

尚亚琼,杨柯红,蔺国骞,等.不同配合比下砂泥岩填料蠕变力学模型[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2025,44(1):62-70.
doi:10.11956/j.issn.1008-0562.20230371
SHANG Yaqiong, YANG Kehong, LIN Guoqian, et al. Creep mechanical model of sand and mudstone filler under different mix proportions[J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science), 2025, 44(1): 62-70. doi: 10.11956/j.issn.1008-0562.20230371

不同配合比下砂泥岩填料蠕变力学模型

尚亚琼¹, 杨柯红¹, 蔺国骞², 曹利军³

(1. 郑州工商学院 工学院, 河南 郑州 451400; 2. 甘肃省交通规划勘察设计院股份有限公司, 甘肃 兰州 730030;
3. 水发规划设计有限公司, 山东 济南 250014)

摘要: 为揭示砂泥岩填料在不同配合比下的蠕变力学特性, 开展不同配合比下的砂泥岩填料剪切蠕变试验。试验发现填料等时应力-应变曲线具有明显的非线性特征, 由此定义反映不同配合比及载荷时间的黏弹性模量, 以此描述填料黏弹性变形, 建立非定常弹性体来描述瞬时弹性变形, 引入SP元件构建表征黏塑性变形的非定常黏塑性体, 得到不同配合比下的砂泥岩填料非线性蠕变力学模型。同时采用新建模型和基础模型模拟填料蠕变试验数据, 验证了新建模型的合理性和可行性。研究结论为码头砂泥岩混合填料地基长期稳定性评价提供参考。

关键词: 配合比; 泥岩颗粒含量; 砂泥岩填料; 蠕变; 非线性; 黏弹性模量; 力学模型

中图分类号: TV411

文献标志码: A

文章编号: 1008-0562(2025)01-0062-09

Creep mechanical model of sand and mudstone filler under different mix proportions

SHANG Yaqiong¹, YANG Kehong¹, LIN Guoqian², CAO Lijun³

(1. Engineering institute, Zhengzhou Technology and Business University, Zhengzhou 451400, China; 2. Gansu Transportation Planning Survey and Design Institute Limited Company, Lanzhou 730030, China; 3. Shuifa Planning and Design Limited Company, Jinan 250014, China)

Abstract: To reveal the creep mechanical properties of sandstone and mudstone fillers under different mix proportions, shear creep tests were conducted on sandstone and mudstone fillers under different mix proportions. The experiment found that the stress-strain curve of the filling material exhibited obvious nonlinear characteristics. Therefore, a viscoelastic modulus reflecting different mix proportions and load times was defined to describe the viscoelastic deformation of the filling material. A unsteady elastic body was established to describe the instantaneous elastic deformation, and an SP element was introduced to construct a unsteady viscoplastic body to characterize the viscoplastic deformation. Thus, a nonlinear creep mechanical model of sandstone and mudstone filling material under different mix proportions was obtained. Simultaneously the new model and the basic model were used to simulate the creep test data of fillers, and verify that the new model is reasonable and feasible. The research conclusions provide a reference for the long-term stability evaluation of wharf sand-mudstone mixed filler foundation.

Key words: mix ratio; mudstone particle content; sand and mudstone fillers; creep; nonlinear; viscoelastic modulus; mechanical model

0 引言

在中国西南地区内河码头建设项目中, 由于

山区峡谷众多、地势险峻, 码头施工作业面窄, 岸坡地势高, 堆场难找寻, 合格填料少且难以运输, 给码头施工作业带来巨大的挑战^[1]。陆侧岸坡

收稿日期: 2023-08-28 修回日期: 2023-10-30 接受日期: 2023-11-19 责任编辑: 张雯

基金项目: 山东省自然科学基金项目(ZR2018BEE050)

作者简介: 尚亚琼(1987-), 女, 河南巩义人, 硕士, 讲师, 主要从事土木工程方面的研究。E-mail: shangyaqiong0311@163.com

开挖料处理后回填码头临水侧是一种可行的方法^[2-3]。重庆万州港项目出露岩性主要为三叠系砂岩、泥岩, 由于砂、泥岩互层, 开挖砂岩后夹杂泥岩, 若完全清理掉泥岩会造成工程成本的增加, 因此将砂岩、泥岩颗粒以一定比例混合制成填料。

混合填料的蠕变特性关乎码头地基的长期稳定性, 关于混合填料的蠕变特性的研究已取得较多成果。ZHOU 等^[4]对堆石料蠕变特性进行研究, 利用数值分析方法进行蠕变模拟。朱明哲^[5]采用钢渣对泥岩填料进行改良, 研究其蠕变力学特性, 并通过经验模型进行模拟。刘家光等^[6]探究了循环荷载作用下蠕变应变发展规律。王启云等^[7]通过试验探讨了竖向应力和降雨入渗对粗粒土的影响。郭兴文等^[8]以胶凝材料掺量作为蠕变试验控制变量, 进行胶凝砂砾石料单轴压缩蠕变试验, 分析不同胶凝材料掺量下混合料的蠕变特性, 并将蠕变本构模型植入 ANSYS 平台进行模拟。

目前针对砂泥岩混合填料蠕变特性的研究较少, 因此以重庆万州港砂泥岩混合填料为研究对象, 开展不同配合比下的剪切蠕变力学试验。基于试验结果, 定义反映不同配合比及载荷时间的黏弹性模量, 描述填料黏弹性变形, 采用弹性体非定常的方式来描述瞬时弹性变形, 同时引入 SP 元件构建非定常黏塑性体, 几者组合得到不同配合比的砂泥岩填料非线性蠕变力学模型。求解模型参数, 进行模拟对比, 分析初始瞬时弹性模量与配合比之间的经验关系, 给出砂泥岩填料在本文及类似条件下的参数取值区间。

1 砂泥岩填料蠕变试验及成果

1.1 试验材料

取重庆万州港项目砂泥岩填料为研究对象, 砂岩、泥岩的基本物理力学参数见表 1。机械破碎开挖后的互层砂泥岩再初筛, 烘干后复筛, 得到不同粒径的砂、泥岩料。配置不同配合比的混合料, 级配曲线见图 1, 不均匀系数 C_u 为 7.51, 曲率系数 C_c 为 1.84, 该级配良好。

表 1 砂岩、泥岩基本物理力学参数

Tab.1 basic physical and mechanical parameters of sandstone and mudstone

| 岩石类别 | 容重 /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$) | 弹性模量 /GPa | 单轴抗压强度 /MPa | 黏聚力 /MPa | 内摩擦角 /($^\circ$) |
|------|---------------------------------------|-----------|-------------|----------|--------------------|
| 泥岩 | 18.77 | 3.54 | 19.76 | 4.96 | 38.24 |
| 砂岩 | 22.48 | 11.65 | 64.82 | 16.54 | 41.78 |

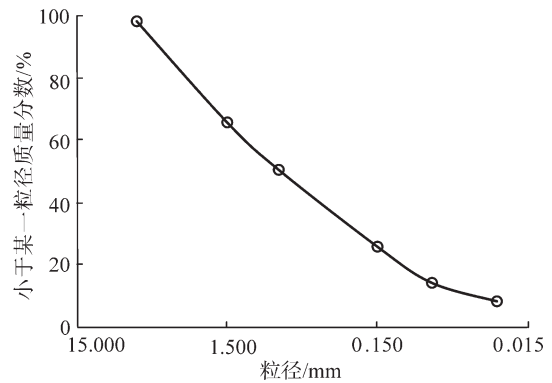


图 1 级配曲线

Fig.1 grading curves

1.2 试验方案

万州港码头地基常年浸水, 在水的浸润作用下砂泥岩填料蠕变现象明显, 将试验的含水率设为饱和, 饱和含水率取 15%。以泥岩颗粒质量分数 C_{MP} 来描述配合比, 以 C_{MP} 作为蠕变试验控制因素, 设 C_{MP} 为 0、20%、40%、60%、80% 和 100%。采用标准环刀 (内径为 61.8 mm、高为 20 mm) 制备试样, 见图 2。每一种 C_{MP} 条件配两组平行样, 利用水膜转移法控制含水率为 15%, 保湿静置 1 d 以使试样水分均匀扩散。采用 ZLB 直剪蠕变仪进行剪切蠕变试验, 见图 3。



图 2 试样照片

Fig.2 sample photo



图 3 试验仪器

Fig.3 test instruments

正应力设为 100 kPa。通过直剪试验确定不同配合比下的最大剪应力, 分五级作为加载载荷^[9],

每一级加载持续 4 000 min, 剪切蠕变试验加载方案见表 2。

表 2 剪切蠕变试验加载方案

Tab.2 basic physical and mechanical parameters of sandstone and mudstone

| $C_{MP}/\%$ | 正应力/kPa | 剪应力加载/kPa | 最大剪应力/kPa |
|-------------|---------|-------------------------------|-----------|
| 0 | 100 | 18.97、37.95、56.92、75.90、94.87 | 94.87 |
| 20 | 100 | 18.07、36.14、54.20、72.27、90.34 | 90.34 |
| 40 | 100 | 16.71、33.42、50.14、66.85、83.56 | 83.56 |
| 60 | 100 | 14.22、28.43、42.65、56.86、71.08 | 71.08 |
| 80 | 100 | 10.96、21.93、32.89、43.86、54.82 | 54.82 |
| 100 | 100 | 9.05、18.10、27.16、36.21 | 45.26 |

1.3 试验结果

试验得到不同 C_{MP} 下的砂泥岩填料蠕变曲线, 见图 4。由图 4 可看出, 不同配合比下的蠕变曲线形态相似, 每一级的应变逐渐增长。在同一加载等级下, 随着 C_{MP} 的增大, 应变呈递增趋势, 当 C_{MP} 为 100% 时, 填料经历四级加载便破坏, 而其余配合比的试样均是经历五级加载发生蠕变破坏, 说明 C_{MP} 的增大促进了蠕变发展。

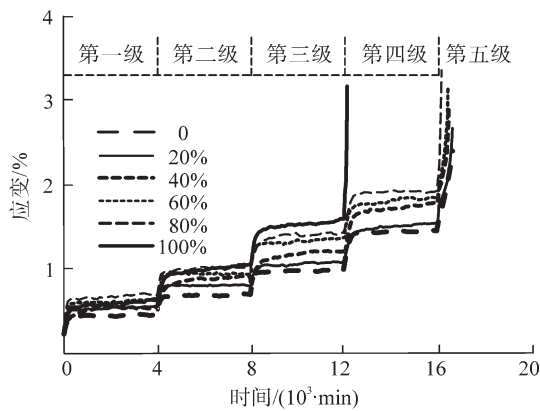


图 4 不同 C_{MP} 下的砂泥岩填料蠕变曲线

Fig.4 creep curves of sand and mudstone fillers under different C_{MP}

对图 4 进行玻尔兹曼线性叠加^[10-11]处理, 得到不同剪应力下蠕变曲线, 见图 5。限于篇幅, 仅以 C_{MP} 为 40% 为例。由图 5 可看出, 填料加载瞬间首先表现出瞬时弹性变形, 随后进入衰减蠕变, 此阶段应变率递减, 应变递增。接着进入稳态蠕变阶段, 该阶段应变率基本恒定, 应变基本稳定。最后一级加载下还发生加速蠕变行为, 应变和应变率急剧增长。

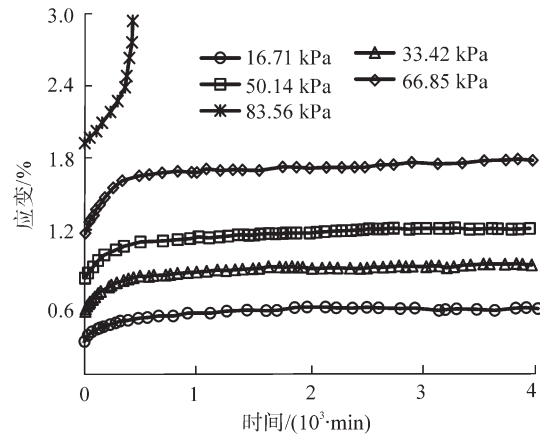
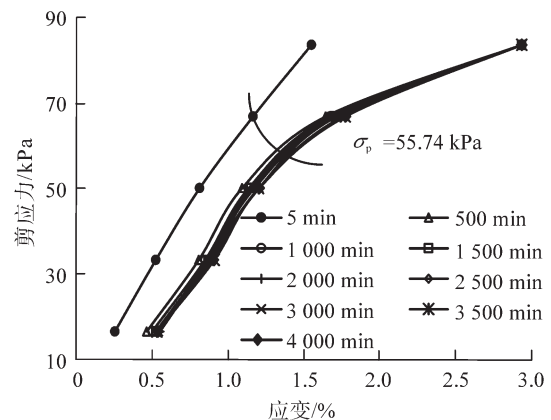


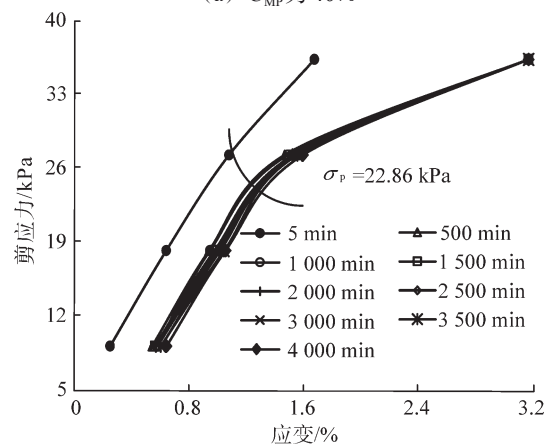
图 5 不同剪应力下蠕变曲线 ($C_{MP}=40\%$)

Fig.5 creep curves under different shear stresses ($C_{MP}=40\%$)

基于图 5, 分别取 5 min、500 min、1 000 min、1 500 min、2 000 min、2 500 min、3 000 min、3 500 min、4 000 min 的蠕变数据点, 绘制等时剪应力-应变曲线, 见图 6。限于篇幅, 仅以 C_{MP} 为 40% 和 100% 为例, 通过在图 4 中取非线性曲线拐点^[12-14]确定长期强度 σ_p 。



(a) C_{MP} 为 40%



(b) C_{MP} 为 100%

图 6 等时剪应力-应变曲线

Fig.6 isochronous shear stress-strain curves

由图 6 可以看出, 5 min 时剪应力近似呈线性增长, 这是由于此时填料瞬时载荷作用下, 表现出弹性的变形关系。500~4 000 min 的剪应力-应变曲线表现出非线性特征。图 6 中通过取非线性曲线拐点确定长期强度 σ_p , C_{MP} 为 0%、20%、40%、60%、80% 和 100% 时, σ_p 分别为 63.52 MPa、60.49 MPa、55.74 MPa、44.68 MPa、31.28 MPa 和 22.86 MPa, 可见 σ_p 随着 C_{MP} 的增大而减小。

2 不同配合比下的填料蠕变力学模型

2.1 基础模型的确定

砂泥岩填料的蠕变过程具有明显的黏弹塑性。其中, 瞬时弹性变形服从 Hooke 定律, 可用 Hooke 体描述填料瞬时弹性变形。黏弹性变形由 Kelvin 模型反映, Kelvin 模型由 Hooke 体和 Newton 体串联组合而得。在填料加速蠕变过程中, 以黏塑性变形为主, 可用带开关的黏塑性体来体现。瞬时弹性、黏弹性、黏塑性变形相累加, 串联以上模型可得 H-H | N-N | S 结构, 即西原模型^[15-16], 其结构见图 7。西原模型的蠕变状态方程为线性, 无法体现材料蠕变的非线性特征。在西原模型的基础上进行改进, 使模型能反映蠕变非线性特征, 同时考虑配合比变化, 得到能反映不同配合比的非线性蠕变力学模型。

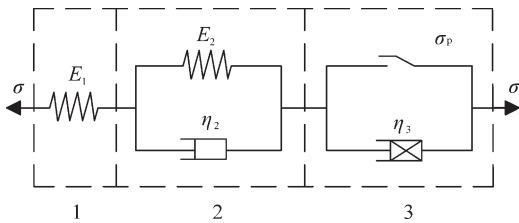


图 7 基础模型结构

Fig.7 basic model structure

西原模型的蠕变状态方程为

$$\begin{cases} \sigma = \sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 \\ \varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 \\ \varepsilon_1 = \sigma_1 / E_1 \\ \sigma_2 = E_2 \varepsilon_2 + \eta_2 \dot{\varepsilon}_2 \\ \sigma_3 = \sigma_p + \eta_3 \dot{\varepsilon}_3 \end{cases}, \quad (1)$$

式中: σ 为模型应力; ε 为模型应变; σ_1 、 σ_2 、 σ_3 分别为模型第一、第二、第三部分的应力; ε_1 、 ε_2 和 ε_3 分别为模型第一、第二、第三部分的应变; E_1 为模型第一部分的瞬时弹性模量; η_2 和 E_2 分别为模型第二部分的黏性系数和黏弹性模量; η_3 为模型第三部分的黏性系数。

由式 (1) 可得西原模型的本构方程为

$$\begin{cases} \varepsilon = \frac{\sigma}{E_1} + \frac{\sigma}{E_2} \left(1 - e^{-\frac{E_2 t}{\eta_2}} \right) & \sigma \leq \sigma_p \\ \varepsilon = \frac{\sigma}{E_1} + \frac{\sigma}{E_2} \left(1 - e^{-\frac{E_2 t}{\eta_2}} \right) + \frac{\sigma - \sigma_p}{\eta_3} t & \sigma > \sigma_p \end{cases}, \quad (2)$$

式中, t 为时间。

2.2 反映不同配合比的黏弹性模量

当砂泥岩填料未进入加速蠕变阶段时, 填料蠕变以黏弹性变形为主, 与图 6 中低于长期强度的曲线相对应^[17], 将此部分曲线的斜率定义为黏弹性模量 E_c , 不同载荷时间下 E_c 与 C_{MP} 的关系曲线见图 8。

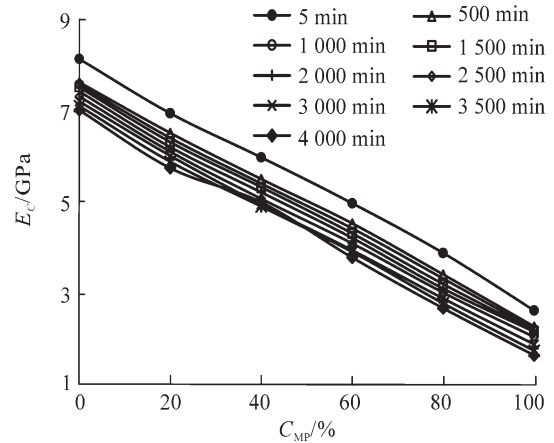


图 8 不同载荷时间下 E_c 与 C_{MP} 关系曲线

Fig.8 relationship between E_c and C_{MP} under different load durations

由图 8 可看出, E_c 与 C_{MP} 呈线性递减关系, 则

$$E_c = M C_{MP} + N, \quad (3)$$

式中, M 和 N 为拟合参数。

利用式 (3) 对图 8 进行线性拟合, 得到拟合参数见表 3。由表 3 可知, R^2 的平均值为 0.998 9, 将 M 和 N 与 t 进行拟合, 得到数据分布, 见图 9。

表 3 E_c 的拟合结果

Tab.3 fitting results of E_c

| t/min | M | N | R^2 |
|----------------|----------|---------|---------|
| 5 | -5.446 4 | 8.457 6 | 0.999 1 |
| 500 | -5.397 8 | 7.689 5 | 0.999 3 |
| 1 000 | -5.348 9 | 7.541 4 | 0.999 4 |
| 1 500 | -5.288 4 | 7.459 1 | 0.999 4 |
| 2 000 | -5.239 5 | 7.341 9 | 0.998 9 |
| 2 500 | -5.207 1 | 7.227 1 | 0.998 7 |
| 3 000 | -5.182 1 | 7.198 5 | 0.999 2 |
| 3 500 | -5.120 6 | 7.154 2 | 0.998 5 |
| 4 000 | -5.081 9 | 7.133 8 | 0.997 3 |

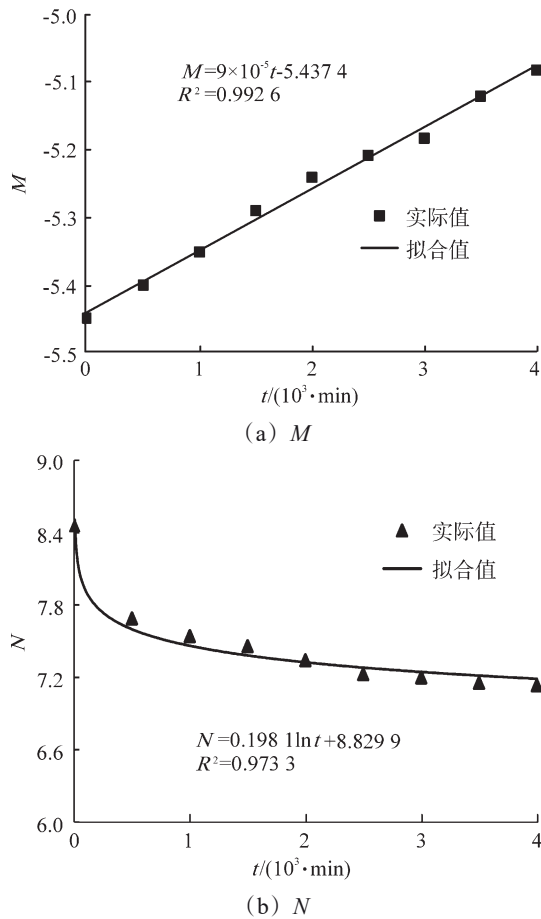


图9 M, N 拟合结果
Fig.9 M, N fitting results

由图9可看出, M 与 t 线性相关, N 与 t 之间存在对数函数关系。 M, N 的拟合结果为

$$\begin{cases} M=at-b \\ N=-c \ln t+d \end{cases} \quad (4)$$

式中, a, b, c, d 为与砂泥岩填料配合比和时间相关的参数。

将式(4)代入式(3)可得

$$E_c=(at-b)C_{MP}-c \ln t+d_0 \quad (5)$$

式(5)即为考虑不同配合比的填料黏弹性模量, 该式可体现砂泥岩填料受配合比和时间影响的蠕变过程。

2.3 非定常弹性体

本文基础模型中, 利用Hooke体来描述砂泥岩填料的瞬时弹性变形, 其中瞬时弹性模量 E_t 是一个定量。实际上, 应力水平以及泥岩颗粒含量 C_{MP} 的不同会导致填料压缩承载能力的变化, 瞬时弹性模量是变化的。文献[18]引入一个非定常弹性体, 将瞬时弹性模量表示为

$$E_{1t}=E_0 e^{-\delta t} \quad (6)$$

式中: E_0 为初始瞬时弹性模量; δ 为控制弹性模量变化的参数。

取 E_0 为5 GPa, 分别取 δ 为 1×10^{-4} 、 4×10^{-4} 、 9×10^{-4} , 代入式(6)得到 E_{1t} 随 t 变化曲线, 见图10。

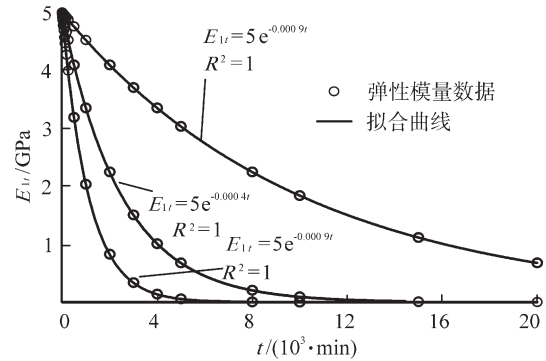


图10 E_{1t} 与 t 关系曲线

Fig.10 relationship between E_{1t} and t

由图10可看出, 随着 t 的增大, E_{1t} 呈指数型衰减, 而后趋于平稳, δ 控制衰减速率, δ 越大, 衰减速率越快。

将式(6)代入传统Hooke体的本构方程中, 得到非定常弹性体的本构方程为

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma}{E_{1t}} = \frac{\sigma}{E_0 e^{-\delta t}} \quad (7)$$

2.4 非定常黏塑性体

在最后一级加载下, 加速蠕变过程中的应变和应变率剧增, 而该级应力恒定, 说明图7模型中第三部分黏塑性体中的黏滞系数 η_3 应为非定常变量, 引入文献[19]中的SP元件, 其可变黏滞系数为

$$\eta_{3t}=(\eta_0-\beta t)^2 \quad (8)$$

式中: η_{3t} 为可变黏滞系数; η_0 和 β 为黏滞参数。

取 η_0 为 1.5×10^4 , 分别取 β 为0、0.2、0.5、0.8、1, 代入式(8)得到 η_{3t} 与 t 关系曲线, 见图11。

由图11可以看出, 当 $\beta=0$ 时, η_{3t} 不变; 当 $\beta=1$ 时, η_{3t} 先递减再递增; 当 $0 < \beta < 1$ 时, η_{3t} 以不同速率递减。由于加速蠕变过程中, 应变率递增, 应力恒定, 黏滞系数与应变率成反比, 黏滞系数递减, 因此对 β 值进行约束, 约束区间为(0,1)。

将SP元件代入基础模型第三部分, 于是有

$$\sigma=\sigma_3=\sigma_{SP}+\sigma_s \quad (9)$$

式中: σ_s 可表示为

$$\sigma_s = \begin{cases} \sigma_3 & \sigma_3 \leq \sigma_p; \\ \sigma_p & \sigma_3 > \sigma_p; \end{cases} \quad (10)$$

σ_{SP} 为 SP 元件的应力, 可表示为

$$\sigma_{SP} = \langle \sigma - \sigma_p \rangle, \quad (11)$$

其中, 当 $\sigma - \sigma_p \leq 0$ 时, $\langle \sigma - \sigma_p \rangle = 0$, 当 $\sigma - \sigma_p > 0$ 时, $\langle \sigma - \sigma_p \rangle = \sigma - \sigma_p$ 。

将式 (8)、式 (11) 代入基础模型第三部分本构, 则非定常黏塑性体为

$$\varepsilon_3 = \frac{\langle \sigma - \sigma_p \rangle t}{(\eta_0 - \beta t)^2} \quad (12)$$

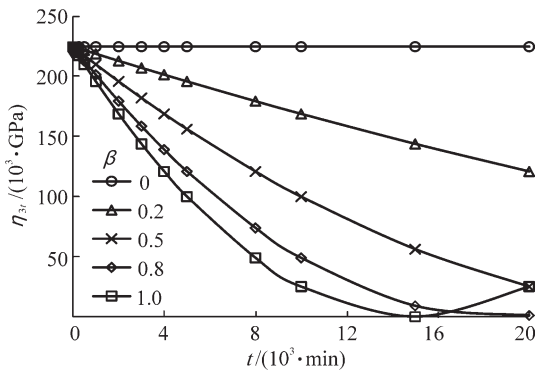


图 11 η_3 与 t 关系曲线

Fig.11 relationship between η_3 and t

2.5 不同配合比下砂泥岩填料蠕变力学模型

在图 7 所示模型的基础上, 将式 (5) 代入第二部分的 Newton 体中, 用非定常弹性体替换第一部分, 非定常黏塑性体替换第三部分, 得到新模型, 见图 12。

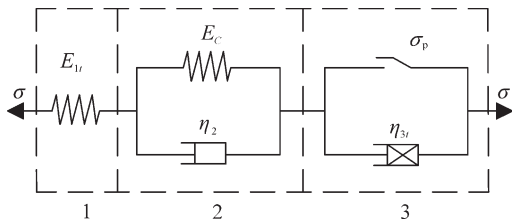


图 12 新建模型结构示意图

Fig.12 structure schematic of the new established model

根据图 12 得到不同配合比下的砂泥岩填料非线性蠕变力学模型的本构方程为

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_0 e^{-\delta t}} + \frac{\langle \sigma - \sigma_p \rangle t}{(\eta_0 - \beta t)^2} + \frac{\sigma}{(at - b)C_{MP} - c \ln t + d} \left\{ 1 - \exp \left[-\frac{(at - b)C_{MP} - c \ln t + d}{\eta_2} \right] \right\} \quad (13)$$

3 模型参数求解及验证分析

本文建立的不同配合比下的砂泥岩填料蠕变

力学模型包含 E_0 、 δ 、 a 、 b 、 c 、 d 、 η_0 、 β 、 η_2 和 σ_p , 共 10 个参数, C_{MP} 和 t 为自变量, 其中 σ_p 通过已蠕变试验确定, 初始瞬时弹性模量 E_0 通过蠕变试验第一级加载条件求解, 其余 8 个待定参数采用 Origin 软件基于 Levenberg-Marquardt 算法模拟求解。利用新建模型对不同配合比下的填料蠕变曲线进行模拟, 基础模型作为对比模型, 得到模拟结果, 见图 13, 图中 94.87 kPa 等数据为每一级加载的应力, 限于篇幅, 仅以 C_{MP} 为 0、40%、60% 和 100% 为例, 模型参数见表 4。

由图 13 可以看出, 新建模型具备较强辨识能力, 拟合效果较好, 平均 R^2 为 0.991 8, 能较为准确描述不同配合比下砂泥岩填料的蠕变力学特性。基础模型对最后一级加载之前的蠕变数据的辨识效果尚可, 平均 R^2 为 0.970 5, 但对最后一级加载的蠕变数据的辨识效果较差, 平均 R^2 为 0.897 4。

为验证新建模型的适用性, 引用文献[20]中的砂泥岩填料侧限压缩蠕变试验数据, 分别利用新建模型和基础模型进行模拟, 模拟结果见图 14。由图 14 可以看出, 新建模型的辨识效果较好, 平均 R^2 为 0.989 4, 基础模型的平均 R^2 为 0.972 3。结合图 13 可知, 基础模型的模拟曲线总体上低于试验值, 而新建模型始终具备较强的辨识能力, 由此证明新建模型的合理性和适用性。

分析表 4 中初始瞬时弹性模量 E_0 与 C_{MP} 之间的关系, 绘制关系曲线见图 15。由图 15 可看出, E_0 随 C_{MP} 的增大而线性递减。随着 C_{MP} 的增大, 砂泥岩填料初始瞬时弹性模量变小, 填料抵抗瞬时变形的能力减弱, 变形量增加, C_{MP} 的增大促进瞬时变形发展。根据图 15, 可得饱和状态下砂泥岩填料正应力为 100 kPa 时, E_0 与 C_{MP} 的关系为

$$E_0 = AC_{MP} + B, \quad (14)$$

式中, A 和 B 为拟合参数。

由图 8 给出的黏弹性模量 E_c 与 C_{MP} 的关系曲线, 结合表 4 给出参数 a 、 b 、 c 、 d 的建议取值范围分别为 [0.018, 0.084]、[10.267, 54.628]、[0.157, 0.497]、[5.794, 9.532]。以上取值范围仅适用于砂泥岩填料在本文及类似条件下的参数取值。

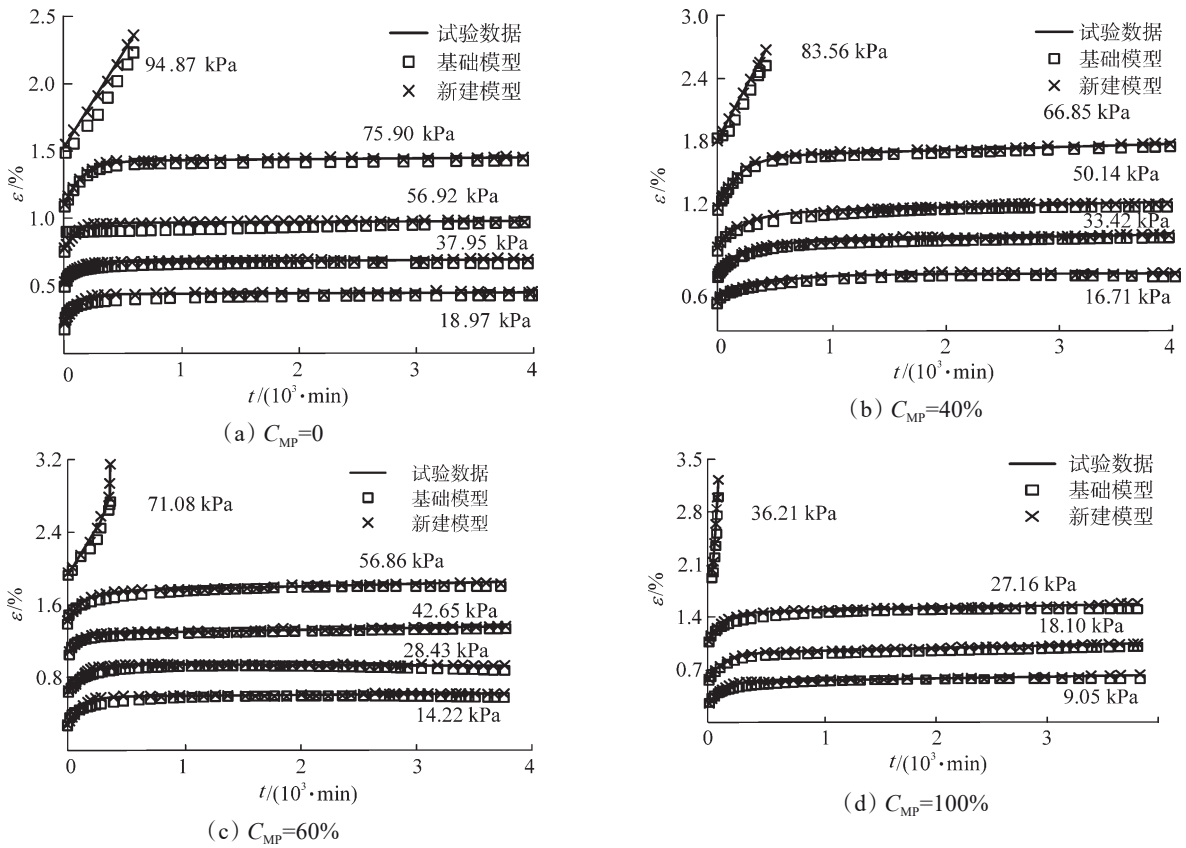


图 13 模拟结果对比

Fig.13 comparison of simulation results

表 4 模型参数

Tab.4 model parameters

| $C_{MP}/\%$ | 应力/kPa | E_0/GPa | $\delta/10^{-4}$ | a | b | c | d | $\eta_2/(\text{MPa}\cdot\text{min})$ | η_0 | β | R^2 | |
|-------------|--------|------------------|------------------|-------|--------|-------|-------|--------------------------------------|----------|---------|---------|---------|
| 0 | 18.97 | 8.477 | 9.753 | 0.084 | 10.267 | 0.157 | 9.532 | 15.836 | 5.726 | 0.385 | 0.991 4 | |
| | 37.95 | | 7.286 | 0.073 | 23.573 | 0.254 | 9.126 | | | | 18.735 | 0.996 7 |
| | 56.92 | | 6.854 | 0.078 | 28.945 | 0.287 | 8.605 | | | | 22.304 | 0.995 3 |
| | 75.90 | | 6.153 | 0.065 | 35.436 | 0.336 | 8.114 | | | | 26.387 | 0.997 2 |
| | 94.87 | | 4.259 | 0.049 | 42.108 | 0.385 | 8.263 | | | | 29.259 | 0.993 8 |
| 20 | 18.07 | 6.892 | 7.806 | 0.075 | 15.749 | 0.180 | 8.355 | 13.685 | 7.384 | 0.416 | 0.995 9 | |
| | 36.14 | | 6.328 | 0.064 | 19.863 | 0.236 | 8.017 | | | | 15.733 | 0.994 5 |
| | 54.20 | | 5.851 | 0.058 | 30.248 | 0.317 | 7.750 | | | | 18.924 | 0.992 1 |
| | 72.27 | | 3.947 | 0.061 | 38.711 | 0.328 | 7.214 | | | | 20.551 | 0.996 0 |
| 40 | 90.34 | 6.235 | 3.453 | 0.052 | 40.253 | 0.419 | 6.981 | 23.296 | 8.502 | 0.457 | 0.989 3 | |
| | 16.71 | | 7.526 | 0.068 | 19.652 | 0.215 | 8.128 | | | | 11.185 | 0.992 4 |
| | 33.42 | | 6.457 | 0.053 | 23.697 | 0.267 | 7.856 | | | | 14.367 | 0.998 5 |
| | 50.14 | | 5.792 | 0.051 | 33.408 | 0.388 | 7.369 | | | | 16.544 | 0.987 2 |
| | 66.85 | | 3.530 | 0.044 | 47.215 | 0.405 | 7.155 | | | | 19.738 | 0.990 8 |
| 60 | 83.56 | 4.965 | 3.085 | 0.042 | 51.380 | 0.441 | 6.732 | 21.391 | 8.726 | 0.424 | 0.988 5 | |
| | 14.22 | | 7.065 | 0.061 | 18.569 | 0.247 | 7.635 | | | | 10.054 | 0.990 8 |
| | 28.43 | | 6.147 | 0.054 | 24.015 | 0.254 | 7.354 | | | | 13.268 | 0.989 5 |
| | 42.65 | | 5.854 | 0.047 | 36.763 | 0.409 | 7.409 | | | | 17.183 | 0.988 7 |
| | 56.86 | | 3.149 | 0.049 | 35.204 | 0.438 | 6.891 | | | | 19.657 | 0.990 2 |
| | 71.08 | | 2.883 | 0.035 | 48.836 | 0.457 | 6.452 | 22.488 | 8.726 | 0.424 | 0.987 4 | |

续表 4

| $C_{MP}/\%$ | 应力/kPa | E_0/GPa | $\delta/10^{-4}$ | a | b | c | d | $\eta_2/(\text{MPa}\cdot\text{min})$ | η_0 | β | R^2 |
|-------------|--------|------------------|------------------|-------|--------|-------|-------|--------------------------------------|----------|---------|---------|
| 80 | 10.96 | 3.091 | 6.585 | 0.057 | 22.174 | 0.268 | 7.392 | 8.762 | 9.143 | 0.480 | 0.991 7 |
| | 21.93 | | 5.726 | 0.052 | 26.857 | 0.283 | 7.154 | 10.953 | | | 0.990 8 |
| | 32.89 | | 5.201 | 0.046 | 35.059 | 0.361 | 6.833 | 13.264 | | | 0.989 4 |
| | 43.86 | | 2.954 | 0.043 | 48.742 | 0.452 | 6.261 | 16.837 | | | 0.990 2 |
| | 54.82 | | 2.623 | 0.031 | 54.628 | 0.486 | 5.954 | 20.155 | | | 0.988 9 |
| 100 | 9.05 | 2.584 | 6.167 | 0.041 | 25.744 | 0.285 | 7.053 | 6.383 | 9.857 | 0.491 | 0.992 2 |
| | 18.10 | | 4.749 | 0.026 | 32.069 | 0.314 | 6.736 | 9.306 | | | 0.988 6 |
| | 27.16 | | 3.255 | 0.022 | 44.287 | 0.402 | 6.128 | 11.758 | | | 0.994 5 |
| | 36.21 | | 1.942 | 0.018 | 52.166 | 0.497 | 5.794 | 14.329 | | | 0.989 1 |

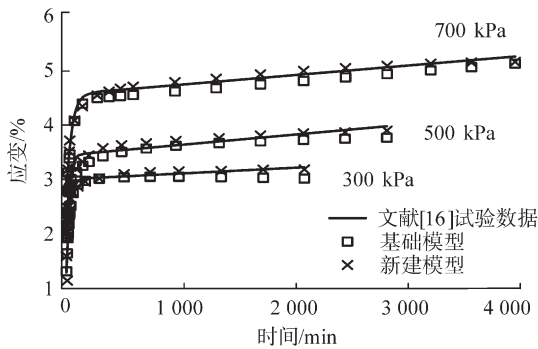


图 14 侧限压缩蠕变试验数据模拟结果对比

Fig.14 comparison of simulation results of confined compression creep test data

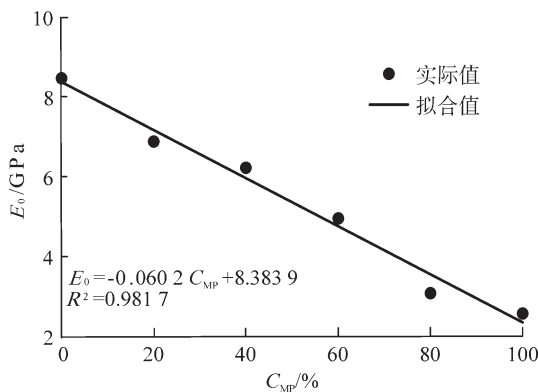


图 15 E_0 与 C_{MP} 关系曲线

Fig.15 relationship between E_0 and C_{MP}

4 结论

(1) 开展砂泥岩填料在不同配合比下的剪切蠕变试验, 发现填料在加载瞬时表现出瞬时弹性变形, 随着时间增长出现衰减、稳态蠕变, 最后一级加载还表现出加速蠕变行为。随着泥岩颗粒含量的增大, 长期强度递减。

(2) 通过研究砂泥岩填料的非线性蠕变特征, 定义一个反映不同配合比及载荷时间的黏弹性模

量, 用于描述填料黏弹性变形, 考虑弹性体非定常, 另引入 SP 元件, 组合得到不同配合比下的砂泥岩填料非线性蠕变力学模型, 并给出参数求解方法。

(3) 针对本文及相关文献中砂泥岩填料的蠕变试验数据, 分别采用新建模型和基础模型进行模拟, 验证了新建模型的合理性和适用性。通过分析初始瞬时弹性模量与配合比之间的关系, 给出了砂泥岩填料在本文及类似条件下的参数建议取值范围。

参考文献 (References):

- [1] 冯楚杰. 考虑软粘土强度与刚度弱化效应离岸深水码头承载特性研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2021: 15-18.
- [2] 王多垠, 兰超, 何光春, 等. 内河港口大直径嵌岩灌注桩横向承载性能室内模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(9): 1307-1313. WANG Duoyin, LAN Chao, HE Guangchun, et al. Researches on lateral support behavior of large diameter rock-socketed cast-in-place piles at river port by laboratory model test[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(9): 1307-1313.
- [3] 宋成涛. 内河港高陡岸坡的接岸型式及其与码头结构的相互关系研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2011: 24-27.
- [4] ZHOU W, CHANG X L, ZHOU C B, et al. Creep analysis of high concrete-faced rockfill dam[J]. International Journal for Numerical Methods in Biomedical Engineering, 2010, 26(11): 1477-1492.
- [5] 朱明哲. 兰州地区钢渣改良红层泥岩填料试验及蠕变模型研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2022: 11-15.
- [6] 刘家光, 宋杨, 王清洲, 等. 循环荷载作用下土石混填料的蠕变模型研究[J]. 长江科学院院报, 2023, 40(12): 147-153. LIU Jiaguang, SONG Yang, WANG Qingzhou, et al. Creep modeling of soil-rock mixed fill under cyclic loading[J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2023, 40 (12): 147-153.
- [7] 王启云, 康健, 张丙强, 等. 铁路粗粒土填料蠕变及颗粒破碎特性试验研究[J]. 铁道标准设计, 2024, 68 (7): 70-77. WANG Qiyun, KANG Jian, ZHANG Bingqiang, et al. Experimental

- study on creep and particle breakage characteristics of railway coarse-grained soil filler[J]. *Railway Standard Design*, 2024, 68(7): 70-77.
- [8] 郭兴文,杜建莉,赵骞,等. 胶凝砂砾石料蠕变试验及大坝长期变形预测[J]. *人民黄河*, 2019, 41(9):149-154.
GUO Xingwen, DU Jianli, ZHAO Qian, et al. Creep test of CSG and long-term deformation prediction of CSG dams[J]. *Yellow River*, 2019, 41(9):149-154.
- [9] 李卫珂. 泾阳 Q_2 原状与重塑黄土纯剪蠕变力学性能对比研究[D]. 西安:西安科技大学, 2017:14-17.
- [10] 刘健,唐扬,易龙,等. 卵石土蠕变本构模型及其工程应用[J]. *长江科学院院报*, 2022, 39(6):107-112.
LIU Jian, TANG Yang, YI Long, et al. Creep constitutive model of cobbly soil and its engineering application[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2022, 39(6):107-112.
- [11] 阮永芬,朱尚万,朱强,等. 高原湖相泥炭质土蠕变特性及本构模型研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2022, 18(3):779-787.
RUAN Yongfen, ZHU Shangwan, ZHU Qiang, et al. Study on creep characteristics and model of plateau lacustrine peat soil[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2022, 18(3): 779-787.
- [12] 刘新喜,李盛南,周炎明,等. 高应力泥质粉砂岩蠕变特性及长期强度研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2020, 39(1):138-146.
LIU Xinxi, LI Shengnan, ZHOU Yanming, et al. Study on creep behavior and long-term strength of argillaceous siltstone under high stresses[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, 39(1):138-146.
- [13] QIAO Z. Experimental analysis on creep mechanics of unsaturated soil based on empirical model[J]. *Open Geosciences*, 2022, 14(1): 785-793.
- [14] TIAN X W, XIAO H B, SU H, et al. Experimental study on creep and long-term strength characteristics of expansive soil improved by the MICP method[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2024, 17 (6):202.
- [15] XU G F, WU W, QI J L. A triaxial creep model for frozen soil based on hypoplasticity[J]. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 2022, 26(7):2569-2580.
- [16] GUO X F, XING X F, WANG Z H, et al. Compression characteristic and creep behavior of moraine soil at Xingkang Bridge, West Sichuan, China[J]. *Journal of Earth Science*, 2023, 34(4):1272-1279.
- [17] 巨能攀,黄海峰,郑达,等. 考虑含水率的红层泥岩蠕变特性及改进伯格斯模型[J]. *岩土力学*, 2016, 37(增刊2):67-74.
JU Nengpan, HUANG Haifeng, ZHENG Da, et al. Improved Burgers model for creep characteristics of red bed mudstone considering water content[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37 (Suppl.2):67-74.
- [18] 许宏发. 软岩强度和弹模的时间效应研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 1997, 16(3):246-251.
XU Hongfa. Time dependent behaviours of strength and elasticity modulus of weak rock[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1997, 16(3):246-251.
- [19] 宋飞,赵法锁,卢全中. 石膏角砾岩流变特性及流变模型研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(15):2659-2664.
SONG Fei, ZHAO Fasuo, LU Quanzhong. Study on rheological properties and model for gypsum breccias[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(15):2659-2664.
- [20] 易琳力. 不同配合比砂泥岩混合填料蠕变特性试验研究[D]. 成都:成都理工大学, 2020:21-25.