

地基处理技术发展综述

郑刚¹, 龚晓南², 谢永利³, 李广信⁴

(1. 天津大学, 滨海土木工程结构与安全教育部重点实验室, 天津 300072; 2. 浙江大学, 软土与环境工程教育部重点实验室, 浙江杭州 310058; 3. 长安大学, 特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西西安 710064; 4. 清华大学, 岩土工程研究所, 北京 100083)

摘要: 国内外特别是我国近几年来地基处理的发展过程中, 体现出了将各种地基处理技术进行交叉、综合应用, 形成了有特色的复合加固技术。本文对我国正在进行修订和编制的地基处理方面相关规范进行了介绍, 并对我国地基处理具有特色和代表性的发展进行了回顾和总结。

关键词: 地基处理; 复合加固技术; 柱状加固体; 复合地基

中图分类号: TU 443 **文献标识码:** A

文章编号: ()

State-of-Art of Ground Improvement Techniques in China

Zheng Gang¹, Gong Xiaonan², Xie Yongli³, Li Guangxin⁴

(1. MOE Key Laboratory of Coastal Civil Engineering Structures and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. MOE Key Laboratory of Soft Soil and Geoenvironmental Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 3. Key Laboratory of Highway Engineering in Special Region of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an, Shanxi 710064, China; 4. Geotechnical Engineering Institute, Tsinghua University, Beijing, 100083, China)

Abstract: In recent years, the development of ground improvement both domestic and abroad, especially in China, shows a trend of the combined use of various ground improvement techniques. Consequently, a lot of hybrid ground improvement methods have been developed. The technical codes regarding ground improvement in China, which are now being revised and compiled, are introduced. Then development of ground improvement in China is analyzed and the hybrid ground improvement methods are highlighted.

Key words: Ground improvement; hybrid ground improvement technique; column type reinforcement element; composite ground

1 我国地基处理方法现状

1.1 地基处理技术的发展特点

我国目前地基处理技术的发展是岩土工程领域最为活跃的一个领域之一, 体现出了“百花齐放、百家争鸣”的局面, 近几年来地基处理发展的一个典型趋势就是在既有的地基处理方法基础上, 不断发展新的地基处理方法, 特别是将多种地基处理方法进行综合使用, 形成了极富特色的复合加固技术。这些复合加固技术主要的发展特点主要体现在如下几个方面:

(1) 由单一加固技术向复合加固技术发展;

(2) 复合地基的加固体由单一材料向复合加固体发展;

(3) 复合地基加固技术与非复合地基加固技术的结合;

(4) 静力加固与动力加固技术的结合;

(5) 机械加固与非机械加固的结合。

其中一些复合加固方法已得到较为广泛的应用, 例如真空-堆载联合预压技术等, 并已取得了较为成熟的经验, 建议了可靠的设计、施工、监测与检测方法, 并被纳入本次修订的《建筑地基处理技术规范》JGJ79 中。也有一些方法尚未经过足够的工程实践检验, 尚不断的验证与发展中, 其机理有待进一步研究, 设计、施工、检测与检验等尚需规范化和标准化。

1.2 地基处理方法

根据最新修订的《建筑地基处理技术规范》

JGJ79, 我国建筑地基处理根据其加固机理、施工方法等划分的主要方法见表 1^[1]。鉴于设计理论、施工方法、检验方法已经积累了较为成熟的经验,

本次修订增加了“真空-堆载联合预压”、“多桩型复合地基”及“微型桩”, 取消了石灰桩法。

表 1 我国地基处理主要方法

Table 1 Main methods of ground improvement in China

地基处理分类	处理方法定义	主要方法
换填垫层	挖除基础底面下一定范围内的软弱土层或不均匀土层, 回填其他性能稳定、无侵蚀性、强度较高的材料, 并夯压密实形成的垫层	无筋垫层 加筋垫层
预压地基	在地基上进行堆载预压或真空预压、或联合使用堆载和真空预压, 形成固结压密后的地基	堆载预压 真空预压 真空-堆载联合预压
压实地基	利用平碾、振动碾或其它碾压设备将填土分层密实处理的地基	平碾 振动碾
夯实地基	反复将夯锤提到高处使其自由落下, 给地基以冲击和振动能量, 将地基土密实或形成密实墩体的地基	强夯法
挤密地基	利用横向挤压设备成孔或采用振冲器水平振动和高压水共同作用下, 将松散土层密实处理的地基	振冲法
复合地基	部分土体被增强或被置换, 形成由地基土和竖向增强体共同承担荷载的人工地基	砂石桩复合地基 水泥粉煤灰碎石桩复合地基 夯实水泥土桩复合地基 水泥土搅拌桩复合地基 旋喷桩复合地基 灰土桩复合地基 柱锤冲扩桩复合地基 多桩型复合地基
注浆加固	将水泥浆或其它化学浆液注入地基土层中, 增强土颗粒间的联结, 使土体强度提高、变形减少、渗透性降低的地基处理方法	
微型桩	用桩工机械或其他小型设备在土中形成直径不大于300mm的钢筋混凝土桩或钢管桩	

如前所述, 在上述方法基础之上, 还形成了为数众多的复合加固方法及在传统方法基础之上发展的新方法。以真空预压和复合地基为例(如表 2 所示), 其中基于真空预压发展了较多的复合加固方法, 对真空预压技术进行了显著的发展和提升, 并在铁路与公路软基加固、吹填土的大面积加固中进行了应用。对复合地基来说, 其发展主要体现在加固体形式的发展和不同加固体的联合使用, 同时, 非复合地基加固手段和复合地基加固的联合使用也是复合地基发展的一个有特色的方向, 例如复合地基与塑料排水板的联合使用。

当然, 其中一些新技术的加固机理还没有深入研究, 工程上还尚未积累足够的经验, 特别是长期的工程观测, 因此, 在应用时根据加固目的、

使用要求、工程地质条件等慎重决定选用。

1.3 复合地基加固体发展

在土质较为软弱的地区, 复合地基处理越来越成为地基处理的主要形式, 广泛用于房屋建筑、铁路与公路、码头与堆场、油罐等的地基处理。在软土地区路堤柱体式加固方法中常用的竖向加固体有碎石桩、挤密砂桩、石灰桩、深层搅拌桩、旋喷桩、混凝土桩、预制桩、PCC 桩、大直径薄壁筒桩、Y 型灌注桩及其它复合加固体。根据上述柱体式加固方法中竖向加固体桩体材料、有无黏结强度、抗拉压强度差异可分为: 散体类柔性加固体、有一定黏结强度的半刚性加固体、无筋刚性加固体、钢筋混凝土加固体、复合加固体等。

不同加固材料加固体强度特性各异, 其破坏

模式也不同。散体类柔性加固体无黏结强度、无一定黏结强度的半刚性加固体几乎无抗拉能力和抗拉与抗弯能力，有一定抗压和抗剪能力；具有一定黏结强度的半刚性加固体几乎无抗拉能力和抗弯能力，有一定抗压、抗剪能力；无筋刚性加

表 2 地基处理复合加固技术

Table 2 Hybrid ground improvement techniques

方法名称	方法原理
真空-堆载联合预压	可获得大于大气压力的固结压力
真空排水+强夯	强夯升高孔隙水压力，增大与排水板之间的压差；劈裂土体增大渗透性
水下真空预压	膜上水压力可转化为固结压力，可获得大于大气压力的固结压力
低位真空预压法	地下水渗流方向与土压缩方向相同；提前开始真空固结
立体真空预压法	多层排水系统，减小排水路径长度
电渗-真空降水联合加固法	电渗-真空联合作用提高低渗透性土的排水量；真空压力使土体向加固区产生压缩变形，减小电渗作用区域裂缝减小电阻
电渗-真空降水-低能量强夯联合加固	兼具真空排水+强夯、电渗-真空降水联合加固法特点
真空-注气加固法	注气提高孔压，增大被加固土体与排水板真空负压之间的压差
劈裂真空预压法	注气提高孔压，增大被加固土体与排水板真空负压之间的压差；气体压力劈裂土体提高渗透性、利于排水
真空降水联合冲压法	真空降水后可进行浅层冲压加固形成硬壳层
真空预压-石灰稳定联合加固法	石灰与超软土拌和后采用真空预压加固可获得较高强度
刚柔性桩复合地基	利用水泥土类桩提高桩间土承载力
长短桩复合地基	利用砂桩、碎石桩加固桩间土并治理桩间土液化
多元复合地基	根据附加应力沿深度衰减，进行沿深度梯次变化的变刚度加固
粉喷桩复合地基+排水板复合处理	利用二种或二种以上的竖向加固体加固软弱地基和不良地基
长板-短桩-预压联合加固法	竖向柱状加固体和水平加筋体的联合加固
桩顶设置可压缩单元复合地基	设置排水板加强粉喷桩施工期间引起的超净孔隙水压力的消散
	在加固区以下设置长排水板，加快预压荷载作用下加固区及加固区以下土固结，减小工后沉降
	利用新奥法原理，首先桩间土承担荷载并产生固结
	降低桩顶应力集中效应
	在端承型柱状加固体设置，使桩间土可分担荷载。已有工程实例

固体有较高黏结强度、较高抗压和抗剪能力，较低的抗拉能力和很低的抗弯能力；钢筋混凝土刚性加固体则有较高黏结强度，加有配筋，具有较高的抗拉、抗弯、抗压和抗剪能力。复合地基加固体的类型丰富多样，其发展呈现如下特点：

- (1) 同一加固体由不同材料、不同工艺完成，形成具有多功能的加固体；
- (2) 同一场地采用不同的加固体形成多元复合地基；
- (3) 刚性桩（素混凝土桩、钢筋混凝土桩）被越来越多地应用于地基处理。

根据加固体的材料、施工工艺、成桩后加固体强度特征、压缩性等，可分为四类，如表 3 所示（郑刚等，2009）。

当然，一些工程中应用的柱状复合加固体存在

着承载力离散大、成桩后质量检测困难、成桩工艺没有标准化、设计缺乏规范方法、加固体直径过大等问题。因此，尚需积累经验、充分验证，解决设计、施工、检测的标准化后方可慎重推广应用。

在地基处理技术取得突出进展的同时，不可否认，目前对地基处理技术的研究是落后于工程实践的，特别是对一些地基处理新方法，其加固机理、设计方法、施工方法、检测原理和方法的研究还不够深入。因此，开展对我国现有地基处理技术的系统总结，及时总结我国地基处理技术的经验、引领地基处理技术的发展方向，对于我国地基处理向高水平的发展至关重要。

1.4 我国地基处理方法与国外地基处理方法对比

美国 “The second Strategic Highway Research Program (SHRP2)” (V.R. Schaefer 等，2009)，针

对“地基处理、路堤快速填筑及工作平台的岩土工程解决方案”(Geotechnical Solutions for Soil Improvement, Rapid Embankment Construction, and Stabilization of the Pavement Working Platform)中如下三个方面的岩土工程问题:

- (1) 在不稳定地基上路堤的建设;
- (2) 既有道路和路堤的拓宽与扩展

(3) 路基加固施工平台的地基加固。

给列出了 44 种与高速公路建设的岩土工程问题相关的岩土工程技术与方法进行系统的归纳、总结,见表 4,由表 4 可看出,针对美国高速公路相关技术中涉及地基处理所列出的方法,大部分采用的方法与我国目前采用的方法相同或相似。

表 3 我国地基处理主要柱状加固体^[2]

Table 3 Main column type ground reinforcement element in China

分类	第一类	第二类	第三类	第四类
	(散体桩)	(低-中等黏结强度桩)	(刚性桩)	(组合桩)
强度特征		水泥搅拌桩	CFG桩	
		石灰桩	预应力管桩	
		水泥/石灰桩	预装方桩	水泥土-预制混凝土劲芯复合桩
	砂桩	夯实水泥土桩	素混凝土桩	水泥土-型钢劲芯复合桩
	碎石桩	灰土桩	钻孔灌注桩	水泥土-现浇混凝土劲芯复合桩
	砂石桩	浆固碎石桩	螺旋成孔灌注桩	混凝土芯砂石桩
		旋喷桩	Y形混凝土桩	水泥土芯砂桩
		袋装砂井	大直径筒桩	
		土工织物袋装砂桩	PCC桩	
		布袋注浆桩	X形混凝土桩	
粘结强度	无	低-中	高	
抗剪强度	低-中	低-中	高	中-高
抗压强度	低	低-中	高	中-高
抗拉强度	无	无-低	低-高	低-高
抗弯强度	无	无-低	低-高	低-高

2 我国地基处理相关规范修订情况

近四年来,我国启动了建筑地基基础方面的多本规范的修订与编制,其中与地基处理相关的规范、规程包括国家标准《建筑地基基础设计规范》GBJ50007-2002、《建筑地基处理技术》JGJ79-2002、《既有建筑地基基础加固规范》JGJ123-2000 等的修订,和《复合地基技术规范》GB5000X-201X、《刚柔形状复合地基技术规范》JGJ/T210-2010 等的编制。这些规范、规程的编制也集中反映了我国近十年来在地基处理领域取得理论进展和积累的工程经验。

2.1 《建筑地基基础设计规范》GB50007 修订^[4]

作为建筑地基基础领域的综合性国家标准,本次修订的一个重要内容就是增加了复合地基变形的一个原则性计算方法,采用加固区复合模量,按照

分层总和法计算复合地基沉降(见规范^[4]7.2.10条)。由于采用复合地基的建筑物沉降观测资料较少,沿用了天然地基的沉降计算经验系数。

一些针对不同刚度、强度柱状加固体复合地基的桩间土及桩端以下土的分层沉降的观测结果指出,当桩端仍处于软弱土层时,或长度达 30m 的刚性桩复合地基,桩端处可产生显著的刺入量,桩顶一定深度范围内则因褥垫层的设置而导致桩身上部一定深度范围内的土层受到压缩,除此之外,桩身相当长度范围内桩间土几乎不受到压缩,说明桩长范围内(即加固区)复合土层的压缩量主要发生在桩端以上一定厚度土层和桩顶以下一定厚度土层。

京津城际高速铁路刚性桩复合地基观测了桩间土及桩端以下土的分层沉降观测断面图^[5],其中加固体采用素混凝土桩,在挡土墙下筏板下的素混凝土桩按 1.4m×1.4m,路堤内部填土的筏板基础下则

按 $1.5\text{m} \times 1.5\text{m}$ 布置, 有效桩长 28m, 桩径 500mm。

表 4 美国高速公路岩土工程技术应用汇总^[3]

Table 4 The application of geotechnical engineering techniques in U.S. highway

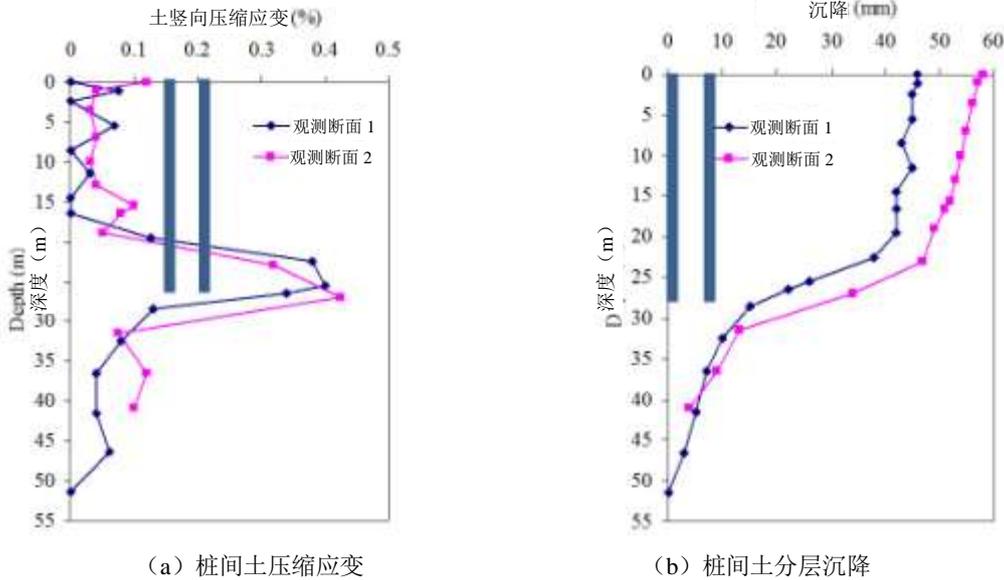
序号	地基处理方法	序号	地基处理方法
1	夯实碎石桩 Aggregate Columns	23	高能量滚夯法 High Energy Impact Rollers
2	废弃物的再利用 Beneficial Reuse of Waste Materials	24	水力冲填+真空固结+排水板 Hydraulic Fill + Vacuum Consolidation + PVDS
3	地基土稳定生物加固 Bio-treatment for subgrade stabilization	25	注入式轻质泡沫填土 Injected Light Weight Foam Fill
4	爆炸挤密 Blasting Densification	26	智能夯实法 Intelligent Compaction
5	整体充填注浆 Bulk-Infill Grouting	27	高压喷射注浆法 Jet Grouting
6	化学灌浆/注浆系统 Chemical Grouting/Injection Systems	28	轻质填土 Light Weight Fills
7	路基和基层化学加固法 Chemical Stabilization of Subgrades and Bases	29	加筋路基或基层 Mechanical Stabilization of Subgrades & Bases
8	柱状加固体支承路堤 Column-Supported Embankments	30	微型桩 Micro-Piles
9	土加固和柱状加固体复合加固 Combined Soil Stabilization with vertical columns	31	加筋土挡墙 MSE Walls (mechanically stabilized earth walls)
10	挤密注浆 Compaction Grouting	32	路面材料现场回收再利用 Onsite Use of Recycled Pavement Materials
11	长螺旋混凝土桩 Continuous Flight Auger Piles	33	部分封闭技术 Partial Encapsulation
12	强夯法 Deep Dynamic Compaction	34	塑料排水板堆载预压法 PVDs and Fill Preloading
13	深层搅拌法 Deep Mixing Methods	35	快速冲击密实 Rapid Impact Compaction
14	钻孔/注浆中空钢管土钉 Drilled/Grouted & Hollow Bar Soil Nailing	36	加筋土边坡 Reinforced Soil Slopes
15	电渗加固 Electro-osmosis	37	挤密砂桩 Sand Compaction Columns
16	换填法 Excavation and Replacemen	38	射入式土钉 Shoot-in Soil Nailing
17	纤维加筋边坡 Fiber Reinforcement for Slopes	39	旋入式土钉 Screw-in Soil Nailing
18	纤维加筋路面系统 Fiber Reinforcement in Pavement Systems	40	支撑加筋土挡墙 Shored MSE Wall
19	土工织物袋装砂桩 Geotextile Encased Columns	41	碎石桩 Stone Columns
20	土工合成材料加筋施工平台 Geosynthetic Reinforced Construction Platforms	42	真空预压法(有或无排水板) Vacuum Preloading with and without PVDs
21	加筋路堤 Geosynthetic Reinforced Embankments	43	振冲挤密法 Vibro Compaction
22	路面中土工合成材料 Geosynthetics in Pavement Systems	44	素混凝土桩 Vibro-concrete Columns

实测的两个断面的桩间土及桩端以下土层的沉降沿深度的分布见图 1 (b), 据此计算的桩间土压缩应变见图 1 (a)。可以看出, 桩间土的主要压缩发生在加固体桩端以上的 $1/4 \sim 1/6$ 高度范围内, 而不是沿桩身全长分布。

荆志东等(2010)针对京津城际高速铁路采用的桩板式复合地基支承形式进行了离心机试验研究, 并与无板的常规复合地基进行了对比试验。由于两种工况均在桩顶铺设 50 cm 厚的砂垫层, 在离心试验后观察发现, 两种情况下均出现了桩端刺入

砂垫层现象。未加混凝土板的路基模型，发现在桩顶处有桩刺穿垫层甚至刺入路基的现象，桩土相对位移较大，刺入垫层的平均深度大于 50 cm 垫层厚度。而有混凝土板时桩顶的刺入量仅限于混凝土板下部的垫层厚度 50 cm。因此，在进行沉降计算时，如桩顶褥垫层厚度较大，桩顶、桩端分别产生的向

上和向下刺入量不能忽略。因此，《建筑地基基础设计规范》GB50007 的 7.2.10 条提供的计算方法实质上是考虑加固区综合压缩的一种经验方法，不能理解为桩身全长范围内土层均发生压缩，以及加固区复合土层的分层压缩量沿深度逐渐减小（附加应力沿深度减小）。



(a) 桩间土压缩应变 (b) 桩间土分层沉降

图 1 京津城际刚性桩复合地基桩间土沉降沿深度分布

Fig.1 Settlement distribution along depth of soil between piles of rigid pile composite foundation

2.2 《建筑地基处理技术规范》JGJ79-2002 修订

2.2.1 主要修订内容简介

本次修订首先是将地基处理技术按处理机理重新进行了分类，如表 1 所示。本次修订的主要内容如下：

- (1) 增加处理后的地基应满足建筑物承载力、变形和稳定性要求的规定；
- (2) 增加采用多种地基处理方法综合使用的地基处理工程验收检验的综合安全系数的检验要求；
- (3) 增加地基处理采用的材料，应根据场地环境类别符合有关标准对耐久性设计的要求；
- (4) 增加处理后的地基整体稳定分析方法；
- (5) 增加加筋垫层下卧层验算设计方法的说明；
- (6) 增加真空和堆载联合预压处理的设计、施工要求；
- (7) 增加高夯击能的设计参数；
- (8) 增加复合地基承载力考虑基础深度修正的有粘结强度增强体桩身强度验算方法；
- (9) 增加建筑工程采用水泥土搅拌桩复合地基处理的施工设备能力的要求；

- (10) 增加多桩形复合地基设计施工要求；
- (11) 增加注浆加固内容；
- (12) 增加微型桩加固内容；
- (13) 增加检验与监测内容；
- (14) 增加复合地基增强体单桩载荷试验要点；
- (15) 增加处理地基承载力载荷试验要点；
- (16) 调整复合地基承载力和变形计算表达式；
- (17) 调整复合地基变形计算经验系数；
- (18) 调整复合地基承载力试验要点。

可以看出，复合地基作为地基处理的一个应用广泛的技术，在该规范中占了较多篇幅，本次修订、增加的内容也最多，体现出了其在地基处理技术领域中的重要性。另外，本次修订内容也体现了多种地基处理技术联合使用的特点，例如上述修正内容 (2)、(6)、(10) 均是多种地基处理技术联合使用相关的条文。

2.2.2 复合地基稳定分析方法

本次修订一个最重要的内容之一就是增加了复合地基稳定计算方法。路堤的整体稳定问题是在软土地区进行路堤快速填筑施工的关键问题。为此，越来越多地采用在软土地基中设置柱状加固体形成

复合地基支承路堤的方法。当采用散体类桩体时可能不会满足路堤的稳定性要求或工后沉降的要求时，常采用刚性桩加固软土地基。

在我国主要的相关规范中，《建筑地基处理技术规范》JGJ79-2002 对包括刚性桩在内的复合地基的稳定性没有给出计算方法，《公路路基设计规范》JTJ D30-2004^[6]在“7.6 软土地区路基”中规定，计算加固土桩（指粉喷桩和搅拌桩）复合地基的路堤整体抗剪稳定安全系数时，复合地基内滑动面上的抗剪强度采用复合地基抗剪强度 τ_{ps} ：

$$\tau_{ps} = \eta\tau_p + (1 - \eta)\tau_s \quad (1)$$

式中 τ_p 为桩体的抗剪强度； τ_s 为地基土的不排水抗剪强度； η 为桩对土置换率。但是，该规范对刚性桩复合地基的稳定没有给出推荐方法。

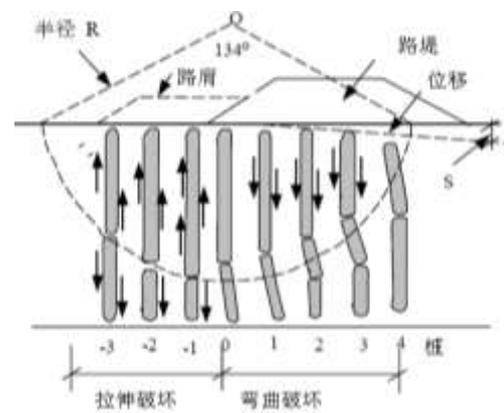
《港口工程地基规范》JTS147-1-2010 指出^[7]，对有桩的土坡和地基，稳定性验算时不宜计入桩的抗滑作用。《铁路路基设计规范》^[8]TB10001-2005 则没有对路堤稳定提出规定。

在实际工程中，即使采用各种桩体加固软土地基，复合地基稳定破坏事故时有发生。台华高速公路采用干振碎石桩进行软土地基处理^[9]，在路堤填筑过程中发生了地基失稳滑移，后来提出刚性桩地基处理加固方案，经数值分析及现场刚性桩试验段测试结果表明刚性桩方案可以满足路堤填筑要求。浙江沿海地区某高速公路^[10]，软基路段约占总长的三分之一，在路基填筑过程中，粒料桩处理路段出现了路基滑移和沉降偏大的现象。某线铁路软土路堤^[11]采用水泥搅拌桩进行加固处理，在施工过程中当路堤填高至 5.2m 时突然发生失稳滑塌。广珠高速公路某软土路段采用管桩复合地基处理，桩顶垫层中铺设两层土工格栅。当填土高度达到 7m 时，路基滑塌，管桩随路基滑动而倾覆，表现出刚度较软土大很多的管桩与软土难以协调变形，桩间土先发生滑动，带动管桩倾覆。还有很多未予以报道的复合地基上路堤失稳的案例。

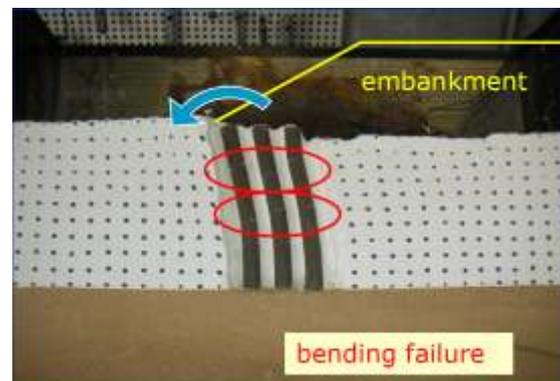
复合地基稳定性的计算方法存在不合理性而可能会过高估计复合地基的稳定性^[12-14]，因此如何合理的评估复合地基的整体稳定性是一个亟需解决的工程问题。

关于复合地基的稳定性问题国内外学者进行了不少研究，也得出了一些有益的研究成果。Han 等^[12-13]和 Navin^[14]通过深层搅拌桩加固复合地基稳定性数值分析发现对搅拌桩加固复合地基按桩体剪切

破坏过高估计了复合地基稳定性。Broms^[15]也指出了路堤下不同位置的水泥土桩体的可能破坏模式有弯曲破坏和受拉破坏两种模式，并不一定发生剪切破坏，如图 2(a)所示。Miyake 等^[16-17]、Kitazume 等^[18-19]通过离心机试验研究了路堤填土荷载对用于加固复合地基的水泥搅拌桩的影响，研究发现用于加固复合地基的水泥搅拌桩的破坏模式有桩体弯曲破坏、桩体倾斜、桩体侧移、桩体剪切破坏、桩体受压破坏以及桩周土体绕流。其中 Kitazume 等^[18]通过离心机试验发现了路堤下搅拌桩的弯曲破坏模式，而不是发生剪切破坏，见图 2(b)。Terashi^[20]则通过离心机试验发现桩间土发生了滑动破坏。



(a) 路堤下桩体的破坏模式



(b) 路堤下搅拌桩的弯曲破坏

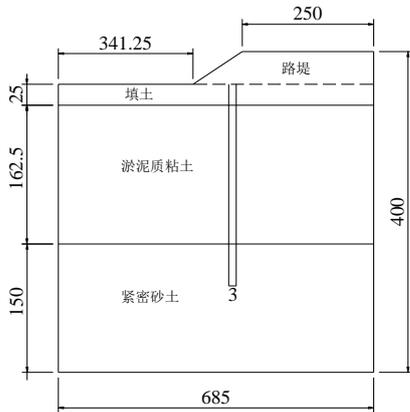
图 2 路堤下桩体的破坏模式

Fig.2 The failure mechanism of piles under embankment

郑刚、刘力等^[21-23]采用有限差分数值方法对刚性桩加固软弱地基上的复合地基稳定性进行了研究。研究表明，不论是在单桩还是群桩条件下，不同位置刚性桩对复合地基稳定性的贡献机理不同，弯曲破坏比剪切破坏更易于发生，甚至桩体有可能发生图 3 所示的两次弯曲破坏，基于钢筋混凝土桩复合地基支承路堤的离心机试验也证明了两次弯曲破坏的可能性，并证明桩体发生弯曲破坏后继而发生倾覆破坏而引发路堤滑动失稳，如图 3 所

示。

由上述研究可知，路堤下绝大部分位置的加固体均按其抗弯承载力而不是抗剪承载力控制复合地基的稳定性，并提出了按桩体在滑动面上发生弯曲破坏由弯矩提供复合地基抗滑贡献对桩体换算为等效抗剪强度采用极限平衡法进行复合地基稳定分析的方法。



(a) 离心模型试验剖面图



(b) 离心试验前路堤侧面图



(c) 试验后离心模型试验侧面图



(d) 离心试验后有桩处路堤剖面图



(e) 路堤失稳破坏时群桩加固体破坏情况

图 3 离心试验模型及成果

Fig.3 The centrifuge model and result

由以上研究成果可以发现，复合地基中各加固体在填土或其它柔性荷载作用下有多种破坏模式，特别是对于抗剪强度较高的刚性桩来说并不一定发生剪切破坏。而目前对采用上述桩体加固复合地基进行整体稳定分析时均采用传统的复合地基稳定计算方法，即采用极限平衡法并假定圆弧滑动面，沿滑动面上桩体和土体产生剪切破坏，对于散体类桩，由于桩体无抗弯刚度，因此桩体中不产生弯矩，假定发生剪切破坏是合理的，而当采用这种计算方法分析软土地基上刚性桩复合地基的整体稳定性时会过高估计复合地基的稳定性，是偏于不安全的，而且也是不合理的。

结合《建筑地基处理技术规范》JGJ91-2002 关于复合地基稳定计算方法的修订课题，规范编制组针对目前国内外关于软土地基中刚性桩的整体稳定性分析方法，建立关于软土地基上复合地基的典型算例，进行复合地基的稳定分析，并与传统的复合地基稳定计算方法进行比较，探讨不同计算方法的合理性和适用性，并提出软土地基中刚性桩复合地基的整体稳定性分析建议方法，即基于整体滑动面形成并失稳时，加固体完全发生弯曲破坏，并在《建筑地基处理技术规范》JGJ79 修订稿^[1]第 3.0.7 条规定，处理后的地基整体稳定分析可采用圆弧滑动法，其稳定安全系数不应小于 1.30。散体加固材料的抗剪强度指标，可按加固体材料的密实度通过试验确定；胶结材料的抗剪强度指标可按桩体断裂后滑动面材料的摩擦性能确定。在新编制的国家标准《复合地基技术规范》^[24]条文说明中也指出，“复合地基稳定分析方法宜根据复合地基类型合理选用”，“对刚性桩复合地基，最危险滑动面上的总剪切力可只考虑传至复合地基桩间土地基面上的荷载，最危险滑动面上的总抗剪切力计算中，可只考虑复合地基加固区桩间土和未加固区天然地基土体对抗力的贡献”，“稳定分析中没有考虑由刚性桩承担的荷载产生的滑动力和刚性桩抵抗滑动的贡献”，“由于没有考虑由刚性桩承担的荷载产生的滑动力的效应

可能比刚性桩抵抗滑动的贡献要大, 稳定分析安全系数应适当提高”。

2.2.3 多桩型复合地基

关于多桩型复合地基, 本次修订提出复合地基的承载力与变形计算推荐方法, 并提出了如下重要规定:

1) 桩型及施工工艺的确定应考虑土层情况、承载力与变形控制要求、经济性、环境要求等综合因素;

2) 对复合地基承载力贡献较大或用于控制复合土层变形的长桩, 应选择相对较好的持力层并应穿过软弱下卧层; 对处理欠固结土的增强体, 其长度应穿越欠固结土层; 对消除湿陷性土的增强体, 其长度宜穿过湿陷性土层; 对处理液化土的增强体, 其长度宜穿过可液化土层;

3) 如浅部存有较好持力层的正常固结土, 可采用刚性长桩与刚性短桩、刚性长桩与柔性短桩的组合方案;

4) 对浅部存在软土或欠固结土, 宜先采用预压、压实、夯实、挤密方法或柔性桩复合地基等处理浅层地基, 而后采用刚性或柔性长桩进行处理的方案;

5) 对湿陷性黄土应根据现行国家标准《湿陷性黄土地区建筑规范》GB50025 的规定, 选择压实、夯实或土桩、灰土桩等处理湿陷性, 再采用刚性长桩进行处理的方案;

6) 对可液化地基, 可采用碎石桩等方法处理液化土层, 再采用有黏结强度桩进行处理的方案;

7) 对膨胀土地基采用多桩型复合地基方案时, 宜采用灰土桩等处理其膨胀性, 长桩宜穿越膨胀土层到达大气影响急剧层以下稳定土层, 且不应采用桩身透水性较强的桩。

8) 多桩型复合地基的布桩宜采用正方形或三角形间隔布置, 刚性桩可仅在基础范围内布置, 其他增强体桩位布置应满足液化土地基、湿陷性黄土地基、膨胀土地基对不同性质土处理范围的要求。

此外, 2008 年以来, 还编制《复合地基设计技术规范》^[24]、《刚柔性桩复合地基技术规范》^[25]、《现浇混凝土大直径管桩复合地基技术规程》^[26]进一步发展和丰富了我国复合地基理论与技术体系。

3 地基复合加固技术

经过多年工程实践, 我国在现有地基处理技术基础上, 将二种或二种以上的地基处理方法结合, 发展了一系列复合加固技术。这些复合加固技术主

要体现在如下三个方面:

- (1) 复合加固体
- (2) 多元复合地基
- (3) 多方法复合加固

下面分类进行回顾。

3.1 复合地基加固体

自 1962 年国际上首次开始使用“复合地基”(Composite Foundation) 一词以来, 伴随各种地基处理技术的发展, 复合地基被越来越广泛地应用于各种工业与民用建筑, 也用于一些水利工程如大坝地基处理, 公路、铁路路基处理也经常采用复合地基。采用的增强体桩型也日趋丰富, 如碎石桩、砂桩, 水泥土搅拌桩、旋喷桩、石灰桩、灰土桩、渣土桩、CFG 桩、各种截面形式的钢筋混凝土桩等。

传统的复合地基主要指由柔性桩或水泥土桩形成的复合地基。近年来, 复合地基处理技术发展较快, 随着刚性桩, 特别是不同材料形成的且具有多种功能的复合桩体的引入, 使复合地基的理论有了很大的发展, 复合地基的加固体不但具有承担荷载的功能, 还可承担排水通道等功能, 使加载时桩间土的固结、桩端以下土的固结速度显著加快, 桩间土也得到改善, 使复合地基的加载过程本身也成为复合地基桩间土及桩端以下土的预压过程。

(1) 浆固碎石桩

浆固碎石桩^[27]结合碎石桩工法和注浆处理技术, 利用钻机按设计直径, 钻进至设计深度成孔, 放入导向管和注浆管, 然后投放石料。在投放石料的过程中, 用注浆管放水清洗孔。石料投放完成后进行注浆并固结成桩。浆液除在孔中注浆成桩外, 也向周围土体渗透。浆固碎石桩作为一种新型的高等级公路桥头深厚软基处理方法, 目前已经在宁波绕城高速公路、杭州千岛湖高速等高等级公路, 以及京沪高速铁路等软弱路基处理中应用。通过实测地基的竖向和侧向变形以及桩、土应力和孔隙水压力, 结果表明, 浆固碎石桩复合地基总沉降量小, 稳定速度快, 工期短; 桩顶应力集中现象明显, 浆固碎石桩复合地基桩土应力比可达 22~28, 桩体置换作用明显; 同时也发挥了桩间土的承载力特性, 相比较于普通混凝土桩, 浆固碎石桩在桩与土之间形成浆固区, 提高了桩侧摩阻力, 使得桩间土发挥较大的承载能力; 浆固碎石桩复合地基排水通畅, 孔隙水压力消散迅速, 有利于主固结的快速完成, 明显增加了土体的强度, 从而有利于路基的整体稳定性, 减小由地基土次固结引起的工后沉降。

(2) 高喷插芯组合桩

高喷插芯组合桩(简称 JPP)是由高压旋喷桩和预应力混凝土芯桩构成的一种新型组合桩。JPP 桩、灌注桩和高压旋喷水泥土桩静载荷对比试验结果表明, JPP 桩与同桩长、同桩径灌注桩相比承载力高 30% 以上。也可在高压旋喷水泥土中插入沉管桩、钢桩等作为芯桩, 把高压旋喷桩旋喷直径大、比表面积大的优势和预应力芯桩强度高的优势有机结合起来, 两者取其长, 避其短, 达到提高承载力、节约造价的目的。JPP 桩上部荷载主要由高强度的预应力管桩内芯承担, 该荷载逐步向下传递的同时, 也逐步通过管桩周围的水泥土向桩周土中扩散, 形成了管桩内芯向水泥土外芯扩散和水泥土外芯向桩周土扩散的双层扩散模式。这种双层扩散模式使上部荷载有效地传递到比一般高压旋喷桩影响范围大得多的土体中, 使得 JPP 桩有很好的承载性能。

(3) 高压挤土砂浆桩(CCMG)

高压挤土砂浆桩作为一种新型的桥头软基处理方法, 是通过专用高压压注设备, 把已搅拌均匀的砂浆体压入土体, 从而形成连续的砂浆桩体。CCMG 施工工艺主要是利用钻机或振动桩工机械使钻杆达到设计标高, 通过专用高压压注设备, 把已搅拌均匀的以水泥、黄沙为主基料的厚砂浆体从钻杆(兼作注浆管)的底端压出, 慢速提升钻杆, 砂浆由下向上逐步压入土体, 形成连续的砂浆桩体。

(4) 变径水泥土搅拌桩

变径水泥土搅拌桩^[28]是东南大学岩土工程研究所研究出的一种新型的地基处理形式。它是在成桩过程中, 由动力系统带动分别安装在内、外同心钻杆上的两组搅拌叶片同时正、反向旋转搅拌水泥土, 通过搅拌叶片的伸缩使桩身部分截面扩大而形成具有变截面的水泥土搅拌桩。

(5) 双向水泥搅拌桩

为提高水泥土搅拌桩的搅拌均匀性, 以及减小搅拌桩施工时对桩周土的扰动导致强度下降的现象, 发展了双向水泥土搅拌桩技术^[29]。在同一场地进行了双向搅拌桩和常规搅拌桩试验段工程, 对比分析了双向搅拌桩和常规搅拌桩的桩身质量、施工扰动、复合地基承载力和路堤荷载下的工作性状特点。现场试验结果表明, 双向搅拌技术能有效地提高搅拌均匀性、消除冒浆现象, 并减小搅拌桩施工对桩周土体的扰动; 双向搅拌桩桩身质量均匀, 桩身强度沿深度变化较小, 复合地基承载力高于常规搅拌桩复合地基; 填土高度相近时, 双向搅拌桩荷

载分担比高于常规搅拌桩, 地表沉降和坡角处最大水平位移小于常规搅拌桩复合地基, 而地基固结速率快于常规搅拌桩复合地基。

(6) 混凝土芯砂石桩

混凝土芯砂石桩^[30]是由预制钢筋混凝土芯桩和外包芯桩的砂石壳形成的复合桩, 和桩间土、褥垫层一起形成复合地基。采用预制钢筋混凝土芯桩作为竖向增强体, 芯桩砂石壳作为竖向排水体, 土工格栅加筋碎石垫层作为基底垫层, 多利用建筑物或路堤本身重量分级逐渐加载, 并使建筑物荷载下的地基变形在堆载和预压期间大部完成, 以解决建筑物使用期间的沉降和不均匀沉降问题, 把工后沉降和工后沉降差控制在规范允许的范围内。为了加速压缩过程, 常采用比建筑物或路堤荷载更大的超载进行预压。适用于软黏土、杂填土、泥炭土、淤泥质土、淤泥、冲填土地基处理, 特别适用于高含水率、高有机质含量深厚软土地区对工后沉降和工后沉降差有严格要求的工程, 如高速公路、市政道路的桥头段, 机场跑道、联络道、滑行道的地基处理。

3.2 多元加固体复合地基

作为我国地基处理研究的一个特色, 采用不同加固体形成多种加固体组成的复合地基, 以改善复合地基的工作性能, 其应用实例越来越多。

目前常用的单一材料加固体基本上只具备对地基土体进行原位加固或原位置换的功能, 由于其比桩间土具有更高的强度和较低的压缩性, 基于应力集中而更多地分担荷载, 与加固体之间土体共同承担荷载而形成复合地基。当然, 散体类加固体更多的还是起排水通道的作用而加快地基固结, 但由于散体类加固体的竖向承载力和变形极大程度地依赖于加固体周围土的约束, 因此, 当加固体周围土体很软弱时, 加固体提高地基竖向承载力的能力是非常有限的。

因此, 基于改善复合地基的性能, 即加固体的设置不仅仅是起到对地基土体进行原位加固或原位置换的功能, 还具有排水体的作用, 可促进桩间土的排水固结。在 1990 年, B.B.Broms 就指出, 在搅拌桩完全达到龄期之前就进行加载, 在水泥土桩刚完成施工并还未形成强度时, 及时施加路基填土荷载对土起到预压作用, 趁水泥土桩完成施工且强度尚低时, 对被加固土尽早加载。这样, 总的填土荷载几乎首先被传递至桩间土。随着桩体的强度增长, 桩间土承担的荷载会逐渐向桩体转移。土的固结时

间可减少 50~70%。

如果将复合地基加固体之间设置的砂桩、碎石桩、袋装砂井、排水板也视为多元复合地基的一个组成部分(称为排水加固体),将水平加筋等的加固体也认为是多元复合地基的一个组成部分,则多元复合地基的工作机理体现在如下几个方面:

(1) 促进不排水加固体施工时土的固结

如前所述,饱和粘性土中粉喷桩、搅拌桩、预制桩等(称为不排水加固体)施工时,会在加固体之间的土引起较大孔隙水压力,因此,在这些加固体施工前,在加固体之间设置排水加固体,可有效加快不排水加固体施工时产生的孔压消散和孔隙水的排出,促进土体强度恢复甚至提高,并可减小工后沉降。

(2) 促进加载时加固体之间土体的固结和加固区下土体固结

在不排水加固体之间设置排水加固体,还可有助于在分级加载(主要是堆场、路堤等)时,加快加固体之间土体的固结和加固区下土体固结,这对于改善复合地基性能,特别是减小工后沉降具有显著作用。

(3) 防止地震时砂土液化

当加固区分布有可液化土层时,在不排水加固体之间设置排水加固体,还可起到地震时加快可液化土层中超净孔隙水压力消散的作用,防止出现可液化土层的液化。

(4) 提高地基稳定性

对于表 2 中抗弯强度较低的竖向加固体,在提高地基稳定性方面的作用是有限的,水平加筋体的设置有助于提高路堤稳定性,例如由路堤-水平加筋体-竖向加固体-土组成的多元复合地基。在抗弯强度很低的竖向加固体中,适当增加部分抗弯强度高的竖向加固体(具有很高抗弯承载力的钢筋混凝土桩),也可提高地基稳定性。

(5) 对地基在竖向实现变刚度、变强度加固

考虑到竖向应力沿深度的衰减,对软弱地基在竖向实施变刚度、变强度加固是合理的。变刚度实现竖向应力大的深度范围内通过长、短加固体的组合使用,形成长短加固体组成的加固区、仅有长加固体的加固区和无加固体的下卧层三个沿深度实现刚度和强度(承载力)变化的加固理念。

由图 1 可看出,对于刚度较大的竖向加固体,当加固体下端仍支承在可压缩土层上时,加固体下端实质上是可产生一定刺入的,对地基在竖向实现

变刚度、变强度加固,也有助于减小刚度大的加固体顶面的应力集中,短加固体(常为刚度较低加固体)可提高桩间土刚度,这两个原因可有助于减小长加固体的下端刺入量。

从表 3 可看出,混凝土芯砂石桩、水泥土芯砂桩实质上是将排水加固体和不排水加固体的上述(1)~(4)作用通过一个复合加固体来实现了。

3.3 多方法复合加固

多方法复合加固技术是指在地基处理中,将 2 种或 2 种以上的地基处理技术用于同一场地的地基处理,达到提高地基承载力和稳定性、减小地基压缩性、提高地基基础耐久性等的地基处理技术。以真空预压为例,近年来,发展了较多的基于真空预压的复合加固技术。

作为大面积软土地基处理的主要方法之一,真空预压一直得到大量应用。同时,如表 2 所示,基于真空预压,发展了较多的复合加固技术和真空预压新技术,包括真空-堆载联合预压法、真空排水+强夯联合加固法(包括高真空击密法)、水下真空预压法、低位真空预压法、立体真空预压法、电渗-真空降水联合加固法、电渗-真空降水-低能量强夯联合加固法、真空-注气加固法、劈裂真空预压法、真空降水联合冲压法、真空预压-石灰稳定联合加固法等等。

4 大面积地基加固

近年来,我国以公路、铁路、机场等为代表的大型基础设施建设呈现出建设覆盖面广、数量多、规模大、标准高等特点,其共同特点是,均涉及到大面积地基的加固问题。东南沿海地区济南、连云港、杭州、上海浦东、宁波、温州、深圳等城市的机场建在高含水量、高孔隙比和高流塑性的软基上;西南地区的桂林、贵阳、南宁、重庆、临沧、九寨沟的机场则为高填方地基,有的还存在岩溶;西北地区西安、兰州、西宁、新疆拉那提等城市的机场建在不同类别与等级的湿陷性黄土地基上,而敦煌、克拉玛依的机场则以盐渍土地基为主;北方地区,黑河、哈尔滨、嫩江、满洲里等机场则以季节冻融或永冻土为地基;还有一些机场存在土洞、膨胀土、珊瑚礁等特殊地基问题。在这些地质条件上的公路和铁路建设也面临类似的问题。

机场、公路、铁路工程的建设遇到的岩土工程问题及要解决的技术难点主要有 3 个方面:一是软土地基的沉降控制标准;二是一些特殊土地基处理

方法；三是山区机场建设中的高填方稳定性。

4.1 大面积高填方地基处理

目前，国际上已经出现高填方 100m 与沿海地区出现深填海造陆形成的机场。例如日本关西机场一期和二期工程，国内也有厦门机场与九寨沟机场，21 世纪，这两类机场还会进一步增加。与此相应，场道地基的稳定、沉降及其处理问题会显得更加突出。目前各类场道地基的处理指标尚无统一工程标准，如何合理确定指标也无统一认识，一些指标的确定还有较大争议，因而 21 世纪一个重要任务是确定各类地基的处理指标，制定出相应工程标准与规范，以指导解决好机场建设中碰到的各类突出的工程地质问题。

以山区机场建设为代表的高填方地基可分为高填土地基、高填石地基和高填土石地基。云南临沧机场是典型的高填土地基，贵阳龙洞堡机场是典型的高填石地基，而九寨沟机场是典型的高填土石地基。九寨黄龙机场最大填方高度达 102m，最大坡顶与坡脚高差 140m，跑道中心线的最大填方高度为 91.0m，地震基本烈度 8.1 度。该机场工程具有超高填方、大土石方量、强地震、高海拔、顺坡填筑及填筑材料选择余地小的特点，是国内机场中土石方量最大、填方高度最高、地质条件最复杂的机场之一。以该机场为例，存在如下技术问题：

(1) 地基沉降变形问题：本机场最大垂直填方 102m，坡顶与坡脚最大高差达 140m，是国内机场建设中遇到的最高填方，其地基沉降问题比较突出。高填方地基的沉降包括两部分：一是在高填方巨大的附加荷载作用下，高填方下天然地基产生沉降变形，二是高填方自身在其自重作用下发生压缩变形与沉降，此外，高填方还将产生较大的水平变形。

(2) 高填方地基稳定性问题：坑填方地基的稳定性问题包括两个方面：一是高填方下及其一定影响范围内天然地基的稳定性问题，二是高填方与原地基交接面的稳定性问题。

(3) 高填方填筑体的边坡稳定问题：高填方填筑体的边坡稳定性也是一个应引起重视的问题。由于填方高度很大，如何使设计既能满足高填方的边坡稳定性，又能使土石方的工程量最省，是一个应该研究而且值得研究的课题。

(4) 高填方地基抗震问题：由于场区地震基本烈度为 8.1 度，属于强地震区，地震对高填方稳定性的影响很大，必须加以认真研究。

(5) 冻融问题：场区年最低气温-24℃，最高

气温 30.8℃，年最大温差达 55℃，这将对材料性能、强度产生非常不利的影响，从而影响填筑体的变形和稳定。

(6) 排水影响问题：高填方改变了场区原有的排水系统，排水处理不当，将给高填方地基带来不利得影响。

(7) 工程环境问题：由于土石方工程规模很大，植物土层的处理及一部分弃土势必带来工程环境问题。跑道东侧的挖方区，破坏了原有植被层，需考虑水土流失问题。

4.2 大面积软弱地基处理

对于大面积、深厚层软弱土地基，当涉及到大面积地基处理时，在现有技术条件下将地基的沉降量控制在较小的范围内比较困难，在满足机场运行安全的前提下，应该允许地基发生一定的工后沉降，同时采用增强地表一定尝试范围内土层强度、刚度的浅层地基处理方法，使地基与上部结构协调变形，从而有效地控制不均匀沉降。这种思路已成功解决了杭州萧山机场、济南遥墙机场和上海浦东机场等所碰到的软弱土地基的沉降问题。实践表明，强夯法可以提高地基土的强度，有效地解决浅层土的不均匀性问题，改善土基的整体变形协调性。由于强夯法本质上属于浅层处理方法，中、深部软土出现沉降变形是无法避免的。通过施工及运营过程中的沉降观测，表明道面出现了一定量的沉降，但道面结构完好，飞机起降运行安全、正常。

上海浦东国际机场二期飞行区场地为促淤所形成，场地工程地质条件比一期飞行区差。在大量试验研究的基础上，相继开展了道面结构对地基沉降适应性、地基工后沉降控制指标以及结合道面结构形式进行地基处理方法等专题研究，最终形成了二期飞行区地基处理模式—堆载预压与浅层处理相结合的地基处理方法。

高速铁路对沉降和工后沉降的要求均非常严格，因此，当采用复合地基进行大面积加固时，合理的沉降控制标准、合理的地基处理方法、合理的地基加固深度仍是高速铁路站场等大宽度地基处理的巨大挑战。例如，京沪高速铁路济南西站站场宽度较大，大面积地基处理宽度达到 160m 以上，采用了 35m 长 PHC 管桩进行地基处理，分层沉降结果表明，地表沉降达 15cm 左右时，地基处理深度范围内的压缩量仅为 3cm 左右，主要的地基压缩量仍发生于加固区以下。

4.3 大面积特殊土地基处理

在膨胀土、湿陷性黄土地区兴建机场、道路、铁路等基础设施时，需要涉及到特殊土的大面积地基处理。主要包括湿陷性黄土大面积地基处理、盐渍土的大面积地基处理及膨胀土的大面积处理等。

4.4 大面积细粒换填土处理

与山区大面积高填方填土不同，在平原地区的道路路堤填筑等常常面临采用细粒土作为大面积填筑土料的问题，需要解决大面积填土的物理、力学性能控制的问题。例如，在奥运水上公园工程中，静水赛道的开挖约有 200 万 m³ 弃土，现场开挖的 3~4 米深范围基本是砂质粉土和粉细砂。其特点是压实性能差、抗剪强度较低、抗变形性能很差（压缩变形、湿陷等）、抗震性能差（振陷、液化）、水力性能极差（易冲蚀、流土、接触冲刷与流滑等）、抗冻害性能较差。可见，开挖出的粉细砂和含砂量较高的砂质粉土其工程性质很差^[31]。所以粉细砂和高含砂量粉土在输水的填方工程中的应用是一个极具挑战性的技术难题。在水利工程中，即使是流速很慢的渠道也避免建造在这类土之上。

通过对粉细砂和粉质粘土通过加密、加固和加筋处理，成功地用开挖的弃土填筑了动水赛道，取得了很大的经济和社会效益，为奥运水上公园项目降低了造价，缩短了工期。并在奥运的预赛中经受了考验和得到成功的应用。

5 土工合成材料

5.1 土工合成材料的应用

目前通常将土工合成材料分为土工织物、土工膜、特种土工合成材料、复合土工合成材料四类^[32]，其中土工织物属于透水的土工合成材料，又叫土工布，土工膜指相对不透水的土工合成材料，特种土工合成材料是指土工织物和土工膜以外近十几年来研制的新型土工合成材料，复合土工合成材料是土工织物、土工膜、特种土工合成材料的两种或两种以上材料复合而成的土工合成材料^[33]。

根据其使用目的和功能，土工合成材料可具有排水作用、隔离作用、加筋作用、防渗作用、防护作用等。当土工合成材料应用于地基处理时，主要发挥其加筋作用和隔离作用。

土工合成材料加筋土结构在建筑、交通、水利、市政工程中已得到广泛应用。常见的加筋土结构包括加筋土挡墙、加筋土地基、加筋土路基(堤)、加筋土堤坝、加筋土边坡和加筋土桥台等。由于土体具有松散性，导致土体容易受拉破坏，而

利用土工合成材料抗拉强度高的优势，将其布置在土体中作为抗拉材料，通过筋材与土产生相互摩擦作用，可以扩散土体的应力，增加土体的模量，传递拉应力，限制其上下土体的侧向变形，从而提高土体的抗剪、抗拉强度，增强土体及有关构筑物的稳定性^[34]。

在地基处理领域，土工合成材料最为广泛应用的就是加筋土路堤，特别是高速铁路路堤，为了严格控制工后沉降，常采用桩-网结构形成水平-竖向加固的双向加固复合地基。京沪高速铁路某试验段的测试结果表明^[35]，采用桩-网结构可有效地控制工后沉降，如图 4 所示，桩顶处的沉降(S1)、两桩之间土面沉降(S2)和四桩之间土面沉降(S3)相差不多，且均较快就达到沉降稳定。

由图 4 可看出，由土工网-加筋垫层的兜提作用，桩和桩间土的差异沉降得到了控制。因此，对于桩-网(土工格室)组成的结构，如何分析其对路堤填土过程中的填土-加筋体-桩-桩间土的相互作用及桩、土荷载分担及沉降的影响成为桩网路堤分析与设计的关键。

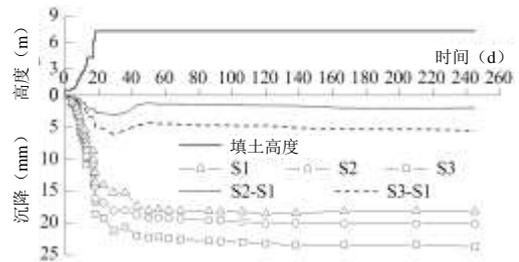


图 4 桩网结构路堤地面沉降

Fig.4 Ground settlement of column-net structure embankment

特殊土路基上应用加筋也可取得较好的针对性的效果。盐渍土地质在我国分布区域广泛。近几年，随着高等级公路的飞速发展，使得越来越多的高等级公路在盐渍土地基上修筑。盐渍土地基遇水具有溶陷性，所以当季节性地下水渗出时，可能会使得该段路基产生较大的沉陷，路基一旦出现较大的沉陷，路面就会破坏，出现裂缝，降水会沿着裂缝下渗，出现翻浆等公路病害，加剧路基的沉陷。由盐渍土引发的诸多公路病害，已成为影响高速公路建设的主要问题之一。嘉安高速公路玉门段途经盐渍土分布区，该区域盐渍土层较厚、含盐量较高，且该段的地下水水位较高，有季节性的地下水渗出。采用粉喷桩与土工格室联合加固地基的桩-网复合基础来处理盐渍土地基^[36]。应用结果表明，在桩土复合地基加固区顶面铺设土工格室，填入砂形成加

筋复合褥垫层,可以增大土体的刚度模量,分散荷载,约束土体的侧向变形,进而提高地基承载力,增大地基稳定性,减小地基竖向变形。这种方法将两种技术联合应用,可以相互补充,发挥各自的特点。

山区高速公路建设必须解决的一个问题是填挖过渡段的差异沉降问题。土工格栅、土工格室等也常常被用来对填挖过渡段进行处治,以减小差异^[37]。此外,软土地基和不良地基上公路拓宽过程中,为控制新、老路堤之间产生沉降差并引起路面的纵向裂缝,以及拓宽部分路堤的失稳,也常常在新、老路堤接合面采用铺设土工合成材料加筋的方法。

5.2 土工合成材料构造物的抗震问题

日本阪神地震、美国北里奇地震、土耳其伊斯坦布尔地震、中美洲萨尔瓦多地震、台湾集-集地震以及我国汶川地震中一些加筋挡土墙加筋边坡的震后调查结果表明,土工合成材料加筋的构造物具有良好的抗震性能,用 EPS(聚苯乙烯板块)作为填料的路堤、桥台也具有优异抗震性能^[38]。其原因是加筋对水平地震作用下堤顶加速度放大作用有明显的抑制效果,加筋后路堤水平地震位移明显减小^[39]。

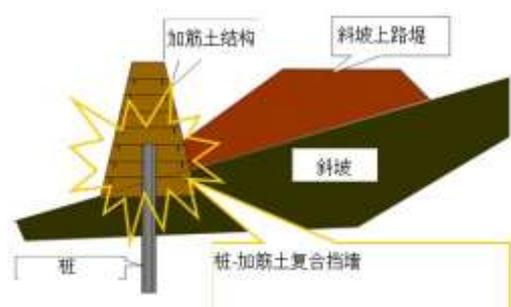
1995 年的阪神地震为里氏 7.2 级。在阪神地震中,人们调查了 120 个加筋土构造物(其中 70% 高度大于 5m, 15% 高度超过 10m),设计地面加速度为 0.15~0.2g,实际加速度 0.27g。震后调查表明,其中 10 个分离式的混凝土整体墙面开裂,3 个墙有明显的横向位移,变形在 4mm~113mm 之间,超过 22 个结构的地面位移明显。但是所有这些结构都保持着使用功能。其中 Tanata 加筋土挡土墙墙高 4.5m,格栅设计强度 29kN/m,在地震以后只是在墙顶和紧邻电缆沟的底部发生 20cm 的水平位移^[40]。

国道 G213 都江堰-映秀段的 32 处加筋土路基段长度范围为 32m~153m,总长度为 1771m,平均长度 55.34m;路基宽度范围为 7.7m~32.5m,平均宽度 13.7m。在 5.12 汶川地震作用下,加筋土路堤的路基(路面)、坡防护遭受到了一定的破坏,但土工格栅加筋路堤整体良好,未受到地震破坏。

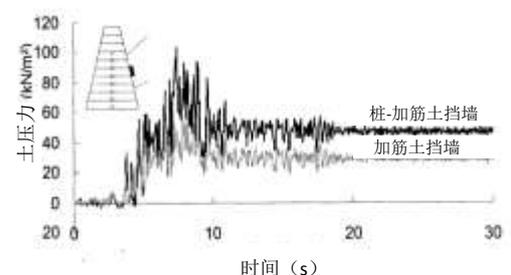
Hara T.等^[41]还针对斜坡等一些不得不采用宽度较小的加筋土墙,发展了称为“Piled Geo-wall”的复合结构,如图 5 所示。利用地震时桩、加筋土墙体的位移不同,充分发挥桩的作用,共同承担荷载。动离心试验结果表明,由于加筋土结构的延性较大,桩可与加筋土共同作用,在动荷载作用下,有更大的土压力传递到桩-加筋土复合墙体上,桩体

的设置可显著提高墙体的抗水平力的能力。

王建等^[42]对汶川 8.0 级地震震区路基震害进行调查,发现强震作用下绝大多数未加筋路堤为浅表层边坡坍塌破坏,极少数路堤发生半幅路面错落的本体滑坡现象,所有路堤均未出现沿基础界面的滑动,而土工格栅加筋路堤震害程度轻微得多。根据变形破坏模式,提出以侧向变形控制为核心的土工格栅布筋方案,即在路堤顶部满铺土工格栅、中上部铺设短格栅。利用未加筋路堤和土工格栅加筋路堤大型振动台模型试验进行加筋变形控制方案有效性的对比试验结果表明,路堤顶部满铺土工格栅,阻断竖向裂缝的扩展,从而抑制路堤本体滑坡;护坡道上方铺设短格栅,可有效抑制路堤侧向变形及边坡坍塌。通过对加速度、动土压力测量结果的对比分析,发现土工格栅加筋后,路堤模型的自振频率提高 12%, 0.7 倍坡高处加速度放大系数在中震下减小 27%,在大震下减小 41%,动土压力幅值也会大幅减小。大震情况下,土工格栅加筋堤模型 0.7 倍坡高处的 PGA 放大系数较未加筋路堤减小了 41%。加速度响应分析表明,土工格栅通过侧向约束作用,抑制了路堤中上部的加速度响应,从而改变了路堤本体的动力特性。



(a) 桩-加筋土挡墙结构



(b) 试验过程中挡土墙土压力

图 5 桩-加筋土复合挡墙工作原理示意图

Fig.5 Principle of pile-reinforced soil composite earth retaining wall

5.3 交通荷载作用下土工合成材料的应用

随着高速铁路、城际列车、地铁和轻轨等快速

轨道交通的迅速发展,以及既有铁路列车提速,列车高速运行,轨道交通荷载作用下地基土的动力响应、引起的地基振动、永久变形以及一系列相关的土动力学和岩土工程问题已经成为亟待解决的关键问题^[43]。瑞典国家铁路局于1998年测试了X2000高速列车在软土地基上运行时的振动,测试了不同速度时的路堤及地面振动,包括速度和加速度测试,还通过落锤法、跨孔法等多种方法对场地的基本参数进行了测试,发现当列车速度为200 km/h时,列车和轨道中的最大振动位移达到了14 mm,超过了保证铁路安全运营的界限;同时,在这次振动测试中,明确发现了临界速度的存在^[44]。作为改善轨道交通荷载下路基土的动力学行为的手段,土工合成材料也得到了应用。

肖宏等^[45]为了考察半干硬性混凝土夯扩桩与土工格室联合作用加固既有线路基基床病害的效果,结合达成铁路k337段成都黏土(膨胀土)基床病害工点的整治,选取了3个测试断面,分别测试了经不同加固方案处理后的轨道平顺性与基床不同高度处在机车荷载作用下的动应力、振动变形和加速度等动力响应。试验表明,k337+700断面土工格室底的动应力均值约为该断面路基面动应力均值的57.97%(即动应力衰减系数为0.5797)。根据已有研究,一般条件下,在基床表层0.3m范围内动应力的衰减系数约为0.7~0.75,可见土工格室在均化动应力峰值、减小动应力沿深度的传递、降低基床下部承受的动应力水平等方面效果明显。在k337+700断面土工格室下的振动变形较格室上(路基面位置)的振动变形平均减小14.85%,由路基面相对轨底位置振动变形的80.98%变成了66.13%,小于k337+675断面路基面处的69.99%与k337+650断面路基面处的69.69%,表明土工格室在减小路基振动变形方面效果显著。

王仕传等^[46]应用有限元法对交通荷载作用下软土地基的动力响应和变形进行了分析,研究了土工格栅加筋减小交通荷载引起的地基累计塑性变形的机理,结果表明,无加筋时,路堤高度较小时交通荷载作用下可产生显著的累计塑性变形,土工格栅加筋可显著改善地基表面的最大压应力分布,减小传递到地基土中的剪应力,土工格栅加筋还可减小地基土上部由交通荷载引起的动偏应力,从而使地基土的累积塑性变形减小。随着路堤高度的增加,由交通荷载引起的地基累积塑性变形会迅速减小,加筋效果也相应下降。

软土路基在交通荷载的长期作用下,往往会产生软化现象,从而导致道路产生较大的沉降。例如,建于天然Ariake粘土上的日本某低路堤高速公路,在投入使用后,5年的沉降达到了1m~2m。因此,软土加筋道路考虑软土地基在交通荷载作用下的软化特性是加筋土路堤研究的一个重要问题。刘飞禹等^[47]对交通荷载作用采用土工格栅加筋的低路堤软基道路工程进行了考虑软土地基软化的研究,研究表明,不考虑软土软化时,加筋道路的竖向和水平向位移在经历一段时间的循环荷载作用之后就稳定下来;而考虑软土的软化的研究发现,软土的软化特性对软基加筋道路的动力响应有重要影响,加筋道路的位移会不断增大,与工程实际中观测到的情况相符合。通过在软土层和砂垫层之间铺设土工加筋材料,可以提高道路的整体强度,使土体应力均化,约束土体的水平变形,减少道路的整体沉降,并降低道路的不均匀沉降。

土工合成材料还可用于整治铁路基床下沉病害,改善基床土的动应力^[48],基于基床土在列车动荷载作用下沉降的同时将向两侧扩张,并伴随有路肩的隆起,因此在基床面下方存在一个拉伸变形区域,如果将土工固格网布置在这个区域,利用固格网具有较高的抗拉强度,可改善这部分基床土的受力性状,同时利用固格网的垫层作用,扩散及均布固格网下基床土受到的动应力,从而提高整个基床土的承载力,消除基床病害。在淮南线采用土工固格网进行了整治基床下沉病害的试验研究。试验段整治前基床下沉外挤病害严重,其余非试验段采用传统的换砂法整治。

5.4 土工合成材料与土界面问题

土工合成材料与土界面问题是由土工合成材料筋材与土之间的接触面,以及相邻土体中存在的一定厚度的剪切带组成^[49]。陈建峰、李辉利^[50]指出,由于土工合成材料的加筋效果是通过其与周围土体之间的相互作用表现出来的,可见,筋土界面相互作用特性是研究加筋机理的核心问题,它直接反映了筋土界面的接触情况;同时,筋土界面技术指标在加筋土工程结构设计中至关重要。土工合成材料加筋土界面特性的主要影响因素有填土类型及性质、填土厚度及密实度、接触面的粗糙度、筋材的种类及结构形式、筋材性能、作用于筋材的上覆压力大小、边界效应和尺寸效应、试验设备和方法等。

关于加筋土界面特性试验主要有:直剪试验、拉拔试验、三轴试验、扭剪试验以及斜板试验,其

中,直剪试验和拉拔试验最为普遍,是目前研究筋土界面特性的最主要手段。此外,也采用各种数值计算方法研究加筋土界面特性,特别是颗粒流数值分析方法在近年来被引入^[51-52]。

5.5 土工合成材料用于防渗问题

北京 2008 年奥运会顺义奥林匹克水上公园(以下简称奥运水上公园)位于北京市顺义区马坡镇向阳村向阳闸东北侧,潮白河东岸。该项目为 2008 年北京奥运会水上运动项目的比赛场地,其中静水赛道有两条,一条是比赛用的正式赛道,另一条是练习赛道,长度约为 2272 米,总宽度约 280m。水平防渗范围内面积为 695876m²,静水赛道水面标高 32.60m,底部标高为 29.10m,水深 3.5m,堤岸标高为 33.40m,边坡坡度为 1:6。由于北京水资源的紧缺,工程的水域的防渗问题成为最关键的技术问题,经过反复论证和多次的勘察,最后决定采用土工膜水平防渗的方案^[31]。这在北京地区是很有代表性的,对于类似工程有重要的参考意义。

6 特殊土加固技术

本部分主要针对高速公路特殊土地基处理中,涉及盐渍土、冰渍土、冻土等的处理。目前,国内外针对特殊土地基的处治措施进行了一些地域性较强的研究。

6.1 盐渍土地基处理

在对盐渍土进行地基处理之前,一定要加强盐渍土地区的公路勘察,特别搞清楚盐渍土分布、类型、程度、水文状况、气象条件、筑路材料情况。对于老路,还应调查清楚老路状况、病害情况。

盐渍土地区公路地基处理,一般包括路堤处理和基底处理。路堤处理有隔断、换填、改善排水条件等措施。基底处理视地表盐渍化程度和软弱土层的深度,分表层、浅层和深层处理。对表层通常采用清表处理,对浅层一般采用换填或抛石挤淤等措施,对深层则采用砾(碎)石桩等进行处理。此外,采用合适的路基高度和断面形式,防止和减轻病害也很重要。对于老路改造,可视老路路基盐渍土病害情况、水文地质条件、土质状况采用换填、老路提高、强夯处理等措施。

盐渍土地基主要处理措施:

(1) 路基高度

合适的路基高度是保证盐渍土地区道路稳定的重要及必要条件。应根据盐渍土类型、公路等级,结合毛细水上升高度、冻胀深度、盐胀深度及安全

高度等综合确定。

(2) 路堤隔断层

在路堤内一定深度设置隔断层,以阻断水分和盐分向上迁移,是防止路基产生盐胀、翻浆及湿陷的有效处理措施。隔断层的形式主要有砾(碎)石隔断层、砂砾隔断层、砂隔断层、土工布隔断层和沥青砂隔断层。

(3) 路基排水

为保证盐渍土地区路基结构的稳定,合理的排水方法是应能使水流畅通,自成体系,不影响路基稳定;应迅速排除降水、积水,防止路基周边地表和路堤次生盐渍化及盐分聚积;并且在地下水位较浅的盐渍土地区,排水措施中的边沟应设置较深的深度以降低地下水位。

(4) 地基换填处理

当盐渍土地区公路分布有过湿路段或池塘、水坑等软弱地基,且厚度在 3m 以内时,可做浅层处理。

(5) 砾石桩加固地基

当路线通过盐渍化软弱土地基,且软弱土层厚度大于 3m 时,应对基底进行深层处理。常见的处理方法有砾(碎)石桩、砂桩等,这类散体柔性桩是通过置换、挤密作用与桩间地基土构成复合地基,提高软弱地基的强度和承载力。其中,砂桩加固盐渍化软弱土地基已成功应用于新疆吐一乌一大公路工程的建设;甘肃嘉~安一级公路盐渍化软弱土地段的地基应用振动沉管挤密砂石桩进行处治,其治理效果和经济效果较理想。

(6) 强夯法加固盐渍土地基

在盐渍土地区进行老路改造时,如果老路基压实度偏低,又不便采用挖除换填或提高路基的措施,可采用强夯法进行地基加固。该处理方法已成功应用于甘肃嘉~安一级公路盐渍化软弱土地基的处治。

6.2 冰渍土地基处理

冰渍土由冰川作用形成,其特点是大小混杂、孔隙大、棱角分明、分选性差,地基承载力极不均匀,主要病害是地基不均匀沉降。

目前,针对冰渍土地基处理措施的研究较少,主要处理方法以强夯为主。

6.3 冻土

冻土地基处理方法主要包括冻土地基的工程防护及改造。

(1) 冻土地基的防护

对冻土地基进行防护的目的是预防冻土天然状态的改变或消除其危害产生的根源,避免冻土对工程产生危害。防护的主要方法有:采用架空通风基础、粗颗粒土垫高地基、铺设隔热层及各种热桩、强制循环制冷桩等。

①通风基础(一般包括架空通风和管道通风):是将建筑物通过桩、柱抬升隔离地表通过埋置通风管道或预设隔热垫层,使建筑物不能和地表直接接触,以达到冻土地基不改变其原始温度条件而得以维持其稳定性。

②粗颗粒土垫高地基:在年均气温低于 0°C 的冻土地区,大多数建筑地基可采用粗颗粒(碎石、砾石)垫高地基,垫高地基超出建筑物外围至少 0.3m 。

③铺设隔热层:作为隔热层的材料必须是具有一定刚度的土工织物或泡沫材料,且使用期间不吸湿(防潮性)。

④桩基础:由于桩基可隔离上层建筑与冻土的直接接触,且于其间易于设置架空空间及铺设绝热材料,因此桩基础是冻土区建筑采用相对较为广泛的基础形式。

⑤热棒(桩):热棒是一种特殊类型的桩,通过自身相转换或强制循环制冷消散土体中热量,故其能够将土体内部的温度降低,因此在改善冻土地基、防止冻土融化下沉和冻胀以及提高地基稳定性方面,都是极好的处理手段。我国曾将热棒有效地应用于青藏铁路,在稳定性方面效果良好。

(2) 冻土地基的改造

冻土地基改造的宗旨主要是消除其冻胀和融沉特性,以保证工程建设的正常完成和有效运营。

①冻土地基的防冻胀措施:换填,即用粗砂、砾石等非冻胀性的土体材料置换天然地基的冻胀性土,以消除或削弱天然地基的冻胀性;物理化学法,利用交换阳离子及盐分对冻胀规律进行改良。

②冻土地基的防融沉措施,主要从改良土体的角度出发,通过剥离土层或其他工业融化方法对冻土进行融、预固结;采用纯净的粗颗粒土换填富冰土或含土冰层,以直接消除或削弱土层的融沉。此外,工程中也有采取多填方、少挖方的方针,以尽可能避免对冻土的扰动破坏。

③季节性冻土基础工程防冻胀措施,基础四侧换土,采用较纯净的砂、砂砾石等粗颗粒土换填基础四周冻土,填土夯实;改善基础侧表面平滑度,基础必须浇筑密实,具有平滑表面。基础侧面在冻

土范围内还可以用工业凡士林、渣油等涂刷以减少切向冻胀力;选用抗冻胀性基础改变基础断面形状,利用冻胀反力的自锚作用增加基础抗冻拔的能力。

④多年冻土地基工程的防融沉措施,一般采取的办法有换填基底土,对采用融化原则的基底上可换填碎、卵、砾石或粗砂等,换填深度可到季节融化深度或受压层深度;选择好基础形式,对融沉、强融沉土用轻型墩台,适当增大基底面积,减少压应力,或结合具体情况,加深基础埋置深度;注意隔热措施,采取保持冻结原则时施工中注意保护地表上覆盖植被,或以保温性能较好的材料铺盖地表,减少热渗入量。施工和养护中,保证结构物周围排水通畅,防止地表水灌入基坑内。

以上三种特殊土存在的主要问题是工程实践相对较少,施工工艺相对不成熟,地基处理存在的问题研究尚不充分。

7 结语

通过对我国近年来地基处理技术发展的回顾,对我国地基处理的发展提出如下回顾总结与建议:

(1)我国在地基处理的方法、复合地基的加固体多功能化、复合地基的加固体多元化、高强度方面取得很大进展,体现了我国地基处理技术发展的特色;

(2)我国发展了多种地基处理技术的复合应用,主要体现在:由单一加固技术向复合加固技术发展;由复合地基的加固体由单一材料向复合加固体发展;复合地基加固技术与非复合地基加固技术的结合;静力加固与动力加固技术的结合;机械加固与非机械加固的结合。这些加固技术的机理、设计方法、检测方法仍需进一步研究,以尽快实现设计方法规范化、检测与监测标准化。

(3)复合地基加固体的类型丰富多样,其发展呈现如下特点:同一加固体由不同材料、不同工艺完成,形成具有多功能的加固体;同一场地采用不同的加固体形成多元复合地基;刚性桩(素混凝土桩、钢筋混凝土桩)被越来越多地应用于地基处理。同样,这些加固体的工作机理、设计方法、检测方法仍需进一步研究并尽快实现设计方法规范化、检测与监测标准化。

(4)将复合地基加固体之间设置的砂桩、碎石桩、袋装砂井、排水板称为排水加固体,将粉喷桩、搅拌桩、预制桩等称为不排水加固体,将水平加筋等的加固体也认为是多元复合地基的一个组成部

分, 则多元复合地基的工作机理体现在如下几个方面: 促进不排水加固体施工时土的固结、促进加载时加固体之间土体的固结和加固区下土体固结、防止地震时砂土液化、提高地基稳定性、对地基在竖向实现变刚度、变强度加固。

(5) 土工合成材料在地基处理中的应用越来越广泛, 对地基特别是铁路、公路路基的承载力、沉降的研究已取得深入成果。但是, 近年来, 我国有很多复杂条件下高挡墙、高陡坡工程, 有的高达 50m-60m, 甚至上百米。在国际上 10m~20 m 的加筋土结构已经被称为高墙与高坡, 目前所见的设计准则, 也主要适用于这个范围。将其应用于超高、超大的加筋土工程应谨慎, 其设计理论还需深入研究, 选料要更严格、施工要更精细、管理和监测要更加规范。

(8) 建议加强地基处理设备、地基处理检测技术、有埋深条件下复合地基的破坏模式与承载力计算、复合地基抗震性能等的研究, 以及大宽度复合地基问题, 包括地基处理深度、压缩层深度、沉降计算方法等。促进我国地基处理技术的进步。

(9) 近年来, 我国岩土工程界同行一直在持续不断地研究新的地基处理方法, 一些方法已积累了成熟的经验并被纳入相关规范, 但也有一些方法尚未经过足够的工程实践检验。因此, 在研究、发展新的地基处理方法的同时, 开展对我国现有地基处理技术的系统总结, 及时总结我国地基处理技术的经验、引领地基处理技术的发展方向, 对于我国地基处理向高水平的发展也是非常重要的。

致谢:

本报告的撰写过程中, 韩杰教授的提供了部分参考资料, 在此表示衷心感谢!

参 考 文 献

- [1] 《建筑地基处理技术规范》JGJ79-2011[S] (报批稿) (JGJ79-2011 Technical code for ground treatment of buildings[S]. 2011. (in Chinese))
- [2] Gang Z., Liu S.Y., Chen R.P. State of advancement of column-type reinforcement element and its application. *Advances in Ground Improvement: Research to practice in the United States and China-Proceedings of the 2009 US-China Workshop on ground improvement technologies*. ASCE Geotechnical Special Publication, No.188 . pp:12-25
- [3] V.R. Schaefer, G.M. Filz, L.S. Vanzler. SHRP2 R02 Phase 1 - Geotechnical solutions for soil improvement, rapid embankment construction, and stabilization of the pavement working platform. *Advances in Ground Improvement: Research to practice in the United States and China-Proceedings of the 2009 US-China Workshop on ground improvement technologies*. ASCE Geotechnical Special Publication, No.188 . pp:1-24.
- [4] 《建筑地基基础设计规范》GB50007-2011[S]. (GB50007-2011 Code for design of building foundation[S]. 2011. (in Chinese))
- [5] Zheng G, Jiang Y., Han J., Liu Y.F. Performance of cement-fly ash-gravel pile-supported high-speed railway embankments over soft marine clay, *Marine Georesources & Geotechnology*, 29:145 - 161, 2011.
- [6] 《公路路基设计规范》JTJ D30-2004[S]. (JTJD30-2004 Specifications for design of highway subgrades[S]. 2004. (in Chinese))
- [7] 《港口工程地基规范》JTS147-1-2010[S]. (JTS147-1-2010.Code for ground of port engineering[S]. 2010. (in Chinese))
- [8] 《铁路路基设计规范》[4]TB10001-2005[S]. (TB10001-2005 Code for design on subgrade of railway[S]. 2005. (in Chinese))
- [9] 曹卫平, 陈云敏. 台华高速公路路堤失稳原因分析与对策[J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, 26(7): 1504-1510. (CAO Weiping, CHEN Yunmin. Analysis of Sliding Failure Mechanism and Treatment for TaiHua Highway Embankment Slope over Soft Soils[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(7): 1504-1510. (in Chinese))
- [10] 张卫民等. 粒料桩加固的软土地基上填筑路堤的稳定分析[J]. *铁道建筑*, 2007, 11: 46-49. (ZHANG Weimin, et al. Stability Analysis of Embankment on Soft Subgrade reinforced with Granular Piles[J]. *Railway Engineering*, 2007, 11: 46-49. (in Chinese))
- [11] 秦立新, 王 钊. 某线铁路软土路堤失稳分析[J]. *路基工程*, 2007(2): 42-43. (QIN Lixin, Wang Zhao. Analysis of Sliding Failure of Railway Embankment Slope over Soft Soils [J]. *Subgrade Engineering*, 2007(2): 42-43. (in Chinese))
- [12] HAN J, HUANG J, PORBAHA A. 2D Numerical modeling of a constructed geosynthetic-reinforced embankment over deep mixed columns[A]. *ASCE GSP 131, 2005, Contemporary Issues in Foundation Engineering*.
- [13] HUANG J, HAN J, PORBAHA A. Two and three-dimensional modeling of DM columns under

- embankments[A]. ASCE GeoCongress[C], 2006.
- [14] NAVIN M P, FILZ G M. Numerical stability of embankments supported on deep mixed columns. ASCE GSP 152, Ground Modification and Seismic Mitigation, 2006.
- [15] BROMS B B.. Can lime/cement columns be used in Singapore and Southeast Asia?[A] 3rd GRC Lecture, Nov. 19, Nanyang Technological University and NTU-PWD Geotechnical research Centre, 1999,214p.
- [16] MIYAKE M, WADA M, SATOH T. Deformation and strength of ground improved by cement treated soil columns[A]. Proceedings of the International Conference on Geotechnical Engineering Coastal Development[C]: GeoCoast' 96, Yokohama, Japan, 1996,Vol. 1, pp.369-372.
- [17] MIYAKE M, AKAMOTO H, WADA M. Deformation characteristics of ground improved by a group of treated soil[A]. Centrifuge 91[C]: Balkema, Rotterdam, 1991,pp.295-302.
- [18] KITAZUME M, MARUYAMA K. Collapse failure of group column type deep mixing improved ground under embankment[A]. Proc. of the International Conference on Deep Mixing 05[C]: ASCE,2005, pp.245-254.
- [19] KITAZUME M, OKANO K, MIYAJIMA S. Centrifuge model tests on failure envelope of column type mixing method improved ground[J]. Soils and Foundations,2000, 40(4): 43-55.
- [20] TERASHI M, TANAKA H, KITAZUME M. Extrusion failure of the ground improved by the deep mixing method[A]. Proceedings of the 7th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering[C]: Haifa, Israel,1983, Vol. 1, pp.313-318.
- [21] 郑刚,刘力. 刚性桩加固软弱地基上路堤的稳定性问题(I)——存在问题及单桩条件下的分析[J]. 岩土工程学报. 2010, 32 (11): 8~18. (ZHENG Gang, LIU Li. Stability Analysis of Embankment on Soft Subgrade Reinforced with Rigid Inclusions (I) —Background and single pile analysis[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering. 2010, 32 (11) : 8~15. (in Chinese))
- [22] 郑刚,刘力,韩杰. 刚性桩加固软弱地基上路堤的稳定性问题(II)——群桩条件下的分析[J]. 岩土工程学报. 2010, 32 (12) : 1811~1820. (ZHENG Gang, LIU Li. Stability Analysis of Embankment on soft subgrade reinforced with rigid inclusions (II) —Study under the condition of group piles [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering. 2010, 32(12): 1811~1820. (in Chinese))
- [23] 刘力. 刚性桩加固路堤稳定分析方法研究[博士学位论文D]. 天津: 天津大学, 2010. (LIU Li. Research on the stability analysis of rigid pile supported embankment[D]. Tianjin: Tianjin university, 2010. (in Chinese))
- [24] 《复合地基技术规范》(报批稿) [S].
- [25] 《刚柔性桩复合地基技术规范》[S]
- [26] 《现浇混凝土大直径管桩复合地基技术规程》JGJ/T2103-2010[S]. (JGJ/T2103-2010 Technical code for composite foundation of PCC pile[S]. 2010. (in Chinese))
- [27] 闻世强,陈育民,丁选明,左威龙. 路堤下浆固碎石桩复合地基现场试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(5):1559-1563. (WEN Shiqiang, CHEN Yumin, DING Xuan-ming, ZUO Wei-long. Application of grouted gravel pile in soft subgrade improvement of expressway[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(5):1559-1563. (in Chinese))
- [28] 向玮,刘松玉,经绯,刘志彬. 变径水泥土搅拌桩复合地基承载特性的试验研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2009, 39(2): 328-333. (Xiang Wei, Liu Songyu, Jing Fei, Liu Zhibin. Bearing capacity of composite foundation of soil-cement deep mixing columns with different cross-section parts[J]. JOURNAL OF SOUTHEAST UNIVERSITY (Natural Science Edition), 2009, 39(2): 328-333. (in Chinese))
- [29] 刘松玉,易耀林,朱志铎. 双向搅拌桩加固高速公路软土地基现场对比试验研究[J]. 2008, 27(11): 2272-2280. (LIU Songyu, YI Yaolin, ZHU Zhiduo. Comparison Tests on Field Bidirectional Mixing Column for Soft Ground Improvement in Expressway[J]. 2008, 27(11): 2272-2280. (in Chinese))
- [30] 程万钊,乐茂华,王富永,赵维炳等. 混凝土芯砂石桩复合地基加固堤防软基试验研究[J]. 水利学报(增刊), 2007, 675-680. (CHENG Wanzhao1, YUE Maohua, WANG Fuyong2, ZHAO Weibing, et al. Field tests study of concrete-cored sand-gravel piles applied to strengthen embankment engineering[J]. SHUILI XUEBAO, 2007, 675-680. (in Chinese))
- [31] 李广信,金焱,汤飞,化建新. 北京奥林匹克水上公园中土工合成材料的应用[C]. 2008, 6月, 上海. 第七届全国土工合成材料学术会议论文集(现代知识出版社):57-64.
- [32] 土工合成材料工程应用手册[M], 中国建筑工业出版社, 1994.
- [33] 朱英,钟香兰. 土工合成材料技术研究及工程应用[J].

- 中国水运, 2007, 7 (6): 80-82. (Zhu Ying, Zhong Xianglan. Research on Geotechnical Reinforcement Technology and Its Engineering Application[J]. China Water Transport, 2007, 7 (6): 80-82. (in Chinese))
- [34] 欧阳仲春. 现代土工加筋技术 [M]. 北京:人民交通出版社, 1990.
- [35] ZENG J.C, ZHANG J.W., TONG X.D., and TU Y.M. Test evaluation of post-construction settlement of subgrade in Beijing-Shanghai high-speed railway. International conference on transportation engineering 2009 (ICTE 2009) 1275-1280.
- [36] 徐世强, 折学森, 李培林, 石刚. 桩-网复合基础在公路盐渍土地基处理中的应用[J]. 西安工程科技学院学报, 2006, 20(5):587-589. (XU Shiqiang, SHE Xuesen, LI peilin, SHI Gang. Application of pile-web complex foundation in the highway salty soil treatment[J]. Journal of Xi' an University of Engineering Science and Technology, 2006, 20(5):587-589. (in Chinese))
- [37] 严刚. 土工格栅在高速公路填挖过渡段的应用[J]. 地质学刊, 2010, 34(3):307-313. (Yan Gang. Application of geogrid on cut-fill transition zone in highway construction[J]. Journal of Geology, 2010, 34(3):307-313. (in Chinese))
- [38] 李广信. 土工合成材料构造物的抗震性能[J]. 世界地震工程, 2010, 26 (4): 31-36. (LI Guangxin. Behavior of earth structure with geosynthetics in earthquake[J]. World Earthquake Engineering, 2010, 26(4): 31-36. (in Chinese))
- [39] 蒋建清, 杨果林, 李丽民. 基于 SIMULINK的高填方加筋路堤地震反应分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2011, 42(1):227-233. (JIANG Jian-qing, YANG Guolin, LI Limin. Seismic response of high-filled reinforced embankment based on SIMULINK[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2011, 42(1):227-233. (in Chinese))
- [40] Koseki J., Bathurst R. J., Guler E., et al . Seismic stability of reinforced soil walls [C]. Proceedings of International Conference 8 thGeosynthetics . Yokohama , Japan : 2006, 18- 22 .
- [41] Hara T., Tsuji S., Tatta N., etc. Development of reinforced soil structure with pile foundation-Piled-Geowall. Geoenvironmental Engineering and Geotechnics: Progress in Model and Application-Proceedings of the 2010 Geo-Shanghai International Conference. 2010, 53-58.
- [42] 王建, 姚令侃, 陈强. 汶川地震路堤成灾模式及土工格栅加筋变形控制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(S):3387-3394. (WANG Jian, YAO Lingkan, CHEN Qiang. Research on Failure Mode of Road Embankment in WenChuan Great Earthquake and Deformation Control of Geogrid Reinforcement[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(S):3387-3394. (in Chinese))
- [43] 刘雪珠, 陈国兴. 轨道交通荷载下路基土的动力学行为研究进展. 防灾减灾工程学报[J], 2008, 28 (2) : 248-255. (LIU Xuezhu, CHEN Guoxing. Advances in Researches on Mechanical Behavior of Subgrade Soils under Repeated-load of High-speed Track Vehicles [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2008, 28 (2): 248-255. (in Chinese))
- [44] Madshus C, Kaynia A. M. High- speed railway lines on soft ground: dynamic behavior at critical train speed [J]. Journal of Sound and Vibration, 2000, 231(3) :689- 701.
- [45] 肖宏, 罗强, 邓江东, 华明. 混凝土夯扩桩和土工格栅室加固铁路基床试验研究[J]. 岩土力学, 2008, 29 (8) :2157-2162. (XIAO Hong, LUO Qiang, DENG Jiangdong, HUA Ming. Test study of reinforcing railway subgrades by using concrete compacted base-enlarged piles and geogrids[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29 (8) :2157-2162. (in Chinese))
- [46] 王仕传, 凌键名, 黄琴龙. 交通荷载下土工格栅加筋软土地基的变形特性[J]. 建筑材料学报, 2010, 13(4): 452-456. (Wang Shichuan, Ling Jianming, Huang Qinlong. Deformation Characteristic of Geogrid Reinforced Soft Soil Foundation under Traffic Loading[J]. Journal of Building Materials, 2010, 13(4): 452-456. (in Chinese))
- [47] 刘飞禹, 余炜, 蔡袁强, 王军. 考虑软土软化特性的软基加筋道路动力响应[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2009, 41 (4) :138-143. (LIU Feiyu, YU Wei, CAI Yuanqiang, WANG Jun. Dynamic response of reinforced pavement considering softening of clay[J]. Journal of HarBin Institute of Technology, 2009, 41 (4): 138-143. (in Chinese))
- [48] 王炳龙, 周文杰, 周顺华等. 土工固格网改善基床土的动应力分析[J]. 铁道学报, 1998, 20 (5) :103-108. (Wang Binglong, Zhou Wenjie, Zhou Shunhua, et al. Geocell Improving Dynamic Stress of Subgrade[J]. Journal of the China Railway Society, 1998, 20 (5) :103-108. (in Chinese))
- [49] 包承纲. 土工合成材料界面特性的研究和试验验证[J]. 岩石力学与工程学报. 2006, 25 (9): 1735- 1744. (BAO Chenggang. Study on Interface Behavior of Geosynthetics and Soil[J]. Chinese Journal of Rock

- Mechanics and Engineering, 2006, 25(9): 1735- 1744.
(in Chinese))
- [50] 陈建峰, 李辉利. 土工合成材料加筋土界面特性研究现状及展望 [J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(5):1049-1054. (CHEN Jianfeng, LI Huili. Status and Prospect of Research on Geosynthetics/Soil Interface Properties[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009, 5(5):1049-1054. (in Chinese))
- [51] Richard , P. J. , Michael I E. P , Tuncer , B. E. DEM simulation of particle damage in granular media-structure interfaces[J]. International Journal of Geomechanics , 2001, 1(1): 21- 39 .
- [52] 张孟喜, 张石磊. H-V 加筋土性状的颗粒流细观模拟 [J]. 岩土工程学报, 2008 , 30(5): 625- 631. (ZHANG Mengxi, ZHANG Shilei. Behaviour of soil reinforced with H-V inclusions by PFC2D[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008 , 30(5): 625- 631. (in Chinese))