

软土管桩侧向蠕变对高速路面平顺性的时变影响

戴述卫

四川路桥盛通建筑工程有限公司

DOI: 10.32629/ems.v8i7.21130

[摘要] 目的：解决传统设计方法忽略时变效应导致的路面过早劣化问题。方法：基于修正的 Singh-Mitchell 蠕变本构模型，建立考虑超孔隙水压力消散与应力重分布的软土侧向蠕变计算方法；构建管桩—路基—路面三维耦合时变动力学模型，引入桩土接触非线性与路面材料疲劳退化效应；结合长三角某高速公路试验段 5 年现场监测数据，验证模型准确性并开展多参数数值模拟分析。结论：软土侧向蠕变呈现“减速—稳定”两阶段特征，通车后 6-18 个月为变形快速发展期；管桩侧向位移沿深度呈“中间大、两端小”的抛物线分布，最大位移出现在地表以下 3—5m 处；路面国际平整度指数（IRI）随蠕变时间呈非线性增长，10 年服役期内 IRI 增幅可达 45%—60%；桩距、桩长与路基填土高度是影响路面平顺性衰变的关键参数。

[关键词] 软土管桩；侧向蠕变；高速路面；平顺性；时变影响

引言

我国东部沿海和长江中下游地区有着大量的厚层软土层，该种土体的工程性质主要是高含水量、大孔隙比、高压缩性、低抗剪强度和明显的流变性^[1]。

大量的工程实践证明，软土地区的高速公路，在运行过程中就出现了路面不平顺性过早劣化的现象^[2]。传统的软土地基设计方法主要考虑竖向承载力和工后沉降，对侧向蠕变效应没有考虑^[3]。

随着交通运输部《“平安百年品质工程”建设研究推进方案》的推进，以长寿命为目标的新一代路面技术将引领未来行业发展方向。本文首先根据室内蠕变试验和现场监测数据，研究软土侧向蠕变的力学机理与时变演化规律；然后建立考虑蠕变时变效应的管桩、路基、路面耦合动力学模型；接着用数值模拟量化分析不同影响因素下路面平顺性衰减特性；最后提出基于蠕变时变效应的路面平顺性预测方法及控制措施。研究结果可以给软土地区高速公路设计、施工和运营管理提供科学依据，对提高软土地区高速公路长期使用性能、降低养护成本具有重要的理论意义和工程价值。

1. 管桩—路基—路面耦合系统的时变动力学模型构建

1.1 各子系统的动力学模型

1.1.1 管桩动力学模型

管桩采用欧拉-伯努利梁单元模型，考虑桩身弯曲变形和轴向变形。

桩身的运动微分方程为：

$$EI \frac{\partial^4 u}{\partial z^4} + m \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + c \frac{\partial u}{\partial t} = p(z, t)$$

式中： EI 为桩身抗弯刚度； m 为桩身单位长度质量； c 为桩身阻尼系数； $u(z, t)$ 为桩身 z 处 t 时刻的侧向位移；

$p(z, t)$ 为桩身受到的侧向土压力。桩身受到的侧向土压力有静止土压力和蠕变附加土压力两部分^[4]。

1.1.2 路基动力学模型

路基采用三维连续介质模型，考虑路基土的非线性与时效性。为考虑路基土的蠕变效应，引入黏塑性流动法则。粘塑性应变率可表示为：

$$\dot{\epsilon}^{vp} = \gamma \langle \Phi(F) \rangle \frac{\partial Q}{\partial \sigma}$$

式中： γ 为粘塑性流动参数； $\langle \Phi(F) \rangle$ 为开关函数，当 $F > 0$ 时， $\langle \Phi(F) \rangle = F$ ，当 $F \leq 0$ 时， $\langle \Phi(F) \rangle = 0$ ； Q 为塑性势函数，采用相关联流动法则时， $Q = F$ 。

路基的运动微分方程为：

$$\rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} + \eta \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} = \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \rho \mathbf{g}$$

式中： ρ 为路基土密度； η 为路基土阻尼系数； $\mathbf{u}$ 为路基位移矢量； $\boldsymbol{\sigma}$ 为路基应力张量； $\mathbf{g}$ 为重力加速度矢量。

1.1.3 路面动力学模型

路面结构层采用层状弹性体系模型，考虑各结构层的材料特性与层间接触状态。

基层与底基层采用线弹性本构模型，其本构关系可表示为：

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{D} \boldsymbol{\epsilon}$$

式中： $\mathbf{D}$ 为弹性刚度矩阵。

路面的运动微分方程为：

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{C} \dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K} \mathbf{u} = \mathbf{F}(t)$$

式中： $\mathbf{M}$ 、 $\mathbf{C}$ 、 $\mathbf{K}$ 分别为路面系统的质量、阻尼与刚度矩阵； $\mathbf{u}$ 、 $\dot{\mathbf{u}}$ 、 $\ddot{\mathbf{u}}$ 分别为路面系统的位移、速度与加速度矢量； $\mathbf{F}(t)$ 为车辆荷载矢量。

车辆荷载用移动集中荷载模型来计算,考虑车辆的轴重、轴距、行驶速度。高速公路一般采用标准轴载 BZZ-100,轴重为 100kN。

1.2 时变耦合动力学模型的建立

考虑软土侧向蠕变的时变效应,把软土的蠕变变形当作边界条件加入管桩动力学模型当中。先依照软土侧向蠕变本构模型算出桩周土体的蠕变变形,再把这种变形转变成施加在桩身上的附加水平荷载,接着把这些荷载带入管桩动力学模型去求解桩身位移和内力。

桩土相互作用采用非线性弹簧模型模拟。桩土界面的水平抗力可表示为:

$$p(z, t) = k_h(z) \Delta u(z, t)$$

式中: $k_h(z)$ 为桩土界面的水平抗力系数; $\Delta u(z, t)$ 为桩土相对位移。

水平抗力系数 $k_h(z)$ 随桩土相对位移的变化而变化。当桩土相对位移较小时, $k_h(z)$ 较大,桩土之间保持黏结状态;当桩土相对位移超过临界值时, $k_h(z)$ 逐渐减小,桩土之间发生滑移。

把管桩的位移当作边界条件代入路基动力学模型中,求解得到路基的变形场。用路基顶面的变形作为路面系统的位移边界条件,输入路面动力学模型中,求解得到路面的动力响应。进而就得到了管桩、路基、路面系统在时间上变化的耦合分析。

为了提高模型的计算效率,用分离迭代法求解耦合系统的动力学方程。分离迭代法把耦合系统拆分成管桩、路基和路面这三部分子系统,每次时间步长都先解一次各子系统的动力学方程,然后靠界面条件传应力和变形,反复算到算不出为止。

2. 侧向蠕变对高速路面平顺性的影响机制与量化分析

2.1 侧向蠕变影响路面平顺性的机制

软土侧向蠕变给高速路面平顺性造成的影响是多尺度、多阶段的传递过程^[5]。软土受路基自重、车辆荷载的作用而产生侧向蠕变,给管桩施加附加的水平荷载,使管桩产生侧向位移和弯曲变形。然后,管桩的变形是通过桩土相互作用传导路基的,引起路基出现不均匀沉降以及横向位移。最后,路基变形传到路面,造成路面出现波浪形起伏和横向裂缝,路面的平顺性就变差了。

管桩侧向位移引起的路面变形主要有竖向不均匀沉降、横向倾斜^[6]。竖向不均匀沉降是由于管桩和桩间土的刚度不同,在软土侧向蠕变的作用下,桩间土的沉降大于桩顶的沉降,路面在桩间土位置出现凹陷,在桩顶位置出现凸起,形

成波浪形起伏。横向倾斜是管桩产生侧向弯曲变形造成路基顶面产生横向坡度的变化,使路面出现横向倾斜。

竖向不均匀沉降造成路面有纵向波浪形起伏,车辆行驶时就会出现垂直振动。路面不平度的波长和车辆固有波长相差不大时,就会引起车辆的共振,使车辆的振动响应变得更加剧烈,大大降低行车的舒适性。横向倾斜造成路面出现横向坡度改变情况,车辆随之会有横向振动和侧倾发生,行车安全受到的影响也就更大一些。

另外管桩侧向蠕变还会造成路面结构层内产生附加应力。由于管桩与桩间土的刚度相差很大,在管桩顶部会产生应力集中,在路面结构层的桩顶处就会出现反射裂缝。随着时间的推移,裂缝会越来越大,形成网状裂缝,路面损坏更加严重,路面的平顺性也会下降。同时裂缝出现会造成雨水渗入到路面结构层里面,使基层和底基层的强度降低,加快路面劣化速度。

2.2 影响因素分析

为了定量地找出各个因素对于路面平顺性衰变的影响,选择桩距、桩长、路基填土高度、软土压缩模量这四个指标做单因素敏感性分析。

桩距影响最大:桩距由 2.0m 增至 3.0m 时,10 年路面 IRI 值由 3.2m/km 增至 4.8m/km,增幅 50%。桩长影响显著:桩长由 15m 增至 25m 时,IRI 由 4.2m/km 降至 3.5m/km,减幅 16.7%。路基填土高度呈正相关:高度由 2m 增至 4m 时,IRI 由 3.4m/km 增至 4.3m/km,增幅 26.5%。软土压缩模量呈负相关:模量由 1.5MPa 增至 2.5MPa 时,IRI 由 4.5m/km 降至 3.3m/km,减幅 26.7%。

根据双因素交互作用分析可知,桩距与路基填土高度存在交互作用,填土高度越大,桩距对 IRI 的影响就越大。

3. 基于蠕变时变效应的路面平顺性预测与控制对策

3.1 路面平顺性时变预测模型

本文在研究成果的基础上建立软土侧向蠕变效应考虑进来的高速公路路面平顺性时变预测模型。该模型是以软土侧向蠕变本构模型和管桩、路基、路面耦合动力学模型为基础,利用现场监测数据对模型参数进行优化提高预测精度的模型。

预测模型的输入参数有软土物理力学参数(重度、压缩模量、内摩擦角、粘聚力、渗透系数),管桩设计参数(桩径、桩长、桩距、桩身抗弯刚度),路基设计参数(填土高度、填土重度、填土压缩模量),路面结构参数(各结构层厚度、弹性模量、泊松比),交通荷载参数(轴重、轴型、交通量);输出参数为服役年限为不同年份时的路面 IRI 值。

3.2 路面平顺性控制对策

对软土管桩侧向蠕变对高速路面平顺性的影响,在设计、

施工、运营三个阶段给出相应的控制对策。

3.2.1 设计阶段控制对策

根据合理的桩距、桩长、桩径来设计管桩。根据本文得出研究结果, 桩距不应大于 2.5m, 对于软土厚度大、路基填高较高路段, 桩距应适当减小, 不宜大于 2.2m。桩长应穿过主要的软土层, 进入比较硬土层不小于 2m, 提高桩端侧向约束。对软土层较厚的路段采用变桩距, 沉降敏感区(桥头、通道两侧等)处可采用较小的桩距。

采用复合地基处理技术, 在管桩基础上铺垫褥垫层, 改变桩土荷载分担比, 减小桩间土的沉降。褥垫层厚度 30—50cm, 用级配好的碎石或砂砾填筑, 压实度不小于 93%。褥垫层顶部要铺设土工格栅, 提高路基整体性、抗变形能力。对特别软弱的路段, 可以采用管桩和水泥土搅拌桩联合处理的复合地基形式, 水泥土搅拌桩布置在管桩之间, 提高桩间土的强度和刚度, 减小桩间土的沉降。

优化路基设计, 用轻质填料填筑路基, 减小作用在软土地基上的荷载。轻质填料可用粉煤灰、泡沫混凝土、EPS 颗粒等。粉煤灰重度约 10~12kN/m³, 比普通粘性土轻 30%~40%, 是很好的轻质填料。同时设置路基底部的排水层, 加快软土中的孔隙水排出, 减少固结时间, 减小侧向蠕变变形。排水层厚度宜为 30cm 至 50cm, 用级配良好的碎石填筑, 横向坡度不小于 3%。

3.2.2 施工阶段控制对策

控制施工质量, 严格控制管桩的施工质量, 保证桩身垂直度、桩顶标高满足设计要求。管桩施工时桩身垂直度偏差不得大于 1%, 桩顶标高偏差不得大于 ±50mm。管桩施工完毕后, 要做静载试验及低应变检测, 检查桩身质量和承载力。静载试验的数量不得少于总桩数的 1%, 且不得少于 3 根; 低应变检测的数量不得少于总桩数的 20%。

控制路基填筑速率, 路基填筑应分层进行, 每层填筑厚度不大于 30cm, 压实度要满足设计要求。填筑时应对地基变形进行观测, 观测内容有路基沉降、侧向位移和孔隙水压力。当侧向位移速率大于 5mm/d 或者孔隙水压力大于上覆荷载的 60% 的时候, 应该停止填筑, 待变形稳定后再继续填筑。

设置预压期, 在路基填筑完成后应有 6 个月以上的预压期, 使软土在预压荷载作用下完成大部分的固结、蠕变变形。预压期结束以后, 根据沉降观测结果来判断是否需要超载预压或者延长预压期。当推算的工后沉降大于设计要求时, 应做超载预压, 超载预压的荷载应为路基自重的 1.1~1.2 倍, 预压期不应少于 3 个月。

3.2.3 运营阶段控制对策

加强对桩身位移、路基沉降、路面平整度做长久的监测

系统的工作。监测频率为通车后前三年内每季度一次, 三年以后每半年一次。根据监测数据来掌握路面平顺性随时间的变化规律, 创建路面平顺性预警系统。当 IRI 值接近 3.0m/km 的时候发出黄色预警, 当 IRI 值接近 3.5m/km 的时候发出红色预警, 及时采取养护措施。

预防性养护, 在路面 IRI 值达到 3.0m/km 之前进行预防性养护, 采用微表处、稀浆封层、碎石封层等改善路面表面功能的方法, 延缓路面平顺性衰变。

控制重载交通, 加强重载车辆管理, 控制超载车辆上路行驶。重载交通会加快路面损坏、地基变形的速度, 超载 100% 的车辆造成的路面损坏相当于 16 辆标准轴载车造成的路面损坏。因此应该在高速公路入口处设置超限检测站, 对超载车辆进行卸载或者处罚, 严格控制重载交通。

4. 结论

公路行业正在向重视养护转型, 这使得降低交通基础设施维修成本、提高通行保障能力和运行效率成为直接压力。软土侧向蠕变呈减速、稳定两个阶段, 通车后 6~18 个月为快速发展期, 占总变形的 60%~70%。管桩侧向位移沿深度呈中间大、两端小的抛物线分布, 最大位移在地表下 3~5m 处, 18 个月后趋于稳定。建立管桩、路基、路面三者耦合时变动力学模型, 并与现场监测结果相比, 误差小于 10%。路面 IRI 值随着蠕变时间的增加是非线性的增长, 10 年后的增长率为 45%到 60%, 桩距是造成平顺性衰变的主要因素。提出考虑蠕变时变效应的路面平顺性预测模型(相对误差小于 15%), 从设计、施工、运营三个阶段给出控制措施。

[参考文献]

- [1] 徐方亮. 管桩在软土地基处理中的应用效果研究[J]. 科学技术创新, 2026, (10): 123-126.
- [2] 张剑, 冉志豪, 孙国栋, 等. 混凝土预制管桩与 CFG 桩在高速铁路路基工程中的应用对比研究[J]. 铁路技术创新, 2026, (02): 87-93. DOI:10.19550/j.issn.1672-061x.2025.12.15.001.
- [3] 许媛媛. 高速公路路基工程 PHC 管桩施工技术研究[J]. 工程建设与设计, 2026, (08): 177-179. DOI:10.13616/j.cnki.gcjsysj.2026.04.257.
- [4] 王金昌, 龙宇航, 范志宏, 等. 浙江省高速公路软基工后沉降影响及对策[J]. 地基处理, 2025, 7(06): 574-583.
- [5] 邹晓溪. 复杂山区高速公路软土岩溶共存区路基稳定性控制技术研究[J]. 运输经理世界, 2025, (33): 45-47.
- [6] 盛明. 高速公路软土路基拓宽施工技术要点与质量控制研究[J]. 交通科技与管理, 2025, 6(20): 141-144.