应变 ε_i 作为微元强度随机分布变量 F 的表征,即:

$$D_i = 1 - \exp \left[- \left(\frac{\varepsilon_i}{\alpha} \right)^{\beta} \right] \quad (8)$$

3.3 损伤本构模型的建立

联立式(2)、式(8)可得:

$$\sigma_i = E_0 \varepsilon_i \exp \left[- \left(\frac{\varepsilon_i}{\alpha} \right)^{\beta} \right] \quad (9)$$

式(9)对 ε_i 求导可得:

$$d\sigma_i / d\varepsilon_i = E_0 \left[1 - \beta \left(\frac{\varepsilon_i}{\alpha} \right)^{\beta} \right] \exp \left[- \left(\frac{\varepsilon_i}{\alpha} \right)^{\beta} \right] \quad (10)$$

图4中,应力-应变曲线上 A 点为线弹性变形阶段的起始点,因此可将 A 点的斜率作为固化体无损伤时的初始弹性模量 E_0 ,当 $\varepsilon_i = \varepsilon_A$ 时有:

$$1 = \left[1 - \beta \left(\frac{\varepsilon_A}{\alpha} \right)^{\beta} \right] \exp \left[- \left(\frac{\varepsilon_A}{\alpha} \right)^{\beta} \right] \quad (11)$$

式(11)两边取自然对数可得:

$$\left(\frac{\varepsilon_A}{\alpha} \right)^{\beta} = \ln \left[1 - \beta \left(\frac{\varepsilon_A}{\alpha} \right)^{\beta} \right] \quad (12)$$

在强度极限 C 点处斜率为0,当 $\varepsilon_i = \varepsilon_C$ 时有:

$$0 = E_0 \left[1 - \beta \left(\frac{\varepsilon_C}{\alpha} \right)^{\beta} \right] \exp \left[- \left(\frac{\varepsilon_C}{\alpha} \right)^{\beta} \right] \quad (13)$$

由式(13)可得:

$$1 - \beta \left(\frac{\varepsilon_C}{\alpha} \right)^{\beta} = 0 \quad (14)$$

式(14)整理后得:

$$\alpha = \beta^{\frac{1}{\beta}} \varepsilon_C \quad (15)$$

最后联立式(9)、式(12)、式(15),并令 $k = \varepsilon_A / \varepsilon_C$,得:

$$\beta = \frac{k}{\ln(1-k)} \quad (16)$$

$$\sigma_i = E_0 \varepsilon_i \exp \left[- \frac{1}{\beta} \left(\frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_C} \right)^{\beta} \right] \quad (17)$$

式(17)即为 $\varepsilon_i \geq \varepsilon_A$ 时的损伤本构方程,模型参数 β 与应变值 ε_A 与 ε_C 相关。

至此得到完整的珊瑚砂微生物固化体单轴受压损伤本构模型:

(1) $0 \leq \varepsilon_i < \varepsilon_A$:

$$\sigma_i = m \varepsilon_i^2 \quad (18)$$

(2) $\varepsilon_i \geq \varepsilon_A$:

$$\sigma_i = E_0 \varepsilon_i \exp \left[- \frac{1}{\beta} \left(\frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_C} \right)^{\beta} \right] \quad (19)$$

$$\beta = \frac{k}{\ln(1-k)} \quad (20)$$

式中: m 为经验参数; $k = \varepsilon_A / \varepsilon_C$ 。

3.4 模型初步验证与分析

利用建立的模型对珊瑚砂微生物固化体单轴压缩试验(U-3、U-4和U-5)应力-应变曲线进行模拟分析,模型参数如表2所示,拟合结果如图5所示。

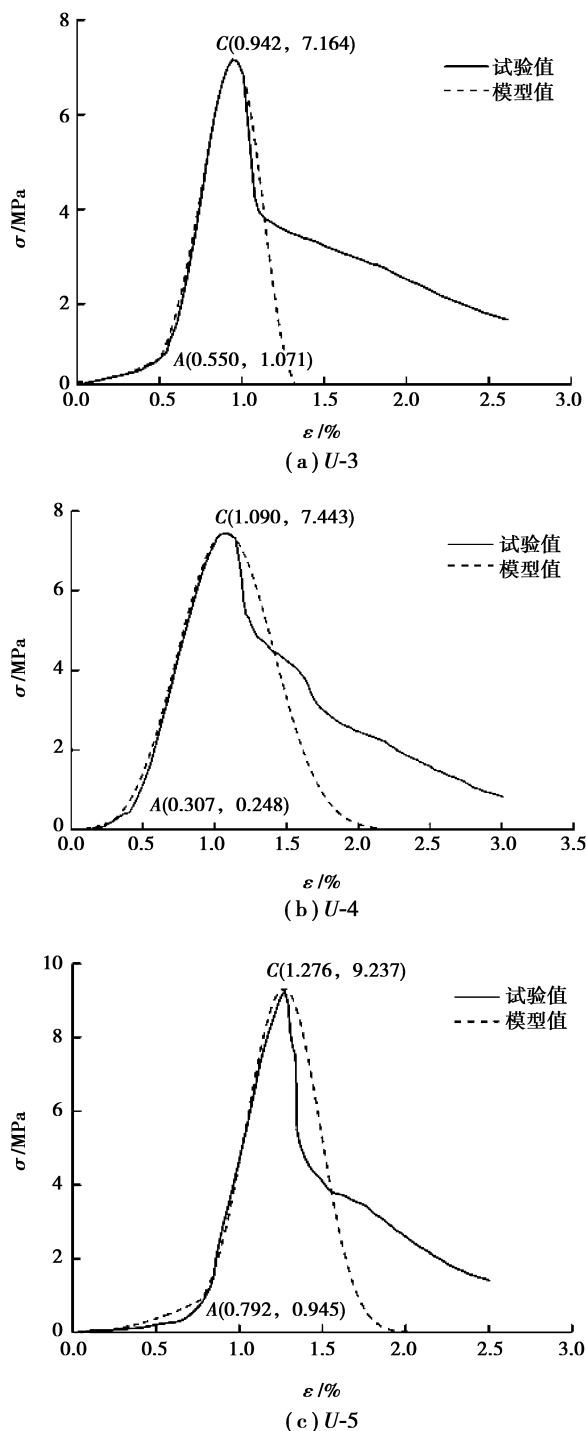


图5 试验曲线与模型曲线拟合

Fig.5 Comparison of test curves and model curves

由图5试验拟合结果可以看出,本文建立的损伤本构模型有以下特点:

(1) 初始压密阶段采用经验方程进行拟合,模型参数 m 为与固化体孔隙率及材料力学特性相关的经验参数。

表2 损伤本构模型参数

Table 2 Parameters of damage constitutive model

试样编号	m	ε_A	ε_C	β
U-3	2.386	0.550	0.942	-0.666
U-4	2.512	0.307	1.090	-0.851
U-5	1.545	0.792	1.276	-0.640

(2) 损伤本构模型参数 ε_C 、 β 的计算以线弹性阶段起点 A 与强度极限 C 点的应变值为依据,因此,模型在 AC 段具有较高的拟合度。

(3) 实际拟合过程中, A 点的选取标准为该点斜率能够尽可能准确地代表固化体的初始弹性模量,因此人为选取影响了精确性。

(4) 由于固化体达到强度极限后发生了大面积崩裂及碎块脱落,实际已无法满足连续介质损伤力学理论及基于 Weibull 分布的岩石微元强度理论假说,因此模型无法准确反映固化体在峰值应力后的软化及残余强度特点,导致与试验值的整体拟合度不高。

4 结论

(1) 利用 MICP 技术得到的珊瑚砂微生物固化体无侧限抗压强度高,均大于 5 MPa,固化体单轴受压应力-应变曲线可大致分为压密阶段、弹性阶段、塑性阶段与破坏软化阶段 4 个阶段。

(2) 基于连续介质损伤力学理论,假定固化体微元强度服从双参数的 Weibull 分布,考虑应力-应变曲线特征进行参数简化后建立了单轴压缩条件下的损伤本构模型。模型采用经验拟合方程与损伤本构方程结合的分段函数形式,并用试验资料初步验证了模型的合理性。

参考文献 (References)

- [1] Chu J, Ivanov V, Naeimi M, et al. Optimization of calcium-based bioclogging and biocementation of sand [J]. Acta Geotechnical, 2014, 9(2): 277-285.
- [2] DeJong J T, Soga K, Banwart S A, et al. Soil engineering in vivo: Harnessing natural biogeochemical systems for sustainable, multi-functional engineering

- solutions[J]. *Journal of the Royal Society Interface*, 2011, 8(54): 1-15.
- [3] 方祥位,申春妮,楚剑,等.微生物沉积碳酸钙固化珊瑚砂的试验研究[J]. *岩土力学*, 2015, 36(10): 2773-2779. (Fang Xiangwei, Shen Chunni, Chu Jian, et al. Test of coral sand improvement with microbially induced calcium carbonate precipitation technology[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(10): 2773-2779. (in Chinese))
- [4] 方祥位,楚剑,申春妮,等.利用微生物固化松散珊瑚砂的方法[P].中国专利:201410050192.7,2014. (Fang Xiangwei, Chu Jian, Shen Chunni, et al. The method of biocementation of coral sand[P]. China Patent, 201410050192.7, 2014. (in Chinese))
- [5] 欧益希,方祥位,张楠,等.溶液盐度对微生物固化珊瑚砂的影响[J]. *后勤工程学院学报*, 2016, 32(1): 78-82. (Ou Yixi, Fang Xiangwei, Zhang Nan, et al. Influence of solution salinity on microbial biocementation of coral sand[J]. *Journal of Logistical Engineering University*, 2016, 32(1): 78-82. (in Chinese))
- [6] 欧益希,方祥位,申春妮,等.颗粒粒径对微生物固化珊瑚砂的影响[J]. *水利与建筑工程学报*, 2016, 14(2): 35-39. (Ou Yixi, Fang Xiangwei, Shen Chunni, et al. Influence of particle sizes of coral sand on bio-cementation[J]. *Journal of Water Resources and Architectural Engineering*, 2016, 14(2): 35-39. (in Chinese))
- [7] 李捷,方祥位,申春妮,等.含水率对珊瑚砂微生物固化体力学特性影响研究[J]. *工业建筑*, 2016, 46(12): 93-97. (Li Jie, Fang Xiangwei, Shen Chunni, et al. Influence of moisture content on mechanical properties of biocemented coral sand columns[J]. *Industrial Construction*, 2016, 46(12): 93-97. (in Chinese))
- [8] 李捷,方祥位,张伟,等.菌液脲酶活性对珊瑚砂微生物固化效果的影响[J]. *后勤工程学院学报*, 2016, 32(6): 88-91, 96. (Li Jie, Fang Xiangwei, Zhang Wei, et al. Influence of activity of bacteria liquid on coral sand biocementation[J]. *Journal of Logistical Engineering University*, 2016, 32(6): 88-91, 96. (in Chinese))
- [9] 李捷.珊瑚砂微生物固化体强度及变形特性研究[D].重庆:后勤工程学院,2017. (Li Jie. Study on strength and deformation properties of biocemented coral sand columns[D]. Chongqing: Logistical Engineering University, 2017. (in Chinese))
- [10] 谢和平.岩石、混凝土损伤力学[M].徐州:中国矿业大学出版社,1990. (Xie Heping. Rocks and concrete damage mechanics[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 1990. (in Chinese))
- [11] Kachanov M, Eric M. Interaction of a crack with certain microcrack arrays[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 1986, 25(5): 625-636.
- [12] Lemaitre J. How to use damage mechanics[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 1984, 80(2): 233-245.
- [13] Krajcinovic D, Silva M A G. Statistics aspects of the continuous damage theory[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 1987, 23(6): 733-750.
- [14] 童小东,龚晓南,蒋永生.水泥土的弹塑性损伤试验研究[J]. *土木工程学报*, 2002, 35(4): 82-85. (Tong Xiaodong, Gong Xiaonan, Jiang Yongsheng. Experimental study on elasto plastic damage of cemented soil[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2002, 35(4): 82-85. (in Chinese))
- [15] 曹文贵,赵明华,刘成学.基于Weibull分布的岩石损伤软化模型及其修正方法研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(19): 3226-3231. (Cao Wengui, Zhao Minghua, Liu Chengxue. Study on the model and its modifying method for rock softening and damage based on Weibull random distribution[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(19): 3226-3231. (in Chinese))
- [16] 吴政,张承娟.单向荷载作用下岩石损伤模型及其力学特性研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 1996, 15(1): 55-61. (Wu Zheng, Zhang Chenjuan. Investigation of rock damage model and its mechanical behavior[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1996, 15(1): 55-61. (in Chinese))