

# 高速公路软土地基 水泥搅拌桩处理设计研究

李 刚 姜献民

(中交第一公路勘察设计研究院 陕西西安 710075)

**摘 要** 结合多条高速公路软土地基处理设计实践,对国内水泥搅拌桩的适用条件,设计方法中一些重要的参数如桩长的设计、无侧限抗压强度取值、稳定计算方法、沉降计算方法等问题进行了研究和探讨,所提观点可供有关设计人员参考和借鉴。

**关键词** 软土 水泥搅拌桩 设计

## 1 引言

搅拌桩法最早起源于美国,称为 MIP 工法,1953 年引入日本后,日本各大企业先后连续开发研制出规格、效率各异的搅拌机械和方法,使这种方法得到了很大的发展和推广应用,我国 1977 年开始由冶金部建筑研究总院和交通部水运规划设计院联合研制,1980 年研究成果通过鉴定,此后广泛用于各类工程中。目前,水泥搅拌桩法(喷浆法和喷粉法,也称湿法和干法)已成为高速公路软土地基处理中一种常用的方法。

水泥搅拌桩加固软土地基的机理主要是通过水泥的水解和水化反应及水泥水化物与黏土的化学反应及碳酸化作用,而形成强度相对较高的桩体与桩周软土一起形成复合地基,以起到提高地基承载力、增强路基稳定性及减少路基沉降的作用。

目前软土地基处理水泥搅拌桩法设计中,存在以下问题尚未完全解决,有待于研究和探讨。

(1) 水泥搅拌桩适用性问题,即水泥搅拌桩法在什么条件下适用?适合采用湿法还是干法?

(2) 稳定分析中无侧限抗压强度取值和影响因素问题?

(3) 稳定、沉降计算方法有几种,哪种较为可靠?

笔者综合分析目前对这些问题的研究现状,并结合几条高速公路软土地基处理实践,对上述问题进行探讨,供类似工程设计和施工人员参考。

## 2 水泥搅拌桩的适用条件

### 2.1 地基条件

《建筑地基处理技术规范》中一般规定:“深层搅拌法适用于处理淤泥、淤泥质土、粉土和含水量较高且地基承载力标准值不大于 120 kPa 的黏性土等地基”。由地基承载力与不排水抗剪强度之间的换算关系,《公路软土地基路堤设计与施工技术规范》(JTJ 017-96)(以下简称《软规》)条文说明中换算出适用水泥搅拌桩处理的软土地基,其不排水抗剪强度的上限值为 45 kPa,不排水抗剪强度是软土地基中常用的、易于获得的指标。事实上,对于强度指标较高的地基中采用搅拌桩处理,往往也是不经济的。当地基土 pH 值小于 4 或天然含水量大于 70 % 时不宜采用,对地基中含有伊利石、氯化物等矿物的黏性土及有机含量高的地基土,加固效果较差,此外,当地基土体中含有碎石、卵石时,使用搅拌桩法,会造成施工困难,使用中需慎重。

高速公路软土地基处理中水泥搅拌桩法已经成为一种常见的方法,具有处理效率高(施工期短、一般要求预压时间短或不需预压)、质量可靠、施工简便等优点。

### 2.2 湿法和干法的选择

水泥搅拌桩目前有喷浆法(湿法)和喷粉法(干法)之分,均通过深层搅拌机械将软土和固化剂强制搅拌,固化剂采用水泥浆液时,称为水泥浆搅拌桩法或湿法,固化剂采用水泥粉时,称为粉体搅拌桩法或干法。

一般认为湿法水泥剂量容易控制,搅拌均匀,成桩质量较为可靠,而干法喷粉量相对较难控制,

搅拌质量不容易控制, 成桩质量相对较差, 湿法质量有保证的成桩长度也比干法成桩长度大, 但干法采用粉体作固化剂, 不再向地基中附加水分, 反而能充分吸收软土的自由水, 因此, 加固后地基的初期强度较高, 特别是对高含水量的软土加固效果显著, 在国外得到广泛应用。国内设计施工中对含水量在 35 % ~ 70 % 之间的软土处理一般采用水泥浆搅拌桩法, 而含水量大于 70 % 时, 多采用粉喷桩法处理。

### 3 设计方法

#### 3.1 桩长的确定

在日本, 水泥搅拌桩最大长度已达 60 m, 是目前世界上采用搅拌桩处理地基中深度最大的, 目前国内水泥搅拌桩最大桩长为 28 m, 《粉体搅拌桩加固软弱土层技术规范》(TB 10113-96) 规定粉喷加固深度不宜超过 15 m。段继伟研究认为, 水泥搅拌桩有效长与桩体模量与被加固软土之间的压缩模量之比相关, 当土体压缩量越小, 有效桩长越长, 对于软土, 一般为 20 ~ 33D (D 为桩体直径)。何开胜、袁文明认为刚度较小的细长水泥土桩确实存在临界桩长, 这与桩体施工质量和刚度大小、受荷面积和作用时间、单桩和群桩作用等密切相关, 由于国内目前规范对水泥土桩还缺乏全长桩身质量检测手段, 不少工程下部软土中由于土的侧压力作用大, 对喷浆、粉产生阻力, 而喷粉浆压力不足, 致使喷灰、浆量降低, 使水泥土搅拌不均, 桩身不连续、强度过低, 以致桩顶荷载难以通过桩身向深处传递, 形成“搁浅”, 当桩身搅拌均匀、强度合格的水泥土桩, 其临界桩长会大大高于 15 m。所以当搅拌桩处理深度较大时, 尤其应选用先进的施工设备、提高施工质量。针对目前国内的施工设备和水平, 采用水泥浆搅拌桩处理地基的最大深度可采用 18m, 粉喷桩处理深度最大可采用 12m。

对于浅薄层软土, 搅拌桩应穿透整个软土层, 并深入软土基底土性较好的土层中 0.5 ~ 1.0 m, 但当软土层厚较大, 无法穿透时, 可采用“悬浮”的方式, 将搅拌桩置于软土层中, 只要满足路基稳定性要求、地基承载力要求和设计使用年限内工后沉降要求即可。

#### 3.2 无侧限抗压强度问题

无侧限抗压强度是水泥搅拌桩设计中一个非常重要的参数, 影响水泥土的无侧限抗压强度的因素

很多, 主要有: 水泥掺入比、龄期、土性、土体含水量、土中有机质含量、水泥标号、外加剂和养护方法等等。

水泥搅拌土的无侧限强度随龄期增长而增长, 龄期超过 28 d, 强度仍有较大增长, 但增长速度已明显减缓, 90 d 龄期后强度增长较小, 《建筑地基处理技术规范》中建议以龄期 90 d 的无侧限抗压强度作为水泥土强度的标准值, 《公路软土地基路堤设计与施工技术规范》中采用 28 d 无侧限强度作为水泥土强度的标准值, 而施工中, 地基处理完成后, 需要一定的时间填筑路基, 而且具有一定的预压期, 粉喷桩长期工作的强度是 90 d 以后的强度, 而施工中都通过监测控制路基填筑速率, 路基稳定性均能保证, 建议设计计算中水泥搅拌桩采用 90 d 龄期强度值。

水泥土强度随水泥掺入比增加而增长, 一般水泥掺入比每增加 2 %, 水泥土强度增加 5 % ~ 20 %, 规范规定范围为 7 % ~ 15 %, 对于高含水量地基, 掺入比 15 % 往往强度难以达到要求, 但当掺入比大于 20 %, 强度增长较小, 且经济性较差, 实际工作中一般取值范围为 7 % ~ 20 %。

水泥土强度和土体性质及含水量也有较大的关系。研究发现, 在相同含水量情况下, 搅拌桩桩体无侧限抗压强度对于粉质黏土比粉土高, 粉土比淤泥质土高, 当塑性指数在 8 ~ 13 时, 水泥土的强度最高。当土层黏土颗粒 (0.0075 mm 以下) 越细, 与水泥结合得越差, 当土质中含有一定的粉粒、砂粒并且级配良好时, 土层与水泥结合效果好; 此外, 有机质含量较大的土中水泥土的无侧限抗压强度较低, 所以, 单纯采用水泥作固化剂效果较差; 而无侧限抗压强度随含水量增大而降低, 通过大量的试验发现, 土样含水量每降低 10 %, 则强度可增加 10 % ~ 50 %。

水泥土的强度随水泥等级的提高而增加。

不同的外掺剂对水泥土强度有着不同的影响, 木质素磺酸钙减水剂对强度的增长影响不大; 石膏、三乙醇胺、氯化钙均能提高水泥土的早期强度 (适当比例时, 增加 10 % ~ 45 %), 三乙醇胺、粉煤灰对长期强度也有一定的增强作用。可采取同时掺加两种以上外掺剂的方法, 以达到多种目的。

养护方法对水泥土强度的影响主要表现在养护的湿度和温度上, 日本的研究表明, 这两个因素主要影响水泥土的早期强度, 而对长期强度影响

较小。

水泥土无侧限抗压强度取值可通过室内试验确定,但室内拌合比实际工程要均匀,所以计算中可取试验强度的 1/3 左右,一般是有保证的。

### 3.3 稳定计算方法

软土路堤稳定性计算方法采用圆弧条分法,按路堤施工期和公路运营期的荷载分别计算抗剪稳定系数。计算方法分为总应力法、固结有效应力法和总强度法等等。总应力法计算假定安全系数时,假定荷载瞬时施加,软土地基的强度参数采用直接快剪指标;固结有效应力法考虑了软土地基在施工荷载作用下,地基强度随固结而逐渐增加的过程,强度参数采用直接快剪指标和固结快剪指标;总强度法进行稳定分析时,直接用实测或估算的总抗剪强度作为计算参数。地基采用水泥搅拌法处理后,加固土桩体的抗剪强度以总强度表示,取为 28 d 龄期无侧限抗压强度的 1/2,也可按设计配合比由室内试验测得 28 d 龄期无侧限抗压强度的 0.3 倍。

总应力法、固结有效应力法,计算参数均采用现场取样、室内试验得到内摩擦角和黏聚力,但在软土地基中取样较为困难,代表性差,加上土样在运输过程中的扰动,以及强度指标试验设备目前以直剪仪为主,还不能大量地采用三轴试验机,试验结果离散性差,可靠度不足;从理论上讲,总强度法适用于计算在透水性极小的饱和软黏土地基(内摩擦角  $\varphi \leq 3.5^\circ$  的情况下),施工期短,地基土没有足够含水量改变时的情况,在其它情况下,计算结果一般较为保守。但总强度法采用十字板强度指标或静力触探试验得到的贯入阻力(单桥探头)和锥尖阻力(双桥探头)换算成十字板强度指标进行计算,由于十字板试验和静力触探试验均为原位测试,操作简便且试验费用较低,强度指标综合反映地基土的强度特性,具有可重复性(多次试验参数离散性小)代表性高,安全可靠。所以,总强度法是软黏土路堤稳定分析中应首先选用的方法。

### 3.4 沉降计算方法

地基沉降量计算一般采用分层法,主固结沉降量采用  $e-p$  曲线法或压缩模量法计算,总沉降量计算采用沉降系数修正法。沉降计算的压缩层厚度按计算层底面的附加应力与有效自重应力之比不大于 0.15 控制。对浅薄层软土,计算到相对硬层为止。

水泥搅拌桩加固软土地基路堤沉降计算方法

有:①《公路软土路堤路堤设计与施工技术规范》方法(应力修正法);②复合模量法;③桩身压缩量法等等。

几种计算方法均将地基沉降分为两部分,即水泥搅拌桩处理深度范围内的加固区沉降( $S_1$ )和加固区下卧层沉降( $S_2$ )两部分。

#### 3.4.1 《公路软土地基路堤设计与施工技术规范》方法(应力修正法)

这种方法属应力修正法,地基采用搅拌桩加固后附加应力增量为加固前地基土附加应力增量的折减值,加固区沉降( $S_{1z}$ )为加固前软土地基的沉降值( $S_1$ )的折减值,而加固区下部沉降( $S_2$ )与原地基计算值相同。

$$S_{1z} = \mu_s S_1 \quad (1)$$

式中: $\mu_s = 1/[1 + (n+1)\eta]$ ,  $\eta$  为桩土置换比。

对这种计算方法,当取桩土应力比  $n=4$ ,桩平面布置为等边三角形时,直径为 0.5 m,桩间距  $B=1.1$  m 时,应力折减系数  $\mu_s = 0.64$ ;  $B=1.2$  m 时,  $\mu_s = 0.68$ ;  $B=1.3$  m 时,  $\mu_s = 0.71$ ,即在上述条件下,加固区采用搅拌桩处理后地基的沉降为处理前沉降的 64%~71%。

#### 3.4.2 复合模量法

将复合地基加固区中桩体(压缩模量  $E_p$ )和桩周土体(压缩模量  $E_s$ )两部分视为一复合土体,采用复合压缩模量( $E_{cs}$ )来评价复合土体的压缩性,采用面积加权平均法时,

$$E_{cs} = \eta E_p + (1 - \eta) E_s \quad (2)$$

桩体压缩模量一般是 28 d 无侧限抗压强度( $c_{u28}$ )的 80 倍,设  $c_{u28} = 0.7$  MPa,  $E_s = 4$  MPa,则  $E_p = 56$  MPa,桩平面布置为等三角形,直径为 0.5 m,相应桩土置换比  $\eta$  和  $E_{cs}$  计算如表 1。

表 1  $\eta$  和  $E_{cs}$  计算值

$B/m$	$\eta$	$E_{cs}/\text{MPa}$	$E_{cs}/E_s$
1.1	0.187	13.72	3.43
1.2	0.157	12.16	3.04
1.3	0.134	10.97	2.74

即在上述条件下,加固区采用搅拌桩处理后地基的沉降为处理前沉降的 29.5%~36.5%。

#### 3.4.3 桩身压缩量法

桩身压缩量法是在荷载作用下,桩体不发生刺入沉降的情况下,通过计算桩身的压缩量确定加固区土层的压缩量,能够避免繁琐的分层计算程序,在桩间土的压缩量等于桩身压缩量的情况下,即桩与土的变形协调时,用这种方法计算结果与复合

# 路堤预应力桩—锚—板结构设计计算理论研究

蒋楚生

(西南交通大学 四川成都 610031)

**摘 要** 预应力桩—锚—板结构已在路堤支挡中大量采用,而设计计算理论,尚未完全成熟,遂介绍对设计计算理论的研究与计算方法。

**关键词** 预应力 桩—锚—板结构 路堤支挡结构 设计计算理论 弹性地基梁

## 1 概述

预应力桩—锚—板结构已在路堤支挡中大量采用,而设计计算理论尚未完全成熟。作者对桩的埋深较大的预应力锚索桩板墙曾进行探讨,现对埋深较小的桩—锚—板结构作一讨论。该结构桩底部仅嵌入地面以下 1~4 m,相当于提供一个支座,侧向土压力主要靠桩上设置的锚索预应力来平衡,故与桩的埋深较大的预应力锚索桩板墙的受力机理有很大差别。

## 2 计算公式推导

对于预应力桩—锚—板结构,可根据其在地面以下的嵌固情况,简化如图 1 所示左侧为自由、铰

支或固定的“弹性地基梁”。

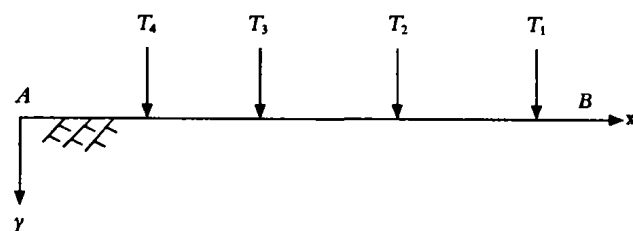


图 1 弹性地基梁计算图示

我们将填土当成弹性地基,根据弹性地基梁理论有梁轴线变形微分方程:

$$EJ \frac{d^4 y}{dx^4} = -dky \quad (1)$$

$$(1) \text{ 式通解为: } y = e^{\beta x} (c_1 \cos \beta x + c_2 \sin \beta x) + e^{-\beta x} (c_3 \cos \beta x + c_4 \sin \beta x) \quad (2)$$

蒋楚生,男,铁道第二勘察设计院高级工程师,在读博士生。

模量法相同,一般认为搅拌桩复合地基桩与土的变形协调。

由上述分析可以看出,对于搅拌桩复合地基加固区沉降值计算方法中,复合模量法和桩身压缩量法计算结果值小,而《软规》计算值大。

对于加固区下卧层地基的沉降计算,相关的问题较多,国内多采用应力扩散法、等效实体法、双层地基法以及《软规》方法进行计算,具体计算过程在此不进行详述。《软规》方法认为下卧层地基的沉降与采用搅拌桩处理前相同,比较之下,《软规》方法计算下卧层地基的沉降值大。从理论上讲,尤其对搅拌桩处理软土地基桩长已穿透软土层而形成复合地基,加固区形成一个相对硬壳层,必然会引起附加应力的扩散,因此,《软规》

方法计算下卧层地基沉降值偏大。

实际工程沉降监测结果证实一般采用《软规》计算搅拌桩复合地基沉降值偏大,而加固区采用复合模量法,下卧层采用应力扩散法计算结果与实际较为吻合。

## 4 结论

通过查阅大量的资料,结合多条高速公路软土地基处理设计实践,对国内外水泥搅拌桩处理软土地基的历史,以及水泥搅拌桩的适用条件和设计方法中一些重要的参数如桩长的设计、无侧限抗压强度取值、稳定计算方法、沉降计算方法等问题进行了研究和探讨,提出的观点可供有关设计人员参考和借鉴。

收稿日期:2004-02-13