

地基强夯加固处理技术方案

1. 强夯法简介

(1) 强夯法加固软土地基是 70 年代盛行的软基加固法。最早是法国梅那达公司 (LOUIS MENARD TECHNIQUE) 开始研制。它是我国古老浅层打夯法的发展, 浅层打夯法和强夯法的主要区别在于前者夯击能量小, 仅适用于含水量较低的回填土表层加固, 影响深度为 1~2m, 而强夯法可以深层软基加固, 加固深度和能量远远超过打夯法。

(2) 目前多数学术观点认为, 土体在重级落锤的夯击下, 使相当大的功能瞬间形成土体的压缩变形, 同时由于土体的压密变形产生相当高的孔隙水压力和剪切裂缝变形, 使夯点和未夯区域形成相当巨大的孔隙水压力梯度, 在土体变形影响下孔隙水压力的穿击作用形成很多很密的分子排水网系, 增加了饱和土的渗透性, 随着夯击能量的加大, 孔隙水压不断提高, 当孔隙水压力达到饱和状态时土体开始液化, 孔隙水主沿着裂缝 (或夹砂层) 排出, 反复夯击, 土体所复进行上述变化, 颗粒间距变小, 密度变大, 土体的粘滞力和摩擦角增加, 强度得到提高。

(3) 夯击时土体强度提高过程示意:

夯击能量转化 (瞬间 $t \approx 0$) \rightarrow 夯击能量 E (土体压密, 沉降 ΔS ; 土体变形瞬间转化内挤压力 $\Delta P = \Delta U$) \rightarrow 土体液化 (土体结构破坏, 强度降低; 强度 $P \rightarrow 0$) \rightarrow 排水固结、土体密实 \rightarrow 主固结 ($t \approx$ 几星期) (时间 T 上升孔隙水沿裂缝排水; 孔隙水压力 ΔU 下降) \rightarrow 颗粒间距缩小 \rightarrow 土体强度提高 \rightarrow 次固结 ($t \approx$ 几个月) 部分自由水又变成薄膜水; 土体结构重

新组合) → 强度再次提高

2. 强夯法设计

(1) 有效加固深度应根据现场试夯或当地经验确定, 也可按以下经验公式估算:

$$h = \sqrt{\alpha Q \times H}$$

式中: h ——有效加固深度 (m);

Q ——锤重 (t);

H ——有效落距 (m);

α ——修正系数, 可取 0.6~0.8, 若地基中设置排水通道时, α 可适当提高

(2) 强夯的单位夯击能量, 应根据土基类别、结构类型、荷载大小和要求处理的深度等因素综合考虑; 亦可通过现场试夯确定。在一般情况下, 对砂性土可取 $1000 \sim 5000 \text{ kN} \cdot \text{m}/\text{m}^2$; 粘性土可取 $1500 \sim 6000 \text{ kN} \cdot \text{m}/\text{m}^2$ 。

(3) 强夯技术参数分别宜按下列不同情况确定:

1) 夯点布置: 根据建筑物结构类型、地基土情况和要求的处理深度确定。

A. 对大面积基础, 宜采用正方形插挡法布置。

B. 对条形基础, 可采用点线插档法布置。

C. 对桩基, 可采用点夯法夯击。

D. 对强夯挤淤, 可采用排夯法加固 (锤印彼此搭接 200~300mm)。

E. 当要求加固深度较大时, 可采用二次夯击 (即在较低标高上夯完

后，再将土填到设计标高，进行第二次夯击）。

2) 夯点间距：宜根据建筑物结构类型、土层厚度和地质条件（或通过试夯）确定；对厚度大各土质差的软弱土层第一遍夯点间距宜为 6~8m；对土层较薄的砂土或回填土，第一遍夯点间距宜为 4~7m。

3) 每个夯点夯击数：应根据土层厚度、表层情况及使用要求确定。要求夯击时土层垂直压缩量最大，水平位移情况小，一般为 5~10 击；软弱土层厚度大，表层土较硬或使用荷载较大时，可用大值，一般应满足下列情况：

A. 用前后两击累计沉降差控制：

$$\Delta S = \Sigma S_n - \Sigma S_{n-1} \leq 50 \sim 100 \text{mm}$$

式中： ΔS ——前后两击沉降差（mm）

ΣS_n 、 ΣS_{n-1} ——分别为前后两击累计沉降量（mm）

B. 对粘性土，锤底静压力应小于 30Kpa；对砂性土，锤底静压力可大于 30Kpa；

C. 夯坑周围地面不应发生过大的隆起；

D. 不因夯坑而发生锤困难。

4) 前后两遍夯击间歇时间：取决于土中超孔隙水压力的消散情况，当缺少实测资料时，可根据地基土的渗透性确定。对粘性和粉性土，含水量高、软弱土层较厚、渗透性较差的，一般间歇 2~4 周；对砂性土，地下水位较低或含水量较小的回填土、以及其他渗透性较好的地基可不考虑间歇时间。

5) 夯击遍数：应根据地基土的性质和使用要求确定，一般情况下夯

2~4 遍。对压缩层厚度大、渗透系数小、含水量高，用大值，反之用小值。

设计时也可用下列公式控制：

$$\sum S_i = (0.6 \sim 0.8) S_{\infty}$$

式中 S_i ——夯击各遍沉降量之和（mm）

S_{∞} ——计算的最终沉降量值（mm）

最后应以低能量普夯击一遍，用以加固表层松土。

6) 夯击范围：夯击范围应大于建筑物基础范围，可按下列公式计算：

$$A = (B + 1/3 - h) \cdot (L + 1/3 - h)$$

式中 A ——夯击范围（m²）

B, L ——分别为加固区的宽度与长度（m）

h ——设计有效加固深度（m）

每边超出基础外缘的宽度不宜小于 2m。

7) 要求有效加固深度大于 8m 时或加固淤泥质粘性土时，可预先在地基中打入塑料水带或袋装砂井后再进行夯击。

3. 强夯法施工程序步骤

(1) 清理芦苇及杂草平整场区，平整后的场地标高差应在 ±20cm 内。

(1) 引测控制基线、基准点，形成“+”字形测量控制网。

(2) 小螺钻探摸取样，分析土质情况，根据土质分布情况合理布置高真空排水井点管。

(3) 预埋水位观测管和孔隙压力计，埋深 4.0m，用以掌握强夯后土

层中孔隙水压力的增长和消散情况，科学地确定二遍夯击的间隙时间（暂定不少于 7 天）。

（4）采用 $10\text{m} \times 10\text{m}$ 方格网测量地面沉降初始值，压力测定孔隙水压力计和地下水位的初读数。

（5）分二次布置高真空排水设备：

1) 降水前必须在试验区处围 5 米处挖设排水明沟，明沟深 1.5 米，底宽 1 米，边坡 1:2，区域明沟相互贯通。

2) 在降水明沟内侧布置小区处围封闭管，外围封闭管与明沟一样要求相互贯通，外围封闭管井点管间距为 2 米，距小区边线距离为 4 米。

3) 第一次降水：分深浅两种井点管（深管为 4~7m，浅管为 2.5~4.0m），井点管间距为 5m，井点管间距为 4m，深管、浅管间隔布置。降水完成后拆除进行强夯。

4) 第二次降水：与第一次降水相同。

（7）强夯施工按二遍进行，夯点间距 $3.5\text{m} \times 4\text{m}$ ，呈梅花型布置，第一遍每夯点夯二击，夯击能量为：1 号试验段 $1000 \text{ kn} \cdot \text{m}$ ，2 号试验段 $800 \text{ kn} \cdot \text{m}$ ，第二遍每夯点夯二击，夯击能量为：1 号试验段为 $1350 \text{ kn} \cdot \text{m}$ ，2 号试验段为 $1200 \text{ kn} \cdot \text{m}$ 。

（8）第一次降水地下水位降至地面以下 2.5m，拆除小区内降水管，外围封闭管继续抽水，然后进行第一遍强夯。施工时宜从一侧向另一侧施工，确保强夯后的孔隙水压力的释放。第一次强夯结束后推平后，需立即进行第二次插管降水，加速强夯后孔隙水压力的消散。第二次降水水位降至地面以下 3~3.5m 后，拆除施工区域内井点管，保留外围封闭管，进行

第二遍强夯。

(9) 每遍强夯后，将场地用推土机推平后适当碾压，进行地面沉降、孔隙水压力、地下水位观测，满足设计规定的间隙期后再进行第二遍的夯击。

4. 强夯法施工工艺

(1) 井位布置：按井位设计平面图安置抽水机组、总管。

(2) 成孔：水冲法成孔，外径约 150mm。

(3) 下井管：孔深度达到设计要求才能下管，管顶外露约 200mm。

(4) 填滤砂：采取动水投砂，当成孔逐步澄清，即投砂（可采用现场的粉细砂）在管井周围均匀回填，孔口 50cm 用淤泥封死。

(5) 设备安装：井点管与总管、真空泵机组连接后，进行运行调试，检查是否有漏气及死管的情况，发现问题及时采取措施进行补救。

(6) 抽水运行：真空泵机组安装真空表，注意真空度情况的变化，出水应先浊后清。

(7) 进行 24 小时水位跟踪观测，水位下降达到设计要求后，方可拆除，进行强夯。

(8) 如土层中有淤泥质黏土存在，该类土质渗透系数很可能导致井点降水难以达到预期效果，发生这种情况时应根据具体情况采取相应措施（如增设井点管，延长抽水时间等），如对强夯施工产生较大影响，则应与设计方、监理方协商采用其他方法降低地下水位。

5. 强夯法施工准备

(1) 强夯主要施工机具设备的选用：

1) 起重机：起重能力可按加固深度、锤重和落距三者确定。宜采用起重能力为 15T 以上的履带式起重机或其他专用设备，起吊高度为 10~12m；起吊速度为 0.2~0.4m/s；吊钩下落速度为 1~3m/s，夯击时应防止臂杆后仰；接地压力应小于地基承载力。

2) 夯锤：可采用圆柱形锤，质量为 8~20T，并应小于 1/2~1/3 的起重机起吊能力；锤应设置若干个上下贯通的气孔，孔径为 250~300mm；底锤面积为 $3\sim 6^2$ 。锤底/锤底面积为 25~35Kpa，对粘性土或加固深度大于 5m 时取小值；对砂性土、含水量小于 25% 的土或加固深度小于 5m 时取大值。

锤材料：若锤重为 8~12T 时，宜采用钢板为外壳，壳内部焊接钢筋骨架后浇筑混凝土制成；锤重大于 12t 时可采用钢或铸铁锤。

3) 脱钩：落锤时宜采用自动脱钩，自动脱钩要有足够强度，且施工灵活。

(2) 当地下水位距地表 2m 以下且表层为非饱和土时，可直接进行夯击；当地下水位较高不利于施工或表层为饱和土时宜采用人工降低地下水位或铺填 0.5~0.2m 的松散材料，如中砂、粗砂、砂砾或山皮土、煤渣、建筑垃圾或性能稳定的工业废渣等材料后进行夯击。坑内或场地如遇积水应及时排除。

(3) 为避免振动对周围设施的影响，施工前必须对附近建筑物进行调查，必要时采取相应的防振或隔振措施，施工时应由距邻近建筑物处向

远处夯击。

强夯振动的主要影响范围一般为 $10\sim 15\text{m}$ ，在此范围内应采取防振措施，如设置防振沟等，在此范围外也应注意振动的不利影响。

(4) 加固区周围应设置排水沟。若加固区边长大于 30m 时，中间应设置网格形排水沟，最大排水距离为 15m 。

(5) 强夯施工可按下列步骤进行：

- 1) 清理并平整施工场地；
- 2) 标出第一遍夯点位置，并测量场地高程；
- 3) 起重机就位，使夯锤对准夯点位置；
- 4) 测量夯前锤顶高程；

5) 将夯锤起吊到预定高度，等夯锤脱钩自由下落后，放下吊钩，测量锤顶高程；

6) 重复步骤五，按设计规定的夯击击数及控制标准，完成一个夯点的夯击；

7) 重复步骤三至六，完成第一遍全部夯点的击数；

8) 推土机将夯坑填平，并测量场地高程；

9) 在规定的间隔时间后，按上述步骤逐次完成全部夯击遍数，再用低能量普夯将场地表层松土夯实，并测量夯后场地高程。

6. 强夯法施工

(1) 小螺钻详探

根据排水击密施工工艺，首先进行小螺钻详探，目的是为了掌握施

工区域的局部地质变化情况。不同的地质结构，要调整不同的施工参数，以尽可能达到最佳施工效果。在该试验区中，由于试验面积较小，采用 $20 \times 20\text{m}$ 或 $15 \times 18\text{m}$ 的方格网布孔进行小螺钻控、记录。

（2）开挖排水沟

结合分区域高真空击密地基处理，开挖明沟，明沟深 1.5m ，底宽 1m ，边坡 $1:2$ ，区域明沟之间相互贯通，形成排水网络，明沟交接处设置一定数量的给水井，明沟水采取自流、强排的方法排放到邻近河道内。

（3）第一遍高真空排水

施工打高真空排水击密法第一遍高真空管和外围封管，放置水位观测孔和孔隙水压力计。

1) 高真空排水击密法施工重点是调整土体含水量，根据初步掌握的地质结构情况，各层土体的渗透系数、含水量，结合真空排水击密法高真空的各项指标，第一遍真空管拟采用分层降水。

2) 高真空管：根据现场地质情况，采用分层布法，根据各小区钻探资料，暂定浅管 $2 \sim 3\text{m}$ ，深管 $5 \sim 6\text{m}$ ，排距 $3.5 \sim 7\text{m}$ ，施工中并设置外围封管。根据初步资料，平衡控制参数为：平衡系数 > 0.75 ，高真空时间 $7 \sim 10$ 天。

（4）第一遍强夯排密

1) 根据高真空排水击密法施工要求，及以往类似土质施工经验，夯锤采用 $12 \sim 15\text{T}$ ，夯锤直径 2.5m 。

2) 夯坑点距： $4\text{m} \times 4\text{m}$ 梅花形布置，夯能采用 2 种方案：试验区的一半（称为 A 区）采用 $800 \sim 100\text{KN.m}$ ，夯点间距 $3.5\text{m} \times 4\text{m}$ 梅花形布置；

另一半（称为 B 区）采用 1200—1500KN.m，夯点间距 4m×4m 梅花形布置。击数暂定：3~4 击，具体根据试夯确定，现场控制标准为：

A. 以现场第一击，坑边 0.5m 隆起量小于 20cm 确定最大夯能。

B. 以夯坑深 0.8m，后一击沉降量小于前一击沉降量，最后二击贯入量<10cm。

（5）第二遍高真空排水

1) 用推土机推平夯坑，然后进行第二遍高真空，第二遍高真空是进一步调整土体各项指标，高真空布置同样根据现场详探资料计算确定。

2) 平衡控制参数：平衡参数>0.80

3) 真空时间 5~7 天。

（6）第二遍强夯击实

1) 高真空排水击密法操作规程，结合以往经验，针对试验区的地质情况，结合设计提出各项试验技术要求，第二遍强夯暂定控制指标为：

2) A 区采用 1000~1350KN.m,夯点间距 3.5m×4m 梅花形布置；B 区采用 1500~1800KN.m,夯点间距 4m×4m 梅花形布置。第二遍夯点与第一遍呈梅花形错位布置，击数暂定：2~4 击，具体根据试夯确定。

A. 以现场第一击，坑边 0.5m 隆起量小于 20cm 确定最大夯能。

B. 以夯坑深 0.8m，后一击沉降量小于前一击沉降量，最后二击贯入量小于 10cm 调整点击数。

C. 第二遍强夯击密，根据初步计算高真空排水击密法作用下的二遍间歇暂定为 6~7 天。具体根据现场孔隙水压力计检测调整。

（7）第三遍击密

由于强夯过程中，夯坑较深，表层土体也较为松散，在高真空排水击密法施工中，第三遍表面击密采用特制的大功率（690KN）的调频调幅振动压路机进行表层击密。具体施工为：推平夯坑，调整振动机频率，使振动频率略小于表层土土体自身频率，在先静压一遍的基础上，进行第二遍、第三遍、第四遍、第五遍逐步加压振动击密，并且第二与第三遍为压半轮，第四、第五遍为十字交叉半轮振动击密。