

文章编号:1007-9629(2021)02-0254-06

胶凝砂砾石材料的细观滞回模型

黄 虎^{1,2}, 李 坡¹, 张献才^{1,2}

(1. 华北水利水电大学 水利学院, 河南 郑州 450045;

2. 华北水利水电大学 河南省水工结构安全工程技术研究中心, 河南 郑州 450045)

摘要: 为充分认识胶凝砂砾石(CSG)材料的动力学特性,更好地揭示其动态本构关系,基于经典 Preisach-Mayergoyz(PM)细观滞回模型,结合 CSG 材料的非线性滞后特性,计入塑性残余应变和循环次数的影响,建立了 CSG 材料的细观滞回模型.将改进后的模型与试验滞回曲线进行对比分析后可知,该模型不仅可以反映 CSG 材料在循环荷载下的非线性滞后特征,还可以预测循环荷载下 CSG 材料的疲劳寿命.

关键词: 胶凝砂砾石材料;滞回曲线;细观滞回模型;疲劳寿命

中图分类号:TV43

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2021.02.004

Mesoscopic Hysteretic Model of Cemented Sand and Gravel Material

HUANG Hu^{1,2}, LI Po¹, ZHANG Xiancai^{1,2}

(1. College of Water Resources, North China University of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Zhengzhou 450045, China; 2. Henan Provincial Hydraulic Structure Safety Engineering Research Center, North China University of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Zhengzhou 450045, China)

Abstract: In order to fully understand the dynamic characteristics of cemented sand and gravel(CSG) material and reveal its dynamic constitutive relationship better, based on the classical Preisach Mayergoyz(PM) mesoscopic hysteretic model, combined with the nonlinear hysteresis characteristic of CSG material, considering the influence of plastic residual strain and cycle number, the elastic-plastic mesoscopic hysteretic model of CSG material was obtained. By comparing the hysteretic curve of the improved mesoscopic model with the test curve, it can be seen that this model can reflect the hysteretic characteristics of the CSG material, and the fatigue life of CSG material under cyclic load can be predicted by the model.

Key words: cemented sand and gravel material; hysteretic curve; mesoscopic hysteretic model; fatigue life

胶凝砂砾石(CSG)材料是一种新型水泥基胶结筑坝材料,由胶凝材料、水、粗细骨料按照一定的配合比搅拌而成,其力学性质与构成成分及结构特点存在密切关系^[1].由于 CSG 中胶凝材料含量少,骨料表面形状不规则,砂浆不能完全填充骨料间的缝隙,导致胶结后的材料内部存在空隙.冯炜^[2]研究发现,在低围压下,CSG 材料的粗骨料在破坏过程中保持自身的完整性,变形量主要来自材料自身的空隙和胶凝材料的失效.从细观角度出发,可以将材料

内部的胶凝材料看作不同数量的细观结构体,其数量的多少直接影响材料的整体力学特性. Guyer 等^[3]将弹性性质近乎刚性的颗粒和可以产生弹性变形的黏结层决定的物质称为非线性细观弹性(NME)材料,如常见的泥土、沙子、混凝土等类似复合材料,并认为 NME 材料是由大量滞后细观弹性单元构成的^[4].结合 CSG 材料的组成和结构特点,可将 CSG 材料归入 NME 材料的范畴.

近年来,随着国内外学者对 CSG 坝的深入研

收稿日期:2019-11-07; 修订日期:2019-12-13

基金项目:国家重点研发计划(2018YFC0406800);河南省科技攻关项目(192102310224);河南省高等学校重点科研项目(20B570001)

第一作者:黄 虎(1981—),男,河南兰考人,华北水利水电大学副教授,硕士生导师,博士. E-mail:huanghu1006@163.com

究,结合静态力学试验,在弹性理论的基础上,提出了诸多本构模型^[5-10],但由于受到许多因素的限制,CSG材料动态力学问题的研究尚处于起步阶段,关于其有效的动态本构模型也鲜有人提及.作为一种新型的筑坝材料,由于目前缺乏合理反映CSG材料动态力学性能的本构模型及计算方法,制约了CSG坝向高坝方向的发展和应用.本文从细观角度出发,基于经典Preisach-Mayergoyz (PM)细观滞回模型^[11-20],建立了CSG材料的细观滞回模型,从弹塑性和细观角度揭示了CSG材料的非线性滞后特征,为进一步深入研究CSG坝的抗震问题提供理论依据.

1 CSG材料的试验滞回曲线

CSG试件的水胶比¹⁾ (m_w/m_B)为1.0,含砂率为20%,表观密度为2 350 kg/m³,尺寸为 $\phi 150 \times 300$ mm,养护龄期为28 d,其配合比见表1.试验的上限循环应力(σ_{up})控制在其静态峰值应力的75%

以下,选取3组应力水平,以等幅正弦波的方式施加循环荷载,频率为1.0 Hz,直到试件破坏^[21].

表1 CSG试件配合比
Table 1 Mix proportions of CSG specimens kg/m³

Sample	Cement	Fly ash	Sand	Water	Aggregate	
					20-40 mm	5-20 mm
S1	40	50	434	90	1 042	694
S2	50	40	434	90	1 042	694
S3	60	30	434	90	1 042	694

循环加卸载过程中,应变分为初始、等速和加速3个阶段.限于篇幅限制,本文仅给出了不同配合比CSG试件的典型滞回曲线,如图1所示,图中“L02”表示循环加卸载2次,其他类推.由图1可见:循环荷载作用下,CSG试件的滞回环为下部不闭合的新月形,不闭合程度反映了单个滞回环塑性变形的大小,且随着循环次数的增加呈大-小-大的变化趋势^[21];单个滞回环间的塑性变形相差不大.

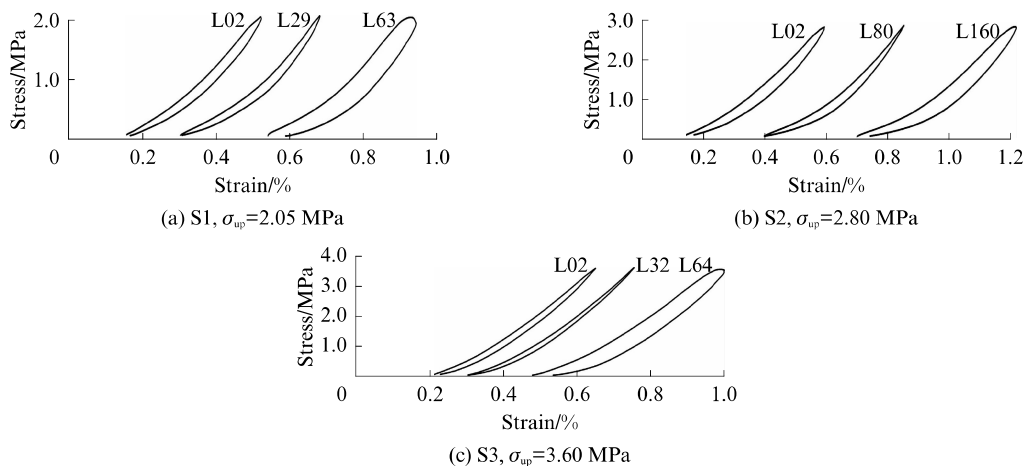


图1 不同配合比CSG试件的典型滞回曲线

Fig. 1 Typical hysteresis loop of CSG specimens with different mix proportions

2 CSG材料的细观滞回理论模型

随着人们对PM细观滞回模型理论研究的不断深入,PM细观滞回模型已广泛应用于岩石、混凝土等细观研究领域^[12-18].为了描述砂岩的非线性滞后特性,把砂岩看作一种具有细观结构的NME材料,并认为砂岩系统是由一定数量的具有相同分布规律和滞后特性的小单元组成的PM细观滞回模型,在外力作用下,所有小单元自身的变化影响砂岩系统整体的变化,系统具有非线性滞后效应.

经典PM细观滞回模型认为,NME材料由一定数量的滞后细观单元(HMEU)组成,且每个细观单元只有张开、闭合2种状态,以此来模拟材料内部微裂纹的张开和闭合^[19-20].假定单个滞后细观单元张开状态时尺寸为 l_0 ,对应的应力为张开应力 σ_0 ;闭合状态时其尺寸为 l_c ,对应的应力为闭合应力 σ_c .NME材料单向受压加载过程中,材料内部的部分HMEU状态由张开转变为闭合,几何尺寸由 l_0 减小至 l_c ,且随应力增加,HMEU闭合数量越来越多,NME材料的应变也越来越大.反之,卸载时,材料

1)文中涉及的水胶比、含砂率等均为质量比或质量分数.

内部的部分 HMEU 状态由闭合转变为张开,几何尺寸由 l_c 增大至 l_0 ,且随着应力减小,HMEU 张开数量越来越多,NME 材料的应变也越来越小.因此,NME 材料可看作加卸载过程中张开单元和闭合单元的混合体,材料的应变取决于加卸载过程中闭合单元的数量与单元总数的比例以及变形时张开单元与闭合单元几何尺寸差($l_c - l_0$).

假定 NME 材料中所有滞后细观单元的张开和闭合长度相同,且滞后细观单元之间是串联的^[4].也就是说,经过宏观变形后,材料的几何长度等于所有细观单元的几何长度之和.宏观材料的应变 ϵ 可表示为:

$$\epsilon = (\hat{L}_c - \hat{L}_0) / \hat{L}_0 = -\alpha n \quad (1)$$

$$\hat{L}_c = l_0 N_c + (l_c - l_0) N_c \quad (2)$$

$$\hat{L}_0 = l_0 N_c \quad (3)$$

式中: $\hat{L}_c$ 为加载过程中试件的几何长度; $\hat{L}_0$ 为未加载状态下试件的几何长度; $\alpha = (l_0 - l_c) / l_0$; n 为闭合 HMEU 数量 N_c 与总 HMEU 数量 N_T 的比值.

由式(1)可知,试件的应变 ϵ 与 n 呈线性关系,而闭合的滞后细观单元的数量与加卸载过程中的应力大小是相关的.以张开应力 σ_0 和闭合应力 σ_c 为特

征值来表征 HMEU,从而构建 PM 细观滞回模型.经典细观单元的 PM 细观滞回模型分布函数为:

$$\begin{cases} \sigma_c = A r_c^\zeta \\ \sigma_0 = \sigma_c r_0^\eta \end{cases} \quad (4)$$

式中: A 为试验参数,其物理意义为某种 NME 材料的极限强度; r_0, r_c 为 $[0, 1]$ 之间的随机数; ζ, η 为形态参数.

根据试验结果,在经典 PM 细观滞回模型的基础上,计入材料的塑性特性,并将加载方式由单次循环改为多次循环加载与卸载,进而得到适合 CSG 材料的细观滞回理论模型.该过程需要引入以下 3 个假定条件:(1)所有细观单元初始状态下的张开长度、闭合长度均相等,且闭合长度一直保持不变;(2)材料破坏之前,宏观应变由弹性应变和塑性应变两部分组成;(3)整个循环过程中,材料最大应变与累积残余塑性应变比值一定,且单次循环内的塑性残余应变相同.考虑到 CSG 材料的应力应变的滞回特性,细观单元在经历张开-闭合、闭合-张开历程后,细观单元的张开长度不等于初始状态时的细观单元长度,因此在整个循环过程中引入循环次数.细观单元循环加卸载过程示意图见图 2.

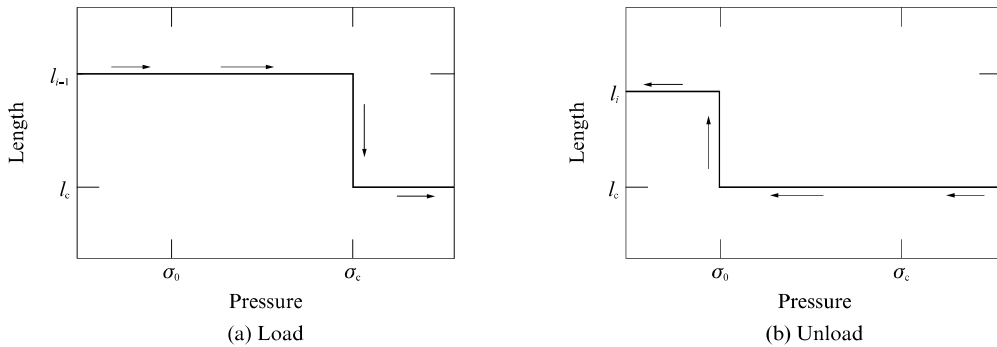


图 2 细观单元循环加卸载过程示意图

Fig. 2 Schematic diagram of HMEU under load and unload cycle process

根据图 2 中的循环加卸载过程,可推导出第 i 次循环过程中受载状态为 j ($j=1$ 表示加载, $j=2$ 表示卸载)的细观单元应变 ϵ_{ij} 为:

$$\epsilon_{ij} = (l_M - l_c) / l_M \quad \begin{cases} j=1, M=i-1 \\ j=2, M=i \end{cases} \quad (5)$$

式中: l_M 为第 i 次循环加卸载过程中细观单元长度.

试件的宏观应力-应变关系为:

$$j=1 \quad \epsilon_{i1}(i, N_c) = [L_{i1}(i, N_c) - L_{i1}(i, 0)] / L_{i1}(i, 0) \quad (6)$$

$$j=2 \quad \epsilon_{i2}(i, N_c) = [L_{i2}(i, N_c) - L_{i2}(i, 0)] / L_{i2}(i, 0) \quad (7)$$

式中: $L_{i1}(i, N_c)$ 为第 i 次循环加载过程中试件的几

何长度; $L_{i1}(i, 0)$ 为第 i 次循环加载过程中试件的初始长度; $L_{i2}(i, N_c)$ 为第 i 次循环卸载过程中试件的几何长度; $L_{i2}(i, 0)$ 为第 i 次循环卸载过程中试件的初始长度.

$$L_{i1}(i, N_c) = l_{i-1} \bar{N}_c + l_0 (N_T - \bar{N}_c) + (l_c - l_{i-1}) N_c \quad (8)$$

$$L_{i1}(i, 0) = l_{i-1} \bar{N}_c + l_0 (N_T - \bar{N}_c) \quad (9)$$

$$L_{i2}(i, N_c) = l_c \bar{N}_c + l_0 (N_T - \bar{N}_c) + (l_i - l_c) N_c \quad (10)$$

$$L_{i2}(i, 0) = l_c \bar{N}_c + l_0 (N_T - \bar{N}_c) \quad (11)$$

式中: l_{i-1}, l_i 分别为第 $i, i-1$ 次循环后细观单元张开几何尺寸; $\bar{N}_c$ 为等幅循环加载时试件内参与张开

闭合的细观单元总数量.

令 $\bar{A} = l_c / l_0$, $\beta = \epsilon_s / (N_T N)$, 则有 $l_i = l_0 (1 - \beta)^i$, 其中: β 为塑变单位系数, 表示单个细观单元 1 次循环中的塑性残余变量; ϵ_s 为动载循环试件的塑性残余应变总量; N 为材料疲劳寿命(次数).

由式(6)、(7)可推导计入塑性残余应变的滞回环应变表达式:

$$\begin{cases} \ddot{\epsilon}_{i1}(i, N_c) = \alpha_{i1} N_c \\ \ddot{\epsilon}_{i2}(i, N_c) = \alpha_{i2} N_c \end{cases} \quad (12)$$

$$\alpha_{i1} = \frac{\bar{A} - (1 - \beta)^{i-1}}{N_T + \bar{N}_c [(1 - \beta)^{i-1} - 1]} \quad (13)$$

$$\alpha_{i2} = \frac{(1 - \beta)^i - \bar{A}}{N_T + (\bar{A} - 1) \bar{N}_c} \quad (14)$$

式中: α_{ij} 为第 i 次循环受载状态为 j 时的应变量.

3 结果分析

由式(1)、(4)和(12)可知, 要想得到合理的 CSG 材料滞回环曲线, 必须选定合理的模型参数. 根据前述分析, 本文取 $N_T = 2\ 500$; σ_{up} 与试验设计方案有关; ϵ_s 、 β 可根据不同试验方案结果确定; ζ 和 η 可以结合试验应力应变曲线确定, 且不同配合比方案下的取值也不同. 限于篇幅, 本文仅对 CSG 材料

每种配合比下选取 1 个上限循环应力进行对比分析. CSG 材料的细观滞回模型参数取值见表 2.

表 2 CSG 材料的细观滞回模型参数
Table 2 Meso hysteretic model parameters of CSG materials

Sample	σ_{up}/MPa	N_T	ζ	η	$\epsilon_s/\%$	β
S1	2.05	2 500	1.70	0.25		
S2	2.80	2 500	1.50	0.23	0.4	2.5×10^{-6}
S3	3.60	2 500	1.48	0.12		

不同配合比 CSG 材料对应的细观单元空间分布规律见图 3. 根据理论分析结果, 不同配合比方案下, 随着水泥含量的增大, ζ 、 η 值逐渐减小. 由图 3 可见: 细观单元分布主要集中在对角线以下; 随着水泥含量的增加, 细观单元在对角线的集中程度越大; 沿着对角线从 B 到 C, 水泥含量不同, 集中程度也不同, 随着水泥含量的增大, B 点集中分布程度减小, 而 C 点集中分布程度明显增大. 细观单元分布主要以沿对角线分布为主, 说明细观单元的张开应力和闭合应力差值较小; 水泥含量越大, 二者的差值越小, 说明细观单元易于闭合, 从材料的宏观角度来看, 说明水泥含量越小, 材料越易于出现开裂.

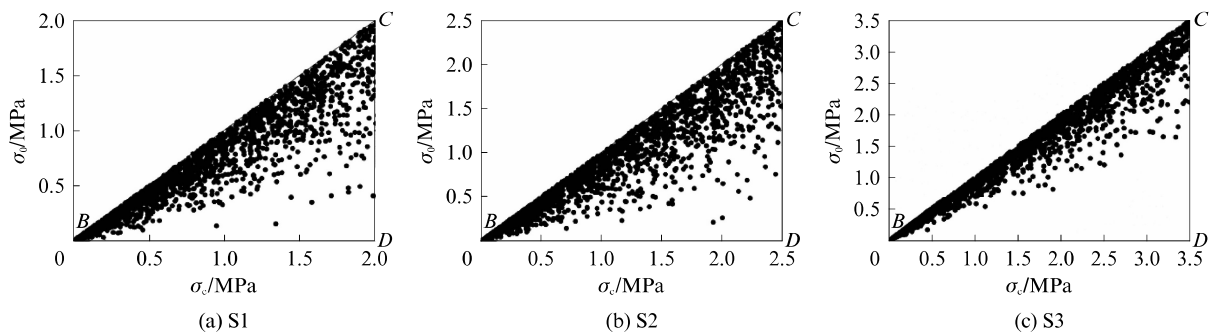


图 3 不同配合比 CSG 材料对应的细观单元空间分布规律

Fig. 3 Spatial distribution of HEMU to CSG material with different mix proportions

根据式(12)和表 2, 选取不同配合比、不同阶段的 CSG 试件的典型滞回环进行分析, CSG 试件的理论与试验滞回曲线对比见图 4. 由图 4 可见: 滞回环为下部不闭合的新月型, 很好地反映出了 CSG 材料在循环荷载作用下的滞后特性; 由于塑性残余变形的存在, 随着循环次数的增大, 理论计算结果下的滞回环逐渐向应变增大的方向发展; 理论计算结果与试验结果吻合较好, 理论结果基本反映了 CSG 材料在循环荷载作用下的应力-应变分布规律.

从单个滞回环的模拟精度来看, 虽然理论结果与试验结果存在一定的差异, 但从反映 CSG 材料在循环荷载作用下的整体特性来看, 理论结果与试验

结果差异并不大. 由于受到材料内部初始空隙结构的影响, 不同阶段的滞回环形状存在一定的差异, 主要体现在滞回环顶部的荷载反转处, 而理论分析结果无法反映这一点; 同时受到试验设备的限制, 试验过程中卸载应力未完全恢复至 0, 而理论结果弥补了试验在这方面的不足. 对于同一试件而言, 由于理论分析中采用相同的细观模型参数, 细观单元张开、闭合数目相同, 故滞回环形状在整个循环过程中基本保持不变. 而材料内部的裂缝开展数量在试验过程中是变化的, 特别是在破坏前的 1 个循环, 滞回环面积突然增大. 通过对材料设定统一的破坏标准—最大应变值, 可保证模型计算结果与试验结果破坏

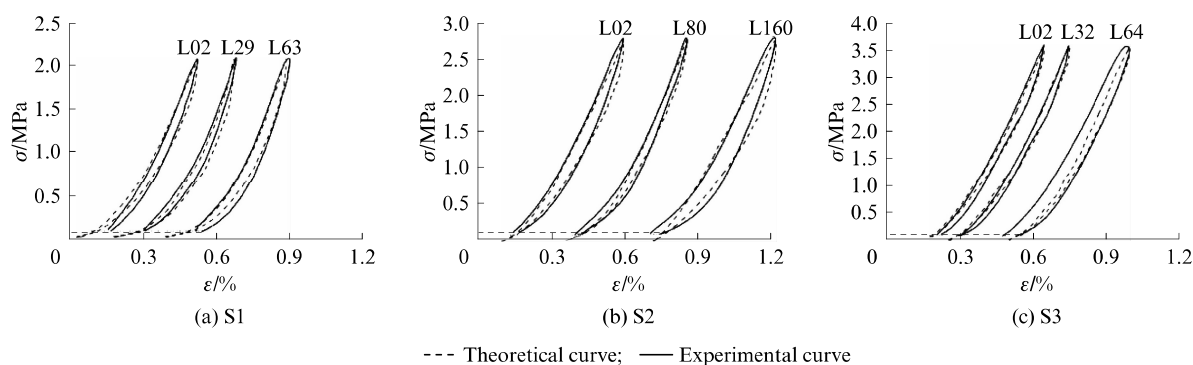


图4 CSG试件的理论与试验滞回曲线对比

Fig. 4 Comparison between theoretical and experimental hysteretic curves of CSG specimens

前1个滞回环的最大应变值保持一致,塑性残余应变累积值一致,进而保证具有相同的疲劳循环次数,故该模型可实现对循环荷载下CSG材料疲劳寿命的预测。

4 结论

(1)结合经典PM细观滞回模型,计入循环次数及塑性残余应变的影响,建立了CSG材料的细观滞回模型。

(2)通过对比发现,CSG的模型计算与试验滞回曲线基本吻合,该模型能反映CSG材料在循环荷载作用下的非线性滞后特征,进而可以对其进行疲劳寿命分析。

参考文献:

- [1] 贾金生,马锋玲,冯伟,等.胶凝砂砾石配合比设计和防渗保护层研究[C]//中国水利学会水工结构专业委员会第十次年会论文集.南宁:中国大坝协会,2012:1-6.
JIA Jinsheng, MA Fengling, FENG Wei, et al. Mix proportion design of cemented sand gravel and research on impervious protective layer[C]//Proceedings of the 10th Annual Meeting of Hydraulic Structure Professional Committee of China Water Conservancy Society. Nanning: China Dam Association, 2012:1-6. (in Chinese)
- [2] 冯伟.胶凝砂砾石坝坝填材料特性研究与工程应用[D].北京:中国水利水电科学研究院,2013.
FENG Wei. Research and engineering application of material characteristics of cemented sand gravel dam[D]. Beijing: China Academy of Water Conservancy and Hydropower Research, 2013. (in Chinese)
- [3] GUYER R A, JOHNSON P A. Nonlinear mesoscopic elasticity: Evidence for a new class of materials[J]. Physics Today, 1999, 52: 30-36.
- [4] MCCALL K R, GUYER R A. Equation of state and wave propagation in hysteretic nonlinear elastic materials[J]. Journal of Geophysical Research, 1994, 99(B12): 23887-23897.

- [5] 何蕴龙,刘俊林,李建成. Hardfill 筑坝材料应力-应变特性与本构模型研究[J]. 四川大学学报, 2011, 43(6): 40-47.
HE Yunlong, LIU Junlin, LI Jiancheng. Research on stress-strain characteristics and constitutive model of Hardfill dam materials[J]. Journal of Sichuan University, 2011, 43(6): 40-47. (in Chinese)
- [6] 孙明权,杨世锋,张镜剑.超贫胶结材料本构模型[J]. 水利水电科技进展, 2017, 27(3): 35-37.
SUN Mingquan, YANG Shifeng, ZHANG Jingjian. Constitutive model of ultra poor cementitious materials[J]. Progress in Water Conservancy and Hydropower Science and Technology, 2017, 27(3): 35-37. (in Chinese)
- [7] 孙明权,刘运红,贺懋茂.非线性K-G模型对胶凝砂砾石材料的适应性[J]. 人民黄河, 2013, 35(7): 92-97.
SUN Mingquan, LIU Yunhong, HE Maomao. Adaptability of nonlinear K-G model to cemented sand gravel material[J]. People's Yellow River, 2013, 35(7): 92-97. (in Chinese)
- [8] 吴孟喜,杜斌,姚元成,等.筑坝硬填料三轴试验及本构模型研究[J]. 岩土力学, 2013, 32(8): 2241-2249.
WU Mengxi, DU bin, YAO Yuancheng, et al. Triaxial test and constitutive model study of dam filling materials[J]. Geotechnical Mechanics, 2013, 32(8): 2241-2249. (in Chinese)
- [9] 蔡新,杨杰,郭兴文,等.一种胶凝砂砾石坝坝料非线性K-G-D本构新模型[J]. 河海大学学报, 2014, 42(6): 491-496.
CAI Xin, YANG Jie, GUO Xingwen, et al. A new nonlinear K-G-D constitutive model of cemented sand gravel dam material[J]. Journal of Hehai University, 2014, 42(6): 491-496. (in Chinese)
- [10] HUANG H, ZHANG X C. Failure mode analysis of cemented sand and gravel material dam[J]. Science of Advanced Materials, 2018, 10(9): 1286-1295.
- [11] MAYERGOYZ I D. Mathematical models of hysteresis[J]. Physical Review Letters, 1986, 56(15): 1518-1521.
- [12] 关晶波,王建祥,赵永红,等.滞后细观模型在岩石力学中的应用[J]. 力学进展, 2004, 34(3): 349-359.
GUAN Jingbo, WANG Jianxiang, ZHAO Yonghong, et al. Application of meso model with hysteresis in rock mechanics[J]. Progress in Mechanics, 2004, 34(3): 349-359. (in Chinese)

- [13] 席道瑛,王鑫,陈运平.描写岩石非线性弹性滞后和记忆的宏观模型[J].岩石力学与工程学报,2005,24(13):2212-2219.
XI Daoying, WANG Xin, CHEN Yunping. Macroscopic model describing nonlinear elastic lag and memory of rock[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(13): 2212-2219. (in Chinese)
- [14] 陈运平,刘干斌,姚海林.岩石滞后非线性弹性模拟的研究[J].岩土力学,2006,27(3):341-347.
CHEN Yunping, LIU Ganbin, YAO Hailin. Study on nonlinear elastic simulation of rock lag[J]. Geotechnical Mechanics, 2006, 27(3): 341-347. (in Chinese)
- [15] 席道瑛,徐松林,李廷,等.岩石中微细观结构对外力和温度响应的概率研究[J].岩石力学与工程学报,2007,26(1):15-21.
XI Daoying, XU Songlin, LI Ting, et al. Probability study on the response of micro structure in rock to external force and temperature[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(1): 15-21. (in Chinese)
- [16] VAKHNENKO V O, VAKHNENKO O O, TENCATE J A, et al. Modeling of stress-strain dependences for Berea sandstone under quasistatic loading[J]. Physical Review B, 2007, 76(18):184108.
- [17] 杜赞,席道瑛,徐松林,等.岩石非线性细观响应中孔隙液体的影响[J].岩石力学与工程学报,2010,29(1):209-216.
DU Yun, XI Daoying, XU Songlin, et al. The effect of pore fluid on the nonlinear meso response of rock[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(1): 209-216. (in Chinese)
- [18] 王新宇.准静态条件下岩石和混凝土类材料非线性弹性行为研究[D].西安:西安建筑科技大学,2016.
WANG Xinyu. Nonlinear elastic behavior of rock and concrete materials under quasi-static conditions[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2016. (in Chinese)
- [19] HOLCOMB D J. Memory, relaxation, and microfracturing in dilatant rock[J]. Journal of Geophysical Research, 1981, 86(B7):6235-6248.
- [20] GUYER R A, MCCALL K R, BOITNOTT G N. Hysteresis, discrete memory, and nonlinear wave propagation in rock: A new paradigm [J]. Physical Review Letters, 1995, 74(17):3491.
- [21] 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 gravel materials under cyclic loading[J]. Journal of Building Materials, 2018, 21(5): 739-748. (in Chinese)

(上接第 253 页)

- [12] 袁润章.胶凝材料学[M].武汉:武汉工业大学出版社,1996:1-5.
YUAN Runzhang. Cementitious material science [M]. Wuhan: Wuhan University of Technology Press, 1996: 1-5. (in Chinese)
- [13] KALTENBACH R, ROBIN D, DOERTE S, et al. Links between nanoscale and macroscale surface properties of natural root mucilage studied by atomic force microscopy and contact angle[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2018, 516: 446-455.
- [14] 路锋,聂江涛.甲基硅酸钠(有机硅防水剂)的应用研究[J].江西化工,1995(2):31-34.
LU Feng, NIE Jiangtao. Application research of sodium methyl silicate(silicone waterproofing agent) [J]. Jiangxi Chemical Industry, 1995(2): 31-34. (in Chinese)
- [15] BENEDIKT S, KARL M, GERHARD S, et al. A mechanism to explain the creep behavior of gypsum plaster[J]. Cement and Concrete Research, 2017, 98:122-129.
- [16] FENG Q, DENG Y H, KIM H, et al. Observation and analysis of gypsum particleboard using SEM[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Materials Science), 2007, 22(1):44-47.
- [17] LI G Z, LI J Q, GUAN R F, et al. Investigation of the water resistance of gypsum materials[J]. ZKG International, 2003, 56(8/9):87-93.