

复合地基技术在高速公路软基处理中的应用

张荣堂

(华侨大学土木工程系, 福建 泉州 362011)

摘要 介绍各类复合地基的应用范围, 以及它在高速公路软基处理中的适用性. 阐述复合地基用于高速公路软基处理的适用路段、技术要求和处理方案设计要点. 对碎石桩和水泥系粉体喷射搅拌桩的复合地基, 列举了工程实例.

关键词 高速公路, 软基处理, 复合地基

中图分类号 U 412.36⁺ 6 B U 416.212.04

文献标识码 A

在复合地基处理实践中, 常按一定的间距和分布在软土层中打设许多桩柱以形成复合土层. 由复合土层组成的地基即为复合地基. 复合地基是相对于天然地基而言, 其实质是考虑桩、土共同分担作用, 因而比仅仅认为荷载由桩体承担要经济. 组成复合地基的桩柱很多, 如碎石桩、挤密砂桩、深层搅拌桩(有粉体和浆液两类)、石灰桩、高压旋喷桩、土桩和灰土桩等. 这些桩按成桩后桩体的强度(或刚度)可分为柔性桩(如碎石桩和砂桩)和半刚性桩(如深层搅拌桩、高压旋喷桩和 CFG 桩). 柔性桩只有受到桩周地基土体的支撑才能成型, 因此要求原地基满足一定的强度条件. 施工时, 一般应在加固范围外侧设保护桩. 半刚性桩的性质介于刚性桩和柔性桩之间. 水泥(或石灰)掺入量的大小将直接影响桩体的刚度, 施工时一般无需在加固范围外侧设置保护桩. 复合地基桩柱种类的选用, 应根据软土的工程性质、建筑物对地基的要求、工程经济等方面加以考虑. 我国已建成或在建的高速公路, 大部分集中在东南沿海大江大河三角洲地区. 该区域正是我国最大的软土分布带, 地下水位埋深多在 0.5~2.5 m 之间, 软土以淤泥、淤泥质粘土为主. 其特点是含水量高、压缩性大、承载力低、厚度大. 上述各类桩柱中, 土桩与灰土桩主要用于干旱地区地下水位以上的湿陷性黄土或人工填土, 不宜用于饱水软粘土. 石灰桩是一种最古老加固方法, 现已为石灰系深层搅拌桩所取代. 挤密砂桩主要用于挤紧松散砂性土, 以提高其强度和防止其液化. 高压旋喷桩虽施工方便, 形成的桩柱强度大, 但成本较高, 宜用于对地基承载力要求高的较大建筑. 根据高速公路软基的工程特性, 目前一般选用技术合理、且成本较低的粉体系列深层搅拌桩或碎石桩来处治. 例如, 沪宁、广深和佛(山)开(平)等高速公路的软基处治均选用了粉体系列深层搅拌桩, 而宁合等高速公路软基处治则选用了碎石桩方案.

1 适用路段和技术要求

1.1 适用路段

除复合地基方案外, 国内外尚有多种软基加固技术, 各种方案都有其适用性, 应结合具体条件加以选用. 对于高含水量的软粘性土公路地基, 充分利用路堤填土自重(必要时可超填), 采用预压排水加固方案. 在容许工期内使大部分软基沉降在修筑路面完成是经济有效的, 体现了以时间换金钱的原则. 因此, 总是优先考虑预压排水加固方案. 但是, 某些关键路段对地基沉降要求较高, 在容许工期内采用预压排水加固方案难以达到工后沉降要求时, 则宜考虑可缩短工期的复合地基方案, 以使这些路段按时建

收稿日期 2003-11-09

作者简介 张荣堂(1964), 男, 副教授, 博士, 主要从事岩土工程的研究. E-mail: rtzhang@hqu.edu.cn

基金项目 教育部留学回国人员科研基金资助项目(2002247)

©1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

成,早日发挥公路全线的运行效益.总体上,在高速公路软基处理中,复合地基有其主要适用路段.

1.1.1 高填方桥头路段 对桥头高路堤下的厚层软土地基,若采用排水方案,即使预压期较长,也难以达到工后沉降标准(如 10 cm).它易形成台阶,路面要随着沉降的持续发生而不断整修或干脆修过渡路面,化费很大的修复费用或重复投资.采用复合地基方案并结合桥头搭板过渡,能较好地解决这一问题.处理范围以沿路线方向台背附近 20~50 m 为宜,具体视桥梁规模、路堤填高和软土厚度确定.

1.1.2 横穿公路构造物路段 主要是箱涵、盖板涵和箱形通道路段,处理范围为构造物基底及沿路线方向基础边缘外侧约 5 m.至于管涵软基,因每个基础需打设的桩柱数量很少,相对的机械设备搬迁费等较高.从经济角度考虑,应慎用复合地基方案.设计时为减少沉降,可在管基下面设置一定厚度的砂砾垫层,并宜设计顺应沉降构造(指预留拱度和沉降缝).例如,沪宁高速公路软基处治的原则是,对总沉降量小于 40 cm 的圆管涵,地基不作特殊处理;但需设置预留拱度,相应于路基中心线点的预留量大小为计算总沉降量的 $1/3 \sim 1/2$.当总沉降量大于 40 cm 时,原地基先与两侧路堤一起填土预压,预压期完后再次开挖修建管涵.

1.1.3 高速公路拓宽工程 随着我国国民经济的高速发展,使得某些原有的高速公路(如沪宁、杭甬等高速公路)已无法满足日益增长的交通量需求.因此,这些高速公路正在或即将拓宽改造.由于高速公路拓宽工程对新老路基衔接处不均匀沉降的控制标准非常严格,相应地在高速公路软基处理中引进了一些新型桩体,如 PCC 桩(即钢筋混凝土薄壁管桩)和 CFG 桩等.这些桩体形成的复合地基强度高、地基总沉降量小,但造价很高,应慎重选用.

1.2 技术要求

1.2.1 工后沉降 对于软土地基路段新修的高速公路,国内现通用的工后沉降标准为桥头路段不大于 10 cm 涵洞与通道基础不大于 20 cm.

1.2.2 地基承载力 复合地基承载力,应满足高速公路各路段原设计的要求.

1.2.3 地基稳定性 复合地基稳定性,应满足设计填土荷载及路面荷载共同作用下的路基稳定性要求.路基稳定性验算,应按 JTJ 017-96 公路软土地基设计施工技术规范进行.

2 处理方案设计要点

2.1 桩长与平面布置

桩长设计以经济合理、满足沉降量和承载力的要求为原则,并结合场地工程地质条件确定.当软土不太厚时(约 10 m)可穿透软基,考虑到现有桩机的能力等因素,粉喷桩和碎石桩的设计桩长一般不宜大于 15 m.桩体的平面布置通常有等边三角形和正方形两种.粉喷桩的设计桩径通常为 50 cm,碎石桩的直径通常为 80 cm,桩间距可通过计算确定.另外,针对不同类型的桩体,在路堤与桩体之间应设置相应的垫层.

2.2 不同结构物和路段处理方案

2.2.1 桥头软基 桥台台后路段复合地基的设计应注意主次分明、均匀过渡.沿路线方向设计可分为两个部分.桥台搭板区是对不均匀沉降最敏感的部位,应采用较小的桩间距和较大的桩长,这一部分设计长度应包括整个搭板,并不宜小于 10 m;紧接后面路段为过渡区,可采用中等的桩间距.另外,路肩外侧路基部分,其桩柱间距宜相应于内侧适当增大,桩长也可适当减少.

2.2.2 涵洞与通道 涵洞与通道对地基的承载力要求,由其基底平均压应力大小确定.箱形涵洞和箱形通道为整体性好的钢筋混凝土结构,刚度大,基底压力较小,因此对软基的适应性较强.根据京津塘高速公路等桥涵设计经验,此类结构对地基的容许承载力要求一般不超过 120 kPa.因此,复合地基设计时,可采用较大桩间距.盖板涵因其涵身和基础均为素混凝土结构,下部构造尺寸较大,刚度和整体性也较差.根据广深珠高速公路构造物设计通用图,其对地基的容许承载力要求为 200~300 kPa.因此,在复合地基设计时,应采用较小的桩间距.另外,采用复合地基支承时,涵洞或通道与两侧路堤间的差异沉降较大,会造成路面与涵面的错台及涵面拱起的/驼峰0现象.因此,设计时宜在涵洞基础加固范围外沿路线方向两侧,各增设约 2 排桩柱.桩间距宜适当放大,桩长也可适当减短,以使沉降均匀过渡.沪宁

高速公路的涵洞与通道软基处理即按这些原则进行, 实践证明是可行的^[12].

3 计算方法与施工技术

关于桩柱的单桩承载力、复合地基的承载力和沉降计算方法及其施工技术, 可参阅国标 5JGJ 792 2002 建筑地基处理技术规范^[6]和有关地基处理手册^[12], 这里不再讨论. 计算和施工应注意结合高速公路的特点进行, 具体可参考 5JTJ 017296 公路软土地基路堤设计与施工技术规范^[6].

4 工程实例

4.1 碎石桩加固实例

4.1.1 工程概况 312 国道宁合高速公路为国家干线公路网中的主干公路之一, 它穿越江苏省江浦县境的城南河. 该区地势低平, 分布有厚层长江河漫滩相的淤泥质粘性土, 桥头路堤填土高达 7 m. 另外, 因附近工业厂房和民房较多, 为减少占地与拆迁, 路堤边坡设计采用直立式加筋土挡墙. 工区软土的十字板抗剪强度为 25 kPa, 设计时决定采用碎石桩加固. 从工艺上考虑, 碎石桩在原地基强度大于 20 kPa 的软粘土中容易制作和成桩, 故其效果较好.

4.1.2 工程地质条件 城南河大桥引道河东加固区长 210 m (与加筋土挡墙等长), 宽 28 m, 面积 5 880 m². 加固区地层属于长江下游河漫滩相第四系松软沉积. 在压缩层范围内, 从上到下各土层分布及其物理力学性质指标, 如表 1 所示. 表中 d 为厚度, W 为质量分数

表 1 土层分布及物理力学性质指标

土层名称	d / m	W	e	I _p	E _s / MPa	C _u / kPa
素填土	2.0	0.290	0.833	11	5.8	30
亚粘土	2.0	0.304	0.843	12	4.8	28
淤泥质亚粘土	1.6	0.376	1.100	14	3.7	25
亚砂土	1.6	0.293	0.880	7	12.3	30
淤泥质亚粘土	6.6	0.406	1.196	11	3.3	25
亚砂土	未打穿	0.255	0.786	5	16.0	30

4.1.3 设计与施工 设计时从软弱路基的稳定性和工后沉降角度考虑, 要求地基承载力为两侧加筋土挡墙基础 200 kPa, 中间路堤基础 140 kPa, 工后沉降小于 10 cm. 加固方案设计时, 要求碎石桩桩长为 14 m, 以打穿第 2 层淤泥质亚粘土, 减少总沉降. 桩间距为中间路基 1.5 m, 呈等边三角形排列, 两侧加筋土挡墙基础 1.2 m, 呈等边三角形紧密排列, 外侧加一排保护桩. 振冲扩孔后成桩直径为 80 cm, 置换率为中间路基 0.26, 两侧挡墙基础 0.40. 经现场制桩试验, 当桩长 12 m 以下时, 由于土质情况复杂和施工机械限制等因素, 制桩十分困难. 经研究, 决定桩长变更为 12 m, 其余设计不变. 工程于 1990 年 7 月开工, 同年 12 月底完工, 共计施工碎石桩 3 122 根, 总桩长 37 448 m, 计用石料 21 318 m², 平均每米桩长用料 0.569 m, 成桩直径为 83 cm.

4.1.4 效果与评价 采用载荷试验进行施工质量检验, 试验点共 4 个, 其中单桩 3 个 (1 个布置在加筋土挡墙基础, 另 2 个布置在中间路基础), 桩间土 1 个 (布置在中间路基础). 根据现场测试记录, 绘制出各测点的压力-沉降曲线 (即 p₂s 线), 并采用沉降比法确定各测点的容许承载力. 然后, 按复合地基承载力计算公式换算, 即可得出加筋土挡墙基础复合地基的容许承载为 206 kPa, 路基础复合地基的容许承载为 152 kPa. 因此, 地基经碎石桩处理后, 其承载力满足了设计要求^[12]. 关于沉降, 设计时采用沉降模量法计算总沉降. 然后考虑到碎石桩类似砂井的排水作用, 在桥头填土施工期按砂井排水固结理论计算地基固结度. 经计算, 其工后沉降能达到小于 10 cm 的要求. 该路段已建成通车近 10 年, 现路面平整, 路况良好, 说明地基处理是成功的.

4.2 粉体喷射深层搅拌桩加固实例

4.2.1 工程概况 沪宁高速公路江苏东段实体试验路, 位于江苏省昆山市郊. 为从技术上探寻不同地质条件、不同填土荷载下修建高速公路的沉降与稳定规律, 提出高速公路软基处理的经济合理方案. 在填土高为 6 m 的某中桥台背长为 47.5 m 的路段中, 采用了水泥系粉体喷射搅拌桩.

4.2.2 工程地质条件 加固区地层属第四系海陆交互相松软沉积层,浅部土体可划分为4个层位。(1)褐黄色亚粘土(硬壳层),可塑状,厚约1.5 m,平均含水量(质量分数,下同)0.33。(2)灰色淤泥质粘性土,流塑状,厚约13 m,平均含水量0.42。(3)暗绿色粉质粘性土,硬塑状,压缩性较低,厚约6 m,平均含水量0.29。(4)砂性土(亚砂或粉砂),稍松至中密状,厚度大于10 m。

4.2.3 设计与施工 在分析软土工程性质和水泥土室内配合比试验结果的基础上,继而进行优化设计。桩径50 cm,桩长在路肩中间部分为10 m,路肩外侧边坡下为5 m。按等边三角形排列,桩间距1.7 m,水泥喷入量按 $45\text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}$ 控制。设计要求成桩后,桩身水泥土容许强度为600 kPa;单桩容许承载力,其10 m桩为120 kN,5 m桩为80 kN。用DPP25型深层喷射搅拌机制桩。为保证水泥与土混合均匀,桩身上部4 m分2次搅拌,距地表0.5 m时停止喷粉。水泥标号为425号,总根数656根,累计桩长5 140 m。桩顶部设置质量分数为0.06的石灰土垫层,垫层厚50 cm。施工期限为1991年11~12月。

4.2.4 效果与评价 为检验加固效果,进行了单桩载荷试验和桩身取样抗压试验。结果表明,桩身水泥土强度和单桩容许承载力均能满足设计要求。经控制剖面实测,填土施工期路基中心点实际沉降量为28 cm,工后沉降(1996年6月至1999年10月)为4.5 cm。因此,满足设计要求,也说明科研方案是成功的。沪宁高速公路全线于1996年10月建成通车,至今已有7年时间。现路况良好,说明所采用的软基处理方案是科学合理的。表2为沪宁高速公路A标段桥头及通道(包括涵洞)实测工后沉降统计结果。从表中可见,除1个桥头(12.3 cm)及1个通道(23.5 cm)的工后沉降略超过设计控制标准外,其余均满足设计要求。

表2 沪宁高速公路A标段桥头及通道实测工后沉降统计

路段名称	总数	工后沉降区间(1996.06~1999.10)/cm			
		0~5.0	5.1~10.0	10.1~20.0	>20.0
桥头/个	85	79	5	1	
通道及涵洞/个	30	23	3	3	1

5 结束语

复合地基在高速公路软基处理中的应用,是一个重要而复杂的应用性研究课题。本文对此仅作了初步探讨。随着我国高速公路扩建项目的不断上马,复合地基在公路软基处理中的应用比重越来越大。许多关键技术,如新的工后沉降控制标准问题等,都有待于今后进一步深入研究。

参 考 文 献

1 张荣堂.高等级公路涵洞软基处理方法探讨[J].中国公路勘察设计,1993,(1):30~32
2 曾国熙,卢肇钧,蒋国澄等.地基处理手册[M].北京:中国建筑工业出版社,1988.120~453
3 张荣堂.碎石桩在宁合高速公路软基处理中的应用[J].中国市政工程,1996,(4):10~12

Application of Composite Foundations to Expressway
as Technique for Treating Soft Ground
Zhang Rongtang

(Dept. of Civil Eng., Huaqiao Univ., 362011, Quanzhou, China)

Abstract Beginning with a description of the scope of applying various composite foundations and the their usability in treating soft ground of expressway, the author inquires into the section of expressway to which the composite foundation are applicable and technical requirements and essentials for designing the scheme of treatment; and finally, exemplifies respectively the gravel pile foundation and the deep cement mixing pile foundation.

Keywords expressway, treatment of soft ground, composite foundation