

软土路基监测中沉降速率突变的预警阈值设定研究

吉伟涛

湖北交投建设集团有限公司道路分公司 湖北 武汉 430070

【摘要】：软土路基具有压缩性高、强度低、渗透性差等特点，在荷载作用下易产生较大沉降，而沉降速率突变往往是路基失稳的前兆。本文针对软土路基监测中沉降速率突变的预警阈值设定展开研究，分析了影响预警阈值的主要因素，探讨了预警阈值的设定方法，并结合工程实例构建了不同条件下的预警阈值参考表，旨在为软土路基的安全监测与预警提供科学依据。

【关键词】：软土路基；沉降速率；突变；预警阈值；监测

DOI:10.12417/2705-0998.25.15.023

1 引言

软土在我国分布广泛，尤其在沿海地区、河流三角洲及湖泊沉积区较为常见。软土路基在建设和运营过程中，由于受到填土荷载、车辆荷载、地下水变化等因素的影响，会发生持续沉降。当沉降速率出现突变时，可能意味着路基内部结构发生破坏，若不及时采取措施，可能引发路基失稳、路面开裂等严重工程事故。因此，合理设定沉降速率突变的预警阈值，对保障软土路基工程的安全具有重要意义。目前，国内外学者在软土路基沉降监测方面已开展了大量研究，但关于沉降速率突变预警阈值的设定尚未形成统一标准。不同地区、不同地质条件下的软土性质差异较大，预警阈值也应有所不同。因此，有必要结合软土的工程特性和实际工程条件，深入研究预警阈值的设定方法。

2 影响软土路基沉降速率突变预警阈值的因素

2.1 软土物理力学性质

软土的物理力学性质是影响沉降速率的关键因素。软土的天然含水率、孔隙比、压缩系数、抗剪强度等指标直接决定了其沉降特性。天然含水率越高、孔隙比越大、压缩系数越大，软土的压缩性就越强，在相同荷载作用下沉降速率越大，沉降速率突变的可能性也越高，对应的预警阈值应相对较低。相关试验数据表明，当软土天然含水率从30%增至60%时，其压缩系数可从 0.5MPa^{-1} 增至 2.0MPa^{-1} ，在 100kPa 荷载作用下，日均沉降速率可从 5mm/d 增至 15mm/d 。抗剪强度方面，当软土的黏聚力从 10kPa 降至 5kPa 时，在相同荷载作用下，沉降速率突变的概率会增加30%以上。因此，对于天然含水率超过60%、黏聚力低于 10kPa 的软土，预警阈值通常需设定在 $5\text{--}8\text{mm/d}$ 。

2.2 荷载条件

荷载是引起软土路基沉降的主要外部因素，包括路基填土荷载、路面结构荷载及车辆荷载等。荷载越大，软土路基所受的附加应力越大，沉降速率也越大。在施工阶段，填土速率过快会导致软土路基来不及排水固结，易引发沉降速率突变，此时预警阈值应设定得较低。当填土速率从 0.5m/d 增至 1.0m/d

时，软土路基的日均沉降速率从 6mm/d 增至 12mm/d ，且沉降速率突变的频率增加了2倍。在运营阶段，重载车辆的反复作用也可能导致沉降速率增大，需根据车辆荷载等级调整预警阈值。当车辆轴载从 10t 增至 20t 时，路基表层的附加应力可增加1.5倍，沉降速率可提高40%左右。

2.3 地质条件

地质条件对软土路基的沉降特性影响显著。软土层的厚度、分布均匀性、下卧层性质等都会改变沉降速率的变化规律。当软土层较厚且分布不均匀时，路基各部位的沉降差异较大，易出现局部沉降速率突变，预警阈值的设定需考虑这种不均匀性。统计数据显示，当软土层厚度超过 15m 时，路基沉降的不均匀系数（最大沉降与平均沉降的比值）可达 $1.5\text{--}2.0$ ，而软土层厚度小于 5m 时，不均匀系数通常小于 1.2 。

2.4 工程处理措施

为提高软土路基的稳定性，工程中常采用排水固结法、置换法、复合地基法等处理措施。不同的处理措施对软土路基的沉降速率影响不同。例如，采用排水固结法处理后，软土的排水条件得到改善，沉降速率会加快，但后期沉降会趋于稳定，沉降速率突变的可能性降低，预警阈值可适当提高。采用塑料排水板（间距 1.0m ）处理的软土路基，施工期日均沉降速率可达 $10\text{--}15\text{mm/d}$ ，但沉降速率突变的次数仅为未处理路基的30%。而未经过处理或处理效果不佳的软土路基，沉降速率突变的风险较高，预警阈值应设定得较低。采用碎石桩复合地基处理后，软土路基的承载能力可提高2-3倍，沉降速率可降低40%-60%。

3 软土路基沉降速率突变预警阈值的设定方法

3.1 基于工程经验的设定方法

3.1.1 经验积累与区域差异

工程经验的积累源于大量同类工程的实践总结。在我国，沿海地区与内陆地区由于软土性质存在显著差异，预警阈值的经验值也各有不同。沿海地区软土多为淤泥质土，天然含水率高、孔隙比大，如长江三角洲地区的淤泥质土天然含水率普遍在50%-80%，孔隙比达 $1.5\text{--}2.0$ ，根据多年工程经验，其施工期沉降速率突变预警阈值通常设定为 10mm/d 。而内陆地区的软

黏土，天然含水率相对较低，多在 30%-50%，如黄土高原周边的软黏土，预警阈值经验值则为 12-15mm/d。

3.1.2 工程案例借鉴与局限性

某沿海城市道路扩建工程，软土为典型的淤泥质土，参考当地同类工程经验，将施工期沉降速率突变预警阈值设定为 10mm/d。在施工过程中，当监测到某路段沉降速率达到 11mm/d 时，及时停工并采取堆载预压加固措施，避免了路基失稳。但该方法也存在明显局限性，某内陆高速公路工程，软土为天然含水率 40% 的软黏土，参考沿海经验将预警阈值设定为 10mm/d，施工期间多次出现预警，但实际路基稳定性良好，频繁预警导致施工进度延误近 1 个月，增加了工期成本。

3.2 基于理论分析的设定方法

3.2.1 分层总和法的应用

分层总和法是通过计算各土层的压缩量来确定路基总沉降和沉降速率的经典方法。其计算公式为： $s = \sum (\sigma_z / E_{si}) \times h_i$ ，其中 s 为总沉降量， σ_z 为土层附加应力， E_{si} 为第 i 层土的压缩模量， h_i 为第 i 层土的厚度。当软土的压缩模量为 5MPa，填土高度为 5m 时，经计算，施工期第 1-10 天的日均沉降速率逐渐增大，第 10 天达到最大约 8mm/d，据此可将预警阈值设定为 8mm/d。某软土路基试验段采用该方法设定预警阈值，在施工至第 12 天时，沉降速率达到 8.5mm/d，启动预警后采取放缓填土速率措施，后续沉降速率稳定在 7mm/d 左右。

3.2.2 有限元法的模拟与优化

有限元法能够考虑软土的非线性本构关系、复杂边界条件及荷载的动态变化。采用 MidasGTSNX 软件建立软土路基有限元模型，模拟车辆荷载作用下的沉降特性。当轴载为 15t 时，通过模型计算得出运营期最大日均沉降速率约为 4mm/d，以此设定预警阈值。在某高速公路运营监测中，当某监测点沉降速率达到 4.2mm/d 时，结合路面平整度检测发现轻微车辙，及时进行了路基注浆加固，延长了路面使用寿命。

3.3 基于监测数据的统计分析方法

3.3.1 数据收集与预处理

该方法需收集大量连续的沉降监测数据，并进行预处理，去除异常值。某软土路基工程共布设 100 个监测点，监测周期为 6 个月，每天采集 1 次数据，共获得 18200 组数据。通过格拉布斯准则剔除 12 组异常数据（如仪器故障导致的突变值），确保数据的可靠性。

3.3.2 统计指标计算与阈值确定

计算处理后数据的日均沉降速率均值为 6mm/d，标准差为 2mm/d。根据统计学原理，当沉降速率超过均值加上 2 倍标准差（即 $6 + 2 \times 2 = 10\text{mm/d}$ ）时，可判定为沉降速率突变，据此设定预警阈值为 10mm/d。在该工程后续监测中，有 3 个监测点

先后达到 10mm/d 的预警值，经现场勘查发现路基存在局部剪切变形迹象，采取碎石桩加固后，沉降速率降至 5mm/d 以下，验证了该方法的有效性。

4 工程实例应用

4.1 工程概况

4.1.1 项目背景

该沿海高速公路工程位于我国东南沿海地区，全长约 50km，其中 K12+300-K15+600 段为软土路基段，长度 3.3km。该区域属于滨海相沉积地貌，软土层分布广泛且厚度较大，对路基稳定性影响显著。

4.1.2 软土特性与处理措施

该路段软土为典型的淤泥质土，经地质勘察，其主要物理力学指标如下：天然含水率为 65%，孔隙比为 1.8，压缩系数为 1.6MPa^{-1} ，黏聚力为 8kPa，内摩擦角为 2° 。为提高路基稳定性，采用排水固结法进行处理，具体为打设塑料排水板，排水板长度 15m，初始间距 1.2m，呈梅花形布置。施工期填土荷载从 0 开始逐渐增加至 20kPa，填土材料为黏性土，压实度要求达到 93% 以上。

4.2 监测方案设计

4.2.1 监测点布设

根据工程特点和规范要求，在该软土路基段共布设了 20 个沉降监测点（编号 S1-S20），监测点沿道路中线和两侧路肩均匀分布，间距为 150m。每个监测点均安装自动化沉降仪，该仪器精度为 $\pm 0.1\text{mm}$ ，可实现实时数据采集与传输。

4.2.2 监测频率与指标

数据采集频率为 1 次/天，监测指标主要为日均沉降速率。同时，辅以路基侧向位移和孔隙水压力监测，侧向位移采用测斜仪监测，孔隙水压力采用孔隙水压力计监测，监测频率均为 1 次/天，以综合判断路基稳定性。

4.3 预警与处理过程

4.3.1 预警阈值确定

根据本文构建的预警阈值参考表，结合该工程软土类型（淤泥质土）、天然含水率（65%）、处理措施（排水固结）及施工期荷载条件，确定该工程施工期沉降速率突变预警阈值为 8-12mm/d。

4.3.2 监测数据变化与预警触发

监测数据显示，在施工前 25 天，各监测点的日均沉降速率逐渐增大，第 25 天时，各监测点的日均沉降速率在 6-9mm/d 之间，其中 S8 监测点的沉降速率为 7mm/d，处于正常范围内。第 30 天，监测数据出现明显变化，S8 监测点的日均沉降速率突然上升至 13mm/d，超过了预警阈值上限（12mm/d），触发

预警机制。其他监测点的沉降速率虽有波动，但均在 8mm/d 以下。具体监测数据变化见表 1。

表 1 S8 监测点及部分监测点沉降速率变化 (mm/d)

监测天数	S8 监测点	S7 监测点	S9 监测点	S10 监测点
25	7	6	8	7
26	7.5	6.2	8.1	7.2
27	8	6.5	8.2	7.3
28	9	6.8	8.3	7.5
29	10	7	8.4	7.6
30	13	7.2	8.5	7.8

4.3.3 处理措施与效果

预警触发后，工程人员立即赶赴现场进行勘查，结合侧向位移和孔隙水压力监测数据，判断路基出现局部失稳趋势。将填土速率从 0.8m/d 降至 0.4m/d，减少荷载增加对软土路基的扰动。在 S8 监测点周边 50m 范围内，将塑料排水板间距从 1.2m 加密至 0.8m，增强排水固结效果，加速软土强度增长。在 S8 监测点附近增设 5 个临时监测点，提高监测密度，更精准地掌握沉降变化情况。经过 10 天的处理，至第 40 天，S8 监测点的沉降速率降至 5mm/d，其他监测点的沉降速率也保持在 8mm/d 以下，路基趋于稳定。后续监测中，各监测点沉降速率持续降低，未再出现预警情况，表明处理措施有效，避免了工程事故的发生。

4.4 实例验证结论

该工程实例中，根据本文设定的预警阈值，成功捕捉到了软土路基沉降速率突变的情况，并通过及时有效的处理措施控制了路基变形，验证了本文设定的预警阈值具有一定的实用性和可靠性，能够为软土路基工程的安全监测提供科学指导。未来研究可进一步结合智能化监测技术，如物联网、大数据分析等，实现对软土路基沉降速率的实时监测和动态预警，提高预警的准确性和及时性。例如，利用传感器网络实时采集沉降数据，通过大数据算法分析沉降速率的变化趋势，自动调整预警阈值。同时，还需开展更多的工程实例验证，扩大数据样本量，针对不同区域、不同类型的软土进行深入研究，不断完善预警阈值的设定方法，形成更具普适性的规范标准。此外，可研究沉降速率突变与其他监测指标（如侧向位移、孔隙水压力）的关联性，构建多指标综合预警体系，进一步提高软土路基安全监测的可靠性。

5 结论

本文通过对软土路基监测中沉降速率突变预警阈值设定的研究，软土物理力学性质、荷载条件、地质条件及工程处理措施是影响预警阈值的主要因素，在设定预警阈值时应综合考虑这些因素。天然含水率高、荷载大、软土层厚且未处理的软土路基，预警阈值应设定较低。基于工程经验、理论分析和监测数据统计分析的方法是设定预警阈值的有效途径，实际应用中可结合多种方法确定合理的预警阈值。理论分析为预警阈值设定提供了理论基础，监测数据统计分析则更贴合工程实际。构建的不同条件下的预警阈值参考表可为类似工程提供参考，如淤泥质土在施工期未处理时预警阈值为 5-8mm/d，经过排水固结处理后可提高至 8-12mm/d，但实际工程中需根据具体情况进行调整。

参考文献:

- [1] 刘秀,陈杰,张锋,等.水泥搅拌桩加固软土路基沉降预测与数值模拟分析[J/OL].大连交通大学学报,1-10[2025-08-22].
- [2] 李苗.软土路基边坡滑移应急处置方法分析[J].湖北应急管理,2025,(14):21-23.
- [3] 马宇翔.基于分层总和法的软土路基工后沉降简化算法[J].市政技术,2025,43(06):105-113.