

高速公路拼接段地基参数反分析方法及其应用

苏 超¹,徐泽中²,吴 钰²

(1. 河海大学水利水电工程学院,江苏 南京 210098;2. 河海大学交通学院,江苏 南京 210098)

摘要 针对高速公路拼接段新建路基施工后,以边载形式引起已建公路产生的附加沉降的不良影响进行研究.应用土体固结非线性有限元法,利用原高速公路的监测沉降记录,对拼接地区的地基参数进行反馈分析,以确定能综合反映当地地基状况的参数.方法在锡澄与沪宁高速公路拼接段上应用,经一年多的现场监测表明取得了良好的效果.

关键词 地基参数 高速公路 拼接段 反分析

中图分类号 U416 **文献标识码** A **文章编号** 1000-1980(2000)06-0038-05

软基上高速公路拼接段的设计目前还没有规范的分析方法,我们需要在已有较成熟的计算方法中寻找能够解决问题的新途径.拼接段与普通高速公路的区别在于新老公路的相互不利影响,新公路中的问题可以在施工中加以解决,但新公路作为边载对老公路所产生的不均匀沉降,可能会造成公路表面破坏,影响交通正常运行.因此,在拼接设计时对这些不良影响有一个相对准确的定量分析方法是非常必要的.在理论分析的基础上寻找经济、实用的工程加固措施,以确保在新公路拼接过程中使老公路的地基不均匀沉降控制在可以接受的范围之内.目前计算软基沉降最有效的方法是比奥固结非线性有限单元法等^[1,2],它可以反映地下水渗流、土体侧向变形和时间效应影响.对路基沉降定量分析的另一个主要因素是地基参数的可靠性,参数误差过大势必影响我们作出正确的结论.以往对金属材料、混凝土等相对均质材料参数方面的研究工作做得比较多,也容易得到理想的研究成果,但对天然的软土地基,由于离散性和不均匀性,参数的室内实验又受到尺寸效应的影响,很难得到理想的计算参数.既然传统的室内实验方法对解决实际工程问题存在一定的局限性,不能在宏观上完整地反映特定地点和特定条件下的力学性质,我们必须采取其它更好的方法取而代之,本文利用现场实测的第一手资料,采用参数反分析的方法来确定地基参数,以综合反映地基的基本特性.通过计算分析选择沉降隔离墙设计施工方案,现场施工和运行过程的监测数据表明,设计是成功的.

1 沉降计算方法

平面应变问题的二维比奥固结基本方程为

$$\left. \begin{aligned} -G \nabla^2 u - \frac{G}{1-2\mu} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \frac{\partial p}{\partial x} &= 0 \\ -G \nabla^2 w - \frac{G}{1-2\mu} \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \frac{\partial p}{\partial y} &= g\rho \\ \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) &= \frac{k}{g\rho_w} \nabla^2 p \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: u, w ——水平向和铅直向位移; p ——孔隙水压力; x, y ——单元节点坐标值; ∇^2 ——拉普拉斯算子; ρ, ρ_w ——土和水的密度; k ——渗透系数; G, μ ——土的剪切模量和泊松比; g ——重力加速度.

土体的切线模量采用邓肯模型,其应力应变关系的切线模量

$$E = \left[1 - \frac{R_f(1 - \sin\varphi)(\sigma_1 - \sigma_3)}{2c \cdot \cos\varphi + 2\sigma_3 \sin\varphi} \right]^2 K p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^n \quad (2)$$

式中: c, φ ——有效应力强度指标; σ_1, σ_3 ——最大、最小主应力; R_f ——破坏系数; K, n ——模量参数, p_a ——大气压力.

切线泊松比

$$\mu = \frac{G - F \lg(\frac{\sigma_3}{p_a})}{(1 - A)^2} \tag{3}$$

其中

$$A = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3) D}{K \cdot p_a (\frac{\sigma_3}{p_a})^n [1 - \frac{R_f(1 - \sin \varphi)(\sigma_1 - \sigma_3)}{2c \cdot \cos \varphi + 2\sigma_3 \sin \varphi}]} \tag{4}$$

卸载后的回弹模量

$$E_{ur} = K_{ur} p_a (\frac{\sigma_3}{p_a})^{n_{ur}} \tag{5}$$

式中 K_{ur} 和 n_{ur} 为回弹模量参数。
式(1)对二维空间和时间离散后,可得在时间 t 以节点位移增量和孔隙水压力为未知量的有限元支配方程。

2 地基参数反分析方法

- 进行反分析的方法很多,直接反分析法是其中有效、稳定的方法之一,其具体实施步骤如下：
- a. 建立一个描述实际岩土工程结构问题或系统的数学模型,其中含有一组待定的材料性质参量,用列阵 P 表示,同时对作用于这个系统的外部环境进行简化和数学描述。
 - b. 现场量测系统在上述外部条件作用下产生的响应。
 - c. 用理论模型来计算分析这个响应,它将是待定参数的函数,在岩土工程中,一般是非线性和非解析的。
 - d. 利用理论模型计算响应和现场实测响应的距离,建立目标函数 $J(P)$ 及确定参数的约束条件。
 - e. 选择优化策略,使 $J(P)$ 以最高效率、稳定、唯一地收敛于最小值 $J(P^*)$

$$J(P^*) = \min J(P)$$

其中, P^* 是最终反分析结果。这样,直接反分析法问题就转化为一个数学模型的优化问题。

数学上的优化方法很多,常见的有 单纯形法、Rosenbrok 法、拟梯度法、Powell 法及复合形法等。由于复合形法可以在全部可行域内寻优,性能稳定、可靠,编程方便,对解决工程问题有较强的适应性,本文分析计算采用复合形法。复形法的基本思想是,在 N 维受非线性约束的设计空间内,由 $K > N + 1$ 个顶点(当 N 较小时,可取 $K = 2N$ 或 $K = N \times N$,当 N 较大时可取 $K = N + 2$)构成多面体,称为复形。然后对复形的各顶点目标函数值逐一进行比较,不断地丢掉函数值最劣的顶点,替换为满足约束条件且函数值有所改善的新顶点,如此反复,逐步逼近最优为止。

3 工程应用

锡澄高速公路北起江阴长江公路大桥,经江阴和锡山市,南于锡山市东北塘钱巷的互通式立交工程(N—15 标段)与沪宁高速公路拼接后相互贯通,全长 34.89 km。N—15 标段互通式立交工程位于沪宁高速公路 NK97 + 510 m ~ NK100 + 145 m,由主线和 13 个匝道组成,长 9.6 km(见图 1)。根据拼接路面间的距离,拼接形式分为直接拼接式和分离拼接式,本文研究的对象为分离式拼接路段,其路幅宽度为 :12.5 m + 26.0 m + 8.5 m,位置在 K99 + 80 m 附近。

拼接段地基上部为灰黄色亚粘土,呈可塑至软塑状;第二层为淤泥质亚粘土,呈软塑至流塑状;第三层为灰黄色亚粘土,呈可塑至硬塑状;第四层为灰色、灰黑色粉砂,饱和,呈中密至稍密状;第五层为灰黄色亚粘土,呈可塑至硬塑状,其地基计算参数的室内实验结果见表 1。

表 1 地基参数室内实验值

Table 1 Laboratory experimental values of foundation parameters

土层	深度 h/m	K	n	c/kPa	$\varphi/(\text{^\circ})$	R_f	G	F	D
1	0.0~4.0	60	0.82	18.0	24.0	0.86	0.23	0.00	1.9
2	4.0~8.0	180	0.46	0.0	30.0	0.62	0.25	0.00	1.3
3	8.0~14.0	60	0.52	20.0	27.0	0.80	0.26	0.05	1.7
4	14.0~24.0	84	0.74	54.0	30.0	0.81	0.21	0.00	2.5
5	24.0~40.0	270	0.43	23.4	25.4	0.87	0.30	0.00	4.0

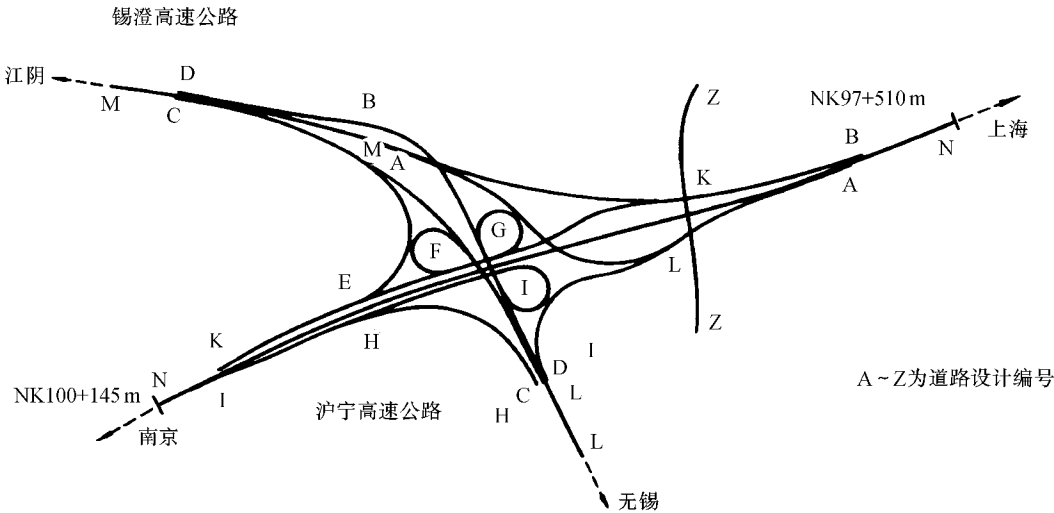


图 1 N—15 标段互通式立交工程概况

Fig.1 Overpassing project at N—15 section

施工过程概化如下 路基分 4 层,每层厚度为路堤高度的 1/4,每层施工 15 d,预压 15 d,第 4 层结束后再预压 60 d 拼接段路面分 3 层,每层施工 20 d,预压 20 d,宁沪高速公路 1991 年 12 月完工,以完工时为起始时间点,其实测沉降值见表 2.

表 2 宁沪高速公路 K99 + 80 m 附近实测沉降值

Table 2 Settlement values near K99 + 80 m of Shanghai-Nanjing highway

时间/d	0	100	200	300	500	700	1000	1500	2400
宁沪路中心沉降/cm	43.15	44.03	44.14	44.23	44.39	44.57	44.85	45.24	45.73
宁沪路路肩相对中心沉降/cm	-0.35	-1.03	-1.04	-1.08	-1.15	-1.21	-1.30	-1.43	-1.60

由于受到尺度效应及实验环境的影响,应用实验参数计算与实测结果有一定的偏差,为更好地解决分离式拼接段的设计计算问题,我们利用宁沪高速公路已有的实测沉降资料(表 2),采用直接反分析方法对地基参数进行反馈分析. 设宁沪路 K99 + 80 m 路面中心点和路肩沉降分别为 w_{1i}^* , w_{2i}^* , $i = 1, 2, \cdots, 9$ 表示表 1 中的 9 个观测时间点,相应的两点沉降计算值分别为 w_{1i} , w_{2i} , 则参数反馈的目标函数为

$$J(P) = \sum \{ [w_{1i}(P) - w_{1i}^*]^2 + [w_{2i}(P) - w_{2i}^*]^2 \} \tag{6}$$

其中 P 包含反馈的未知参数,由于问题本身的非线性特性和实测数据量的限制,决定了我们不可能反馈出 5 层地基的计算参数,再因为参数间的相互影响会导致反馈结果不唯一,因此固定部分变化不大的参数,反馈 K, φ 两个计算参数,以得到一组综合计算参数,计算初值和参数约束范围及最终反馈参数见表 3.

表 3 计算初值和参数约束范围及最终反馈参数

Table 3 Computed initial values, constraining scope and final feedback values of parameters

	K	n	c/kPa	$\varphi/(\text{^\circ})$	R_f	G	F	D	$k_x/(10^{-3}\text{m}\cdot\text{d}^{-1})$	$k_y/(10^{-3}\text{m}\cdot\text{d}^{-1})$
计算初值	120.0	0.58	0.0	25.0	0.69	0.23	0.0	3.0	4.3	4.3
参数约束范围	40.0 ~ 200.0			0.0 ~ 50.0						
最终反馈参数	145.0	0.58	0.0	37.7	0.69	0.23	0.0	3.0	4.3	4.3

通过多方论证比较,对分离式拼接段我们采用定喷隔离墙处理地基^[3],其结构形式见图 2.

拼接段于 1997 年 7 月开工,利用最终反馈参数计算模拟 NK99 + 80 m 处的路面沉降见图 3,与实测路面沉降的比较见表 4. 计算可以反映隔离墙的作用和沉降的大致规律.

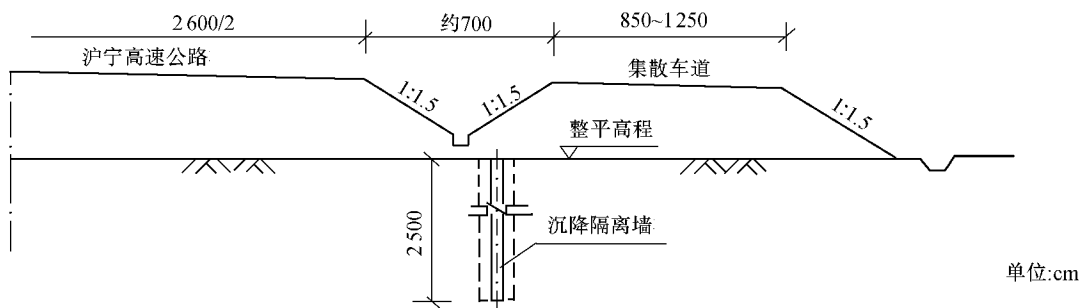


图 2 直接拼接段地基处理方案

Fig.2 Foundation treatment scheme for direct connection section

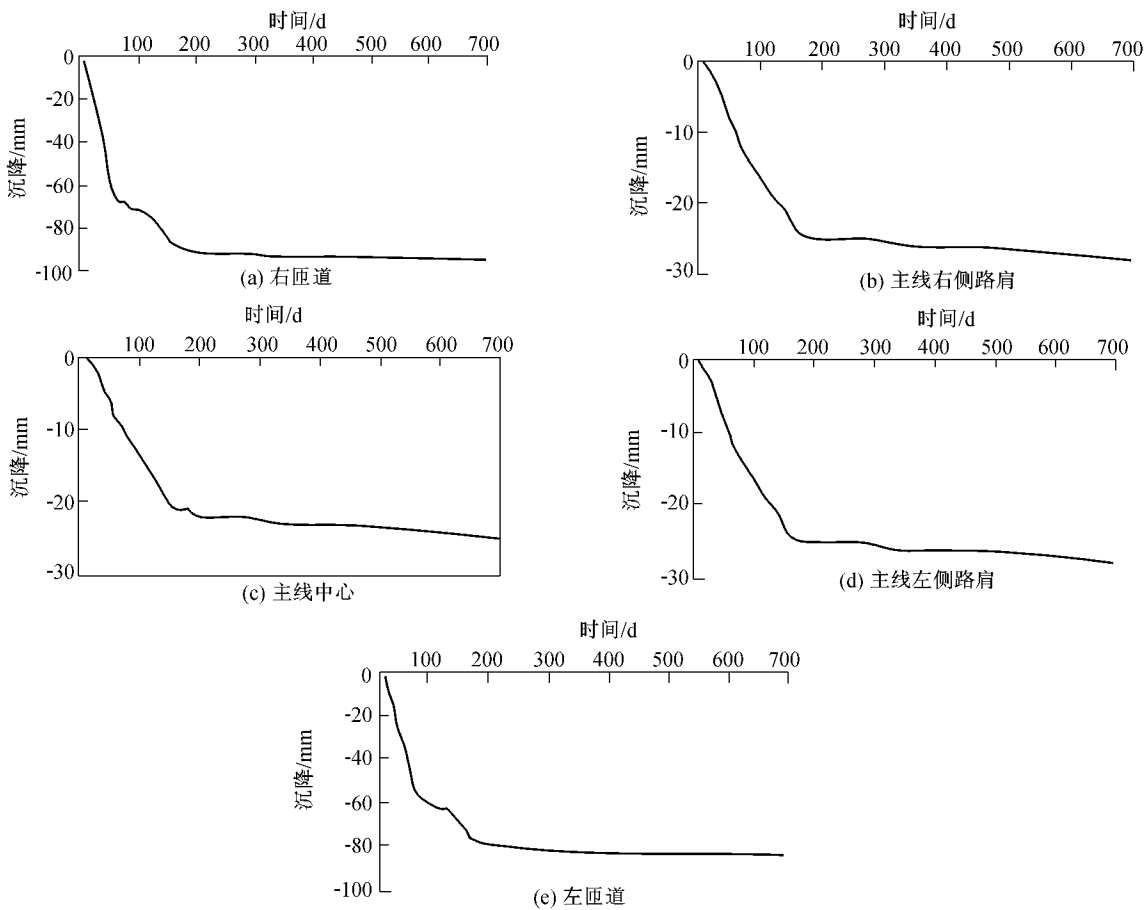


图 3 NK99 + 80 m 处路面计算沉降

Fig.3 Computed settlement at NK99 + 80 m

表 4 NK99 + 80 m 附近计算沉降值和实测沉降对比

Table.4 Comparison of the computed and observed settlement values near NK99 + 80 m

位置		时间/d	左匝道中	主线左侧	主线中心	主线右侧	右匝道中
实测值/mm	NK99 + 045	348					117
	NK99 + 045	414	65				
	NK99 + 045	777		25	25	34	
	NK99 + 139	414	66				
	NK99 + 139	498					112
	NK99 + 139	746			23		
计算值/mm	NK99 + 139	777		26		31	
	NK99 + 080	414	81.6				
	NK99 + 080	445					93.2
	NK99 + 080	777		28.4	25.5	28.6	

4 结 论

采用现场实测沉降资料进行地基参数反馈分析,利用土体固结非线性有限元方法对高速公路拼接段地基处理技术进行了数值模拟,计算分析表明:直接反分析方法可以有效地反演地基参数,从而为解决一直困扰工程技术人员计算参数问题提供一个新途径.该方法的基础数据来自工程现场实测信息,所得结果更具有实用性.需要指出的是由于施工现场影响地基沉降的因素很多,及地质分布的不均匀性,这里反演的参数并不是严格意义上的力学参数,它是各种因素的综合体现.另外,土体的本构关系是非线性的,反演参数的唯一性没有得到充分的证明,在理论上仍有必要进行进一步的研究,但对高速公路拼接段这类工程问题而言,这种计算分析方法完全可以满足工程设计需要.

参考文献:

- [1] 殷宗泽.土坝非线性有限元计算程序[A].见:姜弘道等编.水工结构工程与岩土工程的现代计算方法及程序[M].南京:河海大学出版社,1992.266~275.
- [2] 钱家欢,殷宗泽.土工原理与计算(第2版)[M].北京:中国水利电力出版社,1996.213~228.
- [3] 苏超,徐泽中.锡澄与沪宁高速公路拼接段地基处理设计与分析方法[J].河海大学学报,1999,27(增刊):121~125.

Back Analysis Method of Foundation Parameters for Connection Section of Highways and Its Application

SU Chao¹, XU Ze-zhong², WU Yu²

- (1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098, China;
2. College of Communications, Hohai Univ., Nanjing 210098, China)

Abstract: The unfavorable effect of the new-built foundation of the connection section is studied. By use of the observed settlement of the existing highway, feedback analysis of the foundation parameters at the connection section is performed with soil consolidation finite element method to determine the parameters reflecting the overall situation of the foundation. The method is applied to the connection section between the Xicheng and Shanghai-Nanjing highways. Over one year field monitoring shows that the method is satisfactory.

Key words: foundation; parameters; highway; connection section; back analysis