

# 环境温湿度作用下路基强度衰变试验分析

阮艳彬, 何斌, 吴万平

(中交第二公路勘察设计研究院有限公司, 湖北 武汉 430056)

**摘要:**该文以环境场温度和湿度作用下典型路基土为研究对象,结合室内环境模拟条件下路基回弹模量测试试验及现场路基湿度与模量测试试验,研究路基强度的衰变特征。试验结果表明:室内环境模拟试验与现场测试结果相吻合,路基回弹模量受土质类型、路基含水率状态影响显著,建议公路路基设计应考虑含水率变化影响,细粒土填料应在最佳含水率附近压实,并做好防排水设计,以保持路基湿度与强度状态。在南方非冰冻区或北方季冻区,当路基土存在地表渗水或地下水等外来水源补给时,受环境温度及湿度循环作用,路基湿度将从最佳含水率状态向平衡湿度状态过渡,公路路基湿度增幅均高达10%~15%以上,路基模量急剧衰减,降幅约50%。同时,现场测试试验还表明当能有效控制地表或地下水源补给时,保障路基处于干燥或中湿状态,可明显减缓环境温湿度产生的路基湿度状态及回弹模量不利影响。

**关键词:**环境温湿度;土质类型;含水率;湿度状态;回弹模量;衰减

## 1 国内外研究现状

目前许多工程师、学者结合公路工程的交通荷载条件、地质水文特征、长期性能保障措施等开展了路基结构性能设计研究,分别针对路基宏观结构、中观材料参数、微观土水动力学特性等方面做了大量的模拟分析与试验研究,并在现行规范中给出了适应中国公路建设条件的土基回弹模量建议值范围。关于环境作用下公路路基在施工阶段及在役运营阶段的路基回弹模量变化情况研究大多在室内进行模拟试验,室内外试验对比研究尚不多见。该文结合中国典型路基土的结构与环境特性以及改扩建工程检测调研机遇,开展室内外环境湿度与温度作用下的路基湿度状态及回弹模量影响对比分析,以期探寻从路基施工阶段到在役运营阶段回弹模量变化成因,为高质量路基工程建设提出相应防控技术建议。

## 2 路基土回弹模量影响因素分析

### 2.1 路基土结构特性影响

路基土的结构特性受路线位置、地形地质特征、路

基断面形式、路基土类型、颗粒级配、含水率、施工压实度、公路排水设计等因素的影响。其中路线位置、地形地质、路基断面形式、排水设计等在工程设计施工中已被充分考虑,该文不做分析。下面进行路基土质类型、含水率与压实度等影响因素的试验分析。

#### 2.1.1 土质类型

公路路基强度和长期性能直接与填料的物理力学性质、水稳定特性密切相关。砾石土和砂土等属于良好的路基填料。其原因为砾石土填料中集料和砾石具有较好的嵌锁作用和较高的抗剪摩阻角,其永久变形能力好;砂土颗粒间具有足够的内摩擦力和黏聚力,易压实成平整坚实的路基。而粉质土因黏聚力低、水稳定性差、路基强度较低;黏质土因天然含水率高、固结渗透性差、难以达到施工最佳含水率,需反复晾晒才能达到较理想的施工密实度。因此,粉质土、黏质土等细粒料含量高,水稳定性差的土类属于较差的路基填料,只有在适当的含水率、充分压实并采取良好的隔排水措施下,才可保持路基稳定;否则,在不良水温状态下,易产生冻胀和翻浆。

#### 2.1.2 含水率与压实度

土样的饱和度和密实度的变化会引起路基土物理力学参数的改变,对路基强度影响十分明显,是影响路

基回弹模量的关键因素之一。文中选取黏性砂土、黏质粉土和粉质黏土 3 种不同土质试样进行室内回弹模量测试。分别以最佳含水率范围附近 5 个点及 90%、93% 和 96% 3 个压实度组合配制试件, 土质参数见表 1。测试结果如图 1 所示。

表 1 不同土样的土质类型与物性参数

土样编号	土质类型	最大干密度/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	最佳含水率/ %
1	黏性砂土	2.080	12.5
2	黏质粉土	1.904	13.2
3	粉质黏土	1.890	15.7

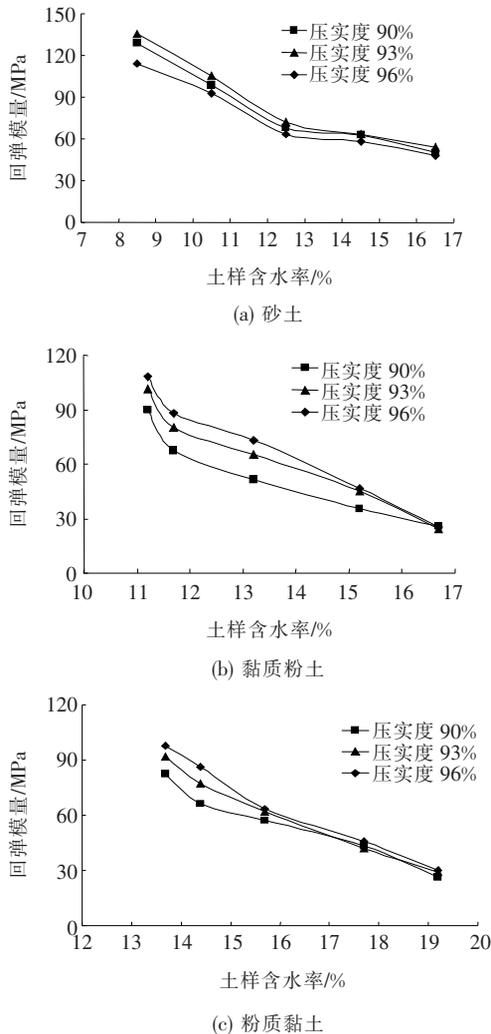


图 1 不同压实度与含水率条件下土样回弹模量测试结果

图 1 表明: 土质类型对回弹模量有决定性影响, 所选黏质砂土干燥压实状态下回弹模量为 114~135 MPa, 远大于黏质粉土和粉质黏土。另外, 3 种土样回

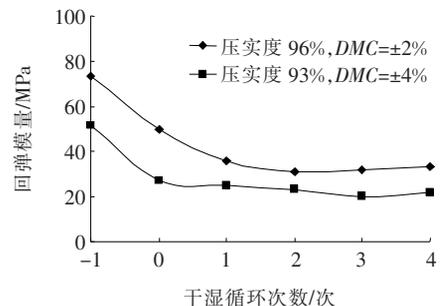
弹模量值受含水率变化影响显著, 且含水率超过最佳含水率后, 压实度影响下降, 回弹模量只与含水率大小有关。因此, 路基设计时应尽量选取良好级配的砾石土、砂类土, 需要选用粉质土、黏质土时, 填料要在最佳含水率附近做好施工压实, 并做好路基防排水技术措施。

## 2.2 环境因素影响

环境影响因素主要为温度和湿度。环境温湿度对路基结构性能的影响主要表现为路表水下渗、地下水位变化及季节性冻融引起路基填料强度与含水率的变化。为进一步探究环境作用下路基土强度衰变原因与特征, 选择黏质粉土和粉质黏土, 模拟环境条件, 进行干湿/冻融循环作用下路基土回弹模量变化测试。

### 2.2.1 干湿循环影响

选用黏质粉土, 模拟南方非冰冻区环境下降雨入渗及地下水位变化引起的路基土干湿循环试验, 测试不同循环次数的回弹模量值。试件条件为: ① 压实度的 96%, 最佳含水率  $OMC$  为 13.2%, 平衡含水率  $EMC$  为 18%~22%, 干湿循环幅度  $DMC = \pm 2\%$ ; ② 压实度的 93%,  $OMC = 13.2\%$ ,  $EMC = 18\%$ ,  $DMC = \pm 4\%$ ; 干湿循环方案为: 上下两块透水石透水吸湿和烘箱低温烘干脱湿模拟干湿循环湿度状态, 土样静置吸湿与烘干脱湿时间均控制在 7 d, 偏应力 75 kPa, 围压 30 kPa, 加载频率 1 Hz。测试结果如图 2 所示。



注:  $N = -1$  次代表试件在施工压实含水率状态,  $N = 0$  代表路基平衡含水率状态;  $N = 1, 2, 3, 4$  次分别代表在经历  $N$  次干湿循环的含水率状态。下同。

图 2 干湿循环条件下黏质粉土路基模量的变化

图 2 表明: 土样从施工含水率至平衡含水率变化期间, 回弹模量明显衰减, 降低约 50%; 进入平衡含水率与干湿循环湿度叠加段后, 循环次数  $N = 4$  与  $N = 1$  次的模量比较降低约 15%, 回弹模量衰减幅度降低。说明在潮湿多雨、地下水源补给充沛的南方地区路基土回弹模量大幅衰减主要发生在施工后路基土达到平

衡含水率的过程,路基土湿度状态基本稳定后,干湿循环作用对路基土模量影响趋于平缓。因此,加强南方地区公路地下水、路表及坡面水防控技术措施,保障路基土湿度状态可控,有利于减缓路基填料含水率变化引起的路基强度衰减。

### 2.2.2 冻融循环影响

选用粉质黏土,模拟北方季冻区冬冻春融环境温度、湿度变化引起的路基冻融循环试验,测试不同冻融循环次数下的回弹模量值。试验条件为:路基土样分别在最佳含水率  $OMC$  为 15.7%、压实度 96% 和平衡含水率  $EMC$  为 18%、压实度 93% 下成型,冻融循环过程采用冻融循环试验装置控制,设补水阀门模拟土样冻结过程水分补给,土样冻融正温为  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,负温为  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,土样冻结与融化时间均控制在 2 d,测试分析路基土经历冻融循环次数  $N = -1, 0, 1, 2, 3, 4$  次的回弹模量衰变情况。试验结果见图 3。

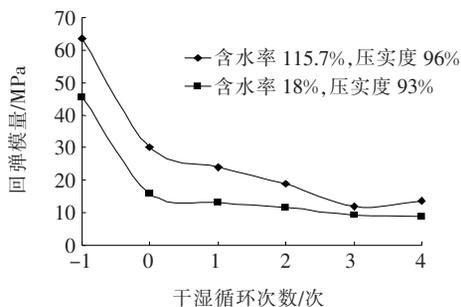


图3 冻融循环条件下粉质黏土路基模量的变化

图3表明:①路基土在环境冻融条件下回弹模量急剧衰减。分析认为随着环境温度变化,路基土冻胀过程,水分向上迁移的速率及迁移量增大,在路基土上层内冻结形成聚冰带,温度回暖上层聚冰带融化,水分无法排除,引起路基土样上部湿度急剧增加,路基回弹模量急剧衰减;②在冻融条件下路基土达到平衡含水率状态,路基模量大幅衰减,降低50%~60%,在经历4次冻融循环后,路基土回弹模量为10~15MPa,较初始值衰减了80%,路基土回弹模量衰减达到最大,性能基本趋于稳定;③含水率为18%、压实度为90%的土样冻融循环后的路基模量明显低于最佳含水率为15.7%和96%压实度下成型的土样,说明路基土样成型含水率越大、密实度越低,冻结时水分迁移速率和补给量就越大,融化后测试的路基模量越小。因此,在季冻区路基土尽量在最佳含水率附近做好施工压实,并注意做好防排水技术措施,以助于减缓路基填料含水率变化引起的路基强度衰减。

## 3 运营公路路基湿度状态与强度衰变调研测试

在实际工程中,公路路基土在最佳含水率附近施工碾压成型,路基湿度小于环境湿度处于不稳定状态。在运营期路基土体与外界环境相互影响,路基含水率不断波动,水分发生迁移与重分布,路基强度逐渐降低。为进一步对比验证室内模拟环境路基强度衰变规律与运营期路基土湿度与强度的差异,下面在非冰冻区与季冻区各调研了一处改扩建公路路基性状。

### 3.1 非冰冻区公路路基性状调查

对安徽省阜蚌高速公路黏质粉土路基土进行调查,发现运营8年后路面以下1~3 m路基含水率较施工含水率增大了11%,最大含水率高达27.04%。现场采用落锤式弯沉仪FWD检测路基顶面模量为72.6~95.5 MPa,但路堤部位模量衰减严重,有的已不足20 MPa。检测结果见图4~6。

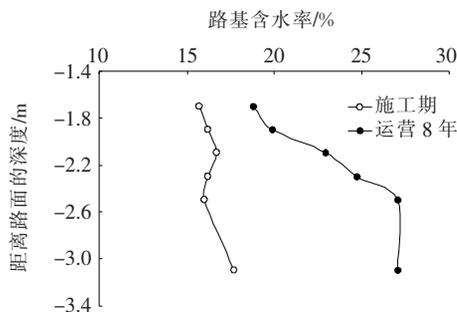


图4 阜蚌高速公路路基湿度状态变化

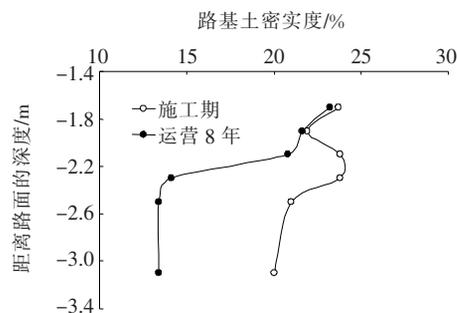


图5 阜蚌高速公路路基密实度状态变化

从图4~6可以看出:①同一深度处运营后的路堤含水率普遍高于路基施工含水率,含水率随着路基深度加深而增大,与地下水毛细现象影响特征相符;②运营期随着路基含水率的增大,路基密实度降低1%~10%,说明粉土在吸水时除含水率增加外,其土体的体积也会发生膨胀;③受地下水影响路基潮湿,回弹模量在深度方向衰减严重,衰减情况与室内干湿循环模拟结果吻合。

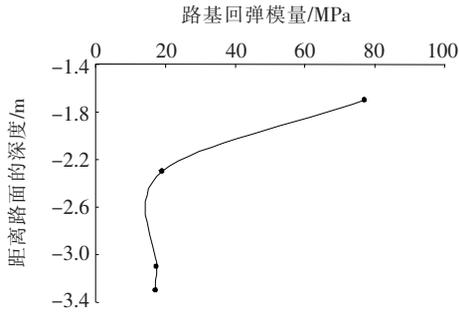


图 6 阜蚌高速公路路基回弹模量随深度变化

### 3.2 季冻区公路路基性状调查

吉林 G302 国道白城线公路改建工程,路基填土为粉质黏土,钻孔冻深为地下 1.5 m 左右,工程现场开挖测得路面以下 1~3 m 含水率增加均超过 15%,最大含水率高达 30%左右,路基处于中湿和过湿状态,路基土回弹模量多低于 15 MPa,模量值衰减至施工期模量的 60%~40%,衰减幅度大,与室内土样冻融循环模拟结果基本吻合。

通过现场开挖与钻探发现,两处路基工作区范围含水率变化总趋势相似。在道路冻深线 1.5 m 附近出现水分积聚现象,含水率急剧攀升;冻深线上下土层含水率受冻结温度梯度影响,水分向冻层位置迁移,含水率较冻深线处低。

另外,调查发现路基 2 m 以下深处含水率变化情况与是否有外来水源补给有关(图 7)。两处钻孔位置

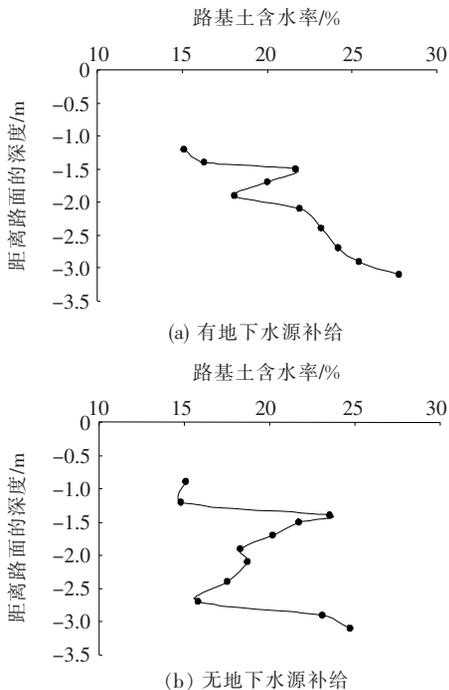


图 7 季冻区粉质黏土路基 2 处钻孔含水率情况

地下水位均在路面以下 4 m 附近,图 7(a)路基 2 m 以下土层含水率主要受地下毛细水补给影响,路基湿度持续增大;图 7(b)因在地下 2.7 m 附近存在一层约 10 cm 厚的砂砾层,有效阻断地下毛细水上升的影响,故在砂砾层之上的路基无外来水源补给,路基含水率仅受冻结温度梯度影响随深度增加持续减小,最小含水率为 15%,相比图 7(a)有地下水源补给时降低约 10%。

因此,建议细粒土路基设计施工应结合环境温湿度条件加强公路地下水、路表、中央分隔带及坡面渗水防控技术措施,特别是受地下水位影响较大的粉质土、黏质土,应做好地下水的防渗隔离措施,保障路基湿度处于干燥或中湿状态,以减缓环境温湿度作用对路基回弹模量的影响。

## 4 结论

(1) 路基土回弹模量与土质类型、路基含水率状态密切相关,回弹模量随路基湿度增加而降低。

(2) 非冰冻区公路受环境湿度影响,路基在干湿循环作用下模量急剧衰减。含水率从施工最佳含水率到运营初期平衡含水率,土样回弹模量降幅最大,约为 50%;随后衰减幅度趋于平缓。

(3) 季冻区公路受环境冻融与湿度影响,路基在冻融作用下模量急剧衰减。在有水分补给条件下,经历一次冻融循环,路基模量衰减 50%~60%,经历 4 次冻融循环,路基回弹模量降至 10~15 MPa。

(4) 结合改扩建工程对运营公路路基湿度状态与模量调研,发现受环境影响路基湿度增大 10%~15%,达到平衡含水率,密实度降低 10%,模量衰减幅度达到 50%以上。回弹模量的衰减幅度与路基土质类型及湿度状态关系密切,与室内测试结果基本吻合。

(5) 公路路基设计时尽量选取良好级配的砾石土、砂类土。当采用细粒土路基填料设计时,应考虑填料含水率变化影响,做好填料湿度控制,在最佳含水率附近施工压实,并结合环境温湿度条件加强路基地下水及地表水的排放、防渗、隔离等,保障路基湿度处于干燥或中湿状态,减缓环境温湿度对回弹模量的不利影响。

### 参考文献:

- [1] 张宜洛,程艳,陈阳阳,等.季节性冰冻地区路基土动态回弹模量试验研究[J].中国科技论文,2020(2).