



# 考虑配合比的砂泥岩混合填料 剪切蠕变力学特性 \*

蔺国骞<sup>1</sup>, 曹利军<sup>2</sup>

(1. 甘肃省交通规划勘察设计院股份有限公司, 甘肃 兰州 730030; 2. 水发规划设计有限公司, 山东 济南 250014)

**摘要:** 砂泥岩混合填料的配合比是影响码头地基承载性能及稳定性关键因素。为研究不同配合比下砂泥岩混合填料土的蠕变力学特性, 开展剪切蠕变试验。结果表明, 在同一配合比下, 随着剪应力加载等级的提高, 瞬时、蠕变应变量及初始、稳态蠕变速率均呈逐渐递增趋势; 当处于同样加载等级时, 初始、稳态、极限加速蠕变速率及瞬时、蠕变应变量均随配合比中泥岩颗粒占比增大而呈递增趋势; 混合填料长期强度折减较大, 折减范围为 50.53%~66.95%, 长期强度随配合比中泥岩颗粒占比增大而递减。研究成果可为码头砂泥岩混合填料地基长期稳定性评价提供一定参考。

**关键词:** 码头地基; 砂泥岩; 混合填料; 配合比; 剪切蠕变; 长期强度

中图分类号: U655

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)04-0189-07

## Shear creep mechanical properties of sand shale mixed filler considering mix ratio

LIN Guoqian<sup>1</sup>, CAO Lijun<sup>2</sup>

(1. Gansu Transportation Planning Survey and Design Institute Co., Ltd., Lanzhou 730030, China;

2. Shuifa Planning and Design Co., Ltd., Jinan 250014, China)

**Abstract:** The mix ratio of sand-mudstone mixed filler is a key factor affecting the bearing capacity and stability of the wharf foundation. To study the creep mechanical properties of sand shale mixed fill soil under different mix proportions, shear creep tests are carried out. The results show that under the same mix ratio, the instantaneous and creep strain and the initial and steady creep rates increase gradually with the increase of the loading level of shear stress. When at the same loading level, the initial, steady-state, and ultimate accelerated creep rates, as well as instantaneous and creep strains, all show a decreasing trend with the increase of the proportion of mudstone particles in the mix ratio. The long-term strength reduction of mixed filler is relatively large, ranging from 50.53% to 66.95%, and the long-term strength decreases with the increase of the proportion of mudstone particles in the mix ratio. The research results can provide some references for the long-term stability evaluation of the mixed sand-mudstone filling foundation of the wharf.

**Keywords:** wharf foundation; sand-mudstone; mixed filler; mix ratio; shear creep; long-term strength

随着我国西南地区水运行业的发展, 山区内河水运枢纽、港口码头大力建设, 为提升内河航道航运能力奠定了基础<sup>[1]</sup>。受地形地质因素的影响, 西南地区内河码头的建设往往面临着作业空间狭窄、岸坡地势高、堆场面积小、合格填料难以找寻及运输等困难, 对拟建码头陆侧岸坡开挖,

将开挖料处理后用于码头临水侧回填是可行的工程手段<sup>[2-3]</sup>。重庆万州港处于红层地区, 三叠系砂岩、泥岩互层, 开挖砂岩往往夹杂泥岩碎料, 考虑经济成本和施工难易程度, 将开挖后砂岩、泥岩以一定配合比制成混合填料用于回填。

不同配合比影响着码头地基填料的瞬时力学

收稿日期: 2023-08-06

\*基金项目: 山东省自然科学基金项目 (ZR2018BEE050)

作者简介: 蔺国骞 (1981—), 男, 高级工程师, 研究方向为岩土工程及地基基础工程。

和蠕变力学特性，其中瞬时力学特性（回填强度、压缩系数）是码头地基设计中的重要参考指标，杨曦<sup>[4]</sup>、杨皓然等<sup>[5]</sup>、吴晓和李顺等<sup>[6-7]</sup>针对不同配合比下的砂泥岩填料瞬时力学特性进行研究，已有大量成果；而针对不同配合比下的砂泥岩填料的蠕变力学特性研究鲜有报道。

鉴于此，本文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，分析混合填料在不同剪应力和配合比下的应变特征、蠕变速率及加速度、长期强度，以期为码头砂泥岩混合填料地基长期稳定性评价提供一定参考。

## 1 砂泥岩混合填料剪切蠕变试验

### 1.1 试验材料

砂泥岩混合填料取自重庆万州港项目，砂岩和泥岩的基本物理力学参数见表 1。

表 1 砂岩和泥岩的基本物理力学参数

岩石类别	密度/ $t \cdot m^{-3}$	弹性模量/GPa	单轴抗压强度/MPa	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)
泥岩	1.877	3.54	19.76	4.96	38.24
砂岩	2.248	11.65	64.82	16.54	41.78

将开挖料进行破碎和筛分，恒温 100 °C 烘干后复筛，获得不同粒径范围的砂岩和泥岩料。按同样的级配曲线(图 1)制作不同配合比的混合料，计算得到不均匀系数  $C_u$  为 7.51，曲率系数  $C_c$  为 1.84，级配良好。

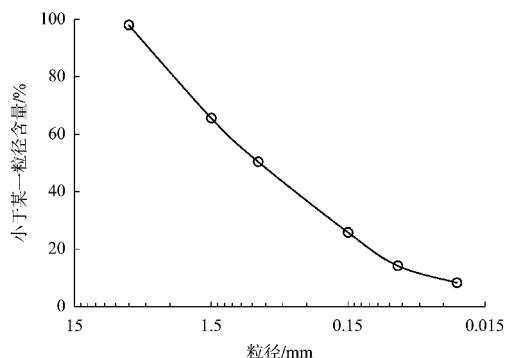


图 1 级配曲线

### 1.2 试验方案设计

由于重庆万州港码头地基处于浸水状态，在这种长期的饱水状态下，码头地基砂泥岩混合填

料蠕变效应显著，由此将蠕变试验的含水条件设定为饱和，饱和含水率取 15%。制备泥岩与砂岩比例为 0:10、2:8、4:6、6:4、8:2、10:0 的混合料，每种配合比设置 2 组平行试验样，采用标准环刀(内径 61.8 mm、高 20 mm)制备试样，通过水膜转移法控制制样含水率为 15%，保湿缸静置 1 d，确保混合料试样水分均匀扩散。

试验仪器采用 ZLB 直剪蠕变仪，考虑到码头地基所处应力状态，为方便试验应力设置，近似设正应力为 100 kPa。开展剪切蠕变试验前，应进行 6 种配合比的混合料在正应力 100 kPa 下的直剪试验，直剪试验得到的剪应力-应变曲线如图 2 所示，每种工况下的最大剪应力分 5 级做为剪切蠕变试验的增量荷载<sup>[8]</sup>，每一级增量荷载持续时间不低于 4 000 min，以保证蠕变充分发展，试验加载方案见表 2。

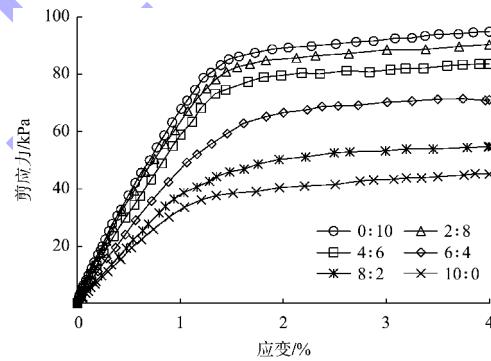


图 2 混合填料剪应力-应变曲线

表 2 剪切蠕变试验加载方案

配合比 (泥岩:砂岩)	正应力/ kPa	剪应力加载/kPa			最大 剪应力/kPa
		18.97	37.95	56.92	
0:10	100	75.90	94.87		94.87
		72.27	90.34		
2:8	100	18.07	36.14	54.20	90.34
		66.85	83.56		
4:6	100	16.71	33.42	50.14	83.56
		56.86	71.08		
6:4	100	14.22	28.43	42.65	71.08
		43.86	54.82		
8:2	100	10.96	21.93	32.89	54.82
		43.86	54.82		
10:0	100	9.05	18.10	27.16	45.26
		36.21	45.26		

### 1.3 试验结果

通过试验得到不同工况下的混合填料剪切蠕

变曲线, 如图3所示。

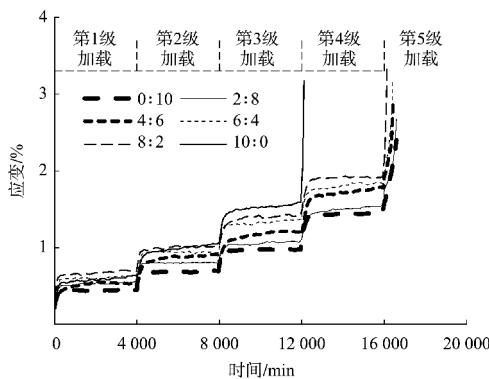


图3 混合填料剪切蠕变曲线

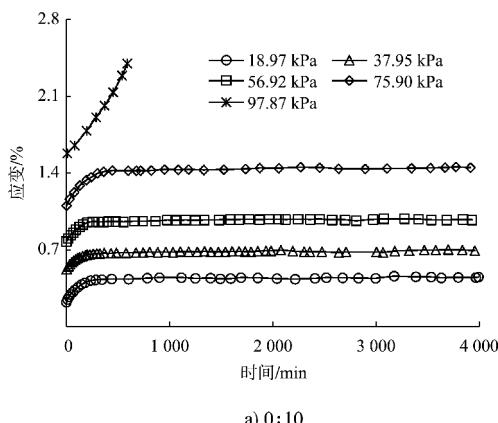
由图3可知, 不同配合比下的混合填料剪切蠕变曲线近似“台阶”形, 应变在每一级加载下累积递增。其中10:0配合比下的混合填料仅经历4级加载便发生蠕变破坏, 其余5种配合比均经历5级加载后破坏。在同样加载等级下, 随着配合比中泥岩颗粒占比增大, 应变呈递增趋势, 这说明泥岩颗粒相比砂岩颗粒更容易发生变形。

## 2 试验成果分析

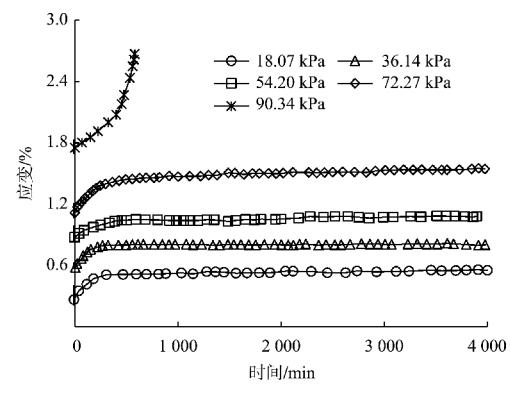
### 2.1 分别加载蠕变曲线

经 Boltzmann 线性叠加<sup>[9-10]</sup>得到混合填料分别加载不同剪应力的蠕变曲线, 如图4所示。

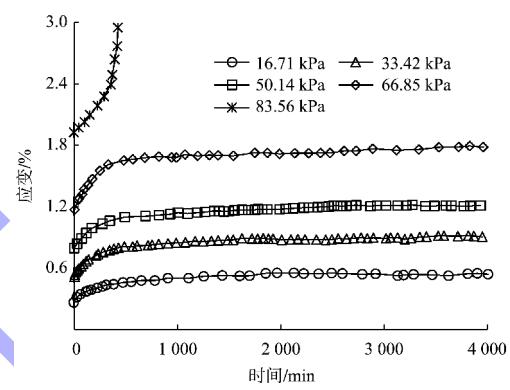
由图4可看出, 不同配合比下的混合填料分别加载不同剪应力的蠕变曲线形态相似。在剪应力加载瞬间, 填料首先表现出瞬时弹性变形, 接着大致在0~300 min范围进入衰减蠕变, 应变基本稳定即进入稳定蠕变阶段, 在最后一级加载下, 应变突增, 混合填料表现为加速蠕变, 填料发生宏观破坏。



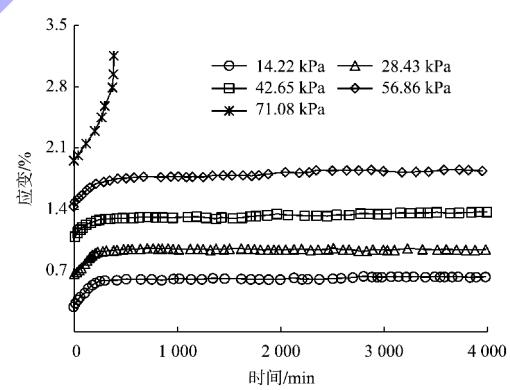
a) 0:10



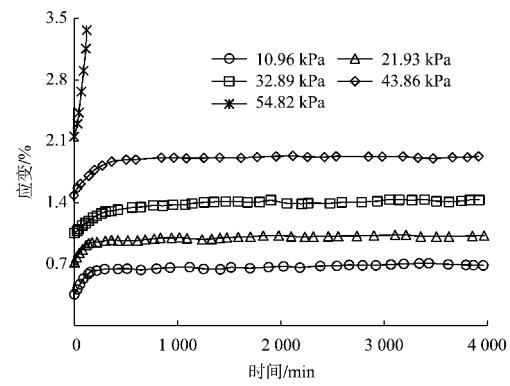
b) 2:8



c) 4:6



d) 6:4



e) 8:2

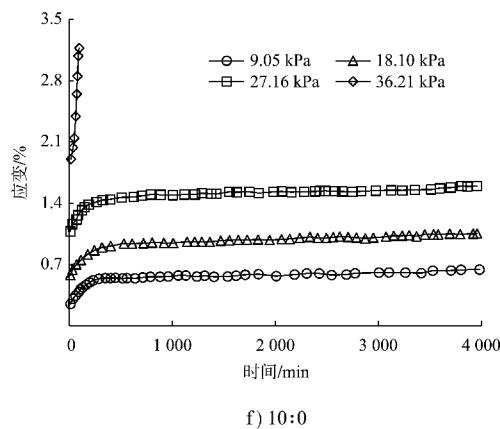


图 4 不同配比混合填料加载不同剪应力的蠕变曲线

## 2.2 应变特征

砂泥岩混合填料在剪应力加载瞬间，产生瞬时弹性应变，在蠕变发展的过程中产生的应变为蠕变应变。为定量描述混合填料的应变特征，绘制不同配合比下的混合填料瞬时、蠕变应变变化曲线(图 5)。

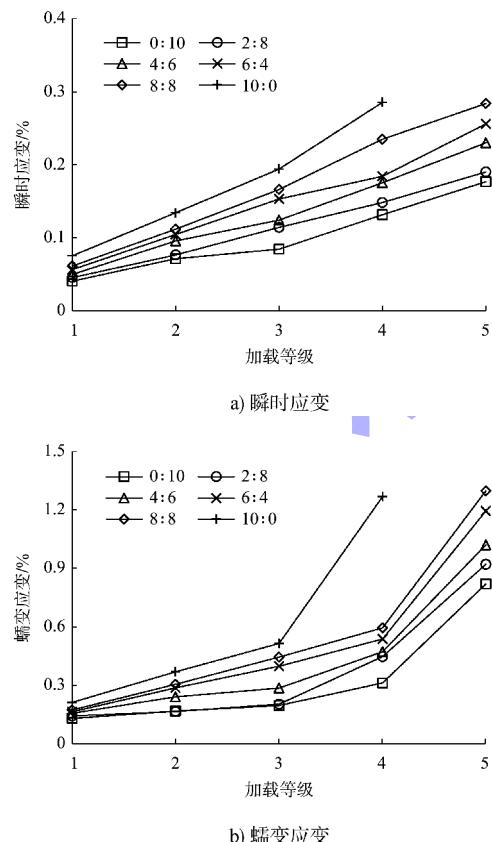


图 5 不同配合比下的瞬时、蠕变应变变化曲线

由图 5a) 可看出，瞬时应变量随着加载等级的提高而呈逐渐递增趋势。当处于同级加载时，随着配合比中泥岩颗粒占比增大，瞬时应变量呈递

增趋势，这说明泥岩颗粒相比砂岩颗粒更容易发生瞬时变形。分析其原因可能为：一是泥岩相比砂岩结构相对松散，孔隙发育更多，机械破碎后，部分颗粒仍有孔隙，荷载作用瞬间的瞬时变形量更大；二是泥岩通常含有蒙脱石、伊利石等黏土矿物，遇水膨胀导致变形量增大。

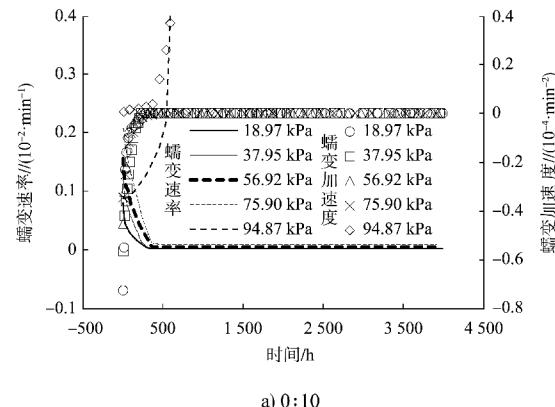
由图 5b) 可看出，蠕变应变量随着加载等级的提高而呈逐渐递增趋势。当处于同级加载时，随着配合比中泥岩颗粒占比增大，蠕变应变量呈递增趋势，这说明泥岩颗粒相比砂岩颗粒更容易发生蠕变变形。分析其原因可能为饱和状态下水充斥到颗粒孔隙间，在剪应力荷载的持续作用下，颗粒孔隙中的水持续挤压排出，孔隙被微颗粒填充，微颗粒持续位移，泥岩颗粒相比砂岩颗粒孔隙更多，微颗粒位置调整幅度相对更大，因此配合比中泥岩颗粒含量越高导致蠕变变形更显著。

综上所述，砂泥岩混合填料的蠕变应变量大于瞬时应变量，表明该填料具有明显的蠕变现象。在码头地基工程中，应慎重考虑砂泥岩填料的配合比，并进行严密的论证分析，以减少填料的蠕变变形和削弱码头地基的长期变形。

## 2.3 蠕变速率及加速度

基于图 4 的蠕变数据，分别求一阶导、二阶导，得到蠕变速率及加速度曲线(图 6)，限于篇幅，仅以 0:10、4:6 和 10:0 这 3 种配合比为例。

由图 6 看出，混合填料蠕变速率和加速度曲线与蠕变发展各阶段相对应，其中衰减蠕变阶段的蠕变速率  $v$  从某初始值开始逐渐衰减， $a < 0$ ；稳定蠕变阶段的  $v$  基本恒定， $a = 0$ ；加速蠕变阶段的  $v$  在短时间内急剧增加， $a > 0$ 。



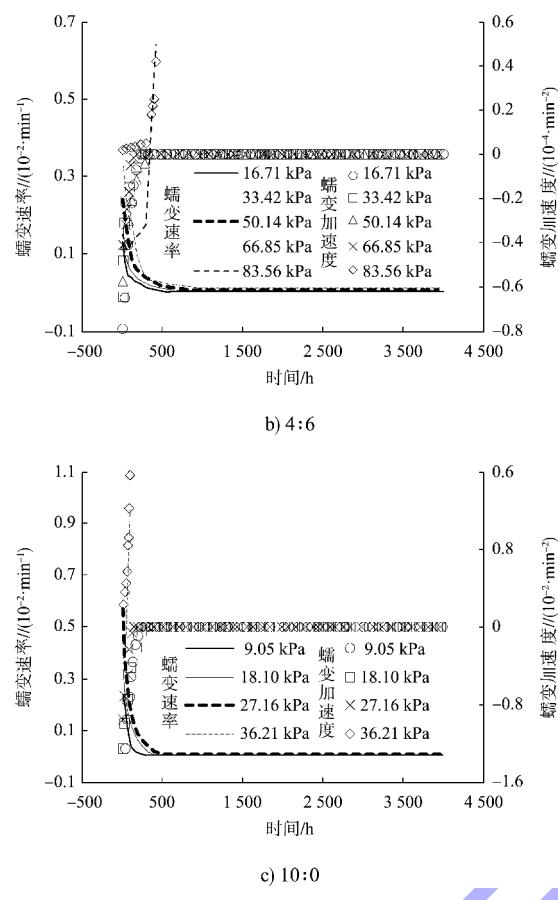


图6 蠕变速率及加速度曲线

为研究初始、稳态和极限加速蠕变速率<sup>[11]</sup>与配合比、剪应力之间的关系, 绘制曲线如图7所示。由于图4中最后一级加载下主要表现为加速蠕变, 衰减和稳态蠕变行为不明显, 在图7a)中略去最后一级加载的初始蠕变速率, 在图7b)中略去最后一级加载的稳态蠕变速率。

由图7a)可看出, 在配合比0:10、剪应力18.97 kPa条件下, 初始蠕变速率最小, 仅有 $0.0815 \times 10^{-2}/\text{min}$ , 在配合比10:0、剪应力27.16 kPa条件下有最大初始蠕变速率, 达 $0.5697 \times 10^{-2}/\text{min}$ 。在同一配合比下, 初始蠕变速率随着剪应力增大而递增。当处于同样加载等级时, 初始蠕变速率随着配合比中泥岩颗粒占比增大而呈递增趋势。

由图7b)可看出, 在配合比0:10、剪应力18.97 kPa条件下, 稳态蠕变速率最小, 仅有 $0.0018 \times 10^{-2}/\text{min}$ ; 在配合比8:2、剪应力43.86 kPa条件下有最大稳态蠕变速率, 达 $0.5693 \times 10^{-2}/\text{min}$ 。在同一配合比下, 稳态蠕变速率随着剪应力增大而递增。当处于同样加载等级时, 配合比中较高

泥岩颗粒占比情形下的稳态蠕变速率始终高于较低占比情形, 这说明泥岩颗粒占比的提高促进稳态蠕变速率提升。

由图7c)可看出, 随着配合比中泥岩颗粒占比减少, 极限加速蠕变速率呈递减趋势, 这说明泥岩颗粒占比的提高促进加速蠕变发展。

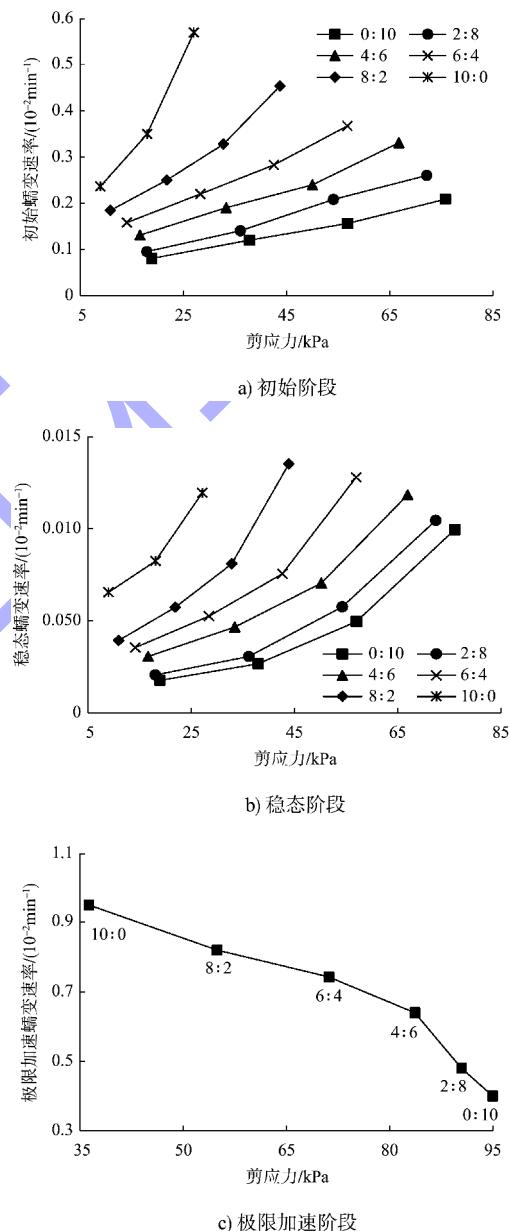


图7 不同阶段蠕变速率与配合比、剪应力关系曲线

综合图7可发现, 剪应力的提升促进初始、稳态蠕变速率提升。随着配合比中泥岩颗粒占比提升, 初始、稳态和极限加速蠕变速率均呈递增趋势, 结合图5分析, 泥岩颗粒相比砂岩颗粒蠕变性能更强, 更容易发生蠕变变形。

## 2.4 长期强度

长期强度关系到地基基础工程的长期稳定性，是实体工程长远营运安全管控中的重要参考指标<sup>[12]</sup>。在图 4 中取 5、500、1 000、1 500、2 000、2 500、3 000、3 500 和 4 000 min 的剪应力-应变数据点，绘制等时剪应力-应变曲线(图 8)，限于篇幅，仅以 0:10、4:6 和 10:0 这 3 种配合比为例，通过在曲线中取拐点<sup>[13-14]</sup>的方法确定长期强度。

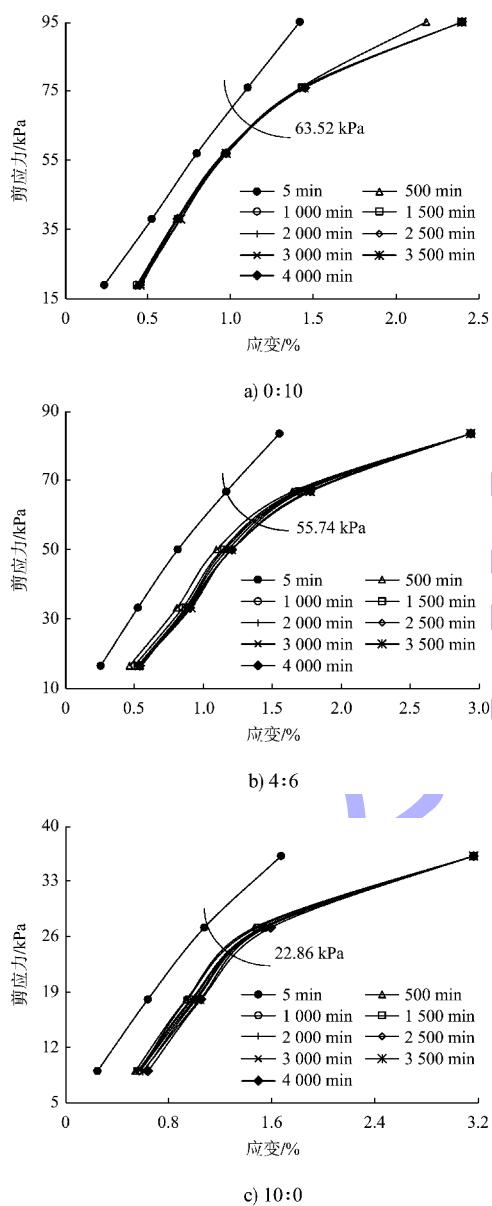


图 8 不同配合比下的等时剪应力-应变曲线

由图 8 看出，等时剪应力-应变曲线由 5 min 线性曲线及 500~5 000 min 非线性曲线簇组成，曲线簇表现出随应变增大而愈发靠拢应变横轴的趋势。

将 6 种配合比下的长期强度、最大剪应力及

两者比值绘图，如图 9 所示。

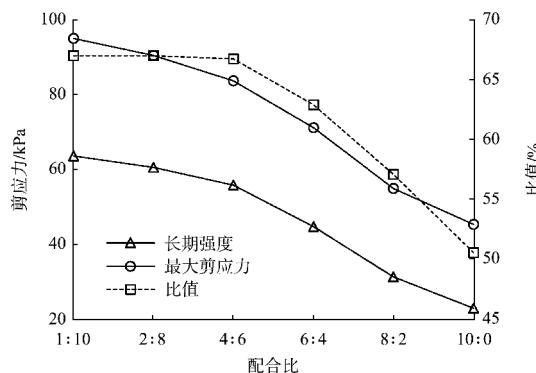


图 9 长期强度与最大剪应力对比曲线

由图 9 可看出，混合填料的长期强度和最大剪应力均随配合比中泥岩颗粒占比增大而呈递减趋势，泥岩颗粒占比超过 40% 后，长期强度、最大剪应力及其比值的衰减速度加剧。砂泥岩混合填料长期强度和最大剪应力比值介于 50.53%~66.95%，长期强度折减较大，其折减比例随着配合比中泥岩颗粒占比增长而递增。在码头地基基础工程中，建议砂泥岩混合填料中泥岩颗粒占比不宜超过 40%，以保证合适的长期、瞬时强度以及长期强度折减比例，同时蠕变效应控制在一定程度内。根据本文试验研究成果，结合万州港码头地基工程实际，建议配合比范围控制在 0:10~4:6。

## 3 结论

1) 本文开展不同配合比下的砂泥岩混合填料剪切蠕变试验，混合填料在加载瞬间表现有弹性变形，接着依次进入衰减、稳定蠕变阶段，最后一级加载还表现出加速蠕变。瞬时、蠕变应变量均随着加载等级的提高而呈逐渐递增趋势。当处于同级加载时，随着配合比中泥岩颗粒占比增大，瞬时、蠕变应变量均呈递增趋势。

2) 剪应力的提升促进混合填料初始、稳态蠕变速率提升。随着配合比中泥岩颗粒占比提升，初始、稳态和极限加速蠕变速率均呈递增趋势。泥岩颗粒相比砂岩颗粒蠕变性能更强，更容易发生蠕变变形。

3) 混合填料的长期强度和最大剪应力均随配合比中泥岩颗粒占比增大而呈递减趋势，泥岩颗

粒占比超过40%后, 长期强度、最大剪应力及其比值的衰减速度加剧。在码头地基基础工程中, 建议砂泥岩混合填料中泥岩颗粒占比不宜超过40%, 以保证合适的长期、瞬时强度以及长期强度折减比例, 同时蠕变效应控制在一定程度内。

### 参考文献:

- [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.
- [2] TANG P, YU Y D. Study on optimal selection for soft soil foundation treatment methods of port engineering [J]. Applied mechanics and materials, 2013, 2574 (738): 2007-2013.
- [3] 赵燕. 重力式煤码头沉箱后方回填优化设计[J]. 中国水运(上半月), 2022(9): 108-109.
- [4] 杨曦. 重庆某机场水库高填方区砂泥岩混合填筑料适宜性研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2015.
- [5] 杨皓然, 李铁园. 砂岩泥岩混合料工程特性试验研究[J]. 中国水运, 2016, 37(5): 73-75.
- [6] 吴晓. 港区砂泥岩混合填料强度特性直剪试验研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2017.
- [7] 李顺, 吴晓. 泥岩颗粒含量对砂泥岩混合料剪切特性的影响[J]. 水运工程, 2021(11): 192-197.
- [8] 李卫珂. 泾阳 Q<sub>2</sub> 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.
- [9] 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.
- [10] 李春, 谭维佳. 不同围压条件下淤泥质黏土蠕变力学特性试验及模拟[J]. 水运工程, 2022(2): 179-185, 208.
- [11] 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(S2): 67-74.
- [12] 陈海应. 泥炭质土的非线性本构模型及蠕变特性分析[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2020.
- [13] ZHU F, DUAN Z Y, WU Z Y, et al. Experimental study on direct shear creep characteristics and long-term strength of red layer sliding zone soil in southern Hunan [C]// International Conference on Materials: Advanced Materials Research, Switzerland: Trans Tech Publications, 2014, 842: 782-787.
- [14] 张兆楠. 两种软土非线性蠕变特性与长期强度试验研究[D]. 长春: 吉林大学, 2015.

(本文编辑 王传瑜)

(上接第167页)

2) 分层沉降监测结果表明, 施工期深层淤泥层压缩量可达2.88%, 土体固结效果显著。表层沉降观测数据表明, 监测后期沉降速率平均为0.09 mm/d, 说明沉降已稳定。

3) 堆载和强夯施工期间, 深层的水位管水位明显高于表层水位管, 在管井降水的同时, 不同点位的孔隙水压力仍有小幅度增大, 说明堆载和强夯排水固结效果明显。

4) 施工期间试验区最大水平位移速率为2.43 mm/d, 均未超过10 mm/d, 一方面说明施工加载速率控制较好, 另一方面说明土体的沉降和压缩主要是由于土体固结引起的。

5) 土工试验检测结果表明, 地基加固前后, 土体含水率、孔隙比、液性指数等均明显下降, 软土的十字板剪切强度的平均值提升20%以上, 改善效果明显。

6) 根据静力触探经验公式确定地基承载力, 试验区①<sub>2</sub>层承载力特征值均达200 kPa以上。平板载荷试验数据表明, 当加载至240 kPa时, 土体

变形仍为直线变形阶段(即压密阶段), 表明极限荷载不小于240 kPa, 即承载力特征值大于120 kPa, 推算承载力特征值达到180 kPa以上。

### 参考文献:

- [1] 白冰, 刘祖德. 冲击载荷作用下饱和软粘土孔压增长和消解规律[J]. 岩土力学, 1998, 19(2): 33-38.
- [2] 白冰, 刘祖德. 动静结合排水固结法处理软基若干问题研究[J]. 四川建筑科学研究, 2000, 26(1): 39-42.
- [3] 张小龙, 刘宝臣, 吴名江, 等. 短程超载真空预压动力排水固结法加固深厚淤泥软基工法研究[J]. 工程地质学报, 2012, 20(1): 109-115.
- [4] 周顺万, 周跃龙, 李旺准. 轻型井点降水联合强夯法在港口吹填砂场地的应用[J]. 公路, 2013(1): 196-199.
- [5] 张大军, 李彭明, 刘俊雄. 超软土地基静动力排水固结法处理的竖向排水体系影响因素分析[J]. 施工技术, 2014, 43(4): 97-100.
- [6] 李彭明, 王茜, 赖建坤, 等. 静动力排水固结法最佳冲击能研究及应用[J]. 施工技术, 2016, 45(17): 20-24.

(本文编辑 赵娟)