

第一章

绪 论

1.1 引言

在工程建设中，当天然地基不能满足结构物对地基的要求而又不能另选其他场地时，就需对天然地基进行处理，形成人工地基，以保证结构物的安全与正常使用。在人工地基中，复合地基已与浅基础（或称均质地基）和桩基础一道，成为工程中常用的三种地基基础型式，形成三分天下有其一的局面，而且由于复合地基良好而独特的技术经济性能，其应用有日益增多的趋势。

复合地基是指天然地基在地基处理过程中部分土体得到增强，或被置换，或在天然地基中设置加筋材料，加固区是由基体（天然地基土体）和增强体两部分组成的人工地基。按目前的概念，复合地基有水平向增强体型和竖直向增强体型这两种型式，见图 1.1-1 和图 1.1-2。

以上两种型式的复合地基各有其长处和短处，但由于实际工程地质条件的复杂多变性，加上控制地基沉降、保持地基稳定、加快工期、节约投资等其他技术经济因素的制约，只采用其中一种型式往往仍然不能满足

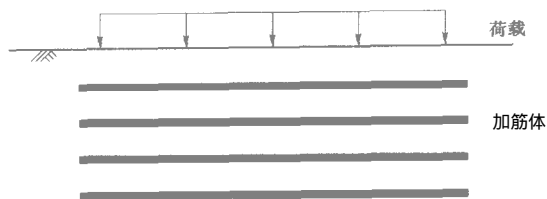


图 1.1-1 水平向增强体复合地基

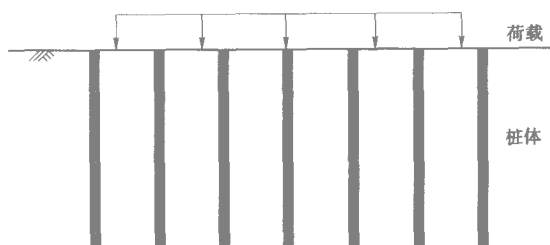


图 1.1-2 竖直向增强体复合地基

要求。在这种情况下，可考虑采用“水平向增强体型 + 竖直向增强体型”的联合复合地基型式，博采两种单一型式之长，从而取得最佳的技术经济效果。本书将这种联合复合地基型式称为“桩—网复合地基”。国内外曾有过成功应用这种地基型式的工程实例，但由于桩—网复合地基的工作机理十分复杂，人们对其不甚明了，主要靠经验进行设计计算，从而限制了其推广应用，因此与其他地基处理方法相比，实例尚不多见，现有例子多以介绍工法为主，理论分析较少。

鉴于以上分析可知，若按增强体的方向来给复合地基分类，则“桩—网复合地基”显然既不属于“水平向增强体型”，也不属于“竖直向增强体型”，本书认为，

宜将其单独分成一类较为合理。

1.2 桩—网复合地基工程应用进展

1.2.1 在加筋土复合地基方面

1963 年法国工程师亨利·维达尔 (Henri Vidal) 首次提出加筋土 (Reinforced Earth) 的概念, 并提出了土的加筋方法与设计理论, 于 1965 年在法意高速公路法国境内的普拉哥尔斯 (Prageres) 成功地建成了世界第一座加筋土挡墙。加筋土的大量应用和良好效能, 使它获得了像钢筋混凝土一样称之为“造福于人类的复合材料”的评价。维达尔于 1966 年对加筋土技术申请并获得专利权。

此后, 筋材由初期的钢筋、钢带、混凝土、钢筋混凝土等逐渐发展成为抗拉强度高、摩擦系数大、耐腐蚀性强等性能更高的带状、网状、板状土工合成材料 (geosynthetics)、金属材料等产品类型, 其应用也很快由欧洲向日、美等世界各地推广, 日本于 1967 年将加筋土技术取名为“补强土工法”。

真正意义上的土工合成材料是 20 世纪 50 年代末兴起的。在国外, 最初是以土工织物 (geotextile) 和土工膜 (geomembrane) 分别作为用于岩土工程的透水性和不透水性合成纤维材料的总称, 此外还有其他各种名称。由于定义上的不明确和应用上的交织, 加上产品种类越来越多, 在叫法和应用上出现了一定程度的混乱与不便。为此, 1983 年 J.E. Fluet 建议使用“土工合成材

料 (geosynthetics) ”一词来概括各种类型的材料, 得到响应和接受, 并被各国规范所采用。

20 世纪 60 年代中期, 我国铁路部门开始研究利用土工合成材料防治翻浆冒泥和包石材料作盲沟排水。20 世纪 80 年代初开始将土工合成材料用于软土地基加固。与此同时, 我国公路部门在公路路基、路面、地基处理等工程中广泛应用土工合成材料进行加筋、排水、护坡等。另外, 水利、电力、建筑、港口等部门和行业开始应用土工合成材料进行有关建筑物和构筑物的设计与施工。1998 年在三江 (长江、松花江、嫩江) 流域抗洪抢险中大显身手, 当年用量超过 4 亿 m^2 , 为世界之最。1984 年成立了全国性的“土工织物科技情报协作网”, 1995 年改名为“中国土工合成材料工程协会 (CTAG)”。目前, 我国经贸、建设、铁路、交通、水利等部门已先后制定了 50 余项国家和行业规范, 生产、设计、施工、试验等环节基本做到有章可循。

1.2.2 在深层搅拌桩复合地基方面

美国于第二次世界大战后首先研发成功一种就地搅拌桩 (mixed-in-place, 简称 MIP)。

日本清水建设株式会社 1953 年从美国引进此法, 1974 年日本港湾技术研究所等单位研发成功水泥搅拌固化法 (CMC), 此后又有所发展。目前其主要的搅拌桩工法有: CDM (Cement Deep Mixing method, 即水泥深层搅拌处理) 工法; DJM (Dry Jet Mixing method, 即粉体喷射搅拌处理) 工法; DCS (Deep Cement Stabi-

lization method , 即水泥深层稳定处理) 工法; SMW (Steel Mixing Wall method , 即型钢混合挡墙处理) 工法。现在已发展到单桩最大施工直径超过 1.8m , 一次最大加固截面面积超过 9.5m^2 , 最大加固深度接钻杆式超过 60m , 塔架式可达 30m 以上。日本在搅拌桩技术领域的潜心开发和研究终于结出丰硕成果, 目前引导着世界搅拌桩技术的新潮流, 迄今为止, 无论是施工机械、工程应用、设计方法、室内试验、质量控制与检测均处于世界领先地位。

瑞典于 1967 年开始研制喷石灰粉搅拌法。

原苏联在 1970 年研发成功一种类似于美国 MIP 的淤泥水泥土桩。

1977 年 10 月, 我国冶金部建筑研究总院和交通部水运规划设计院进行了室内试验和机械研制工作, 于 1978 年底制造出国内第一台 SJB—1 型深层搅拌机; 1980 年在上海宝山钢铁总厂三座卷管设备基础的软基加固中获得成功; 1981 年在天津造纸厂蒸煮锅改扩建工程中应用并获得成功; 1983 年浙江大学土木工程系与联营单位开发了 DSJ 型单轴搅拌桩机; 同年铁道部第四勘测设计院开发了粉喷桩技术; 1984 年铁道部武汉工程机械研究所试制 PH—5 型粉喷桩机并投入实践; 1988 年铁道部第四勘测设计院和上海探矿厂联合研制成功 GPP—5 型粉喷桩机并很快投入批量生产。当前, 我国广泛使用的粉喷桩机大部分是由上海探矿厂和铁道部武汉工程机械研究所生产的, 其他各种类型的粉喷桩机生产厂家不计其数, 有的是专业厂家生产的, 有的是

改装的，有的是自行装配的，遍布全国各地。目前我国国产搅拌桩机的最大施工直径已达 1.2m，一次最大加固截面面积超过 2.1m²，加固深度多在 15~30m 之间或以上。

值得一提的是，1985 年中国建筑科学研究院地基所在碎石桩基础上开发出水泥粉煤灰碎石桩（Cement Flyash Gravel，简称 CFG 桩），很快得到推广应用。历经 10 余年的科研和工程实践，CFG 桩系列技术先后被国家科委、建设部列为全国重点推广项目、国家级工法。

“深层搅拌法”是相对于早期“浅层搅拌法”而言的，通常其搅拌加固深度在 5m 以上。

1.2.3 在桩—网复合地基方面

1.2.3.1 国际概况

1975 年，日本在北海道石狩河的堤岸改造工程中，因雨季防汛需赶工期，又考虑软土地基等其他技术条件的影响，经反复研究决定采用“桩—网工法”，其桩为混凝土桩或经防腐处理的木桩，网材为土工织物（geotextiles）或经防腐处理的钢筋，这是世界上首次提出并应用此法，见图 1.2-1。因效果好，随后日本迅速将该工法推广应用于铁路、公路、建筑等领域。

20 世纪 80 年代英国扩建伦敦第三大国际机场——Stansted 机场，作为扩建的关键工程之一，要修建一条连接既有 London-Combridge 干线的新铁路，路基所经之处有一片地下水位很高、承载力很低的深厚软粘土，为使新路基与既有干线路基间的沉降差保持最小，考虑

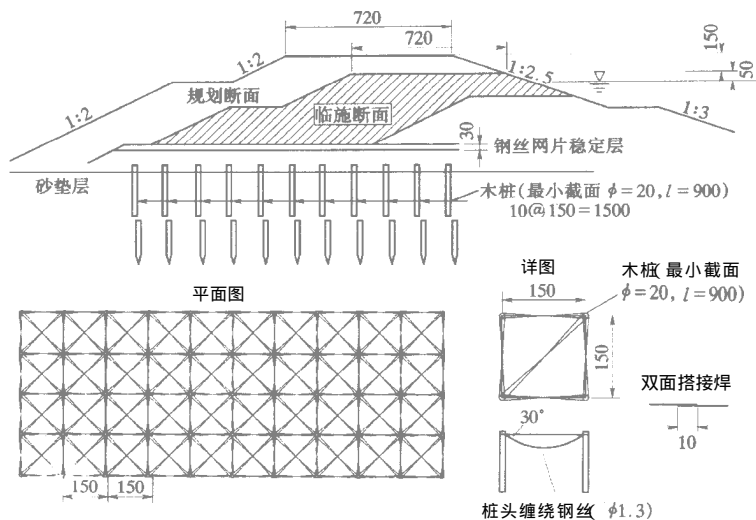


图 1.2-1 桩—网复合地基法处理软基上的河流堤坝（日本，北海道石狩河，1975 年；单位：cm）

到工期及其他地质条件的影响，经多方案试验比较，最终决定采用“带帽钢筋混凝土预制桩 + 土工织物（geo-textiles）”的路堤填筑技术，并且取得了非常好的技术经济效果，见图 1.2-2。

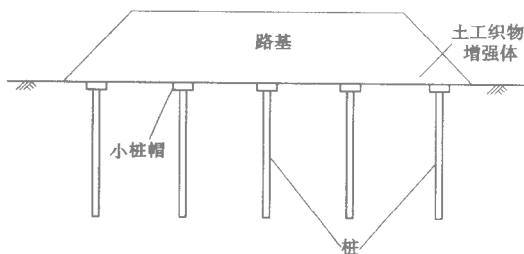


图 1.2-2 桩—网复合地基法处理软基上的铁路路堤（英国，伦敦 Stansted 机场，1980 年）

以上是国外两个成功的有代表性的实例。

1.2.3.2 国内概况

1990年由浙江大学土木工程系和南京金陵石油化工公司炼油厂合作，采用“横向土工布（geotextiles）砂垫层+竖向砂井”方式处理一座2万 m^3 容积的油罐软基，获得了预期效果，满足了设计要求，见图1.2-3。

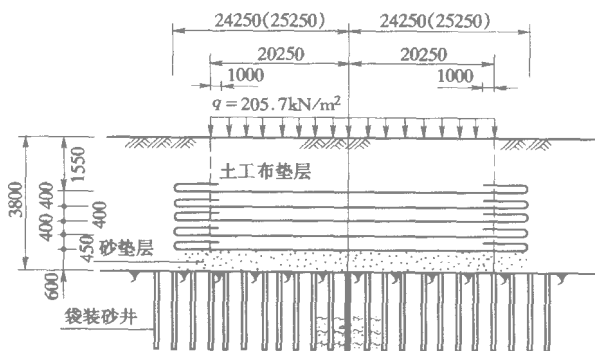


图 1.2-3 桩—网复合地基法处理软基上的大型油罐基础（中国，江苏南京，1990年）

1998年江苏省泰州市工程技术人员，首次利用“土工编织布（geotextiles）加筋垫层+水泥粉喷搅拌桩”的复合地基方案，修复处理该市引江河嘶马码头下的软土地基，成功地解决了原设计中单一的水泥粉喷搅拌桩复合地基方案处理后所出现的桩体被剪断、偏斜、移位、码头基塘边坡滑动、桩间土翻砂冒泡等多种问题，提高了地基承载力，减少了沉降，增加了码头稳定

性，降低了工程造价，修复处理方案的技术经济效益明显，见图 1.2-4。

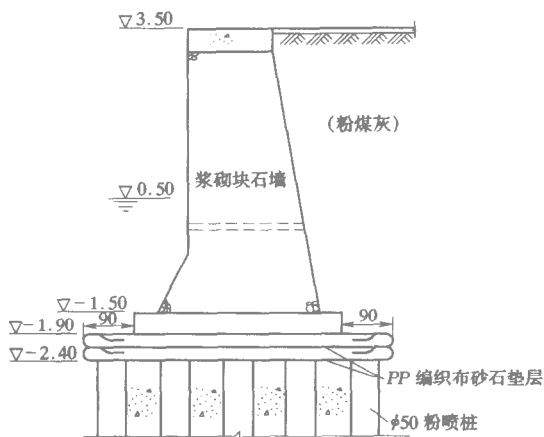


图 1.2-4 桩—网复合地基法处理软基上的
码头（中国，江苏泰州，1998 年）

2001 年铁道部科学研究院深圳分院的研究设计人员，在设计深圳市宝安区固戍开发区市政道路工程的软基处理方案时，考虑到拟建道路场地下有较深厚的淤泥层（平均厚 5.3m，最厚达 9.6m），为减少道路建成后的沉降和差异沉降，并考虑到为后续工程提供可资借鉴的经验，采用了水泥深层搅拌桩法、沉管砂桩排水固结超载预压法、插塑板排水固结真空预压法等三种处理方案，且进行了大量相关试验；在两种不同处理路段的交接处，为减少道路建成后的差异沉降，铺 15m 长的土工格栅（geogrid），从而使土工格栅与其下方的水泥深层搅拌桩形成了本文所述的“桩—网”

复合地基”处理法。作者有机会亲自参加了软基处理方案特别是“桩—网复合地基”处理法的相关试验，并指导现场土工格栅的施工，见图 1.2-5（图中前排中间为作者，两边为工地现场技术管理人员，后排为正在施工的工人）

以上是国内三个成功的实例。



图 1.2-5 桩—网复合地基法处理软基上的市政道路（中国，广东深圳，2001 年）

1.3 桩—网复合地基理论研究进展

理论研究进展主要体现在三大块：土工合成材料等组成的加筋土；垫层；水泥系深层搅拌桩加固土。现择其中代表性论点，简述如下。

1.3.1 承载力与强度

土佐林宏（1975 年）提出在“木桩—土工纤维板”复合地基情况下，有经验公式，其单桩承载力为

$$P = qD^2 \quad (1.3-1)$$

土工纤维板所需抗拉强度为

$$\tau = \frac{0.5fD^2q}{2\sqrt{2}D} = 0.21Dq \quad (1.3-2)$$

式中 q ——荷载， kN/m^2 ；
 D ——桩间距；
 f ——安全系数 取 1.2。

1.3.2 桩土加固区沉降量

朱梅生（1989 年）基于桩土均匀沉降、Boussinesq 弹性半空间等假定，从理论上推导出桩土加固区复合地基沉降量计算公式为

$$S_c = \frac{2\sigma_{r0}L}{E_s} \ln \frac{a}{r_0} \quad (1.3-3)$$

更进一步为

$$S_c = \beta S_0 \quad (1.3-4)$$

$$\beta = \frac{1}{1 + \eta(n-1)} \quad (1.3-5)$$

式中 L ——桩长；
 E_s ——桩周土体的变形模量；
 r_0 ——桩的半径；
 σ_{r0} ——桩的侧压力， $\delta_{r0} = K_c P_c$ ；
 P_c ——竖向压力；
 K_c ——侧压力系数；

- a ——换算桩间距之半（正方形布置时为桩间距的 0.564 倍，三角形布置时为桩间距的 0.503 倍）；
- β ——下沉折减系数；
- n ——桩土应力比；
- η ——置换率；
- S_0 ——桩深度范围内未加固处理时天然地基的沉降量。

1.3.3 网材拉力

C.J.F.P.Jones 等（1990 年）提出在“土工织物一半预制混凝土桩”复合地基情况下，桩土应力比经验计算式为

$$n = \left(\frac{C_c a}{H} \right)^2 \quad (1.3-6)$$

$$C_c \approx 1.95 \frac{H}{a} - 0.18 \quad (1.3-7)$$

- 式中 a ——桩帽直径（当无桩帽时即为桩直径）；
- H ——路堤填方高度；
- C_c ——弯曲系数。

呈抛物线状下垂的桩间土工织物承担的垂直路堤荷载为

$$W_T = \frac{s\gamma_c H(s^2 - a^2n)}{s^2 - a^2} \quad (1.3-8)$$

$$\gamma_c = \gamma + q/H \quad (1.3-9)$$

- 式中 s ——桩间距；
- γ_c ——路堤填料的有效容重

γ ——路堤填料的天然容重；
 q ——施于路堤之上的外加荷载。

在路堤长度方向，因 W_T 的作用而在土工织物中产生的拉伸作用力为

$$P_{RP} = \frac{W_T(s-a)\sqrt{1+1/6\epsilon}}{2a} \quad (1.3-10)$$

式中 ϵ ——土工织物的应变率。

为保持路堤的侧面稳定，土工织物还需与路堤向外的水平力相互作用，由此在边坡下方土工织物中产生的拉伸作用力为

$$P_{RL} = 0.5K_a\gamma_c H^2 \quad (1.3-11)$$

式中 K_a ——Rankine 主动土压力系数。

故在路堤宽度方向的总拉力为

$$P = P_{RP} + P_{RL} \quad (1.3-12)$$

牛志荣教授（2000 年）等基于“编织土工布—粉喷桩”处理桥头过渡段、桩间编织土工布的弯曲形状为抛物面等情况，根据力的平衡条件，推得了编织土工布中的拉应力计算式。其中由竖向分布荷载产生的分量为

$$T_v = \frac{a\sqrt{a^2+4S^2}}{4S}(p_1-p_2) \quad (1.3-13)$$

由水平荷载产生的分量为

$$T_h = 0.5K_a\gamma(2H-H_g)H_g \quad (1.3-14)$$

$$K_a = \text{tg}^2(45^\circ - \varphi/2) \quad (1.3-15)$$

式中 a ——1/2 相邻两桩的外侧距离；

S ——编织土工布的中心挠度；

p_1 ——竖向分布荷载；

p_2 ——地基反力；

H ——路堤高度；

γ ——路堤填土容重；

H_g ——编织土工布的影响厚度；

K_a ——加筋碎石垫层的主动土压力系数；

φ ——加筋碎石垫层的内摩擦角，一般可取 35° 。

如此，得编织土工布中的总拉应力为

$$T = T_v + T_h \quad (1.3-16)$$

1.3.4 计算总沉降量的常用方法

龚晓南教授（1992年）等学者，根据目前各类复合地基在荷载作用下其应力场、位移场的分布情况了解较少，实测资料不多，沉降计算理论还不成熟等实际情况，总结各类复合地基总沉降的计算思路为

$$s = s_1 + s_2 \quad (1.3-17)$$

式中 s ——复合地基的总沉降量；

s_1 ——复合地基加固区的压缩量；

s_2 ——复合地基压缩层厚度内加固区下卧层的压缩量。

1.3.4.1 加固区压缩量 s_1 的实用计算方法

1. 复合模量法 (E_c 法)

$$s_1 = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta P_i H_i}{E_{csi}} \quad (1.3-18)$$

式中 ΔP_i ——第 i 层复合土上附加应力增量（此处设土层数为 n ）；

H_i ——第 i 层复合土层厚度。

式中 $E_{cs} = mE_{ps} + (1 - m)E_{ss}$ (1.3-19)
 E_{cs} ——复合土的压缩模量 (按面积加权平均法算得, 也可采用弹性理论计算得到, 结果相同);

E_{ps} ——桩体的压缩模量;

E_{ss} ——桩间土的压缩模量;

m ——复合地基置换率。

2. 应力修正法 (E_s 法)

$$s_1 = \mu_s s_{1s} \quad (1.3-20)$$

$$\mu_s = \frac{1}{1 + m(n-1)} \quad (1.3-21)$$

式中 s_{1s} ——未加固天然地基在复合地基总荷载 P 作用下相应厚度内的压缩量;

——应力修正系数;

——复合地基桩土应力比。

3. 桩身压缩量法 (E_p 法)

$$s_1 = s_p = \frac{(\mu_p P + P_{bo})}{2E_p} l \quad (1.3-22)$$

$$\mu_p = \frac{n}{1 + m(n-1)} \quad (1.3-23)$$

式中 s_p ——桩身压缩量;

P ——复合地基总荷载;

μ_p ——应力集中系数;

E_p ——桩身材料变形模量;

l ——桩身长度, 也等于加固区厚度;

P_{bo} ——桩底端承力。

4. 应变修正法 (Goughnour 法, 1983 年)

$$s_1 = \epsilon_v l \quad (1.3-24)$$

$$\epsilon_v = \epsilon_{w0} \max[R_p, R_e] \quad (1.3-25)$$

- 式中 ϵ_v ——复合地基竖向应变；
 ϵ_{w0} ——未加固天然地基在复合地基总荷载 P 作用下相应厚度内的竖向应变；
 R_p ——塑性状态下的应变折减系数，需进行专门分析计算；
 R_e ——弹性状态下的应变折减系数，需进行专门分析计算。

5. 实体墩基法

对于粉喷桩加固区，《地基处理手册》推荐该法，但该法有一定的应用条件，即

$$s_1 = \frac{P + P_b l}{2E_c} \quad (1.3-26)$$

- 式中 P ——加固区顶面的均布荷载；
 P_b ——加固区底面，也即下卧层顶面处的平均附加应力；
 E_c ——加固体的复合模量，算法同前；
 l ——桩长，也是加固区的深度。

对于条形基础有

$$P_b = P - \frac{2l}{b} \tau_a \quad (1.3-27)$$

对于矩形基础有

$$P_b = P - \frac{2(B+H)l}{bh} \tau_a \quad (1.3-28)$$

式中 b ——加固区底部宽度；
 B ——上部基础（荷载作用）宽度；
 H ——矩形基础（荷载作用）长度；
 τ_a ——加固区四周侧壁作用的周剪力，可当作常量以简化计算。

6. 应力扩散法

加固区压缩量的计算式同式（1.3-26），应力扩散角 θ 采用《建筑地基基础设计规范》（GBJ7—89）的规定，但 P_b 的算法有所不同。

对于条形基础有

$$P_b = \frac{B}{B + 2l \operatorname{tg} \theta} P \quad (1.3-29)$$

对于矩形基础有

$$P_b = \frac{BH}{(B + 2l \operatorname{tg} \theta)(H + 2l \operatorname{tg} \theta)} P \quad (1.3-30)$$

式中，符号意义同前。

1.3.4.2 压缩层厚度内加固区下卧土层压缩量 s_2 的计算方法

采用《建筑地基基础设计规范》（GBJ7—89）中的分层总和法，即

$$s_2 = \psi_s \sum \frac{\bar{p}_0}{E_{si}} (z_i \bar{a}_i - z_{i-1} \bar{a}_{i-1}) \quad (1.3-31)$$

公式符号意义、计算步骤等详见规范。

下面就比较难确定的 P_b ——加固区底面，也即下卧层顶面处的附加应力的算法作一补充说明。

(1) 应力扩散法。平面应变情况下用式（1.3-29），其余情况下用式（1.3-30）。