

文章编号:1673-9469(2015)03-0019-06

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2015.03.005

河内-海防高速公路深厚软基沉降预测研究

卓文泽¹,周仁²

(1.广东长大海外工程有限公司,广东广州510075;2.中冶集团武汉勘察研究院有限公司,湖北武汉430000)

摘要:基于越南河内-海防高速公路EX-5标段工程实例,在现场监测数据和地勘资料的基础上,借助大型有限元商业软件ABAQUS,模拟了越南深厚软土排水板堆载预压下的土体固结沉降过程;针对数值模拟中模型参数选取困难的问题,将优化算法与有限元软件结合,利用C语言编写了遗传算法-ABAQUS反分析程序,并用实例对此程序的适用性进行了验证。得到如下结论:无论是变形模量还是泊松比,路基恒载期沉降量对两者的敏感度要大于堆载期的敏感度;反演计算的最终沉降与实际沉降比较接近,相对误差基本都在10%以内,这说明编制的ABAQUS-遗传算法固结反分析程序反演出的参数值是有效的、可行的。

关键词:固结沉降;遗传算法;反分析

中图分类号:TU433

文献标识码:A

Forecast study on settlement of soft foundation on Vietnam Hanoi - Hai Phong expressway

ZHUO Wen - ze¹, ZHOU Ren²

(1. Guangdong Grew Up Overseas Engineering Co. Ltd., Guangdong Guangzhou 510075, China; 2. Wuhan Surveying - Geotechnical Research Institute Co., Ltd; Hubei Wuhan 430000, China)

Abstract: In this paper, based on the measured data from section EX - 5 of Vietnam Hanoi - Hai Phong expressway and by using ABAQUS software, the soil consolidation settlement process was simulated by the method of drain with pre - loading. We made the genetic algorithm combine with ABAQUS software and wrote genetic algorithm - ABAQUS back analysis program to solve the shortcomings of the numerical simulation method. Then this paper compiled the genetic algorithm - ABAQUS back analysis program, which was verified by application examples. The comprehensive researches show that: (1). The sensitivity of deformation modulus and poisson's ratio in constant load is greater than the sensitivity of preloading. (2). The final settlement of inversion calculation is close to the actual settlement. The relative error is within 10%. This shows that the parameters of the anti - performance parameters of the ABAQUS - genetic algorithm are effective. In engineering, it is feasible to predict the subsidence by using this method.

Key words: consolidation settlement; Genetic algorithm; back analysis

现代高速公路的快速施工和软土地基的特殊性产生了许多工程问题,突出问题是路堤工后差异沉降大,对高速公路的通行与运营带来了极大的危害^[1]。自 Terzaghi^[2]创立一维固结理论以来,地基沉降预测的研究取得了长足的发展。主要方法为基于现场实测沉降历时曲线进行沉降推算,

这种方法有很多,如双曲线法、浅岗法、指数曲线法、三点法^[3]。此类方法大都属于经验型方法,而且对前期实测数据的要求较高。其它为借助数值方法进行相关预测,现在常用的有有限元法、差分法、加权残值法和边界元法等。

有限元法是当前应用最为广泛的数值方法,

收稿日期:2015-05-15

基金项目:国家自然科学基金项目(51309086);教育部博士点新教师基金项目(20110094120002);中央高校基本科研业务费专项资金资助(2014B04914,2011B07214);广东省交通运输厅科技项目(201302023)

作者简介:卓文泽(1976-),男,广东茂名,高级工程师,研究方向为高速公路施工。

对于非线性问题、非均质材料及各向异性材料都有着很好的适用性,且能解决复杂边界条件和不一样性质下的实际问题^[4]。数值模拟方法中模型参数的获得是否符合实际情况有待商榷,尤其是模型参数的获取,考虑到室内试验中土体不可避免的受到扰动,其准确性就更难保证。基于以上考虑,本文结合越南河内-海防高速公路 EX-5 工程,在现场监测数据和地勘资料的基础上,利用有限元软件 ABAQUS 模拟计算断面的沉降量及沉降过程,随后采用 C 语言编制接口程序,将遗传算法反演的参数植入 ABAQUS 中,以此来更精确地预测沉降。

1 工程地质条件

河内-海防高速公路是越南第一条符合国际 A 级标准的高速公路,全长 105.5 km,设计的时速为 120 km/h;沿线地势平坦,河塘密布,主要为水田耕作区,原地表以下分布着大量淤泥、淤泥质黏土等软弱土,及带植物残留的粘土,地质情况较差;大部分区域钻探 100 m 未见基岩;下卧软粘土 3A、3B 层厚,含水量大,压缩性高,排水固结稳定性差。

实地勘察显示,沿线原地面以下软土层主要为第 3 层淤泥质土层,有 3A 及 3B 两个夹层,其承载力不高,呈流塑或软塑状,压缩性大,是压缩固结的主要对象。各层具体情况如下:黏土 1:黄色、棕黄色、灰色,以黏土为主,层位不稳定,厚度 0.7~5.1 m,干强度中等,工程性能差;黏质粉砂 2:黄色、棕黄色、灰色、黑色,层位稳定,厚度 0.9~2.9 m,饱和,分选较差,磨圆度较好,含较多黏土,

混有腐木,松散;淤泥质土 3A:深灰色、黑色,由近岸海相沉积形成,呈软塑状,主要由粘粒组成,含较多有机质,局部混有较高的砂粒,强度低,工程性能差;淤泥质土 3B:深灰色、黑色,由近岸海相沉积形成,呈流塑状,主要由粘粒组成,含少量黏土和有机质,属高压缩性土,强度很低,工程性能极差;黏土 4:黄色、棕黄色、灰色、黑色,层位不稳定,层厚 0.7~4.1 m 局部混砂粒,含极少量的有机质,呈可塑状,工程性能较差。

根据越南的 22TCN263-2000、AASHTO 和 ASTM 标准,对 EX-5 标段(km 48+000~km 63+300)进行了工程地质勘察,重点进行了现场十字板剪切试验,标准贯入试验(SPT),圆锥触探试验(CPT),以及室内的土、水样试验,土样试验结果见表 1。

2 数值分析及参数敏感性分析

结合越南河内-海防高速公路 EX-5 标段的地层情况,采用 ABAQUS 建立 km 51+800 断面的计算模型,进行有限元模拟分析。

2.1 模型建立及参数等效

km 51+800 断面采用排水板堆载预压法处理软基,堆载高度 4.3 m,坡比为 1:2,路基计算深度取为 13.5 m,计算宽度为路堤底宽的 2 倍。塑料排水板采用正方形的布置,间距为 1.5 m,处理深度为 13.5 m。由于对称性,取路基横断面的一半分析,填土选择 Mohr-Coulomb 模型,地基土采用线性的 D-P 模型,模型尺寸示意如图 1,等效为砂墙后的网格剖分见图 2。

表 1 软土的物理力学参数建议值

Tab. 1 Physical and mechanical parameters of soft soil

土层	$R/\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	e_0	I_p	$C_v/\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	α_v/MPa^{-1}	C_0/kPa	ψ°
1	18.7	0.799	18	5.80×10^{-3}	0.33	32	-
2	18.1	1.075	13	-	0.60	-	22
3A	16.9	1.426	18	1.10×10^{-3}	1.36	17.2	-
3B	17.1	1.179	17	1.70×10^{-3}	1.01	18.4	-
4	18.5	0.915	17	2.00×10^{-3}	0.59	40	-

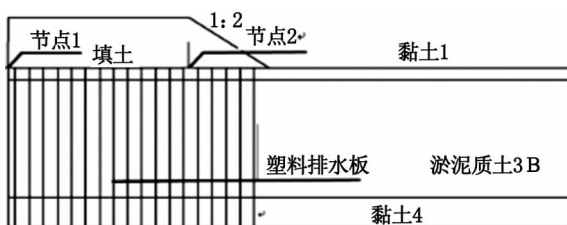


图1 模型示意图

Fig. 1 Scheme of model

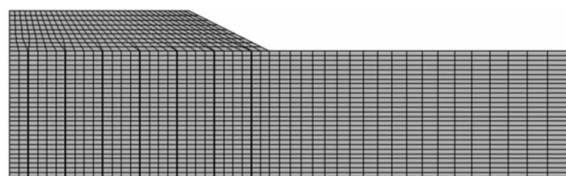


图2 等效成砂墙后的有限元网格剖分图

Fig. 2 Scheme of Finite element mesh after equivalent to sand wall

表2 砂井参数调整

Tab.2 Parameters of sand well adjusted

地层	砂井有效排水 半径/m	砂墙间距 /m	等效砂井 半径/m	泊松比 μ	水平渗透系 数调整系数	竖向渗透系 数调整系数	水平渗透系 数 $K_h/m \cdot d^{-1}$	竖向渗透系 数 $K_v/m \cdot d^{-1}$
黏1	0.846	2	0.025	0.25	0.5	0.8	0.028 8	0.046 0
3B	0.846	2	0.025	0.35	0.55	0.9	0.001 67	0.005 72
黏4	0.846	2	0.025	0.25	0.5	0.8	0.010 9	0.017 4

采用赵维炳^[5]等效方法,涂抹区半径与砂井的半径比值 S 取为 2,沙井间距为 1.5 m,砂墙厚度一半与砂墙涂抹区一半比值 S_p 等于 2,实际砂井地基径向渗透系数与涂抹区的渗透系数的比值 β 取为 7,模型中具体分析参数如表 2 所示。

2.2 线性 D-P 模型中参数敏感性分析

基于上述参数,模拟 km 51 + 800 路堤堆载过程,图 3 给出了节点 1 及节点 2 实测与有限元分析对比图。

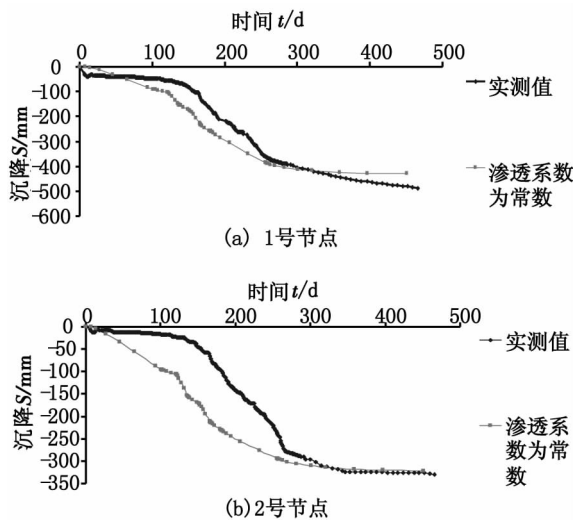


图3 实测沉降量与有限元分析沉降量对比

Fig.3 Comparison of settlement between measured subsidence and finite element analysis

通过与实测沉降曲线的对比,即使采用地勘资料确立相关土层信息,并按照施工过程模拟堆载,实测值与数值分析结果仍呈现较大差距,采用其他模型同样存在上述问题,其主要原因应为模型中参数。因此对模型进行参数敏感性分析,考虑淤泥质土 3B 层厚,压缩性较好,保持其他土层参数不变,主要分析淤泥质土 3B 层参数对沉降曲线的敏感性。

2.2.1 渗透系数

渗透系数作为研究土体固结过程中的一个重要参数,其值的确定主要通过室内渗透试验和固结参数反演,在土体固结过程中,渗透系数随着固

结的发展而不断减小。随着研究的深入,得出土体渗透系数与土体基本性质、土体的孔隙比和固结压力等参数有很大的关系,在其中土体渗透系数与孔隙比的关系探讨取得了相对统一的结论。本文为了研究分析渗透系数变化在土体固结过程中所产生的作用,采用 Taylor^[6] 提出的公式考虑渗透系数变化值。

$$K = K_0 \frac{e - e_0}{0.5e_0} \quad (1)$$

式中 e_0 - 初始孔隙比; K_0 - 初始渗透系数。

km51 + 800 断面实测值及渗透参数变化及未变化条件下有限元分析结果如图 4 所示。

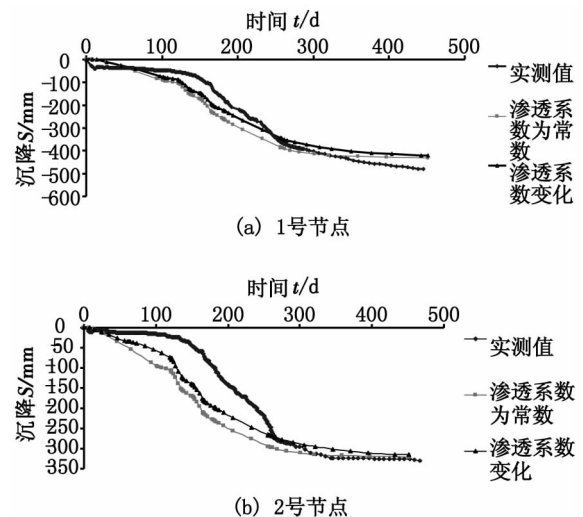


图4 实测沉降量与有限元分析沉降量对比

Fig.4 Comparison of settlement between measured subsidence and finite element analysis

由图 4 可见:渗透系数的改变对最终沉降量的影响不明显,影响土体的固结速率,表现为降低了计算沉降曲线的收敛速度;渗透系数变化情况下的计算沉降曲线与实测值曲线吻合的较好,这也证明了在数值模拟中,设置渗透系数变化更加的符合实际情况。

2.2.2 变形模量 E

土体的变形模量是指无侧限条件下,土的竖向附加应力增量与相应的应变增量之比值,通过现场压板荷载试验获得,本文分别取不同弹性模量下堆载期 136、255 天和恒载期 358、451 天的沉

降数据,1号节点沉降过程曲线如图5。

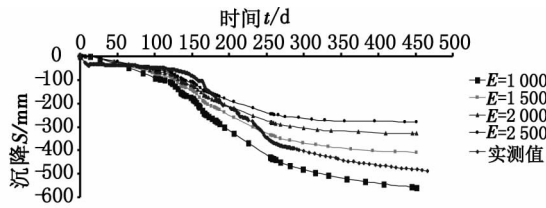


图5 不同变形模量下1号节点的沉降曲线与实测曲线对比

Fig.5 Comparison of settlement curves and measured curves of 1 nodes under different deformation modulus

由图5可以看出:变形模量对沉降量及沉降曲线的影响较大,变形模量越大,土体沉降量越小;与实测值进行比较分析,实测值曲线大致在 $E = 1 \text{ MPa}$ 沉降曲线和 $E = 2 \text{ MPa}$ 沉降曲线之间,可以初步确定淤泥质土3B的变形模量范围为 $1 \sim 2 \text{ MPa}$,与实际试验值存在一定的偏差。

2.2.3 泊松比

土体的泊松比是反映土体弹性变形的重要参数。本文取 $\mu = 0.3, 0.325, 0.35, 0.375$ 四个不同的值分析泊松比对沉降量的影响,1号节点在堆载期136、255天和恒载期358、451天的沉降计算曲线如图6所示。

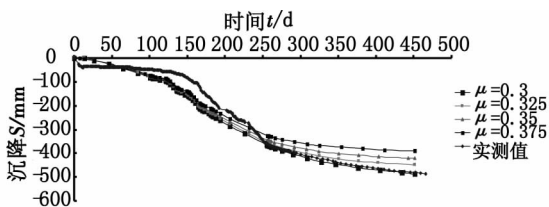


图6 不同泊松比下1号节点的沉降曲线与实测曲线对比

Fig.6 Comparison of settlement curves of 1 nodes with Different Poisson's ratio under different poisson's ratio

由图6可见:随着泊松比的增大,沉降量逐渐减小,相对于变形模量来说,沉降量及沉降曲线对于泊松比的敏感度较小。如 $t = 451 \text{ d}$,泊松比从 0.3 变大到 0.325 时,沉降量减少 35 mm ;而泊松比从 0.35 变大到 0.375 时,沉降量减少了 32 mm 。对于泊松比在相同的范围内变化,路基恒载期时沉降量对变形模量的敏感度要大于堆载期间的敏感度,如变形模量从 0.3 增加到 0.325 时,恒载期 $t = 451 \text{ d}$,沉降量减少了 35 mm ,而堆载期 $t = 136 \text{ d}$,沉降量只减少了 4 mm 。

3 参数反分析实现

遗传算法的基本理论,建立 ABAQUS - 遗传算法的固结反分析程序。反分析方法是利用工程中的实测值(如压力、孔压、位移),通过反演模型,

确定岩土介质的力学参数。其最终目的是建立一个更接近现场实测结果的理想预测模型,便于正确的地反映和预测岩土体的某些力学行为。

3.1 反分析目标函数的确定

一般的在正反分析的过程中,目标函数取为实测值(如位移、孔压、应力等)与相应的计算值两者相减的平方和,即如下式:

$$J = \sum_i^m (u_i - u_i^*)^2 \rightarrow \min \quad (2)$$

式中: m - 实测数据总数; u_i^* - 第 i 点实测数据,例如应力、孔压水压力等; u_i - 相应的计算值, u_i 是计算参数 $\{x\}$ 的函数,随着 $\{x\}$ 的不同值而变化,其中 n 是需要通过反分析确定的参数总数,这样目标函数 J 为参数 $\{x\}$ 的函数,反分析转化为求一目标函数的极小值问题。

基于越南河内 - 海防高速公路 EX - 5 标段沉降的实际监测点布置, $\text{km}51 + 800$ 断面上布置 3 个沉降监测点,布置位置如图 7。

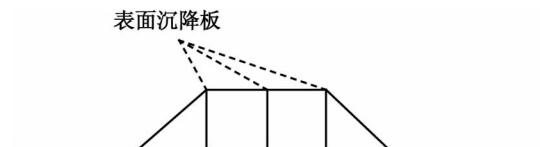


图7 Km51+800表面沉降监测点布置情况

Fig.7 Layout of settlement monitoring points at Km51+800

考虑到渗透系数对最终固结沉降量影响不大,对沉降过程曲线的影响较大,本文取中间和右边两个观测点进行对比分析,分别取每个观测点 207 d 和 451 d 的实测值与数值计算值进行对比分析,目标函数如下:

$$J = (u_{11} - u_{11}^*)^2 + (u_{12} - u_{12}^*)^2 + (u_{21} - u_{21}^*)^2 + (u_{22} - u_{22}^*)^2 \rightarrow \min \quad (3)$$

式中: $u_{11}, u_{11}^*, u_{12}, u_{12}^*$ 为中间观测点 207、451 d 的数值计算值与实测值; $u_{21}, u_{21}^*, u_{22}, u_{22}^*$ 为右边观测点 207、451 天数值计算值与实测值。

3.2 反演参数的确定及范围

通过软土地基沉降对线性 D - P 模型参数的敏感性分析表明,参数 E 对沉降的敏感度相对较高,而其他参数对沉降的敏感性相对较小;渗透系数 K 对地基最终沉降量的影响不大,但对于沉降过程曲线的影响不可忽略; $\text{km}51 + 800$ 断面地基土中,淤泥质土 3B 的固结是主要的。综上几个因素,本文选取淤泥质土 3B 的 E, K 参数进行反演分析,在反演过程中考虑渗透系数 K 随孔隙比而变

化,给出该土层不同孔隙比下水平渗透系数和竖向渗透系数的取值范围。

选择合适的反演参数的可行范围,可以加速反演速度,避免解的不唯一性,及出现不合理的结果。在本文的反演中,根据越南河内-海防高速公路 EX-5 标段的地质勘察资料, E 参数的可行范围如下,对于渗透系数则给出了孔隙比 $e = 1.0$ 、 1.172 、 1.344 下的取值范围。

$$\begin{cases} 1000 < E < 2500 \\ 2 \times 10^{-4} < K_h < 7 \times 10^{-4}, 1 \times 10^{-3} < K_v < 2.1 \times 10^{-3} & e = 1.000 \\ 8 \times 10^{-4} < K_h < 1.3 \times 10^{-3}, 2.5 \times 10^{-3} < K_v < 4 \times 10^{-3} & e = 1.172 \\ 1.4 \times 10^{-3} < K_h < 1.9 \times 10^{-3}, 5 \times 10^{-3} < K_v < 6.5 \times 10^{-3} & e = 1.344 \end{cases}$$

3.3 反分析基本思路

根据遗传算法的基本理念,按照图 8 所示流程编制了与 ABAQUS-反分析程序。

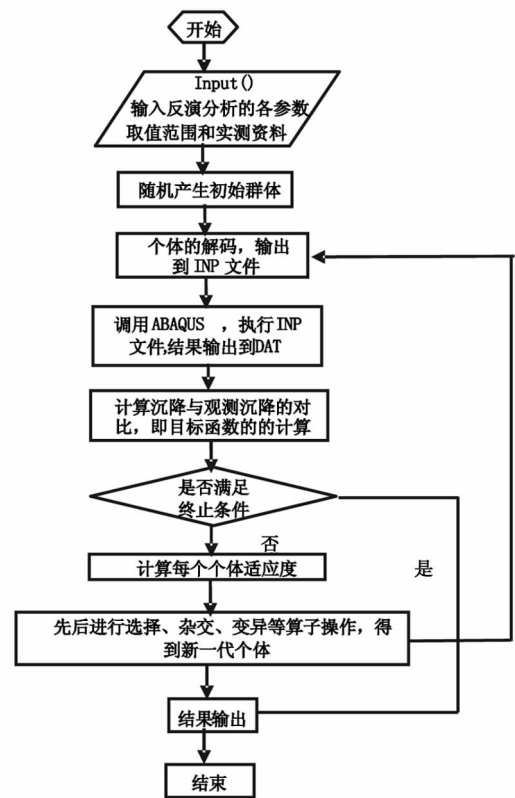


图8 程序流程图

Fig. 8 Program flow chart

表 3 参数取值范围

Tab. 3 Range of parameters

土层	厚度/m	反演参数					
		变形模量/kPa		水平渗透系数/ $m \cdot d^{-1}$		竖向渗透系数/ $m \cdot d^{-1}$	
		下限	上限	下限	上限	下限	上限
淤泥质土 3B	10	1 000	2 500	2×10^{-4}	7×10^{-4}	1×10^{-3}	21×10^{-3}
				8×10^{-4}	13×10^{-3}	25×10^{-3}	4×10^{-3}
				14×10^{-3}	1.9×10^{-3}	5×10^{-3}	65×10^{-3}

表 4 遗传算法参数及实测信息

Tab. 4 Genetic algorithm parameters and actual measurement information

遗传算法				实测数据			
种群大小	最大代数	交叉率	变异率	中间沉降板		右边沉降板	
20	30	0.65	0.05	207 d	451 d	207 d	451 d
				368 mm	481 mm	255 mm	326 mm

表 5 km51+800 地基参数反演结果

Tab. 5 The inversion results of km51+800 soil parameters

土层	变形模量 E /kPa	水平渗透系数/ $m \cdot d^{-1}$	竖向渗透系数/ $m \cdot d^{-1}$
淤泥质土 3B	1 353	6×10^{-4}	2×10^{-3}
		1.2×10^{-3}	3.8×10^{-3}
		1.8×10^{-3}	6.3×10^{-3}

表6 反演计算沉降值与实际沉降比较

Tab.6 The inversion calculation of settlement value and actual settlement

节点	反演计算值与实际沉降比较				相对误差/%	
	反演计算值/mm		实际沉降/mm		260 d	451 d
	260 d	451 d	260 d	451 d		
1	-376	-448	-368	-481	2.2	6.86
2	-293	-335	-265	-326	10.5	2.76

3.4 结果与分析

本文采用越南河内-海防高速公路 EX-5 标段 km51+800 断面进行正反分析,正分析采用所建的 ABAQUS 模型,待反演参数 E 、 K 范围如表 3。遗传算法种群大小、最大代数、个体交叉概率、个体变异概率和实测反馈信息则如表 4 所示。

采用本文编制的基于遗传算法的地基固结沉降反分析程序,经过 30 代的优化计算,最优个体产生在 30 代。最优个体的适应度为 510.62,对应的 E 、 K 值如表 5。

为了验证参数反演结果的可靠性,使用反演的最优变形模量和渗透系数,用 ABAQUS 进行正分析预测 km51+800 断面的最终沉降,并与实测数据进行对比,对比结果如表 6。

由表 6 可以看出,节点 1 和节点 2 反演计算的最终沉降与实际沉降比较接近,相对误差基本都在 10% 以内,这说明本文编制的 ABAQUS-遗传算法固结反分析程序反演出的参数值是有效的,在工程中,运用这种方法进行沉降预测是可行的。

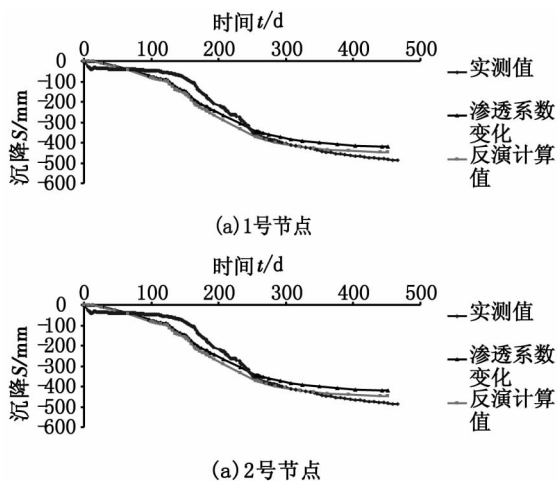


图9 节点实测沉降量与反演计算沉降量对比

Fig.9 Comparison between measured subsidence and inversion calculation of node

由图 9 可以得到:在沉降前期,反演计算值曲

线与模型计算值曲线基本重合,但是到了沉降后期,反演计算值曲线与实测曲线的吻合度更高,对于 1 号节点和 2 号节点,其反演计算值曲线明显更加贴近实测曲线,与实测的最终沉降量差距也更小,这说明反演得出的变形模量、渗透系数值更加接近土层的实际情况。

4 结论

1) 渗透系数变化情况下的计算沉降曲线与实测值曲线吻合的较好;敏感度分析表明:变形模量 $E >$ 泊松比 $\mu >$ 摩擦角 $\beta >$ 三轴拉伸和三轴压缩的屈服应力比值 k ,无论是变形模量还是泊松比,路基恒载期沉降量对两者的敏感度要大于堆载期的敏感度。

2) 研制了遗传算法-ABAQUS 反分析程序,实例证明反演计算的最终沉降与实际沉降比较接近,相对误差基本都在 10% 以内,这说明本文编制反分析程序反演出的参数值是有效的、可行的。

参考文献:

- [1] 卓文泽,周 斌. 河内-海防公路软基渗透性及差异沉降研究[J]. 河北工程大学学报:自然科学版,2015,32(1): 14-18.
- [2] TERZAGHI K. Erdbaumechanik and bodenphysikalischer grundlage[M]. Lpz. Deuticke,1925.
- [3] 马 杰. 越南河内-海防高速公路软基沉降预测研究[D]. 南京:河海大学,2013.
- [4] 钱家欢,殷宗泽. 土工原理与计算[M]. 2 版. 北京:中国水利水电出版社,1996.
- [5] 余志顽,赵维炳,顾吉. 粘弹-粘塑性软基排水预压的三维有限元分析[J]. 河海大学学报,1995,23(5): 1-7.
- [6] 邓永锋,刘松玉,章定文,等. 几种孔隙比与渗透系数关系的对比[J]. 西北地震学报,2011,33(Z): 64-66.

(责任编辑 王利君)