挤密法处理地基浅议

强　瑜
（中国石化洛阳石油化工工程公司）

提　要　本文从挤密法处理地基的机理出发，分析了挤密点的部置原则，给出了挤密点间距的计算公式；并着重分析了挤密地基干密度的分布规律，给出了干密度与挤密点距离的关系式。

一　前　言

挤密法处理地基以其诸多优点——工程投资省、施工速度快、场地环境好、承载能力强、压缩模量高、监测结果可靠等而广泛采用，尤其是在湿陷性黄土地区和回填土区域。

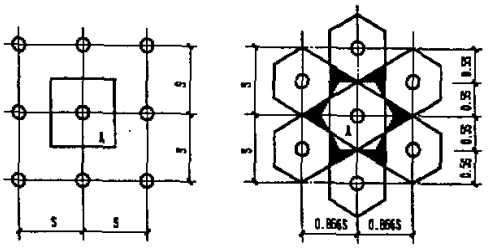
所谓挤密法处理地基就是先采用沉管法、冲击法等把挤密点局部范围内的土体向周围侧向挤出，使其周围一定范围内的土体得到挤密并达到所要求的密实度，从而在挤密点形成一定直径的园孔，再以素土、灰土、砂或其它材料回填夯实，使原来比较松散的天然地基被挤密成能满足工程需要的较为密实的人工地基。我们可以用不同的挤密点的间距来控制平均挤密系数，达到不同的密实度来满足不同的使用要求，使技术经济效果更好。

近年来发展起来的空内深层强夯法,其实是一种能量更大、效果更显著的侧向挤密法。它的实现有两种方法，一种是先用直径 400mm 的长螺旋钻钻出一个园孔，再向孔内填以原土或灰土或建筑垃圾等无机废料，并用下端成锥形重 1.5t 的锤夯击，使之在回填孔的同时，把回填料向周围挤出。由于这种方法的夯击能量大，能把原来只有 400mm 直径的园孔向外挤出并形成直径约 600mm 或更大的密实度极高的土桩、灰土桩、渣土桩，从而使该桩周围较松散的原状土被挤压密实；另一种方法是用直径约 1.0m～1.2m、重约 10～15t 的流线型超重锤提升到 8～10m 高度落下，以 1000～1500Kn-m 的能量在原状土上冲击出一个直径约 1.0～1.2m 的园孔，在这个过程中像沉管挤密一样将周围的土体挤密，当孔冲到一定深度时，再向孔内填以上述土料，并以原锤夯实形成土桩；必要时，还可像钻孔挤密那样利用夯击土进行二次挤密，结果形成直径更大的土桩。孔内深层强夯法形成的人工挤密地基，其承载力较原状土提高很多，通常达到 300kPa 以上，最大可达 600kPa。

评价一种地基处理方法，取决于它的技术经济指标，而技术经济指标又是由一系列参数及其相互间的关系决定的，对于挤密法处理地基来讲，挤密点的布置形式、挤密点的间距和挤密土的干密度的大小是影响它的技术经济效果的主要参数，在此我们加以讨论。

二　挤密点的布置

通常挤密点的布置是以等边三角形形成的所谓“梅花形”和以正方形形成的所谓“方格网形”居多，如图 1 所示。



(a)方格布点　　(b)梅花布点

图 1 挤密布点法及挤密点挤密面积示意图

一般来说不推荐使用“环形”或“径向形”布置。但是，在某种特定条件下，也可采用一些综合布点法，从而取得更好效果。比如大形油罐，它是一个体积很大但自身刚度较小、容易变形的园形构筑物，更由于它多半采用柔性基础、随地基的变形而变形，所以，在一般均匀地基上，油罐基础变形后多成为“锅底形”，即油罐中部沉降较大而油罐边部沉降较小，那么我们就可以通过改变挤密点间距的办法在保证地基强度的前提下，油罐中部布点稍密一点，而边部则稍疏一点，适当提高油罐中部的地基刚度，降低油罐中部的沉降变形，减小油罐沉降量的“中边差”，从而达到改善油罐的变形及其受力状态的目的。而在油罐周边，适当采用“环形”和“径向形”布点来收边不失是一种可行的和较好的方法。

三　挤密点合理间距的确定

挤密点的合理间距是根据天然地基的基本条件和工程需要来确定的，在相同的工程要求前提下，不同的地基条件，挤密间距是不同的，松散的土壤，间距要小一点，而密实土壤，间距要大一点；而在相同地基条件下，对于重要建筑物，间距要小一点，对于次要建筑物，间距可大一点。另外，挤密点的间距还会因不同的布点方式而不同。下面我们根据挤密前后挤密区土体的总质量不变的原理，以不同的土性、不同的工程需要和不同的布点方式为参数，来推导挤密点间距的公式。

1. 当采用“方格网形”布点时

设：S 为“方格网形”布点的间距；

d_n 为挤密孔的直径，即挤密土的内直径；

r_n 为挤密孔的半径，即挤密土的内半径；

λ 为挤密后的平均挤密系数，按规范规定确定；

ρ 为挤密前天然状态下土的平均干密度；

ρ_{max} 为挤密后挤密土的最大干密度，以击实试验确定；

A为每个挤密点的有效挤密面积；$A=S^2$，计算方法见图1。

这里要说明的是，每一个挤密点实际挤密的范围，面积要比 A 大的多，它会对周围所有相邻挤密点的有效面积的一部分进行适度的挤密，反过来周围挤密点在施工过程中又对它进行反挤密，即它失去的能量又被反还回来。所以我们可以认为，每个挤密点在挤密过程中，它的全部能量都消耗在自己的有效挤密面积范围内。因此这个有效面积我们可以理解为它的"分管面积"，即分配给每个挤密点应挤密到设计要求的干密度的挤密面积。但是我们知道，每个挤密点向外挤密作用在所有方向是等效的，所以它的实际有效挤密范围应该为圆形，其半径为

$$r_y=\sqrt{\frac{A}{\pi}}=\sqrt{\frac{S^2}{\pi}}=0.564S \tag{1}$$

或实际有效挤密直径为

$$d_y=1.128S \tag{2}$$

挤密前一个挤密点"分管面积"内的土体总质量为

$$M_q=A\bar{\rho}=S^2\bar{\rho}$$

挤密后一个挤密点实际的挤密有效面积为

$$A_h=S^2-\pi r_n^2$$

挤密后一个挤密点实际的挤密有效面积内的土体总质量为

$$M_h=S^2\bar{\lambda}\rho_{max}-\pi r_n^2\bar{\lambda}\rho_{max}$$

令 $M_q=M_h$ 则有

$$S=0.89d_n\sqrt{\frac{\bar{\lambda}\rho_{max}}{\bar{\lambda}\rho_{max}-\bar{\rho}}}=1.773r_n\sqrt{\frac{\bar{\lambda}\rho_{max}}{\bar{\lambda}\rho_{max}-\bar{\rho}}} \tag{3}$$

式中符号的物理意义同前。

2. 当采用"梅花形"布点时

我们可以根据同样的道理推导出以正三角形组成的"梅花形"布点时挤密点之间的间距公式为

$$S=0.95d_n\sqrt{\frac{\bar{\lambda}\rho_{max}}{\bar{\lambda}\rho_{max}-\bar{\rho}}}=1.9r_n\sqrt{\frac{\bar{\lambda}\rho_{max}}{\bar{\lambda}\rho_{max}-\bar{\rho}}} \tag{4}$$

式中符号的物理意义同前。

不过在此推导过成中，每个挤密点的有效挤密面积（分配面积）的计算如图 1,b)所示，每个挤密点的分管面积由一个以挤密点间距 S 为直径的内接正六边形的面积和六个以二分之一 S 为边长的等边三角形的各三分之一面积所组成，A=0.866 S^2；

实际有效挤密半径为；

$$r_y=\sqrt{\frac{A}{\pi}}=\sqrt{\frac{0.866s^2}{3.1416}}=0.525S \tag{5}$$

实际有效挤密直径为：

$$d_y=1.05S \tag{6}$$

四　挤密区内土体干密度的分布情况

我们已知，每一个挤密点都有一个固定的有效挤密半径，在这个有效半径范围内，土体的平均干密度是满足要求的，而不是在所有的点上它的干密度都能超过我们要求的干密度值。事实上它的干密度是沿着挤密半径变化的，在挤密孔边缘干密度最大，而沿着半径向外辐射状变小，直到有效挤密半径端部变得最小。干密度沿着挤密半径变化问题的提出和解决，对正确地监测工程质量是十分必要的，因为国家规范所给的干密度控制值是一个平均值，不是一个确切的量，监测时很难掌握，若测点距挤密点中心较近，则所测干密度会大于要求的平均值，反之就可能小于要求的平均值。这个问题如果不搞清楚，有时会产生不必要的矛盾，甚至有的建设单位要求施工单位在远离挤密点的地方，在挤密半径的末端或之外也要满足规定的平均值，这实际上是强人所难，因为当土质、挤密点间距、挤密孔径确定之后，位于有效挤密半径端部附近土体干密度无论如何也达不到这个要求。

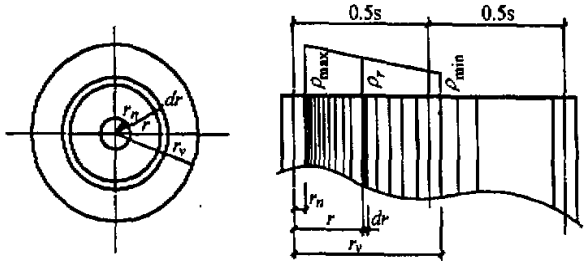
下面我们按直线变化规律，来推导挤密区内干密度随半径的变化关系。

假设条件

1.挤密区域内土质在水平方向上是均匀的；

2.在挤密过程中土体只作径向水平侧移，忽略竖向隆起；

3.近似地认为一个挤密点有效挤密范围内挤密土的干密度沿半径成直线分布，在挤密孔边缘最大，即为 ρ_{max}；在有效挤密半径端部最小，即为 $\lambda_r\rho_{max}$；



(a)平面图　　(b)剖面示意图

图2　挤密区干密度分布图

设在挤密区范围内任意半径 r 处，其干密度为 $\rho_r = \lambda_r \rho_{max}$ 如图 2 所示。
这样我们就可建立关系式如下：

$$\rho_r = \lambda_r \rho_{max} = \rho_{max} - \frac{\rho_{max} - \lambda_y \rho_{max}}{r_y - r_n}(r - r_n) = \rho_{max}[1 - \frac{1 - \lambda_y}{r_y - r_n}(r - r_n)] \quad (7)$$

$$即 \lambda_r = 1 - \frac{1 - \lambda_y}{r_y - r_n}(r - r_n) \quad (8)$$

在式(7)、(8)中，挤密点有效挤密半径端部挤密系数 λ_y 是一个未知量，只要设法求出该值，就可很容易求出挤密点的有效挤密范围内，距挤密点中心任意距离处的干密度 ρ_r 的值。下面我们仍然用有效挤密范围内土体质量不变的原理来求 λ_y。

设位于任意半径 r、径向增量为 dr 的微环土体质量为

$$dM = 2\pi r dr \rho_r$$

其中： ρ_r 如公式(7)所示

根据挤密区内土体总质量不变的原理，在一个挤密点的有效挤密范围内，当任意半径 r 由 r_n 变到 r_y 时，其土体总质量 M 为微环质量 dM 在该范围内的积分，必需等于设计规范规定的平均总质量，即有：

$$M = \int_{r_n}^{r_y} dM = 2\pi \rho_{max} \int_{r_n}^{r_y} \left[1 - \frac{1 - \lambda_y}{r_y - r_n}(r - r_n)\right] r dr = \overline{\lambda} \ \pi \rho_{max}\left(r_y^2 - r_n^2\right)$$

积分后进行整理得

$$\lambda_y = 1 - \frac{3\left(r_y^2 - r_n^2\right)\left(1 - \overline{\lambda}\right)}{2\left(r_y^2 + r_y r_n + r_n^2\right) - 3r_n\left(r_y + r_n\right)} \quad (9)$$

这样我们就很容易求出 λ_y 值，把它代入式(7)和(8)，就可求出挤密范围内任意点的干密度值。

以上是以沉管挤密为对象推导出仅适用于沉管挤密法的一系列公式，而对于钻孔孔内强夯挤密法，设钻孔的直径 d_k 为，半径为 r_k，我们可以根据同样的道理推出以下公式：(a)挤密后土桩半径（被挤密土环内半径）r_n 的确定

$$r_n = \sqrt{\frac{r_y^2 \overline{\lambda} \ \rho_{max} - r_y^2 \overline{\rho} + r_k^2 \overline{\rho}}{\overline{\lambda} \ \rho_{max}}} \quad (0')$$

(b)方格网形布点间距

$$S=1.773\sqrt{\frac{r_n^2\overline{\lambda}\ \rho_{max}-r_k^2\overline{\rho}}{\overline{\lambda}\ \rho_{max}-\overline{\rho}}}=0.89\sqrt{\frac{d_n^2\overline{\lambda}\ \rho_{max}-d_k^2\overline{\rho}}{\overline{\lambda}\ \rho_{max}-\overline{\rho}}} \tag{3'}$$

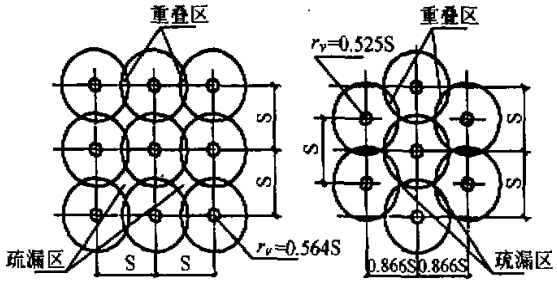
(c)梅花形布点间距

$$S=1.9\sqrt{\frac{r_n^2\overline{\lambda}\ \rho_{max}-r_k^2\overline{\rho}}{\overline{\lambda}\ \rho_{max}-\overline{\rho}}}=0.95\sqrt{\frac{d_n^2\overline{\lambda}\ \rho_{max}-d_k\overline{\rho}}{\overline{\lambda}\ \rho_{max}-\overline{\rho}}} \tag{4'}$$

(d)有效挤密区内土的干密度的公式，对于钻孔孔内深层强夯挤密法任意半径处的挤密系数、干密度以及有效半径处的挤密系数与前面沉管挤密法给出的公式完全相同，这里不再列出。

五　关于两个特殊区块挤密土干密度的意见

无论挤密点如何布置，都会出现有效挤密区相重叠的区块和有效挤密区覆盖不到的区块（称之为疏漏区），如图3所示。这两个区块挤密土的干密度的确定应该有别于其它部位。在重叠区块受两个挤密点的作用，干密度会有所提高，但不会是提高系数的平方关系，因为相邻疏漏区块干密度较小，重叠区块的土有向疏漏区块‘流动’的趋势，所以重叠区块应予以折减，而疏漏区块则应予以提高。下面所给出的建议值是根据一些工程反算而来，有待试验作进一步修正。



(a) 方格布点　　(b) 梅花布点

图3　挤密作用区块图

1. 重叠区块

重叠区块位于两个挤密点直线距离之中部，由前面的公式我们已经知道，有效挤密半径大于挤密点间距的一半，所以两个挤密点都对该块有挤密作用，笔者认为该块挤密土的干密度可用 $r=0.5S$ 处的干密度来代表。并建议

$$\rho_{co}=\eta_{co}\frac{\rho_{0.5s}^2}{\overline{\rho}} \tag{10}$$

式中：η_{co} 为重叠区干密度修正系数，建议取 0.88~0.92

2. 疏漏区块

所谓疏漏其实并不是实际意义上的疏漏，只是针对有效挤密半径而言，实际上该区仍然受到周围挤密点的挤密作用，所以我们仍然可以用求任意点干密度的公式来确定该区的干密度。同样我们用距周围各挤密点最远的点的干密度作为该区干密度的代表值。并建议

$$\rho_{so} = \eta_{so}\rho_{yu} \tag{11}$$

式中：ρ_{so} 为距各挤密点最远点挤密土的干密度，用(7)求出；

η_{so} 为疏漏区干密度修正系数，建议取 1.04~1.06

六 结束语

挤密法处理地基是改善原状土而形成的复合地基，不需其它建筑材料且施工方法简单，所以造价低廉；无论是沉管法还是钻孔孔内深层强夯法，处理深度都较大，目前沉管法处理的深度可达 12m，孔内深层强夯法可达 25m，因而处理厚度大，而且它可以根据工程需要达到很高的承载力及很大的刚度，所以挤密法处理地基是一种比较理想的方法，但由于它的发展时间比较短，许多问题有待进一步研究。