

塑料排水板处理软土地基设计参数的优化

杨红伟¹, 王炳龙¹, 董月英¹

(同济大学 铁道建筑工程系, 上海 200331)

摘要:通过对高速铁路软土路基工后沉降组成的分析,以经济效益为目标函数,软土地基工后沉降、沉降速率双控制指标为约束条件建立优化数值模型.采用遗传算法对塑料排水板处理软土地基的主要设计参数,在总工期一定的情况下进行优化,以获得更好的经济效果.

关键词:路基;塑料排水板;工后沉降;沉降速率;遗传算法;优化

中图分类号: TU991.35

文献标识码: A

1 概述

路基在填筑过程中至铺轨前所产生的沉降为施工沉降,这部分沉降可以采用填补加高来解决,不是控制部分.路基在铺轨之后所产生的沉降为工后沉降,只能以抬道补碴调整,直接关系到高速铁路的运营能力、维修模式和成本.因此,文献[1]中对路基的工后沉降提出了严格的要求.明确规定工后沉降不应大于10 cm,沉降速率小于3 cm/年的双指标控制^[1].

由于塑料排水板的排水作用能加速软粘土的固结和强度增长,用塑料排水板联合超载预压处理软粘土地基已成为国内外岩土工程中广泛应用、行之有效的地基加固方法.使用超载预压可以缩短堆载预压时间,减少工后沉降量^[2],根据超载预压加固地基的原理,在保证地基稳定的前提下,超载越大,时间越长,则减小卸荷后地基剩余沉降的效果越好.但在实际应用中,采用很大的超载与长期的堆载预压既不经济又不现实,反之,用少量的超载甚至不超载短期的预压又达不到预期的效果.

传统的超载设计一般先假定使用荷载下主固结沉降量和次固结沉降量之和等于有超载作用下主固结的某一固结度(通常 $\bar{U} = 80\%$),然后反算有超载作用下的主固结沉降量和超载预压时间^[3].但就高速铁路而言,工后沉降要求非常严格,采用上述方法难以估算工后沉降量,因此,以工后沉降和沉降速率为控制标准,进行超载预压的优化设计无论是在理论上还是在工程实际中都有重要意义.

2 软土路基工后沉降

软土路基工后沉降由三部分组成:填土压密下沉、运营阶段行车引起的基床累计下沉和铺轨后软土地基仍未完成的沉降.

2.1 填土压密下沉

目前各国关于路基填土的压密下沉通常都是通过压实密度予以保证.对于填土压密工后沉降,德国和日

本采用了经验公式估算^[4],即

$$S = \frac{h^2}{3000} \quad (1)$$

式中: S —路堤压密工后沉降(m); h —路堤高度(m)

按上式估算,4.5 m高的路基填土压密下沉的工后沉降约0.7 cm.

2.2 行车引起的基床累计下沉

为预测下沉量,各国都十分重视下沉规律的研究.根据日本的资料,基床表层 $K_{30} \geq 150$ MPa/m 和基床底层的 70~110 MPa/m;当荷载作用次数为 150 万次(相当于日本主要干线一年的作用次数)时,累计下沉量仅为 1~2.5 mm,且经过一年行车后便能趋于稳定而不再发展.我国高速铁路,对路基填筑压实标准和 K_{30} 的要求与国外标准相当.

2.3 软土地基引起的路基工后沉降

这部分工后沉降允许值为 10 cm 扣除路堤填土压密后沉降和行车引起的基床累计沉降量,对 4~5 m 高度的路基,软土地基产生的工后沉降允许值约为 8~9 cm.

3 软土地基固结度

1) 瞬时加荷条件下的固结度可表示为下式:

$$\bar{U} = 1 - \alpha e^{-\beta t} \quad (2)$$

式中: t —瞬时加载的作用时间; α 、 β —排水固结系数;参数 α 、 β 视不同的排水条件而定.其中

$$\alpha = \frac{8}{\pi^2} \quad (3)$$

$$\beta_1 = \frac{8C_{h1}}{Fd_e^2} + \frac{\pi^2 C_{v1}}{4H_1^2} \quad (4)$$

$$\beta_2 = \frac{\pi^2 C_{v2}}{4H_2^2} \quad (5)$$

$$\beta_3 = \frac{8C_{h3}}{Fd_e^2} + \frac{\pi^2 C_{v3}}{4H_3^2} \quad (6)$$

β_1 、 β_2 —计算路基本体和超载荷载产生的加固区、加固区以下压缩层内固结度的排水固结系数;

β_3 —计算轨道和列车换算荷载产生的加固区内固结度的排水固结系数;

C_{h1} —加固区内地基土径向平均固结系数; C_{v1} —加固区内地基土竖向平均固结系数;

C_{v2} —加固区以下压缩层内地基土竖向平均固结系数;

C_{h3} —轨道和列车换算荷载产生的压缩层范围内地基土的径向平均固结系数;

C_{v3} —轨道和列车换算荷载产生的压缩层范围内地基土的竖向平均固结系数;

F —反映井阻和涂抹作用的综合参数; d_e —塑料排水板的影响直径;

H_1 —加固区内地基土的竖向排水距离; H_2 —加固区以下压缩层内地基土的竖向排水距离;

H_3 —轨道和列车荷载产生的压缩层内地基土竖向排水距离.

2) 逐渐加荷条件下,地基土固结度可采用高木俊介法进行修正.

$$\bar{U}_i = \sum_{i=1}^n \frac{q_i}{\sum \Delta p} \left[(T_m - T_{m-1} - \frac{\alpha}{\beta} e^{-\beta T_m} + e^{-\beta T_{m-1}}) \right] \quad (7)$$

式中: \bar{U}_i — t 时刻多级等速加荷修正后的地基平均固结度; q_i —第 i 级荷载的加载速率; $\sum \Delta p$ —各级荷载的累加值; T_{m-1} 、 T_m —分别为第 i 级荷载加载的起始和终止时间(从零点起算),当计算第 i 级荷载加载过程中某时间 t 的固结度时, T_i 改为 t ;

4 数值计算模型

多级等速加载曲线可简化为一连续等速加载曲线^[5]. 因此, 整个施工期曲线如图 1.

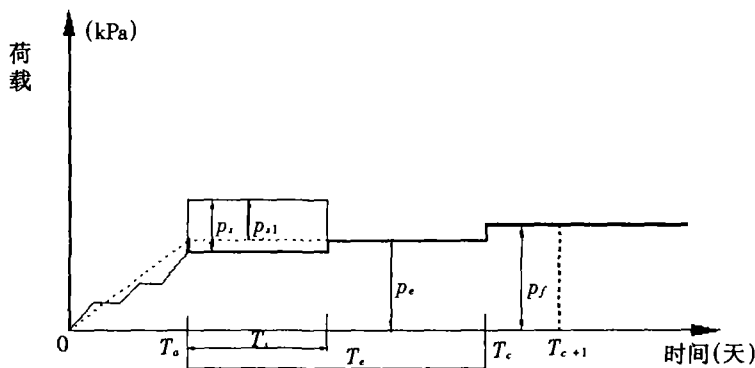


图 1 考虑超载和轨道列车荷载简化加载示意图

由于简化了加载曲线, 超载荷载由原加载的 P_s 变化为简化加载后的 P_{s1} , 二者之间的差值 ΔP 可表示为

$$\Delta P = P_s - P_{s1} \quad (8)$$

采用塑料排水板联合超载预压法, 铺轨后 ($t \geq T_c$) 的固结度 (对 P_e 而言, 考虑了超载的影响) 的普遍式可表示为

$$\bar{U}_{(t)} = 1 + \frac{\alpha}{\beta T_a} [e^{-\beta t} - e^{-\beta(t-T_a)}] + \frac{P_{s1}}{P_e} (1 - \alpha e^{-\beta T_s}) \quad (9)$$

式中: T_a —预压前路基本体施工期 (天); T_s —预压土柱的放置时间 (天); T_c —路基填筑的总施工期 (天); T_{c+1} —铺轨结束后一年时间 (天); P_s —预压土柱荷载 (kPa); P_{s1} —加载曲线简化后的超载荷载 (kPa); P_e —基床表层施工结束后路基本体荷载 (kPa)。

当分别考虑路基本体填土、超载荷载和轨道列车荷载产生的塑料排水板加固区、加固区以下压缩层范围内的固结度和主固结沉降量, 则铺轨后剩余沉降计算式可表示为

$$S_{\text{剩余}} = [1 - \bar{U}_1(t)] S_{c1} + [1 - \bar{U}_2(t)] S_{c2} + [1 - \bar{U}_3(t)] S_{c3} \quad (10)$$

式中: S_{c1} —塑料排水板加固区主固结沉降量 (m); S_{c2} —塑料排水板加固区以下压缩层内主固结沉降量 (m); S_{c3} —轨道和列车荷载产生的主固结沉降量 (m); $\bar{U}_1(t)$ —路基填土和超载产生塑料排水板加固区内土层时刻的平均固结度; $\bar{U}_2(t)$ —路基填土和超载产生塑料排水板加固区以下压缩层内土层时刻的平均固结度; $\bar{U}_3(t)$ —轨道和列车荷载产生塑料排水板加固区内土层时刻的平均固结度。

当 $t = T_c$ 时, (10) 式即为工后沉降。

4.1 目标函数

本文目的是要求采用塑料排水板联合超载预压处理软土地基在满足工后沉降要求时获得更好的经济效益, 即投资额最小。此方法处理地基的造价由四部分组成, 即塑料排水板材料费, 塑料排水板打设费, 预压土柱费用 (运输、填筑、清除) 和由于预压期造成的误工费用。所以优化数值分析要求:

$$f(x) \rightarrow f_{\min} \quad x \in \Omega$$

$$f(x_1, x_2, x_3) = 4A_1[c_1(h_s + l_s) + c_2(h_s + l_s)]/\pi x_1^2 + c_3 A_2 x_2/\gamma_s + c_4 x_3 \quad (11)$$

式中: x_1 —塑料排水板的影响直径 d_e (m); x_2 —预压土柱的荷载 P_s (kPa); x_3 —预压时间 T_s (天); γ_s —预压土柱填料容重 (kN/m^3); A_1 —塑料排水板地基处理的面积 (m^2); A_2 —预压土柱的面积 (m^2); h_s —塑料排水板长度 (m); l_s —预留埋入砂垫层中的塑料排水板长度 (m); c_1 —台班费, 即打设 1 m 塑料排水板所需费用 (元/m); c_2 —塑料排水板单价 (元/m); c_3 —预压土柱单价 (元/ m^3); c_4 —因堆载预压误工费用单价 (元/天)。

4.2 约束条件

约束条件首先应该是三个设计参数应满足各自的变化范围;其次是在该种地基处理方法中由某一组的设计参数计算的沉降值必须满足文献[1]对高速铁路软土地基的变形要求.具体约束条件如下:

1) 塑料排水板的间距是影响土体固结速率的主要因素之一,在一定的荷载下,间距越小,固结越快;反之亦然.但为避免使周围土体受到扰动,塑料排水板的间距不可过小.因此塑料排水板的间距大小常选在 1.0m~2.0 m.

2) 预压土柱的放置时间 T_s 主要受工期的限制,其最大限值为总工期扣除路基本体施工计划时间所剩的允许放置时间.

3) 超载预压虽然在一定的荷载范围内可以加速地基土固结度的增长,但其荷载 P_{s1} 主要受到路堤和软土地基稳定性的限制.要对路堤进行稳定性检算,以确定超载极限值 P_{\max} .

4) 在铺轨后软土地基的沉降 $g1(x)$ 应在允许的范围内 Sc .

$$g11(x) = Sc_1 \left[\frac{\alpha_1}{\beta_1 T_a} (e^{-\beta_1 T_s} - e^{-\beta_1 T_c}) + \frac{x_2 - \Delta p}{p_e} (\alpha_1 e^{-\beta_1 x_3} - 1) \right] \quad (12)$$

$$g12(x) = Sc_1 \left[\frac{\alpha_2}{\beta_2 T_a} (e^{-\beta_2 T_s} - e^{-\beta_2 T_c}) + \frac{x_2 - \Delta p}{p_e} (\alpha_2 e^{-\beta_2 x_3} - 1) \right] \quad (13)$$

$$g1(x) = g11(x) + g12(x) + Sc3 \leq Sc \quad (14)$$

5) 铺轨后第一年软土地基的沉降速率 $g2(x)$ 应满足 3 cm/年的要求

$$g21(x) = Sc_1 \left[-\frac{\alpha_1}{\beta_1 T_a} [e^{-\beta_1 (T_{s+1} - T_s)} - e^{-\beta_1 T_{s+1}}] + \frac{\alpha_1}{\beta_1 T_a} [e^{-\beta_1 T_s} - e^{-\beta_1 T_c}] \right] \quad (15)$$

$$g22(x) = Sc_2 \left[-\frac{\alpha_2}{\beta_2 T_a} [e^{-\beta_2 (T_{s+1} - T_s)} - e^{-\beta_2 T_{s+1}}] + \frac{\alpha_2}{\beta_2 T_a} [e^{-\beta_2 T_s} - e^{-\beta_2 T_c}] \right] \quad (16)$$

$$g23(x) = Sc_3 [1 - \alpha_3 e^{-\beta_3 (T_{s+1} - T_s)}] \quad (17)$$

$$g2(x) = g21(x) + g22(x) + g23(x) \leq 0.03(\text{m}) \quad (18)$$

4.3 优化模型

综合上述约束条件(1)~(5)所述,可得优化模型如下:

$$\text{Min}_{x \in \Omega} f(x), \Omega = X \begin{cases} a \leq d_e \leq b(\text{m}) \\ 0 \leq P_s \leq P_{\max}(\text{kPa}) \\ 0 \leq T_s \leq T(\text{天}) \\ 0 \leq g1(x) \leq Sc(\text{m}) \\ 0 \leq g2(x) \leq 0.03(\text{m}) \end{cases} \quad (19)$$

5 优化方法

由式(11)~(19)可知目标函数和约束条件均为变量(x_1, x_2, x_3)的非线性函数,因此(19)式所示模型为非线性优化模型.对于这类优化模型可采用遗传算法来求解.

遗传算法(Genetic Algorithm 简称 GA)是一种模拟自然界生物进化过程的计算模型,由模型参数初始化、交叉、复制、和变异四部分组成.其有自身的特点^[6],其概率地使用 3 种遗传操作(选择、交叉、变异)进行搜索,而不用确定地规则,可以避免传统搜索方法的局部最优限制,找到全局最优解;它对待寻优函数并无限制,它既不要求函数连续,也不要求函数可微;计算过程中具有较强的鲁棒性和自适应等智能特征,能克服传统优化方法容易陷入局部极小值的缺点,为解决复杂优化问题,寻找全局最优解提供了一种有效途径.

根据具体问题,其优化计算的步骤会有所不同.为实现本文中所论述类型的问题的优化,步骤如下:

- 1) 参数设置:迭代次数、种群规模、变异概率.
- 2) 在约束条件(19~1)、(19~2)、(19~3)容许的范围内随机初始化三个待优化参数的群体.
- 3) 将染色体编码译码为适合应用于适应度值计算的形式.
- 4) 计算当前群体中染色体的适应度值;选出最好的个体按概率随机选择,进行自我复制,形成新的群体.

- 5) 随机选择染色体进行交叉、变异操作。
- 6) 根据约束条件(19~4)、(19~5)淘汰掉不符合条件的染色体组合.采用符合条件的参数组合计算目标函数值。
- 7) 对子代群体重复步骤(3)~(6),进行新一轮进化过程.如找到最优解,则计算结束。

6 工程实例优化

6.1 工程地质概况

某高速铁路路基试验点,路基面宽度按软土地区双线路堤标准 13.8 m,设计路堤长度 65 m,高 4.5 m.全段路堤边坡坡率 1:1.5,坡脚设高 1.0 m、宽 1.0 m 护道。

地基拟采用塑料排水板联合超载预压加固.塑料排水板呈正三角形布置,深 15.0 m,影响直径拟取在 1.0~2.0 m 之间.为增加排水面,基底铺设厚 0.3 m 中粗砂垫层.为满足试验路堤稳定性、减小不均匀沉降的需要,在 0.3 m 处铺设两层土工格栅,相间 0.2 m.设置超载前的路堤本体施工期拟用 180 天,总工期定为 450 天.其地基土的主要物理力学指标见表 1.

表 1 地基土的物理力学指标

层号	土层	层厚 (m)	含水量 w/%	密度 γ / ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	孔隙比 e	塑性指数 I_p	C_v / ($\text{cm}^2/\text{s}\times 10^{-3}$)	C_h / ($\text{cm}^2/\text{s}\times 10^{-3}$)	压缩模量 E_s/MPa
1	杂填土	1.4							
2	粘土	2.4	34.7	18.5	0.99	17.0	2.69	3.38	5.1
3	粉质粘土	1.6	35.1	18.4	0.99	10.6	6.39	6.00	5.1
4	淤泥质粘土	9.9	47.4	17.3	1.33	17.3	2.53	3.47	3.0
5	粘质粉土	11.9	27.8	19.1	0.81	6.8	8.70	8.15	14.0
6	粉质粘土	7.3	31.8	18.8	0.92	15.4	5.48	3.29	6.0
7	粉质粘土	3.2	30.3	19.3	0.84	13.4	8.28	6.66	5.6
8	粉质粘土	10.0	34.3	18.7	0.96	16.9	2.63	3.17	7.5

6.2 优化计算

对于地基土的主固结沉降量可采用分层总和法计算^[1].通过计算可得 $S_{c1}=0.3459\text{ m}$, $S_{c2}=0.1111\text{ m}$, $S_{c3}=0.0084\text{ m}$.

该高速铁路路堤试验段填土为苏州阳山下蜀粘土加 4% 的生石灰改良土,所以将破裂面视为一圆柱面,采用条分法进行稳定性检算.试算出文献[1]中规定的稳定性系数 K_{\max} 时超载荷载的最大值 p_{\max} .通过计算近似可得 $p_{\max}=50\text{ kPa}$.在此工程实例中公式(11)中所需的各参数值如表 2 所示:

表 2 目标函数中参数值

C_1 (元/m)	C_2 (元/m)	C_3 (元/ m^3)	C_4 (元/天)	A_1 (m^2)	A_2 (m^2)	h_s (m)	l_s (m)	γ_s (kN/m^3)
1.5	1.0	128	100	1800	828	15	0.3	18

6.2.1 优化必要条件论述

- 1) 由高速铁路路基工后沉降分析可得,对 4~5 m 高度的路基,软土地基产生的工后沉降允许值约为 8~9 cm.为确保地基沉降变形的安全,地基土的工后沉降允许值取值为 8 cm。
- 2) 现取三个设计参数的极限值组合,以确定优化设计的边界范围,论证优化设计的必要性。
- (1)取 $d_e=2.0$, $T_s=0\text{ 天}$, $P_s=0\text{ kPa}$.如果地基土工后沉降量小于 8 cm 则可采用等载预压方法。
- (2)取 $d_e=1.0$, $T_s=240\text{ 天}$, $P_s=50\text{ kPa}$.如果地基土工后沉降量大于 8 cm.在这种情况下则要考虑采用其它地基处理方法。
- 为施工中改变总工期设计提供依据,本文对不同的总工期也进行了优化.不同的总工期、设计参数极限值的不同组合,地基土工后沉降量计算结果见表 3.通过计算结果以确定优化的必要性。

表 3 工后沉降量结果表

总工期(天)	沉降量(cm)(条件①)	沉降量(cm)(条件②)
450	10.13	7.71
480	9.72	7.64
510	9.43	7.57
540	9.21	7.50

6.2.2 优化结果

则优化准则函数(取其在约束条件容许范围内的极小值)为公式(11). 优化结果见表 4. 塑料排水板影响直径优化结果为工程实用考虑已进行了修正.

表 4 优化计算结果

T_c (天)	d_c (m)	P_s (kPa)	T_s (天)	工程费用(元)	工后沉降(cm)
450	2.00	35	218	2.4986×10^5	8.00
480	1.96	32	235	2.3462×10^5	8.00
510	2.00	32	148	2.2575×10^5	8.00
540	1.90	28	224	2.1141×10^5	8.00

7 结 论

- 1) 随着总工期的增长,对预压土柱荷载的要求逐渐减小,软土地基的处理费用逐渐减小.
- 2) 塑料排水板联合堆载预压处理高速铁路软土地基的设计参数,以文献[1]对高速铁路软土地基工后沉降、沉降速率的双控制指标为约束条件建立优化数值模型,采用遗传算法进行优化是可行的. 为以后类似工程提供了设计依据.

参考文献:

[1] 铁道部第三勘察设计院等.京沪高速铁路线桥隧站设计暂行规定[S].2002.
[2] 潘秋元,朱向荣,谢康和.关于砂井地基超载预压的若干问题[J].岩土工程学报,1991,13(2):1~12.
[3] 地基处理编写委员会.地基处理手册[M].北京:中国建筑出版社出版,2000,9.
[4] 王其昌,等.高速铁路土木工程[M].成都:西南交通大学出版社出版,1999.
[5] 谢康和,曾国熙.砂井地基的优化设计[J].土木工程学报,1989,22(2):1~11.
[6] MICHALEWICZ Z. Genetic algorithm + Data structures = Evolution programs[M]. AI Series. New York:Springer-Verlag,1994.

Optimization about Designing Parameter by Using Plastic Drain Board to Consolidate the Soft-soil Foundation

YANG Hong-wei, WANG Bing-long, DONG Yue-ying

(Department of Railway Engineering, Tongji University, Shanghai 200331, China)

Abstract: In this paper, the analysis of components of the settlement of high-speed railway subgrade after construction is given. In the optimization numeric model, the economic utility is adopted as object function, and the double controlling indicators which comprise the settlement after construction and the rate of settlement are employed as the constraint conditions. In order to get better economical result, genetic algorithm under the definite general contraction is used in this paper to optimize the designing parameter of capitalizing the plastic drain board to consolidate the soft-soil foundation.

Key words: subgrade; plastic drain board; settlement after construction; rate of settlement; genetic algorithm; optimize