



# 广义复合地基理论及工程应用

龚晓南

(浙江大学岩土工程研究所, 浙江 杭州 310027)

**摘要:** 首先通过对复合地基技术发展过程的回顾, 阐述了从狭义复合地基概念到广义复合地基概念的发展过程。通过分析浅基础、桩基础和复合地基三者在荷载作用下的荷载传递路线, 指出复合地基的本质是桩和桩间土共同直接承担荷载, 并讨论了三者之间的关系。接着分析了复合地基的形成条件以及满足形成条件的重要性。分析了复合地基与地基处理、复合地基与双层地基、复合地基与复合桩基之间的关系。讨论了基础刚度和垫层对桩体复合地基性状的影响、复合地基位移场的特点、复合地基优化设计思路和复合地基按沉降控制设计思路。介绍了工程中常用的复合地基型式、复合地基承载力和沉降计算实用方法。通过一个工程实例介绍了广义复合地基理论在高速公路工程中的应用。最后还对进一步应重视的研究方向提出建议。

**关键词:** 广义复合地基理论; 复合地基的本质; 位移场; 基础刚度; 垫层; 优化设计

**中图分类号:** TU43 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2007)01-0001-13

**作者简介:** 龚晓南(1944-), 男, 浙江金华人, 1984年获浙江大学岩土工程博士学位,

1986年获洪堡奖学金赴德国 Karlsruhe 大学从事博士后研究, 1988年春回国, 同年聘

为浙江大学教授, 1993年聘为岩土工程博士生导师。2002年获茅以升土力学及基础工程大奖。长期从事岩土工程教学、科研和技术服务工作。研究方向: 软黏土工程学、复合地基理论、地基处理技术、基坑工程学、岩土工程施工环境效应及对策、既有建筑物地基加固及纠倾技术等。E-mail: xngong@hzcnc.com。



## Generalized composite foundation theory and engineering application

GONG Xiao-nan

(Institute of Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**Abstract:** Firstly, the development of the generalized composite foundation theory was expounded based on a review of the development of composite foundation techniques. Through the comparison among the load transfer mechanisms of shallow foundation, pile foundation and composite foundation, it was pointed out that the essence of the composite foundation was that both piles and soils beared the loading together directly, and the relationship among the above three foundation types was discussed. Then the forming condition of composite foundation and the importance of forming condition were studied. The relationship of composite foundation and ground treatment, composite foundation and double-layered foundation, composite foundation and composite pile foundation were studied. The influence of the foundation rigidity and the bedding cushion on the behavior of composite foundation, the characteristics of the displacement field of composite foundation under loading, the principle of the optimum design of the composite foundation and the design of composite foundation according to settlement were discussed. Type of composite foundation, practical methods to calculate the bearing capacity and settlement of composite foundation were introduced. A case study of the application of the generalized composite foundation theory to highway engineering was discussed. Finally, some proposals concerning further development of the generalized composite foundation theory and its application were put forward.

**Key words:** generalized composite foundation theory; essence of composite foundation; displacement field; foundation rigidity; cushion; optimum design

## 0 前 言

20世纪60年代国外将采用碎石桩加固的人工地基称为复合地基。改革开放以后我国引进碎石桩等多

种地基处理新技术, 同时也引进了复合地基概念。随

收稿日期: 2006-11-06

着复合地基技术在我国土木工程建设中的推广应用，复合地基概念和理论得到了很大的发展。随着深层搅拌桩加固技术在工程中的应用，发展了水泥土桩复合地基的概念。碎石桩是散体材料桩，水泥搅拌桩是黏结材料桩。在荷载作用下，由碎石桩和水泥搅拌桩形成的两类复合地基的性状有较大的区别。水泥土桩复合地基的应用促进了复合地基理论的发展，由散体材料桩复合地基扩展到柔性桩复合地基。随着低强度桩复合地基和长短桩复合地基等新技术的应用，复合地基概念得到了进一步的发展，形成了刚性桩复合地基概念。如果将由碎石桩等散体材料桩形成的复合地基称为狭义复合地基，则可将包括散体材料桩、各种刚度的黏结材料桩形成的复合地基以及各种形式的长短桩复合地基称为广义复合地基<sup>[1]</sup>。

我国地域辽阔，工程地质复杂，改革开放后工程建设规模大，我国是发展中国家，建设资金短缺，这给复合地基理论和实践的发展提供了很好的机遇。1990年在河北承德，中国建筑学会地基基础专业委员会在黄熙龄院士主持下召开了我国第一次以复合地基为专题的学术讨论会。会上交流、总结了复合地基技术在我国的应用情况，有力地促进了复合地基技术在我国的发展。笔者<sup>[2-6]</sup>曾较系统总结了国内外复合地基理论和实践方面的研究成果，提出了基于广义复合地基概念的复合地基定义和复合地基理论框架，总结了复合地基承载力和沉降计算思路和方法。1996年中国土木工程学会土力学及基础工程学会地基处理学术委员会在浙江大学召开了全国复合地基理论和实践学术讨论会，总结成绩，交流经验，共同探讨发展中的问题，促进了复合地基理论和实践水平的提高<sup>[7]</sup>。近年来复合地基理论研究和工程实践日益得到重视，复合地基技术在我国房屋建筑、高等级公路、铁路、堆场、机场和堤坝等土木工程中得到广泛应用，复合地基在我国已成为一种常用的地基基础型式，已取得良好的社会效益和经济效益<sup>[8-14]</sup>。

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。

### 1 复合地基的本质

通过分析浅基础、桩基础和复合地基在荷载作用下的荷载传递路线和传递规律可以较好认识复合地基的本质<sup>[15-16]</sup>，并获得浅基础、桩基础和复合地基三者之间的关系。

对浅基础，荷载通过基础直接传递给地基土体，

如图1所示。桩基础可分为摩擦桩基础和端承桩基础两大类，如图2所示。对摩擦桩基础，荷载通过基础传递给桩体，桩体主要通过桩侧摩阻力将荷载传递给地基土体；对端承桩基础，荷载通过基础传递给桩体，桩体主要通过桩端端承力将荷载传递给地基土体。因此对桩基础可以说，荷载通过基础先传递给桩体，再通过桩体传递给地基土体。对桩体复合地基，荷载通过基础将一部分荷载直接传递给地基土体，另一部分通过桩体传递给地基土体，如图3所示。由上面分析可以看出，浅基础、桩基础和复合地基三者的荷载传递路线是不同的。从荷载传递路线的比较分析可看出复合地基的本质是桩和桩间土共同直接承担荷载。这也是复合地基与浅基础和桩基础之间的主要区别。

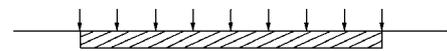


图1 浅基础

Fig. 1 Shallow foundation

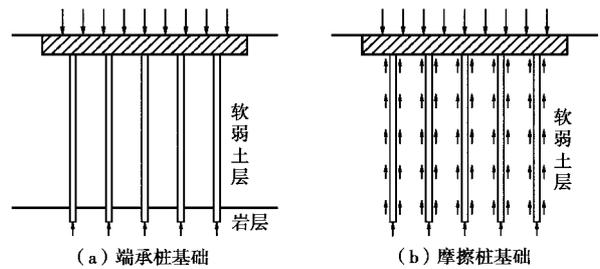


图2 桩基础

Fig. 2 Pile foundation

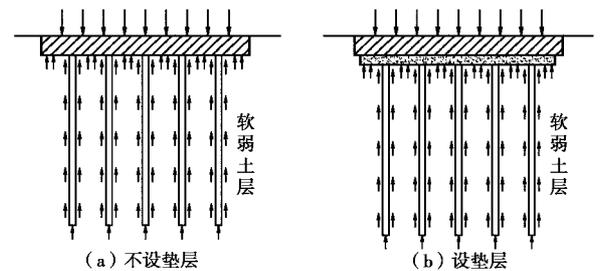


图3 桩体复合地基

Fig. 3 Composite foundation

可以用图4来表示浅基础、复合地基和桩基础三者之间的关系。

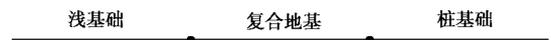


图4 浅基础、复合地基和桩基础的关系

Fig. 4 The relationship among shallow foundation, composite foundation and pile foundation

### 2 复合地基的形成条件

在荷载作用下，桩体和地基土体是否能够共同直

接承担上部结构传来的荷载是有条件的,也就是说在地基中设置桩体能否与地基土体共同形成复合地基是有条件的。这在复合地基的应用中特别重要<sup>[17]</sup>。

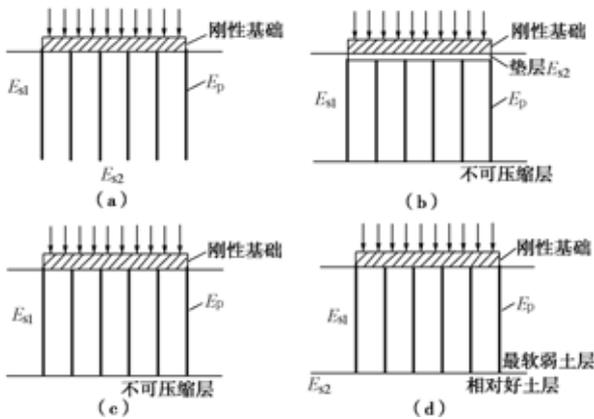


图 5 复合地基形成条件示意图

Fig. 5 Forming condition of composite foundation

如何保证在荷载作用下,增强体与天然地基土体能够共同直接承担荷载的作用?在图 5 中, $E_p > E_{s1}$ ,  $E_p > E_{s2}$ , 其中  $E_p$  为桩体模量,  $E_{s1}$  为桩间土模量,图 5 (a) 和 (d) 中  $E_{s2}$  为加固区下卧层土体模量,图 5 (b) 中  $E_{s2}$  为加固区垫层土体模量。散体材料桩在荷载作用下产生侧向鼓胀变形,能够保证增强体和地基土体共同直接承担上部结构传来的荷载。因此当增强体为散体材料桩时,图 5 中各种情况均可满足增强体和土体共同承担上部荷载。然而,当增强体为黏结材料桩时情况就不同了。在图 5 (a) 中,在荷载作用下,刚性基础下的桩和桩间土沉降量相同,这可保证桩和土共同直接承担荷载。在图 5 (b) 中,桩落在不可压缩层上,在刚性基础下设置一定厚度的柔性垫层。一般在荷载作用下,通过刚性基础下柔性垫层的协调,也可保证桩和桩间土两者共同承担荷载。但需要注意分析柔性垫层对桩和桩间土的差异变形的协调能力和桩和桩间土之间可能产生的最大差异变形两者的关系。如果桩和桩间土之间可能产生的最大差异变形超过柔性垫层对桩和桩间土的差异变形的协调能力,则虽在刚性基础下设置了一定厚度的柔性垫层,在荷载作用下,也不能保证桩和桩间土始终能够共同直接承担荷载。在图 5 (c) 中,桩落在不可压缩层上,而且未设置垫层。在刚性基础传递的荷载作用下,开始时增强体和桩间土体中的竖向应力大小大致上按两者的模量比分配,但是随着土体产生蠕变,土中应力不断减小,而增强体中应力逐渐增大,荷载逐渐向增强体上转移。若  $E_p \gg E_{s1}$ , 则桩间土承担的荷载比例极小。特别是若遇地下水位下降等因素,桩间土体进一步压缩,桩间土可能不再承担荷载。在这种情况下增强体与桩间土体两者难以始终共同直接承担荷载的作

用,也就是说桩和桩间土不能形成复合地基以共同承担上部荷载。在图 5 (d) 中,复合地基中增强体穿透最薄弱土层,落在相对好的土层上,  $E_{s2} > E_{s1}$ 。在这种情况下,应重视  $E_p$ ,  $E_{s1}$  和  $E_{s2}$  三者之间的关系,保证在荷载作用下通过桩体和桩间土变形协调来保证桩和桩间土共同承担荷载。因此采用黏结材料桩,特别是对采用刚性桩形成的复合地基需要重视复合地基的形成条件的分析。

在实际工程中设置的增强体和桩间土体不能满足形成复合地基的条件,而以复合地基理念进行设计是不安全的。把不能直接承担荷载的桩间土承载力计算在内,高估了承载能力,降低了安全度,可能造成工程事故,应引起设计人员的充分重视。

### 3 复合地基与地基处理

当天然地基不能满足建(构)筑物对地基的要求时,可采用物理的方法、化学的方法、生物的方法,或综合应用上述方法对天然地基进行处理以形成可满足要求的人工地基称为地基处理。按照加固地基的机理,笔者常将地基处理技术分为六类:置换,排水固结,灌入固化物,振密、挤密,加筋和冷、热处理。

经各类地基处理方法处理形成的人工地基粗略可以分为两大类<sup>[18]</sup>:①在地基处理过程中地基土体的物理力学性质得到普遍的改良,通过改善地基土体的物理力学指标达到地基处理的目的;②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,形成复合地基达到地基处理的目的。后一类在地基处理形成的人工地基中占有很大的比例,而且呈发展趋势。因此,复合地基技术在地基处理技术中有着非常重要的地位,复合地基理论和实践的发展将进一步促进地基处理水平的提高。

### 4 复合地基与双层地基

在荷载作用下,复合地基与双层地基的性状有较大区别,在复合地基计算中直接应用双层地基计算方法有时是偏不安全的,应予以重视<sup>[19]</sup>。

图 6 (a) 和 (b) 分别为复合地基和双层地基的示意图。为便于分析,讨论平面应变问题。设复合地基加固区和双层地基上层土体复合模量均为  $E_1$ ,复合地基其它区域土体模量和双层地基下层土体均为  $E_2$ ,  $E_1 > E_2$ 。双层地基上层土体的厚度与复合地基加固区深度相同,记为  $H$ 。荷载作用面宽度均为  $B$ ,而且荷载密度相同。现分析在荷载作用中心线下复合地基加固区下卧层中 A1 点(图 6 (a))和双层地基中对应的 A2 点(图 6 (b))处的竖向应力情况。不难判断复合

地基中 A1 点的竖向应力  $\sigma_{A1}$  比双层地基中 A2 点的竖向应力  $\sigma_{A2}$  要大。如果增大  $E_1/E_2$  值, 则 A1 点  $\sigma_{A1}$  值增大, 而 A2 点  $\sigma_{A2}$  值减小。理论上当  $E_1/E_2$  趋向无穷大时, 双层地基中 A2 点的竖向应力  $\sigma_{A2}$  趋向零, 而复合地基中 A1 点的竖向应力  $\sigma_{A1}$  是不断增大的。由上述分析可以看出复合地基与双层地基在荷载作用下地基性状的差别是很大的。

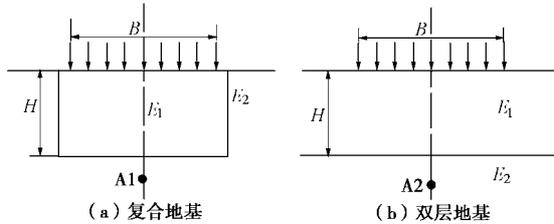


图6 复合地基与双层地基

Fig. 6 Composite foundation and double-layered foundation

荷载作用下均质地基中的附加应力可用布西涅斯克解求解, 双层地基中的附加应力可用当层法计算。由上面分析可知, 将复合地基视为双层地基采用当层法计算地基中的附加应力可能带来很大的误差, 而且是偏不安全的。

## 5 复合地基与复合桩基

在深厚软黏土地基上采用摩擦桩基础时, 为了节省投资, 管自立<sup>[20]</sup>采用稀疏布置的桩基础(桩距一般在5~6倍桩径以上), 并称为疏桩基础。疏桩基础要比按传统桩基理论设计的桩基础沉降量要大, 但考虑了桩间土对承载力的直接贡献, 可以节省工程费用。事实上桩基础的主要功能有两个: 提高承载力和减小沉降。以前人们往往重视前一功能而忽视后一功能。将用于以减小沉降量为目的的桩基础可称为减少沉降量桩基。在减小沉降量桩基设计中考虑了桩土共同作用。在桩土共同作用分析中主要也是考虑桩间土直接承担荷载。疏桩基础、减小沉降量桩基和考虑桩土共同作用都是主动考虑摩擦桩基础中一般存在的桩间土直接承担荷载的性状。考虑桩土共同直接承担荷载的桩基称为复合桩基。是否可以说复合桩基的本质也是考虑桩和桩间土共同直接承担荷载, 而在经典桩基理论中, 不考虑桩间土直接承担荷载。复合桩基也可以认为是一种广义的桩基础。

由上面分析可知, 复合桩基的本质与复合地基的本质是一样的, 它们都是考虑桩间土和桩体共同直接承担荷载。因此是否可以认为复合桩基是复合地基的一种, 是刚性基础下不带垫层的刚性桩复合地基<sup>[21]</sup>。

目前在学术界和工程界对复合桩基是属于复合地基还是属于桩基础是有争议的, 笔者认为既可将复合

桩基视作桩基础, 也可将其视为复合地基的一种形式。复合桩基属于桩基还是属于复合地基并不十分重要, 重要的是弄清复合桩基的本质、复合桩基的形成条件、复合桩基的承载力和变形特性、复合桩基理论与传统桩基理论的区别。

## 6 基础刚度和垫层对桩体复合地基性状影响

复合地基早期多用于刚度较大的条形基础或筏板基础下地基加固。在荷载作用下, 复合地基中的桩体和桩间土的沉降量是相等的。早期一些关于复合地基的设计计算方法和相应的计算参数都是基于对刚性基础下复合地基性状的研究得出的。

随着复合地基技术在高等级公路建设中的应用, 人们发现将刚性基础下复合地基承载力和沉降计算方法应用到填土路堤下的复合地基承载力和沉降计算, 得到的计算值与实测值相差较大, 而且是偏不安全的。

为了探讨基础刚度对复合地基性状的影响, 吴慧明<sup>[22]</sup>采用现场试验研究和数值分析方法对基础刚度对复合地基性状影响作了分析。图7为现场模型试验的示意图。试验内容包括: ①原状土地基承载力试验; ②单桩竖向承载力试验; ③刚性基础下复合地基承载力试验(置换率  $m=15\%$ ); ④柔性基础下复合地基承载力试验(置换率  $m=15\%$ )。试验研究表明基础刚度对复合地基性状影响明显, 主要结论如下:

(1) 在荷载作用下, 柔性基础下和刚性基础下桩体复合地基的破坏模式不同。当荷载不断增大时, 柔性基础下桩体复合地基中土体先产生破坏, 而刚性基础下桩体复合地基中桩体先产生破坏。

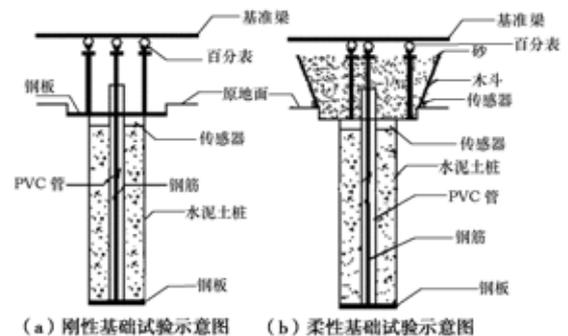


图7 现场模型试验的示意图

Fig. 7 In-situ model tests

(2) 在相同的条件下, 柔性基础下复合地基的沉降量比刚性基础下复合地基沉降量要大, 而承载力要小。

(3) 当复合地基各种参数都相同的情况下, 在荷载作用下, 复合地基的桩土荷载分担比, 柔性基础下

的要比刚性基础下的小,也就是说刚性基础下复合地基中桩体承担的荷载比例要比柔性基础下复合地基桩体承担的荷载比例大。

(4)为了提高柔性基础下复合地基桩土荷载分担比,提高复合地基承载力,减小复合地基沉降,可在复合地基和柔性基础之间设置刚度较大的垫层,如灰土垫层、土工格栅碎石垫层等。不设较大刚度的垫层的柔性基础下桩体复合地基慎用。

下面先分析刚性基础下设置柔性垫层对刚性基础下复合地基性状的影响<sup>[23]</sup>,然后分析柔性基础下设置刚度较大的垫层对柔性基础下复合地基性状的影响。

图 8 (a) 和 (b) 分别表示刚性基础下复合地基设置垫层和不设置垫层两种情况的示意图。刚性基础下复合地基中柔性垫层一般为砂石垫层。由于砂石垫层的存在,使图 8 (a) 中桩间土单元 A1 中的附加应力比图 8 (b) 中相应的桩间土单元 A2 中的要大,而图 8 (a) 中桩体单元 B1 中的竖向应力比图 8 (b) 中相应的桩体单元 B2 中的要小。也就是说设置柔性垫层可减小桩土荷载分担比。另外,由于砂垫层的存在,使图 8 (a) 中桩间土单元 A1 中的水平向应力比图 8

(b) 中相应的桩间土单元 A2 中的要大,图 8 (a) 中桩体单元 B1 中的水平向应力比图 8 (b) 中相应的桩体单元 B2 也要大。由此可得出:由于砂垫层的存在,使图 8 (a) 中桩体单元 B1 中的最大剪应力比图 8 (b) 中相应的桩体单元 B2 中的要小得多。换句话说,柔性垫层的存在使桩体上端部分中竖向应力减小,水平向应力增大,造成该部分桩体中剪应力减小,这样就有效改善了桩体的受力状态。

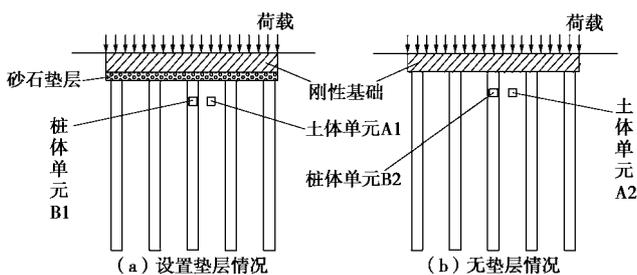


图 8 刚性基础下复合地基示意图

Fig. 8 Composite foundation under rigid footing

从上面分析可以看到,在刚性基础下复合地基中设置柔性垫层,一方面可以增加桩间土承担荷载的比例,较充分利用桩间土的承载潜能;另一方面可以改善桩体上端的受力状态,这对低强度桩复合地基是很有意义的。

刚性基础下设置柔性垫层对刚性基础下复合地基性状的影响程度与柔性垫层厚度有关。以桩土荷载分担比为例,垫层厚度愈厚,桩土荷载分担比愈小。但

当垫层厚度达到一定数值后,继续增加垫层厚度,桩土荷载分担比并不会继续减小。在实际工程中,还需考虑工程费用。综合考虑,通常采用 300~500 mm 厚度的砂石垫层。

图 9 (a) 和图 9 (b) 分别表示路堤下复合地基中设置垫层和不设置垫层两种情况的示意图。在路堤下复合地基中常设置刚度较大的垫层,如灰土垫层、土工格栅加筋垫层。比较图 9 (a) 和图 9 (b) 在荷载作用下的性状,不难理解与刚性基础下设置砂石柔性垫层作用相反,在路堤下复合地基中设置刚度较大的垫层,可有效增加桩体承担荷载的比例,发挥桩的承载能力,提高复合地基承载力,有效减小复合地基的沉降。

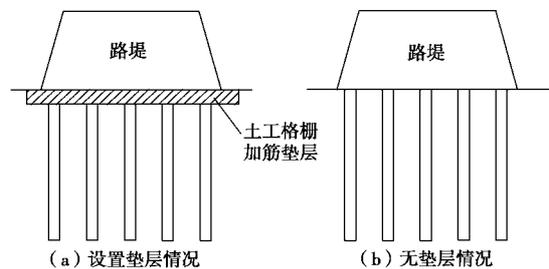


图 9 路堤下复合地基示意图

Fig. 9 Composite foundation under embankment

## 7 复合地基型式

目前在我国工程建设中应用的复合地基型式很多,可以从下述 4 个方面来分类:①增强体设置方向;②增强体材料;③基础刚度以及是否设置垫层;④增强体长度。

复合地基中增强体除竖向设置和水平向设置外,还可斜向设置,如树根桩复合地基。在形成桩体复合地基中,竖向增强体可以采用同一长度,也可以采用不同长度,如长短桩复合地基<sup>[24]</sup>。长短桩复合地基中的长桩和短桩可以采用同一材料制桩,也可以采用不同材料制桩。通常短桩采用柔性桩或散体材料桩,长桩采用钢筋混凝土桩或低强度混凝土桩等。长短桩复合地基中长桩和短桩布置可以采用三种形式:长短桩相间布置、外长中短布置和外短中长布置。

对增强体材料,水平向增强体多采用土工合成材料,如土工格栅、土工布等;竖向增强体常采用砂石桩、水泥土桩、低强度混凝土桩、薄壁筒桩、土桩与灰土桩、渣土桩、钢筋混凝土桩等。

为了减小柔性基础复合地基的沉降,应在桩体复合地基加固区上面设置一层刚度较大的“垫层”,防止桩体刺入上层土体,并充分发挥桩体的承载作用。对刚性基础下的桩体复合地基有时需设置一层柔性垫层

以改善复合地基受力状态。

由以上分析可知在工程中得到应用的复合地基具有多种类型,应用时一定要因地制宜,结合具体工程实际情况进行精心设计。

## 8 复合地基位移场特点

曾小强<sup>[25]</sup>比较分析了宁波一工程采用浅基础和采用搅拌桩复合地基两种情况下地基沉降情况。场地位于宁波甬江南岸,属全新世晚期海相冲积平原,地势平坦,大多为耕地,土层自上而下分布如下: I<sub>2</sub>层为黏土,层厚为 1.00~1.20 m; I<sub>3</sub>层为淤泥质粉质黏土,层厚为 1.4~2.0 m; II<sub>1-2</sub>层为淤泥,层厚为 12.6~15.2 m; II<sub>2</sub>层为淤泥质黏土,层厚为 12.1~25.0 m; 采用水泥搅拌桩复合地基加固,设计参数为:水泥掺入量 15%,搅拌桩直径 500 mm,桩长 15.0 m,复合地基置换率为 18.0%,桩体模量为 120 MPa。

图 10 表示采用有限元分析得到的水泥土桩复合地基的沉降情况和相应的天然地基的沉降情况。

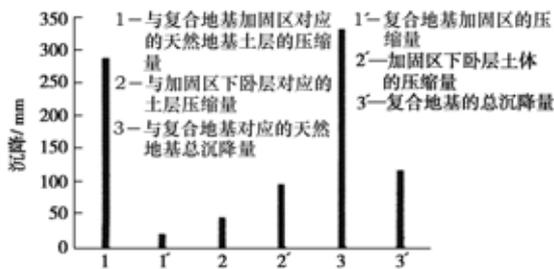


图 10 加固效果比较图

Fig. 10 Comparison of reinforcement effect

由图 10 中可以看出,经水泥土加固后加固区土层压缩量大幅度减小 ( $1' < 1$ ),而复合地基加固区下卧层的土层由于加固区存在,其压缩量比天然地基中相应的土层压缩量要大不少 ( $2' > 2$ )。这与复合地基加固区的存在使地基中附加应力影响范围向下移是一致的。复合地基沉降量 ( $3' = 1' + 2'$ ) 比浅基础沉降量 ( $3 = 1 + 2$ ) 明显减小,这说明采用复合地基加固对减小沉降是非常有效的。可以说图 10 反映了均质地基中采用复合地基加固的位移场特性。

上面分析表明,依靠提高复合地基置换率或提高桩体模量,增大复合地基加固区的复合土体模量,进一步减小复合地基加固区压缩量  $1'$  的潜力是很小的,因为该部分数值不大。增大复合地基加固区的复合土体模量,还会使加固区下卧层土体中附加应力增大,增加加固区下卧层土体的压缩量。由此可以得到进一步减小复合地基的沉降量的关键是减小复合地基加固区下卧层的压缩量。减小复合地基加固区下卧层部分的压缩量最有效的办法是增加加固区的厚度,减小加

固区下卧层中软弱土层的厚度。这一结论为复合地基优化设计指明了方向。

## 9 复合地基承载力

桩体复合地基承载力的计算思路通常是先分别确定桩体的承载力和桩间土的承载力,然后根据一定的原则叠加这两部分承载力得到复合地基的承载力。复合地基的极限承载力  $p_{cf}$  可表示为<sup>[6]</sup>

$$p_{cf} = k_1 \lambda_1 m p_{pf} + k_2 \lambda_2 (1-m) p_{sf} \quad (1)$$

式中  $p_{pf}$  为单桩极限承载力 (kPa);  $p_{sf}$  为天然地基极限承载力 (kPa);  $k_1$  为反映复合地基中桩体实际极限承载力与单桩极限承载力不同的修正系数;  $k_2$  为反映复合地基中桩间土实际极限承载力与天然地基极限承载力不同的修正系数;  $\lambda_1$  为复合地基破坏时,桩体发挥其极限强度的比例,称为桩体极限强度发挥度;  $\lambda_2$  为复合地基破坏时,桩间土发挥其极限强度的比例,称为桩间土极限强度发挥度;  $m$  为复合地基置换率,  $m = A_p/A$ , 其中  $A_p$  为桩体面积,  $A$  为对应的加固面积。

复合地基的容许承载力  $p_{cc}$  计算式为

$$p_{cc} = \frac{p_{cf}}{K} \quad (2)$$

式中,  $K$  为安全系数。

当复合地基加固区下卧层为软弱土层时,按复合地基加固区容许承载力计算基础的底面尺寸后,尚需对下卧层承载力进行验算。

式(1)中,桩体极限承载力可通过现场试验确定。如无试验资料,对刚性桩和柔性桩的桩体极限承载力可采用类似摩擦桩的极限承载力计算式估算。散体材料桩桩体的极限承载力主要取决于桩侧土体所能提供的最大侧限力。

散体材料桩在荷载作用下,桩体发生鼓胀,桩周土进入塑性状态,可通过计算桩间土侧向极限应力计算单桩极限承载力。其一般表达式可表示为

$$p_{pf} = \sigma_m K_p \quad (3)$$

式中,  $\sigma_m$  为桩侧土体所能提供的最大侧限力 (kPa),  $K_p$  为桩体材料的被动土压力系数。

计算桩侧土体所能提供的最大侧向力常用方法有 Brauns 计算式,圆筒形孔扩张理论计算式等<sup>[6]</sup>。

式(1)中,天然地基的极限承载力可以通过载荷试验确定,也可以采用 Skempton 极限承载力公式进行计算。

水平向增强体复合地基主要包括在地基中铺设各种加筋材料,如土工织物、土工格栅等形成的复合地基。加筋土地基是最常用的形式。加筋土地基工作性状与加筋体长度、强度、加筋层数以及加筋体与土体

间的黏聚力和摩擦系数等因素有关。水平向增强体复合地基破坏可具有多种形式, 影响因素也很多。到目前为止, 水平向增强体复合地基的计算理论尚不成熟, 其承载力可通过载荷试验确定。

在复合地基设计时有时还需要进行稳定分析。如路堤下复合地基不仅要验算承载力, 还需要验算稳定性。稳定性分析方法很多, 一般可采用圆弧分析法计算。

## 10 复合地基沉降计算

在各类实用计算方法中, 通常把复合地基沉降量分为两部分, 复合地基加固区压缩量和下卧层压缩量, 如图 11 所示。图中  $h$  为复合地基加固区厚度,  $Z$  为荷载作用下地基压缩层厚度。复合地基加固区的压缩量记为  $S_1$ , 地基压缩层厚度内加固区下卧层厚度为  $(Z-h)$ , 其压缩量记为  $S_2$ 。于是, 在荷载作用下复合地基的总沉降量  $S$  可表示为这两部分之和, 即:

$$S=S_1+S_2 \quad (4)$$

若复合地基设置有垫层, 通常认为垫层压缩量较小, 而且在施工过程中已基本完成, 故可以忽略不计。

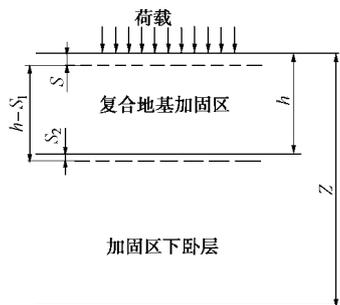


图 11 复合地基沉降

Fig. 11 The settlement of composite foundation

复合地基加固区土层的压缩量  $S_1$  的计算方法主要有下述三种: 复合模量法 ( $E_c$  法)、应力修正法 ( $E_s$  法) 和桩身压缩量法 ( $E_p$  法)。三种方法中复合模量法应用较多。在复合模量法中<sup>[26]</sup>, 将加固区中增强体和基体两部分视为一复合土体, 采用复合压缩模量  $E_{cs}$  来评价复合土体的压缩性, 并采用分层总和法计算加固区土层的压缩量。

加固区下卧层土层压缩量  $S_2$  的计算常采用分层总和法计算。在工程应用上, 作用在下卧层上的荷载常采用下述三种方法计算: 压力扩散法、等效实体法和改进 Geddes 法。在采用压力扩散法计算时, 要注意复合地基中压力扩散角与双层地基中压力扩散角数值是不相同的<sup>[27]</sup>。在采用等效实体法计算时, 要重视对侧摩阻力  $f$  值的合理选用<sup>[28]</sup>。特别当桩土相对刚度比较小时,  $f$  值变化范围很大, 选用比较困难。

复合地基的沉降计算也可采用有限单元法。在几何模型处理上大致上可以分为两类: ①把单元分为增强体单元和土体单元两类, 增强体单元如桩体单元、土工织物单元等, 并根据需要在增强体单元和土体单元之间设置或不设置界面单元; ②可以把单元分为加固区复合土体单元和非加固区土体单元两类, 复合土体单元采用复合体材料参数。

## 11 复合地基优化设计思路

复合地基优化设计分两个层面, 一是复合地基型式的合理选用, 二是复合地基型式确定后, 复合地基设计参数的优化。

复合地基型式的合理选用主要依据工程地质条件、荷载水平、上部结构及基础型式、加固地基机理, 通过综合分析确定。

加固地基的主要目的可以分三种情况: ①提高地基承载力; ②减小沉降量; ③两者兼而有之。对上述不同情况, 优化设计的思路是不同的。

由桩体复合地基承载力公式可知, 提高复合地基中桩的承载力和提高置换率均可有效提高复合地基承载力。

对在复合地基中应用的不同类型的桩, 提高桩的承载力的机理是不同的。

对散体材料桩, 桩的极限承载力主要取决于桩周土对它的极限侧限力。饱和黏性土地基中的散体材料桩桩体承载力基本上由地基土的不排水抗剪强度确定。对某一饱和黏性土地基, 设置在地基中的散体材料桩的桩体承载力基本是定值。提高散体材料桩复合地基的承载力只有依靠增加置换率。在砂性土等可挤密性地基中设置散体材料桩, 在设置桩的过程中桩间土得到振密挤密, 桩间土抗剪强度得到提高, 桩间土的承载力和散体材料桩的承载力均得到提高。

对黏结材料桩, 桩的承载力主要取决于桩侧摩阻力和端阻力之和, 以及桩体的材料强度。刚性桩的承载力主要取决于桩侧摩阻力和端阻力之和, 因此增加桩长可有效提高桩的承载力。柔性桩的承载力往往制约于桩身强度, 有时还与有效桩长有关, 因此有时增加桩长不一定能有效提高桩的承载力。对上述黏结材料桩, 如能使由摩阻力和端阻力之和确定的承载力和由桩身强度确定的承载力两者比较接近则可取得较好的经济效益。基于这一思路, 近年来各种类型的低强度桩复合地基得到推广应用。

在复合地基设计时, 首先要充分利用天然地基的承载力, 然后通过协调提高桩体承载力和增大置换率两者来达到既满足承载力的要求, 又达到比较经济的

目的。

当加固地基的主要目的是减小沉降量时,复合地基优化设计显得更为重要。从复合地基位移场特性可知,复合地基加固区的存在使地基中附加应力高应力区应力水平降低,范围变大,向下伸展,影响深度变深。从对复合地基加固区和下卧层压缩量的分析可知,当下卧层为软弱土层而且较厚时,下卧层土体的压缩量占复合地基总沉降量的比例较大。因此,为了有效减小深厚软黏土地基上复合地基的沉降量最有效的方法是减小软弱下卧层的压缩量。减小软弱下卧层压缩量的最有效方法的是通过加大加固区深度,减小软弱下卧土层的厚度。当存在较厚软弱下卧层时,采用增加复合地基置换率和增加桩体刚度对减小沉降量效果不好,有时甚至导致总沉降量变大。

考虑到荷载作用下复合地基中附加应力分布情况,复合地基加固区沿深度最好采用变刚度分布。这样不仅可有效减小压缩量,而且可减小工程投资,取得较好的经济效益。为了达到加固区的刚度沿深度变刚度分布可以采用下述两个措施:①桩体采用变刚度设计,浅部采用较大刚度,深部采用较小刚度,例如采用深层搅拌法设置水泥土桩时,浅部采用较高的水泥掺和量,深部采用较低的水泥掺和量,或水泥土桩浅部采用较大的直径,深部采用较小的直径;②沿深度采用不同的置换率,例如采用由一部分长桩和一部分短桩相结合组成的长短桩复合地基。

对加固地基的目的既为了提高地基承载力又为了减小地基沉降量时,则首先要满足地基承载力的要求,然后再考虑满足减小地基沉降量的要求,其优化设计思路应综合前面讨论的两种情况。

## 12 复合地基按沉降控制设计思路

首先讨论什么是按沉降控制设计理论?它的工程背景如何?然后再讨论复合地基按沉降控制设计。

无论按承载力控制设计还是按沉降控制设计都要满足承载力的要求和小于某一沉降量的要求。按沉降控制设计和按承载力控制设计究竟有什么不同呢?下面从工程对象和设计思路两个方面来分析。

例如:在浅基础设计中,通常先按满足承载力要求进行设计,然后再验算沉降量是否满足要求。如果地基承载力不能满足要求,或验算沉降量不能满足要求,通常要对天然地基进行处理,如:采用桩基础、或采用复合地基、或对天然地基进行土质改良。又如:在端承桩桩基础设计中,通常按满足承载力要求进行设计。对一般工程,因为端承桩桩基础沉降较小,通常认为沉降可以满足要求,很少进行沉降量验算。上

述设计思路是先按满足承载力要求进行设计,再验算沉降量是否满足要求。上述设计思路实际上是目前多数设计人员的常规设计思路。为了与按沉降控制设计对应将其称为按承载力控制设计。

下面通过一实例分析说明按沉降控制设计的思路。例如:某工程采用浅基础时地基是稳定的,但是沉降量达 500 mm,不能满足要求。现采用 250 mm×250 mm 方桩,桩长 15 m。布桩 200 根时,沉降量为 50 mm,布桩 150 根时沉降为 70 mm,布桩 100 根时沉降为 120 mm,布桩 50 根时,沉降量 250 mm,地基沉降量  $s$  与桩数  $n$  关系曲线如图 12 所示。若设计要求的沉降量小于 150 mm,则由图 12 可知布桩大于 90 根即可满足要求。从该例可看出按沉降量控制设计的实质及设计思路。

图 12 表示采用的桩数与相应的沉降量之间的关系,实际上图示规律也反映工程费用与相应的沉降量之间关系。减小沉降量意味着增加工程费用。于是按沉降控制设计可以合理控制工程费用。

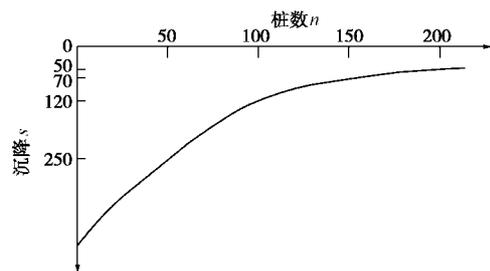


图 12 桩数  $n$  - 沉降  $s$  关系曲线示意图

Fig. 12 Relationship between  $n$  and  $s$

按沉降控制设计思路特别适用于深厚软弱地基上复合地基设计。

按沉降控制设计对设计人员提出了更高的要求,要求更好地掌握沉降计算理论,总结工程经验,提高沉降计算精度,要求进行优化设计。按沉降控制设计理念使工程设计更为合理。

## 13 工程实例:杭宁高速公路一通道低强度混凝土桩复合地基<sup>[14]</sup>

### (1) 工程概况

杭宁高速公路浙江段跨越杭嘉湖平原,大部分地区为河相、湖相沉积,软土分布范围广,软土层厚度变化大。杭嘉湖平原河流分布广泛,人口密集。在高速公路建设中既要处理好地基稳定性问题、有效控制工后沉降和沉降差,还要尽量减小在施工期对当地群众交通的影响。该路段一般线路多采用砂井堆载预压法处理。若一般涵洞和通道地基也采用砂井堆载预压

表 1 地基土物理力学性质指标

Table 1 Soil properties

编号	土层名称	层厚 /m	含水率 $w$ /%	重度 /( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	孔隙比	压缩模量 /MPa	渗透系数/( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )		压缩指数
							$K_h$	$K_v$	
1	(亚)黏土	3.4	32.7	18.8	0.948	4.98	$0.69 \times 10^{-7}$	$1.10 \times 10^{-7}$	0.161
	淤泥质(亚)黏土	6.6	47.3	17.5	1.315	2.17	$1.68 \times 10^{-7}$	$1.29 \times 10^{-7}$	0.42
3	淤泥质亚黏土	12.7	42.4	17.8	1.192	2.77	$2.29 \times 10^{-7}$	$1.40 \times 10^{-7}$	0.41
1	亚黏土	13.1	28.3	19.4	0.794	8.42	$1.02 \times 10^{-7}$	$3.32 \times 10^{-8}$	0.18
2	亚黏土	12.4	25.6	19.8	0.734	8.65			
4	含砂亚黏土	3.3							

法处理, 不仅预压完成后再进行开挖费时间, 而且堆载预压和再开挖工期长影响当地群众交通, 给村民生产和生活造成困难。若一般涵洞和通道地基均采用桩基础, 虽然缩短了施工周期, 减小了在施工期对当地群众交通的影响, 但工程费用较大, 而且在涵洞和通道与填土路堤联接处容易产生沉降差, 形成“跳车”现象。为了较好处理上述一般涵洞和通道地基的地基处理问题, 根据我们建议, 杭宁高速公路 K101+960 处的通道地基由原砂井堆载预压法处理改用低强度混凝土桩复合地基处理。

该通道处淤泥质黏土层厚 19.3 m, 通道箱涵尺寸为 6.0 m×3.5 m, 填土高度 2.5 m。根据工程地质报告, 通道场地地基土物理力学性质指标见表 1。下面对采用低强度混凝土桩复合地基处理通道地基设计和测试情况作简要介绍。

## (2) 设计

设计分两部分: 一是涵洞和通道地基下的低强度混凝土桩复合地基设计; 另一是涵洞和通道与相邻采用其它处理方法(如砂井堆载预压法处理)路段之间为减缓由于采用不同地基处理方法而形成的沉降差异而设置的过渡段部分的低强度混凝土桩复合地基设计。复合地基设计除需要满足承载力及工后沉降的要求外, 在过渡段部分工后沉降尚需满足纵坡率的要求。具体设计步骤如下:

a) 全面了解和掌握设计要求、场地水文和工程地质条件、周围环境、构筑物的设计、邻近路段的地基处理设计、施工条件以及材料、设备的供应情况等。

b) 确定低强度混凝土桩桩身材料强度等级和桩径, 确定采用的施工设备和施工工艺。

c) 根据场地土层条件, 承载力和控制工后沉降要求确定桩长和桩间距, 完成构筑物下复合地基设计。

d) 根据构筑物与相邻路段地基的工后沉降量, 道路纵坡率的要求, 确定过渡段长度。

e) 采用变桩长和变置换率, 进行过渡段复合地基设计, 实现过渡段工后沉降由小到大的改变, 做到平

稳过渡。

f) 选用垫层材料, 确定垫层厚度。设计要求通道下复合地基容许承载力需达到 100 kPa 以上。经计算分析, 低强度混凝土桩身材料采用 C10 混凝土, 桩径取  $\phi 377$  mm, 桩长取 18.0 m, 置换率取 0.028, 单桩容许承载力为 217.8 kN, 复合地基容许承载力为 108.9 kPa, 地基总沉降量为 14.5 cm, 其中加固区沉降量 3.0 cm, 下卧层沉降量 11.5 cm。垫层采用土工格栅加筋垫层, 厚度取 50 cm。

由于低强度混凝土桩复合地基沉降量较小, 而相邻路段采用排水固结法处理沉降较大。为减缓交接处沉降差异, 设置过渡段协调两者的沉降。过渡段仍采用低强度混凝土桩复合地基, 通过改变桩长和置换率等参数来调整不同区域的工后沉降。过渡段中不同桩长条件下地基的总沉降量和工后沉降量如表 2 所示。

表 2 不同桩长条件下地基的总沉降量和工后沉降量

Table 2 The ultimate and post-construction settlements with different pile lengths

桩长/m	15	16	17	18	19	20
总沉降/cm	19.5	17.7	15.9	14.1	12.3	10.5
工后沉降/cm	13.2	11.8	10.3	8.9	7.4	6.0

根据设计要求该通道两侧路线方向工后总沉降差不大于 60 mm, 且要求纵坡率不大于 0.4%, 由此确定过渡段长度为 15.0 m。通过改变桩长和置换率等参数来调整过渡段不同区域的工后沉降完成平稳过渡。具体设计参数为: 低强度混凝土桩桩身材料采用 C10 低标号混凝土, 桩径  $\phi 377$  mm, 桩长 15.5~18.0 m (通道桩长 18.0 m, 过渡段桩长 15.5~17.5 m), 桩间距 2.0~2.5 m (通道桩间距 2.0 m, 过渡段桩间距 2.0 m, 2.5 m), 土工格栅加筋垫层为 50 cm 厚碎石垫层, 碎石粒径 4~6 cm。该通道及过渡段的桩长布置及工后沉降分布详见图 13。

## (3) 测试

现场测试项目包括: ①桩身和桩间土应力测试; ②桩顶沉降、地基表面沉降与分层沉降测试; ③地基

土侧向变形观测；④桩身完整性和复合地基承载力检测。现场测试测点布置如图14所示。

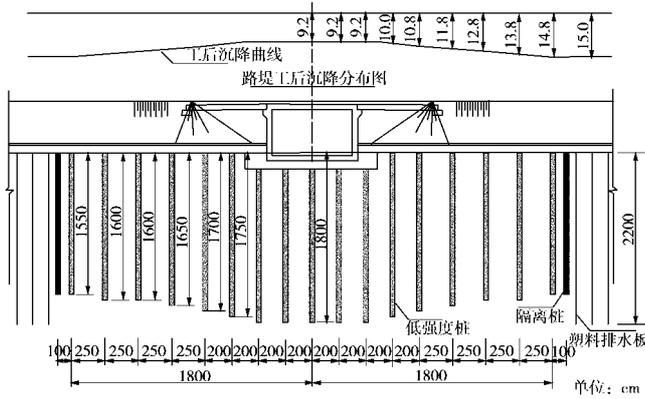


图13 过渡段的桩长、布置及工后沉降分布图

Fig. 13 Layout of length of piles in transition and the settlement after construction

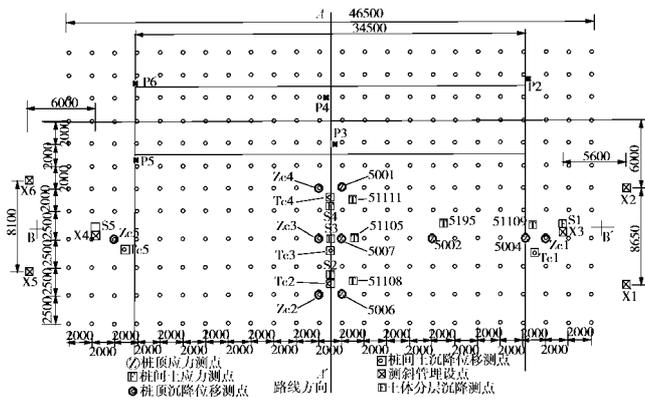


图14 测试仪器平面布置图

Fig. 14 Instrumentation plan

低强度混凝土桩施工从2000年11月20日开始,2000年12月30日结束,历时共41 d。2001年2月20日完成桩身完整性检测,2001年2月27日完成单桩静力载荷试验。2001年4月17日~4月27日进行路堤填筑前的施工准备工作。4月29日完成隔水土工膜敷设,5月2日开始碎石垫层的铺设,7月8日进行土工格栅的敷设。第一层宕渣填筑从2001年7月11日开始,7月27日试验段填筑工作完毕,从5月2日碎石垫层铺设算起,路堤填筑施工工期共为87 d。测试元件的埋设从2001年5月22日开始,6月2日全部埋设完毕。6月7日~7月16日观测两次以上,读取初始值。实际观测频率为路堤填筑期间3~4 d观测一次,填筑期结束后10~20 d观测一次。

图15表示桩土应力比和荷载分担比随加荷过程的变化情况。由图可见,加荷初期两者均较小,并随荷载增加有下降趋势;在加荷后期两者都快速增长,在恒载期间两者也有一定波动变化。几个测点所得的桩土应力比  $n$  值为 9.87~15.47, 荷载分担比  $N$  值为

0.22~0.35。由此可知,绝大部分的荷载是由桩间土承担的,采用低强度桩复合地基可以充分发挥桩间土的承载能力。另外,现场测试结果还表明:桩土应力比和荷载分担比值随桩长的增加而有所增大。图16为路中线处桩顶和桩间土沉降随时间的变化曲线。由图16可见,离通道越近的测点,桩顶沉降量和桩间土表面沉降量越小。因为离通道越近,复合地基中的桩较长,置换率较高,所以桩顶和桩间土沉降较小。同时还发现:桩顶的最大沉降量为6.3~14.1 cm,桩间土表面的最大沉降量为10.5~23.8 cm,相同监测部位的桩间土表面沉降比桩顶沉降要大,说明桩顶产生了向上刺入,桩顶某一深度范围内存在一个负摩擦区。桩间土对桩壁产生的负摩擦力将使桩体承担的荷载增加,桩间土承担的荷载相应减少,这对减少复合地基加固区土体的压缩量起到有利的作用,但同时也会增加桩底端的贯入变形量。

根据道路中线3个测点TC2、TC3和TC4的实测值,采用双曲线法推算该三点的总沉降量分别为39.5 cm、31.7 cm和23.9 cm,该三点相应的工后沉降量分

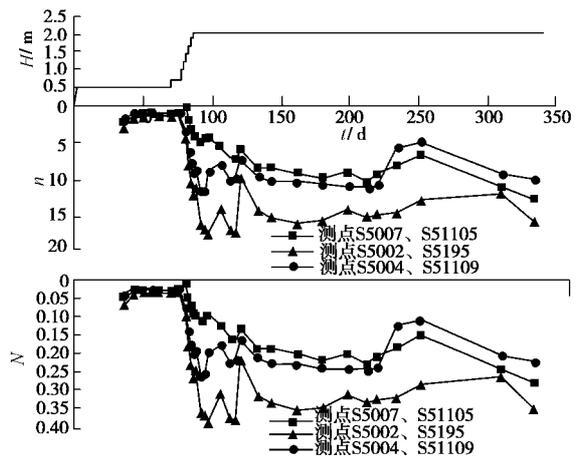


图15 桩土应力比  $n$  及荷载分担比  $N$  变化曲线

Fig. 15 Pile-soil stress ratio  $n$  and load sharing ratio  $N$

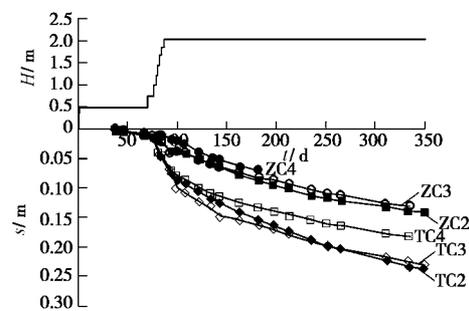


图16 桩顶沉降与桩间土表面沉降

Fig. 16 Settlement of the soil and the pile head

别为15.7 cm、8.6 cm和3.80 cm。推算相关系数在0.987以上。3个测点的工后沉降推算值均小于20 cm,符合高速公路的工后沉降控制标准,而且离通道越近,工

后沉降值越小,这也与原设计意图一致。

根据相邻采用塑料排水板堆载预压处理路段的观测结果,桩号 K102+085 测点的沉降实测值为 1.730 m。同样采用双曲线法推算,所得该测点的最终沉降为 1.897 m,工后沉降为 16.7 cm。显然,邻近的排水固结处理路段的沉降量远大于通道过渡段的沉降量,但过渡段测点 TC2 推算的工后沉降量与桩号 K102+085 测点推算的工后沉降量比较接近,这说明在两种不同处理路段拼接处产生的工后沉降差异较小,过渡段对沉降变形起到了较好的平稳过渡作用,缓解了这两种不同处理路段的沉降差异。

#### (4) 结语

测试成果和运营情况说明杭宁高速公路一通道地基采用低强度混凝土桩复合地基加固是成功的,取得了较好的效果。该方法施工速度快,工期短,比原设计的塑料排水板超载预压处理方案缩短工期约 1 a,而且不需进行二次开挖,解决了施工期村民的交通问题,处理后路基工后沉降和不均匀沉降较小。与采用水泥搅拌桩加固比较,采用低强度混凝土桩加固具有桩身施工质量较易控制,处理深度较深(可达 20 m 以上),处理费用较低等优点。

## 14 结 论

(1)随着复合地基技术在我国工程建设中的推广应用,复合地基理论得到了很大的发展。相对于最初由碎石桩复合地基形成的狭义复合地基概念已发展成包括散体材料桩、各种刚度的黏结材料桩复合地基以及各种形式的长短桩复合地基的广义复合地基概念。复合地基在我国已成为一种常用的地基基础型式。

(2)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。复合地基的本质是桩和桩间土共同直接承担荷载。这也是复合地基与浅基础和桩基础之间的主要区别。

在荷载作用下,桩体和地基土体能否共同直接承担上部结构传来的荷载是有条件的,也就是说桩体能否与地基土体共同形成复合地基是有条件的。不能满足形成复合地基的条件,而以复合地基理念进行设计是不安全的。它高估了地基的承载能力,降低了安全度,可能造成工程事故,应该引起充分重视。

(3)可将各类地基处理方法粗略分为两大类:①通过土质改良达到地基处理的目的;②是通过形成复合地基达到地基处理的目的。后一类占有很大的比例,而且呈发展趋势。因此复合地基在地基处理技术中有

着非常重要的地位。

在荷载作用下,复合地基与双层地基的性状有较大区别,在复合地基计算中直接应用双层地基的计算方法是偏不安全的。

复合桩基与复合地基的本质都是考虑桩间土和桩体共同直接承担荷载。复合桩基的本质,复合桩基的形成条件,复合桩基的承载力和变形特性等与复合地基有类似之处,也可将复合桩基视为复合地基的一种型式,是刚性基础下不带垫层的刚性桩复合地基。

(4)目前在我国工程建设中应用的复合地基型式很多,可以从增强体设置方向、增强体所用材料、基础刚度以及是否设置垫层、设置增强体的长度等 4 个方面来分类。在复合地基设计时一定要因地制宜,根据具体工程的具体情况进行设计。

(5)基础刚度和垫层对复合地基的性状有重要的影响。在荷载作用下,柔性基础下复合地基的桩土荷载分担比要比刚性基础下的小。当荷载不断增大时,柔性基础下桩体复合地基中土体先产生破坏,而刚性基础下桩体复合地基中桩体先产生破坏。基础刚度不同,桩体复合地基的破坏模式不同。在相同的条件下,柔性基础下复合地基的沉降比刚性基础下复合地基沉降要大,承载力要小。

为了提高柔性基础下复合地基的桩土荷载分担比,提高承载力,减小复合地基沉降,可在复合地基和柔性基础之间设置刚度较大的垫层,如采用灰土垫层、土工格栅碎石垫层等。不设刚度较大的垫层的柔性基础下桩体复合地基应慎用。

在刚性基础下复合地基中设置柔性垫层,一方面可增加桩间土承担荷载的比例,较充分利用桩间土的承载潜能;另一方面也可改善桩体上端的受力状态,这对低强度桩复合地基是很有意义的。

(6)对复合地基位移场的分析表明,由于复合地基加固区的存在使地基中附加应力影响范围向下移。以均质地基为例,依靠提高复合地基置换率,或提高桩体模量,增大复合地基加固区的复合土体模量,进一步减小复合地基沉降效果不好。进一步减小复合地基的沉降量的关键是减小加固区下卧层土体的压缩量。而减小加固区下卧层土体压缩量最有效的办法是增加加固区的厚度,减小加固区下卧层中软弱土层的厚度。这一结论为复合地基优化设计指明了方向。

(7)桩体复合地基承载力的计算思路是先分别确定桩体和桩间土的承载力,然后根据一定的原则叠加这两部分承载力得到复合地基的承载力。

在各类实用的沉降计算方法中,通常把复合地基沉降量分为两部分:加固区压缩量和下卧层压缩量。加固区土层压缩量的计算方法主要有:复合模量法( $E_c$ )

法)、应力修正法( $E_s$ 法)和桩身压缩量法( $E_p$ 法)。上述三种方法中复合模量法应用较多。

加固区下卧层土层压缩量的计算常采用分层总和法计算。在工程应用上,作用在下卧层上的荷载常采用下述几种方法计算:压力扩散法、等效实体法和改进 Geddes 法。

在进行复合地基承载力和沉降计算时,应根据具体工程情况,特别是采用的复合地基型式,合理选用相应的计算方法。

(8)复合地基优化设计分两个层面,一是复合地基型式的合理选用,一是复合地基型式确定后,复合地基设计参数的优化。在选用复合地基型式时一定要因地制宜,结合具体工程实际情况进行合理选用。在复合地基设计时可以采用按沉降控制设计的思路。按沉降控制设计理念使工程设计更为合理。

## 15 进一步开展研究的建议

复合地基在土木工程中得到广泛应用,已与浅基础和桩基础成为地基基础工程中三种常用的形式。与浅基础和桩基础相比较,复合地基更需加强研究以满足工程应用的要求,笔者认为下述几个方面的问题应予以重视。

要继续重视复合地基荷载传递机理的研究,如成层地基中复合地基的荷载传递机理、各种类型长短桩复合地基荷载传递机理、垫层和基础刚度对复合地基荷载传递的影响以及地基土体固结<sup>[29]</sup>和蠕变对复合地基的荷载传递的影响等。

在荷载传递机理的研究的基础上,重视复合地基形成条件的研究,确保在荷载作用下,桩体和桩间土能够同时直接承担荷载。要加强成层地基中复合地基形成条件的研究,地基土体固结和蠕变以及地下水位下降等因素对复合地基形成条件的影响等。

在基础工程设计中,沉降计算是工程师们最为棘手的问题,对复合地基沉降计算设计只有感到更为困难。要加强各类复合地基沉降计算理论的研究,特别要重视加固区下卧层土体压缩量的计算精度。要重视工程经验的积累,提高设计水平以满足要求。

进一步开展复合地基优化设计和按沉降控制设计的研究。

与竖向增强体复合地基相比较,水平向增强体复合地基的工程实践积累和理论研究相对较少。随着土工合成材料的发展,水平向增强体复合地基工程应用肯定会得到越来越大的发展,要积极开展水平向增强体复合地基的承载力和沉降计算理论的研究。

还要重视开展复合地基在动力荷载和周期荷载作

用下的性状研究。

致谢:本讲座反映了笔者的学生们与笔者多年来的研究工作,也吸收了国内外在该领域的研究成果,在此笔者表示衷心感谢!同时感谢国家自然科学基金和浙江省自然科学基金的资助。

## 参考文献:

- [1] 龚晓南. 复合地基理论及工程应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.(GONG Xiao-nan. Theory of composite foundation and engineering application[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2002.(in Chinese))
- [2] 龚晓南. 复合地基引论(一)[J]. 地基处理, 1991,2(3):36 - 42. (GONG Xiao-nan. An introduction to composite foundation(1)[J]. Ground Improvement, 1991,2(3):36 - 42.(in Chinese))
- [3] 龚晓南. 复合地基引论(二)[J]. 地基处理,1991,2(4)1 - 11. (GONG Xiao-nan. An introduction to composite foundation(2)[J]. Ground Improvement, 1991,2(4)1 - 11.(in Chinese))
- [4] 龚晓南. 复合地基引论(三)[J]. 地基处理,1992,3(1)32 - 40. (GONG Xiao-nan. An introduction to composite foundation(3)[J]. Ground Improvement, 1992,3(1)32 - 40.(in Chinese))
- [5] 龚晓南. 复合地基引论(四)[J]. 地基处理,1992,3(2)24 - 38. (GONG Xiao-nan. An introduction to composite foundation(4)[J]. Ground Improvement, 1992,3(2)24 - 38.(in Chinese))
- [6] 龚晓南. 复合地基[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1992. (GONG Xiao-nan. Composite foundation[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 1992.(in Chinese))
- [7] 龚晓南. 复合地基理论与实践[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1996. (GONG Xiao-nan. Theory and practice of composite foundation[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 1996.(in Chinese))
- [8] GONG Xiao-nan. Development of composite foundation in China[M]// Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. A A Balkema, 1999,1:201.
- [9] GONG Xiao-nan. Development and application to high-rise building of composite foundation[C]//中韩地盘工学讲演会论文集. 2001.
- [10] GONG Xiao-nan, ZENG Kai-hua. On composite foundation[C]// Proc of International Conference on Innovation and Sustainable Development of Civil Engineering in the 21st Century, Beijing, 2002.
- [11] 尚亨林. 二灰混凝土桩复合地基性状试验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 1995. (SHAN Heng-lin. Test study of behavior of composite foundation with cement and lime concrete pile[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 1995.(in Chinese))

- [12] 葛忻声. 高层建筑刚性桩复合地基性状[D]. 杭州: 浙江大学, 2003.(GE Xin-sheng. Behavior of composite foundation with rigidity pile under high-rise building[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2003.(in Chinese))
- [13] 陈志军. 路堤荷载下沉管灌注筒桩复合地基性状分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2005. (CHEN Zhi-jun. Behavior of composite foundation with cast-in place tubular pile under embankment loading [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005.(in Chinese))
- [14] 龚晓南. 复合地基设计和施工指南[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003.(GONG Xiao-nan. Introduction of design and construction of the composite foundation[M]. Beijing: China Communications Press, 2003.(in Chinese))
- [15] 王启铜. 柔性桩的沉降(位移)特性及荷载传递规律[D]. 杭州: 浙江大学, 1991.(WANG Qi-tong. Characteristic of settlement (displacement) and load transmission mechanism of the flexible pile[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 1991.(in Chinese))
- [16] 段继伟. 柔性桩复合地基的数值分析[D]. 杭州: 浙江大学, 1993. (DUAN Ji-wei. Numerical analyses of the composite foundation with flexible pile[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 1993.(in Chinese))
- [17] 龚晓南. 形成竖向增强体复合地基的条件[J]. 地基处理, 1995,6(3):48. (GONG Xiao-nan. Condition of the composite foundation with vertical strengthen body[J]. Ground Improvement, 1995,6(3):48.(in Chinese))
- [18] 龚晓南. 地基处理技术与复合地基理论[J]. 浙江建筑, 1996(1):35.(GONG Xiao-nan. Technique of the ground improvement and theory of the composite foundation[J]. Zhejiang Construction, 1996(1):35.(in Chinese))
- [19] 龚晓南, 陈明中. 关于复合地基沉降计算的一点看法[J]. 地基处理, 1998,9(2):10.(GONG Xiao-nan, CHEN Ming-zhong. On settlement calculation of composite foundation[J]. Ground Improvement, 1998,9(2):10.(in Chinese))
- [20] 管自立. 软土地基上“疏桩基础”应用实例[C]//城市改造中的岩土工程问题学术讨论会论文集. 杭州: 浙江大学出版社, 1990. (GUAN Zi-li. Case study of “pile foundation with large pile spacing” in the soft clay ground[C]// Proc of Conference of Geotechnical Engineering on Transforming City. Hangzhou: Zhejiang University Press, 1990.(in Chinese))
- [21] 龚晓南. 复合桩基与复合地基理论[J]. 地基处理, 1999,10(1):1.(GONG Xiao-nan. The theory of the composite pile foundation and the composite foundation[J]. Ground Improvement, 1999,10(1):1.(in Chinese))
- [22] 吴慧明. 不同刚度基础下复合地基性状[D]. 杭州: 浙江大学, 2001.(WU Hui-ming. Behavior of composite foundation under the foundation of different rigidity[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2001.(in Chinese))
- [23] 毛前, 龚晓南. 桩体复合地基柔性垫层的效用研究[J]. 岩土力学, 1998,19(2):67. (MAO Qian, GONG Xiao-nan. Study of the effect of flexible cushion of pile composite foundation[J]. Rock and Soil Mechanics, 1998,19(2):67.(in Chinese))
- [24] 邓超. 长短桩复合地基承载力与沉降计算[D]. 杭州: 浙江大学, 2002.(DENG Chao. Calculation of bearing capacity and settlement of composite foundation with both the long and short piles[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2002.(in Chinese))
- [25] 曾小强. 水泥石力学特性和复合地基变形计算研究[D]. 杭州: 浙江大学, 1993. (ZENG Xiao-qiang. Study of characteristic of cement-stabilized soil and displacement calculation of composite foundation[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 1993.(in Chinese))
- [26] 张土乔. 水泥土的应力应变关系及搅拌桩破坏特性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 1993. (ZHANG Tu-qiao. Study of the stress-strain relationship of cement-stabilized soil and disrupt characteristic of mixing-in-place pile[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 1993.(in Chinese))
- [27] 杨慧. 双层地基和复合地基压力扩散角比较分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2000.(YANG Hui. Comparison analyses of spread angle of both the composite foundation and double-layered foundation[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2000.(in Chinese))
- [28] 张京京. 复合地基沉降计算等效实体法分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2002. (ZHANG Jing-jing. Analyses of settlement calculation of composite foundation with equivalent body method [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2002.(in Chinese))
- [29] 邢皓枫. 复合地基固结分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.(XING Hao-feng. Consolidation analyses of the composite foundation[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006.(in Chinese))