

超软地基排水固结联合轻质土路堤处理技术及其 简易算法

刘吉福¹, 陈忠平², 汪建斌³

(1. 广东省交通规划设计研究院股份有限公司, 广东 广州 510507; 2. 广州大学 土木工程学院, 广东 广州 510006;
3. 广东盛瑞科技股份有限公司, 广东 广州 511400)

摘 要: 深厚超软地基采用复合地基存在不少缺陷, 排水固结路堤的适用高度常低于路堤设计高度。排水固结+轻质土路堤技术利用轻质土的轻质性和应力补偿原理, 显著提高排水固结路堤的适用高度, 有效减少工后沉降、规避泡沫轻质土路堤在不均匀沉降下易于开裂的缺点。该技术先对路堤进行排水固结, 然后根据计算卸除部分填土, 之后填筑轻质土至路床顶面。基于软土地基承载力、沉降和固结、应力补偿等理论提出堆载预压+轻质土路堤、真空联合堆载预压+轻质土路堤简易计算分析方法, 最后给出工程算例。分析表明, 排水固结+轻质土路堤往往比复合地基路堤经济, 真空联合堆载预压+轻质土路堤的适用高度远大于堆载预压+轻质土路堤的适用高度。

关键词: 超软地基; 排水固结+轻质土; 路堤; 应力补偿

中图分类号: TU470

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2019)02-0012-05

作者简介: 刘吉福(1971-), 男, 山东阳谷人, 博士, 教授级工程师, 副总工程师, 主要从事公路设计、科研等工作。E-mail: 617067152@qq.com。

New technology of preloading combined with light-soil for embankment on ultra-soft ground and simplified calculation method

LIU Ji-fu¹, CHEN Zhong-ping², WANG Jian-bin³

(1. Guangdong Province Communication Planning & Design Institute Co., LTD, Guangzhou 510507, China

2. College of Civil Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China

3. Guangdong Shengrui Technology Co., Ltd., Guangzhou 511400, China)

Abstract: There are many defects for the composite foundation with thick super soft soil. The applicable height of the drainage-consolidated embankment is often lower than the design height of the embankment. Utilizing its light weight and stress compensation principle, drainage consolidation combined with lightweight soil embankment technology can significantly improve the applicable height of drainage consolidation embankment, effectively reduce post-construction settlement, and avoiding the shortcomings of foam lightweight soil embankment which is easy to crack under uneven settlement. The technology starts with drainage and consolidation of the embankment, and then removes part of the fill according to the calculation. Finally, the lightweight soil is filled on the surface of the road bed. Based on the theory of soft soil foundation bearing capacity, settlement and consolidation, stress compensation, etc, a simple analysis method of preloading combined with lightweight soil embankment, vacuum combined preloading and lightweight soil embankment is proposed. The analyses show that the drainage consolidation combined with lightweight soil embankment is more economical than the composite foundation embankment, and the applicable height of the vacuum combined preloading and lightweight soil embankment is much higher than the applicable height of the preloading combined lightweight soil embankment.

Key words: super soft ground; drainage consolidation combined with light soil; embankment; stress compensation

0 引 言

我国沿海及部分内陆地区分布大量饱和软弱

黏土。江门、中山港口、汕头牛田洋、连云港等地区的软土含水量多超过 70%, 抗剪强度多低于

15 kPa, 属于超软土。这些地区超软土厚度多超过 15 m。

超软地基中水泥土桩成桩质量难以保证, 刚性桩复合地基路堤也出现不少事故。上海曾发文限制水泥土桩复合地基的应用; 广东、浙江曾发文限制管桩复合地基路堤的应用。因此, 超软地基路堤常用的地基处理方式是排水固结法, 包括堆载预压法和真空联合堆载预压法。对于超软地基, 堆载预压路堤的适用填土厚度通常小于 5.0 m, 扣除沉降后, 深厚超软地基路堤的适用高度常低于 4.0 m; 真空联合堆载预压路堤的适用填土厚度通常小于 7.5 m, 深厚超软地基路堤的适用高度常低于 5.5 m。

我国沿海地区经济发达, 高度城镇化对地方交通要求高, 加上水塘、河网密布, 导致道路结构物密集、路堤高度普遍较大, 不少路段路堤高度超过 6 m, 大于堆载预压路堤甚至真空联合堆载预压路堤的适用高度。

近几年形成的排水固结+轻质土路堤处理技术可以有效解决上述难题。该技术相对排水固结路堤占地、路堤填料较少。随着沿海地区征地费用、路堤填料价格的日益增长, 该技术的优势不断凸显。

1 排水固结+轻质土路堤技术

排水固结+轻质土路堤技术实施步骤为:

- (1) 计算路堤的适用填土厚度 T_f ;
- (2) 填筑 T_f 厚填土, 并进行排水固结;
- (3) 预压完毕后, 根据监测结果按照应力补偿原理计算需要填筑的轻质土厚度 T_l 、需要卸除的填土厚度 T_r ;
- (4) 按照计算结果卸除多余土方、施工轻质土至路床顶面, 见图 1。

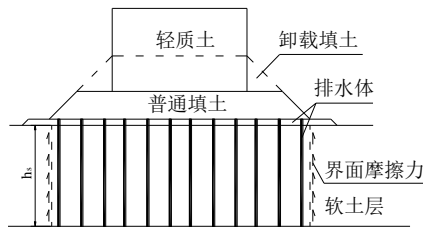


图 1 排水固结+轻质土路堤

Figure 1 Drainage consolidation & lightweight soil embankment

该技术分为堆载预压+轻质土路堤技术和真空联合堆载预压+轻质土路堤技术。

该技术的实质仍然是排水固结法, 宜用于有效工期大于 18 个月的工程。该技术将排水固结法与轻质土法有机结合, 不但可以显著提高排水固结路

堤的适用高度, 而且利用应力补偿的原理有效减少轻质土路堤的工后沉降、规避了轻质土路堤在不均匀沉降下易于开裂的缺点。

江门~中山高速公路曾对 3 段桥头路堤等载预压后换填轻质土, 工后沉降非常小^[1,2]。其实质是排水固结+轻质土路堤, 只是应用路段路堤高度小于排水固结路堤适用高度, 经济性不高、必要性不大。

2 堆载预压联合轻质土路堤简易算法

2.1 堆载预压路堤适用填土厚度

堆载预压路堤的适用填土厚度 T_f 宜采用路堤稳定分析软件计算确定。对硬壳层厚度较小的深厚超软地基, 可采用以下简化方法计算:

天然地基路堤的适用填土厚度为^[3]:

$$T_{f0} = \frac{5.14C_u}{\gamma_f F_s} \quad (1)$$

式中: T_{f0} 为天然地基路堤适用填土厚度, C_u 为软土不排水抗剪强度, γ_f 为填土重度, F_s 为安全系数。

T_{f0} 厚填土在地基中产生附加应力, 路堤加固区与非加固区之间的界面摩擦力会减少加固区的附加应力。界面摩擦力取 C_u , 则 T_{f0} 厚填土在路堤加固区软土层中产生的平均附加应力可近似表示为:

$$\sigma = T_{f0} \gamma_f - \frac{C_u h_s}{B} \quad (2)$$

式中: σ 为软土层平均附加应力, h_s 为软土层深度, B 为加固区宽度, 可取路堤顶宽和底宽的平均值。经 T_{f0} 厚填土堆载预压后, 加固区平均抗剪强度增量为^[4]:

$$\Delta C_u = \left(T_{f0} \gamma_f - \frac{C_u h_s}{B} \right) \tan \varphi_{cq} \quad (3)$$

路堤稳定分析、工程实践表明, 软基路堤最危险滑动面圆心通常在路堤坡脚附近, 软土厚度大时, 圆心多位于坡脚之外。因此, 最危险滑动面内及其附近软土的强度增量平均值近似为式(3)计算值的 50%。因此, 经 T_{f0} 厚填土堆载预压后, 可继续填筑的填土厚度 T_{f1} 近似为

$$T_{f1} = \frac{2.57(T_{f0} \gamma_f B - C_u h_s) \tan \varphi_{cq}}{\gamma_f F_s B} \quad (4)$$

式中: h_s 为软土深度, φ_{cq} 为软土固结快剪内摩擦角。

式(2)已考虑了路堤加固区与非加固区之间的界面摩擦力对加固区附加应力的影响, T_{f1} 厚填土在加固区产生的附加应力不再考虑界面摩擦力的影响。经 T_{f1} 厚填土堆载预压后, 可继续填筑的填土厚度近似为:

$$T_{f2} = \frac{2.57T_{f1} \tan \varphi_{cq}}{F_s} \quad (5)$$

以此类推, 经 T_{fi} 厚填土堆载预压后, 可继续填筑的填土厚度近似为

$$T_{fi+1} = \frac{2.57T_{fi} \tan \varphi_{cq}}{F_s} \quad (6)$$

由等比数列公式可得:

$$T_f = \frac{F_s T_{f0} - \frac{2.57C_u h_s \tan \varphi_{cq}}{B \gamma_f}}{F_s - 2.57 \tan \varphi_{cq}} \quad (7)$$

式中: T_f 为适用填土厚度。

B 随 T_f 变化, 为简便起见, 可采用下式计算:

$$B = b + T_{f0} m \quad (8)$$

式中: b 为路基顶宽, m 为边坡值。

F_s 可取 1.2~1.3。软土厚度越大, 最危险滑动面圆心越向路堤外侧移动。因此, 软土厚度大时, F_s 取大值。

2.2 堆载预压路堤最终沉降

T_f 厚填土对应的最终沉降 S_f 宜采用分层总和法计算。对硬壳层厚度较小的深厚超软地基, 也可采用以下公式近似计算:

$$S_f = m_s \left(T_f \gamma_f - \frac{C_u h_s}{B} \right) \frac{h_s}{E_s} \quad (9)$$

式中: S_f 为最终沉降, m_s 为沉降修正系数, E_s 为软土对应地基土自重~地基土自重与 $T_f \gamma_f$ 之和对应的压缩模量。

2.3 堆载预压路堤适用高度

$$h_{md} = T_f - d_w - (S_f - d_w) \frac{\gamma_f'}{\gamma_f} \quad S_f > d_w \text{ 时} \quad (10)$$

$$h_{md} = T_f - S_f \quad S_f \leq d_w \text{ 时}$$

式中: h_{md} 为适用高度, d_w 为地下水位深度, γ_f 为填土浮重度。

2.4 轻质土厚度

根据工期安排可以确定卸载时地基固结度及已完成沉降。

根据应力补偿原理确定的轻质土厚度为^[5]:

$$T_i = \frac{K \gamma_f [T_e S_f - T_f (S_i + S_{ra})]}{S_f (\gamma_f - \gamma_l)} \quad (11)$$

式中: T_i 为轻质土厚度, K 为安全系数, T_e 为包括已完成沉降、路面结构等效填土厚度的路堤填土厚度, S_i 为已完成沉降, S_{ra} 为容许工后沉降, γ_l 为轻质土重度。

K 可取 1.2~1.3。计算 T_e 时位于地下水位以下的沉降土方重度应换算为地下水位以上填土重度。设计阶段, S_f 和 U_i 可计算得到; 施工阶段, S_f 和 U_i

应根据监测资料推算得到。

根据路堤竖向空间关系得到的轻质土厚度为:

$$T_i = T_e - T_p - T_f \quad (12)$$

式中: T_p 为路面结构等效厚度。

轻质土厚度应取式 (11) 和式 (12) 计算值的大者。

2.5 需要卸载厚度

$$T_r = T_f - T_e + T_p + T_i \quad (13)$$

式中: T_r 为需要卸除的填土厚度。

2.6 堆载预压+轻质土路堤适用高度

超软地基的沉降土方多位于地下水位以下, 开挖难度较大; 轻质土护壁也需要较密实的土层作为地基土。因此, 通常不卸除沉降土方, 最大卸载厚度为 $T_r = T_f - S_i$, 由式 (11)、式 (13) 可得:

$$h_{mfl} = \frac{K \gamma_f T_f (S_i + S_{ra}) - (T_p + S_i) S_f (\gamma_f - \gamma_l)}{K \gamma_f S_f - S_f (\gamma_f - \gamma_l)} - S_i \quad (14)$$

式中: h_{mfl} 为堆载预压+轻质土路堤适用高度。

3 真空联合堆载预压+轻质土路堤简易算法

3.1 真空联合堆载预压路堤适用填土厚度

真空预压后, 最危险滑动面范围内及其附近软土的平均抗剪强度为:

$$C_{uv} = C_u + 0.5 p_v \tan \varphi_{cq} \quad (15)$$

式中: C_{uv} 为经真空预压后软土的平均抗剪强度, p_v 为真空度。

结合第 2.1 节, 对硬壳层厚度较小的深厚超软地基, 有:

$$T_{f0} = \frac{5.14 C_{uv}}{\gamma_f F_s} \quad (16)$$

$$T_f = \frac{F_s T_{f0} - \frac{2.57 C_u h_s \tan \varphi_{cq}}{B \gamma_f}}{F_s - 2.57 \tan \varphi_{cq}} \quad (17)$$

3.2 真空联合堆载预压路堤最终沉降

$$T_{vf} = T_f + \frac{p_v}{\gamma_f} \quad (18)$$

式中: T_{vf} 为包括真空等效填土的适用填土厚度。

对硬壳层厚度较小的深厚超软地基, 利用下式可计算得到最终沉降:

$$S_f = m_s \left(T_{vf} \gamma_f - \frac{C_{uv} h_s}{B} \right) \frac{h_s}{E_s} \quad (19)$$

3.3 真空联合堆载预压路堤适用高度

见式 (10)。

3.4 轻质土厚度

根据工期安排可以确定卸载时地基的固结度, 轻质土厚度取式 (20) 和式 (12) 计算值中的大者:

$$T_l = \frac{K\gamma_f [T_e S_f - T_{vf} (S_t + S_{ra})]}{S_f (\gamma_f - \gamma_l)} \quad (20)$$

3.5 需要的卸载厚度

见式 (13)。

3.6 真空联合堆载预压+轻质土路堤适用高度

取 $T_r = T_f - S_t$, 由式 (20)、式 (13) 可得:

$$h_{mvt} = \frac{K\gamma_f T_{vf} (S_t + S_{ra}) - (T_p + S_t) S_f (\gamma_f - \gamma_l)}{K\gamma_f S_f - S_f (\gamma_f - \gamma_l)} - S_t \quad (21)$$

式中: h_{mvt} 为真空联合堆载预压+轻质土路堤的适用高度。

4 工程算例

4.1 工程概况

江门某桥头路堤路基容许工后沉降为 0.1 m, 顶宽 24 m。其中 100 m 长度范围位于水塘区, 水塘深 2 m, 路堤高 7 m, 其中路面结构厚度 0.8 m, 重度 24 kN/m³; 路堤填土重度 20 kN/m³, 填土浮重度 12 kN/m³, 黏聚力 20 kPa, 内摩擦角 20°。路堤边坡坡率 1:1.5。

淤泥深度 20 m, 淤泥重度 16 kN/m³, 十字板抗剪强度 15 kPa, 固结快剪内摩擦角 12°, 压缩模量 1.5 MPa。淤泥下为 10 m 厚的粉质黏土, 桩侧阻力为 60 kPa, 桩端阻力 2500 kPa。

对排水固结+轻质土路堤、管桩复合地基路堤进行比选。由于位于水塘区, 工作垫层厚 2 m, 工作垫层顶部设置 2 m 宽平台, 排水沟设置在该平台上。为减少工后沉降, 管桩之间设置竖向排水体。

两种方案的排水垫层均采用 0.4 m 厚的碎石垫层, 堆载预压+轻质土路堤、管桩复合地基路堤排水垫层伸出平台以上路堤 1.5 m; 真空联合堆载预压+轻质土路堤排水垫层与平台以上路堤等宽。排水板布置宽度与排水垫层宽度相同, 正三角形布置, 间距 1.2 m, 板长 23.0 m。填土前, 碎石垫层上面铺 1 层土工布。

采用直立式轻质土路堤, 轻质土路堤宽 25 m, 轻质土重度 6 kN/m³, 抗压强度 1.2 MPa。真空预压面积与排水垫层面积相同, 抽真空 8 个月。

先施工排水板再施工管桩。为减少管桩施工对排水板的损坏, 排水垫层以上填筑 0.5 m 厚填土后再施工管桩。管桩采用 PHC400B 型, 管桩布置在平台以上路堤坡脚之间, 桩间距 2.4 m, 桩长 28 m。

桩帽边长 1.2 m, 厚 0.35 m, 桩帽设置在填土层中, 采用土模。桩帽以上铺设 0.5 m 厚碎石垫层。管桩复合地基路堤预压 3 个月, 施工期沉降量为 0.4 m。

4.2 堆载预压+轻质土路堤可行性

取 $F_s = 1.3$, 由式 (1) 可得 $T_{f0} = 2.97$ m。由式 (8) 可得 $B = 28.46$ m; 由式 (7) 可得 $T_f = 4.74$ m。

取 $m_s = 1.3$, 由式 (9) 可得 $S_f = 1460$ mm。由式 (10) 可得 $h_{md} = 3.86$ m, 因此堆载预压路堤适用高度小于设计高度。

卸载时固结度取 0.85, 则 $S_t = 1241$ mm, $T_e = 7.91$ m。K 取 1.2, 由式 (11) 可得 $T_l = 6.10$ m, 由式 (12) 可得 $T_l = 2.21$ m, 取 $T_l = 6.10$ m。由式 (13) 可得 $T_r = 3.73$ m。

由式 (14) 可得 $h_{m\eta} = 6.13$ m, 因此, 堆载预压+轻质土路堤适用高度小于设计高度, 不能采用。

4.3 真空联合堆载预压+轻质土路堤

真空度 P_v 取 80 kPa, 由式 (15) 可得 $C_{uv} = 23.5$ kPa。

取 $F_s = 1.3$, 由式 (16) 可得 $T_{f0} = 4.65$ m。由式 (8) 可得 $B = 30.97$ m; 由式 (17) 可得 $T_f = 7.47$ m, 由式 (18) 可得 $T_{vf} = 11.47$ m。取 $m_s = 1.3$, 由式 (19) 可得 $S_f = 3713$ mm。由式 (10) 可得 $h_{md} = 5.24$ m, 因此真空联合堆载预压路堤适用高度小于设计高度。

卸载时固结度取 0.85, 则 $S_t = 3156$ mm, $T_e = 9.05$ m。K 取 1.2, 由式 (20) 可得 $T_l = -1.73$ m, 说明根据应力补偿原理不需要换填轻质土; 由式 (12) 可得 $T_l = 0.62$ m, 取 $T_l = 0.62$ m。由式 (13) 可得 $T_r = 0$ m。

由式 (21) 可得 $h_{mvt} = 15.22$ m。可见, 真空联合堆载预压+轻质土路堤的适用高度远大于堆载预压+轻质土路堤的适用高度。

因此可采用真空联合堆载预压+轻质土路堤。

4.4 简化方法验证

采用理正岩土软土地基路堤、堤坝设计软件进行稳定分析表明 (不考虑沉降引起的路堤增高), 第 4.2 节填土 4.74 m 厚, 地基完全固结时, 最危险滑动面圆心位于坡脚外 3.555 m, 路堤稳定安全系数 1.306; 第 4.3 节填土 7.47 m 厚, 地基完全固结时, 最危险滑动面圆心位于坡脚外 2.134 m, 路堤稳定安全系数 1.272。两种情况的稳定安全系数与 $F_s = 1.3$ 接近或稍小, 说明简化方法是可行的。

4.5 与管桩复合地基路堤的经济比较

碎石垫层综合单价 150 元/m³, 土工布综合单价

6 元/m², 排水板综合单价 4 元/m³, 管桩综合单位 220 元/m, 桩帽综合单价 1200 元/m³, 真空预压综合单价 120 元/m², 路堤普通土综合单位 40 元/m³, 轻质土综合单位 350 元/m³ (包括金属网、护壁等附属结构), 路堤防护综合单价 150 元/m², 征地费用 25 万元/亩。两种方案的工程造价对比见表 1, 表中造价单位为万元。

表 1 工程造价对比

Table 1 Comparison of project cost

项目	排水固结+轻质土		管桩复合地基	
	数量	造价	数量	造价
排水垫层	1389 m ³	20.84	1680 m ³	25.20
排水板	59179 m	23.67	66815 m	26.73
土工布	3573 m ²	2.14	4200 m	2.52
管桩	—	—	188160 m	413.95
桩帽	—	—	339 m ³	40.64
褥垫层	—	—	1815 m ³	27.23
真空预压	3473 m ²	41.67	—	—
路堤土	26868 m ³	107.47	20962 m ³	83.85
轻质土	1550 m ³	54.25	—	—
边坡防护	2010.5 m ²	30.16	2523.9 m ²	37.86
征地	4472.8 m ²	167.65	4900 m ²	183.66
合计	—	447.85	—	841.63

由表 1 可知, 真空联合堆载预压联合轻质土路堤造价约为复合地基路堤造价的 53%, 宜采用真空联合堆载预压+轻质土路堤。

5 结 语

(1) 排水固结+轻质土路堤往往比复合地基路堤经济合理。

(2) 真空联合堆载预压+轻质土路堤的适用高度远大于堆载预压+轻质土路堤的适用高度。

(3) 提出的简易计算方法合理可行。

参考文献:

- [1] 刘志岳, 郭灿. 泡沫轻质土在珠三角地区软基处理中的应用[J]. 广东公路交通, 2018, 2: 45-49.
- [2] 陈忠平. 气泡混合轻质填土新技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2006.
- [3] 龚晓南. 土塑性力学[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1990.
- [4] 沈珠江. 软土工程特性和软土地基设计[J]. 岩土工程学报. 1998, 20(1): 108-110.
- [5] 刘吉福, 陈忠平, 汪建斌. 软基路堤换填轻质土厚度确定方法[J]. 公路, 2019, 4: 31-35.