上海市工程建设规范《地基基础设计规范》(DGJ08-11-1999)—地基处理设计要点简介

叶观宝　赵春风　叶书麟
(同济大学土木工程学院地下系，上海，200092)

提　要　本文介绍上海市工程建设规范《地基基础设计规范》(DGJ08-11-1999)——地基处理设计要点一章的主要特点和主要内容。

一　编制原则

规范采用以概率理论为基础的极限状态设计方法，并以分项系数表达的极限状态设计表达式进行计算。即按承载能力极限状态验算地基承载力，同时按正常使用极限状态验算地基变形。

地基基础极限状态分为两类：

(1)承载能力极限状态：对应于地基基础达到最大承载能力或发生不适合于继续承载的过度变形。

(2)正常使用极限状态：对应于地基基础达到建筑物正常使用所规定的容许变形值或达到耐久性要求的某项限值。

地基基础承载能力极限状态的计算应采用荷载效应的基本组合，抗震设防时，应计入地震效应组合。按正常使用极限状态验算地基沉降时应采用荷载的长期效应组合；验算基础水平变位、抗裂、裂缝宽度时，应根据使用要求和裂缝控制等级分别采用荷载的短期效应组合或短期效应组合考虑长期的影响。

采用容许承载力设计原则时，荷载取用标准值，处理后的地基承载力取用容许承载力。采用概率极限状态设计原则时，荷载取用设计值，处理后的地基承载力也应当取用设计值。

按本节所述方法进行地基处理后复合地基承载力采用概率极限状态设计原则时，是本着保持采用容许承载力设计原则的安全水准不变的前提下，采用综合变量形式给出分项形式方法进行设计原则转轨，得到复合地基承载力设计值的设计公式。地基处理后地基承载力，当采用静载荷试验确定时，有试验所得的承载力为地基进行承载力，近似考虑到地基承载力的安全系数一般为 2，故在由试验值换算为地基承载力设计值时，其分项系数取 1.6。

二 规范主要的特点

(1)所列各种地基处理方法包含了上海市标准《地基处理技术规范》(DBJ08-40-94)中所含方法，均为上海地区应用较多、基本成熟的方法，本次重点介绍各种方法的设计要点；

(2)经过多年实践，各种方法有了进一步的发展，本次编制时作了适当的补充和修改；

(3)采用概率极限状态设计原则，与上部结构设计原则相匹配；

(4)强调了地基处理设计时，必须遵循软土地基变形控制设计理论，通过变形计算来确定有关设计参数。

(5)强调地基处理的特殊性及监理与监测的重要性。

(6)强调多种方法联合处理地基。

三 规范主要内容

1．一般规定

地基处理的设计计算须按承载能力极限状态验算地基承载力，同时应按正常使用极限状态验算地基变形。

处理后的地基承载力应满足下式要求：

$$P_d \leqslant f_{sp,d} \tag{1}$$

$$f_{sp,d} = f_{sp,k} / \gamma_R \tag{2}$$

式中 p_d——基础底面处平均压力的设计值(kPa)；

$f_{sp,d}$——处理后地基承载力设计值(kPa)；

$f_{sp,k}$——地基经过处理后由载荷试验得到的地基极限承载力标准值(kPa)。

2．换填法

换填法适用于表层有淤泥质土、松散素填土、杂填土、浜填土和已完成自重固结的冲填土等浅层软弱土层的换土处理，以及建筑物场地低洼需要填土的处理。

垫层的底面尺寸可由基础边缘向下作 45° 的直线扩大确定，并按式(3)计算：

条形基础：$b_s = b + 2h_s$ (3-1)

矩形基础：$b_s = b + 2h_s$ (3-2)

$l_s = l + 2h_s$ (3-3)

式中 l, b——基础底面长度、宽度(m)；

l_s, b_s——砂垫层底面长度、宽度(m)；

h_s——砂垫层厚度(m)。

垫层的厚度应根据垫层下土层的承载力确定，一般不大于 3m 和不小于 1m，并按式(4)计算：

$$p_s = (\alpha \cdot p_d + 1.2\gamma_s \cdot h_s - \gamma_w h_t) \leqslant f_d \tag{4}$$

式中 p_s——垫层底面处的压力设计值(kPa)；

α——基底有效压力扩散系数，当$h_s \leqslant 0.5b$时，查表确定；当$h_s > 0.5b$时，条形基础$\alpha = \dfrac{b}{b+h_s}$，矩形基础$\alpha = \dfrac{l \cdot b}{(l+h_s)(b+h_s)}$；

p_d——基底平均压力设计值(kPa)，$p_d = (F_d + G_d)/A$；

F_d——上部结构传至基础顶面的竖向力设计值(kN)；

G_d——基础自重和基础上覆土重的设计值(kN)，基础材料和上覆土的混合重度取20kN/m³，自重分项系数取1.2；地下水位以下应扣除浮力，浮力作用分项系数取1.0；

γ_s——垫层的重度(地下水位以下取饱和重度)(kN/m³)；

γ_w——水的重度(kN/m³)；

f_d——垫层底面下土层的地基承载力设计值(kPa)；

A——基础底面积(m²)。

当无试验资料时，可按表1选用垫层的承载力设计值$f_{sp,d}$和压缩模量E_s（或变形模量E_0）。

3. 预压法

预压法分为堆载预压法和真空预压法两类，目前在上海地区使用最为广泛的是堆载预压，堆载预压中要以油罐地基的充水预压法使用最为普遍，已建成的有上海高桥石化炼油厂5万立方米油罐。该厂的2个10万立方米油罐地基的充水预压已经取得成功，将为我国在软土地基上建造特大型油罐开创新的一页。

表1 密实材料的$f_{sp,d}$、E_s（或E_0）值

垫层材料	$f_{sp,d}$ (kPa)	E_s或E_0 (MPa)
砂(或砂石)垫层	185～250	E_s=20～30
干渣垫层	310～500	E_0=25～40
粉煤灰垫层	150～250	E_s=8～20

注：上海市各电厂粉煤灰均可作为填筑材料；

以上粉煤灰已考虑浸水强度降低的因素。

预压法适用于淤泥质土、淤泥和冲填土等软土地基。可应用于油罐地基、堆场、机场跑道和港区陆域大面积填土及建筑等工程。

预压法加固地基通常要设置竖向排水体和铺设排水砂垫层。预压荷载的大小一般可与基底压力相同，预压荷载的顶面范围应大于基础外缘所包围的范围。对沉降和不均匀沉降有严格要求的建筑物，或为了缩短预压时间，则可采用超载预压。其超载大小应根据限定的预压时间内要求消除的变形量通过计算确定。一般预压荷载可取设计荷载的1.1～1.4倍。

4. 深层密实法

深层密实法包括强夯法和碎(砂)石桩法。

强夯法适用于砂土、含水量低于25%的杂填土、粘性土和粉性土，也可用以处理液

化地基。对淤泥质土，应经试验证明加固质量有效时方可采用。强夯法可应用于机场跑道、码头堆场、油罐、贮仓等空旷场地的工程。

强夯法设计的参数颇多，但如应用得当，即使在软土地区加固仍能取得效果。如崇明军用机场场道地基对强夯加固采用了多项措施：①增加塑料排水板，改善土体的排水条件；②增加遍数，减少每遍击数；③逐步增加能量，从表层土至深层土逐层加固；④考虑时间效应，保证有足够的时间。最后质量检验结果满足了设计预期要求。

设置垫层的作用有三方面原因：①必需具有一层能支承起重设备的稍硬表层；②垫层能对所施加的夯击能得到扩散，使夯击能向深度方向传递；③增加垫层可加大地下水位与地表面的距离，以免夯击成“橡皮土”。

碎(砂)石桩包括碎石桩和砂桩。碎(砂)石桩适用于砂土、粉性土、粘性土、人工填土等地基处理，也可用以处理液化地基。

对粘性土所构成的复合地基，其承载力设计值应通过现场复合地基载荷试验确定。如无试验资料时，也可按式(5)进行估算：

$$f_{sp,d}=[1+m(n-1)]\cdot f_{s,d} \tag{5}$$

式中 $f_{sp,d}$——复合地基承载力设计值(kPa)；

$f_{s,d}$——桩间土承载力设计值(kPa)；

n——桩土应力比。

无实测资料时，当天然土不排水抗剪强度 c_u=20～30kPa 时，n 取 3～4；当 c_u=30～40kPa 时，n 取 2～3。天然土强度低取大值，天然土强度高取小值。

为了验证公式(5)与按容许承载力设计原则的计算公式的安全度，选择了几个碎石桩的典型工程进行验算，验算结果见表 2。由表可见，转轨后碎石桩复合地基承载力设计公式与转轨前安全度基本一致。

表 2 上海地区碎石桩校核资料

序号	工程名称	$f_{s,k}$ (kPa)	$f_{sp,k}$ (kPa)	$f_{s,d}$ (kPa)	$f_{sp,d}$ (kPa)	$k=f_{sp,d}/f_{sp,k}$
1	凌桥水厂	87.36	109.20	83.38	120.00	1.10
2	凌桥水厂	166.2	207.75	191.94	253.17	1.32
3	凌桥水厂	185.91	232.39	197.80	260.90	1.12
4	上海炼油厂	133.56	212.63	175.61	260.00	1.22
5	上海炼油厂	133.56	192.86	175.61	235.83	1.22
6	华东石油销售分公司	116.58	168.34	131.66	212.93	1.26
7	上海良工阀门厂	119.72	196.34	132.99	250.82	1.28
8	上海高桥石化公司	133.52	172.24	186.89	204.92	1.19

注：表中 $f_{s,k}$ 为按原规范临塑荷载公式计算的地基土容许承载力；$f_{sp,k}$ 为按容许承载力设计原则和 $f_{s,k}$ 及设计置换率计算得到的复合地基容许承载力；$f_{s,d}$ 为按本规范公式计算的地基土承载力设计值；$f_{sp,d}$ 为按概率极限状态设计原则转轨后计算公式得到的复合地基承载力设计值。

对砂土或粉性土所构成的复合地基，复合地基承载力设计值也可按式(5)进行估算，但其中 $f_{s,d}$ 为达到设计要求密实度时的桩间土承载力设计值，桩土应力比 n 可取 2～3。

5. 化学加固法

化学加固法包括注浆法、高压喷射注浆法和水泥土搅拌法。

注浆法适用于砂性土、粉性土、粘性土和一般填土层。处理目的是防渗堵漏、提高地基土的强度和变形模量、进行托换技术和控制地层沉降。

用作防渗的注浆至少应设置三排注浆孔，浆液应选用水玻璃或水玻璃与水泥的混合液，注浆孔间距可按 1.0～1.5m 范围设计。用作提高土体强度的注浆液可选用以水泥为主剂的悬浊液，注浆孔间距可按 1.0～2.0m 范围设计。

在砂土地基中注浆时，一般使用的浆液初凝时间为 5～20 分钟；在粘性土中劈裂注浆时，一般浆液初凝时间为 1～2 小时。注浆量取决于地基土性质和浆液的渗透性等因素。一般粘性土地基中的浆液注入率为 15%～20%。

注浆压力的选用应根据土层的性质及其埋深确定。在砂土中的经验数值是 0.2～0.5MPa；在粘性土中的经验数值是 0.2～0.3MPa。注浆的流量一般为 7～10L/min，对充填型注浆，流量可适当加快，但不宜大于 20L/min。浆液水灰比一般取 0.5～0.6。

注浆孔的布置原则，应能使被加固土体在平面和深度范围内连成一个整体。注浆点的覆盖土应不小于 2m。

注浆法按注浆工艺所依据的基本原理，可分为渗入性注浆、劈裂注浆和压密注浆三类。劈裂注浆是上海地区常见的一种注浆方法。然而,在实际注浆中浆液往往以多种形式灌入在地基中，单一的流动方式是难以产生的。因此，渗透注浆也伴随有劈裂现象，只是以渗透方式为主而已。在上海，最常用的是渗入性注浆和劈裂注浆。平时泛称的压密注浆加固实际上是渗入性注浆和劈裂注浆的结合，浆液在地基中往往成脉状分布，它形成空间网架，是作为整体效果对地基进行加固。

当前对地基注浆加固的效果检查和评估仍然是个尚待进一步研究的问题。由于浆液注入地层的不均匀性,从理论上分析，应选用能从宏观上反映的检查手段,如一些地球物理检测方法。但实际上这些方法均存在对加固土体的强度和刚度等指标难以定量和直接反映的特点。标准贯入试验和静力触探试验是一种有损检测方法,它们还存在仅能反映调查孔一点的加固效果的特点。但却是一种简单实用的检测方法。

高压喷射注浆法适用于处理淤泥质土和粉性土等地基，但对于砾石直径过大,含量过多及有大量纤维质的腐殖土,应通过试验确定其适用性。

高压喷射注浆法可用于已建建筑的托换工程和新建建筑的地基处理、深基坑的挡土结构、坑底加固、防止管涌及地下防水帷幕等工程。

用旋喷桩处理的地基,宜按复合地基设计。当用作挡土结构时，按加固体独立承担荷载计算。旋喷桩复合地基承载力设计值应通过现场复合地基载荷试验确定。也可结合当地及土质相似工程的经验确定或按式(6)估算。

$$f_{sp,d}=m\frac{P_u}{\gamma_R A_p}+\beta\cdot(1-m)\cdot f_{s,d} \tag{6-1}$$

式中 $f_{sp,d}$——复合地基承载力设计值(kPa)；

γ_R——承载力分项系数，取 1.6；

A_p——桩的设计截面积(m^2)；

$f_{s,d}$——桩间土承载力设计值(kPa)；

β——桩间土承载力折减系数，可根据试验确定；在无试验资料时，可取 $\beta=$ 0.2～0.6;当不考虑桩间土的作用时,取 $\beta=0$;

P_u——单桩极限承载力标准值(kN)，可通过现场载荷试验确定;也可按式(6-2)和式(6-3)估算,并取其中较小值;

$$P_u=\eta\cdot f_{cu}\cdot A_p \tag{6-2}$$

$$P_u=U_p\sum_{i=1}^{n}l_i\cdot f_{si}+A_p\cdot f_k \tag{6-3}$$

f_{cu}——与桩身水泥配方相同的室内水泥土试块(边长 70.7mm 的立方体)在标准养护条件下，28 天龄期的抗压强度平均值(kPa);

η——桩身强度折减系数,可取 0.7;

U_p——桩的周长(m);

n——桩长范围内所划分的土层数;

l_i——桩周第 i 层土的厚度(m);

f_{si}——桩周第 i 层土的极限摩阻力标准值(kPa)，可参照钻孔灌注桩极限侧壁摩阻力标准值取用;

f_p——桩端土的极限承载力标准值(kPa)。

水泥土搅拌法适用于处理淤泥质土、地基承载力设计值不大于 120kPa 的粘性土和粉性土等地基。当用于场地内地下水具有侵蚀性时,应通过试验确定其适用性。

水泥的掺入量一般为被加固湿土重的 10%～15%或每立方米被加固软土掺入水泥 180～250kg。水泥浆水灰比可选用 0.45～0.55。

承重水泥土桩的桩长应通过沉降计算来确定。其单桩极限承载力标准值宜通过单桩载荷试验确定,也可按式(7-1)和(7-2)估算,并取其中小值:

$$P_u=\eta\cdot f_{cu}\cdot A_p \tag{7-1}$$

$$P_u=U_p\Sigma f_{si}\cdot l_i \tag{7-2}$$

式中 P_u——单桩极限承载力标准值(kN);

f_{cu}——与桩身水泥土配方相同的室内水泥土试块(边长为 70.7mm 的立方体)，在标准养护条件下，90 天龄期的抗压强度平均值(kPa);

A_p——桩的截面积(m^2);

η——桩身强度折减系数，可取 0.6;

U_p——桩的周长(m);

f_{si}——桩周土的平均极限摩阻力。对淤泥可取 10～16kPa；对淤泥质土可取 16～24kPa；对粘性土可取 24～30kPa;

l_i——桩周第 i 层土的厚度(m)。

承重水泥土桩复合地基承载力设计值宜通过复合地基载荷试验确定,也可按式(8)估算:

$$f_{sp,d}=m\frac{P_u}{\gamma_R A_p}+\beta\cdot(1-m)\cdot f_{s,d} \tag{8}$$

式中 $f_{sp,d}$——复合地基承载力设计值(kPa)；

m——桩土面积置换率；

β——桩间土承载力折减系数，当桩端为软土时，可取 0.5～1.0；当桩端为硬土时，可取 0.1～0.4；

$f_{s,d}$——桩间天然地基土承载力设计值(kPa)。

为了验证公式(8)与按容许承载力设计原则的计算公式的安全度，选择了几个水泥土桩的典型工程进行验算，验算结果见表 3。由表可见，转轨后水泥土桩复合地基承载力设计公式与转轨前安全度基本一致。

表 3 上海地区水泥土桩校核资料

序号	工程名称	$f_{s,k}$ (kPa)	$f_{sp,k}$ (kPa)	$f_{s,d}$ (kPa)	$f_{sp,d}$ (kPa)	$k=f_{sp,d}/f_{sp,k}$
1	开鲁住宅区	94.06	145.90	106.10	188.25	1.29
2	中国纺织大学	118.05	134.35	134.20	176.78	1.32
3	松江景家堰小区	118.04	160.36	126.20	202.79	1.26
4	松江中南路危房改造	142.80	163.80	168.90	209.77	1.28
5	东波苑小区	130.39	146.37	128.70	177.43	1.21
6	松江方松新村	100.93	137.90	107.70	174.31	1.26
7	平阳新村四街坊	136.36	160.12	126.05	188.12	1.17

注：表中 $f_{s,k}$ 为按原规范临塑荷载公式计算的地基土容许承载力；$f_{sp,k}$ 为按容许承载力设计原则和 $f_{s,k}$ 及设计置换率计算得到的复合地基容许承载力；$f_{s,d}$ 为按本规范公式计算的地基土承载力设计值；$f_{sp,d}$ 为按概率极限状态设计原则转轨后计算公式得到的复合地基承载力设计值。

承重水泥土桩复合地基的变形计算应包括水泥土桩群体的压缩变形和桩端下未加固土层的压缩变形之和。其中桩群体的压缩变形值可根据上部结构、桩长、桩身强度等按经验取 20～40mm。复合地基沉降计算时，地基的附加应力分布从基底开始扩散，将经加固后的复合层当作一层土来考虑。

6. 沉降控制复合桩基

沉降控制复合桩基适用于深厚软土地基上以沉降控制为主的八层及八层以下的多层建筑物。宜采用桩身截面边长≤250mm、长细比在 80 左右的预制混凝土小桩。桩距不宜小于 5～6 倍桩身截面尺寸。桩端应穿过压缩层范围内最高压缩性的土层，且进入压缩性相对较低但不一定十分坚硬的持力层；

单桩极限承载力标准值应通过单桩静载荷试验确定，当没有进行桩的静载荷试验时，可按桩长确定后，可由式(9)确定估算。

$$R_k = U_p \Sigma f_{si} \cdot l_i + f_p A_p \tag{9}$$

同时应满足桩身结构强度要求：

$$R_k \leqslant (0.60\sim0.75) A_p f_c \tag{10}$$

式中 R_k——单桩进行承载力标准值(kN)；

U_p——桩身截面周长(m)；

l_i——第 i 土层厚度(m)；

f_{si}、f_p——分别为桩侧第 i 土层的极限摩阻力标准值(kPa)和桩端处土层的极限端阻

力标准值(kPa)；

A_p——桩的截面积(m²)；

f_c——混凝土轴心抗压强度设计值标准值(kPa)。

复合桩基的承台底面积可按式(11)估算：

$$A_c \geqslant \frac{F_d + G_d}{\eta \cdot f_{s,d}} \tag{11}$$

式中 F_d——上部结构传至承台顶面的竖向荷载设计值(kN)；

G_d——承台自重和承台上覆土重的设计值(kN)；

$f_{s,d}$——承台下地基土承载力设计值(kPa)；

η——经验修正系数，可取 1.5～1.7。

复合桩基的整体承载力应满足式(12)要求：

$$F_d + G_d \leqslant \xi\, kR_k + A_c f_{s,d} \tag{12}$$

式中 ξ——复合桩基承载力调整系数，可取 0.55；

k——桩数。

7. 树根桩

树根桩常用于基础托换加固，也可用作承受垂直荷载支承桩、侧向支护桩和抗渗堵漏墙。树根桩直径一般在 100～300mm 范围内，桩长通常不超过 30m，布置型式有各种排列的直桩和网状结构的斜桩。

树根桩作为支承桩时，单桩承载力设计值一般应由现场载荷试验确定。当无试验资料时，亦可按摩擦桩设计：

$$R_d = \frac{1}{\gamma_R} U_p \Sigma f_{si} \cdot l_i \tag{13}$$

式中 R_d——单桩承载力设计值(kN)；

U_p——桩周长(m)；

f_{si}——第 i 层土层极限摩阻力标准值(kPa)；

l_i——第 i 层土层中的桩长度(m)。

γ_R——承载力分项系数，取 1.6。

树根桩桩身强度应按式(14)估算：

$$R_d \leqslant 0.60 f_c A_p \tag{14}$$

式中 A_p——桩身截面积(m²)；

f_c——桩身混凝土轴心抗压强度设计值(MPa)，桩身混凝土强度等级应不小于 C20。

8. 锚杆静压桩

锚杆静压桩适用于处理淤泥质土、粘性土、人工填土和松散粉土等地基。可应用于既有多层建筑物和中小型工业厂房的托换工程、或新建和改建的建筑物需要进行的地基处理。

对新建的建筑物需要采用桩基，但不具有单独打桩工期的情况下，可采用锚杆静压桩逆作施工方法进行地基处理。

当桩承受水平力、拔力和七度抗震设计时应采用焊接接头；当桩承受垂直压力时可采用硫磺胶泥接头。

9. 垂直土层锚杆

当地下建筑物及地下构筑物受到较大上浮力时，可采用垂直土层锚杆作为抗拔措施。一般情况下，垂直土层锚杆可不设自由段。其锚固段宜进入到砂质粉土、粉砂、暗绿色粘性土等较硬的土层中。

采用垂直土层锚杆抵抗建筑物浮力产生的上拔力时，应按式(15)验算建筑物的整体稳定性：

$$W_d \leqslant nR'_d + G_d \tag{15}$$

式中 W_d——浮力作用设计值(kN)，浮力作用分项系数取 1.05；

n——土层锚杆总数；

R'_d——单锚抗拔承载力设计值(kN)；

G_d——地下建筑物结构自重设计值，自重分项系数取 1.0。

当采用试锚时，单锚抗拔承载力设计值 R'_d 可按式(16)计算：

$$R'_d = \frac{R'_k}{\gamma_R} \tag{16}$$

式中 R'_k——单锚抗拔极限承载力标准值(kN)；

γ_R——单锚抗拔承载力分项系数，可取 2.0～2.5。

一般情况下垂直土层锚杆可仅按承载能力极限状态设计，受拉钢筋截面积按式(17)计算：

$$A_s = \frac{1.3R'_d}{f_y} \tag{17}$$

式中 A_s——锚杆钢筋截面积(mm^2)；

f_y——钢筋抗拉强度设计值(N/mm^2)。

参考文献

[1] 上海市工程建设规范《地基基础设计规范》(DGJ08-11-1999)，上海，上海市工程建设标准化办公室，1999。

[2] 中华人民共和国行业标准《建筑地基处理技术规范》(JGJ79-91)，北京，中国计划出版社，1991。

[3] 上海市标准《地基处理技术规范》(DBJ08-40-94)，上海，上海市工程建设标准化办公室，1994。

[4] 叶书麟，韩杰，叶观宝编著：《地基处理与托换技术(第二版)》，北京，中国建筑工业出版社，1994。

[5] 叶书麟，叶观宝编著：《地基处理》，北京，中国建筑工业出版社，1997。

[6] 叶观宝，叶书麟编著：《地基加固新技术》，北京，机械工业出版社，1999。