

干湿循环作用下高液限粉土动态回弹模量试验研究

李长贵¹, 胡健坤^{2*}

(1. 中国路桥工程有限责任公司, 北京市 100011; 2. 长沙理工大学 公路养护技术国家工程实验室)

摘要:针对高液限粉土,采用新型试验方法进行干湿循环试验,并对干湿循环后的试验土样进行了动态回弹模量试验,探索动态回弹模量随干湿循环次数、含水率、应力状态的变化规律。研究表明:①回弹模量与围压呈正相关,与干湿循环次数、偏应力和含水率呈负相关;②回弹模量变化幅度随着干湿循环次数的增加而不断降低,首次降低最为明显,经历3~5次循环后衰减基本达到稳定,回弹模量衰减幅度约为63%;③干湿损伤对含水率变化较为敏感,随含水率增大,干湿循环损伤因子逐渐升高。此外,干湿损伤对应力状态变化规律影响较小,呈现出无序性。

关键词:道路工程;高液限粉土;干湿循环;动态回弹模量

路基作为道路的主体承载结构,保证其具备足够的耐久性和稳定性是道路建设的基本要求,而回弹模量作为路基土强度的设计指标,对路基的承载能力起到至关重要的作用。近年来,环境效应对道路的使用性能影响逐渐成为研究的热点。地下水位变动、干燥蒸发和降水入渗等多种因素使土体湿度状态处于不断循环变化中。不断的干湿循环作用使路基土的内部结构出现反复变化,最终造成路基刚度降低,使路面的使用性能出现不同程度的下降。因此,对路基土在干湿

循环作用下的动态回弹模量演变规律进行深入研究,对中国道路设计与发展具有重要意义。

针对干湿循环作用下的路基土动态回弹模量变化规律,李冬雪等采用透水石渗水、烘箱脱水的方式对上海黏土进行干湿循环试验,探索了不同工况和不同干湿循环次数对回弹模量的影响规律;陈开圣采用烘箱脱湿和注射器加湿的方式,实施承载板试验探索了不同干湿路径下回弹模量值的变化特性;王铁行等采用真空饱和增湿和烘箱烘干脱水的方法模拟干湿循环试

定性明显改善,各项指标满足设计要求。

(3) 随着水泥掺量的提高,混合料48h浸水马歇尔稳定度、残留稳定度、冻融前后的劈裂强度逐步提高。劈裂强度比于1.5%水泥剂量附近出现最大值。

(4) 水泥掺量为1.5%及以上时,沥青混合料试件冻融劈裂试验后出现不同程度开裂,表明随着水泥剂量的提高,沥青混合料逐渐变脆而开裂。因此,最佳水泥剂量为1.0%。

(5) 花岗岩机制砂与石灰岩机制砂混合料水稳定性对比分析结果表明,花岗岩机制砂掺入混合料总质量的1.0%~2.0%水泥后,与未掺水泥的石灰岩机制砂对沥青混合料水稳定性影响效果相当。

参考文献:

[1] 沈金安,李福普,陈景. 高速公路沥青路面早期损坏分析

与防治对策[M]. 北京:人民交通出版社,2004.

[2] 王雪元. 关于用花岗岩作SMA骨料的技术研究[D]. 大连海事大学硕士学位论文,2008.

[3] 张明. 地产花岗岩在沥青路面中的应用研究[D]. 合肥工业大学硕士学位论文,2010.

[4] 王月峰. 提高花岗岩沥青混合料水稳定性措施的研究[J]. 路基工程,2012(4).

[5] 郑晓光,杨群,吕伟民. 水泥填料对沥青混合料性能影响的试验分析[J]. 建筑材料学报,2005(8).

[6] 吴渝玲. 孔隙率对沥青混合料水稳定性影响研究[J]. 公路工程,2014(5).

[7] 鹿传建,许志鸿. 水泥做填料对沥青混合料路用性能的影响[J]. 上海公路,2008(4).

[8] 李丽娟,王玮. 基于均匀设计的抗剥落剂组合对机制砂与沥青黏附性的影响研究[J]. 中外公路,2018(1).

验,对干湿循环后压实黄土的动强度以及微观结构做了研究;李卓智等采用上部滴水 and 烘箱脱水的方式对江汉平原砂性土进行了干湿循环下的路基土回弹模量试验研究。虽然已经取得了一定的成果,但是现有对于干湿循环下路基土的力学性能试验方法大多采用顶部加水、喷水、或者浸水的方式进行加湿,难以较好地模拟路基的干湿循环过程,且容易破坏试件。此外,针对高液限粉土在干湿循环作用下的动态回弹模量的衰减机制研究极少。该文针对高液限粉土试样,探索雾化加湿和烘箱脱湿的方式实现路基土干湿循环的可行性。对高液限粉土在干湿循环作用下的动态回弹模量随各因素的变化规律进行深入分析。

1 试验材料

试验选取湖南长沙高液限粉土,参照 JTG E40—

2007《公路土工试验规程》针对选取土样进行基本物理性能试验,试验结果见表 1。

表 1 土样的基本物理性质指标

| $w_L /$ % | $w_P /$ % | I_P | $\rho_{max} /$ ($g \cdot cm^{-3}$) | $w_{opt} /$ % | 细粒含量 (< 0.075 mm)/% | 相对 密度 |
|--------------|--------------|-------|---|------------------|------------------------------|----------|
| 51.7 | 37.1 | 14.6 | 1.62 | 22.6 | 95.62 | 2.71 |

2 试验方案

2.1 干湿循环试验方案

考虑现场施工初始压实时的湿度状态,试件初始含水率设置为最佳含水率(OMC)、目标含水率设置为 $0.9OMC$ 、 OMC 和 $1.1OMC$,压实度设置为 96% ,进行 0、1、3、5 次循环。循环过程及具体方案见表 2。

表 2 干湿循环试验过程设计

| 初始含水率 | 目标含水率 | 循环过程 | 循环次数/次 | 压实度/% |
|-------|----------|----------------------------|---------|-------|
| | $0.9OMC$ | $OMC-1.3OMC-0.9OMC$ | | |
| OMC | OMC | $OMC-1.3OMC-0.9OMC-OMC$ | 0、1、3、5 | 96 |
| | $1.1OMC$ | $OMC-1.3OMC-0.9OMC-1.1OMC$ | | |

已有研究者根据干湿循环作用下土的力学特性和变形特性进行了相关研究,其所采用的方法不尽相同,如表 3 所示。

表 3 典型干湿循环试验方法

| 文献 | 增湿方法 | 脱湿方法 | 研究内容 |
|------|--------|-------------------------------------|-----------|
| [6] | 真空饱和增湿 | 自然风干 | 力学性能 |
| [3] | 透水石渗水 | 烘箱脱湿($50\text{ }^\circ\text{C}$) | 力学性能 |
| [7] | 真空饱和增湿 | 自然风干 | 力学性能、微观分析 |
| [8] | 浸水加湿 | 烘箱脱湿($71\text{ }^\circ\text{C}$) | 力学性能、微观分析 |
| [9] | 真空饱和增湿 | 烘箱脱湿 | 力学性能 |
| [10] | 滴水增湿 | 自然风干 | 变形特性 |
| [11] | 注射器增湿 | 烘箱脱湿($105\text{ }^\circ\text{C}$) | 力学性能 |
| [12] | 真空饱和增湿 | 烘箱脱湿 | 力学性能、微观分析 |

由表 3 可以看出:对路基土在干湿循环作用下无论是力学性能还是变形特性的研究,采用的增湿方法都是直接将液态水在试件上部由上到下进行浸润加湿,脱湿方法则以烘箱烘干为主。为分析不同试验方法的优劣性,针对不同试验方案进行了相关的实施探索。研究发现将水直接加到试件上部或采用 CBR 试

验浸泡的方式进行增湿虽然增湿过程较快,但是会对试件造成不可逆的破坏,比如:① 试件表面的土颗粒脱落;② 反复称重时会对试件产生不可逆的损伤。这些破坏将会对动态回弹模量试验的测定造成很大的影响。其次,使路基土的湿度状态接近极限的真空饱和增湿方式,难以模拟路基在真实运营期间的湿度变化,且施加的压力会对试件有一定的力学性能影响,由此得到的干湿循环下的回弹模量衰减系数更是难以恰当地指导实际路基设计与施工。基于此,该文对新的干湿循环试验方法进行探索。

2.1.1 增湿过程

采用雾化板对成型的试件进行增湿。

试验每隔 10 h 左右对试件进行称重,试件第 1 次增湿过程含水率随时间的变化如图 1 所示。由图 1 可以看出:在 96% 压实度条件下,试件含水率从 OMC 增湿到 $1.3OMC$ 只需 $2.5\sim 3$ d。含水率随时间呈线性关系变化,这是因为在雾化加湿过程中,试件内部的水分传递速度和试件表面的吸水速度大致相当。也就是说在 100% 湿度状态下,试件表面水分迁移到试件内部和前一时刻表面开始接触雾化水气是一个递进的过

程。因此,采用这种增湿方式,可以理解为增湿过程和试件水分迁移过程在同时进行,且试件只需静置 1~2 d 便可使试件内部的含水率达到平衡。

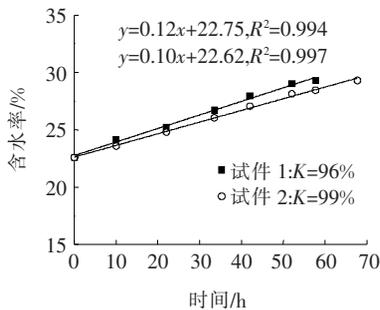


图1 增湿过程含水率与时间关系

2.1.2 脱湿过程

由表3可知:已统计文献中试件干湿循环的脱湿方法,主要包括烘箱烘干脱湿和自然风干脱湿。考虑到自然风干容易受到天气的约束,使用烘箱对试件进行脱湿。为防止试件在脱湿过程中开裂,将烘箱温度设定为 50 °C,采用保鲜膜包裹、上下放置透水石的方式对已增湿的试件进行脱湿试验。与增湿过程相似,试验每隔 10 h 对试件称重,以评价试件的脱湿水平,试验结果如图2所示。

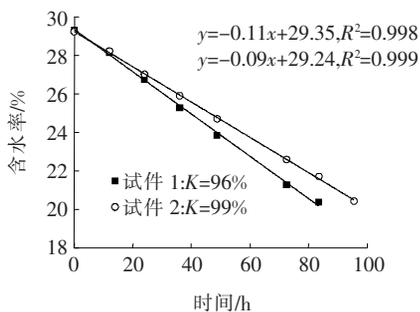


图2 脱湿过程含水率与时间关系

图2表明:由 1.3OMC 到 0.9OMC 的脱湿时间为 82~100 h。相较于已有研究方法,脱湿的时间较长,这是因为试验采用保鲜膜包裹和上下放置透水石的方式限制了试件中水分的迁移,但是同时也对试件起到了很好的保护作用,使后续回弹模量的测定更为准确。

2.2 回弹模量试验方案

采用圆柱形试件,试件尺寸为高度 200 mm,直径 100 mm。试验仪器,选用意大利产 Dynatriax100/14 动三轴试验系统。动三轴试验采用文献[13]加载序列,能较大地覆盖道路在运营过程中的受力特性,加载时间为 0.2 s,间歇时间为 0.8 s,波形取半正矢波,加载频率为 1 Hz。加载序列的详细参数如表4所示。

表4 路基细粒土试件加载序列

| 加载序列 | 围压/kPa | 接触应力 0.2σ ₃ /kPa | 循环偏应力/kPa | 最大轴向应力/kPa | 加载次数/次 | 主应力之比 σ ₁ /σ ₃ |
|------|--------|-----------------------------|-----------|------------|--------|--------------------------------------|
| 0-预载 | 30 | 6 | 55 | 61 | 2 000 | 2.83 |
| 1 | 60 | 12 | 30 | 42 | 100 | 1.50 |
| 2 | 40 | 9 | 30 | 39 | 100 | 1.75 |
| 3 | 30 | 6 | 30 | 36 | 100 | 2.00 |
| 4 | 15 | 3 | 30 | 33 | 100 | 3.00 |
| 5 | 60 | 12 | 55 | 67 | 100 | 1.92 |
| 6 | 40 | 9 | 55 | 64 | 100 | 2.38 |
| 7 | 30 | 6 | 55 | 61 | 100 | 2.83 |
| 8 | 15 | 3 | 55 | 58 | 100 | 4.67 |
| 9 | 60 | 12 | 75 | 87 | 100 | 2.25 |
| 10 | 40 | 9 | 75 | 84 | 100 | 2.88 |
| 11 | 30 | 6 | 75 | 81 | 100 | 3.50 |
| 12 | 15 | 3 | 75 | 78 | 100 | 6.00 |
| 13 | 60 | 12 | 105 | 117 | 100 | 2.75 |
| 14 | 40 | 9 | 105 | 114 | 100 | 3.63 |
| 15 | 30 | 6 | 105 | 111 | 100 | 4.50 |
| 16 | 15 | 3 | 105 | 108 | 100 | 8.00 |

3 试验结果分析

3.1 应力状态对回弹模量的影响

为分析应力状态对回弹模量的影响,将未经过干湿循环的试样,在不同含水率和应力状态下的回弹模量试验数据绘制如图3所示。

由图3可知:在 OMC 和 96% 压实度的条件下:① 当围压相同时,回弹模量随偏应力的增大而减小。偏应力对回弹模量的消极作用可以解释为围压相同,偏应力的增大导致竖向变形随之增加,而竖向应变难以和偏应力达到同步,竖向应变的增长幅度大于偏应力增加的幅度,最终导致回弹模量减少;② 当偏应力相同时,回弹模量随围压增大而呈现非线性增加。这是因为在相同的竖向应力条件下,围压的增加对试件具有较强的侧向约束作用。这一结论也被众多研究者所证实。此外,偏应力从 30 kPa 增大到 105 kPa,回弹模量平均减小了约 32%。围压从 15 kPa 增大到 60 kPa,回弹模量平均增加了约 46%。这表明在高液限粉土中,围压对回弹模量产生的约束作用要大于偏应力对回弹模量产生的剪切作用。

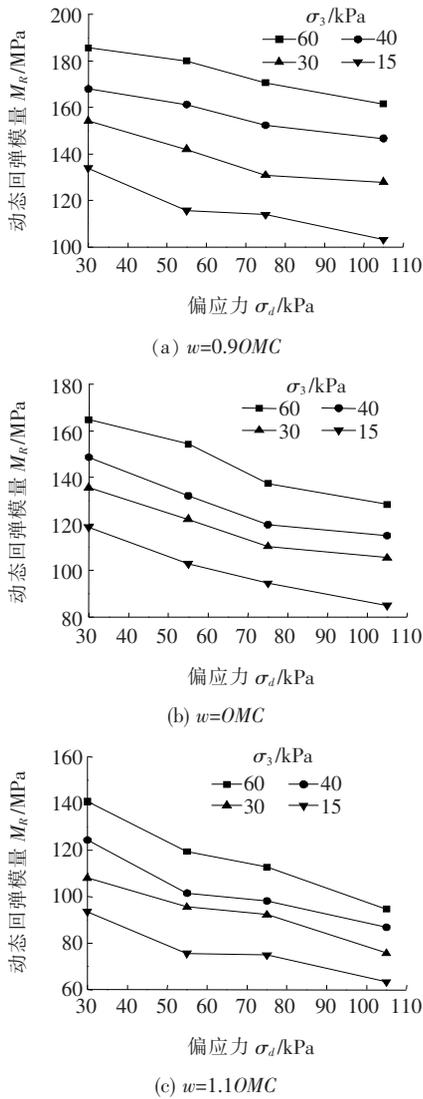


图 3 未经干湿循环作用时不同含水率条件下围压和偏应力与动态回弹模量的关系

在应力状态相同时,动态回弹模量随含水率的增大而逐渐减小。在 96% 压实度条件下,含水率从 0.9OMC 增大到 1.1OMC 时,动态回弹模量平均减小了约 52%,作用效果明显。含水率对回弹模量的消极作用可以作如下解释:土中水在土颗粒间具有一定的润滑作用。当含水率减小时,土颗粒表面的水膜较薄,土颗粒间的相对移动困难,因此试样抵抗变形的能力就越强。随着水分的增多,土颗粒间的水膜增大,土颗粒间的相对位移较为简单,土样抵抗变形的能力就越差。因此,含水率的增大对试件具有较强的软化作用,即随含水率的增高,回弹模量值逐渐越低。

3.2 干湿循环次数对回弹模量的影响

为探究高液限粉土在干湿循环作用下回弹模量随干湿循环次数的衰减规律,参考张安顺定义冻融损伤

因子的方法。该文定义干湿损伤因子 ψ_{D-w} 如下:未经干湿循环(干湿循环次数为 0 次)的回弹模量值 $M_{R(0)}$ 与经历 N 次干湿循环后回弹模量值 $M_{R(i)}$ 两者的差值与未经循环作用(干湿循环次数为 0 次)的回弹模量的比值,如式(1)所示:

$$\psi_{D-w} = \frac{M_{R(0)} - M_{R(i)}}{M_{R(0)}} \quad (1)$$

高液限粉土动态回弹模量干湿循环损伤因子在不同含水率时随干湿循环次数的变化关系,如图 4 所示。

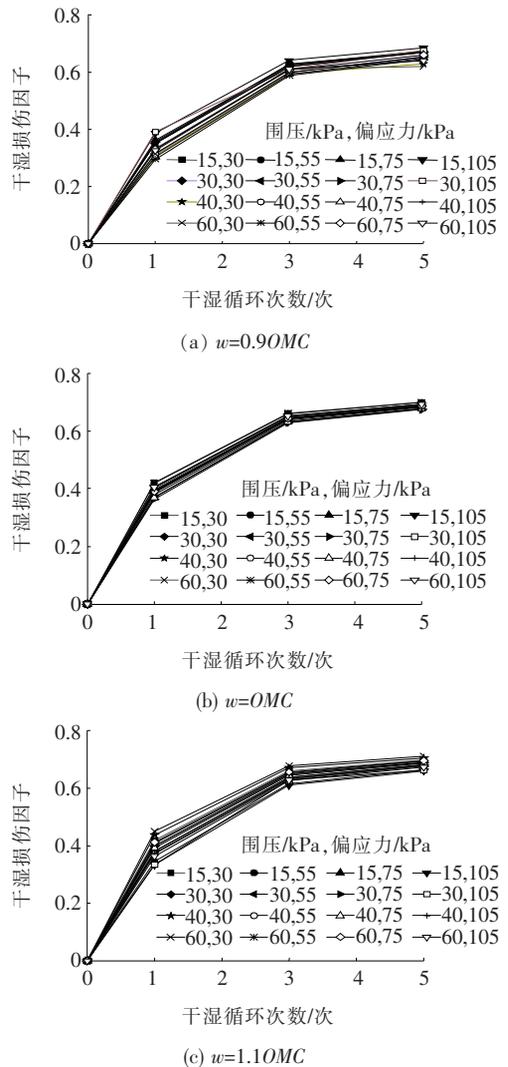


图 4 不同含水率下动态回弹模量损伤因子与干湿循环次数关系

由图 4 可知:试件经历第 1 次干湿循环时,回弹模量衰减最为明显,损伤因子范围为 0.32~0.43。随着干湿循环次数的增多,损伤因子的增速降低,最后趋于稳定。经历 5 次干湿循环后回弹模量的损伤因子为 0.63,与第 3 次循环相比,衰减小于 5%,可以认为在

经历5次循环后试件的强度处于稳定状态。该文研究结果和李冬雪等的研究结果有较大区别,该文研究发现随着干湿循环次数的增加试件强度逐步趋于稳定,而不是在经历1次干湿循环后试件的强度就不再变化,这可能是因为该文研究采用的干湿循环方式为雾化加湿,加湿和保湿属于同步进行,而类似李冬雪等的加湿和脱湿方式显得较为粗糙,土样内部的结构变化可能也就越快。该文方法比较符合现实道路运营中干湿作用逐渐积累,而后路基强度逐渐变化的规律。

由图4还可以看出:含水率对干湿损伤有较大影响。在一定压实度条件下,随含水率的增加,损伤因子出现明显的增大。损伤因子随偏应力和围压的变化则呈现出不规律性,例如:有时在相同偏应力下,损伤因子出现随围压增大而增大的现象,这可能是因为损伤因子仅仅体现的是回弹模量的差值与初始回弹模量的比值,在某一应力水平下,分子分母同时增大或减小又会出现分母增大或减小的程度较小,分子增大或减小的程度较大的现象。

4 结论

该文研究探索新的干湿循环试验方法,通过室内试验分析了高液限粉土动态回弹模量随含水率、应力状态、干湿循环次数的变化规律,得到如下结论:

(1) 探索了新型干湿循环试验的可行性,并确定了含水率随时间变化的增湿曲线和脱湿曲线。

(2) 在压实度和含水率相同的条件下,高液限粉土动态回弹模量随围压的增大而增大,随偏应力的增大而减小,围压对回弹模量的影响更为显著。

(3) 在相同应力状态和压实度下,含水率对回弹模量有较大影响。相较于其他影响因素,回弹模量随含水率的增加而衰减的程度更为明显。

(4) 随干湿循环次数的增加,回弹模量逐渐减小。在第1次循环时衰减最为明显,随着循环次数的增加回弹模量的衰减程度会逐渐降低,5次循环后的回弹模量的变化幅度约为5%,趋于稳定。

参考文献:

- [1] 吕梦飞,陈开圣. 干湿循环下红黏土回弹模量对路面结构影响[J]. 广西大学学报(自然科学版),2018(4).
- [2] 陈龙旭,王帅,罗大天,等. 干湿循环下红砂岩路基填料回弹模量控制研究[J]. 中外公路,2020(4).
- [3] 李冬雪,凌建明,钱劲松,等. 湿度循环下黏质路基土回弹模量演化规律[J]. 同济大学学报(自然科学版),2013(7).
- [4] 王铁行,郝延周,汪朝,等. 干湿循环作用下压实黄土强度性质试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2020(6).
- [5] 李卓智,张静波,杨明. 江汉平原砂土回弹模量干湿循环折减系数研究[J]. 公路,2020(11).
- [6] 张芳枝,陈晓平. 反复干湿循环对非饱和土的力学特性影响研究[J]. 岩土工程学报,2010(1).
- [7] Liu W, Tang X, Yang Q, et al. Influence of Drying/Wetting Cycles on the Mechanical Cyclic Behaviours of Silty Clay[J]. European Journal of Environmental Civil Engineering,2015,19(7): 867-883.
- [8] Solanki P, Zaman M. Effect of Wet-Dry Cycling on the Mechanical Properties of Stabilized Subgrade Soils[C]. Geo-Congress 2014: Geo-Characterization and Modeling for Sustainability,2014,3 625-3 634.
- [9] 穆坤,孔令伟,张先伟,等. 红黏土工程性状的干湿循环效应试验研究[J]. 岩土力学,2016(8).
- [10] 王飞,李国玉,穆彦虎,等. 干湿循环条件下压实黄土变形特性试验研究[J]. 岩土力学,2016(8).
- [11] 陈开圣. 干湿循环下重塑红黏土回弹模量研究[J]. 公路,2017(3).
- [12] 潘振兴,杨更社,叶万军,等. 干湿循环作用下原状黄土力学性质及微观损伤研究[J]. 工程地质学报,2020(6).
- [13] 罗志刚. 路基与粒料层动态模量参数研究[D]. 同济大学博士学位论文,2007.
- [14] Zhang J, Peng J, Zheng J, et al. Prediction of Resilient Modulus of Compacted Cohesive Soils in South China [J]. International Journal of Geomechanics,2019,19(7).
- [15] Zhang J, Peng J, Zheng J, et al. Characterisation of Stress and Moisture-Dependent Resilient Behaviour for Compacted Clays in South China[J]. Road Materials and Pavement Design,2020,21(1): 262-275.
- [16] 张安顺. 冻融循环下建筑废弃物路基填料动态回弹模量试验研究[D]. 长沙理工大学硕士学位论文,2019.