



基于核磁共振试验的 粉砂岩干湿循环损伤演化研究 *

李文良¹, 张 铁¹, 李佳林², 罗 刚³, 周建伟⁴

(1. 四川省交通勘察设计研究院有限公司, 四川 成都 610017; 2. 四川中部设施建设有限公司, 四川 绵阳 621011;
3. 西南交通大学 地球科学与环境工程学院, 四川 成都 610036; 4. 川藏铁路有限公司, 四川 成都 610094)

摘要: 受降雨入渗和地下径流影响, 内陆港口岩石地基经历着干湿循环作用, 地基承载能力随时间推移而逐渐衰减。以粉砂岩为研究对象, 开展 5 种干湿循环条件下的核磁共振和单轴压缩试验。基于几何损伤和能量损伤, 结合岩石孔隙体积及弹性模量变化规律, 建立两种损伤演化方程, 分析粉砂岩干湿循环损伤演化机制。结果表明: 粉砂岩 T_2 谱图表现出 3 个峰, 分别对应微小、小尺寸和大尺寸孔隙, 粉砂岩的结构孔隙以微小、小尺寸孔隙为主; 随着干湿循环作用的加强, T_2 谱峰总面积、孔隙度均表现出幂函数递增规律, 岩石孔隙数量逐渐递增; 干湿循环促进峰值强度和弹性模量的衰减, 当循环次数达到 16 次时, 衰减幅度逐渐平缓。

关键词: 港口地基工程; 核磁共振; 干湿循环; 孔隙分布; T_2 谱; 损伤演化

中图分类号: U 655

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)03-0024-07

Dry-wet cyclic damage evolution of siltstone based on nuclear magnetic resonance test

LI Wenliang¹, ZHANG Tie¹, LI Jialin², LUO Gang³, ZHOU Jianwei⁴

(1. Sichuan Communication Surveying & Design Institute Co., Ltd., Chengdu 610017, China;

2. Sichuan Central Facilities Construction Co., Ltd., Mianyang 621011, China;

3. School of Earth Science and Environmental Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610036, China;

4. Sichuan Tibet Railway Co., Ltd., Chengdu 610094, China)

Abstract: Under the influences of rainfall infiltration and underground runoff, the rock foundation of inland port undergoes the dry-wet cycle, and the bearing capacity of the foundation gradually decreases with time. Taking siltstone as the research object, we carry out nuclear magnetic resonance (NMR) and uniaxial compression tests under five dry-wet cycle conditions. Based on the geometric damage and energy damage, we build two damage evolution equations combining with the change law of rock pore volume and elastic modulus, and analyze the dry-wet cycle damage evolution mechanism of siltstone. The results show that the T_2 spectrum of siltstone shows three peaks, corresponding to smaller, small and large pores respectively, and the structural pores of siltstone are smaller and small pores. With the strengthening of dry-wet cycle, the total area of T_2 spectrum peak and porosity show a power function increasing law, and the number of rock pores increases gradually. The dry-wet cycle promotes the attenuation of the peak strength and elastic modulus. When the number of cycles reaches 16, the attenuation amplitude gradually flattens.

Keywords: port foundation engineering; nuclear magnetic resonance; dry-wet cycle; pore distribution; T_2 spectrum; damage evolution

收稿日期: 2022-06-17

*基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 项目 (2017YFD0800501)

作者简介: 李文良 (1986—), 男, 高级工程师, 从事水运及地质工程勘察。

内陆港口地基工程中, 受降雨入渗和地下径流影响, 随着时间的推移, 岩石地基持续经历着干湿循环。岩石受水的作用影响, 孔隙、裂隙等微缺陷延展发育, 岩石结构损伤劣化, 致使岩石地基承载能力降低, 严重时可能造成质量安全事故^[1-3]。因此, 有必要开展不同干湿循环次数下的岩石损伤劣化研究。

目前国内外关于岩石干湿循环损伤劣化已有一定的研究成果, 如 Hale 等^[4]以 6 种砂岩为研究对象, 分析不同干湿循环次数下强度劣化规律; 陈绪新等^[5]针对蚀变岩分析干湿循环作用对岩石的化学损伤演化规律; 谢凯楠等^[6]针对三峡地区泥质砂岩开展不同干湿循环次数的核磁共振及扫描电镜试验, 探索泥质砂岩的孔隙结构分布及微观结构劣化损伤; Zhao 等^[7]采用核磁共振手段, 研究红砂岩在不同干湿循环作用下的孔隙分布规律, 建立损伤程度与循环次数和孔隙度之间的关系; 张丙吉等^[8]探究砂岩力学指标干湿循环劣化规律及能量损伤演化过程。

本文结合重庆忠县新生港深基坑工程, 基于 0、1、4、8 和 16 次共 5 种干湿循环条件, 进行核磁共振及单轴压缩试验, 从 T_2 谱分布、谱峰面积、核磁共振成像方面分析粉砂岩孔隙分布变化规律, 同时结合岩石峰值强度、弹性模量劣化规律, 基于几何损伤和能量损伤思路构建两种损伤变量, 得到损伤演化曲线, 并分析粉砂岩干湿循环损伤演化机制。

1 试验设计

基坑粉砂岩经历降雨入渗、地下水作用, 岩石发生干湿循环损伤劣化, 导致承载性能降低。在基坑内取新鲜粉砂岩, 经薄片鉴定, 该岩样由碎屑物(83%)和胶结物(17%)组成, 碎屑物主要为石英(69%)、长石(9%)、岩屑(5%)等, 胶结物主要为方解石(14%)、伊利石(2%)、绿泥石(1%)等。制备直径 50 mm、长 100 mm 和直径 25 mm、长 50 mm 的圆柱试样, 粉砂岩在天然状态下的基本物理参数为: 天然表观密度 2.16 t/m³,

天然含水率 1.89%, 天然密度 2.62 t/m³, 干密度 2.54 t/m³, 天然吸水率 0.73%, 软化系数 0.46, 抗压强度 15.79 MPa, 黏聚力 11.30 MPa, 内摩擦角 38.4°。

本文先对粉砂岩进行干湿循环, 之后再采用 NMRC12-010V 核磁共振系统(图 1)对直径 25 mm、长 50 mm 圆柱样进行核磁共振试验。以 2 d 作为干湿循环周期, 其中 1 d 用于烘干岩样, 接下来 1 d 用于自由饱水, 循环次数设置为 0、1、4、8 和 16 次。



图 1 NMRC12-010V 核磁共振系统

通过核磁共振手段, 研究岩石孔隙在不同干湿循环工况下的变化规律, 核磁共振试验针对饱和试样。为研究粉砂岩在不同工况下的力学性能变化规律, 采用 MTS815 岩石伺服试验系统对直径 50 mm、长 100 mm 的粉砂岩试样开展单轴压缩试验。

2 核磁共振试验结果分析

2.1 横向弛豫时间 T_2 分布

由核磁共振原理^[9]可知, 岩石孔隙内存在自由、扩散和表面弛豫这 3 种弛豫机制, 可表示为:

$$\frac{1}{T_2} = \frac{1}{T_{2f}} + \frac{1}{T_{2s}} + \frac{1}{T_{2k}} \quad (1)$$

式中: T_2 为总横向弛豫时间; T_{2f} 为流体在自由状态下的横向弛豫时间; T_{2s} 为表面弛豫对应的横向弛豫时间; T_{2k} 为梯度磁场扩散对应的横向弛豫时间。

实际上, T_{2f} 和 T_{2k} 相对于 T_{2s} 而言数值十分小, 此处可忽略, 则式(1)可写为:

$$\frac{1}{T_2} \approx \frac{1}{T_{2s}} \quad (2)$$

表面弛豫的特征是取决于岩石孔隙表面积 S 与孔隙体积 V 之比, 表面弛豫强度 ρ_{2s} 与 T_{2s} 成反比, 于是有:

$$\frac{1}{T_{2s}} = \rho_{2s} \left(\frac{S}{V} \right) \quad (3)$$

将式(3)代入式(2)得:

$$\frac{1}{T_2} = \rho_{2s} \left(\frac{S}{V} \right) \quad (4)$$

式(4)中的 ρ_{2s} 越大, T_2 越小。岩石孔隙分布规律可通过 T_2 谱反映出来, 通过谱峰可判断孔径的大小, 峰面积可反映孔隙数量, 孔径大小与 T_2 值成正比, 孔隙数量与峰面积成正比, 由此通过 T_2 谱研究岩石孔隙分布情况是一种可行的手段。不同工况下粉砂岩的 T_2 谱如图 2 所示。

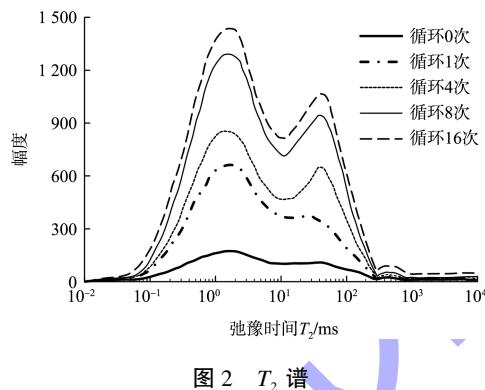


图 2 T_2 谱

由图 2 可看出, 粉砂岩 T_2 谱表现出 3 个峰, 横轴从左到右, T_2 值增大, 孔隙的孔径随之增大, 将这 3 种孔径的孔隙分别定义为微小、小尺寸和大尺寸孔隙。一般地, 微小孔隙的孔径范围为 $0.001 \sim <0.1 \mu\text{m}$, 小尺寸孔隙的孔径范围为 $0.1 \sim <1000 \mu\text{m}$, 大尺寸孔隙的孔径范围为 $1000 \mu\text{m}$ 及以上。大致比较谱峰面积, 显然粉砂岩的结构孔隙以微小、小尺寸孔隙为主。随着干湿循环次数的增加, 粉砂岩 T_2 谱第 1 峰和第 3 峰变化不明显, 第 2 峰表现出逐渐右移的趋势, 这说明粉砂岩在干湿循环作用下, 水进入岩石孔隙中充斥, 不断渗透, 岩石内部微裂纹发育扩展, 水对小尺寸孔隙的影响可能更大。

2.2 T_2 谱面积分析

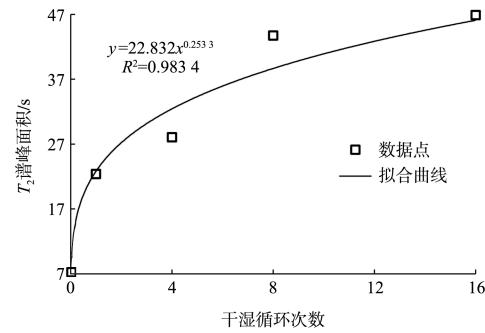
由于岩石对应孔径的孔隙数量与峰面积成正比, 故对粉砂岩 T_2 谱峰面积进行比较研究, 不同

干湿循环条件下 T_2 谱峰总面积及各峰所占比例见表 1。

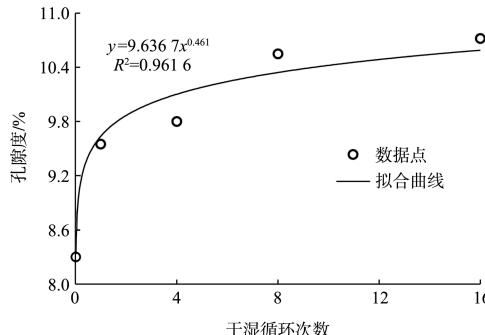
表 1 不同干湿循环条件下 T_2 谱面积

循环次数	峰总面积/ms	第 1 峰所占比例/%	第 2 峰所占比例/%	第 3 峰所占比例/%
0	7.274	57.34	41.51	1.15
1	22.396	63.84	34.38	1.78
4	28.071	61.60	36.46	1.94
8	43.758	64.87	33.32	1.81
16	46.902	65.02	33.14	1.84

由表 2 可看出, 峰总面积随着干湿循环次数 n 的增大而递增, 这说明干湿循环作用促进粉砂岩内部孔隙数量的增长。 T_2 谱第 1 峰占总面积的一半以上, 粉砂岩内部孔隙主要为微小孔隙; 第 2 峰占总面积的比例范围为 $33.14\% \sim 41.51\%$, 小尺寸孔隙的数量仅次于微小孔隙; 5 种干湿循环条件下, 第 3 峰占总面积的比例均低于 2%, 这说明粉砂岩内部的大尺寸孔隙较少。通过核磁共振进行孔隙度测量, 统计分析不同工况下的 T_2 谱峰总面积和粉砂岩孔隙度, 对比曲线如图 3 所示; 统计不同工况下 T_2 谱各峰面积, 对比曲线如图 4 所示。



a) 峰总面积-干湿循环次数关系



b) 孔隙度-干湿循环次数关系

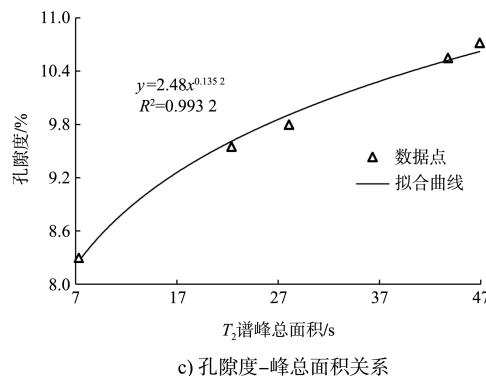


图3 不同工况下的 T_2 谱峰总面积、干湿循环次数和孔隙度关系

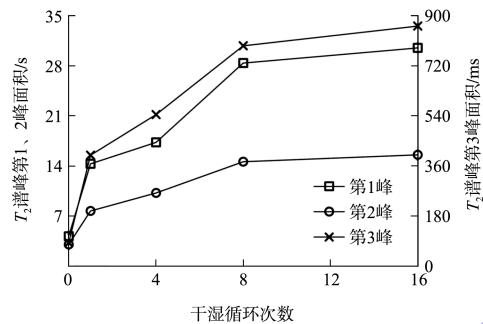


图4 不同工况下的 T_2 谱各峰面积曲线

由图3a)、b)和表1可看出, 粉砂岩 T_2 谱峰总面积、孔隙度均随着干湿循环作用的加强而表现出幂函数递增规律, 当 n 从0次增长到1次时, 峰总面积从7.274 s增长到22.396 s, 增长幅度达207.89%, 孔隙度增长幅度为9.04%, 这说明干湿循环对粉砂岩孔隙、裂隙发育影响明显; 当 n 从1次增长到4次时, 峰总面积增长幅度为25.34%, 孔隙度增长幅度为2.62%, 相比循环0次增至1次时峰总面积、孔隙度增幅减弱; 当 n 从4次增长到8次时, 峰总面积增长幅度为55.88%, 孔隙度增长幅度为10.71%, 相比循环1次增至4次时增幅明显增强; 当 n 从8次增长到16次时, 峰总面积增长幅度为7.18%, 孔隙度增长幅度为1.57%, 这表明随着 n 的不断增加, 岩石孔隙发育趋势逐渐趋于平缓。

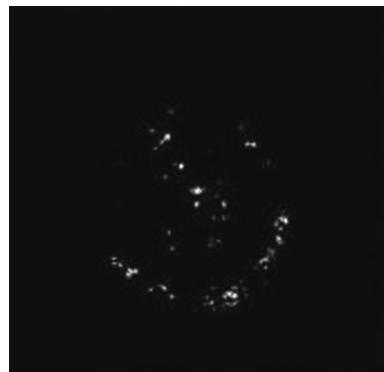
由图3c)可看出, 孔隙度与峰总面积呈幂函数递增规律, 这与前文孔隙数量与峰面积成正比的

结论是吻合的。总体而言, 图3a)与b)的走势较为接近, 这也证明了通过分析峰总面积反映岩石孔隙数量变化是可行的。

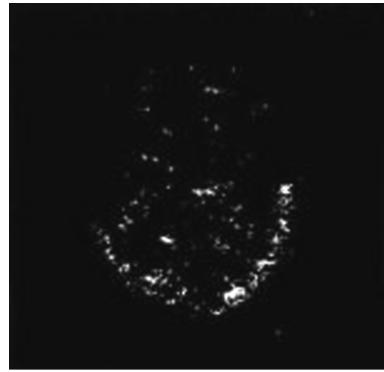
由图4可看出, 粉砂岩 T_2 谱各峰面积均随干湿循环作用的增强而递增, 当循环次数低于8次时, 第1~3峰的面积均增长较快, 当循环次数达到超过8次时, 峰面积增长趋于平缓, 这说明干湿循环作用促进岩石孔隙发育是具有一定限度的, n 超过8次后, 孔隙发育速率明显放缓。

2.3 核磁共振成像分析

对不同工况下的粉砂岩开展核磁共振成像测量, 得到试样横截面方向的图像, 如图5所示。图像中黑色部分代表底色, 白色部分代表水分子活动范围, 图像白色部分范围越大, 色泽越亮, 则岩石孔隙度越大。为定量识别图像中孔隙面积, 其对比曲线如图6所示。



a) 循环0次



b) 循环1次

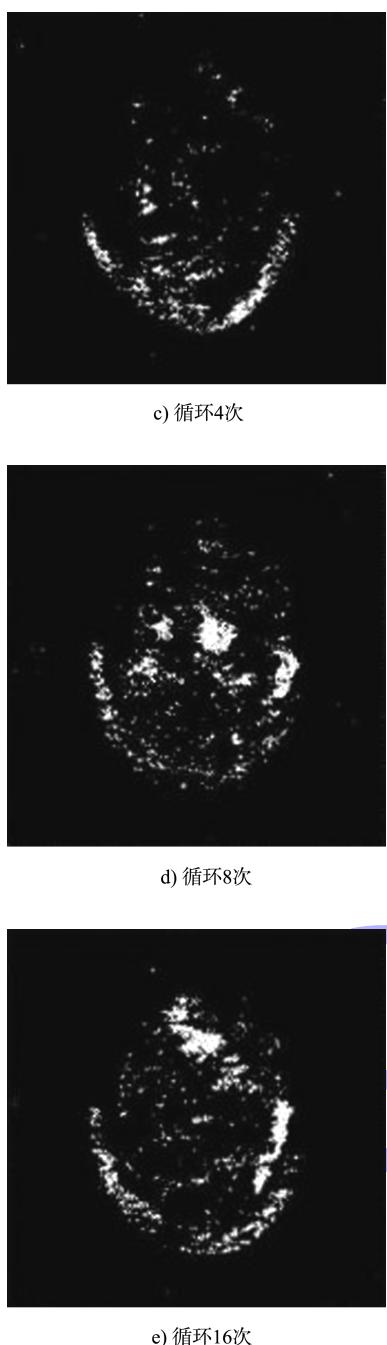


图 5 核磁共振成像

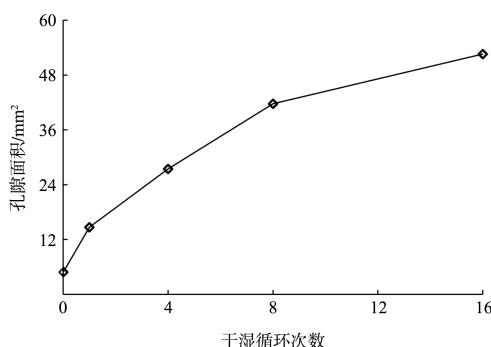


图 6 孔隙面积对比曲线

由图 5a) 可看出, 干湿循环 0 次的核磁共振图像白色光点少, 分布不均且范围小, 整体色泽较暗, 这说明粉砂岩此时孔隙数量较少。

由图 5b) 可看出, 岩样经历 1 次干湿循环作用后, 图像中白色光点大幅增多, 白色光点分布范围变广, 整体亮度有所增加, 这说明干湿循环作用对粉砂岩孔隙影响显著, 仅 1 次循环作用, 水分子便大量进入岩石内部孔隙, 微裂纹不断发育扩展。

由图 5c) 可看出, 图像的亮度比图 5b) 有所增加, 白色光点分布范围变化不大, 这说明当干湿循环次数达到 4 次时, 岩石内部孔隙、裂隙等微缺陷不断发育, 损伤持续累积。但是发育速率相比循环 0 次增至 1 次时有所降低, 这与前文相吻合, 分析其原因可能为: 循环 0 次增至 1 次时, 水分子大量涌入岩石结构孔隙, 图像亮点范围及亮度明显增加, 而循环 4 次时, 此时孔隙喉道及微裂纹正在扩展中, 但是扩展速率有限, 微裂纹也并未贯通, 导致进入孔隙的水分子数量实际增长不多。

由图 5d) 可看出, 干湿循环达到 8 次时, 图像整体亮度有所增加, 出现了大光点, 这说明干湿循环作用使得水分子已经充分进入到岩石内部孔隙, 水与岩石中的胶结物相互反应, 孔隙、裂隙等微缺陷发育扩展, 局部已贯通。

由图 5e) 可看出, 相比图 5d), 图像亮点分布范围和整体亮度变化不大, 但是出现了更大的光点, 这说明此时微裂纹汇聚贯通, 形成了更大尺寸的孔隙、裂隙。

综合图 5、6 可看出, 核磁共振成像的孔隙面积随着干湿循环次数的增加而逐渐增大, 干湿循环作用使得粉砂岩原有孔隙分布发生变化, 核磁共振图像和识别孔隙面积在不同干湿循环次数下的变化规律与 T_2 谱峰总面积及孔隙度变化规律基本吻合, 证明了利用核磁共振图像、 T_2 谱分布判断岩石孔隙变化的方法是基本可行的。

3 单轴压缩试验结果分析

通过单轴压缩试验得到的不同工况下粉砂岩试验结果见图7。

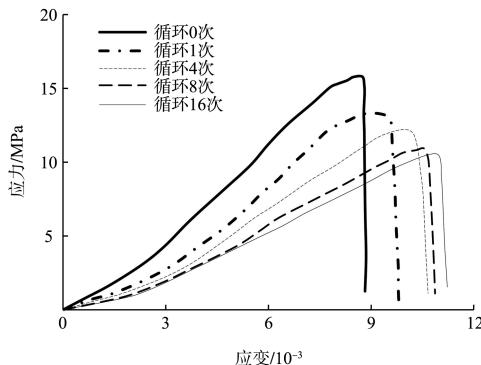


图7 应力-应变曲线

由图7可看出, 粉砂岩的峰值点随着干湿循环次数的增加而逐渐向图中右下方向移动, 这说明峰值强度递减, 对应的峰值应变递增。以图7中的曲线直线段斜率作为弹性模量^[10], 得到不同工况下的弹性模量变化曲线, 如图8所示。统计图7中的峰值强度, 结合图3中的孔隙度变化, 绘制与n之间的关系, 如图9所示。

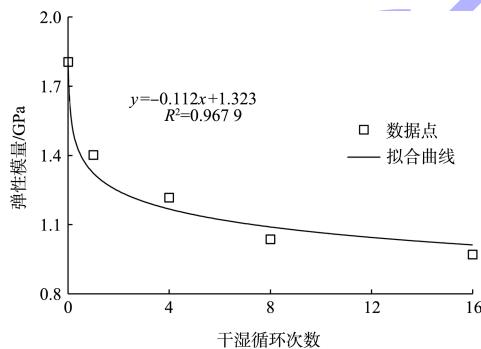


图8 弹性模量与干湿循环次数关系曲线

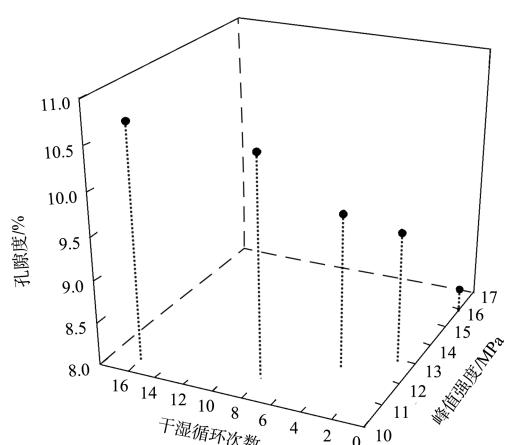


图9 峰值强度、孔隙度与干湿循环次数关系

由图8可看出, 弹性模量随干湿循环作用的增强而逐渐衰减, 大致呈对数衰减规律, 当循环达16次时, 弹性模量趋于平衡。

由图9可看出, 随着干湿循环次数的增加, 孔隙度递增, 峰值强度递减, 当循环达16次时, 孔隙度和峰值强度的变化趋于收敛。峰值强度与孔隙度呈反比关系, 当孔隙度从8.34%增至11.02%时, 峰值强度降幅较大, 达33.04%, 这说明孔隙度的增大对峰值强度衰减劣化可能起一定的促进作用, 孔隙度越大, 岩石内部微缺陷发育越多, 尤其是干湿循环次数较高时, 岩石内孔隙、裂隙扩展贯通, 岩石更容易屈服破坏。

4 干湿循环损伤演化分析

4.1 损伤变量及演化曲线

岩石是一种非线性非均质的复杂材料, 经历风化、冻融、浸水等众多因素作用, 经受压力会导致岩石性能劣化, 损伤即为致使岩石性能劣化的结构微观变化^[11]。损伤力学理论认为, 损伤变量主要通过2种形式定义: 1) 基于结构有效承载面积的几何损伤思路; 2) 基于弹性模量变化的能量损伤思路^[12]。

基于几何损伤思路, 假定岩石损伤过程中的孔隙体积变化可作为损伤变量定义的依据, 于是有:

$$D_n = 1 - \frac{V_n}{V_0} \quad (5)$$

式中: D_n 为干湿循环 n 次后的损伤变量; V_0 为干湿循环 0 次时的孔隙体积; V_n 为干湿循环 n 次后的孔隙体积。

孔隙体积可表示为:

$$\begin{cases} V_n = V(1-p_n) \\ V_0 = V(1-p_0) \end{cases} \quad (6)$$

式中: V 为岩石体积; 干湿循环过程中岩石体积变化可忽略不计; p_0 为干湿循环 0 次时的孔隙度; p_n 为干湿循环 n 次后的孔隙度。

联合式(5)(6), 再结合图 3b) 中的孔隙度拟合公式, 则有:

$$D_n = 1 - \frac{1 - p_n}{1 - p_0} = \frac{0.096n^{0.461} - 0.083}{0.917} \quad (7)$$

式(7)即为基于几何损伤思路建立的损伤演化方程。

基于弹性模量变化的能量损伤思路, 于是有:

$$D_n = 1 - \frac{E_n}{E_0} \quad (8)$$

式中: E_n 为干湿循环 n 次后的弹性模量; E_0 为干湿循环 0 次时的弹性模量。

结合图 8 的弹性模量拟合公式, 代入式(8)可得:

$$D_n = \frac{0.112 \ln n + 0.483}{1.806} \quad (9)$$

式(9)即为能量损伤思路而构建的损伤演化方程。利用式(7)(9)绘制不同 n 对应的损伤演化曲线, 如图 10 所示。

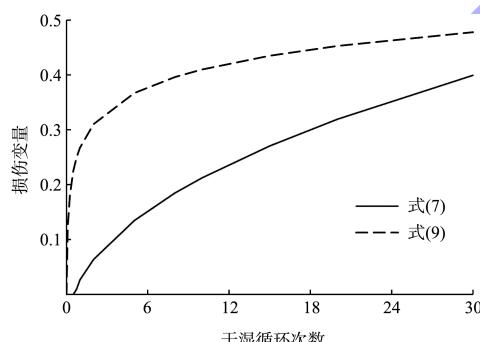


图 10 损伤演化曲线

由图 10 可看出, 随着 n 的增加, 损伤变量不断累积。式(7)与(9)绘制的损伤演化曲线有所不同, 基于几何损伤思路建立的损伤变量, 其演化曲线总体斜率较高, 损伤累积速率较快, 而基于能量损伤思路建立的损伤变量, 其演化曲线先陡后平缓, 循环次数较高时表现出逐渐收敛的趋势。总体来看, 由于损伤变量构建思路和方法的不同, 导致损伤演化曲线存在一定差异, 这样的差异不存在绝对的对错。对于粉砂岩在不同 n 下的峰总面积、孔隙度、峰值强度及弹性模量变化规律而言, 可能类似式(9)这种损伤变量在 n 较高时趋于平衡的走势更为贴近实际。

4.2 损伤演化机制分析

通过本文开展的核磁共振和单轴压缩试验进行分析, 认为粉砂岩损伤演化主要有微观和宏观两个方面的影响, 微观的影响主要体现为物理和化学变化, 宏观的影响主要表现为力学性能劣化。

干湿循环作用使得水分子进入岩石内部孔隙、裂隙, 水分子持续渗透, 使得岩石颗粒软化、润滑, 孔隙、裂隙不断地发育扩展, 损伤不断累积, 随着 n 的增长, 岩石内部孔隙数量递增, 损伤作用逐渐变强。粉砂岩中含有伊利石、绿泥石等黏土矿物, 黏土矿物与水发生化学反应, 在水中溶解、迁移, 造成岩石材料结构的损伤。干湿循环次数的增加, 内部结构的损伤导致岩石材料宏观力学的劣化, 使得岩石峰值强度、弹性模量逐渐衰减, 降低了岩石发生屈服破坏的难度。

5 结论

1) 粉砂岩 T_2 谱图表现出 3 个峰, 分别对应微小、小尺寸和大尺寸孔隙, 粉砂岩的结构孔隙以微小、小尺寸孔隙为主, 干湿循环过程中, 水对小尺寸孔隙的影响可能更大。

2) 干湿循环作用改变了粉砂岩原有孔隙分布, 核磁共振图像在不同干湿循环次数下的变化规律与 T_2 谱峰总面积及孔隙度变化规律基本吻合, 随着干湿循环作用的加强, T_2 谱峰总面积、孔隙度均表现出幂函数递增规律, 岩石孔隙数量逐渐递增。

3) 随着干湿循环次数的增加, 岩石材料内部损伤不断累积, 宏观表现为峰值强度和弹性模量的逐渐衰减, 当循环次数达到 16 次时, 衰减幅度趋于平缓。

4) 基于几何损伤和能量损伤的思路, 结合岩石孔隙体积及弹性模量变化规律, 建立 2 种损伤演化方程。分析干湿循环损伤演化机制, 认为损伤受微观和宏观两个方面的影响, 主要表现在物理、化学和力学性能上的变化。

(下转第 49 页)



水运工程船载智能化固结仪的研发与应用

刘永胜, 胡伟娜, 孙书科, 刘健, 任世锋
(中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007)

摘要: 在水运工程勘察中, 固结试验是常用测定土的压缩性参数的室内试验方法, 也是研究土的强度及结构关系的重要手段。固结仪是室内土工固结试验的主要仪器设备。在分析国内外现有固结试验设备性能的基础上, 针对现有固结仪体积大、噪声大、抗晃动性能差、智能化程度低、不适用于水运工程船载实验室使用等问题, 研发了一套已获得实用新型专利的船载智能化固结仪。试验表明: 该仪器不仅性能稳定、量测精度高, 且具有结构简单、操作简便、智能化程度高、船载性能优越等特点。新型船载智能化固结仪具有广阔的市场应用前景, 特别适用于移动类的土工实验室。

关键词: 水运工程; 固结试验; 固结仪; 船载; 智能化; 杠杆式; 气压式

中图分类号: U 652

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)03-0031-04

Development and application of intelligent shipboard consolidation instrument for waterway engineering

LIU Yongsheng, HU Weina, SUN Shuke, LIU Jian, REN Shifeng
(CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China)

Abstract: In the investigation of waterway engineering, the consolidation test is commonly used in laboratories to test the deformation characteristics of soil, and it is also an important means to study the relationship between strength and structure of soil. A consolidation instrument is the main equipment for laboratory geotechnical consolidation tests. Upon the analysis of the performance of existing equipment both at home and abroad, this paper develops a new intelligent shipboard consolidation instrument, which has obtained the utility model patent. This instrument aims to solve the problems of existing consolidation instruments, such as large volume, loud noise, poor sloshing resistance, low intelligence, and inapplicability for laboratory shipboard use in waterway engineering. Experiments verify that the instrument has stable performance and high measuring accuracy and features a simple structure, simple operation, high intelligence, and superior shipboard performance. The new intelligent shipboard consolidation instrument for waterway engineering has a broad market application prospect, especially for use in mobile geotechnical laboratories.

Keywords: waterway engineering; consolidation test; consolidation instrument; shipboard; intelligent; lever type; air pressure type

土体固结特性的研究在工程应用中具有重大意义。土体在固结过程中, 随着土中水的排出, 孔隙比减小, 土体产生压缩, 体积变小; 同时随着有效应力逐步增大, 土体抗剪强度提高。室内固结试验(也称压缩试验)是研究土体固结特性

的基本方法^[1], 通过试验数据可计算土的单位沉降量、压缩系数、压缩指数、回弹指数、压缩模量、固结系数及原状土的前期固结压力等。固结试验仪器设备经历了杠杆式、液压式、气压式的发展阶段。杠杆式固结仪采用人工加荷、记录、