

# 国内外高速公路、铁路地基处理技术回顾

郑刚<sup>1,2</sup>, 赵佳鹏<sup>1,2</sup>, 周海祚<sup>1,2\*</sup>, 于晓旋<sup>1,2</sup>, 夏博洋<sup>1,2</sup>, 王金山<sup>1,2</sup>

(1. 天津大学 建筑工程学院, 天津 300072; 2. 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)

**摘要:** 高速公路和高速铁路在世界范围内处于快速建设阶段。为保障交通运输的安全性和舒适性, 对地基的低变形性和高稳定性产生了较高的要求。天然软弱地基在全球范围内分布广泛, 而在具有低抗剪强度、高压缩性和低渗透性的软土地基上修建高速公路和高速铁路路基容易出现沉降和稳定两方面问题。合理运用地基处理技术可以起到改善路堤变形性能、提高路堤稳定性的作用, 在保障交通运输的安全性和舒适性的同时满足工程高效性和经济性的平衡。本文对高速公路、铁路已有的地基处理技术进行了简要阐述和回顾, 综述了不同地基处理方法的沉降和稳定研究进展。选取了国内外的典型高速公路、铁路建设案例对地基处理技术的应用进行讨论。分析了现有路堤沉降预测方法和稳定性计算方法的缺陷及面临的挑战, 探讨了地基处理技术在高速公路、铁路建设中的应用前景, 以期今后高速公路、铁路地基处理理论和技术的发展提供参考。

**关键词:** 地基处理; 高速公路; 高速铁路; 沉降; 稳定

中图分类号: TU43

文献标志码: A

文章编号: 2096-7195(2021)02-0091-09

## State-of-the-art review for techniques on ground improvement of highway and railway

ZHENG Gang<sup>1,2</sup>, ZHAO Jia-peng<sup>1,2</sup>, ZHOU Hai-zuo<sup>1,2\*</sup>, YU Xiao-xuan<sup>1,2</sup>, XIA Bo-yang<sup>1,2</sup>, WANG Jin-shan<sup>1,2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Key Laboratory of Coast Civil Structure Safety of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** Expressways and high-speed railways are rapidly being constructed worldwide. For transportation safety and comfort insurance, higher requirements are imposed on the low deformation and high stability of the foundation construction. Natural soft foundations are widely distributed around the world. The construction of highways and high-speed railway subgrades on soft soils with low shear strength, high compression and low permeability is prone to settlement and stability problems. Reasonable use of foundation treatment technology can play a role in improving the deformation performance of the embankment and enhancing the stability of the embankment. This can ensure the safety and comfort of transportation while satisfying the balance of engineering efficiency and economy. This article, therefore, briefly describes and reviews the existing foundation treatment technologies for high-speed highways and railways. It summarizes the settlement and stability research progress of different foundation treatment methods. The application of foundation treatment technology is discussed in the typical high-speed highway and railway construction cases at home and abroad. The shortcomings and challenges of existing embankment settlement prediction methods and stability calculation methods are analyzed, and the application prospects of foundation treatment technology in high-speed highway and railway construction are discussed, with a view to the development of high-speed highway and railway foundation treatment theory and technology in the future for reference.

**Key words:** ground improvement; highway; high-speed railway; settlement; stability

收稿日期: 2021-03-28

基金项目: 国家自然科学基金 (52078337, 51708405, 41630641)。

作者简介: 郑刚 (1967—), 男, 博士, 教授, 主要从事岩土与地下工程系统性能控制、复合地基承载力与稳定、基坑工程无支撑节约型支护技术方面的研究。E-mail: zhenggang1967@163.com。

\*通讯作者: 周海祚 (1987—), 男, 博士, 副教授, 主要从事静-动力作用下结构物与土体的相互作用方面的研究。E-mail: hzzhou@tju.edu.cn。

## 0 引言

交通运输业是影响一个国家经济与发展最为重要的产业之一,其中高速公路和高速铁路的发展是交通现代化的重要标志,承担着巨大的运输承载力<sup>[1]</sup>。近年来,世界经济不断繁荣,世界范围内高速公路、铁路的建设进度不断加快。为了保证车辆运行的安全和旅客乘坐的舒适,高速公路路基必须具备稳定、平顺的特征;高速铁路的轨道结构必须以强硬且稳定的路基作为基础<sup>[2]</sup>。

天然地基常见软土地基和区域性不良地基,这些地基在我国沿海地区(渤海地区、长三角地区、珠三角地区等)存在大量分布,基本覆盖了我国经济最发达、人口最密集、工程建设量最大的地区。这些软土地基具有孔隙比大、压缩性强和抗剪强度低的特点。在软土地基上修建高速公路、铁路主要面临着沉降和稳定性两个方面的问题,由此造成的路堤失稳和工后沉降、不均匀沉降问题在工程中屡见不鲜,如图1所示。这两类问题显著影响着高速公路、铁路的运行安全和舒适度,必须对相关理论和实践技术进行深入研究。



(a) 某高速公路路堤失稳破坏



(b) 某高铁地基沉降导致开裂

图1 高速公路、铁路路堤面临的工程问题

Fig.1 Engineering problems in embankments of highway and railway

地基处理作为一种改善地基的承载力和变形特性的有效技术,被广泛应用于软弱地基和区域性不良地基的高速公路、铁路工程建设中。总结国内外高速公路、高速铁路地基处理的技术应用和理论研究进展,进而逐步构建起更为完善的技术体系,提高高速公路、铁路地基处理整体技术水平,对于确保交通工程建设的效率和效率具有重要意义。本文首先对常见的高速公路、铁路路堤地基处理方式进行简要总结和阐述,在此基础上对近年来不同地基处理方式的沉降和稳定性研究进展进行归纳总结,并结合国内外典型工程建设案例介绍不同地基处理方式的应用情况,最后对已有理论和技术的成功经验和不足之处进行总结,对高速公路、铁路地基处理的应用前景进行探讨。

## 1 常见公路、铁路地基处理技术

高速公路、铁路建设中常见的软土地基处理方式如表1所示。

根据原理不同,高速公路、铁路建设中常见的地基处理方法总体上分为土质改良和复合地基。土质改良是通过改良天然地基土体性质的方式,提高地基土的抗剪强度、减小土体压缩性等;复合地基是形成由基体和增强体两部分组成的人工地基来共同承担上部荷载。

土质改良包括置换法、排水固结法以及强夯法等。换填垫层法是最常用的置换法之一<sup>[4]</sup>,适用于软土较为浅薄的情况,对于软土层较厚的情况,该方法施工困难且造价过高。

排水固结法是指对地基土设立排水体或者事先进行预压,使土壤水排出固结进而提高强度、减小压缩性的方法。根据加荷方式的不同,排水固结法可分为堆载预压法、超载预压法、真空预压法和真空-堆载联合预压法等。其中,堆载预压法由于其固结时间长,适用于软土不太厚的工程;真空-堆载联合预压法对于具有深厚软黏土或者工期紧的工程,是一种更为经济有效的方法,通过在地基上施加荷载和使用真空负压源进行抽气使土体内部处于真空状态的联合使用,可有效加快地基的固结过程,缩短高速公路、铁路工程的工期<sup>[5]</sup>。

强夯法是将大重量的重锤从高处落下,使天然地基压密进而提高承载性能与密实度的方法。强夯法具有土质适用范围广、施工简单、地基改善效果好、施工效率高的优势。但是,对于饱和度较高的软黏土,强夯法由于易形成“橡皮土”从而存在夯

表1 国内外公路、铁路主要地基处理方式<sup>[3]</sup>

Table 1 Typical methods of ground improvement for highway and railway

地基处理原理	地基处理分类	处理方法定义	主要方法
土质改良	置换	将土层中的软土及不均匀土体挖除, 将其他强度较高的材料进行回填, 随后经夯压密实形成工程性质较好的垫层	换土垫层法 挤淤置换法 褥垫法 EPS超轻质料填土法 加筋垫层法
	排水固结	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	堆载预压法 超载预压法 真空预压法 真空预压与堆载联合作用电渗
复合地基	强夯	反复将夯锤提到高处使其自由落下, 将地基土密实	强夯法
	竖向增强体复合地基	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	刚性桩复合地基 水泥土搅拌桩复合地基 柱锤冲扩桩复合地基 多桩型复合地基
	组合增强体复合地基	采用竖向增强体与水平向增强体相结合的方法对其进行处理	布袋注浆桩
			大直径现浇薄壁管桩
			桩网复合地基 桩筏复合地基 长短桩组合复合地基

后地基承载力降低的问题, 故一般不宜用于加固。

复合地基法中的增强体可分为散体类柔性桩、半刚性桩、刚性桩、钢筋混凝土桩以及复合加固体等, 这是根据增强体的材料特性、有无黏结强度以及抗拉压强度差异来区分的。其中采用以上多种加固体的组合即为复合加固体, 充分发挥了复合加固体中各种材料的特点, 从而使复合加固体的性能更加突出。这些地基处理方法具有成熟的理论经验以及丰富的实践基础, 也是较为经济的一类地基处理技术。对于普遍存在的深厚软土地基, 特别是深度超过 12 m 以上的情况, 其工后沉降偏大, 需采用竖向增强体与水平向增强体相结合的方法对其进行处理。

桩网复合地基为复合地基配以加筋垫层, 从而达到充分发挥地基承载能力并调节桩土应力分担比的目的, 同时, 水平加筋体对坡脚附近的侧向位移还有较好的约束作用<sup>[6]</sup>。加筋垫层由土工合成材料以及碎石(砂砾)组成, 不仅具有优秀的抵抗变形的能力, 同时可以根据实际情况来调节基底桩土之间的荷载分担比, 使得桩体主要承担上层建筑的

荷载。桩网复合地基尤其适用于不均匀沉降的减少, 是一种有效且相对经济的方法。

桩筏复合地基的组成部分包括钢筋混凝土桩、支撑梁以及钢筋混凝土筏板。在初始加载过程中, 由于桩间土体的刚度远小于混凝土筏板和桩的刚度, 土体相比于桩具有更大的压缩变形。桩与土的变形差异, 筏板的恒载主要由桩来承担。在该体系中桩间土支撑上部结构荷载, 垫层平衡桩土荷载的分布<sup>[1]</sup>。

## 2 高速公路、铁路地基处理沉降与稳定研究现状

### 2.1 高速公路、铁路地基场地特性及存在问题

高速公路相比于普通公路, 路面更高、路堤更宽、路线更直, 因此其作用在地基上的荷载大小和范围都更大, 产生了巨大的附加应力。如果修建在软土地基上, 容易出现失稳问题, 并产生较大的不均匀沉降, 轻则出现“桥头跳车”现象、地面出现下沉和变形, 重则发生路堤垮塌, 造成严重的人员

和经济损失。高速公路的以上特点要求地基具备较高的稳定性和较小的工后沉降。

早期的铁路建设重点关注稳定问题。但随着列车速度越来越快,高速铁路逐渐产生高开行密度、高安全性、高稳定性、高平顺性的运营需求,有效控制轨下基础工后沉降和不均匀沉降成为了最核心的技术问题之一。高速铁路的轨道基础设施由上部结构(轨道构件)和下部结构(基础构件)两部分组成。由于结构差异和地基处理差异,轨道的不均匀沉降主要分布在不同下部结构连接处附近以及在地基不均匀性区域、充填段与切割段连接以及不同地基处理段连接区域<sup>[7]</sup>。这些过渡段在高速列车的作用下,桥头容易出现较大的振动现象,被称为“桥头跳车”。高速铁路无砟轨道对于路基工后沉降和过渡区的不均匀沉降有严格的界定。例如,一般情况下工后沉降应小于 15 mm,过渡区允许的路基差沉降应小于 5 mm,钢轨顺向弯曲角应限制在 1/1 000 以内。高速铁路对于地基工后沉降的要求要比高速公路更为严苛。

## 2.2 高速公路、铁路地基处理沉降研究现状

有效控制工后沉降和差异沉降需要以合理精确的沉降预测方法作为理论基础。对于排水固结法,预测工后沉降时通常采用分层总和法,该方法的预测精度对于高速铁路有砟轨道可以接受。对于散体桩复合地基和水泥土搅拌桩复合地基,复合模量法常被用来预测工后沉降,但此方法不够可靠。对于组合增强体复合地基(例如桩网复合地基以及桩筏复合地基),常采用承载力比率法和桩基础沉降法预测工后沉降,但预测精度并不理想。

### (1) 排水固结法沉降预测方法

Indraratna 等<sup>[8]</sup>提出了在轴对称和平面应变条件下考虑真空预压的垂直排水管固结沉降计算模型。Mohamedelhassan 和 Shang<sup>[9]</sup>建立了一维固结模型,计算了超孔隙水压力和固结沉降。Ho 和 Behzad<sup>[10]</sup>介绍了一种非饱和土层沉降的二维解析解。随着对地基固结沉降认识的深入,更多研究将地基的解析模型由单一均质土层发展为多层非均质土层。在这些分析方法的基础上,发展了大量计算地基在高度复杂情况下固结沉降的数值算法。由于软土固结过程中涉及流固耦合、地层分布、地质环境、渗流等多方面因素,数值模拟结果的准确性很大程度上取决于计算算法和参数的选择。

(2) 散体桩和水泥搅拌桩复合地基沉降预测方法

Castro 和 Sagaseta<sup>[11]</sup>提出了一种新的桩-土单元分析方法来分析加筋散体桩地基的沉降,对控制参数进行了参数分析。Yapage 和 Liyanapathirana<sup>[12]</sup>采用有限元方法对加筋水泥土搅拌桩支撑路堤的总沉降和不均匀沉降进行了参数分析。结果表明:桩间距、桩径和软土弹性模量是最重要的参数。Filz 等<sup>[13]</sup>提出了一种荷载-位移协调的方法来估计竖向荷载的传递和路堤的沉降,提出了临界路堤高度。Phutthananon 等<sup>[14]</sup>利用小尺度模型试验结合有限元方法研究了 T 形水泥土搅拌桩支撑路堤的荷载传递和沉降特性。由于散体桩和水泥搅拌桩复合地基总沉降等于桩身的压缩变形,工程实践中广泛采用以下简化方法来确定复合地基的复合压缩模量  $E_{cs}$ :

$$E_{cs} = mE_p + (1 - m)E_s \quad (1)$$

式中:  $m$  为桩的置换率;  $E_p$  为桩的压缩模量;  $E_s$  为土压缩模量。基于此复合模量可采用分层总和法计算沉降。

### (3) 组合增强体复合地基沉降预测方法

常见组合增强体复合地基(桩网复合地基和桩筏复合地基)刚度很大,其变形机理与散体桩和水泥搅拌桩复合地基完全不同。在后者的桩土体系中,桩身会明显受到压缩,不会明显穿透覆盖层和支撑层。但桩网复合地基和桩筏复合地基的压缩变形小到可以忽略不计,地基整体沉降主要是由桩插入土体导致的,因此不能采用复合模量法来预测沉降。

Xu 等<sup>[15]</sup>提出了一种在表面荷载作用下计算多桩刚性复合地基沉降时间的简化解法。总的来讲,总沉降  $S$  等于土体加固区域沉降  $S_1$  和桩支撑层沉降  $S_2$  之和。其中  $S_1$  可以采用综合模量法计算。先求出复合地基的综合模量,随后采用分层总和法求压缩沉降。桩网复合地基和桩筏复合地基中桩的压缩变形远小于土的压缩变形,其复合模量如果采用桩模量与土模量加权平均计算将比一般土模量大数百倍,造成地基沉降的低估。因此,已有研究提出了扩散角法、Boussinesq 法和  $L/3$  法来计算桩支撑层的沉降  $S_2$ 。在上述基础上,提出了一个经验系数  $m_s$  用以修正沉降预测结果,如式(2)所示。此系数是平均压缩模量  $\bar{E}_s$  的函数,而  $\bar{E}_s$  取决于地基沉降的测量数据以及工程规范。

$$S = m_s (S_1 + S_2) \quad (2)$$

基于桩-土相互作用原理,将 Boussinesq 法和

Mindlin 法的应力解整合为一种预测桩-网支撑路堤沉降的算法, 称为 Mindlin-Boussinesq 组合算法。Mindlin-Boussinesq 联合算法是复合地基中附加应力随深度变化的函数, 可用于揭示附加应力的分布和地基沉降规律, 且该方法计算的沉降量与工程实践实测结果一致。在实际工程中, 高速铁路桩网和桩筏复合地基支撑路堤中桩基承台和桩网下方常存在较大的孔洞。在这种情况下, 桩基础沉降计算方法 (如深大地基法和  $L/3$  法) 可用于桩网和桩筏复合地基支撑路堤的沉降预测。

### 2.3 高速公路、铁路地基处理稳定研究现状

#### (1) 传统路堤稳定性分析方法

极限平衡法被广泛应用于传统的复合地基支撑路堤稳定性分析中, 例如瑞典条分法、Bishop 法、Janbu 法、Spencer 法等。这种极限平衡法基于处理后的地基同时发生剪切破坏的假定, 这对于换填垫层法或者散体桩复合地基是合理的, 因为此时地基的组成部分均不具有抗弯刚度进而不产生弯矩<sup>[16-17]</sup>。我国的公路规范主要采用瑞典条分法进行稳定性计算, 根据不同的强度准则, 该分析方法可分为总应力法、有效固结应力法和总强度法等。

#### (2) 半刚性桩、刚性桩复合地基稳定性分析方法

复合地基支撑路堤下的半刚性、刚性桩可能发生剪切、弯曲、倾覆等多种类型破坏<sup>[17-20]</sup>。当复合地基呈现弯曲或者倾覆破坏时, 传统极限平衡法将不适用。Han<sup>[21]</sup> 通过数值方法研究了水泥土搅拌桩的稳定性, 分析了剪切破坏与弯曲破坏相互转换的桩体强度临界值, 结果表明: 当复合地基强度超过这一临界值时, 采用传统的极限平衡法会对稳定性产生明显高估。郑刚等<sup>[22]</sup> 提出了可以反映桩体破坏后性状的本构模型, 发现并分析了刚性桩的连续破坏现象, 结果表明: 刚性桩复合地基支撑路堤的桩体并非同时破坏, 而是坡肩处的桩体首先发生弯曲破坏, 周围的桩体拉应力及弯矩进而变小, 引发相邻桩体的连续破坏。随着路堤荷载的增大, 坡肩处的桩体在较浅位置发生二次破坏, 引发更大范围的连续破坏, 最终导致整体失稳。基于这一连续破坏控制稳定性的理念, 郑刚等<sup>[23]</sup> 提出了刚性桩复合地基关键桩的概念和非一致设计方法。分别针对桩体发生弯曲破坏及倾覆破坏的工况, 提出了分区非等强设计方法 (见图 2) 和分区非等长设计方法<sup>[24]</sup>, 通过提高少数关键桩桩体特性的方法, 可有效、经济地提高路堤稳定性。

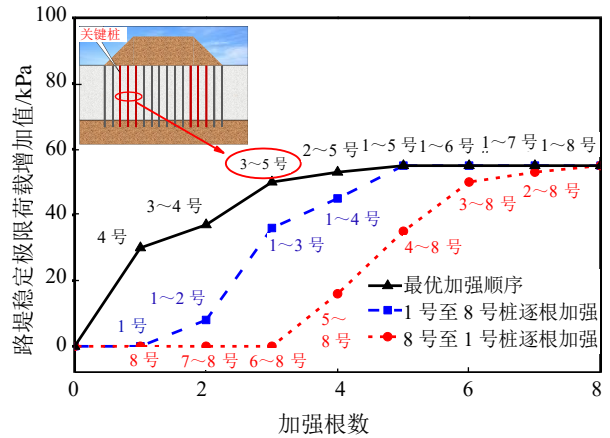


图2 分区非等强设计方法<sup>[23]</sup>

Fig. 2 Non-uniform strength design method

## 3 国内外典型高速公路、铁路工程

### 3.1 高速公路工程

#### (1) 日本东京湾高速公路

横贯东京湾的高速公路包括浮岛通道、人工用地、道路、盾构隧道和桥梁工程。挤密砂桩法 (SCP) 和深层水泥搅拌法 (DMM) 用于该工程地基处理<sup>[25]</sup>。

采用直径 1.3 m 的砂桩, 置换率高达 30.1%, 从而防止置换砂层液化。地层上, 一定厚度的弱冲积黏土分布于场地上部。为此, 在场地上采用挤密砂桩法, 以减少沉降。如图 3 所示。

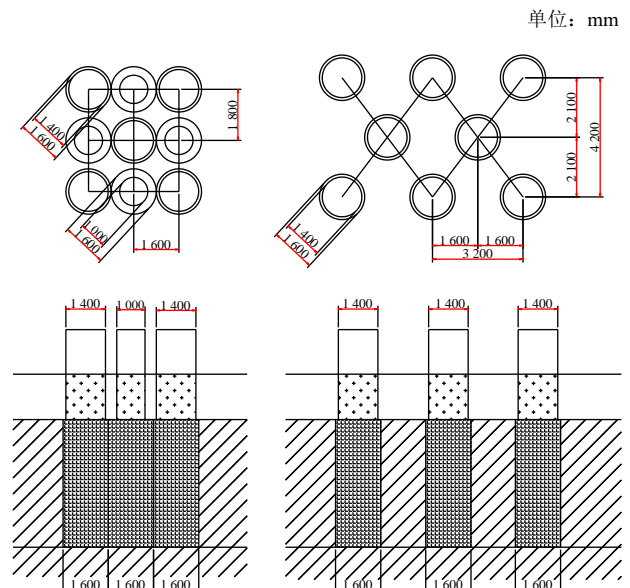


图3 日本东京湾高速公路挤密砂桩法示意图<sup>[25]</sup>

Fig. 3 Schematic diagram of compacted sand pile method of Tokyo Bay expressway in Japan

#### (2) 福建省平潭县万北路

工程地处福建省福州市东南部的平潭综合试

验区,场地地势较为平缓,其中分布有大量海相软土。海相软土力学具有高孔隙比、高含水率、低渗透性、低抗剪强度等特性,须进行地基处理以提高地基稳定性。施工场地地层大致分布为:上部是淤泥层;中部为细砂层,含有不均匀泥质;下部主要为粉质黏土层。

针对该工程地质土层特征和工程技术条件,提出并采用水泥搅拌桩-CFG桩组合处理技术,设计并比较了3种不同的桩型布置方案。经过方案比选后,最终选用的方案比最初设计的只采用CFG桩的方案,节省了9%的造价。本项目中水泥搅拌桩-CFG桩多元复合地基的应用发挥出了显著的优势,是一种具有经济效益的先进技术。

### (3) 京津高速公路

京津高速公路天津段大部分位于软土区,其中相当一部分需要进行特殊的地基处理。对于桥头高填土路基,该项目考虑利用刚、柔性地基桩的各自优势进行处理,从而达到减少路基工后沉降,降低工程造价的目的。

本工程试验段属于高填土路基,这种路基在软土地区工程风险很大。路基两侧的反压护道宽度取6 m,这样的宽度可以保证路基边坡稳定。路基采用混凝土薄壁管桩+水泥搅拌桩的加固方式,如图4所示。其中现浇混凝土薄壁管桩使用了三级过渡的处理方式,在现浇混凝土薄壁管桩的间隙中再打入一根水泥搅拌桩,并且在反压护道区域内采用第三级桩长的现浇混凝土薄壁管桩,显著节约了工程投资<sup>[26]</sup>。

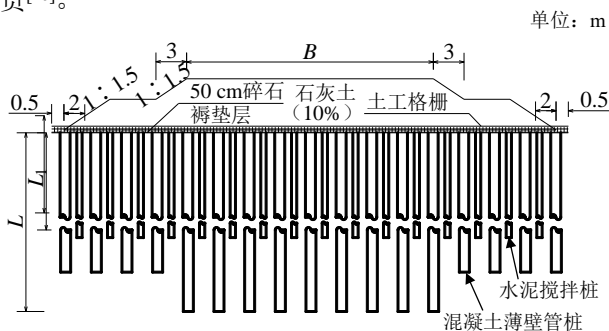


图4 路基处理示意图<sup>[26]</sup>

Fig. 4 Diagram of subgrade treatment

## 3.2 高速铁路工程

### (1) 法国 Bordeaux-Tours 高速铁路

Bordeaux-Tours 高铁是属于连接法国和西班牙的 LGV South Europe Atlantic SEA 铁路项目。其中位于多尔多涅河冲积平原的多尔多涅段,上层地基土为第四纪底土,地层的厚度随场地而变化。土层由厚约3~7 m的软黏土组成,属于高压缩性土,同

时存在有机质互层,因此在设计阶段必须考虑蠕变现象。下面的地层由致密的砾石砂和非常坚硬的泥灰岩组成。

Bordeaux-Tours 高铁设计商业速度将超过320 km/h。该段现场地基处理方案是设置700个垂直排水板和4000个CMC桩(Controlled modules columns, 模量可控桩)。其次,为增加路堤的水平刚度,在路堤内设置钢丝网板。该高铁路段的剖面图及CMC桩的处理范围如图5所示。

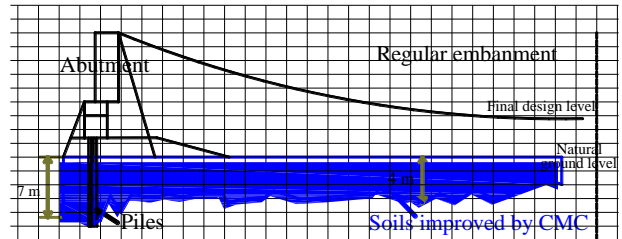


图5 Bordeaux-Tours高铁某段纵向剖面图<sup>[27]</sup>

Fig. 5 Longitudinal section of Bordeaux-Tours high-speed railway

CMC桩属于半刚性桩,其桩的材料由浆液、混凝土或胶凝材料、废料(如粉煤灰和矿渣)组成,与周围土体共同形成复合灌浆材料。其复合地基方法主要用于软黏性土、疏松砂、白垩、有机土壤和泥炭的场地。通过CMC桩加固,桩顶部将承受更多的路堤荷载,桩间土的竖向土压力和变形减少,从而达到控制沉降和提高稳定性的目的。CMC的直径一般为300~500 mm,布置间距为1.3~2 m。桩通常是10~20 m长,大直径桩可设置到30 m深<sup>[27]</sup>。

### (2) 西班牙高速铁路

为了增加瓦伦西亚、马德里和塞维利亚之间的高速铁路线, Madrid-Seville和Madrid-Levante高速铁路线(HSL)之间设计了一条连接支线。通往瓦伦西亚的线路长5 593 m,通往塞维利亚的线路长5 702 m。

项目区位于托雷洪·德贝拉斯科和耶尔·埃斯基维亚斯镇之间的Guaten河的冲积平原。通过机械钻孔,进行了实地调查研究以便能够正确地确定冲积沉积物的厚度。由于地质历史时期旧河床Manzanares(河水流经马德里)形成,冲积厚度较厚,约为6~12 m,为软黏土。从深度大约15 m以下,在大约24~25 m的深度缓慢增加到10~50 MPa。设计方案采用双排半刚性桩CMC桩进行地基土加固,采用桩径为360 mm,桩间距的布置形式采用1.5 m×2 m,桩长17 m<sup>[28]</sup>。

### (3) 宝兰客运专线

位于湿陷性黄土地区的宝兰客运专线,为西部地区横贯陕西省和甘肃省的快速客运系统主骨架之一。线路设计速度为250 km/h,长度1 661.08 m,路堤中心最大填土高度为9 m。地层上部为厚18~23 m的黏质黄土,具有结构疏松、孔隙比大、压缩性高等特征,IV级严重自重湿陷性,地层下部为砾砂及细圆砾土层。

为确保地基加固方案安全可靠、切实可行、经济有效,工程采用了刚柔性组合桩的设计方案。这种技术利用柔性短桩来解决浅层黄土的湿陷变形问题,利用刚性或半刚性长桩来提高承载力,充分发挥刚柔性组合桩的优势,达到良好的效果。柔性桩采用桩径为0.4 m的水泥土挤密桩,桩间距为1.0 m,处理范围为坡脚外3 m;刚性桩采用桩径0.4 m的CFG桩,桩间距2.0 m,处理范围至两侧坡脚处。组合桩平面采用正方形布置,CFG桩间隔布置,桩孔中心间距是挤密桩的2倍<sup>[29]</sup>。

本段路基工程2014年4月完成了复合地基施工,本体填筑于7月完成,路基堆载预压施工于9月完成,至2015年12月评估之日,中心组合沉降板累计沉降15.42~69.37 mm(路基本体填筑及堆载预压期间,基底沉降板累计沉降达到90%以上,与设计值基本吻合),预测工后沉降为7.42 mm,满足无砟轨道铺设要求。

## 4 结论与展望

总结了常见的高速公路、铁路地基处理方式,归纳了软土地基上高速公路、铁路地基处理稳定和沉降的研究进展,得出了以下的结论与展望:

(1) 基于高速公路、铁路场地地基的特点,单一地基处理方法和组合地基处理方法得到了创新性发展。换填垫层法出现了冲击压实技术,排水固结法出现了增强式真空预压技术,强夯法出现高能强夯法,复合地基出现了布袋注浆桩以及各种异型桩技术。对于复杂场地,出现了结合不同地基处理技术优势的组合处理技术,比如长短组合桩复合地基、多元复合地基、刚柔性组合桩复合地基等,实现了技术效果和经济效益的平衡。

(2) 已有排水固结法的沉降计算方法精度足够工程使用。迫切需要发展一种精度高、效率高的桩网结构基础沉降预测方法。现有的方法中广泛采用了经验因子法,并在软土地区进行了大量的现场试验,得到了这些地区与施工条件相关的经验因

素。但是,对于软土地基地区高速铁路地基沉降预测的经验因素仍需积累和探索。

(3) 高速公路、铁路地基处理稳定性的分析方法应与潜在破坏模式相匹配。换填置换法和散体桩复合地基以剪切破坏为主,半刚性桩和刚性桩复合地基则可能发生多种破坏形式。其中刚性桩复合地基不同位置加固体对路堤整体稳定性具有不同的贡献程度,针对这种加固体的非一致性提出复合地基关键桩的概念以及相应的设计方法,可提升岩土工程的品质,具有较好的经济效益。

(4) 高速公路、铁路地基处理的技术仍有以下问题值得深入研究。现有的桩网复合地基沉降控制仍不理想,应在经济与技术相平衡的条件下进一步发展该技术;应提高复杂工程环境下的精细化沉降控制技术,比如临近已运营线路、上跨或下穿已运营线路的精细化沉降控制技术;路基沉降是个长期问题,路基缺陷的快速修复方法和沉降修复技术是研究热点。

## 参考文献

- [1] ZHOU S H, WANG B L, SHAN Y. Review of research on high-speed railway subgrade settlement in soft soil area[J]. *Railway Engineering Science*, 2020, 28(1): 129-145.
- [2] 刘辉, 朱颖, 陈列. 中国客运专线(高速铁路)建设回顾与思考[J]. *铁路工程学报*, 2008(S): 21-31.  
LIU Hui, ZHU Ying, CHEN Lie. Review and thoughts on the construction of passenger dedicated line (high speed railway) in China[J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2008(S): 21-31.
- [3] 郑刚, 龚晓南, 谢永利, 等. 地基处理技术发展综述[J]. *土木工程学报*, 2012, 45(2): 127-146.  
ZHENG Gang, GONG Xiao-nan, XIE Yong-li, et al. State-of-the-art techniques for ground improvement in China[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2012, 45(2): 127-146.
- [4] 龚晓南, 岑仰润. 真空预压加固软土地基机理探讨[J]. *哈尔滨建筑大学学报*, 2002, 35(2): 7-10.  
GONG Xiao-nan, CEN Yang-run. Mechanism of vacuum preloading[J]. *Journal of Harbin University of Civil Engineering and Architecture*, 2002, 35(2): 7-10.
- [5] 娄炎, 杨守华, 高长胜. 对真空预压加固中沉降稳定标准的讨论[J]. *中国港湾建设*, 2004(1): 23-25.  
LOU Yan, YANG Shou-hua, GAO Chang-sheng. Discussion on convergence standard of settlement curve in

- vacuum preloading[J]. *China Harbour Engineering*, 2004(1): 23–25.
- [6] ARULRAJAH A, ABDULLAH A, BO M W, et al. Ground improvement techniques for railway embankments[J]. *Ground Improvement*, 2009, 162(GI1): 3–14.
- [7] 翟婉明, 赵春发, 夏禾, 等. 高速铁路基础结构动态性能演变及服役安全的基础科学问题[J]. *中国科学: 技术科学*, 2014, 44(7): 645–660.
- ZHAI Wan-ming, ZHAO Chun-fa, XIA He, et al. Basic scientific issues on dynamic performance evolution of the high-speed railway infrastructure and its service safety[J]. *Scientia Sinica: Technologica*, 2014, 44(7): 645–660.
- [8] INDRARATNA B, RUJIKIATKAMJORN C, SATHANANTHAN I. Analytical and numerical solutions for a single vertical drain including the effects of vacuum preloading[J]. *Canadian Geotechnical*, 2005, 42(4): 994–1014.
- [9] MOHAMEDHASSAN E, SHANG J. Vacuum and surcharge combined onedimensional consolidation of clay soils[J]. *Canadian Geotechnical*, 2002, 39(5): 1126–1138.
- [10] HO L, BEHZAD F. Analytical solution for the two-dimensional plane strain consolidation of an unsaturated soil stratum subjected to time-dependent loading[J]. *Computer and Geotechnics*, 2015, 67: 1–16.
- [11] CASTRO J, SAGASETA C. Consolidation and deformation around stone columns: numerical evaluation of analytical solutions[J]. *Computers and Geotechnics*, 2011, 38(3): 354–362.
- [12] YAPAGE N N S, LIYANAPATHIRANA D S. A parametric study of geosynthetic-reinforced column-supported embankments[J]. *Geosynth Int*, 2014, 21(3): 213–232.
- [13] FILZ G M, SLOAN J A, MCGUIRE M P, et al. Settlement and vertical load transfer in column-supported embankments[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2019, 145(10): 04019083.
- [14] PHUTTHANANON C, JONGPRADIST P, JAMSAWANG P. Influence of cap size and strength on settlements of TDM-piled embankments over soft ground[J]. *Marine Georesources & Geotechnology*, 2019, 38(6): 686–705.
- [15] XU M J, NI P P, MEI G X, et al. Time effects on settlement of rigid pile composite foundation: Simplified models[J]. *Comput Methods*, 2018, 15(7): 1850066.
- [16] ZHENG G, YU X, ZHOU H, et al. Stability analysis of stone column-supported and geosynthetic-reinforced embankments on soft ground[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2020, 48(3): 349–356.
- [17] 郑刚, 周海祚. 复合地基极限承载力与稳定研究进展[J]. *天津大学学报: 自然科学与工程技术版*, 2020, 53(7): 661–673.
- ZHENG Gang, ZHOU Hai-zuo. State-of-the-Art review of ultimate bearing capacity and stability of composite foundations[J]. *Journal of Tianjin University: Science and Technology*, 2020, 53(7): 661–673.
- [18] HUANG J, HAN J, PORBAHA A. Two and three-dimensional modeling of DM columns under embankments[C]// *Geocongress*. Atlanta, 2006: 1–5.
- [19] KITAZUME M, KENJI M. External stability of group column type deep mixing improved ground under embankment loading[J]. *Soils Found*, 2006, 46(3): 323–340.
- [20] 郑刚, 郭知一, 杨新煜, 等. 桩体刚度对复合地基支承路堤失稳破坏模式的影响研究[J]. *岩土工程学报*, 2019, 41(S1): 49–52.
- ZHENG Gang, GUO Zhi-yi, YANG Xin-yu, et al. Influences of stiffness of piles on failure modes of embankment of composite foundation[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2019, 41(S1): 49–52.
- [21] HAN J, CHAI J C, LESHCHINSKY D, et al. Evaluation of deep-seated slope stability of embankments over deep mixed foundations[J]. *Geotechnical Special Publication*, 2004: 945–954.
- [22] ZHENG G, YANG X, ZHOU H, et al. Numerical modeling of progressive failure of rigid piles under an embankment load[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2019, 56: 23–34.
- [23] 郑刚, 杨新煜, 周海祚, 等. 基于渐进破坏的路堤下刚性桩复合地基的稳定性分析及控制[J]. *岩土工程学报*, 2017, 39(4): 581–591.
- ZHENG Gang, YANG Xin-yu, ZHOU Hai-zuo, et al. Researches on stability and control strategy of embankments reinforced by rigid piles based on the concept of progressive failure[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, 39(4): 581–591.
- [24] ZHOU H, ZHENG G, LIU J, et al. Performance of embankments with rigid columns embedded in an inclined underlying stratum: Centrifuge and numerical



- modelling[J]. Acta Geotechnica, 2019, 14(5): 1571–1584.
- [25] UCHIDA K, IIDA Y, YOSHIDA Y, et al. Special ground improvement methods: Ground improvements associated with the Trans-Tokyo Bay highway[J]. Marine Georesources & Geotechnology, 1996, 14(1): 47–63.
- [26] 徐青, 肖田, 靳灿章. 京津高速公路软土区高路堤复合地基处理实例[J]. 山西建筑, 2014, 40(22): 155–156.
- XU Qing, XIAO Tian, JIN Chan-zhang, et al. The treatment examples of high-fill embankment composite foundation in Beijing-Tianjin highway soft soil district[J]. Shanxi Architecture, 2014, 40(22): 155–156.
- [27] BURTIN P, RACINAIS J. Embankment on soft soil reinforced by CMC semi-rigid inclusions for the high-speed railway sea[J]. Procedia Engineering, 2016, 143: 355–362.
- [28] OTEO C S, OTEO J, GONZÁLEZ V, et al. Ground improvement for a high speed railway near Madrid (Spain) [J]. Procedia Engineering, 2016, 143: 490–497.
- [29] 张晓波, 阎保家, 张光宗, 等. 济南西站宽站场路基复合地基沉降特性研究分析[J]. 高速铁路技术, 2015, 6(6): 9–16.
- ZHANG Xiao-bo, YAN Bao-jia, ZHANG Guang-zong, et al. Research and analysis on settlement characteristic of composite foundation of wide station subgrade in Jinan west station[J]. High Speed Railway Technology, 2015, 6(6): 9–16.

## 【简 讯】

### 《土力学及基础工程实用名词词典》（第二版）简介

《土力学及基础工程实用名词词典》（浙江大学出版社, 1993）出版 20 多年来得到了广大读者的欢迎。20 多年来我国土木工程建设快速发展, 对外交流日益增多, 不少设计、施工技术人员承担域外工程。近年来, 不少读者希望词典能够再版。为了适应需要, 我们在第一版的基础上组织编写了第二版。第二版对第一版收编的词条进行了修订、补充、完善, 收编的汉语词条从 723 条扩展到 1 106 条。

《土力学及基础工程实用名词词典》（第二版）收录了土力学及基础工程领域的常用词条和相应的英文词条。词条释文力求正确、简明、全面, 并尽可能包括设计、施工所需资料。词条索引共有 3 种: (1) 词条分类检字索引; (2) 词条拼音检字索引; (3) 词条英文检字索引。查阅方便。

《土力学及基础工程实用名词词典》（第二版）内容分 30 个部分, 分别为: (1) 综合类; (2) 工程地质及勘察; (3) 岩土分类; (4) 室内试验; (5) 原位测试; (6) 土的物理性质; (7) 渗透性和渗流; (8) 应力; (9) 位移和变形; (10) 固结; (11) 抗剪强度; (12) 本构模型; (13) 岩

土动力性质; (14) 地基承载力; (15) 地基处理; (16) 浅基础; (17) 复合地基; (18) 桩基础; (19) 特种基础; (20) 土坡稳定; (21) 挡土结构和喷锚结构; (22) 堤与坝; (23) 土压力; (24) 基坑工程与降水; (25) 地下工程; (26) 动力机器基础; (27) 地基基础抗震; (28) 土工合成材料; (29) 环境岩土工程; (30) 其他。

《土力学及基础工程实用名词词典》（第二版）主编龚晓南, 副主编谢康和。罗勇博士、连峰博士、李瑛博士、王志达博士、沈扬博士、郭彪博士、吕文志博士、张杰博士、陈东霞博士、史海莹博士、张磊博士、张雪婵博士、黄大中博士等在浙江大学学习期间参与了本词典词条的遴选、编写和校对工作。本词典在编写过程中还得到了浙江大学滨海和城市岩土工程研究中心同事们的大力支持, 陆水琴和王笑笑等同志为本词典的排版、校对等做了许多工作, 在此表示感谢。

由于编者水平有限, 本词典中难免有错误和不当之处, 敬请读者批评指正。