

# 注浆红黏土力学性能的试验研究

张恺<sup>1</sup>, 刘妍<sup>2</sup>, 彭水根<sup>1</sup>

(1. 江西省交通科学研究院, 江西 南昌 330200; 2. 江西赣粤高速公路股份有限公司九江管理中心, 江西 九江 332000)

**摘要:** 该文研究溶洞上覆红黏土在注浆前后的力学性能, 包括其强度特性和动力特性。采用快剪试验分析注浆红黏土的内摩擦角  $\varphi$  和黏聚力  $c$ , 采用动三轴试验分析土的临界动应力、动剪切模量、阻尼比和软化指数。试验结果表明: 在未注浆的情况下, 溶洞上覆红黏土处于软塑状态(液性指数  $I_L = 0.9$ ), 内摩擦角  $\varphi$  仅为  $21.1^\circ$ , 黏聚力  $c$  仅为  $9.7 \text{ kPa}$ ; 在注浆量达到  $1\ 200 \text{ L}$  且经  $10 \text{ d}$  养生后, 红黏土进入坚硬状态( $I_L = -0.4$ ), 抗剪强度进一步提高。注浆量的增加有助于抑制轴向累积应变的增长, 并提高试样的临界动应力, 从而提高溶洞上覆红黏土的防振抗塌能力, 减少土洞塌陷。注浆量的增加还有助于提高动剪切模量、阻尼比和软化指数, 从而减小土体的损伤程度。

**关键词:** 道路工程; 红黏土; 注浆; 防振抗塌; 动三轴

**中图分类号:** U414 **文献标志码:** A

溶洞上覆土层(多为红黏土)富含地下水, 在地下水的浸泡下呈可塑甚至软塑状态, 可能在抽水、排水、爆破、加载、振动等因素的作用下形成土洞, 并进一步产生塌陷。在这种情况下, 需要针对溶洞上覆土层进行注浆, 其目的为: ① 排出水分, 将红黏土软塑状态提高为可塑至硬塑状态, 提高溶洞上覆土层的抗冲刷侵蚀能力; ② 提高红黏土动剪切模量和软化指数, 提高溶洞上覆土层的防振抗塌能力, 避免产生土洞塌陷。

现有红黏土研究主要是静力学特性分析, 而动力学特性分析的较少。李景阳<sup>[1]</sup>采用三轴剪切试验和气压固结试验, 探讨了贵州残积红黏土的力学特性, 发现其结构强度与溶蚀—交代成土过程有关; 王建收等<sup>[2]</sup>采用饱和固结快剪试验和非饱和三轴试验, 分析了西南山区红黏土的工程特性, 发现原状红黏土含水量高、孔隙比大、塑性强, 黏聚力为  $10 \text{ kPa}$  左右, 内摩擦角为  $10^\circ$  左右<sup>[2]</sup>; 程允等<sup>[3]</sup>采用快剪试验, 分析了干湿循环作用对岩溶区红黏土的影响, 发现其黏聚力随干湿循环作用大幅降低, 同时, 内摩擦角小幅上升; Yuan 等<sup>[4]</sup>采用强夯试验, 分析了红黏土的非线性动力特性, 发现具有较低落差高度的重型夯实机比具有较高落差高度的轻型夯实机具有更好的加固效果; Zhang 等<sup>[5]</sup>采用循环加载三轴试验, 分析了红黏土的剪切破坏特性, 发现不排水抗剪强度和超孔隙水压力随围压和超固结比增大而增大; Zhang 和 Liu<sup>[6]</sup>采用扫描电镜 SEM、能谱

分析、X 射线衍射 XRD 分析了红黏土的水稳定性和力学特性, 发现其中的蒙脱石矿物成分和层状结构容易在水的作用下破坏。

研究注浆红黏土的临界动应力、动模量、阻尼比和软化指数等动力特性对于防治土洞具有重要意义。该文主要采用动三轴试验, 研究注浆红黏土的抗剪强度以及在循环荷载作用下的动力特性。

## 1 试验基本情况

### 1.1 试验土样

研究区位于江西省某高速公路 K11+727 附近, 地下水位  $10.4 \text{ m}$ , 自  $14.4 \text{ m}$  至基岩面( $18 \text{ m}$ )分布红黏土, 自  $16 \text{ m}$  开始向下由可塑状态转变为软塑状态, 性状极为软弱。按  $1:1$  的水灰比进行注浆, 共包括 4 个试验孔。溶洞上覆红黏土裂隙、含水等状况的空间变异性对注浆试验结果存在影响。为减小空间变异性带来的误差, 4 个试验孔按正方形布置, 间距为  $2 \text{ m}$ 。1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>、4<sup>#</sup> 试验孔注浆量  $V$  分别为  $0$  (不注浆)、 $400 \text{ L}$ 、 $800 \text{ L}$ 、 $1\ 200 \text{ L}$ 。现场试验表明: 注浆  $10 \text{ d}$  后透水率平均由  $62 \text{ Lu}$  降低至  $12 \text{ Lu}$ , 平均标准贯入击数由  $14$  次提高至  $25$  次。由此表明, 注浆有利于提高溶洞上覆土层的抗冲刷侵蚀能力。

进一步地, 在注浆  $10 \text{ d}$  后取原状土(取土深度

17.0~17.5 m)进行室内试验研究结果见表 1。由表 1 可知:注浆后土体物理参数得以明显改善。

表 1 试验土样的基本物理性质

试验孔	$\rho/$ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	$w/$ %	$w_L/$ %	$w_P/$ %	$I_P$
1 <sup>#</sup>	1.68	41	42	15	27
2 <sup>#</sup>	1.76	35	46	19	27
3 <sup>#</sup>	1.82	27	48	23	25
4 <sup>#</sup>	1.88	18	51	28	23

1.2 试验方案

土的内摩擦角  $\varphi$  和黏聚力  $c$  是表征土体强度特性的主要参数,采用快剪试验进行分析。土的临界动应力、动剪切模量、阻尼比和软化指数是表征土体动力特性的主要参数,利用动三轴试验进行分析。动三轴试验主要研究不同注浆量下红黏土的动力特性,包括动剪切模量、阻尼比和软化指数。其中,循环荷载的波形为正弦波,振动频率  $f$  采用 1 Hz,采用应力控制方式施加循环荷载。考虑到取土深度较深(17 m),故设置动应力幅值  $\sigma_d=200\sim700$  kPa,围压  $\sigma_3$  为 100 kPa(相当于取土位置的侧向土压力),循环加载 300 次,研究动力特性的变化情况。

2 测试结果和讨论

2.1 抗剪强度

采用快剪试验测定不同注浆量条件下红黏土的抗剪强度,结果如表 2 所示。在未注浆的情况下(1<sup>#</sup> 试验孔),溶洞上覆红黏土处于软塑状态(液性指数  $I_L=0.9$ ),内摩擦角  $\varphi$  仅为  $21.1^\circ$ ,黏聚力  $c$  仅为 9.7 kPa。在注浆量达到 400 L 之后,由于水泥浆大量吸水,含水率大幅度降低,红黏土由软塑状态提高为可塑状态( $I_L=0.6$ )。与此同时,抗剪强度大幅度提高。在注浆量达到 1 200 L 且经 10 d 养生之后,红黏土进入坚硬状态( $I_L=-0.4$ ),抗剪强度进一步提高。

表 2 试验土样的抗剪强度

试验孔	注浆量/L	$\varphi$		$c$	
		实测值/ $^\circ$	提高率/%	实测值/kPa	提高率/%
1 <sup>#</sup>	0	21.1	—	9.7	—
2 <sup>#</sup>	400	27.4	30	29.5	204
3 <sup>#</sup>	800	33.8	23	53.6	82
4 <sup>#</sup>	1 200	37.2	10	81.3	52

2.2 轴向累积应变

图 1 为红黏土试样在不同注浆量下,动应力幅值

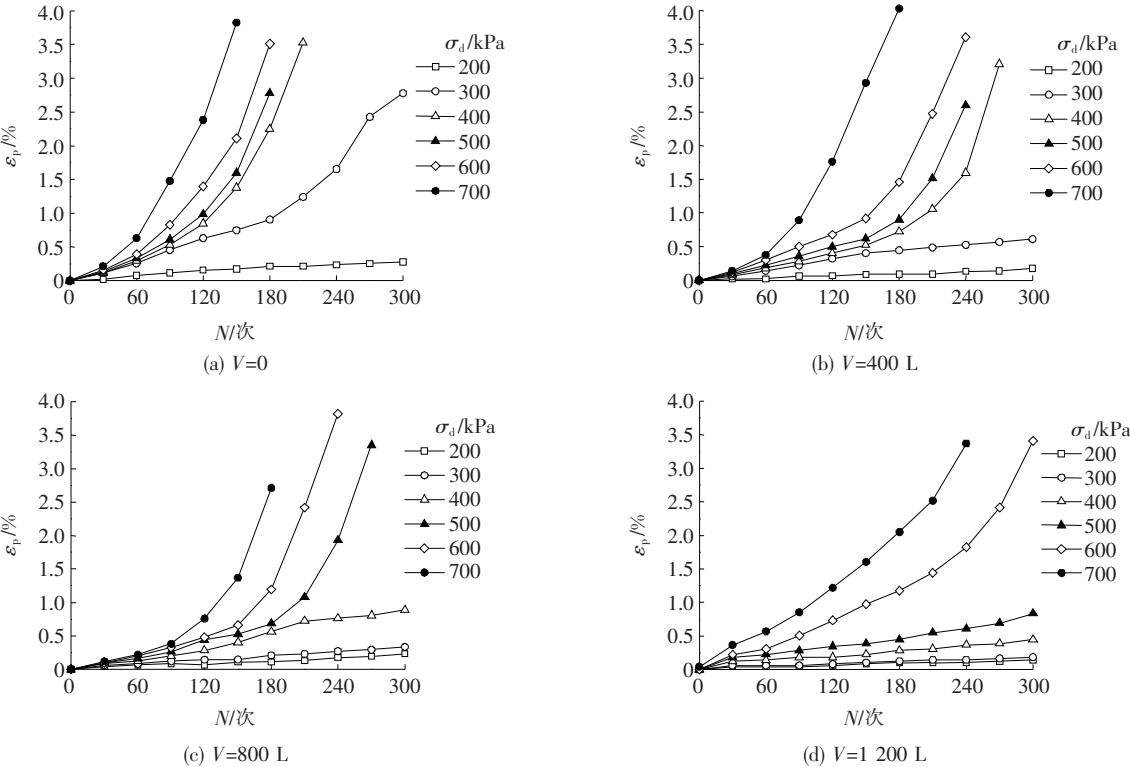


图 1 轴向累积应变的变化规律

$\sigma_d=200\text{ kPa}$ 、 $300\text{ kPa}$ 、 $400\text{ kPa}$ 、 $500\text{ kPa}$ 、 $600\text{ kPa}$ 、 $700\text{ kPa}$ 时的轴向累积应变发展曲线,规定试样在轴向累积应变 $\epsilon_p$ 超过 $4.0\%$ 时破坏。

由图1可知:

(1) 在不注浆( $V=0$ )的情况下,若 $\sigma_d\leq 200\text{ kPa}$ ,轴向累积应变 $\epsilon_p$ 缓慢增长至 $0.2\%$ 并趋于稳定;若 $\sigma_d\geq 300\text{ kPa}$ ,累积应变 $\epsilon_p$ 随加载次数 $N$ 快速增加至试样破坏;若 $200\leq\sigma_d\leq 300\text{ kPa}$ ,累积应变 $\epsilon_p$ 的增长速率介于缓慢与快速之间,红黏土试样位于稳定与破坏之间,可将其称为极限状态。

(2) 对于注浆红黏土,随着注浆量 $V$ 的增加,轴向累积应变 $\epsilon_p$ 的增长速率明显减缓,破坏的试样逐渐减少。具体地,在注浆量 $V=400\text{ L}$ 的情况下,控制 $\sigma_d\leq 300\text{ kPa}$ 可使试样处于稳定状态;在注浆量 $V=800\text{ L}$ 的情况下,控制 $\sigma_d\leq 400\text{ kPa}$ 可使试样处于稳定状态;在注浆量 $V=1\,200\text{ L}$ 的情况下,控制 $\sigma_d\leq 500\text{ kPa}$ 可使试样处于稳定状态。

2.3 临界动应力

由2.2节可知,在不注浆( $V=0$ )的情况下,若 $200\leq\sigma_d\leq 300\text{ kPa}$ ,红黏土试样将处于极限状态。因此,将 $200\leq\sigma_d\leq 300\text{ kPa}$ 称为不注浆条件下的临界动应力 $\sigma_{d,max}^{[7-9]}$ 。采用类似的方法,还可以得到红黏土试样在注浆量 $V=400\text{ L}$ 、 $800\text{ L}$ 、 $1\,200\text{ L}$ 条件下的临界动应力,见表3。

表3 试验土样的临界动应力		
试验孔	注浆量 $V/\text{L}$	$\sigma_{d,max}/\text{kPa}$
1#	0	200~300
2#	400	300~400
3#	800	400~500
4#	1200	500~600

由表3可知:注浆显著提高了红黏土的临界动应力。结合2.2节可知,临界动应力的提高有利于抑制轴向累积应变的发展,从而提高溶洞上覆红黏土的防振抗塌能力,减少土洞塌陷。因此,注浆对于防治岩溶地区土洞塌陷具有重要意义。

2.4 动剪切模量

图2为未注浆、注浆红黏土在动应力幅值 $\sigma_d=500\text{ kPa}$ 的循环作用下,动剪切模量 $G^{[10]}$ 与振动次数 $N$ 的关系曲线。

由图2可知:注浆红黏土的动剪切模量 $G$ 随振动次数 $N$ 的增大而减小,最终趋于稳定。其中,当振动次数相对较小的情况下( $N$ 为 $0\sim 50$ 次),减小的幅度

较为明显;随着振动次数 $N$ 继续增大( $N$ 为 $50\sim 300$ 次),动剪切模量 $G$ 近似以线性规律减小,但减小的幅度并不明显,且逐渐趋于稳定。循环荷载作用下,注浆红黏土的动剪切模量 $G$ 逐渐减小,主要是由于在循环加荷过程中土体结构受到损伤,损伤程度随振动次数的增加而逐渐累积。对于相同的振动次数,注浆量 $V$ 越小,动剪切模量 $G$ 越小,土体的损伤程度越高,出现土洞塌陷的可能性也越大。

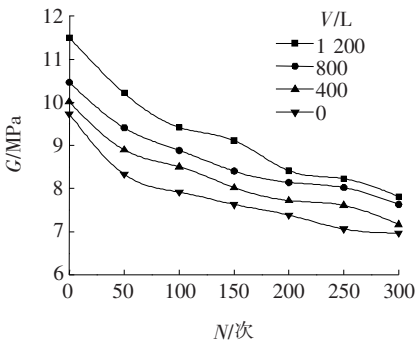


图2 剪切模量与循环加载次数关系曲线

2.5 软化指数

图3为示注浆、注浆红黏土在动应力幅值 $\sigma_d=500\text{ kPa}$ 的循环作用下,软化指数 $\delta^{[11]}$ 与振动次数 $N$ 的关系曲线。

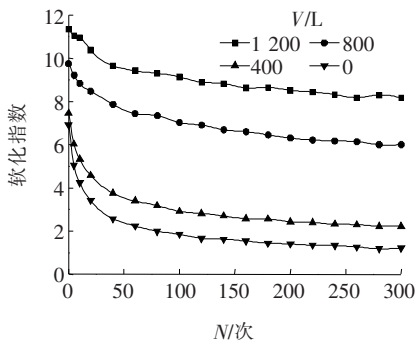


图3 软化指数与循环加载次数关系曲线

由图3可知:注浆红黏土的软化指数 $\delta$ 随振动次数 $N$ 的增大而减小,最终趋于稳定,与动剪切模量 $G$ 的变化情况类似。对于相同的振动次数,注浆量 $V$ 越小,软化指数 $\delta$ 越小,土体的软化程度越高。尤其是在注浆量 $V\leq 400\text{ L}$ 时,软化指数 $\delta$ 大幅度减小,说明土体软化程度大幅度提高。循环荷载作用下土体软化,主要是由于循环荷载作用下孔压的产生和主应力方向的不断改变,导致土体结构重塑,引起应变软化。而注浆则有利于抑制土体结构的变形与重塑,从而减少应变软化。

## 2.6 阻尼比

图 4 为注浆红黏土在动应力幅值  $\sigma_d = 500$  kPa 的循环作用下, 阻尼比  $D^{[12]}$  与振动次数  $N$  的关系曲线。

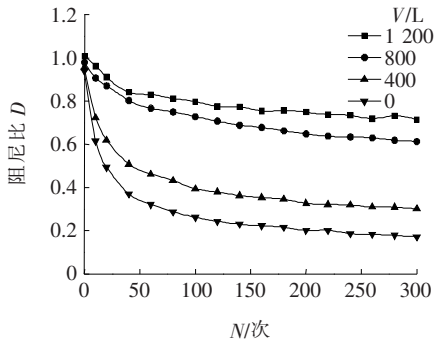


图 4 阻尼比与循环加载次数关系曲线

由图 4 可知: 注浆红黏土的阻尼比  $D$  随振动次数  $N$  的增大而不断减小。主要是由于循环加荷期间, 塑性剪切变形累积<sup>[13]</sup>, 土体结构不断重塑并逐渐振密, 有利于动力波传递, 导致其阻尼比减小。对于相同的振动次数, 注浆量  $V$  越大, 阻尼比  $D$  越大, 可能是由于水泥浆分散于红黏土中, 阻碍了动力波的传递。

## 3 结论

(1) 注浆不仅可以提高溶洞上覆土层的抗冲刷侵蚀能力, 还有助于提高其防振抗塌能力, 减少土洞塌陷。

(2) 注浆量的增加有助于抑制轴向累积应变的增长, 并提高试样的临界动应力。注浆量的增加还有助于提高动剪切模量  $G$ , 从而减小土体的损伤程度。

(3) 室内试验表明: 在循环加荷期间, 土体结构不断重塑并逐渐振密, 有利于动力波传递, 导致其阻尼比减小。但在实际的溶洞上覆土层中, 由于存在岩溶裂隙, 土体将在循环加荷作用下形成土洞, 并导致阻尼比增大。未来应进一步考虑岩溶裂隙对注浆红黏土循环加载试验的影响。

## 参考文献:

- [1] 李景阳. 贵州残积红粘土的力学强度特征[J]. 贵州工业大学学报, 1997, 26(2): 73—80.
- [2] 王建收, 李岩铭, 王桂新, 等. 西南山区红粘土工程特性试验研究[J]. 路基工程, 2013(6): 97—101.
- [3] 程允, 韦昌富, 牛庚. 干湿循环作用对岩溶区红粘土剪切强度的影响[J]. 岩土力学, 2017, 38(S2): 191—196.
- [4] YUAN H P, LIU M, LI W, et al. Dynamic Compaction Model Tests for the Characteristics of Red Clay under Equal Energy Level[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2018, 36(3): 1 873—1 883.
- [5] ZHANG Z, WANG T, WU S, et al. Dynamics Characteristic of Red Clay in a Deep-Seated Landslide, Northwest China: An Experiment Study[J]. Engineering Geology, 2018, 239: 254—268.
- [6] ZHANG H, LIU J. Microstructures, Mineral Compositions, and Mechanical Properties of Red-Layers in Southern China[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2018, 2018(1): 1—9.
- [7] 肖军华, 刘建坤. 循环荷载下粉土路基土的变形性状研究[J]. 中国铁道科学, 2010, 31(1): 1—8.
- [8] 刘文化, 杨庆, 唐小微, 等. 干湿循环条件下粉质黏土在循环荷载作用下的动力特性试验研究[J]. 水利学报, 2015, 46(4): 425—432.
- [9] 周文权, 冷伍明, 刘文劼, 等. 低围压循环荷载作用下饱和粗粒土的动力特性与骨干曲线模型研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(2): 415—423.
- [10] 贺为民, 李德庆, 杨杰, 等. 土的动剪切模量、阻尼比和泊松比研究进展[J]. 地震工程学报, 2016, 38(2): 309—317.
- [11] 刘干斌, 范思婷, 陈斌, 等. 考虑温度影响的饱和软黏土累积变形特性研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(7): 1 238—1 245.
- [12] 白冰. 土的动力特性及应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- [13] 汪明元, 单治钢, 王亚军, 等. 应变控制下舟山岱山海相软土动弹性模量及阻尼比试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(7): 1 503—1 512.