

动态增量反演下的软土变形特性仿真分析

崔松明, 朱 松

(中国二十冶集团有限公司, 上海 201999)

摘 要: 为了准确获得软土变形量, 提出动态增量反演下的软土变形特性仿真分析方法。利用增量反演分析法将反演参数不断逼近实时测量的变形数据, 计算软土变形值。结果表明: 软土含水率增加, 摩擦角随之减小, 土体更容易产生变形; 公路分层填筑时的软土变形最大值为 3 cm; 公路摊铺平整时的软土变形最大值为 2 cm; 公路碾压压实的软土变形最大值为 3.5 cm。软土压缩指数对土层自然含水率变化较为敏感。所提方法的变形仿真分析结果与真实值的误差小于 1 cm, 仿真分析结果具有较高的准确性。研究成果可为工程设计与施工提供参考。

关键词: 增量反演; 高速公路; 软土; 变形特征; 变形分析; 弹性模量

中图分类号: TU473

文献标志码: A

文章编号: 1005-8249 (2026) 05-0079-05

DOI:10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2026.05.012

Simulation Analysis of Deformation Characteristics of Soft Soil under Dynamic Incremental Inversion

CUI Songming, ZHU Song

(China MCC20 Group Co., Ltd., Shanghai 201999, China)

Abstract: To accurately obtain soft soil deformation values, a simulation analysis of deformation characteristics of soft soil under dynamic incremental inversion is proposed. Using incremental inversion analysis, the inversion parameters are continuously approximated to real-time measured deformation data to calculate soft soil deformation values. Analysis results indicate: as soft soil moisture content increases, the friction angle decreases, making the soil more prone to deformation; The maximum deformation of soft soil during layered filling of highways is 3 cm; The maximum deformation during paving and leveling is 2 cm; The maximum deformation during compaction is 3.5 cm. The compression index of soft soil is highly sensitive to changes in natural moisture content. The deformation simulation results from the proposed method exhibit an error of less than 1 cm compared to actual values, demonstrating high accuracy. The research results can provide references for engineering design and construction.

Key words: incremental inversion; highway; soft soil; deformation characteristics; deformation analysis; modulus of elasticity

岩土力学

0 引言

高速公路建设是推动经济增长和社会发展的主要驱动力。一些国家近年来积极推进高速公路的建设,以促进域互联互通。然而,高速公路在地形多样、地质条件复杂的软土地区容易出现地基沉降等变形问题,公路路基的稳定性面临严峻挑战。因此,如何准确地分析和预测软土地区的公路变形特性,已成为亟待解决的技术难题^[1-2]。

已有一些学者对工程中的软土变形分析进行了研究。王卫东^[3] 基于土体小应变特性构建了修正本构方程,结合实测数据分析软土深基坑变形特征,并提出分级加载变形控制技术;乔丽平等^[4] 从时空分布特征入手,分析了变形的时空耦合效应,建立考虑土体各向异性的多参数影响权重,探讨了超大直径软土深基坑支护桩在不同方向变形的影响因素;徐四一等^[5] 利用不同开挖工况下的测斜管位移场,分析了不同基坑宽度、围护深度对基坑变形的影响。基于地质界面倾角确定变形修正系数,得到了古河道沉积软土区车站基坑的测斜变形规律;柯磊等^[6] 基于光纤光栅传感技术,布设 FBG 传感器阵列,通过应变-温度耦合解耦算法,监测与分析了软土-基岩条件下地铁车站施工间歇期的结构变形特性;王虎等^[7] 针对不同路基填土方案,分析了深厚软土区新建路基填土荷载的数值效应,研究方顶管隧道变形特征,分析填土荷载下软土-隧道相互作用力链演化规律;赵鹏飞等^[8] 考虑原位测试数据的数字化应用优势,利用 FLAC 3D 有限差分软件自动关联基坑挖掘模拟数据,分析得到软土基坑的变形特性;周傲等^[9] 提出了软土基坑的长期变形分析方法,以实际工程作为研究背景,进行软土蠕变试验,并考虑结构松弛效应,结合反演算法与工程分析软土长期变形规律;张志伟等^[10] 提出了软土层地面隆起分析方法,采用弹性力学 Mindlin 解和随机介质理论,考虑施工扰动区土体参数空间变异性的隆起量概率,分析工程进行中的软土变形情况;Kabeta 等^[11] 通过观察和测量的方式分析岩土土压力或侧应力、相对密度、孔隙水压力对地基打桩时土层变形的影响;宋许根^[12] 针对广州南沙某深厚软土区现场概况,分析了综合管廊基坑变形发生的成因和特征,同步研

究了桩土相互作用的变化,探究基坑变形时空传递路径。

上述研究在考虑不同荷载和环境条件的动态增量对公路变形的影响方面研究较少。因此,提出了动态增量反演下的软土变形特性仿真分析方法。动态增量反演方法通过实时反馈和数据驱动,模拟软土地区的公路变形特性^[13-15]。利用该方法完成高速公路软土变形的动态分析,并预测不同施工步骤后的软土变形趋势,为工程设计与施工提供参考依据。

1 高速公路软土变形特性仿真分析

1.1 工程概况

研究的外环形公路项目工程北 1 段(OCHP-NS1)的长度约为 2 km,全线均包括坡道路段。该工程位于穆图拉贾韦拉湿地,仅略高于平均海平面。湿地是凯拉尼河洪泛平原的一部分,从凯拉尼河右岸一直延伸到尼贡博泻湖。该地区大部分软土采用砾石压实桩(GCP)进行回填。

为了测试该地区软土性质,从 Ker IC 分布的 39 个钻孔中提取了地基土数据。提取原状样和扰动样的样品进行室内试验,包括指标试验、固结试验(固结仪试验)和 CU、UU 的三轴试验。不同指标的测试标准如下:天然含水量(NMC)的测试标准为 ASTM D 2216;有机含量(OC)的测试标准为 bs1377:1990;阿特伯格限制的测试标准为 ASTM D 4318;比重的测试标准为 ASTM D 854;油量的测试标准为 ASTM D 2435-90;三轴(UU)的测试标准为 bs1377:1990;三轴(CU)的测试标准为 bs1377:1990;磁场叶片剪切(VST-MF)的测试标准为 4437:1967。

有机含量(OC)是衡量土中有机质比例的关键指标,OC 越高表明土体结构越不稳定且承载力越低。天然含水量(NMC)反映土体孔隙中自由水的饱和程度,高含水量会导致软土出现显著的流变效应和长期沉降。OC 与 NMC 这两个指标能在由泥炭和有机黏土组成的冲积层中有效表征研究区土体的压缩性、抗剪性和渗透性等物理力学性质,为地基变形分析提供直接依据。

泥炭是一种有机土壤,稳定性主要受到有机物

含量的影响。该地区有机含量的变化范围很大，介于 10%~98% 之间。OCH-NS1 泥炭和有机黏土/粉砂的有机含量在 6%~62% 之间。

NMC（狭窄的矿物含量）是 OC 重要的影响因素，它主要影响泥炭的岩土特性。比较 OCHP 软土的 OC 范围和 NMC 范围见表 1。在 OCHP-NS1 施工区土层的信息见表 2。

表 1 OCHP 软土的 OC 范围和 NMC 范围
Table 1 OC range and NMC range of ochp soft soil

参考/地点	OC 范围/%	土壤类型	NMC 范围/%
Ref 1	20~50	皮特斯	200~800
		皮特斯	13~851
Ref 2	3~87	有机黏土	2~548
		软黏土	14~340
Ref 3	17~92	泥煤	142~524
OCHP-NS1	6~62	泥炭、有机黏土/粉砂	36~810
		软黏土	26~236

表 2 土层信息参数
Table 2 Soil layer information parameters

土层	厚度/m	侧压力系数 K_0	泊松比 ν	容重 $\gamma/(\text{g/cm}^3)$
1	2.5	0.51	0.40	18.3
2	3.3	0.48	0.41	17.9
3	1.8	0.55	0.43	18.1
4	4.6	0.39	0.42	18.5
5	5.3	0.35	0.44	19.7
6	5.8	0.27	0.35	20.1

1.2 反演分析

获取高速公路工程的各种信息后，引入反演分析方法，以时域、空域的反馈分析结果为落点，分析弹性增量和黏性增量，动态反馈测量的岩土变形情况。

将实际数据作为标准约束集，目标参数则是可调集，通过改变可调集将计算结果向约束集靠近，达到拟合精度的可调集结果便是反演分析参数。

1.2.1 弹性增量反演分析

在空域上，设测量点 m 位置的实际位移量为：

$$U_m = \|A\| \sigma_0 \tag{1}$$

式中： A 为敏感系数矩阵； σ_0 为初始软土应力。

为了保证反演分析的可靠性，测量点数量 $m >$ 反演参数数量 n ，利用最小二乘法对公式（1）进行求解，结果为：

$$\frac{\sigma_0}{nE} = \frac{AU_m}{AA^T} \tag{2}$$

式中： E 为施工中软土的弹性模量。

利用最小二乘目标函数计算动态施工反演的信息未知量 X （如施工中软土的弹性模量、初始侧压力系数 K_0 等），公式为：

$$X = \sum_{i=1}^3 \frac{\omega_i J_i}{J_{i0}} \tag{3}$$

式中： J_i 和 J_{i0} 分别为第 i 个施工阶段反演信息和实际测量值； ω_i 为加权常数，一般情况下 $\omega_i = 1$ 。

将 J_i 中的 i 分别取值 1~3，设 X 向实际测量值 X^* 不断逼近。根据当前施工步骤 j 与前一步骤 k 的弹性变形，得到弹性变形增量 Δu_{k1} ，并将该值作为初始值进行弹性反演，在进行到第 i 步时，总弹性变形为：

$$u_{i1} = \Delta u_{k1} + \sum_{j=k+1}^i \Delta u_{j1} \tag{4}$$

式中： u_{i1} 、 Δu_{j1} 分别为工程进行到第 i 步的总弹性变形和第 j 步弹性变形反演增量。

1.2.2 黏性增量反演分析

软土会发生流变，将 Ker 的软土变形假设线性流变，引入 Maxwell（麦克斯韦）模型描述软土不同土层的变形情况，如图 1 所示。

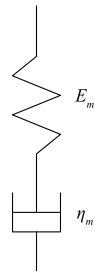


图 1 土层分析 maxwell 模型
Fig. 1 Maxwell model for soil layer analysis

设 E_m 为 m 个测量点的弹性模量，在进行每一个施工步骤且土体压力 η_m 不变时，流变变形与弹性变形的增量比值固定。

根据流变变形和弹性变形可以计算软土的总变形量为：

$$u_i = u_{i1} + \sum_{j=k+1}^i \Delta u_{j1} + \Delta u_{i2} \tag{5}$$

2 仿真试验与结果分析

分析 OCHP-NS1 地区岩土含水量与压缩指数相关性，将其与 Karunawardena 和 T&T 提出的相关性分析结果进行对比。由图 2 可知，OCHP 曲线的梯度大

岩土力学

于其他两种曲线，表明在相同的变化范围内，OCHP 曲线的压缩指数 C_c 对自然含水量 W_0 的变化更为敏感。对于给定的 NMC，CHP-NS1 处的泥炭显示了更高的压缩指数。这表明在相同的 NMC 条件下，OCHP-NS1 的泥炭在自然含水量变化时，其压缩性变化更为显著。这一结果对于理解泥炭的岩土特性和压缩行为具有重要意义。

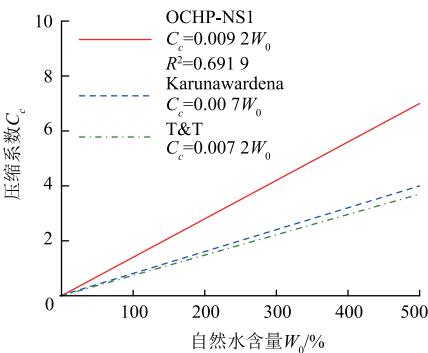


图 2 含水量与压缩指数的相关性
Fig. 2 Correlation between moisture content and compression index

由图 3 可知，随着泥炭中含水量的增加，摩擦角会逐渐减小。因为摩擦角的减小会导致软土的稳定性降低，从而更容易发生变形。在施工过程中，这种变形可能会对道路的稳定性的造成影响，甚至可能导致工程安全问题。因此，公路施工需要紧密关注软土的自然含水量，以确保工程安全顺利进行。针对软土地区的高含水量问题，土壤改良或加固处理可以增强土壤的稳定性。

以施工中的第 5 步作为初始值，通过公式（3~5）反演计算软土弹性增量，得到软土的流变系数结果见表 3。

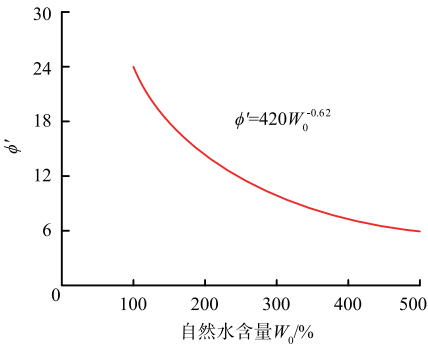
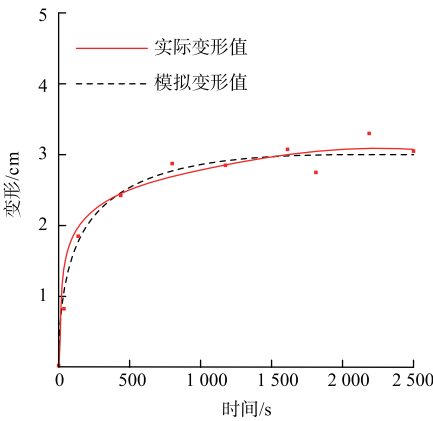


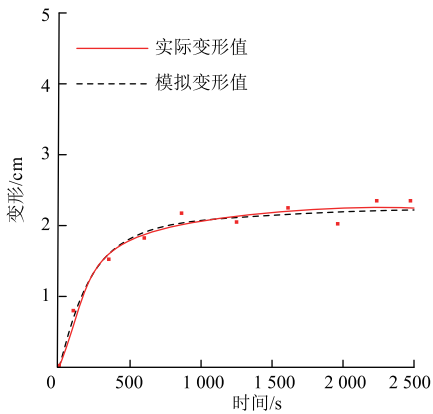
图 3 OCHP-NS1 泥炭的摩擦角在不同含水量下的变化
Fig. 3 Changes in friction angle of OCHP-NS1 peat at different moisture contents

表 3 软土参数反演值			
Table 3 Inverted values of soft soil and rock parameters			
土层	弹性模量参数		黏性系数 / (MPa · s)
	初始值/kPa	反演值/kPa	
1	900 1.7	426 5.6	2.08×107
2	229 68.4	165 72.5	2.11×107
3	104 68.1	250 40.4	2.98×107
4	133 51.3	702 88.9	5.48×10
5	760 42.4	838 54.6	6.92×107
6	119 634.5	103 402.4	7.44×107

根据表 3 计算值仿真分析其他施工步骤的软土变形量：第 6 步分层填筑的软土最大变形值为 3 cm；工程第 7 步摊铺平整的软土最大变形值为 2 cm；工程第 8 步碾压压实的软土最大变形值为 3.5 cm。分析结果由图 4 可知，利用动态增量反演算法计算的软土变形仿真结果，与真实的变形数值基本吻合，误差小于 1 cm。



(a) 第 6 步软土变形



(b) 第 7 步软土变形

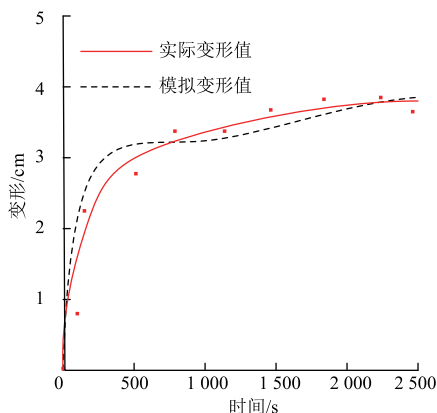


图 4 软土变形分析结果

Fig. 4 Analysis results of soft soil deformation under dynamic incremental inversion

3 结论

通过现场钻孔取样及室内试验,结合动态增量反演方法对软土岩土变形情况研究,并对软土变形特性进行仿真分析,主要得出如下结论:

(1) 相同含水率变化范围内,软土的压缩指数对土层自然含水率变化具有较高敏感性,且 OCHP-NS1 的泥炭在自然含水量变化时,其压缩性变化更为显著。

(2) 随着泥炭中含水量的增加,软土摩擦角逐渐减小,土体稳定性随之降低,更易产生变形,因此在软土地区公路施工中需密切关注土体含水量变化。

(3) 利用动态增量反演算法计算的软土变形仿真结果,与真实的变形数值基本吻合,误差小于 1 cm。

(4) 为公路工程设计和施工提供了重要的技术支持。根据动态增量反演计算结果,可以减少施工意外,有利于推进工程进度。

参 考 文 献

[1] 高熙贺. 软土地层隧道围岩分区初期支护技术研究 [J]. 粉煤

灰综合利用, 2024, 38 (4): 87-91.

- [2] 章莘苒, 王超, 张宇轩, 等. 软土地层大断面矩形顶管施工诱发既有结构变形特性研究 [J]. 河北工程大学学报 (自然科学版), 2024, 41 (4): 1-8.
- [3] 王卫东. 软土深基坑变形及环境影响分析方法与控制技术 [J]. 岩土工程学报, 2024, 46 (1): 1-25.
- [4] 乔丽平, 李韵迪, 杨超. 某邻地铁超大直径圆环撑软土深基坑变形特性分析 [J]. 岩土工程技术, 2023, 37 (1): 118-126.
- [5] 徐四一, 丁传松. 复杂条件下软土超深基坑变形特性分析 [J]. 岩土工程技术, 2023, 37 (6): 749-753.
- [6] 柯磊, 李红, 刘坤, 等. 软土-基岩条件下地铁车站施工间歇期的结构变形监测与分析 [J]. 岩土工程技术, 2023, 37 (5): 567-573.
- [7] 王虎, 叶胜, 罗天霖, 等. 深厚软土区地表附加荷载对顶管隧道变形的影响分析 [J]. 现代隧道技术, 2024, 61 (增刊 1): 1011-1017.
- [8] 赵鹏飞, 王泽希, 方成全, 等. 双排桩支护下软土深基坑开挖的变形分析与控制 [J]. 现代隧道技术, 2022, 59 (增刊 1): 1087-1094.
- [9] 周傲, 王斌, 李洁涛, 等. 太湖隧道软土基坑长期稳定性分析与变形预测 [J]. 浙江大学学报 (工学版), 2022, 56 (4): 692-701.
- [10] 张志伟, 李忠超, 梁荣柱, 等. 软土地层矩形顶管掘进引起地表隆沉变形分析 [J]. 岩土力学, 2022, 43 (增刊 1): 419-430.
- [11] Kabeta W F. Effects of full displacement pile installation on the stress and deformation state of surrounding soil: review [J]. Archives of Civil Engineering, 2022, 68 (4), 445-466.
- [12] 宋许根. 广州南沙某深厚软土区综合管廊基坑变形破坏分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42 (增刊 1): 3629-3642.
- [13] 王延仓, 李笑芳, 张文胜, 等. 基于高光谱技术公路路基土壤压实度定量反演的研究 [J]. 光谱学与光谱分析, 2023, 43 (7): 2294-2300.
- [14] 寇昊, 何川, 吴枋胤, 等. 考虑走滑断裂活动影响的公路隧道初始地应力场反演分析 [J]. 中国公路学报, 2022, 35 (9): 321-330.
- [15] 王首彬, 莘嘉庆, 周远. 基于预报误差法的边界热流反演方法研究 [J]. 计算机仿真, 2023, 40 (8): 308-312, 434.