

深厚饱和软粘土中薄硬夹层 作桩基持力层的工程实践

蔡杉岭*

1. 概 况

宁波地区地层中,广泛分布着如图1所示的土层:在深厚的饱和淤泥质土层中间,夹有一层较薄的粘土或粉细砂粘土的土层。大量的桩基工程(如静压扩头灌注桩)实施中,将此薄层作为桩基持力层,取得了良好的经济效益。最近又有人采用预制大头桩靴,亦利用此薄层,致使工艺简化,取得了成功并推广使用。

有时,上述薄层仅0.8m厚。但只要采用适当的施工工艺,均可取得成功,如表1所示。笔者曾在1989年第二届全国地基处理学术讨论会上提出这一研究课题,后又经一段时间的实践和探索,特将研究的体会,介绍如下,以期抛砖引玉

薄硬夹层在宁波地区发现的深度一般在12~17m之间,在一定范围内没有明显的起伏。不同深度的薄层密度厚度不同:浅者密度较小厚度较薄;而深者则密度和厚度均较大。

薄硬夹层其深度和厚度的均匀性可以这样解释:它不是单纯地由冲积或沉积形成的土层。按照饱和淤泥质土的易流动性,可推断此层理土层,是从冲积和沉积下来的土层,按悬浮体形成的规律,由不平衡状态而渐趋于平衡的。在移动时由于受粘滞力作用,致使平衡过程缓慢,长年累月才形成了均匀薄层。此薄层因具有潜体性质,则可称为悬浮体。因其有无限的含义,所以又可称之为无限悬浮板带。

从工程上来说,在相当有限范围内,其板带的厚度、强度和深度几乎是相同的,可按深度相同的等强度、等厚度板带视之。实践中,采用正常沉桩速度的静压沉桩工艺,压桩力取

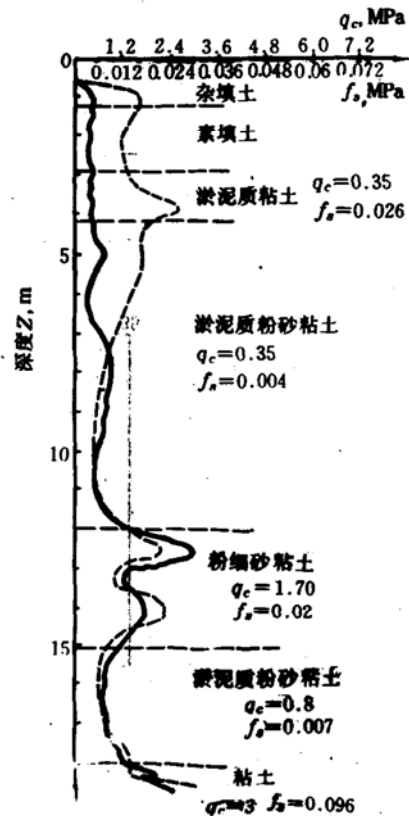


图1 宁波地区薄层分布一例

*原工作单位: 宁波市机电设计院。
到稿日期: 1991-12-07.

0.5~0.7 q_u , 板带不会遭到破坏, 激振沉桩和锤击沉桩均不宜使用于薄层板带。

根据几十个利用薄层板带制做静压扩头灌注桩的工程成功经验, 认为在下列条件下可以利用悬浮薄板带作为静压扩头灌注桩持力层:

$$\text{a)} \quad q_{c\text{板}} \leq \frac{1}{2} q_{c\text{桩}} \quad q_{c\text{桩}} \geq 1\text{MPa} \quad (1)$$

b) 静压扩头压桩力不大于 $\frac{1}{2}q_u$ 。其中, q_u 系根据静力触探所取得的成果进行理论换算得来的单桩极限承载力。这里可不考虑单桩在淤泥质土摩阻力的折减系数。这是因为静压扩头沉桩时取的压桩力 $\frac{1}{2}q_u$ 已包含此因素在内。

表1

扩头灌注桩实例

工程名称	上部构造			桩 型			板 带		备 注
	幢数及 建筑面积 (m^2)	层数	结构	桩径 (mm)	桩长 (m)	单桩允许 承载力 (kN)	厚度 (m)	q_c (MPa)	
传染病医院Ⅱ区病房楼	1幢 3242	4	框架	$\phi 325$	15	(120)170	0.8	1.9	传染病Ⅱ区病房楼工程原设计采用了桩筏共同作用的基础, 要求单桩允许承载力定为120kN, 而实际得到单桩允许承载力为170kN。括号内为原设计的单桩允许承载力。
传染病医院职工住宅楼	1000	6	砖混	$\phi 325$	15	170	0.8	1.9	
化机厂烘干车间	2幢 6000	2	框架	$\phi 377$	16	200	0.8	1.3	
工商学校学生宿舍楼	2幢 3000	6	砖混	$\phi 325$	15	170	0.8	1.5	
粮食干校综合楼	1幢	4	框架	$\phi 377$	14	170	1.5	1.3	
化工局住宅楼	2幢	6	砖混	$\phi 325$	14	200	1.0	1.2	
供销干校综合楼	1000	5	框架	$\phi 377$	14	180	1~1.5	1.3	
大梁街住宅小区	10000	6	砖混	$\phi 377$	15	250	0.9~1.5	1.15	
浙江省医药专科学校	2幢 3000	5	砖混	$\phi 325$	12	180	0.7~1.2	1	

在桩基工程实践中, 曾采用水冲法将桩拔起。在单桩静载测试中, 所得 $P-S$ 曲线是一条光滑曲线。同时, 简易地采用以75%极限承载力的压桩力进行跑桩测试, 可获得无垂直位移(沉降)的试桩现象; 即使个别桩出现微小沉降(不大于3mm), 也不影响单桩侧壁摩阻力遭受损失的可能。出现上述微小变形, 可能由下列各因素所致:

- (1) 桩体混凝土本身的压缩变形。因为一般在跑桩测试中, 桩身混凝土还未达到一定强度;
- (2) 桩穿入板带过深或其它施工问题, 致使扩头成型不理想而造成变形;
- (3) 局部土层有可能尖灭, 引起尖端土的压缩效应。

综上所述, 用板带所作的静压扩头桩其承载力效果是良好的。所以不但可从技术经济效益方面进行探讨; 而且还可以从桩型发挥效能方面进行理论上的探讨。

根据板带形成的解释, 引入了悬浮体原理, 得出无限板带浮力是巨大的推论。桩尖停留在板带面上, 不仅依赖于板带自身强度, 而且, 端承力的发挥还与板带深度和其无限板带所形成的浮力有关。因此, 有限的单桩荷载施加于无限的板带面, 对板带变形来说是极微小的。正如稳定的坚实板面上竖立着细小的直杆。只要单桩承受的荷载不使板带遭受破坏即可。另

一方面, 由于桩尖扩了头, 使桩端受力由原来的集中力改变成面力, 更有利于改善桩在板带面上的受力性能。

2. 文克勒地基模型的引入和解释

假设的文克勒地基模型用于浅基础的力学解释, 经过修正已取得实用上成效。对于埋藏在深厚淤泥质土中的薄硬夹层, 若将其视为半无限空间弹性连续板带, 则可按弹性理论基本假设处理。实际上, 此深厚淤泥质土均为饱和状态近乎液态, 上述夹层可视为近似于流体中飘浮着可忽略其剪应力的薄板带。按阿基米德原理, 悬浮板带处于平衡状态时, 则潜体微元面的浮力(垂直向上)为

$$dP_z = \gamma'_s \cdot h \cdot dA + \gamma'_s \cdot dV \quad (2)$$

式中 dP_z 为微元面浮力; γ'_s 为淤泥土的容重; dA 为微元面投影面积; dV 为液表面下微元面投影面的柱形体积。这正是潜体分割微元面排开液体的重量, 其总压力的水平分力为零。由于板带是无限的, 积分后所得总浮力是巨大的。这一点不同于文克勒模型用于浅基时的解释。所以, 当板带局部受一有限的外力时, 若其: ①不超过式(2)等号右端任一项的垂直力; ②不使板带遭受到破坏。则板带承受外力后变形是不明显的。

3. 板带强度理论

在考虑施加于板带的外力远小于其内应力情况下, 按自由能极小的条件, 通过变分 δF 与板势能 δU 之和为零, 则可将空间问题按平面问题来解析, 推出板带平衡方程为

$$D\Delta^2\omega - P = 0 \quad (3)$$

式中 D 为抗弯刚度, $D = Eh^3/12(1-\mu)$, 其中 E 为板带土层的弹性模量; h 为板厚; μ 为泊松比; Δ 为拉普拉斯算子; ω 为板中性面上点的位移(即坐标 Z); P 为垂直作用于板面上的外力(设潜体无体积力)。

由于板带为无限连续体, 当受外力不大, 产生弯曲很小时, 板带边缘是自由的。即在无外力作用的情况下, 变分 $\partial\omega$ 和 $\delta\frac{\partial\omega}{\partial n}$ 是任意的。且其周线积分中, 位于这些变分前的系数等于零。因此其自由边界条件满足:

$$-\frac{\partial\Delta\omega}{\partial n} + (1-\mu)\frac{\partial}{\partial L}\left\{\cos\theta\sin\theta\left(\frac{\partial^2\omega}{\partial x^2} - \frac{\partial^2\omega}{\partial y^2}\right)\right\} + (\sin^2\theta - \cos^2\theta)\frac{\partial^2\omega}{\partial x\partial y} = 0 \quad (4)$$

$$\Delta\omega + (1-\mu)\left\{2\sin\theta\cos\theta\frac{\partial^2\omega}{\partial x\partial y} - \sin^2\theta\frac{\partial^2\omega}{\partial x^2} - \cos^2\theta\frac{\partial^2\omega}{\partial y^2}\right\} = 0 \quad (5)$$

对该土层来说, 已知内应力是由物体分子间相互作用引起的。在粘土中, 它还与凝聚力 c 有关。在确定式(3)中的 E , μ 数值后, 再进行 Δ^2 的演算, 就能获得 P 的大小。

Δ^2 是中性面上点位移梯度取散度型式的平方, 即

$$\Delta^2\omega = |\text{div}(\text{grad}\omega)|^2 \quad (6)$$

其物理意义是板带中性面受一集中的法向力后转角与任意点至作用点距离之比。从材料力学得知: $\theta = \frac{M}{D}$, 其中 $M = LP$, 则 $\frac{\theta}{L} = \frac{P}{D}$ 。由于板带四周是自由的, 因此 $M = 0$ 。但 P 为常量,

因此只有除 $L=0$ 外的无限小量, 否则就无意义。且 $\frac{P}{D}$ 可为任意小, 因此量 θ 也是任意小。

说明板带受有限外力时, 其点位移量极小。因此, 对式(6)条件是满足的。

已知在有限外力 P 时, 其转角 θ 甚小, 因此对板带土层, 只要在承受桩端轴力能满足所引起的剪应力小于土层的抗剪强度, 保证不发生剪切破坏即可, 即:

在砂土中: $\tau_{\max} < S = \sigma_z \tan \phi$

在粘土中: $\tau_{\max} < S = \sigma_z \tan \phi + c$

这就是本文提出的板带强度理论。

4. 板带受力分析

单桩、单排桩和群桩对板带受力影响有所不同, 特分别予以讨论。

(1) 视板带为一均匀弹性体, 它的边界平面伸展至无穷远处。在边界面受一有限线段的均布垂直力作用, 其方向假定与纸面垂直, 此时在弹性体内的应力分布如何? 若取一单位板宽, P 是单位厚度的荷载, 则可得弹性体的某一平面边界上受较长均布垂直力情况下应力的近似解。显然, 在作用点附近的应力不是有限的。但是实际上力的作用有一定面积, 作用点的应力又不会是无限的。集中力作用下的数字解不适用于作用点附近。作用点以外区域采用圣维南原则, 却能近乎实际情况。在近似解中, 将 P 作为单位宽度的荷载, 这样显示其应力分布是简单的, 即

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial \theta} + f_r = 0 \quad (7)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial r} + \frac{2\tau_{r\theta}}{r} + f_\theta = 0 \quad (8)$$

此时, 离集中力作用点距离为 r 及和 X 轴成 θ 角的元面 c 的应力分布为

$$\sigma_r = -K \frac{\cos \theta}{r} \quad \sigma_\theta = 0 \quad \tau_{r\theta} = 0$$

式中 常数 $K = 2P/\pi$; P 为垂直于边界面的合力。

从上式可知, 与矢径 r 垂直的元面 c 为主平面, 剪应力为零。取 $r = \frac{h}{2}$, 那么除 X 轴外, 可取 P 为极小值, 又知

$$P \leq \frac{\sigma_r r \pi}{2 \cos \theta}$$

当 $\theta = 0$ 时, 则得

$$P \leq \sigma_r r \pi / 2 = \sigma_r h \pi / 4 \quad (9)$$

这是单桩或单排桩受力情况下获得的 P 值解法(图略)。

(2) 当受到群桩的垂直力时, 设此荷载强度分布为 $P(y)$, 在 AB 面上微元 dy 内的荷载为 Pdy , 任取一点 o 为原点, 这样便有:

$$Pdy = P \frac{rd\theta}{\cos \theta} \quad (10)$$

由于 Pdy 在点 o 处所产生应力应是

$$\Delta \sigma_r = -\frac{2Pdy}{\pi} \cdot \frac{\cos \theta}{r} = -\frac{2P}{\pi} d\theta$$

假如荷载是均匀的, 则 P 为常数, 积分后得

$$\sigma_x = -\frac{P}{2\pi} (2\theta_2 - 2\theta_1 + \sin 2\theta_2 - \sin 2\theta_1) \quad (11)$$

$$\sigma_y = -\frac{P}{2\pi}(2\theta_2 - 2\theta_1 - \sin 2\theta_2 + \sin 2\theta_1) \quad (12)$$

$$\tau_{xy} = -\frac{P}{2\pi} \quad (13)$$

在 $\theta_1 = -\theta_2$ 时, 正应力最大, 剪应力为零, 这与实际情况是符合的。以此限定 P 值, 即群桩对板带的受力解(图略)。

5. 土自重应力对板带的影响

将淤泥层中间的板带视为流体中飘流着的薄板带, 符合牛顿流体的要求(实际上真正的牛顿流体是不存在的), 那么在静止或相对静止状态, 不存在切应力。又根据压力体的概念: 实压力体与虚压力体的两个垂直分力代数和等于零这一事实, 即液态内板带处于平衡状态时, 其垂直分力之和与水平分力等于零。这说明板带以上部分土层无自重应力影响于板带。其理由是:

- (1) 板带是介于单一的而非多层各异的淤泥质土中间。板带上下层的土性几乎相等;
- (2) 板带深度在地表以下12~17m, 其含水量饱和和稳定近乎液态。

当然, 将板带作为桩基持力层, 就需将闭管从地表经过上层, 沉至板带顶面而成桩。这个过程致使结构性的上层土起一定变化, 即上层土的滑动。滑动与加速度有关。只是流体流动的粘滞作用, 在板带上层淤泥作匀速运动时, 到板面和板底面发生了不同速度的运动状态。板带虽是无限体, 其两层上仍相互发生作用与反作用力。使板面上运动减速, 板带面下运动加速。这一对力在流体内部是内摩擦力与粘性无关。此时对板带表面是产生剪应力 τ 。因淤泥土具有可压缩性, 当沉管桩尖下土层形成的太沙基变形模型, 却不产生流管现象, 无明显边界。因其具有压缩性, 则向四周运动的淤泥速度迅速减弱, 所产生力 τ 因减速而减弱, 形成涡流。同时由于板带上、下无明显层理, 则可视作粗糙表面。如此使流体动能损失很大。层厚愈厚, 速度梯度就愈小, 则边界面 X , Y 方向的 σ_x , σ_y 可忽略不计。因此一根桩沉入造成上层液态土的滑动速度并不影响无限板带应力的变化。

应力 σ_z 和沉管力及速度有关。为避免遭受穿透破坏, 应使 σ_z 符合下列关系式:

$$m(q+a) < A\sigma_z \quad (14)$$

6. 扩底灌注桩的施工要领

沉管在板带顶面进行静压扩底, 其顺序是: ①沉外模管至板带顶面; ②在外模管内灌足扩头的混凝土; ③插入内芯管, 顶住混凝土面; ④提外模管至所需扩底高度然后固定之; ⑤压内芯管使混凝土扩散; ⑥松外模管连同内芯管同步压至桩靴顶面。对扩底部位土体流散情况进行分析, 得到如下基本模型:

- (1) 顶住内芯管, 提外模管。此时模管下的混凝土不受外模管约束。趁压下内芯管使底部混凝土流散扩大。此时由于上层土自重压力作用于散流的混凝土上, 则呈图2(a)的形状;
- (2) 内芯管顶与外模管顶齐平, 同时同步压至桩靴顶时, 由于外模管外壁挤压作用, 则呈图2(b)的形状。

扩底模型的形成与上层土自重压力和扩底处土侧压力有关。对侧压力大的土层进行扩底, 非但扩不了底, 而且还会在内芯管释压时, 使混凝土挤进模管内。更为严重的是, 由于压桩

力过大,可能出现板带穿透的不良后果。

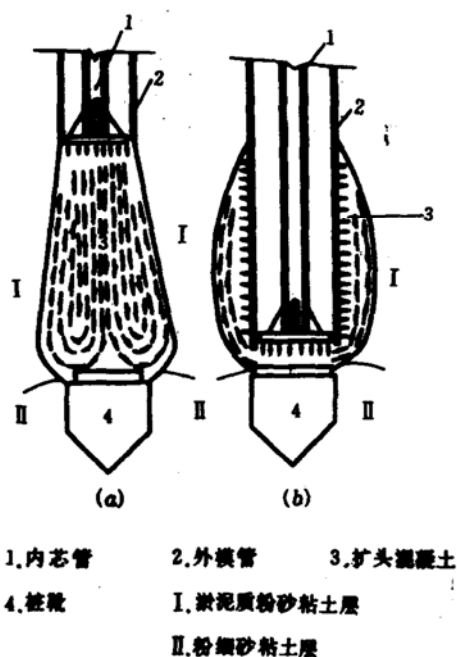


图2 扩头形状

7. 结 语

(1) 实践证实了扩底灌注桩较预制桩或混凝土灌注桩有更好的经济技术效益和社会效益。有关技经比较, 见表2。

表2

不同桩型技术经济比较

桩 型	持力层深度(m)	单桩承载力(kN)	水泥用量比(%)	钢筋用量比(%)
扩底灌注桩	12	150	83.5	44.3
灌注桩	18.5	180	105.1	70.1
低配筋预制桩*	19	200	100	100

*低配筋系指含筋率<8%者。

(2) 综上所述, 扩底灌注桩的施工要求是非常高的。施工工艺稍有失当, 就会有穿透薄板层的危险。即使在较厚的板带进行施工, 也要重视施工工艺的掌握和选择。

附志: 本文曾以“软粘土中薄层板带力学解析和实用价值”为题, 作《第二届全国地基处理学术讨论会》的讨论稿。后又在实践中充实了一些内容, 撰写成此文。限于水平, 不妥之处, 请读者批评指正。