

文章编号: 1002-0268(2003)06-0020-05

关于塑料排水板的真空联合堆载预压软基处理的位移反分析研究

沈才华¹, 宋少华²

(1. 河海大学交通与海洋工程学院, 江苏 南京 210098; 2 苏州市高速公路指挥部, 江苏 苏州 215007)

摘要:以分层总和法结合改进的高木俊介方法作为实际施工时土体分级加载计算的正分析数学模型,用最小二乘法建立位移目标函数,通过单纯形法结合等参变换的优化处理方法,对真空联合堆载预压软基加固处理结合实例进行位移反分析研究。一方面对真空联合堆载预压的原理作进一步的分析研究,另一方面结合实际工程对塑料排水板+真空联合堆载预压的效果进行分析,以便进一步改进和更好地指导以后的现场施工。
关键词:真空联合堆载预压; 分层总和法; 位移反分析; 单纯形法; 最小二乘法
中图分类号: U416 **文献标识码:** A

Study on the Displacement Back-analysis of the Vaccum-heaped Load Combining Pre-compression

SHEN Cai-hua¹, SONG Shao-hua²

(1. College of Taffic and Ocean Engineering Hohai University, Jiangsu Nanjing 210096 China;
2 Sujiahang Department for Expressways Construction, Jiangsu Suzhou 215007, China)

Abstract: This article deals with the displacement back-analysis for the Vaccum-Heaped Load Combining Pre-compression (VHLCP), which employs the positive-analysis model based on the layerwise summation method combined with the modified GAOMUJUNJIE-Method, the displacement objective function constructed by the least square fomulas, and the optimizing method of simplex. The twofold analysis of further study of the Vaccum-Heaped Load Combining Pre-compression theory on one hand and of its actual effects of the living example on the other hand will improve and better direct the field work.
Key words: The vacuum-heaped Load combining pre-compression; Layerwise summation method; Displacement back-analysis; Simplex method; The least square fomulas

0 序言

我国从 1980 年起开展了真空预压法的研究, 后来随着进一步的改进, 加固效果大大提高, 逐渐推广使用, 目前随着高速公路建设的发展, 真空联合堆载预压在高速公路软基处理上取得了巨大成功, 积累了很多实际施工的经验, 但是由于土体结构较为复杂, 难以准确确定土体本身的力学参数, 而且目前真空联合堆载预压法的理论研究还不完善, 所以, 现场实际观测结果往往与理论计算并不吻合; 为了充分利用已有施工的

经验对土体作进一步的研究, 更好地指导、改进以后的施工; 因此有必要对土体利用实测的数据进行反馈土层的力学参数研究, 并在实际施工过程中利用这些参数(即等价于利用实测的数据)来计算以后土体的变形规律, 重新评估原来的设计, 即现在广泛采用的现场动态研究法来控制施工进度, 实际表明这种利用位移反分析的方法能有效地保证工程质量。
目前利用位移反分析的优化方法很多, 如鲍威尔法、罚函数法、非线性阻尼二乘法和 Rosenbrok 法等, 但以往只是对一般堆载情况进行分析, 对真空联合堆载

预压的分析很少,本文利用位移反分析对真空联合堆载预压进行分析研究。

1 位移反分析的简介

位移反分析就是利用位移直接法反演地基参数。它首先要确定反演参数,并根据参数的特点确定合理的定解条件,然后在正分析数学模型的基础上,根据已知条件构造目标函数,再利用各种数学计算方法以求得目标函数的最小值来反演参数。通过分析比较,单纯形法作为一种有效的直接法,它不必求函数的导数,优化迭代比较稳定;并且在有约束条件下,结合参数变换法,在实际运用中效果较好。

1.1 单纯形法简介

所谓单纯形是指由 n 维空间中 $n+1$ 个点的集合所形成的几何图形。而这 $n+1$ 个点叫做单纯形的定点,若单纯形中任意 2 个定点的距离都相等,则称这种单纯形为正规单纯形^[1]。利用单纯形法实现最优化的基本思想是:从 n 维空间中一个任意形状的初始单纯形出发,先计算其 $n+1$ 个定点上函数的值,并确定其函数值中最大、次大和最小的点,然后通过反射、扩张、压缩等操作求出一个新的较好点,并用它来取代最大函数点,构成新的单纯形;或者向最小函数点收缩形成新的单纯形。如此反复迭代,单纯形不断更新,逐步向最优优点移动,围绕最优优点收缩,从而逐步逼近极小点。单纯形法的稳定性较好,它不要求目标函数具有连续性,也不必求目标函数的导数,所以计算比较方便,适用范围较广。

在处理有约束问题时,本文利用参数变换法,将原有约束参数作变换使之成为无约束参数,但目标函数不变,这样就确保了收敛稳定。

1.2 位移反演法参数的确定

由于土层本身的复杂性以及土工试验本身的局限性,在实际工程沉降计算中最常用的方法还是分层总和法。计算中如果采用天然土层的分布,由于参数太多,在反演过程中会造成计算时间过长,并有可能造成不收敛的情况。所以本文采用等代地基的方法,即取土层的平均参数进行计算。根据大量实际经验,在计算的过程中采用 e 、 α_c 和 α_v 3 个参数进行反演计算。荷载分级根据实际情况确定,计算深度按水工规范确定。目标函数的确定见式(1),目标函数采用最小二乘法准则的位移误差函数加以构造。

1.3 正分析数学模型的建立

现在常用的有两种正分析数学模型:一种是利用固结度和压缩度概念结合改进高木俊介公式^[3]的实用

方法,另一种模型是建立在比奥固结理论基础上的非线性有限元方法^[3]。由于采用有限元方法比较繁琐,而且所需土工参数较多,实际工程中这些参数又很难准确获得,所以这种方法不利于在实际施工中的操作,第一种方法更具有实用性。本文将主要利用第一种方法对实际施工进行分析。采用真空联合堆载与一般堆载在作用机理有一定的区别,下面为真空预压主要的加固机理。

真空预压法实际上是在不改变土体中总应力的情况下,降低土中的孔隙水压力,使土中的有效应力得以增加,其受力分析见图1,从而使地基土体强度及承载力得到提高,达到加固地基的目的。

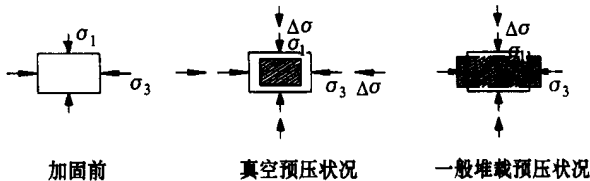


图1 真空预压与堆载预压的受力分析

在抽真空前,由于密封膜内外都受到大气压力的作用,土体孔隙中气体与地下水面上都是处于相同的大气状态下;抽气后,密封膜下砂垫层中的气体首先被抽出,其压力逐渐下降 p_a 至 p_v ,使密封膜内外形成一个压差 $p_a - p_v$,使密封膜紧贴于砂垫层上,这个压差称之为真空度。砂垫层中形成的真空度,通过塑板逐渐向下延伸,同时真空度又由塑板向其四周扩展,引起土中孔隙水压力降低,形成负的超静孔隙水压力;由于真空度自砂垫层由竖向排水体向土体逐渐衰减,从而形成了孔隙水压力差,使土体内孔隙水发生由高水压向低水压的渗流,孔隙水由竖向排水通道汇集至地表砂垫层,由真空泵抽出。所以塑料排水板在真空联合堆载预压中起很重要的作用,现在在计算中主要是将塑料排水板的作用简化成沙井等价计算^[4]。

2 联合堆载预压的位移反分析实例分析

2.1 工程概况

本例为某段高速公路真空联合堆载预压软基加固处理现场动态观测研究成果之一。

某段高速公路,原设计为中桥,5跨20m,全长100m,后改为路堤填筑。原设计单位经较长时间验算提出反压护道法,考虑在反压护道外再打设10m宽的粉喷桩,但安全系数仍偏小,费用很高。考虑到目前真空预压已有很多成功经验,因此提出采用真空预压作为比选方案之一。经河海大学对该段进行地质补勘后进行真空预压法设计,计算当路基的固结度达95%

时,在负压的保护下稳定性满足规范要求,讨论确认所设计方案可行,且比其他方案经济,施工期也较短。原始平均地质参数见表 1,现场动态观测沉降曲线见图 2。

原始平均地质参数					
表 1					
层厚 H(m)	γ' (kN/m ³)	e_0	I_p	c_v (10 ⁻³ cm ² /s)	α_v (MPa ⁻¹)
4	8.3	1.05	15.8	2.07	0.88
1	8.4	1.04	16.2	1.48	1.03
3	8	1.11	16.1	1.27	0.99
3	7.2	1.39	19.7	7.70	0.92
4	8.8	0.91	12	6.68	0.23
10	10	0.68	13.8	4.81	0.2
5	9.4	0.766	14	5.18	0.158
10	9.3	0.8	16	5.00	0.23

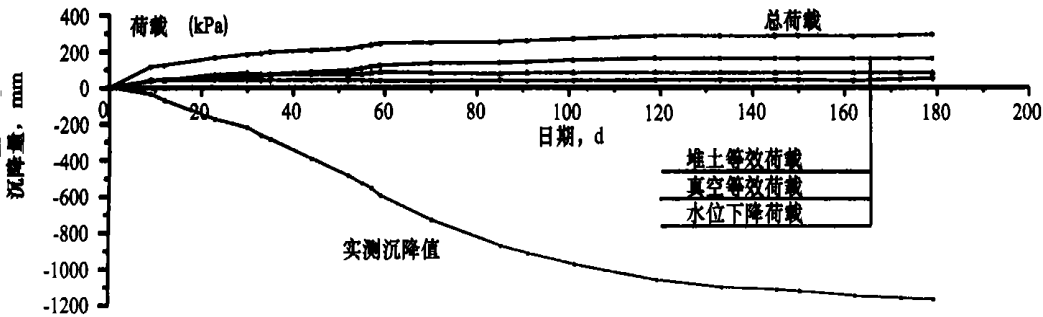


图 2 荷载-时间-实测沉降量关系曲线

在进行土体固结度的计算时,最常用的方法是太沙基方法,但对于变速加载,太沙基方法并不适用。工程应用证明改进的高木俊介方法更适合实际情况,平均固结度的计算采用式 (3)

$$U'_t = \sum_1^n \frac{q_n}{\sum \Delta p} \left[\left(T_n - T_{n-1} \right) - \frac{\alpha}{\beta} e^{-\beta t} \left(e^{\beta T_n} - e^{\beta T_{n-1}} \right) \right]$$
 (3)

式中, U'_t 为 t 时刻多级等速加载修正后的地基平均固结度; q_n 为第 n 级荷载的加荷速率; $\sum \Delta p$ 为各级荷载的累加值; T_{n-1} 、 T_n 为分别为第 n 级荷载起始和终始的时间,当计算第 n 级荷载加荷过程中时间 t 的固结度时,则 T_n 改用 t ; α 、 β 为对于不同的排水固结条件,其含义不同,见表 2。

2.2.3 反演分析参数的确定及处理

本文主要对 e 、 α_v 和 c_v 3 个参数进行反演计算。根据实际工程经验建立如下的参数约束条件 (塑

2.2 该段位移反演分析

2.2.1 目标函数的构造

目标函数取实测值与计算值的最小二乘

$$F(X) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (X_{it} - X_{it}')^2 / n}$$
 (1)

式中, n 为反演的测点数; X_{it} 为测点 i 在时刻 t 计算的沉降值; X_{it}' 为在时刻 t , 测点 i 实际发生的沉降值, 由现场实测量得。

2.2.2 正分析采用的基本理论及数学模型

本例主要利用分层总和法见式 (2)。

$$S = \sum_{i=1}^n \Delta S = \sum_{i=1}^n \left[\frac{\Delta e_i \times h_i}{1 + e_{0i}} \right] = \sum_{i=1}^n \left[\frac{\sigma_{zi} \times h_i}{E_{si}} \right]$$
 (2)

式中, n 为地基沉降计算深度范围内的土层数; E_{si} 为第 i 层土的压缩模量, kPa; h_i 为第 i 层土的厚度 m; σ_{zi} 为第 i 层土在荷载作用下的平均附加应力, kPa; e_{0i} 为第 i 层土的初始孔隙比; Δe_i 为由原始压缩曲线确定的第 i 层土的孔隙比变化。

不同的排水固结条件下的 α 、 β			
表 2			
序号	条件	α	β
1	竖向排水固结 ($\overline{U}_z > 30\%$)	$\frac{8}{\pi^2}$	$\frac{\pi^2 c_v}{4H^2}$
2	向内径排水固结	1	$\frac{8c_h}{F(n) d_e^2}$
3	竖向和向内径排水固结	$\frac{8}{\pi^2}$	$\frac{\pi^2 c_v}{4H^2} + \frac{8c_h}{F(n) d_e^2}$

料排水板进行梅花形布置, 间距 1.1m, 深度按平均深度 14m 简化计算)

$$0.2 \leq e \leq 1.3$$

$$9.0e-4 \leq c_v \leq 9.0e-2$$

$$0.1 \leq \alpha_v \leq 1.2$$

采用如下等参变化方法对以上约束条件进行转化

$$\min f(x)$$

$$x_{li} \leq x_i \leq x_{ri} \quad i = 1, 2, \dots, n$$

其中, x_{li} 和 x_{ri} 分别表示参数 x_i 允许值的上、下限。采

用下列参数变换

$$x_i = x_{\bar{i}} + (x_{\bar{r}} - x_{\bar{i}}) \sin x'_i \tag{4}$$

变换后代入目标函数使之成为 $f(x')$ ，使原有约束问题转化为一个无约束最优化问题。具体原始参数取值及与之对应的反演计算参数见表 3。

表 3

参数名称	H (m)	γ' (kN/m ³)	e_0	c_v (10 ⁻³ cm ² /s)	α_v (MPa ⁻¹)
参数取值 1	40	8.3	1.0	3.0	1.0
反演参数 1	40	8.3	1.284	18	0.5079
参数取值 2	40	8.3	0.8	8.0	0.3
反演参数 2	40	8.3	1.255	17.8	0.5004

从两次反演结果看，当所取的初始值不同时，反演结果有很细微的变化，这是由于计算机数值计算本身是近似计算所造成的。从利用反演参数计算的沉降

结果（见图 3）看，两者结果误差很小，这说明程序收敛是稳定的。

反演值中 c_v 值比试验室测得的大一个数量级，这与利用现场实测孔隙水压力计算所得以及国内外实际工程经验的结果一致，说明反演值符合实际情况，具有很好的指导实际施工的作用。

经对大量实际工程的反演计算可看出，只取 e 、 α_v 和 c_v 3 个主要参数进行反演计算能够满足一般工程的精度要求，而且这样可有效地减少反演参数使反演更有效。

从计算对比曲线图 3 中可见，反演值计算的结果比采用原始土体资料计算的结果更接近实际观测结果，所以利用位移反演法来进行实际施工过程中动态观测控制满足设计施工要求，效果明显，值得进一步研究推广。

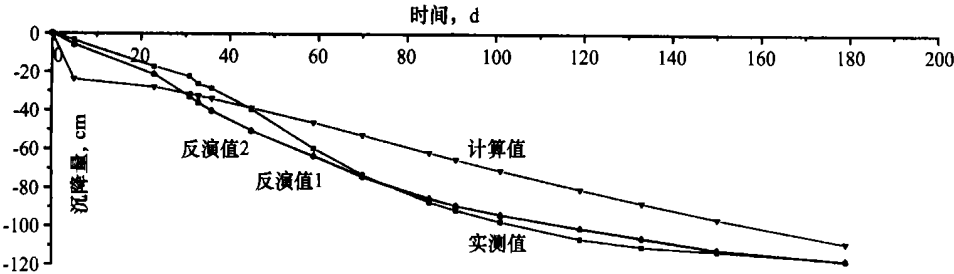


图 3 实测值-计算值-反演值对比曲线

因为是真空预压，引起地基沉降的因数主要有 3 个：真空负压、堆载和地下水位下降。它们之间相互影响，地下水位下降既是真空负压作用下排水的结果，同时地下水位的下降又将加强地基土的固结效果，而且形成的地下水漏斗形渗流面又将增加土体的稳定，所以在实际测量中真空度的测量以及地下水位的测量很重要，在反演计算中可以看出荷载的简化对结果影响很大。由此可见在实际施工中抽真空是关键，确保抽真空的连续性，维持稳定的真空度对反演分析结果影响很大。

塑料排水板真空预压加剧了 c_v 的非线性，但一般在计算时没有考虑此因数，在反演计算中也没有从根本上反映，只是使结果有所改善，因此在以后的研究中建议考虑非线性模型，充分考虑渗透系数、压缩系数随固结过程的变化，结合反演结果采用适当的拟合曲线进行计算。当然这有待于对真空预压机理的进一步研究。

图 3 显示：计算值开始时沉降速率太大，其实这说明，若不是采用真空联合堆载预压，则加载速度已经过快，土体可能发生破坏。实际上若根据资料进行

稳定计算时安全系数确已不能满足规范要求。但由于采用了真空联合堆载预压，由于受到负压的保护，经计算路堤稳定安全系数仍然满足设计要求；且由于受真空负压作用，土体出现向路堤内收缩变形，有效减小了总沉降量。

反演值计算曲线与实测值有一交点，这不是偶然现象，很多计算都有同样结果。此交点位于真空预压 3 个月左右，这正好是真空预压效果最明显的阶段。说明当地基土达到一定的固结度时，真空效果逐渐减弱，这也是真空预压只适用于一定的软粘土的原因。

从图 3 可见反演值 1 与反演值 2 计算的结果非常接近（几乎重合），说明理论设计与程序是稳定可靠的，反演计算的结果能准确地反映实际情况。

从图 4 可以看到真空联合堆载预压由于受负压保护，可以一次性加载很大，所以沉降速率明显比普通堆载预压快很多。3 个月以后，沉降速率开始明显减小。这说明由于抽真空时塑料板的排水作用大大加快了土体的固结，而且由于超载的作用，此时土体内的有效应力已大于卸载后道路在正常运行荷载下产生的有效应力，即卸载后路堤将处于再压缩状态，因而沉

降速率以及工后沉降将大大减小。根据规范^[5]采用沉降速率法控制工后沉降，路基 95 区顶面沉降速率应以小于 5mm/月为稳定标准，而根据经验及实际测得 C_c/C_s 的值为 4~6 左右，故本路段堆载预压的卸荷

标准可控制为 20~30mm/月。所以真空联合堆载预压不仅大大缩短了施工时间，而且解决了公路建成后沉降速率和工后沉降的问题。用于桥头软基处理时，能有效减少桥头跳车现象。

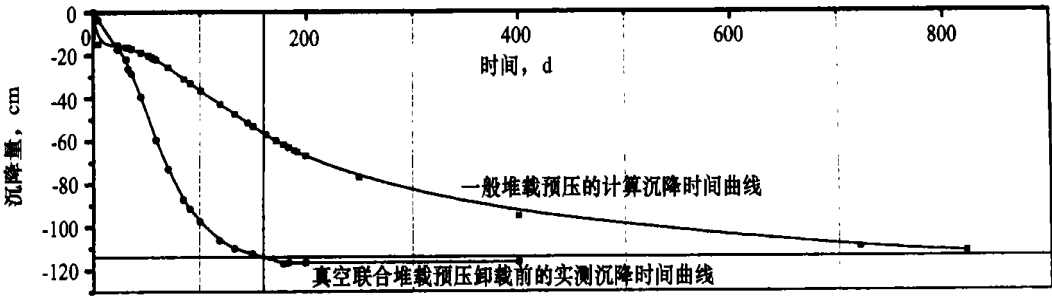


图 4 一般堆载预压设计与真空联合堆载预压实测沉降对比曲线

3 结论

(1) 利用实用沉降预测方法，结合位移反分析推算出的 C_v 值比试验室测得的大一个数量级，这与利用现场实测孔隙水压力计算所得以及国内外实际工程经验的结果一致，说明反演值符合实际情况，具有很好的指导实际施工的作用。

(2) 位移反分析能有效地解决目前试验室测量的土工参数与实际现场不符合的现象。并且利用位移反分析法，我们可以对目前积累的大量宝贵的实际工程经验进行土体的进一步分析，更好地促进对土体的研究。所以它既是一种很好的指导现场施工的手段，更是一种研究思路和方法。

(3) 从计算对比曲线中可见，反演值计算的结果比采用原始土体资料计算的结果更接近实际观测结果，所以利用位移反演法来进行实际施工过程中的动态观测控制能满足设计施工要求，效果明显，值得进一步研究推广。

(4) 从实例中反演计算的结果看，反演计算的孔隙比偏大，这是由于在正分析数学模型中土体的固结系数与渗透系数及孔隙比成正比，而真空预压过程中是通过增加压力差来加快土体固结效果的，目前所采用的模型中尚未考虑此因数，只是通过等价转化来简化计算，从而导致了反演的孔隙比参数并不是真实的

土体的孔隙比，只是反映实际固结沉降的固结系数的一个数学参数。由此可见，今后有必要对真空作用机理理论作进一步的研究。

(5) 对于一般堆载情况利用有限元方法计算的结果，其固结速度总体上要快于利用改进的高木俊介方法所得的结果。这或许是由于利用改进的高木俊介方法并未考虑土体的侧向变形，从这方面讲利用有限元方法比较符合土体的实际变形情况，所以其计算结果与实际测量成果比较接近。但对于塑料排水板+真空联合堆载预压目前各种有限元模型尚未有效地模拟塑料排水板在真空作用下孔隙水压的变化，而且由于缺乏研究经验，对于抽真空区域的边界也没有固定很好的简化处理方法，所以荷载简化难以准确处理。从实际计算看，效果并不理想，有待进一步的实践研究。

参考文献:

[1] 唐汉, 等. 实用计算方法 (第一版) [M]. 南京大学出版社, 1998.
[2] 许永明. 高速公路沉降预测方法研究 [M]. 南京: 河海大学, 2000.
[3] 钱家欢, 等. 土工原理与计算 (第二版) [M]. 中国水利水电出版社, 1996.
[4] 柴玉卿. 真空堆载联合预压法的固结与渗流研究 [M]. 南京: 河海大学, 2001.
[5] 中华人民共和国交通部. 公路软土地基路堤设计与施工技术规范 (JTJ 017-96) [S]. 北京: 人民交通出版社, 1996