

UDC

SH

中华人民共和国行业标准

P

SH/T 3083-1997

石油化工钢储罐地基处理 技术规范

Petro-chemical technical specification
for steel storage tanks subgrade treatment

1997-09-26 发布

1998-03-01 实施

中国石油化工总公司 发布

中华人民共和国行业标准

石油化工钢储罐地基处理 技术规范

Petro-chemical technical specification
for steel storage tanks subgrade treatment

SH/T 3083-1997

主编单位：上海高桥石油化工设计院
批准部门：中国石油化工总公司

中国石油化工总公司文件

中石化（1997）建字 518 号

关于发布行业标准《石油化工 钢储罐地基处理技术规范》的通知

各有关单位：

由上海高桥石油化工设计院主编的《石油化工钢储罐地基处理技术规范》已经审查定稿。现批准《石油化工钢储罐地基处理技术规范》SH/T3083-1997 为石油化工行业推荐性标准，自 1998 年 3 月 1 日起实施。

本规范的具体解释工作由上海高桥石油化工设计院负责。

中国石油化工总公司
一九九七年九月二十六日

目 次

1	总则	1
2	主要符号	2
3	基本规定	6
4	储罐地基充水预压法	8
4.1	一般规定	8
4.2	设计要点	8
4.3	施工	13
4.4	质量检验	14
5	垫层法	15
5.1	一般规定	15
5.2	设计要点	15
5.3	施工	17
5.4	质量检验	17
6	排水固结法	19
6.1	一般规定	19
6.2	设计要点	19
6.3	施工	24
6.4	质量检验	25
7	振冲法	27
7.1	一般规定	27

7.2	设计要点	27
7.3	施工	31
7.4	质量检验	33
8	强夯法	36
8.1	一般规定	36
8.2	设计要点	37
8.3	施工	38
8.4	质量检验	41
9	灰土挤密桩法	43
9.1	一般规定	43
9.2	设计要点	43
9.3	施工	45
9.4	质量检验	47
10	砂石桩法	49
10.1	一般规定	49
10.2	设计要点	49
10.3	施工	51
10.4	质量检验	52
附录 A	圆形面积上均布荷载作用下 各点附加应力系数 α_i	插页
附录 B	圆形面积上均布荷载作用下 各点平均附加应力系数 $\bar{\alpha}_i$	插页
附录 C	复合地基载荷试验要点	53
附录 D	用词说明	55
	附加说明	56

1 总 则

1.0.1 本规范适用于储存原油、中间产品油和成品油等石油化工立式圆筒形钢制储罐地基处理的设计与施工。不适用于储存低温、酸碱腐蚀性和自重大于 10kN/m^3 介质及架高储罐地基处理的设计与施工。

1.0.2 地基处理除应满足工程设计要求外，尚应做到因地制宜、就地取材、保护环境和节约资源等。

1.0.3 执行本规范时，应符合现行有关标准规范的要求。

2 主要符号

2.0.1 材料性能

E_0 —— 桩间土变形模量;

E_{cp} —— 复合地基变形模量;

E_p —— 桩体变形模量;

E_s —— 桩间土压缩模量;

E_{sp} —— 复合地基压缩模量;

ρ_d —— 地基挤密前土层的平均干密度;

ρ_{dmax} —— 桩间土最大干密度。

2.0.2 作用和作用效应

C_{sp} —— 复合地基粘聚力;

C_s —— 桩间土或原状土的粘聚力;

f_h —— 垫层底面下软弱下卧层顶面处的地基承载力;

f_{pk} —— 桩体单位面积承载力标准值;

f_{sk} —— 桩间土承载力标准值;

f_{spk} —— 复合地基承载力标准值;

P_0 —— 加荷总量, 或计算点土的自重压力;

P_c —— 计算点土的先期固结压力;

P_{cz} —— 垫层底面处土的自重压力;

P_z —— 垫层底面下软弱下卧层顶面处的附加压力;

- Q —— 锤重;
 S_c —— 按分层总和法计算固结沉降量;
 τ_{fo} —— 在加载之前该点土的天然抗剪强度;
 τ_{ft} —— 地基中某点固结时间为 t 时的抗剪强度;
 $\Delta\sigma_1$ —— 计算点由于预压荷载而引起的最大主应力增量;
 $\Delta\sigma_z$ —— 由于预压荷载而引起的该点竖向附加应力;
 $\Delta\tau_{fc}$ —— 计算点由于排水固结而增长的抗剪强度增量;
 $\Sigma\Delta p$ —— 各级荷载的累加值。

2.0.3 几何参数

- A —— 单桩所承担的加固面积;
 A_o —— 单桩加固的有效桩间土面积;
 b —— 塑料排水板宽度;
 d —— 桩的直径、桩孔直径;
 d_e —— 每根竖向排水体的等效影响圆直径,或单桩等效影响圆的直径;
 D_p —— 塑料排水板当量换算直径;
 h —— 有效加固深度;
 H —— 为排水固结土层竖向排水最远距离;
 H_1 —— 砂井深度;
 H_2 —— 砂井以下压缩土层厚度;
 H' —— 有效落距;
 S —— 竖向排水体的间距,或桩间距;
 Z —— 测点深度;

- δ —— 塑料排水板厚度;
- ϕ' —— 土的有效内摩擦角;
- ϕ_p —— 桩体内摩擦角;
- ϕ_s —— 桩间土或原状土的内摩擦角;
- ϕ_{sp} —— 复合地基内摩擦角。

2.0.4 计算系数及其他

- C_v —— 地基土的竖向固结系数;
- C_h —— 地基土的水平向(径向)固结系数;
- e —— 自然对数的底;
- K_u —— 孔隙水压力荷载系数;
- K_σ —— 八面体正应力的应力系数;
- K_τ —— 八面体剪应力的应力系数;
- m —— 置换率;
- m_1 —— 考虑地基侧向变形及其他影响的经验系数;
- n —— 井径比, 或桩土应力比;
- $\dot{q}$ —— 加荷速率;
- $\dot{q}_i$ —— 第 i 级的加荷速率;
- $\dot{q}_n$ —— 第 n 级荷载的加荷速率;
- r —— 计算系数;
- $\dot{S}_t$ —— 为时间 t 时的沉降速率;
- t —— 第 i 加荷段之间的时间;
- $T_{(2i-1)}$ —— 第 i 级荷载加荷阶段结束时间;
- $T_{(2i-2)}$ —— 第 i 级荷载加荷阶段起始时间;
- T_n —— 第 n 级荷载加荷的终止时间;
- T_{n-1} —— 第 n 级荷载加荷的起始时间;

- U_0 —— 为“0”情况平均固结度；
 U_{0-2} —— 单向排水“0-2”情况地基土的平均固结度；
 U_1 —— 为“1”情况平均固结度；
 U_t —— 固结时间 t 时的地基平均固结度；
 U_z —— 地基竖向排水平均固结度；
 α —— 计算系数，计算参数；
 α' —— 影响系数；孔隙水压力系数；
 β —— 固结衰减系数，计算参数；
 η —— 强度折减系数；
 η_0 —— 形状系数；
 μ_p —— 应力集中系数；
 $\bar{\lambda}_c$ —— 地基土挤密后桩间土的平均压实系数；
 $\frac{C}{P}$ —— 土的强度增长率。

3 基本规定

3.0.1 在选择地基处理方案前，应完成下列工作：

1 掌握地基土的工程地质、水文地质条件及储罐对地基的要求等；

2 结合工程实际情况，了解建罐地区的地基处理经验、施工条件、建筑材料供应及其他地区相似场地上同类储罐工程的地基处理经验和使用情况；

3 必要时，在初步设计阶段通过现场原位试验和工程试桩工作获得有关设计参数，确定施工工艺。

3.0.2 在选择地基处理方案时，应优先选择本地区常用的地基处理方法，宜选用加强储罐基础刚度和处理地基相结合的方案。

3.0.3 地基处理方法的确定，宜按下列步骤进行：

1 根据储罐对地基的要求和地基条件，确定需要处理的范围和要求，结合现场实际情况选择几个可行的地基处理方案；

2 对初步选定的几个地基处理方案，分别从加固机理、适用范围、预期处理效果、材料供应及消耗、施工机具、施工工期及环境保护等多方面进行技术经济指标分析，选择最佳的地基处理方案。必要时，也可选择由多种地基处理方法组成的综合处理方案；

3 对选定的地基处理方案，宜按储罐大小和场地复杂程度，在有代表性的场地上进行现场试验和补充调查，以检验设计参数和处理效果，如不能满足设计要求时，应查找原因采取措施或重新选择地基处理方案。

3.0.4 对于储罐地基处理工程需采取多种手段进行综合监测，随时了解地基变形情况及发展趋向，通过控制加荷速率来防止地基土发生破坏。

4 储罐地基充水预压法

4.1 一般规定

4.1.1 在夹有薄层粉砂的饱和粘性土或冲填土等排水条件较好的地基土上建造钢储罐，当地基承载力不足时，可以采用充水预压法加固地基。

4.1.2 在工程地质勘察时，除了获得常规数据外，尚应查明土的固结系数、渗透系数、孔隙比和固结压力关系曲线、抗剪强度和现场十字板抗剪强度等指标，必要时，应测定先期固结压力及在现场测定固结系数。

4.1.3 在进行充水预压时，应进行沉降、侧向位移、孔隙水压力等项目的测试。根据动态测试结果分析加固效果，以便对设计作必要的修改，并指导现场施工。

4.1.4 在充水预压过程中的各项控制指标为：沉降速率不宜大于 $15 \sim 20 \text{ mm/d}$ ，孔隙水压力增量，不宜超过预压荷载增量的 60%，侧向位移应不大于 5 mm/d 。

4.1.5 当地基经充水预压的变形量满足设计要求，且受压土层平均固结度达到 80% 以上时，方可放水卸载。

4.2 设计要点

4.2.1 设计充水预压方案，应按以下步骤进行：

- 1 根据储罐容量、结构型式和工程地质勘察资料等，

计算出作用于地基上的荷载和固结度，预估一个充水预压方案；

2 按预估充水预压方案进行详细的固结度、地基强度增长计算和整体、局部稳定验算。当验算结果不满足安全要求时，必须调整充水预压方案，再重新验算；

3 在选定充水预压方案以后，尚需进行沉降计算、沉降速率计算和孔隙水压力消散计算，如果不满足安全要求，应重新考虑采用其它地基加固方案。

4.2.2 地基固结度，可按下列公式计算：

$$U_{0-2} = \frac{2rU_0 + (1-r)U_1}{1+r} \quad (4.2.2-1)$$

$$r = \frac{P_1}{P_2} \quad (4.2.2-2)$$

$$U_0 = 1 - \frac{8}{\pi^2} \left[\sum_{j=1}^4 \frac{1}{(2j+1)^2} \cdot e^{-\frac{(2j+1)^2 \pi^2}{4} T_v} \right] \quad (4.2.2-3)$$

$$U_1 = 1 - \frac{32}{\pi^3} \left[\sum_{j=0}^3 \frac{1}{(2j+1)^3} \cdot e^{-\frac{(2j+1)^2 \pi^2}{4} T_v} \right] \quad (4.2.2-4)$$

$$T_v = \frac{4\beta}{\pi^2} \cdot t \quad (4.2.2-5)$$

$$t = T_{(2l-1)} - \frac{T_{(2l-2)} + T_{(2l-1)}}{2} \quad (4.2.2-6)$$

在每级加荷阶段计算出固结度以后, 要进行修正, 其修正系数为:

$$K_{\omega} = \frac{P_i}{\sum_{j=1}^n P_j} \quad (4.2.2-7)$$

在第 i 级加荷阶段, 及其以后的第 j 段加荷时间时的固结度为:

$$U_{ij} = K_{\omega} \cdot U_{0-2ij} \quad (i=1 \sim N, j=1 \sim N+1) \quad (4.2.2-8)$$

当 N 级加荷阶段的固结度算完后, 可算出每级加荷阶段的平均固结度 U_j :

$$U_j = \sum_{i=1}^n U_{ij} \quad (i=1 \sim N, j=1 \sim N+1) \quad (4.2.2-9)$$

以上式中 U_{0-2} —— 单向排水 “0-2” 情况地基土的平均固结度 (%) ;

U_0 —— 为 “0” 情况平均固结度 (%) ;

U_1 —— 为 “1” 情况平均固结度 (%) ;

r —— 计算系数, 指地基土压缩层范围内上下面平均附加应力之比;

β —— 与土的固结特性有关的系数, 或称为固结衰减系数 (1/d) ;

$T_{(2i-2)}$ —— 第 i 级荷载加荷阶段起始时间 (d) ;

$T_{(2i-1)}$ —— 第 i 级荷载加荷阶段结束时间 (d) ;

4.2.3 地基整体、局部稳定，可按圆弧滑动法计算。

4.2.4 地基的沉降，可按现行《石油化工企业钢储罐地基与基础设计规范》的有关规定计算。

4.2.5 地基的沉降速率，可按下列式计算：

在 i 级加荷过程中沉降速率：

$$\dot{S}_i = \frac{S_c}{P_0} \left\{ m_i \dot{q}_i + \alpha \cdot e^{-\beta \cdot t} \left[\sum_{n=0}^{i-1} \dot{q}_n (e^{\beta \cdot T_n} - e^{\beta \cdot T_{n+1}}) - \dot{q}_i e^{\beta \cdot T_i} \right] \right\} \quad (4.2.5-1)$$

在 i 级停荷期间沉降速率：

$$\dot{S}_i = \frac{S_c}{P_0} \alpha \cdot e^{-\beta \cdot t} \sum_{n=0}^i \dot{q}_n (e^{\beta \cdot T_n} - e^{\beta \cdot T_{n+1}}) \quad (4.2.5-2)$$

$$\alpha = \frac{2r\alpha_1 + (1-r)\alpha_2}{1+r} \quad (4.2.5-3)$$

$$r = \frac{P_1}{P_2} \quad (4.2.5-4)$$

$$\alpha_1 = \frac{8}{\pi^2} \quad (4.2.5-5)$$

$$\alpha_2 = \frac{32}{\pi^3} \quad (4.2.5-6)$$

以上式中 $\dot{S}_i$ —— 为时间 t 时的沉降速率；

$\dot{q}_i$ —— 第 i 级的加荷速率；

$\dot{q}_n$ —— 第 n 级荷载的加荷速率；

β —— 固结衰减系数；

- r —— 计算系数, 为地基土压缩层范围内上
下面平均附加应力之比值;
 α —— 计算系数;
 m_1 —— 考虑地基侧向变形及其他影响的经验
系数, 可取 1.1 ~ 1.4;
 T_{n-1} 、 T_n —— 加荷停荷各级的起始终止时间;
 t —— 第 i 加荷段之间的时间;
 S_c —— 固结沉降量, 按分层总和法计算;
 P_0 —— 加荷总量;
 e —— 自然对数的底。

4.2.6 地基土孔隙水压力消散, 可按式计算:

$$\Delta U_i^{0-2} = \frac{2r\Delta U_i^0 + (1-r)\Delta U_i^1}{1+r} \quad (4.2.6-1)$$

$$\Delta U_i^0 = \sum_{n=1}^i U^0[(t - T_{n-1}), (\dot{q}_n - \dot{q}_{n-1})] \quad (4.2.6-2)$$

$$\Delta U_i^1 = \sum_{n=1}^i U^1[(t - T_{n-1}), (\dot{q}_n - \dot{q}_{n-1})] \quad (4.2.6-3)$$

$$U^0[(t - T_{n-1}), (\dot{q}_n - \dot{q}_{n-1})] = \frac{4}{\pi} K_u (\dot{q}_n - \dot{q}_{n-1}) I_i^0 \quad (4.2.6-4)$$

$$U^1[(t - T_{n-1}), (\dot{q}_n - \dot{q}_{n-1})] = \frac{8}{\pi^2} K_u (\dot{q}_n - \dot{q}_{n-1}) I_i^1 \quad (4.2.6-5)$$

$$I_t^0 = \sum_{i=1,3,5,\dots}^{19} \frac{1}{i^3 \beta} \sin \frac{i\pi Z}{2H} (1 - e^{-i^3 \beta t}) \quad (4.2.6-6)$$

$$I_t^1 = \sum_{i=1,3,5,\dots}^{19} \frac{1}{i^4 \beta} \sin \frac{i\pi Z}{2H} (1 - e^{-i^3 \beta t}) \quad (4.2.6-7)$$

$$K_u = K_\sigma + \alpha' K_\tau \quad (4.2.6-8)$$

式中 $\dot{q}$ —— 加荷速率;

β —— 固结衰减系数, 由实测反算得出;

H —— 为排水固结土层竖向排水最远距离;

Z —— 测点深度;

K_u —— 孔隙水压力荷载系数;

K_σ —— 八面体正应力的应力系数;

K_τ —— 八面体剪应力的应力系数;

α' —— 孔隙水压力系数, 可由室内三轴固结不排水试验 $(\Delta u - \Delta \delta_m) \sim \Delta \tau_m$ 关系曲线求得。

4.2.7 预压地基应在地表铺设排水垫层, 垫层厚度宜大于 0.5 m。垫层材料宜用中粗砂或碎石, 含泥量应小于 3%, 在预压区内, 宜设置与排水垫层相连的排水盲沟, 且应将地基中排出水引出预压区。

4.3 施 工

4.3.1 储罐地基充水预压, 应根据设计单位提出的充水预压加荷图进行。

4.3.2 在充水预压过程中，应每天进行沉降、侧向位移及孔隙水压力等项目的观测。

4.3.3 在储罐充满水后，对大型储罐地基恒压时间不宜小于 60d，对中小型储罐地基恒压时间不宜小于 45d。充水预压达到设计要求后才能放水，放水速度不宜大于 1.5 m/d。

4.4 质 量 检 验

4.4.1 在充水预压期间，应及时整理沉降与时间、孔隙水压力与时间关系曲线，推算地基的最终沉降量，不同时间固结度与相应沉降量，以分析地基加固效果。

4.4.2 控制地基中心与边缘沉降差，直径两端沉降差，沿圆周方向的沉降差，并应符合设计要求。

5 垫 层 法

5.1 一 般 规 定

5.1.1 垫层法适用于淤泥、淤泥质土、湿陷性黄土、素填土、杂填土地基及暗沟、暗塘等的浅层地基处理。

5.1.2 垫层法的选择,应考虑材料的来源和造价。

5.1.3 垫层材料,可采用中粗砂、碎石、素土和灰土等。在有充分依据或成功经验时,也可采用其他质地坚硬、性能稳定、透水性强、无侵蚀性的材料。

5.2 设 计 要 点

5.2.1 垫层厚度,应根据下卧土层的承载力确定,并按下式计算:

$$P_z + P_{cz} \leq f_k \quad (5.2.1)$$

式中 P_z ——垫层底面下软弱下卧层顶面处的附加压力 (kPa);

P_{cz} ——垫层底面处土的自重压力 (kPa);

f_k ——垫层底面下软弱下卧层顶面处的地基承载力 (kPa)。

5.2.2 垫层厚度,尚应符合储罐的变形要求,一般不宜大于 3m,作为储罐基础持力层的垫层厚度也不宜小于 1 m。

5.2.3 垫层的宽度,应满足基础底面应力扩散的要求,

可按储罐环墙基础外缘向下作 45° 的直线扩大确定。

5.2.4 垫层的承载力,宜通过现场试验确定,对一般工程,当无试验资料时,可按表 5.2.4 选用。

表 5.2.4 各种垫层的承载力

施工方法	垫层材料类别	压实系数 λ_c	承载力标准值 f_k (kPa)
碾 压 或 振 密	碎石、卵石	0.94 ~ 0.97	200 ~ 300
	砂夹石 (其中碎石、卵石占全重的 30% ~ 50%)		200 ~ 250
	土夹石 (其中碎石、卵石占全重的 30% ~ 50%)		150 ~ 200
	中砂、粗砂、砾砂		150 ~ 200
	粘性土和粉土 ($8 < I_p < 14$)		130 ~ 180
	灰土	0.93 ~ 0.95	200 ~ 250
重锤夯实	土或灰土	0.93 ~ 0.95	150 ~ 200

注: ① 压实系数小的垫层,承载力标准值取低值,反之取高值;

② 重锤夯实土的承载力标准值取低值,灰土取高值;

③ 压实系数 λ_c 为土的控制干密度 ρ_d 与最大干密度 ρ_{dmax} 的比值;土的最大干密度宜采用击实试验确定,碎石或卵石的最大干密度可取 $2.0 \sim 2.2 \text{ g/cm}^3$ 。

5.2.5 下卧土层变形,应按现行《建筑地基基础设计规

范》GBJ7 有关规定计算。

5.3 施 工

5.3.1 垫层施工机械,应根据不同的垫层材料选择。素土宜采用平碾,砂石等宜采用振动碾或振动压实机。当有效夯实深度内土的饱和度小于并接近 0.6 时,可采用重锤夯实。

5.3.2 垫层的施工方法、分层铺填厚度、每层压实遍数等,宜通过试验确定。

5.3.3 素土和灰土垫层土料的施工含水量,应控制在最优含水量 $\omega_{op} \pm 2\%$ 的范围内,最优含水量可通过击实试验确定,也可按当地经验取用。

5.3.4 严禁扰动垫层下卧层的淤泥或淤泥质土层,防止受冻或受浸泡。

5.3.5 当夯击或碾压振动对邻近建构筑物产生有害影响时,必须采取有效预防措施。

5.4 质 量 检 验

5.4.1 在一般情况下,垫层质量可用贯入仪检验;对砂垫层也可采用钢筋贯入法检验。并均应通过现场试验以控制压实系数所对应的贯入度为合格标准。压实系数的检验,可采用环刀法或其他方法。

5.4.2 垫层的质量检验必须分层进行。当压实系数符合设计要求后,才能铺填上层。

当采用环刀法取样时,取样点应位于每层 $2/3$ 的深度

处。

5.4.3 当采用贯入仪或钢筋贯入法检验垫层质量时，检验点的间距应小于 4 m。

6 排水固结法

6.1 一般规定

6.1.1 排水固结法适用于加固淤泥、淤泥质土、冲填土等饱和粘性土地基。对软土层较薄或软土层含较多薄层粉砂夹层的地基，预估固结速率能满足工期要求时，可不设置竖向排水体，否则宜在地基中设置竖向排水体（可采用普通砂井、袋装砂井或塑料排水板）和铺设排水垫层。

6.1.2 在地基加固过程中，应进行沉降、侧向位移和孔隙水压力等项目的动态观测。根据现场获得的观测和工程地质勘察资料，修订设计参数，分析地基的加固效果，并与原设计预估值进行比较，以对设计作必要的调整并指导施工。

6.2 设计要点

6.2.1 排水固结法加固软土地基的设计，应包括下列内容：

- 1 选择竖向排水体，确定其直径、间距、深度、排列方式和布置范围；
- 2 确定排水垫层厚度、砂料及其粒度分布；
- 3 确定加荷速率和预压时间。

6.2.2 竖向排水体的平面布置形式，可采用等边三角形

或正方形排列。

等边三角形排列时

$$d_e = 1.05S \quad (6.2.2-1)$$

正方形排列时

$$d_e = 1.13S \quad (6.2.2-2)$$

式中 d_e —— 每根竖向排水体的等效影响圆直径 (m) ;

S —— 竖向排水体的间距 (m) 。

6.2.3 竖向排水体的布置,应符合“细而密”的原则,其直径和间距应根据地基土的固结特性、要求达到的平均固结度和施工期限等因素确定。普通砂井直径可取 300 ~ 500 mm, 间距可按井径比 n (砂井等效影响圆直径 d_e 与砂井直径 d_w 之比, 即 $n = d_e / d_w$) 值为 6 ~ 8 选用; 袋装砂井直径可取 70 ~ 120 mm, 间距可按井径比 15 ~ 30 选用; 塑料排水板的当量换算直径可按公式 (6.2.3) 计算, 井径比可采用 15 ~ 30 。

$$D_p = \alpha \cdot \frac{2(b + \delta)}{\pi} \quad (6.2.3)$$

式中 D_p —— 塑料排水板当量换算直径 (mm) ;

α —— 换算系数, 无试验资料时, 可取 0.75 ~ 1.0;

b —— 塑料排水板宽度 (mm) ;

δ —— 塑料排水板厚度 (mm) 。

6.2.4 竖向排水体的深度, 应根据土层分布、储罐对地基稳定性要求和变形的要求确定。

对以地基稳定性控制的储罐, 竖向排水体的深度, 应

超过最危险滑动面。砂井深度超过最危险滑动面不得小于 2 m。

对以地基变形控制的储罐，竖向排水体的深度应根据在限定的预压时间内应消除的变形量确定。当压缩层厚度不大时，竖向排水体应贯穿压缩土层。必要时可采用预压等方法以满足变形要求。

6.2.5 竖向排水体的布置范围，应根据储罐容量、场地工程地质条件确定，一般在基础外缘扩大 3 排。

6.2.6 排水固结法加固地基时，必须在地面铺设排水砂垫层，垫层厚度宜大于 500 mm。对表层土松软的软土地基，应采用厚的垫层。

在预压区内，应设置与砂垫层相连的排水盲沟，并把地基中排出的水引出预压区。

预压加固区地坪标高设计，必须考虑地基经排水固结处理后场地地坪的碟形变形。

6.2.7 一般情况下，预压设计的荷载，可与储罐的基底压力相同。

加荷速率必须与地基土因排水固结而增长的强度相适应，可通过计算确定分级加荷计划，并通过现场的动态观测对加荷计划加以修正和控制。

6.2.8 一级或多级等速加荷条件下，固结时间为 t 时，对应总预压荷载的地基平均固结度可按式 (6.2.8) 计算：

$$U_t = \sum_1^n \frac{\dot{q}_n}{\sum \Delta p} \left[(T_n - T_{n-1}) - \frac{\alpha}{\beta} e^{-\beta t} (e^{\beta T_n} - e^{\beta T_{n-1}}) \right] \quad (6.2.8)$$

式中 U_t —— 固结时间 t 时的地基平均固结度 (%) ;

$\dot{q}_n$ —— 第 n 级荷载的加荷速率 (kPa/d) ;

$\Sigma \Delta p$ —— 各级荷载的累加值 (kPa) ;

T_{n-1} —— 第 n 级荷载加荷的起始时间 (d) ;

T_n —— 第 n 级荷载加荷的终止时间, 当计算第 n 级荷载加载期间 t 时刻的固结度, 则 T_n 改用 t (d) ;

α 、 β —— 计算参数, 根据排水固结条件, 按表 6.2.8 选用。

表 6.2.8 不同排水固结条件下的 α 、 β 值

参 数 \ 排水固结条件	竖向排水固结 $U_z > 30\%$	向内径向排水固结	竖向和向内径向排水固结 (砂井贯穿受压土层)	砂井未贯穿受压土层之固结
α	$\frac{8}{\pi^2}$	1	$\frac{8}{\pi^2}$	$\frac{8}{\pi^2} Q$
β	$\frac{\pi^2 C_v}{4H^2}$	$\frac{8C_h}{F_{(n)}d_w^2}$	$\frac{8C_h}{F_{(n)}d_w^2} - \frac{\pi^2 C_v}{4H^2}$	$\frac{8C_h}{F_{(n)}d_w^2}$

注: 表中 U_z —— 地基竖向排水平均固结度 (%) ;

C_v —— 地基土的竖向固结系数 (cm^2/d) ;

C_h —— 地基土的水平向 (径向) 固结系数 (cm^2/d) ;

H —— 地基的竖向最短排水距离 (cm) ;

$$Q = \frac{H_1}{H_1 + H_2}$$

H_1 —— 砂井深度 (m) ;

H_2 —— 砂井以下压缩土层厚度 (m) ;

$$F_{(n)} = \frac{n^2}{n^2 - 1} \ln(n) - \frac{3n^2 - 1}{4n^2}$$

n —— 井径比。

6.2.9 地基平均固结度的计算,对长径比大、砂料(或板芯)渗透系数较小的竖向排水体,应考虑井阻作用;当普通砂井采用挤土方式,塑料排水板采用圆形钢导管施工时,应考虑土的涂抹和扰动影响。

6.2.10 预压荷载作用下饱和粘性土地基中某点固结时间为 t 时的抗剪强度,可按下列公式计算:

$$\tau_{ft} = \eta(\tau_{f0} + \Delta\tau_{fc}) \quad (6.2.10-1)$$

正常固结状态时

$$\Delta\tau_{fc} = \Delta\sigma_1 \cdot U_1 \frac{\sin \phi' \cos \phi'}{1 + \sin \phi'} \quad (6.2.10-2)$$

超固结状态时

$$\Delta\tau_{fc} = (\Delta\sigma_z + P_0 - P_c) \cdot U_1 \cdot \frac{C}{P} \quad (6.2.10-3)$$

式中 τ_{ft} ——地基中某点固结时间为 t 时的抗剪强度 (kPa);

τ_{f0} ——在加载之前该点土的天然抗剪强度,由十字板剪切试验、无侧限抗压试验或三轴固结不排水剪切试验确定 (kPa);

$\Delta\tau_{fc}$ ——计算点由于排水固结而增长的抗剪强度增量 (kPa);

η ——强度折减系数,取 0.75 ~ 0.9;

$\Delta\sigma_1$ ——计算点由于预压荷载而引起的最大主应力增量,或可近似取其等于该点的竖向附加应力 $\Delta\sigma_z$ (kPa);

- U_t —— 计算点固结时间为 t 时的固结度 (%) ;
 ϕ' —— 土的有效内摩擦角, 由三轴固结不排水剪切试验确定 ($^{\circ}$) ;
 $\Delta\sigma_z$ —— 由于预压荷载而引起的该点竖向附加应力 (kPa) ;
 P_0 —— 计算点土的自重压力 (kPa) ;
 P_c —— 计算点土的先期固结压力 (kPa) ;
 $\frac{C}{P}$ —— 土的强度增长率, 可由三轴固结不排水剪切试验的内摩擦角或天然地基现场十字板剪切试验强度值与测定点土有效自重应力的比值测定。

6.2.11 预压过程中地基的稳定性分析, 按现行国家标准《建筑地基基础设计规范》GBJ7 的规定执行, 计算中应考虑地基土强度随深度的变化和由于预压荷载引起地基固结而产生的强度增量。

6.2.12 预压荷载下地基的最终沉降量, 应按现行国家标准《建筑地基基础设计规范》有关规定计算。

6.3 施 工

6.3.1 普通砂井的灌砂量, 应按井孔的体积和砂在中密状态时的干土重度计算, 其实际灌砂量 (不包括水重) 不得小于计算值的 95 %。

普通砂井施工时, 应尽量减小成孔对周围土的扰动, 且应保证砂井灌砂的密实度。

6.3.2 袋装砂井的砂袋应采用透水性好、具有足够抗拉

强度及一定抗老化和耐腐蚀性能的编织布（如聚丙烯编织布）。灌入砂袋的砂，宜用风干砂，且应振捣密实。

袋装砂井施工所用钢管内径，宜略大于砂井直径，砂袋放入井孔后，袋口应用麻绳或铅丝扎紧。

6.3.3 塑料排水板应有良好的透水性，足够的湿润抗拉强度和一定的抗弯曲能力。

塑料排水板施工所用导管，管尖平端与导管靴应配合适当，避免错缝。塑料排水板需接长时，必须采用滤膜内芯平搭接的连接方式，搭接长度宜大于 200 mm。

6.3.4 竖向排水体施工时，平面井距偏差，不应大于井径；垂直度偏差，不应大于 1.5 %。

对袋装砂井和塑料排水板，拔管后带上的砂袋或塑料排水板长度，不宜大于 500 mm。砂袋或塑料排水板预留地面长度，不宜小于 500 mm，并应埋入排水垫层中。

6.3.5 在预压期间，应及时整理沉降、孔隙水压力及不同深度的侧向位移随时间的变化曲线，推算预压荷载下地基的最终沉降量、不同时间的固结度和相应的抗剪强度值，不断分析地基的加固效果，修正和控制加载计划。沉降速率、孔隙水压力增量和侧向位移控制应符合本规范 4.1.4 条的规定。

6.3.6 砂垫层和砂井的砂料应用中粗砂，含泥量应小于 3 %。砂垫层的砂料中可混有少量粒径小于 50 mm 的砾石，砂垫层经分层捣实后其干密度应不小于 1.6 g/cm^3 。

6.4 质量检验

6.4.1 对以抗滑稳定控制的大型储罐工程，应在地基加

固后在预压区内选择代表性地点预留孔位，在加荷的不同阶段，进行现场十字板剪切试验和静力触探试验，并取原状土样进行室内剪切试验，以检验地基的排水固结效果和验算地基的抗滑稳定性。

6.4.2 根据观测和工程地质勘察资料，应综合分析地基土经预压处理后的加固效果。预压达到下列标准时，可进行卸载：

1 对主要以沉降控制的储罐，当地基经预压后消除的变形量满足设计要求，且土层的平均固结度达到 80 %以上时；

2 对主要以地基承载力或抗滑稳定性控制的工程，在地基上经预压后增长的强度满足设计要求时。

7 振 冲 法

7.1 一 般 规 定

7.1.1 振冲法分为振冲置换法和振冲密实法。

7.1.2 振冲置换法适用于粘性土、粉土和以粘性土或粉土为主所组成的素填土、冲填土等地基。对于不排水抗剪强度小于 20kPa 的淤泥质土、淤泥等地基应通过试验确定其适用性。

7.1.3 振冲密实法适用于砂土、粉土以及部分杂填土等地基。

7.1.4 对于粘性土，设计前应收集地基土的不排水抗剪强度指标；对于砂土和粉土，应收集地基土的颗粒级配、粘粒含量、天然孔隙比、相对密度或标准贯入击数指标。

7.1.5 对于大型储罐或场地复杂的工程，在正式设计和施工前应在有代表性的场地上进行成桩可能性、成桩工艺和加固效果等试验。

7.2 设 计 要 点

7.2.1 采用振冲加固方案时，应先进行地基加固试验，按不同桩间距及桩长和加固电流进行设计和试验，从中选择最佳的布置方案，合理的桩长及各项施工参数。

7.2.2 振冲桩加固范围，应根据储罐容量、场地工程地

质条件确定。当用于改善地基承载力和变形性质时，在基础外缘宜扩大1~2排；当用于消除地基液化时，在基础外缘宜扩大2~3排。

7.2.3 振冲桩位网点布置，宜采用等边三角形或放射状布置。

7.2.4 振冲置换桩的间距，应根据基础荷载和天然地基承载力确定。在无加固试验资料的地区，其桩间距，还应结合振冲器的功能考虑（如功率为30kW的振冲器桩间距为1.3~2.5m，75kW的振冲器桩间距为1.5~3.5m）。

7.2.5 振冲桩的直径，应根据选用振冲器的型号及功率来确定（如采用功率为30kW的振冲器，其桩径施工尺寸为0.8~1.0m，如采用75kW的振冲器，其桩径为1.0~1.3m）。振冲器的技术参数，见表7.2.5。

表 7.2.5 振冲器的技术参数

型 号	ZXQ-13	ZCQ-30	BL-75
电机功率 (kw)	13	30	75
转速 (rpm)	1450	1450	1450
稳定电流 (A)	22.5	60	150
不平衡重量 (N)	290	660	
振动力 (kN)	35	90	160
振幅 (mm)	4.2	4.2	7.0
振冲器外径 (mm)	274	351	426
长度 (mm)	2000	2150	3000
总重量 (kN)	7.8	9.4	20.5

7.2.6 振冲桩的长度，在粘性土地基中，当相对硬层埋藏深度大时，应按相对硬层埋藏深度确定桩长。当相对埋藏深度大于 8m 时，应按储罐的允许沉降量及地基下卧层承载力验算结果确定桩长。桩长不宜小于 4m，同时也不宜大于 18m。在有抗震要求的地基中，桩底应按抗震加固要求的深度确定。在用于加固抗滑稳定的地基中，桩底应深入最低滑动面 1m 以上。

7.2.7 振冲桩桩体填料可用含泥量不大于 5 % 的碎石、卵石、砾石、粗砂或其他质地坚硬、无侵蚀性、性能稳定和透水性强的材料。当振冲器为 30kW 时，粒径为 20 ~ 50 mm，最大粒径不大于 80 mm，当振冲器为 75kW 时，材料粒径为 30 ~ 80 mm，最大粒径不宜大于 150 mm。禁止使用强风化易软化的石料。

7.2.8 振冲法施工时，当周围有建构筑物，并可能造成某些震害时，应考虑施工的安全距离，一般振冲孔中心距建构筑物不得小于 5m。

7.2.9 复合地基承载力标准值，应按现场复合地基载荷试验确定，也可用单桩和桩间土的载荷试验结果按下式确定：

$$f_{spk} = f_{pk} \cdot m + (1 - m)f_{sk} \quad (7.2.9-1)$$

当无现场载荷试验资料时

$$f_{spk} = [1 + m(n-1)]f_{sk} \quad (7.2.9-2)$$

$$m = \frac{d^2}{d_e^2} \quad (7.2.9-3)$$

式中 f_{spk} —— 复合地基承载力标准值 (kPa) ;
 f_{pk} —— 桩体单位面积承载力标准值 (kPa) ;
 f_{sk} —— 桩间土承载力标准值 (kPa) ;
 m —— 置换率;
 d —— 桩的直径 (m) ;
 d_e —— 单桩等效影响圆的直径 (m) , 等边三角形布桩时 d_e 为 $1.05S$, S 为桩的间距;
 n —— 桩土应力比, 无实测资料时可取 $2 \sim 4$, 原土强度低取大值, 反之取小值。

7.2.10 复合地基的变形, 应按国家标准《建筑地基基础设计规范》(GBJ7-89) 的有关规定计算。复合地基的压缩模量和变形模量可按下列公式计算:

$$E_{sp} = [1 + m(n-1)]E_s \quad (7.2.10-1)$$

$$E_{op} = \frac{E_o A_o + E_p (A - A_o)}{A} \quad (7.2.10-2)$$

式中 E_{sp} —— 复合地基压缩模量 (MPa) ;
 E_s —— 桩间土压缩模量 (MPa) , 也可用加固前地基土压缩模量代替;
 E_{op} —— 复合地基变形模量 (MPa) ;
 E_o —— 桩间土变形模量 (MPa) ;
 E_p —— 桩体变形模量 (MPa) , 可用桩体上的载荷试验求得;
 A_o —— 单桩加固的有效桩间土面积 (m^2) ;

n ——桩土应力比, 在无实测资料时, 粘性土可取 2~4, 粉土、砂、土可取 1.5~3, 原土强度低时取大值, 原土强度高时取小值;

A ——单桩所承担的加固面积 (m^2)。

7.2.11 复合地基抗剪强度指标, 可按下列公式计算:

$$\text{tg } \phi_{sp} = m \cdot \mu_p \cdot \text{tg } \phi_p + (1 - m \cdot \mu_p) \text{tg } \phi_s \quad (7.2.11-1)$$

$$C_{sp} = (1 - m \cdot \mu_p) C_s \quad (7.2.11-2)$$

$$\mu_p = \frac{n}{(n-1)m+1} \quad (7.2.11-3)$$

式中 ϕ_{sp} ——复合地基内摩擦角 ($^\circ$);

C_{sp} ——复合地基粘聚力 (kPa);

ϕ_p ——桩体内摩擦角 ($^\circ$);

ϕ_s ——桩间土或原状土的内摩擦角 ($^\circ$);

C_s ——桩间土或原状土的粘聚力 (kPa)

μ_p ——应力集中系数。

7.2.12 碎石桩施工后, 应挖除桩顶范围内 0.5~1.0 m 的松散碎石层, 或通过碾压等方式使其密实, 并在处理后的桩顶部铺设一层 500 mm 厚的碎石垫层。

7.3 施 工

7.3.1 振冲桩宜采用带潜水电机的振冲器, 其功率、振动力、振冲器的外径等参数, 可按振冲桩孔径的大小和要求

达到的密实度选用（通常采用功率为 30kW 的振冲器），在已有建、构筑物附近施工时，宜用功率较小的振冲器。

7.3.2 振冲用起重机的起重功率和提升高度均应符合设计、施工和安全要求，一般要求起重功率为 80 ~ 150kW。

7.3.3 施工准备工作，应按下列要求进行：

1 当地面和地下有障碍物（如大块砖渣瓦块等建筑垃圾，防空洞或原有建筑物基础，古墓等），应予清除或事先处理；

2 当地表附近有透水性很大的粗砂地层（渗透系数 $K \geq 50\text{m/d}$ ）时，在平整场地时，宜挖至地下水位 0.5m 左右，再开始振冲成孔；

3 应设置泥水排泄系统，避免场地泥水泛滥和浸泡。

7.3.4 造孔制桩，宜按下列要求进行：

1 振冲器应对准桩位，对不易造孔的松砂地层，宜在振冲点上安放钢护筒，使振冲器对准钢护筒的轴心；

2 振冲器沉入土层的过程中，应记录振冲器经各深度的水量、水压、时间和电流值。振冲器下沉速率，宜控制在每分钟 1 ~ 2m 范围内，造孔过程应保持振冲器呈悬垂状态、保持孔中泥水返出地面。达到设计深度终止造孔；

3 振冲器达到设计加固深度后，应控制水泵流量，对砂类土应尽量减少水量，防止大量砂粒冲出地面，粘土地层水量可大一些，以降低泥浆稠度；

4 如遇振冲器不宜贯入的砂层或土层可增设辅助水管，以加快下沉速率；

5 振冲加固填料，可采用连续填料和间断填料工艺，

连续填料工艺在加密过程中保持石料处于满孔状态，间断填料工艺成孔后，将振冲器上提 1 m 左右（或提出孔口）。振密至达到规定振密电流并维持 5 ~ 15 s。

6 分段振密桩体时，应记录各段振密电流值，投料量及留振时间，如此反复循环多次直至填满振实整个桩体为止。

7.4 质量检验

7.4.1 对振冲过程中所有桩的施工记录，包括桩号、制桩日期、每米成孔电流、成孔时间、每级填料数量、每级密实电流、每级制桩时间、总成孔时间、填料总数量和制桩总时间等均应检查。如发现有漏桩或不符合质量标准的桩，应采取有效的补救措施。

7.4.2 振冲施工结束后，除砂土地基外，应间隔一定时间方可进行质量检验。对粘性土地基，间隔时间可取 3 ~ 4 周；对粉土地基，可取 2 ~ 3 周。

7.4.3 振冲桩的施工质量检验，可用单桩载荷试验。试验用圆形压板的直径与桩的直径相等。可按每 200 ~ 400 桩随机抽取一根进行检验，但总数不得少于 3 根。

7.4.4 对粉土和砂土土层中的碎石桩，除用单桩载荷试验检验外，尚可用静力触探和标准贯入等试验对桩间土进行处理前后的对比检验。

7.4.5 造孔制桩，应符合下列质量标准。

1 施工时振冲器尖端喷水中心与孔径中心的偏差，不得大于 50 mm；

2 造孔中心与设计定位中心的偏差，不得大于 100 mm；

3 完成后的桩顶中心与定位中心偏差，不得大于 0.2d（d 为桩孔直径）；

4 实际施工桩孔深度与设计深度的允许偏差不得超过 500 mm；

5 如达不到上述各款要求，应立即回填并作补换处理；如有漏作或不符合规定的桩，应补作或采取有效补救措施。

7.4.6 检验桩间砂、土的振密效果，可采用下列方法：

1 载荷试验，每一建造地段不小于 2 点；

2 对粘性土或粉质土，宜采用静力触探检验，每一建造地段不宜少于 3 孔，静探深度应大于地基加固深度；

3 对砂类土，采用标准贯入法，每一建造地段不宜少于 3 孔，对用振冲密实法处理的饱和液化砂土，标贯点次应不少于 5 点次；

4 对砂类土的检验，还应在现场挖坑采样直接测定和计算其相对密实度等指标，也可采用动力触探测定的方法；

5 对用振冲挤密处理的饱和液化的砂土，宜按跨桩及不跨桩的情况进行跨孔波速试验，每一重要地段的检测剖面应不少于两条。

7.4.7 对大型储罐或复杂地基，尚应进行复合地基加固效果检验，选择有代表性的或地基土较差的地段进行一根桩或群桩的复合地基载荷试验，一根桩的试验面积应覆

盖单桩分担的面积。每一座储罐载荷试验点数应不少于 2 点。当地基土比较复杂时，宜适当增加检验点数。当土层沿深度有较大变化时，对较长的桩，宜进行不同深度土层的载荷试验。复合地基载荷试验应符合本规范附录 C 的有关规定。

8 强 夯 法

8.1 一 般 规 定

8.1.1 强夯法适用于碎石土、砂土、湿陷性黄土、含水量低于 25 % 的回填土地基，也可用于粉质粘土和粘性土。对上述以外的土采用强夯法时，应通过试验确定。

8.1.2 强夯场地应平整，并能承受夯击机械的重力。施工前，必须查明罐区范围内的地下构筑物 and 地下管线的位置及标高等，并采取必要措施，避免强夯施工而造成损坏。

8.1.3 强夯施工过程中，应检查各项测试数据和施工记录，不符合设计要求时，应采取有效措施进行补夯。

8.1.4 对高饱和度或水下土层的强夯，应通过试夯确认辅助措施有效的夯击工艺。当进行试夯方案设计时，强夯工艺，应根据地基条件、工程要求和设备等条件确定。

在强夯有成功经验的地区，当地质条件相同时，可不进行专门试夯，但在施工之前应先进行小片试验性施工。

8.1.5 强夯设计，应根据试夯检测效果或已有的成功经验，结合储罐特点和工程地质勘测资料，选择技术可靠且经济的方案。

设计文件中应规定的强夯参数包括：锤重和落距，起夯面标高，夯点布置位置，单点夯击数和场地夯击遍数，相邻夯击遍数的间歇时间，加固范围，地面平均下沉量，以及检

测项目点位，合格指标等。

8.2 设计要点

8.2.1 有效加固深度，应根据现场试夯或当地经验确定。当无条件试夯时，有效加固深度，可按下式估算：

$$h = \alpha' \cdot \sqrt{H' \cdot Q / 10} \quad (8.2.1)$$

式中 h —— 有效加固深度 (m)；

Q —— 锤重 (kN)；

H' —— 有效落距 (m)；

α' —— 影响系数，可取 0.3 ~ 0.6。

8.2.2 夯锤重量一般可选用 10 ~ 25t，最大可采用 40t。锤形宜为圆柱和圆台组合形，锤重心位置应低于锤高度的二分之一。

8.2.3 夯锤的落距一般为 10 ~ 20m。起重设备，应按需要的落距和外伸距离选用，且应保证施工时起吊高度和夯锤下落位置保持不变。

8.2.4 强夯夯点可按等边三角形或放射形布置，夯点间距应按试夯效果确定，一般可取夯锤底面直径的 1.5 ~ 2.5 倍。不同夯击能、夯击遍数的布点可按罐中心轴线、轮廓线或对称于基础中心线等形式排列，并考虑各遍夯点间交叉对应关系。

强夯处理地基面积，应大于基础底面积，一般在基础底面边缘外扩展 1 ~ 2 排夯点。

8.2.5 单点的夯击数不宜超过该能级强夯的单点饱和夯

击能。饱和夯击能可采用下列一种或几种方法确定：

1 N—S 法：即利用夯击数 N 与单点累计夯沉量 S 曲线趋于平缓的拐点所对应的夯击数；

2 最大加速度法：取离夯击中心 10 m 处测得的随夯击数增加的加速度值达最大值所对应的夯击数。

3 孔隙水压力控制法：随着夯击能增加夯坑底部或夯坑周围较小范围内孔隙水压力增长至等于自重有效应力时所对应的夯击数。

8.2.6 强夯应采用多遍夯击。第一遍宜为最大能级强夯，宜采用较稀疏的布点进行。第二、三……遍强夯能级逐渐减小，基夯点插于前遍的夯点之间进行。第一遍可分为 2～3 次夯完，即采用跳行跳点夯，夯击遍数可根据土的渗透系数、天然含水量及实耗夯击能确定。

每两遍之间的间歇时间应根据超孔隙水压力的消散情况确定。当缺少实测资料时，对渗透性较差的粘性土地基，应不少于 3～4 周；对渗透性好的地基可不考虑间歇时间。每遍夯完后，应将地面摊平碾压。当夯坑深度大于 1 m 时，坑内的虚土宜在下遍夯击前事先夯击加固以后再进行下遍夯击。

8.3 施 工

8.3.1 强夯主要施工机具设备的选用，应符合下列规定：

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它专用设备，起吊高度为 10～20 m；起吊速度为 0.2～

0.4 m/s；吊钩下落速度为 1 ~ 3 m/s，夯击时应防止臂杆后仰；接地应力应小于地基承载力；

2 夯锤：锤重应为 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 ~ 300 mm；锤底面积为 3 ~ 6 m²，锤底压力为 25 ~ 35 kPa。对粘性土或加固深度大于 5 m 时用小值；对其他类土或加固深度小于 5 m 时用大值。

锤材料：当锤重小于 12 t 时，宜用钢板为外壳，内部焊接钢筋骨架后浇筑混凝土制成；锤重大于 12 t 时，可用钢或铸铁锤；

3 脱钩：落锤时宜采用自动脱钩，自动脱钩要有足够强度，且施工方便。

8.3.2 当地下水位距地表大于 2 m 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，或表层为饱和土或耕土时，宜采用人工降低地下水位或铺填 0.5 ~ 2.0 m 的松散性材料后进行夯击。坑内或场地积水应及时排除。

8.3.3 振动对周围建筑设施有影响时，施工前应采取相应的防振或隔振措施；施工时，应背离建筑物方向夯击。

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

8.3.5 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，待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，按设计规定的夯击次数及控制标准，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 用推土机将夯坑填平，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。

8.3.6 强夯施工，应严格按照规定的强夯参数执行。起夯面标高允许偏差为 $\pm 100\text{ mm}$ 。夯点位置允许偏差不得大于 50 mm 。当夯锤落入坑内倾斜角大于或等于 30° 时，应用基坑内的土将夯坑底填平后再夯。

在施工过程中，对每个夯点应严格控制下列质量指标：

（1）要求的夯击数；

（2）要求的夯坑深度；

（3）最后二击的夯沉量小于试夯确定的值。最后两击的平均夯沉量不大于 50 mm ，当单击夯击能量较大时不大于 100 mm 。

8.3.7 强夯施工宜划片夯击；夯击施工过程中要防止降水或曝晒改变土的湿度和其他不利影响。强夯过程中不应将夯坑内的土移出坑外，当必须挖除部分土体时，则应在计算夯沉量中扣除。

8.3.8 施工过程中,应对各项参数及施工情况进行详细记录。

8.4 质量检验

8.4.1 强夯施工结束后,应间隔一定时间方可对地基加固质量进行检验。对碎石土和砂土地基,其间隔时间可取1~2周;对粉土和粘性土地基可取3~4周。

8.4.2 强夯法处理的地基必须检测,查明有关物理力学指标和工程性质改善的情况,确定强夯有效加固深度。核实强夯地基设计所采用的参数等。检测深度应大于强夯有效加固深度。强夯检测内容包括变形、强度、压力、振动和施工工艺控制等。

8.4.3 质量检验方法,宜根据土性选用原位测试和室内土工试验,如变形位移、静力触探或现场十字板剪切试验、静载荷试验、旁压试验及波速试验等。对砂性土地基也可采用标准贯入试验。对于中小型储罐工程,应采用两种或两种以上方法进行检验;对于大型储罐工程,应增加检验项目。

8.4.4 质量检验数量,应根据场地复杂程度和储罐的大小确定。对简单场地或中型储罐,每个储罐地基的检验点不应少于3处;对复杂场地或大型储罐地基应增加检验点数。

8.4.5 强夯地基检测,应符合下列要求:

1 对粘性土、粉土、填土、湿陷性黄土每1000m²取原状土试样点不少于一处(湿陷性黄土必须有探井取

样)；静力触探试验点不少于三处。原状土试样应沿深度每米取一个。标准贯入试验和其他动力试验，旁压试验可单独选点进行，也可与静力触探及取土试样点对比进行。

2 对粗粒土、堆积填土地基，每 500 m^2 标准贯入试验或其他动力触探试验点不少于一处，并应通过其他有效手段测试地基土物理、力学指标。粗粒土地基，且应进行一定数量的颗粒分析试验。

3 对饱和软土地基每 300 m^2 一处检测点，可采用钻孔取土、静力触探、旁压试验、标准贯入等综合检测方法。

4 静力载荷试验每 5000 m^2 一处，对大型储罐区强夯地基载荷试验总数，不宜少于 3 点。

5 现场渗水试验、波速试验等，可根据具体工程需要进行。

6 对强夯面积较小的储罐地基，可按数据统计最低需要确定检测点数量。检测点位置，应以储罐中心轴线、轮廓线等均匀或对称布置。

9 灰土挤密桩法

9.1 一般规定

9.1.1 灰土挤密桩适用于处理地下水位以上的湿陷性黄土、粘性土、填土等地基。当地基土的含水量为 14 % ~ 23 % 时，宜采用挤密桩加固法，当含水量大于 23 % 及饱和度大于 0.65 时，不宜采用。

9.1.2 灰土挤密桩的处理深度宜为 5 ~ 15 m。

9.1.3 当施工试桩时，宜依据选定的打桩和夯实机型，采用两种以上布点间距和相应参数，对成桩可能性和挤密效果及有关设计参数，进行包括填料速率和夯实工艺标准对比试验，提出最优设计方案和质量控制标准。当有地区成熟经验时，可仅对通用的方案进行试验性施工。

9.2 设计要点

9.2.1 灰土桩的基本尺寸、布置及桩孔填料，应符合下列要求：

1 桩孔直径，可根据当地常用成孔机械的型号及规格确定，一般为 300 ~ 600 mm；

2 桩孔填料的压实系数 λ_c ，对大型储罐不应小于 0.95，中小型储罐不应小于 0.93。灰土配合比宜为 2 : 8 或 3 : 7；

3 桩的布置,当整片处理时,宜按等边三角形布置;当处理土含水量适中时,桩间距可按下式计算:

$$S = \eta_0 \cdot d \sqrt{\frac{\bar{\lambda}_c \cdot \rho_{dmax}}{\bar{\lambda}_c \cdot \rho_{dmax} - \bar{\rho}_d}} \quad (9.2.1)$$

式中 S —— 桩间距 (m);

$\bar{\lambda}_c$ —— 地基土挤密后,桩间土的平均压实系数,宜取 0.93 ~ 0.95;

ρ_{dmax} —— 桩间土最大干密度 (g/cm^3),由击实试验确定;

d —— 桩孔直径 (m);

η_0 —— 形状系数,等边三角形布桩时取 0.95;

$\bar{\rho}_d$ —— 地基挤密前土层的平均干密度 (g/cm^3)。

4 如土层中出现上松下密的情况或下部土层湿度较大易发生缩径时,根据工程的需要,宜采用长短桩结合布置的方案,使地基上下层的处理都达到较佳的挤密效果。

9.2.2 当以提高地基承载力为目的时,挤密桩处理深度,应按挤密桩地基下卧层承载力验算要求确定。对湿陷性黄土地基,应符合国家标准《湿陷性黄土地区建筑规范》GBJ25-90 的有关规定。

9.2.3 挤密桩处理储罐地基的范围应大于储罐基础,应超出基础外缘且不宜小于处理土层厚度的 1/2。当有经验时,可适当减少,但不应小于 2m。

9.2.4 挤密桩地基的设计可采用承载力计算控制。挤密桩复合地基的承载力,对大型储罐应通过现场试验并结合

当地经验确定。对中小型储罐，当无试验资料时，可根据经验确定。对于灰土桩挤密地基，不大于处理前的 2 倍，并不大于 250kPa。

9.2.5 在确定基础底面标高时，桩顶部分应预留被清除的松动层，其厚度宜为 0.3 ~ 0.5 m；如冬季施工可适当增加预留松动层的厚度。在基础底面下宜设置 0.3 ~ 0.5 m 厚的灰土垫层。

9.3 施 工

9.3.1 选择打桩成孔机械时，应考虑土质条件和桩孔深度的要求。

填土用的夯锤直径，应比成桩孔径小 90 ~ 120 mm，重量不宜小于 100 kg，夯锤下端宜做成抛物线锥头，上段宜呈弧形。

9.3.2 当地层中存在有空洞或虚土洞穴（如古墓等）时，应预先填实，也可采取加密打桩或多次增填挤密的办法处理，但必须通过检测确认其有效性。

9.3.3 场地土质变化较大或土的含水量过高或过低时，施工前应在不同地段进行挤密成孔试验，同一地层的试验孔数不得少于 7 个。如土层含水量过高，桩孔出现严重的缩颈、坍孔、回淤或沉管贯入反常等情况时，应重新考虑地基处理方案。

9.3.4 成孔过程中当拔出桩管后，如发现桩孔局部有轻微缩径现象，应钻孔消除缩径，使之达到设计桩径要求，保证夯锤顺利落入孔底。成孔允许偏差应符合表 9.3.4 的

要求。当处理厚层自重湿陷性黄土时,可采用冲击法成孔。孔径可采用 400 ~ 600 mm。

9.3.4 灰土桩挤密成孔的允许偏差表

灰土桩成 孔方法	允 许 偏 差			
	孔位(mm)	垂直度(%)	桩径(mm)	深度(mm)
沉管法	50	1.5	± 20 (不限)	± 100(不限)
冲击法	50	1.5	± 50	± 300(不限)

9.3.5 桩孔回填所用的土料及石灰应符合下列要求:

1 不得采用有机质含量大于 8 % 的表层耕土、淤泥质土、膨胀土或夹有砖块、瓦片、生活垃圾的杂填土。土料一般需过筛,筛孔通常不宜大于 20 mm。亦不得采用含有冻土块或冰屑的土料;

2 宜采用生石灰经现场消解(闷透)的熟石灰粉并过筛使用,其粒径不得大于 5 mm,石灰质量应符合 III 级以上标准,活性 $\text{CaO}+\text{MgO}$ 的含量(按干重计)不得小于 50 %;

3 灰土应拌合均匀,颜色一致后及时回填,不宜延迟 24 小时以上使用;

4 填料的含水量应尽量接近最优含水量,如超过或不足最优含水量的差值大于 3 %,可予以凉晒,或洒水湿润。

9.3.6 填料成桩用的夯实机械应有稳定的夯实功能和速率。施工工艺应与夯实机械的功能相适应,必要时可通过夯填试验,确定合适的分次填料量和夯击次数。

9.3.7 桩孔夯填施工时,应符合下列规定:

1 夯实机械就位后应保持平整稳固，夯锤应对准桩孔中心，并能自由下落至孔底；

2 夯实前应先检查孔底，不得掉进杂物，不得有积水和回淤现象，否则应予以清除。填料前，应先夯实孔底；

3 填料时，应按试桩确定的恒定填料速率进行，每次填料后应待夯击次数符合规定后才能再次填料；

4 桩孔内填料夯实的最后高度宜超出基础底面（或垫层底面）设计标高 200 ~ 300 mm，然后用一般土料轻轻夯填至地面；

5 每一桩孔的填料量，夯实时间和实耗夯击能（每米锤数）等均应进行控制和记录。

9.3.8 各桩施工顺序，宜按由外围向内圈推进、每一排适当隔点跳打的方式进行。

9.4 质量检验

9.4.1 对桩体夯填质量应进行随机抽样检查。抽样数量不得少于桩孔总数的 2 %。检验时间对灰土桩宜在桩孔夯实后 72 小时内进行。检验方法可选下列一种或几种结合进行。

1 通过不同夯填密度求得轻便触探锤击数 N_{10} 与填料压实系数 λ_c 的关系曲线，求得合格的“检定锤击数”，以实际击数不少于“检定锤击数”为合格桩；

2 可对桩体进行剖开取样检验，即沿桩身每隔 1.0 ~ 1.5 m 分层取样，每层 2 ~ 3 个，测定各层填料的干密度并计算其压实系数；

3 采用洛阳铲在桩体中心打孔,从基础底面每隔 0.5~1.0 m 用带长杆的小环刀取土器,分层取原状土样,测试其干密度并计算压实系数,此时应避免取样过程中试样受压造成数据失真。

9.4.2 对桩间土挤密效果进行检验时,一般应包括提高干密度和承载力以及对黄土消除湿陷性的检验,其检验方法可取样做室内土工试验以及静力触探和载荷试验等。试验结果的评价可按相应标准执行。

对大型储罐的地基加固效果检测,宜增加复合地基载荷试验及单桩载荷试验法,必要时可在复合地基载荷试验承压板下埋设土压力盒以测定桩土应力比。载荷试验应选择有代表性或地基土较差的地点进行,每一台储罐复合地基载荷试验点数不宜少于 3 点,单桩载荷试验点数不宜少于 2 根。

9.4.3 确定复合地基的承载力时,如载荷试验 $p \sim s$ 曲线无明显拐点,对灰土桩地基可用相对沉降量 $s/b=0.008$ 对应的荷载。

复合地基载荷试验的压板面积至少应覆盖 1 根桩及其分担的桩间土范围。

当根据单桩与桩间土载荷试验结果估算复合地基承载力与变形模量时,可用面积比加权平均法。此时应力比可按桩上和桩间土试验的承载力比值 $n = f_p / f_s$ 估算。

9.4.4 对黄土地基加固效果检验可采用复合地基浸水载荷试验法,试验时宜在地基承载力标准值或设计值的压力作用下进行浸入。也可用浸水饱和状态下逐级加荷的方法。具体要求可按《湿陷性黄土地区建筑规范》执行。

10 砂 石 桩 法

10.1 一 般 规 定

10.1.1 砂石桩适用于松散素填土、杂填土、砂土和粉性土地基。

10.1.2 在采用砂石桩加固地基设计前，应搜集设计和施工方面的有关技术资料，包括砂土的相对密实度、砂石料特性、砂石填充量及充盈系数，可采用的施工机具及其性能等。

10.1.3 砂石桩加固地基应视地基土施工扰动后强度恢复与增长情况，间隔一定时间再行加载。必要时应确定初期载荷量的级别与时间。

10.2 设 计 要 点

10.2.1 砂石桩宜采用等边三角形或放射形布置，其直径可采用 300 ~ 800 mm。根据地基土质、成桩设备能力及施工效率等因素综合确定。

10.2.2 砂石桩的桩距应通过现场试验确定，对砂土和粉性土地基，砂石桩的桩距不宜大于砂石桩直径的 4 倍，对粘性土地基则不宜大于砂石桩直径的 3 倍。

10.2.3 砂石桩的桩长宜为 8 ~ 20 m，根据地基中松软土层厚度、地基变形、地基稳定性和抗液化要求等综合确

定。

10.2.4 砂石桩挤密地基的范围应超出储罐基础，对环形基础外边放宽不宜少于 2～3 排；砂石桩用于防止砂层液化时，外边放宽不宜小于处理深度的 $1/2$ ，并不应小于 5 m。当液化层上覆盖有厚度大于 3 m 的非液化层时，每边放宽不宜小于液化层厚度的 $1/2$ ，并不应小于 3 m。

10.2.5 砂石桩孔内的填料宜用砾砂、粗砂、中砂、圆砾、角砾、卵石、碎石等。填料中含泥量不得大于 5%，并不宜含有大于 50 mm 的颗粒。

10.2.6 砂石桩复合地基的承载力标准值，应按现场复合地基载荷试验确定，也可通过下列方法确定：

1 对于砂石桩处理的复合地基，可用单桩和桩间土的载荷试验，按本规范式（7.2.9-1）计算：

2 对于砂桩处理的砂土地基，可根据挤密后砂土的密实状态，按现行国家标准《建筑地基基础设计规范》的有关规定确定。

10.2.7 砂石桩复合地基的变形，应按本规范第 7.2.10 条计算，对于砂桩处理的砂土地基，应按现行国家标准《建筑地基基础设计规范》的有关规定执行。

10.2.8 砂石桩处理储罐地基工程时，应进行抗滑稳定性验算，计算时应考虑以下因素：

1 如滑动面切过砂石桩桩身，计算时应分别采用原状土及砂石桩的内聚力、内摩擦角值。计算时宜采用现场十字板剪切试验加以修正的抗剪强度值；

2 如在砂石桩处理区及其邻近有开挖土方施工，应

考虑挖方卸载对抗剪强度值的影响。

10.3 施 工

10.3.1 砂石桩施工可采用振动沉管成桩法或锤击沉管成桩法。锤击法可采用单管法或双管法。

10.3.2 施工前应进行成桩工艺、方法试验及成桩质量试验。当成桩质量不能满足设计要求时，应调整有关设计与施工参数后，重新进行试验。

10.3.3 施工时应根据设计桩径、桩长及桩身挤压密度等要求，控制砂石填充及排放量、套管升降幅度和速度、套管往复挤压振动次数、振动器振动时间、电动机工作电流等以保证桩身连续和密度均匀。

10.3.4 施工中应选用适宜的桩尖结构，保证顺利出料和有效挤压桩孔内砂石料。当采用活瓣钢桩靴时，振动成桩时可选用尖锥型，锤击成桩时宜选用平底型，一次性活头桩尖可采用混凝土桩尖、平板或尖锥钢桩头。

10.3.5 砂石桩的施工顺序：对砂性土地基应从外围或两侧向中间进行，以挤密为主的砂石桩宜间隔成桩；淤泥质粘性土地基宜从中间向外围或隔排施工。在已有建（构）筑物邻近施工，应背离建（构）筑物方向进行；在路堤或岸坡上施工应背离岸边和向坡顶方向进行。

10.3.6 砂石桩施工对周围环境的影响及预防措施应按国家标准《地基基础工程施工及验收规范》GBJ202-83 第一章和第四章有关规定执行。

10.3.7 施工结束后，应将基底下的松土层挖除换填或夯

压密实。基础下应铺以厚度不少于 500 mm 密实的砂石垫层。垫层应与砂石桩顶相贯通，以利排水固结。

10.3.8 施工桩位水平偏差应不大于工具套管外径，工具套管插入土中垂直度偏差不大于 1%，成桩直径不小于设计桩径 5%，成桩长度不应小于设计桩长 100 mm。

10.3.9 以挤密为主的砂石桩施工顺序应间隔进行，孔内实际填砂石量（不包括水重）不应少于设计值的 95%，砂石桩施工应保证桩位准确，其纵向偏差应不大于桩管直径，桩身应保持连续和垂直，垂直度偏差不应大于 1.5%；施工中应有专人记录各项施工参数。

10.4 质量检验

10.4.1 施工期间及施工结束后，应检查施工记录，包括：各桩段的填充石料、套管往复挤压振动次数与时间、套管升降幅度和速度等各项施工记录。

10.4.2 可采用标准贯入、静力触探或轻便触探等方法检测桩及其桩间土的处理效果。对储罐基础检测数量不少于桩总数的 2%，并不少于 3 处。对于大型储罐工程应进行复合地基载荷试验检测地基的处理效果。

10.4.3 经质量检验后，如有砂石桩质量未达到设计要求时，应采取加桩或其他补救措施。对大型储罐工程采取补救措施后，宜对复合地基处理效果重新进行检测评定。

10.4.4 施工后应间隔一定时间方可进行复合地基处理效果检测或地基载荷试验，对砂土及粉土地基宜间隔 1 周；对饱和粘性土地基宜间隔 2 周。

附录 A 圆形面积上均布荷载作用下 各点附加应力系数 α_i

表 A 圆形面积上均布荷载作用下各点附加应力系数 α_i

r/R	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
z/r	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
0.0	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	0.50000
0.1	0.99991	0.99997	0.99985	0.99961	0.99816	0.99731	0.99549	0.99094	0.97590	0.90030	0.48265
0.2	0.99245	0.99219	0.99132	0.98962	0.98656	0.98097	0.97006	0.94658	0.88993	0.74677	0.46721
0.3	0.97627	0.97551	0.97306	0.96836	0.96024	0.94628	0.92172	0.87687	0.79399	0.65027	0.45111
0.4	0.94877	0.94732	0.94272	0.93413	0.91989	0.89697	0.86037	0.80218	0.71251	0.58595	0.43446
0.5	0.91055	0.90838	0.90157	0.88918	0.86944	0.83956	0.79548	0.73239	0.64623	0.53791	0.41745
0.6	0.86380	0.86102	0.85238	0.83702	0.81343	0.77946	0.73239	0.66999	0.59126	0.49890	0.40025
0.7	0.81141	0.80820	0.79836	0.78120	0.75562	0.72021	0.67355	0.61646	0.54438	0.46539	0.38298
0.8	0.75621	0.75280	0.74240	0.72457	0.69860	0.66374	0.61941	0.56565	0.50341	0.43557	0.36576
0.9	0.70062	0.69719	0.68679	0.66918	0.64400	0.61097	0.57004	0.52170	0.46721	0.40867	0.34869
1.0	0.64644	0.64312	0.63313	0.61636	0.59272	0.56222	0.52513	0.48214	0.43413	0.38375	0.33223
1.1	0.59487	0.59176	0.58242	0.56687	0.54517	0.51751	0.48433	0.44633	0.40462	0.36062	0.31596
1.2	0.54662	0.54376	0.53522	0.52107	0.50146	0.47669	0.44724	0.41381	0.37735	0.33904	0.30016
1.3	0.50203	0.49945	0.49175	0.47904	0.46152	0.43952	0.41353	0.38419	0.35232	0.31888	0.28491
1.4	0.46117	0.45887	0.45200	0.44069	0.42516	0.40573	0.38287	0.35714	0.32927	0.30062	0.27025
1.5	0.42396	0.42192	0.41583	0.40583	0.39213	0.37504	0.35496	0.33242	0.30801	0.28239	0.25623
1.6	0.39200	0.38940	0.38303	0.37423	0.36217	0.34716	0.32956	0.30980	0.28849	0.26590	0.24286
1.7	0.35964	0.35685	0.35134	0.34350	0.33302	0.32185	0.30841	0.29308	0.27602	0.25649	0.23316
1.8	0.33201	0.32902	0.32468	0.31968	0.31400	0.29884	0.28529	0.27007	0.25355	0.23610	0.21812
1.9	0.30703	0.30381	0.30018	0.29622	0.28807	0.27793	0.26602	0.25264	0.23808	0.22267	0.20674
2.0	0.28445	0.28338	0.28019	0.27496	0.26780	0.25889	0.24841	0.23662	0.22377	0.21013	0.19599
2.1	0.26402	0.26308	0.26028	0.25568	0.24938	0.24154	0.23231	0.22190	0.21054	0.19844	0.18587
2.2	0.24551	0.24469	0.24222	0.23817	0.23263	0.22571	0.21756	0.20836	0.19828	0.18754	0.17633
2.3	0.22872	0.22799	0.22582	0.22225	0.21736	0.21124	0.20404	0.19688	0.18694	0.17738	0.16737
2.4	0.21347	0.21282	0.21090	0.20775	0.20342	0.19801	0.19162	0.18438	0.17642	0.16789	0.15894
2.5	0.19958	0.19901	0.19732	0.19452	0.19069	0.18589	0.18021	0.17377	0.16667	0.15905	0.15102
2.6	0.18693	0.18642	0.18491	0.18243	0.17903	0.17476	0.16971	0.16396	0.15762	0.15079	0.14359
2.7	0.17536	0.17491	0.17358	0.17137	0.16834	0.16454	0.16003	0.15489	0.14922	0.14309	0.13660
2.8	0.16478	0.16438	0.16319	0.16123	0.15852	0.15513	0.15110	0.14650	0.14140	0.13589	0.13005
2.9	0.15509	0.15473	0.15366	0.15191	0.14949	0.14645	0.14284	0.13871	0.13413	0.12917	0.12389
3.0	0.14618	0.14586	0.14491	0.14333	0.14117	0.13844	0.13520	0.13149	0.12736	0.12288	0.11810
3.1	0.13798	0.13770	0.13684	0.13543	0.13349	0.13103	0.12812	0.12477	0.12105	0.11699	0.11267
3.2	0.13043	0.13017	0.12941	0.12814	0.12638	0.12418	0.12154	0.11852	0.11516	0.11148	0.10756
3.3	0.12346	0.12323	0.12263	0.12139	0.11961	0.11732	0.11464	0.11171	0.10855	0.10532	0.10215
3.4	0.11701	0.11680	0.11618	0.11514	0.11371	0.11191	0.10976	0.10728	0.10451	0.10148	0.09823
3.5	0.11104	0.11085	0.11028	0.10935	0.10805	0.10642	0.10446	0.10221	0.09970	0.09694	0.09397
3.6	0.10549	0.10532	0.10481	0.10396	0.10279	0.10130	0.09953	0.09748	0.09519	0.09267	0.08996
3.7	0.10034	0.10019	0.09972	0.09895	0.09788	0.09654	0.09492	0.09305	0.09096	0.08866	0.08617
3.8	0.09555	0.09541	0.09498	0.09428	0.09331	0.09208	0.09061	0.08890	0.08699	0.08488	0.08261
3.9	0.09108	0.09095	0.09057	0.08993	0.08904	0.08792	0.08657	0.08501	0.08326	0.08133	0.07924
4.0	0.08691	0.08679	0.08644	0.08586	0.08505	0.08402	0.08279	0.08136	0.07975	0.07798	0.07606
4.1	0.08302	0.08290	0.08258	0.08205	0.08131	0.08037	0.07924	0.07793	0.07645	0.07482	0.07305
4.2	0.07937	0.07927	0.07897	0.07848	0.07780	0.07694	0.07590	0.07470	0.07334	0.07184	0.07021
4.3	0.07595	0.07586	0.07559	0.07514	0.07451	0.07372	0.07277	0.07166	0.07041	0.06902	0.06755
4.4	0.07274	0.07265	0.07241	0.07200	0.07142	0.07069	0.06978	0.06879	0.06764	0.06636	0.06497
4.5	0.06973	0.06965	0.06942	0.06904	0.06852	0.06784	0.06703	0.06609	0.06503	0.06384	0.06256
4.6	0.06690	0.06682	0.06661	0.06626	0.06578	0.06516	0.06441	0.06354	0.06255	0.06146	0.06027
4.7	0.06423	0.06416	0.06396	0.06364	0.06319	0.06262	0.06193	0.06113	0.06021	0.05920	0.05827
4.8	0.06171	0.06165	0.06147	0.06117	0.06076	0.06023	0.05959	0.05884	0.05800	0.05706	0.05613
4.9	0.05934	0.05928	0.05911	0.05884	0.05845	0.05797	0.05737	0.05668	0.05590	0.05502	0.05417
5.0	0.05710	0.05704	0.05688	0.05663	0.05628	0.05583	0.05528	0.05463	0.05390	0.05309	0.05220
5.1	0.05498	0.05492	0.05478	0.05454	0.05422	0.05380	0.05329	0.05269	0.05201	0.05126	0.05043
5.2	0.05297	0.05292	0.05278	0.05257	0.05226	0.05187	0.05140	0.05085	0.05022	0.04951	0.04874
5.3	0.05107	0.05102	0.05089	0.05069	0.05041	0.05005	0.04961	0.04910	0.04851	0.04785	0.04713
5.4	0.04927	0.04922	0.04910	0.04891	0.04865	0.04832	0.04791	0.04743	0.04688	0.04627	0.04559
5.5	0.04756	0.04751	0.04740	0.04723	0.04698	0.04667	0.04629	0.04584	0.04533	0.04476	0.04413
5.6	0.04593	0.04588	0.04578	0.04562	0.04540	0.04511	0.04475	0.04433	0.04386	0.04332	0.04273
5.7	0.04439	0.04434	0.04424	0.04409	0.04388	0.04362	0.04329	0.04290	0.04245	0.04195	0.04140
5.8	0.04292	0.04287	0.04278	0.04264	0.04245	0.04219	0.04189	0.04152	0.04111	0.04064	0.04012
5.9	0.04152	0.04147	0.04138	0.04125	0.04107	0.04084	0.04055	0.04021	0.03982	0.03938	0.03890
6.0	0.04018	0.04014	0.04006	0.03993	0.03977	0.03955	0.03928	0.03896	0.03860	0.03819	0.03773
6.1	0.03891	0.03886	0.03879	0.03867	0.03852	0.03831	0.03806	0.03777	0.03743	0.03704	0.03661
6.2	0.03770	0.03765	0.03758	0.03747	0.03732	0.03714	0.03690	0.03663	0.03630	0.03594	0.03554
6.3	0.03654	0.03649	0.03642	0.03632	0.03618	0.03601	0.03579	0.03553	0.03523	0.03489	0.03451
6.4	0.03543	0.03538	0.03532	0.03522	0.03509	0.03493	0.03473	0.03448	0.03420	0.03388	0.03353
6.5	0.03437	0.03432	0.03426	0.03417	0.03405	0.03390	0.03371	0.03348	0.03322	0.03292	0.03258
6.6	0.03335	0.03331	0.03325	0.03316	0.03305	0.03291	0.03273	0.03252	0.03227	0.03199	0.03168
6.7	0.03238	0.03233	0.03228	0.03220	0.03209	0.03196	0.03179	0.03160	0.03136	0.03110	0.03080
6.8	0.03145	0.03140	0.03135	0.03127	0.03117	0.03105	0.03090	0.03071	0.03049	0.03024	0.02997
6.9	0.03056	0.03051	0.03045	0.03038	0.03029	0.03018	0.03003	0.02986	0.02966	0.02942	0.02916
7.0	0.02970	0.02965	0.02960	0.02953	0.02945	0.02934	0.02920	0.02904	0.02885	0.02863	0.02839

续表 A

r/R Z/r	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0
0.0	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
0.1	0.08356	0.01747	0.00559	0.00234	0.00115	0.00064	0.00038	0.00024	0.00016	0.00011
0.2	0.20131	0.07681	0.03207	0.01520	0.00803	0.00462	0.00284	0.00184	0.00124	0.00086
0.3	0.26141	0.13653	0.07079	0.03834	0.02200	0.01334	0.00849	0.00583	0.00387	0.00274
0.4	0.28984	0.17946	0.10795	0.06536	0.04059	0.02603	0.01725	0.01178	0.00828	0.00596
0.5	0.30222	0.20722	0.13782	0.09093	0.06044	0.04085	0.02817	0.01985	0.01428	0.01047
0.6	0.30568	0.22408	0.15984	0.11252	0.07910	0.05598	0.04007	0.02909	0.02144	0.01604
0.7	0.30380	0.23338	0.17512	0.12955	0.09528	0.07014	0.05193	0.03877	0.02924	0.02230
0.8	0.29857	0.23744	0.18507	0.14228	0.10855	0.08262	0.06299	0.04825	0.03720	0.02890
0.9	0.29117	0.23781	0.19092	0.15133	0.11895	0.09311	0.07283	0.05708	0.04490	0.03547
1.0	0.28212	0.23558	0.19364	0.15732	0.12675	0.10160	0.08117	0.06491	0.05201	0.04180
1.1	0.27232	0.23121	0.19376	0.16066	0.13213	0.10807	0.08810	0.07174	0.05844	0.04769
1.2	0.26200	0.22572	0.19223	0.16213	0.13570	0.11293	0.09362	0.07746	0.06405	0.05299
1.3	0.25141	0.21931	0.18935	0.16204	0.13767	0.11630	0.09785	0.08211	0.06881	0.05766
1.4	0.24076	0.21230	0.18547	0.16073	0.13833	0.11840	0.10092	0.08576	0.07275	0.06166
1.5	0.23021	0.20492	0.18087	0.15846	0.13794	0.11943	0.10298	0.08851	0.07590	0.06501
1.6	0.21984	0.19734	0.17577	0.15548	0.13670	0.11958	0.10416	0.09044	0.07833	0.06774
1.7	0.20976	0.18969	0.17033	0.15196	0.13480	0.11899	0.10461	0.09166	0.08011	0.06988
1.8	0.20000	0.18208	0.16468	0.14805	0.13238	0.11782	0.10444	0.09227	0.08130	0.07149
1.9	0.19061	0.17459	0.15893	0.14387	0.12957	0.11617	0.10375	0.09235	0.08199	0.07262
2.0	0.18162	0.16727	0.15317	0.13951	0.12647	0.11415	0.10264	0.09199	0.08223	0.07333
2.1	0.17303	0.16016	0.14744	0.13506	0.12316	0.11184	0.10119	0.09126	0.08209	0.07366
2.2	0.16485	0.15329	0.14181	0.13057	0.11971	0.10931	0.09947	0.09023	0.08162	0.07367
2.3	0.15708	0.14667	0.13630	0.12610	0.11618	0.10663	0.09753	0.08894	0.08089	0.07340
2.4	0.14970	0.14033	0.13094	0.12167	0.11260	0.10384	0.09544	0.08746	0.07993	0.07289
2.5	0.14272	0.13426	0.12576	0.11732	0.10903	0.10098	0.09322	0.08581	0.07897	0.07217
2.6	0.13611	0.12846	0.12075	0.11306	0.10548	0.09809	0.09092	0.08405	0.07750	0.07129
2.7	0.12986	0.12294	0.11593	0.10892	0.10199	0.09518	0.08857	0.08219	0.07608	0.07027
2.8	0.12395	0.11768	0.11131	0.10491	0.09855	0.09230	0.08619	0.08027	0.07458	0.06914
2.9	0.11837	0.11267	0.10687	0.10103	0.09520	0.08944	0.08380	0.07831	0.07301	0.06792
3.0	0.11310	0.10792	0.10263	0.09729	0.09194	0.08664	0.08142	0.07633	0.07139	0.06663
3.1	0.10812	0.10341	0.09858	0.09368	0.08877	0.08388	0.07906	0.07433	0.06973	0.06528
3.2	0.10342	0.09912	0.09471	0.09022	0.08570	0.08120	0.07673	0.07234	0.06806	0.06389
3.3	0.09898	0.09505	0.09101	0.08689	0.08274	0.07858	0.07445	0.07037	0.06637	0.06248
3.4	0.09479	0.09120	0.08749	0.08371	0.07988	0.07603	0.07221	0.06842	0.06470	0.06106
3.5	0.09082	0.08754	0.08414	0.08065	0.07712	0.07357	0.07002	0.06650	0.06303	0.05962
3.6	0.08708	0.08406	0.08094	0.07773	0.07447	0.07118	0.06789	0.06462	0.06138	0.05819
3.7	0.08354	0.08077	0.07789	0.07493	0.07192	0.06888	0.06582	0.06277	0.05975	0.05677
3.8	0.08018	0.07764	0.07499	0.07226	0.06947	0.06665	0.06381	0.06097	0.05815	0.05536
3.9	0.07701	0.07467	0.07222	0.06970	0.06712	0.06450	0.06186	0.05922	0.05658	0.05397
4.0	0.07401	0.07185	0.06959	0.06726	0.06487	0.06243	0.05998	0.05751	0.05505	0.05260
4.1	0.07116	0.06917	0.06708	0.06492	0.06270	0.06044	0.05815	0.05585	0.05355	0.05125
4.2	0.06847	0.06662	0.06469	0.06269	0.06063	0.05852	0.05639	0.05424	0.05208	0.04994
4.3	0.06591	0.06420	0.06241	0.06055	0.05864	0.05668	0.05469	0.05268	0.05066	0.04864
4.4	0.06348	0.06190	0.06024	0.05851	0.05673	0.05490	0.05304	0.05117	0.04928	0.04738
4.5	0.06118	0.05971	0.05816	0.05656	0.05490	0.05320	0.05146	0.04970	0.04793	0.04615
4.6	0.05899	0.05762	0.05619	0.05469	0.05314	0.05155	0.04993	0.04829	0.04662	0.04495
4.7	0.05690	0.05564	0.05430	0.05291	0.05146	0.04998	0.04846	0.04692	0.04536	0.04379
4.8	0.05492	0.05374	0.05250	0.05120	0.04985	0.04846	0.04704	0.04559	0.04413	0.04265
4.9	0.05304	0.05194	0.05078	0.04956	0.04830	0.04700	0.04567	0.04431	0.04294	0.04155
5.0	0.05124	0.05022	0.04914	0.04800	0.04682	0.04560	0.04435	0.04308	0.04178	0.04047
5.1	0.04953	0.04858	0.04756	0.04650	0.04540	0.04426	0.04308	0.04188	0.04066	0.03943
5.2	0.04791	0.04701	0.04606	0.04507	0.04403	0.04296	0.04186	0.04073	0.03958	0.03842
5.3	0.04635	0.04551	0.04463	0.04369	0.04272	0.04172	0.04068	0.03962	0.03854	0.03744
5.4	0.04487	0.04408	0.04325	0.04238	0.04146	0.04052	0.03954	0.03854	0.03753	0.03649
5.5	0.04345	0.04271	0.04193	0.04111	0.04026	0.03937	0.03845	0.03751	0.03655	0.03557
5.6	0.04210	0.04141	0.04067	0.03990	0.03910	0.03826	0.03740	0.03651	0.03560	0.03467
5.7	0.04080	0.04015	0.03947	0.03874	0.03798	0.03719	0.03638	0.03554	0.03468	0.03381
5.8	0.03957	0.03896	0.03831	0.03763	0.03691	0.03617	0.03540	0.03461	0.03380	0.03297
5.9	0.03838	0.03781	0.03720	0.03656	0.03588	0.03518	0.03445	0.03371	0.03294	0.03216
6.0	0.03725	0.03671	0.03613	0.03553	0.03489	0.03423	0.03354	0.03284	0.03211	0.03137
6.1	0.03616	0.03565	0.03511	0.03454	0.03394	0.03331	0.03266	0.03200	0.03131	0.03061
6.2	0.03512	0.03464	0.03413	0.03359	0.03302	0.03243	0.03182	0.03118	0.03053	0.02987
6.3	0.03413	0.03367	0.03319	0.03268	0.03214	0.03158	0.03100	0.03040	0.02978	0.02915
6.4	0.03317	0.03274	0.03228	0.03180	0.03129	0.03076	0.03021	0.02964	0.02906	0.02846
6.5	0.03225	0.03184	0.03141	0.03095	0.03047	0.02997	0.02945	0.02891	0.02835	0.02778
6.6	0.03137	0.03098	0.03057	0.03014	0.02968	0.02921	0.02871	0.02820	0.02767	0.02713
6.7	0.03053	0.03016	0.02977	0.02936	0.02892	0.02847	0.02800	0.02752	0.02702	0.02650
6.8	0.02972	0.02936	0.02899	0.02860	0.02819	0.02776	0.02732	0.02686	0.02638	0.02589
6.9	0.02893	0.02860	0.02825	0.02788	0.02749	0.02708	0.02666	0.02622	0.02576	0.02530
7.0	0.02818	0.02786	0.02753	0.02718	0.02681	0.02642	0.02602	0.02560	0.02517	0.02472

注: ① R —— 圆形面积的半径 (m);② Z —— 计算点离基础底面的垂直距离 (m);③ r —— 计算点距圆形面积中心的水平距离 (m)。

附录 B 圆形面积上均布荷载作用下各点平均附加应力系数 $\bar{\alpha}_i$

表 B 圆形面积上均布荷载作用下各点平均附加应力系数 $\bar{\alpha}_i$

r/R Z/r	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
0.0	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	0.50000
0.1	0.99975	0.99974	0.99971	0.99965	0.99954	0.99932	0.99884	0.99762	0.99334	0.96698	0.49186
0.2	0.99808	0.99801	0.99778	0.99732	0.99650	0.99496	0.99184	0.98461	0.96439	0.91800	0.48391
0.3	0.99381	0.99359	0.99291	0.99157	0.98920	0.98497	0.97697	0.96056	0.92302	0.82577	0.47580
0.4	0.98623	0.98578	0.98439	0.98173	0.97715	0.96933	0.95558	0.93014	0.88005	0.77323	0.46759
0.5	0.97508	0.97435	0.97208	0.96784	0.96075	0.94916	0.92999	0.89737	0.83959	0.73070	0.45927
0.6	0.96053	0.95949	0.95630	0.95044	0.94088	0.92585	0.90222	0.86451	0.80259	0.69518	0.45088
0.7	0.94302	0.94169	0.93762	0.93025	0.91852	0.90064	0.87367	0.83266	0.76894	0.66167	0.44242
0.8	0.92313	0.92154	0.91671	0.90805	0.89455	0.87450	0.84519	0.80226	0.73824	0.63786	0.43393
0.9	0.90149	0.89968	0.89422	0.88455	0.86969	0.84809	0.81729	0.77346	0.71009	0.61386	0.42542
1.0	0.87868	0.87670	0.87076	0.86033	0.84451	0.82189	0.79027	0.74626	0.68412	0.59207	0.41693
1.1	0.85520	0.85310	0.84682	0.83587	0.81942	0.79620	0.76427	0.72058	0.66004	0.57207	0.40849
1.2	0.83147	0.82929	0.82279	0.81151	0.79471	0.77124	0.73936	0.69634	0.63759	0.55353	0.40012
1.3	0.80782	0.80560	0.79897	0.78752	0.77058	0.74712	0.71570	0.67344	0.61659	0.53625	0.39188
1.4	0.78450	0.78225	0.77557	0.76409	0.74718	0.72392	0.69287	0.65180	0.59688	0.52004	0.38364
1.5	0.76168	0.75944	0.75277	0.74134	0.72459	0.70166	0.67125	0.63131	0.57382	0.50477	0.37565
1.6	0.73950	0.73728	0.73067	0.71936	0.70286	0.68036	0.65068	0.61191	0.56080	0.49305	0.36776
1.7	0.71804	0.71585	0.70933	0.69829	0.68200	0.66000	0.63109	0.59352	0.54424	0.47669	0.36004
1.8	0.69735	0.69519	0.68879	0.67788	0.66203	0.64058	0.61246	0.57607	0.52854	0.46372	0.35249
1.9	0.67745	0.67534	0.66907	0.65840	0.64292	0.62202	0.59472	0.55950	0.51366	0.45138	0.34512
2.0	0.65836	0.65629	0.65017	0.63975	0.62485	0.60433	0.57784	0.54375	0.49952	0.43963	0.33793
2.1	0.64006	0.63804	0.63207	0.62191	0.60722	0.58746	0.56176	0.52877	0.48607	0.42842	0.33093
2.2	0.62254	0.62058	0.61475	0.60486	0.59057	0.57137	0.54645	0.51451	0.47326	0.41772	0.32411
2.3	0.60578	0.60386	0.59819	0.58856	0.57467	0.55602	0.53185	0.50092	0.46106	0.40749	0.31749
2.4	0.58974	0.58788	0.58236	0.57299	0.55949	0.54138	0.51793	0.48797	0.44941	0.39770	0.31106
2.5	0.57441	0.57260	0.56723	0.55812	0.54499	0.52740	0.50465	0.47561	0.43830	0.38834	0.30482
2.6	0.55975	0.55798	0.55276	0.54390	0.53113	0.51404	0.49196	0.46381	0.42767	0.37935	0.29876
2.7	0.54572	0.54408	0.53892	0.53030	0.51789	0.50129	0.47985	0.45254	0.41751	0.37074	0.29288
2.8	0.53230	0.53063	0.52568	0.51730	0.50523	0.48909	0.46826	0.44176	0.40779	0.36248	0.28718
2.9	0.51946	0.51784	0.51302	0.50486	0.49312	0.47742	0.45718	0.43144	0.39848	0.35455	0.28166
3.0	0.50716	0.50558	0.50089	0.49295	0.48152	0.46626	0.44658	0.42156	0.38955	0.34693	0.27630
3.1	0.49539	0.49385	0.48928	0.48154	0.47042	0.45556	0.43642	0.41209	0.38099	0.33961	0.27111
3.2	0.48410	0.48260	0.47815	0.47061	0.45978	0.44531	0.42668	0.40302	0.37278	0.33257	0.26608
3.3	0.47327	0.47181	0.46747	0.46013	0.44957	0.43548	0.41734	0.39431	0.36489	0.32579	0.26120
3.4	0.46289	0.46146	0.45723	0.45007	0.43978	0.42605	0.40837	0.38594	0.35730	0.31926	0.25648
3.5	0.45292	0.45153	0.44740	0.44042	0.43039	0.41700	0.39977	0.37791	0.35001	0.31140	0.25190
3.6	0.44335	0.44199	0.43796	0.43115	0.42136	0.40830	0.39150	0.37019	0.34300	0.30692	0.24745
3.7	0.43415	0.43282	0.42889	0.42224	0.41268	0.39994	0.38354	0.36275	0.33624	0.30107	0.24315
3.8	0.42530	0.42400	0.42016	0.41367	0.40434	0.39189	0.37589	0.35560	0.32973	0.29543	0.23897
3.9	0.41678	0.41552	0.41177	0.40542	0.39631	0.38415	0.36852	0.34871	0.32346	0.28999	0.23492
4.0	0.40859	0.40735	0.40369	0.39748	0.38858	0.37670	0.36143	0.34208	0.31741	0.28473	0.23098
4.1	0.40070	0.39949	0.39590	0.38984	0.38113	0.36951	0.35459	0.33567	0.31158	0.27965	0.22717
4.2	0.39309	0.39191	0.38840	0.38247	0.37396	0.36259	0.34799	0.32950	0.30594	0.27474	0.22347
4.3	0.38575	0.38460	0.38116	0.37537	0.36702	0.35591	0.34163	0.32354	0.30050	0.26999	0.21987
4.4	0.37868	0.37754	0.37418	0.36850	0.36034	0.34946	0.33548	0.31778	0.29524	0.26539	0.21638
4.5	0.37184	0.37074	0.36744	0.36188	0.35389	0.34323	0.32965	0.31222	0.29015	0.26094	0.21299
4.6	0.36525	0.36416	0.36094	0.35548	0.34765	0.33722	0.32381	0.30684	0.28523	0.25663	0.20969
4.7	0.35887	0.35781	0.35465	0.34930	0.34163	0.33140	0.31827	0.30164	0.28047	0.25245	0.20649
4.8	0.35271	0.35166	0.34856	0.34332	0.33580	0.32578	0.31290	0.29660	0.27586	0.24840	0.20330
4.9	0.34674	0.34572	0.34268	0.33754	0.33017	0.32034	0.30771	0.29173	0.27139	0.24448	0.20035
5.0	0.34097	0.33997	0.33699	0.33195	0.32471	0.31507	0.30268	0.28701	0.26706	0.24067	0.19741
5.1	0.33519	0.33440	0.33148	0.32653	0.31943	0.30997	0.29781	0.28243	0.26287	0.23687	0.19454
5.2	0.32993	0.32901	0.32614	0.32128	0.31431	0.30502	0.29309	0.27800	0.25879	0.23338	0.18176
5.3	0.32478	0.32378	0.32096	0.31619	0.30935	0.30023	0.28852	0.27370	0.25484	0.22990	0.18904
5.4	0.31965	0.31872	0.31595	0.31126	0.30454	0.29558	0.28408	0.26952	0.25100	0.22651	0.18640
5.5	0.31472	0.31380	0.31108	0.30648	0.29987	0.29107	0.27977	0.26547	0.24728	0.22322	0.18383
5.6	0.30993	0.30903	0.30636	0.30183	0.29534	0.28669	0.27569	0.26153	0.24366	0.22002	0.18132
5.7	0.30529	0.30440	0.30177	0.29733	0.29094	0.28244	0.27152	0.25771	0.24014	0.21691	0.17888
5.8	0.30078	0.29991	0.29732	0.29295	0.28667	0.27831	0.26758	0.25400	0.23672	0.21389	0.17650
5.9	0.29640	0.29554	0.29300	0.28870	0.28252	0.27430	0.26374	0.25039	0.23340	0.21094	0.17418
6.0	0.29213	0.29130	0.28880	0.28456	0.27845	0.27040	0.26001	0.24687	0.23016	0.20807	0.17191
6.1	0.28800	0.28717	0.28471	0.28054	0.27457	0.26661	0.25639	0.24346	0.22701	0.20528	0.16970
6.2	0.28397	0.28316	0.28073	0.27663	0.27075	0.26292	0.25286	0.24013	0.22394	0.20255	0.16755
6.3	0.28006	0.27926	0.27687	0.27283	0.26704	0.25932	0.24942	0.23689	0.22096	0.19990	0.16545
6.4	0.27626	0.27546	0.27310	0.26913	0.26343	0.25583	0.24607	0.23374	0.21805	0.19732	0.16339
6.5	0.27253	0.27176	0.26944	0.26554	0.25991	0.25242	0.24282	0.23067	0.21521	0.19480	0.16139
6.6	0.26892	0.26815	0.26587	0.26202	0.25648	0.24911	0.23964	0.22767	0.21245	0.19234	0.15943
6.7	0.26540	0.26464	0.26239	0.25859	0.25314	0.24587	0.23655	0.22475	0.20976	0.18994	0.15752
6.8	0.26197	0.26122	0.25901	0.25525	0.24988	0.24272	0.23353	0.22191	0.20713	0.18760	0.15565
6.9	0.25862	0.25789	0.25570	0.25201	0.24671	0.23965	0.23059	0.21913	0.20456	0.18531	0.15382
7.0	0.25536	0.25464	0.25248	0.24884	0.24361	0.23666	0.22772	0.21642	0.20206	0.18229	0.15204

续表 B

r/R z/r	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0
0.0	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
0.1	0.02797	0.00486	0.00148	0.00060	0.00030	0.00016	0.00010	0.00006	0.00004	0.00003
0.2	0.08870	0.02535	0.00938	0.00420	0.00215	0.00121	0.00074	0.00047	0.00032	0.00022
0.3	0.13779	0.05306	0.02338	0.01156	0.00629	0.00368	0.00229	0.00150	0.00102	0.00072
0.4	0.17284	0.07979	0.04009	0.02167	0.01250	0.00764	0.00489	0.00326	0.00225	0.00160
0.5	0.19774	0.10279	0.05685	0.03306	0.02014	0.01279	0.00844	0.00575	0.00404	0.00291
0.6	0.21558	0.12178	0.07233	0.04460	0.02846	0.01875	0.01272	0.00887	0.00633	0.00462
0.7	0.22839	0.13717	0.08602	0.05560	0.03691	0.02511	0.01749	0.01246	0.00905	0.00670
0.8	0.23752	0.14951	0.09785	0.06570	0.04508	0.03155	0.02251	0.01635	0.01207	0.00906
0.9	0.24391	0.15934	0.10791	0.07475	0.05274	0.03784	0.02757	0.02039	0.01530	0.01163
1.0	0.24819	0.16709	0.11637	0.08274	0.05978	0.04381	0.03253	0.02447	0.01863	0.01434
1.1	0.25085	0.17313	0.12342	0.08969	0.06613	0.04937	0.03729	0.02847	0.02196	0.01712
1.2	0.25221	0.17775	0.12924	0.09569	0.07180	0.05449	0.04177	0.03233	0.02525	0.01989
1.3	0.25256	0.18121	0.13399	0.10081	0.07681	0.05913	0.04593	0.03599	0.02843	0.02263
1.4	0.25211	0.18369	0.13781	0.10515	0.08119	0.06330	0.04976	0.03942	0.03146	0.02528
1.5	0.25100	0.18536	0.14085	0.10879	0.08500	0.06702	0.05325	0.04261	0.03433	0.02782
1.6	0.24938	0.18635	0.14319	0.11181	0.08828	0.07031	0.05641	0.04555	0.03701	0.03024
1.7	0.24735	0.18677	0.14496	0.11428	0.09108	0.07319	0.05923	0.04823	0.03950	0.03251
1.8	0.24499	0.18672	0.14621	0.11627	0.09344	0.07571	0.06176	0.05067	0.04179	0.03464
1.9	0.24237	0.18628	0.14704	0.11784	0.09542	0.07789	0.06399	0.05287	0.04389	0.03661
2.0	0.23956	0.18552	0.14749	0.11903	0.09706	0.07976	0.06595	0.05483	0.04581	0.03843
2.1	0.23660	0.18448	0.14763	0.11990	0.09838	0.08134	0.06767	0.05659	0.04754	0.04011
2.2	0.23352	0.18322	0.14749	0.12049	0.09943	0.08267	0.06916	0.05815	0.04911	0.04164
2.3	0.23037	0.18178	0.14713	0.12084	0.10024	0.08378	0.07044	0.05952	0.05051	0.04303
2.4	0.22716	0.18018	0.14656	0.12096	0.10083	0.08467	0.07162	0.06071	0.05175	0.04428
2.5	0.22392	0.17847	0.14584	0.12091	0.10123	0.08538	0.07244	0.06175	0.05286	0.04541
2.6	0.22067	0.17666	0.14497	0.12069	0.10146	0.08593	0.07320	0.06265	0.05383	0.04643
2.7	0.21742	0.17477	0.14398	0.12033	0.10155	0.08633	0.07381	0.06341	0.05469	0.04733
2.8	0.21419	0.17282	0.14290	0.11985	0.10151	0.08659	0.07430	0.06404	0.05543	0.04813
2.9	0.21098	0.17084	0.14173	0.11927	0.10135	0.08674	0.07467	0.06457	0.05606	0.04884
3.0	0.20781	0.16882	0.14050	0.11860	0.10109	0.08679	0.07493	0.06500	0.05660	0.04945
3.1	0.20467	0.16678	0.13922	0.11786	0.10074	0.08674	0.07510	0.06533	0.05705	0.04999
3.2	0.20158	0.16474	0.13789	0.11705	0.10032	0.08661	0.07519	0.06558	0.05742	0.05044
3.3	0.19854	0.16269	0.13652	0.11618	0.09984	0.08641	0.07521	0.06576	0.05772	0.05083
3.4	0.19555	0.16064	0.13513	0.11528	0.09929	0.08614	0.07515	0.06587	0.05795	0.05115
3.5	0.19262	0.15860	0.13372	0.11433	0.09870	0.08582	0.07504	0.06591	0.05812	0.05142
3.6	0.18974	0.15658	0.13230	0.11336	0.09806	0.08544	0.07487	0.06590	0.05823	0.05163
3.7	0.18691	0.15458	0.13087	0.11236	0.09739	0.08503	0.07465	0.06584	0.05830	0.05179
3.8	0.18415	0.15260	0.12944	0.11134	0.09669	0.08457	0.07439	0.06574	0.05832	0.05190
3.9	0.18144	0.15064	0.12801	0.11030	0.09596	0.08409	0.07410	0.06560	0.05829	0.05197
4.0	0.17880	0.14870	0.12658	0.10926	0.09521	0.08357	0.07377	0.06542	0.05823	0.05200
4.1	0.17621	0.14679	0.12516	0.10820	0.09445	0.08303	0.07341	0.06520	0.05814	0.05200
4.2	0.17367	0.14492	0.12375	0.10715	0.09367	0.08247	0.07303	0.06496	0.05801	0.05197
4.3	0.17120	0.14307	0.12235	0.10609	0.09288	0.08189	0.07262	0.06469	0.05786	0.05191
4.4	0.16878	0.14125	0.12097	0.10503	0.09208	0.08130	0.07219	0.06440	0.05768	0.05182
4.5	0.16641	0.13946	0.11959	0.10398	0.09127	0.08070	0.07175	0.06409	0.05748	0.05171
4.6	0.16410	0.13771	0.11824	0.10293	0.09046	0.08008	0.07129	0.06377	0.05725	0.05157
4.7	0.16184	0.13598	0.11690	0.10188	0.08965	0.07946	0.07083	0.06342	0.05701	0.05142
4.8	0.15964	0.13429	0.11557	0.10084	0.08884	0.07883	0.07034	0.06307	0.05676	0.05125
4.9	0.15747	0.13263	0.11427	0.09981	0.08803	0.07819	0.06986	0.06270	0.05649	0.05106
5.0	0.15537	0.13100	0.11298	0.09879	0.08722	0.07756	0.06936	0.06232	0.05621	0.05086
5.1	0.15331	0.12940	0.11172	0.09778	0.08641	0.07692	0.06886	0.06193	0.05591	0.05065
5.2	0.15130	0.12783	0.11047	0.09678	0.08561	0.07628	0.06835	0.06153	0.05561	0.05042
5.3	0.14934	0.12629	0.10924	0.09580	0.08481	0.07564	0.06784	0.06113	0.05530	0.05019
5.4	0.14742	0.12478	0.10803	0.09482	0.08402	0.07500	0.06733	0.06072	0.05498	0.04994
5.5	0.14554	0.12330	0.10684	0.09385	0.08324	0.07436	0.06681	0.06031	0.05465	0.04969
5.6	0.14371	0.12185	0.10567	0.09290	0.08246	0.07373	0.06630	0.05989	0.05432	0.04943
5.7	0.14191	0.12043	0.10452	0.09196	0.08169	0.07309	0.06578	0.05947	0.05399	0.04917
5.8	0.14016	0.11903	0.10339	0.09103	0.08093	0.07247	0.06526	0.05905	0.05365	0.04889
5.9	0.13844	0.11767	0.10228	0.09012	0.08017	0.07184	0.06475	0.05863	0.05330	0.04862
6.0	0.13677	0.11633	0.10118	0.08922	0.07943	0.07122	0.06424	0.05821	0.05296	0.04834
6.1	0.13513	0.11501	0.10011	0.08833	0.07869	0.07061	0.06373	0.05779	0.05261	0.04805
6.2	0.13352	0.11372	0.09905	0.08746	0.07796	0.07000	0.06322	0.05737	0.05226	0.04777
6.3	0.13195	0.11246	0.09802	0.08659	0.07724	0.06940	0.06272	0.05694	0.05191	0.04748
6.4	0.13042	0.11122	0.09700	0.08575	0.07653	0.06880	0.06221	0.05652	0.05156	0.04718
6.5	0.12891	0.11001	0.09599	0.08491	0.07583	0.06821	0.06172	0.05610	0.05121	0.04689
6.6	0.12744	0.10882	0.09501	0.08409	0.07513	0.06763	0.06122	0.05569	0.05085	0.04660
6.7	0.12600	0.10765	0.09404	0.08327	0.07445	0.06705	0.06073	0.05527	0.05050	0.04630
6.8	0.12459	0.10651	0.09309	0.08248	0.07378	0.06648	0.06025	0.05486	0.05015	0.04601
6.9	0.12321	0.10538	0.09216	0.08169	0.07311	0.06591	0.05976	0.05445	0.04980	0.04571
7.0	0.12186	0.10428	0.09124	0.08092	0.07245	0.06535	0.05929	0.05404	0.04946	0.04542

注: ① R —— 圆形面积的半径 (m);② z —— 计算点离基础底面的垂直距离 (m);③ r —— 计算点距圆形面积中心的水平距离 (m)。

附录 C 复合地基载荷试验要点

C.0.1 单桩复合地基载荷试验的压板可用圆形或方形，面积为一根桩承担的处理面积；多桩复合地基载荷试验的压板可用方形或矩形，其尺寸按实际桩数所承担的处理面积确定。

C.0.2 压板底高程应与基础底面设计高程相同，压板下宜设中粗砂找平层。

C.0.3 加荷等级可分为 8 ~ 12 级，总加载量不宜少于设计要求值的两倍。

C.0.4 每加一级荷载 Q ，在加荷前应各读记压板沉降 s 一次，以后每半小时读记一次。当一小时内沉降增量小于 0.1 mm 时即可加下一级荷载；对饱和粘性土地基中的振冲桩或砂石桩，一小时内沉降增量小于 0.25 mm 时即可加下一级荷载。

C.0.5 当出现下列现象之一时，可终止试验：

- 1 沉降急骤增大、土被挤出或压板周围出现明显的裂缝；
- 2 累计的沉降量已大于压板宽度或直径的 10 %；
- 3 总加载量已为设计要求值的两倍以上。

C.0.6 卸荷可分三级等量进行，每卸一级，读记回弹量，直至变形稳定。

C.0.7 复合地基承载力基本值的确定:

1 当 $Q \sim s$ 曲线上有明显的比例极限时,可取该比例极限所对应的荷载;

2 当极限荷载能确定,而其值又小于对应比例极限荷载值的 1.5 倍时,可取极限荷载的一半;

3 按相对变形值确定:

a 振冲桩和砂石桩复合地基。对以粘性土为主的地基,可取 s/b 或 $s/d=0.02$ 所对应的荷载 (b 和 d 分别为压板宽度和直径);对以粉土或砂土为主的地基,可取 s/b 或 $s/d=0.015$ 所对应的荷载。

b 土挤密桩复合地基,可取 s/b 或 $s/d=0.010 \sim 0.015$ 所对应的荷载;对灰土挤密桩复合地基,可取 s/b 或 $s/d=0.008$ 所对应的荷载。

C.0.8 试验点的数量不应少于 3 点,当满足其极差不超过平均值的 30 % 时,可取其平均值为复合地基承载力标准值。

附录D 用词说明

本规范条文中要求严格程度的用词，在执行时按下述说明区别对待。

D.0.1 表示很严格，非这样不可的用词：

正面词采用“必须”；

反面词采用“严格”。

D.0.2 表示严格，在正常情况下应这样做的用词：

正面词采用“应”；

反面词采用“不应”或“不得”。

D.0.3 表示允许稍有选择，在条件许可时首先应这样做的用词：

正面词采用“宜”或“可”；

反面词采用“不宜”。

**附加说明 本规范主编单位和主要
起草人名单**

主 编 单 位：上海高桥石油化工设计院

主要起草人：贾庆山