高速公路长板－短桩工法复合地基的理论与方法研究*

周荣超[1],潘思建[1],叶观宝[2]
(1. 盐城市高速公路工程建设指挥部,江苏 盐城　224001;2. 同济大学 土木工程学院,上海　200092)

摘　要:高速公路深厚软土地基的加固处理是目前软土地区公路或高速公路建设中的技术难点之一。采用长的塑料排水板(或砂井)与短的水泥土搅拌桩联合处理方法(长板－短桩工法,又称 D－M 工法)能有效提高地基的稳定性,将工后沉降控制在一定的范围内。另外,通过桩和板的间距、长度以及预压方式的调整使不同段落之间沉降速率的协调成为可能。

关键词:公路;长板－短桩工法;复合地基;理论与方法;研究
中图分类号:U412.36　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1671－5322(2007)02－0073－06

1　概念模型

高速公路对工后沉降和不同路段的沉降差有比较严格的要求。针对不同特点的软土地基,可以选择换填、强夯、预压排水固结、碎石桩、水泥土搅拌桩、CFG 桩、桩基等不同的技术方案对原地基进行处理和加固。

本文提出的采用长的塑料排水板(或砂井)与短的水泥土搅拌桩联合处理方法(长板－短桩工法,又称 D－M 工法)与单独预压排水法相比,由于"短桩"的存在,有效提高地基的稳定性,可以加快路堤施工速率,从而相应缩短建设周期;与单独深层搅拌桩相比,由于"长板"的存在,可以加快深部软土的固结沉降,从而将工后沉降控制在一定的范围内。

1.1　长板－短桩工法的组成

长板－短桩工法由长的竖向排水体(砂井、袋装砂井、塑料排水板)、短的水泥土搅拌桩(浆喷桩、粉喷桩)和垫层组成(见图 1)。垫层材料由中砂、粗砂、级配砂石或碎石等组成。该垫层是长板－短桩工法的关键,一方面起水平向排水垫层作用,与长的竖向排水体共同组成排水体系;另一

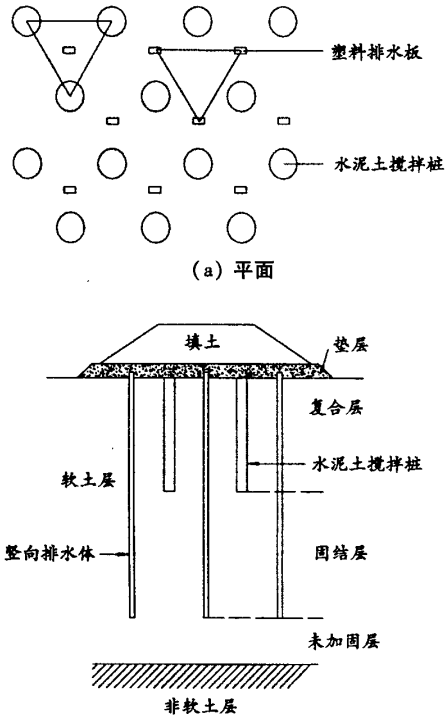

图 1　长板－短桩工法模式图

Fig. 1　Drawing of D－M processing mode

* **收稿日期**:2007－02－21
基金项目:江苏省交通科学研究计划项目(03Y023)
作者简介:周荣超(1970－),男,江苏盐城市人,工程师,硕士,主要研究方向为高速公路项目建设管理。

万方数据

方面起褥垫层作用,可以调整复合层的桩土应力。

1.2 长板 - 短桩工法的布置

在采用长板 - 短桩工法处理深厚软基时,根据该工法作用机理与特点,在地基剖面上应可划分为:a. 水泥土搅拌桩复合地基层(简称复合层);b. 预压排水固结层(简称固结层);c. 未加固处理的原状软土层(简称未加固层);

长板与短桩在平面上可以等间距布置,或不等间距布置;在深度上,长板穿过短桩复合层插入深部软土,可以穿透软土层(较薄时),也可以不穿透软土层(较厚时),具体可按照地基压缩层厚度确定。图 1 中的长板与短桩按等间距布置,长板不穿透软土层。

1.3 长板 - 短桩工法的施工

可以采用先施工水泥土搅拌桩(短桩)、再施工排水体(长板);也可以采用先施工排水体(长板)、再施工水泥土搅拌桩(短桩)。对于含水量较高的地基土,应采用先长板后短桩的施工工艺。

2 长板 - 短桩工法处理软基的机理

长板 - 短桩工法加固软基和消除地基沉降的机理可归纳如下。

2.1 地基的承载力

长板 - 短桩工法处理后,地基的承载力与单独搅拌桩处理的地基承载力相似。即

$$f_{spk} = m\frac{Ra}{A_p} + \beta(1-m)f_{sk} \tag{1}$$

式中:f_{spk}为复合地基承载力特征值(kPa);R_a 为单桩承载力特征值(kN),受有效桩长(或实际桩长)和桩身强度双重控制,取其小者;A_p 为搅拌桩的截面积(m^2);f_{sk}为处理后桩间土承载力特征值(kPa);m 为面积置换率;β 为桩间土承载力折减系数。

$$R_a = u_p\sum_{i=1}^{n} q_{si}l_i + \alpha q_p A_p \tag{2}$$

$$R_a = \eta f_{cu}A_p \tag{3}$$

式中:f_{cu}为与搅拌桩桩身水泥土配比相同的室内加固土试块(边长为 70.7 mm 的立方体,也可采用边长为 50 mm 的立方体)在标准养护条件下 90 d 龄期的立方体抗压强度平均值(kPa);η 为桩身强度折减系数,干法可取 0.20 ~ 0.30;湿法可取 0.25 ~ 0.33;u_p 为桩的周长(m);n 为桩长范围内所划分的土层数;q_{si}为桩周第 i 层土的侧阻力特征值。对淤泥可取 4 ~ 7 kPa;对淤泥质土可取 6 ~ 12 kPa;对软塑状态的粘性土可取 10 ~ 15 kPa;对可塑状态的粘性土可以取 12 ~ 18 kPa;l_i 为桩长范围内第层土的厚度(m);q_p 为桩端地基土未经修正的承载力特征值(kPa),可按现行国家标准《建筑地基基础设计规范》GB 50007 的有关规定确定;α 为桩端天然地基土的承载力折减系数,可取 0.4 ~ 0.6,承载力高时取低值。

对式(2)和式(3)进行分析可以看出,当桩身强度大于式(3)所提出的强度值时,相同桩长的承载力相近,而不同桩长的承载力明显不同。此时桩的承载力由基土支持力控制,增加桩长可提高桩的承载力。当桩身强度低于式(3)所给值时,承载力受桩身强度控制。对水泥土桩,其桩身强度是有一定限制的,也就是说,水泥土桩从承载力角度,存在一有效桩长,单桩承载力在一定程度上并不随桩长的增加而增大。

2.2 桩底平面上的平均附加应力

复合地基最基本的特征是桩与桩间土的协调变形。在施加预压荷载以后,短桩处理的复合层相当于路基下垫层,起到均匀和扩散附加应力的作用,提高在上部荷载作用下地基的整体稳定性,并通过分期加荷来保证桩底固结层地基土不发生剪切破坏。因此,从本质上讲,由半刚性桩与桩间土组成的复合地基中不存在类似桩基中的"群桩效应",在计算桩底平面上附加应力时,不应将复合层按实体基础考虑。

可以按天然地基附加应力计算方法(即 Boussinesq 公式)求解桩底平面上的平均附加应力。在进行简化计算时,也可参照条形基础下软弱下卧层顶面附加应力扩散法按下式计算,并参见图 2:

$$p_z = \frac{bp_k}{b + 2l\tan\theta} \tag{4}$$

式中:p_z 为桩底平面上的平均附加应力(kPa);p_k 为复合地基顶面平均压力值(kPa);b 为路堤平均宽度(荷载分布平均宽度)(m);l 为水泥土搅拌桩桩长(m);θ 为复合层的压力扩散角(°)。

在确定 θ 时,需要根据复合层与固结层的模量比,其中复合层的压缩模量应按面积置换率 m 取桩与土的复合模量,即

$$E_{sp} = mE_p + (1-m)E_s \tag{5}$$

式中:E_{sp}为复合层的压缩模量(MPa);E_p 为水泥土搅拌桩的压缩模量(MPa);E_s 为桩间土的压缩

万方数据

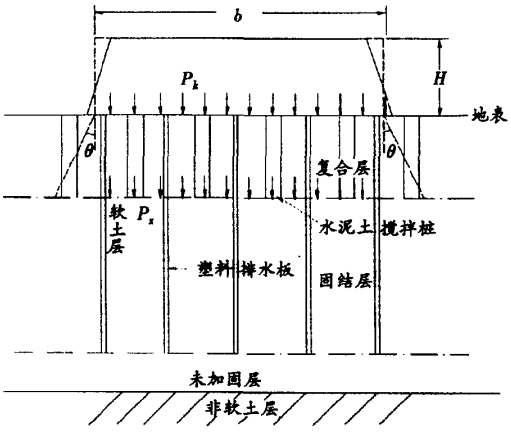

图 2　桩底平面附加应力计算简图

Fig. 2　Sketch for calculating additional stress of pile's bottom plane

模量(MPa)。

同样地,式(5)中桩间土的压缩模量在预压期应该是变量。

2.3　固结层和未加固层的固结度

在上部荷载传至桩底平面的附加应力作用下,固结层和未加固层产生超孔隙水压力,其中固结层产生的超孔压较大,且由于排水板的存在排水较快;在未加固层产生的超孔压较小,且排水固结较慢。

一级或多级等速加载条件下,当固结时间为 t 时,固结层对应总荷载的地基平均固结度可按下式计算:

$$\overline{U}t' = \sum_{i=1}^{n} \frac{\dot{q}_i}{\sum \Delta p}\left[(T_{2i-1} - T_{2i-2}) - \frac{\alpha}{\beta} e^{-\beta t}\left(e^{\beta T_{2i-1}} - e^{\beta T_{2i-2}}\right)\right] \tag{6}$$

式中:$\overline{U}t'$ 为 t 时多级荷载等速加荷修正后的平均固结度(%);$\Sigma \Delta p$ 为各级荷载的累计值;$\dot{q}_i$ 为第 i 级荷载的平均加速度率(kPa/d);T_{2i-2}、T_{2i-1} 为分别为各级等速加荷的起点和终点时间(从零点起算),当计算某一级等速加荷过程中时间的固结度时,则 T_{2i-1} 改为 t。

α、β 见表 1。

表 1　不同条件下平均固结度计算公式

Table 1　Formula for calculating average consolidation degree under different conditions

序号	条件	平均固结度计算公式	α	β	备注
1	竖向排水固结 ($\overline{U}_z > 30\%$)	$\overline{U}_z = 1 - \frac{8}{\pi^2} e^{-\frac{\pi^2 C_v}{4H^2} t}$	$\frac{8}{\pi^2}$	$\frac{\pi^2 C_v}{4H^2}$	Tezaghi 解
2	内径向排水固结	$\overline{U}_r = 1 - e^{-\frac{-8c_h}{F_n d_e^2} t}$	1	$\frac{-8c_h}{F_n d_e^2}$	Barron 解
3	竖向和内径向排水固结(砂井地基平均固结度)	$\overline{U}_{rz} = 1 - \frac{8}{\pi^2} \cdot e^{-(\frac{8c_h}{F_n d_e^2} + \frac{\pi^2 C_v}{4H^2})t}$ $= 1 - (1 - \overline{U}_r)(1 - \overline{U}_z)$	$\frac{8}{\pi^2}$	$\frac{-8c_h}{F_n d_e^2} + \frac{\pi^2 C_v}{4H^2}$	$F_n = \frac{n^2}{n^2 - 1}\ln(n) - \frac{3n^2 - 1}{4n^2}$ $n = \frac{d_e}{d_w}$
4	砂井未贯穿受压土层的平均固结度	$\overline{U} = Q\,\overline{U}_r z + (1 - Q)\overline{U}_z$ $\approx 1 - \frac{8Q}{\pi^2} e^{-(\frac{8c_h}{F_n d_e^2})t}$	$\frac{8}{\pi^2}Q$	$\frac{-8c_h}{F_n d_e^2}$	$Q = \frac{H_1}{H_1 + H_2}$ H_1 - 砂井长度 H_2 - 砂井以下压缩土层厚度
5	外径向排水固结 ($\overline{U} > 60\%$)	$\overline{U}_r = 1 - 0.692 e^{-\frac{5.78c_h}{R^2} t}$	0.692		R - 土柱体半径
6	普遍表达式	$\overline{U} = 1 - \alpha \cdot e^{-\beta \cdot t}$			

万方数据

表中:c_v 为竖向固结系数,$c_v = \frac{k_v(1+e)}{a \cdot \gamma_w}$; c_h 为径向固结系数(或称水平向固结系数),$c_h = \frac{k_h(1+e)}{a \cdot \gamma_w}$; d_e 为每一个砂井有效影响范围的直径;d_w 为砂井直径。

当排水竖井采用挤土方式施工时,应考虑涂抹对土体固结的影响。当竖井的纵向通水量 q_w 与天然土层水平向渗透系数 k_h 的比值较小,且长度又较长时,应考虑井阻影响。瞬时加载条件下,考虑涂抹和井阻影响时,固结层地基径向排水平均固结度可按下式计算:

$$\overline{U_r} = 1 - e^{-\frac{8c_h}{Fd_e^2}t} \tag{7a}$$

$$F = F_n + F_s + F_r \tag{7b}$$

$$F_n = \ln(n) - \frac{3}{4} \quad n \geqslant 15 \tag{7c}$$

$$F_s = [\frac{k_h}{k_s} - 1]s \tag{7d}$$

$$F_r = \frac{\pi^2}{4}\frac{k_h}{q_w} \tag{7e}$$

式中:$\overline{U_r}$为固结层在固结时间 t 时地基径向排水平均固结度;k_h 为固结层天然土层水平向渗透系数(cm/s);k_s 为固结层涂抹区土的水平向渗透系数,可取(cm/s);s 为固结层涂抹区直径与竖井直径的比值,可取 s =2.0~3.0,对中等灵敏粘性土取低值,对高灵敏粘性土取高值;L 为固结层竖井深度(cm);q_w 为固结层竖井纵向通水量,为单位水力梯度下单位时间的排水量(cm^3/s)。

一级或多级等速加荷条件下,考虑涂抹和井阻影响时竖井穿透受压土层固结层地基之平均固结度可按式(6)计算,其中

$$\alpha = \frac{8}{\pi^2}, \beta = \frac{8c_h}{Fd_e^2} + \frac{\pi^2 C_v}{4H^2}。$$

在计算 t 时刻未加固层平均固结度时,可将塑排板底面作为一个排水面,当 $\overline{U_{rz}} \geqslant 30\%$ 时的 $\overline{U_{rz}}$可采用下式计算:

$$\overline{U_z} = 1 - \frac{8}{\pi^2}e^{-\frac{\pi^2 C_v}{4H^2}t} \tag{8}$$

式中符号同上。

2.4 地基的沉降量

长板-短桩工法处理后的地基任一时刻的沉降量都是复合层、固结层和未加固层沉降量之和,而每一层的最终沉降量都包括荷载施加后的瞬时沉降、固结沉降和次固结沉降。为了便于说明本文的问题,这里暂不考虑次固结沉降。

2.4.1 瞬时沉降量

将软土层看作均质地基,由于短桩的存在,复合层的模量与固结层和未加固层的具有明显的不同。因此,在计算地基的瞬时沉降时不应将整个地基的弹性模量视为常数。作为简化处理,可认为固结层和未加固层地基的模量相等,而复合层的弹性模量按式(5)的方法取水泥土搅拌桩和桩间土的复合模量。整个地基的弹性模量按下式取计算深度范围内弹性模量的当量值 $\overline{E}$:

$$\overline{E} = \frac{A_1 + A_2}{A_1/E_1/ + A_2/E_2} \tag{9}$$

式中:E_1、E_2 为复合层与下部软土的弹性模量;A_1、A_2 为复合层与下部软土范围上附加应力面积。

长板-短柱工法处理后地基的瞬时沉降 s_d 按下式估算:

$$s_d = \frac{\omega(1-\mu^2)}{\overline{E}}pb \tag{10}$$

式中:μ 为土的泊松比;p 为均布荷载;b 为荷载的分布宽度;ω 为沉降影响系数,应按柔性矩形分布荷载($l/b \geqslant 100$)取值。

2.4.2 固结沉降量 s_c

地基土的固结沉降的计算方法多采用分层总和法:

$$s_c = \sum_{i=1}^{n}\frac{e_{0i} - e_{1i}}{1 + e_{0i}}\Delta h_i \tag{11}$$

式中:e_{0i}为第 i 层土中点处土自重应力所对应的孔隙比;e_{1i}为第 i 层土中点处土自重应力与附加应力之和所对应的孔隙比;Δh_i 为第 i 层土的分层厚度,在分层时,不同层之间的界面作为当然分层界限;n 为沉降计算深度范围内分层总数。

对于复合层,当面积置换率比较高(布桩较密)时,根据实践经验可以不计其固结沉降量,反之,应计算桩间土的固结沉降量。

2.4.3 最终沉降量

长板-短桩工法处理后的软土地基的最终沉降量应为瞬时沉降、固结沉降、次固结沉降之和,当不考虑次固结沉降时,最终沉降量 s_∞ 表示为:

$$s_\infty = s_d + s_c \tag{12}$$

或者按照经验公式估算地基的最终沉降量:

$$s_\infty = \Psi_s s_c \tag{13}$$

式中 Ψ_s 为沉降计算经验修正系数,通常为 1.1~1.4。

万方数据

则在一级荷载瞬时施加上以后,地基的沉降随时间而不断发展,某一时刻地基的沉降量 s_t 可按下式计算:

$$s_t = s_d + \overline{U}_t s_c \tag{14}$$

式中 $\overline{U}_t - t$ 为 t 时刻地基的平均固结度,可按固结层与未加固层固结度的厚度加权平均取值,其余符号同上。

2.5　长板－短桩工法的设计方法简介

首先应根据路堤高度(荷载)、地基条件(软基厚度与空间分布)和建设周期等条件和要求确定是否适合和有必要采用长板－短桩工法加固软土地基。如果确定应用该联合处理的方法进行加固,可采用如下的思路和方法进行设计。

(1) 根据上部荷载和地基条件,以复合地基承载力为控制原则,进行复合层的初步设计。根据室内配比试验结果确定水泥掺量(桩身强度与刚度),结合地基条件确定有效桩长;以有效桩长为上限,按式(1)调整面积置换率和桩长;以面积置换率进行布桩。即承载力以面积置换率控制;面积置换率以有效桩长控制;有效桩长以桩身强度控制。

(2) 结合搅拌桩的布置,初步确定排水体的布置形式;根据软土层的实际厚度确定排水体的插入深度,并以 25 m 为上限。

(3) 以最后路堤高度作为荷载条件,按式(10)、(11)、(12)或式(13)、(14),计算地基的最终沉降量 s_∞ 和预压期结束时的沉降量 s_t,判断 $\Delta s_t = s_\infty - s_t$ 是否满足相应路段工后沉降设计要求。若满足,进行第(4)步设计计算;若不满足,需要对排水体的间距进行调整,也可调整路堤荷载(如采用超载预压),直至满足为止。

(4) 根据路堤施工的实际情况,按分级加荷或等速加荷等级,按式(4)计算短桩底平面上的附加应力,并验算是否小于排水层的地基承载力;根据附加应力的大小调整加荷速率。

(5) 按式(6)、(8)分别计算在每一级荷载作用下固结层和未加固层的平均固结度,根据经验公式估算地基土的强度变化,并作为下一级加荷的依据。计算预压荷载下饱和粘性土地基中某点的抗剪强度时,应考虑土体原来的固结状态。对正常固结饱和粘性土地基,某点某一时间的抗剪强度可按下式计算:

$$\tau_{ft} = \tau_{f0} + \Delta\sigma_z \cdot U_t \tan\varphi_{cu} \tag{15}$$

式中:τ_{ft} 为 t 时刻该点土的抗剪强度(kPa);τ_{f0} 为地基土的天然抗剪强度(kPa);$\Delta\sigma_z$ 为预压荷载引起的该点的附加竖向应力(kPa);U_t 为该点土的固结度;φ_{cu} 为三轴固结不排水压缩试验求得的土的内摩擦角(°)。

(6) 按第(4)和第(5)步骤确定分级或等速加载计划,直至达到路堤设计高度。

(7) 根据加荷计划,校核工后沉降和稳定性是否满足设计要求。如不满足,需要调整加荷计划或采用超载预压措施,直至满足为止。在实际工程实践中,应进行孔隙水压力和地基沉降监测,并以此作为后续施工速率控制的依据和设计变更的依据。

3　结论

长板－短桩工法处理深厚高速公路软土地基的方案,其特点是将填土施工和预压的过程作为路基处理的过程,充分利用填土荷载加速路基沉降,以达到减小工后沉降的目的。该工法上部采用短桩复合地基可有效提高地基的早期稳定性;竖向排水体的存在,有效地缩短了排水途径,有利于中部固结层地基土在传至桩底的附加应力作用下发生排水固结和下部未加固层的固结沉降,提高沉降速率,可较好地解决深厚软基的工后沉降问题。

参考文献:

[1] 赵玮,叶观宝. 长板－短桩工法软基处理研究[A]. 江苏省高速公路建设论文集[C]. 北京:人民交通出版社,2003.
[2] 张庆松,李术才. 粉喷桩复合地基沉降的影响因素分析[J]. 土工基础,2006,20(6):12－15.
[3] 李彬. 某高速公路塑料排水板处理软基施工实例与效果分析[J]. 中南公路工程,2003,28(4):12－14.
[4] 邓永锋,刘松玉,洪振舜. 水泥土搅拌桩复合地基载荷试验数值分析[J]. 岩土力学,2004(增刊):11－14.

万方数据

Study on the Theory and Method of D – M Processing for Expressway's Composite Foundation

ZHOU Rong – chao[1], PAN Si – jian[1], YE Guan – bao[2]

(1. Yancheng Expressway Engineering Construction Headquarters, Jiangsu Yancheng 224001, China;
2. School of civil Engineering, Tongji University Shanghai City 200092, China)

Abstract: At present, the consolidation processing of the deep soft – soil foundation for expressway is one of the technical difficulties on the highway or expressway construction at the soft – soil area. The Article puts forward the method of joint processing the long plastic draining plate (or sand well) and the short mixed soil – cement pile (also called D – M Processing), which can control the after – work settlement. In addition, by adjusting the distance between the pile and the plate, the lengths and the prepressing mode, it would be possible to coordinate the settlement speed of different parts.

Keywords: expressway; D – M processing; composite foundation; theory and method; study

(上接第 72 页)

参考文献:

[1] 陈幼雄. 井点降水设计与施工[M]. 上海:上海科学普及出版社,2004.
[2] 姚天强. 基坑降水手册[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2006.
[3] 曹所江. 大型基坑流线方程的求解与降水设计[J]. 盐城工学院学报:自然科学版 ,2006,19(3):60 – 63.
[4] 陈希哲. 土力学与地基基础[M]. 北京:清华大学出版社,1982.

An Algorithm of the Estimate of the Sedimentation Capacity with Precipitation Streamline Equation

CAO Suo – Jiang

(Hydraulic Science and Engineering School of Yangzhou University, Jiangsu Yangzhou 225009, China)

Abstract: Foundation ditch precipitation can cause concretion and sedimentation of soil and affect the security of the buildings nearby. The measurement of the sedimentation capacity is associated with the drawdown position of groundwater at certain plain and certain point. According to the sedimentation streamline equation, we can get the estimate of the sedimentation capacity so that we can estimate the sedimentation capacity at any position from the foundation pitch and provide theoretical calculation and reference for judging the sedimentation of buildings and actual influence.

Keywords: streamline equation, estimate of the sedimentation capacity, means of calculation

万方数据