

复合地基理论和技术应用体系形成和发展

龚晓南

(浙江大学 滨海和城市岩土工程研究中心, 浙江 杭州 310058)

摘要: 本文对复合地基理论和技术应用体系形成和发展作了简要介绍。首先简要介绍复合地基技术的发展背景和复合地基技术理论框架在中国的形成过程, 然后介绍复合地基的荷载传递机理和位移场特性, 指出复合地基荷载传递机理和位移场特性是复合地基设计和优化的理论依据。介绍基础刚度对复合地基工作性状的影响, 并指出在柔性基础下桩体复合地基设计中不能简单搬用刚性基础下桩体复合地基设计中的设计计算方法和设计参数。简要介绍了复合地基技术应用体系的形成过程, 分析了复合地基理论和技术的发展对基础工程学的贡献, 最后对复合地基理论和技术的发展作了展望。

关键词: 复合地基; 荷载传递机理; 位移场; 基础刚度

中图分类号: TU470

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2019)01-0007-10

作者简介: 龚晓南(1944 -), 男, 院士, 教授, 博士生导师, 主要从事软粘土力学、基坑工程、地基处理及复合地基等方面的教学和科研。E-mail: 13906508026@163.com。

Formation and development of composite foundation theory and technology application system

GONG Xiao-nan

(Research center of coastal and urban geotechnical engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: This paper briefly describes the formation and development of composite foundation theory and technology application system. Firstly, the development background of composite foundation technology and the formative process of composite foundation technology theory framework in China are briefly introduced. Then this paper introduces the load transfer mechanism and displacement field characteristics of composite foundation, and it is pointed out that the composite foundation load transfer mechanism and displacement field characteristics are the theoretical basis for composite foundation design and optimization. The foundation stiffness has an effect on the working properties of composite foundation. In the design of pile composite foundation under flexible foundation, the design calculation method and parameters cannot be simply copied from those of pile composite foundation design under rigid foundation. The formative process of composite foundation technology application system is simply introduced. The contribution of the development of composite foundation theory and technology to foundation engineering is discussed. Finally, the development of composite foundation theory and technology is prospected.

Key words: composite foundation; load transfer mechanism; displacement field; foundation stiffness

0 引言

20世纪60年代, 国外有人将采用碎石桩加固的地基称为复合地基。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的概念。采用复合地基可以较好发挥增强体和天然地基土体的承载潜能, 具有较好的经济性和适用性。我国地域辽阔, 工程地质复杂, 工程建设规模大, 又是发展中国家, 建设资金短缺, 这给复合地基技术的应用和发展提供了良好的机遇。

在发展初期国内外学者主要集中碎石桩复合地基性状的研究。随着深层搅拌法和高压喷射注浆法在地基处理中的推广应用, 人们开始重视水泥土桩复合地基技术的研究。碎石桩和水泥土桩两者的主要差别为: 前者桩体材料碎石属散体材料, 后者桩体材料水泥土为粘结体材料。研究表明: 散体材料桩的承载力主要取决于桩侧土的侧限力, 而粘结材料桩的承载力主要取决于桩侧土的摩阻力和桩端端阻力。两者在荷载作用下的荷

载传递机理有较大的差别。复合地基概念也包括了粘结材料桩复合地基。为了提高承载力,混凝土桩复合地基也在工程中得到应用。人们注意到复合地基中桩体的刚度大小对桩的荷载传递性状有较大影响,于是又将粘结材料桩按刚度大小分为柔性桩和刚性桩两大类,提出了柔性桩复合地基和刚性桩复合地基的概念,这样复合地基概念得到进一步拓宽。为了提高桩体的受力性能,发展了多种型式的组合桩技术。随着加筋土地基在工程建设中的广泛应用,又出现了水平向增强体复合地基的概念。将竖向增强体与水平向增强体组合应用,可形成双向增强复合地基技术。随着复合地基技术的发展,复合地基概念也在不断发展中^[1]。

复合地基技术在我国得到重视、发展是与我国工程建设对它的需求分不开的。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。笔者在复合地基引言^[2-3]和《复合地基》^[4]中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、分类,总结了复合地基承载力和沉降计算的思路和方法,构建了复合地基理论框架。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笔者主持下在浙江大学召开了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,促进了复合地基处理理论和实践水平进一步提高。《复合地基理论与实践》^[5]较全面总结了复合地基理论与实践在我国的发展。2002年、2007年和2018年笔者分别在《复合地基理论及工程应用》第一、二、三版^[6-8]中对在《复合地基》^[4]中提出的复合地基理论框架作了补充和完善,较全面地介绍了复合地基理论和工程应用在我国的发展。2003年应人民交通出版社邀请,出版了《复合地基设计和施工指南》^[9]。2008年由笔者主编的浙江省工程建设标准《复合地基技术规程》(DB33/1051-2008)^[10]发布实施。2010年由笔者主编的中华人民共和国行业标准《刚-柔性桩复合地基技术规程》(JGJ/T210-2010)^[11]发布实施。2012年由笔者主编的中华人民共和国国家标准《复合地基技术规范》(GB/T50783-2012)^[12]发

布实施。现在复合地基已成为一种常用的地基基础形式,在我国已形成复合地基技术应用体系。

目前在我国应用的复合地基类型主要有:由多种施工方法形成的各类砂石桩复合地基、水泥土桩复合地基、各类刚性桩复合地基、组合桩复合地基、长短桩复合地基、桩网复合地基、加筋土地基等。复合地基技术在房屋建筑(包括高层建筑)、高等级公路、铁路、堆场、机场、堤坝等土木工程建设中得到了广泛应用,产生了良好的社会效益和经济效益。

1 荷载传递机理和位移场特性

荷载作用下复合地基的荷载传递机理与增强体的特性相关。复合地基中的增强体可分为两大类:散体材料桩和粘结材料桩。粘结材料桩又分为柔性桩和刚性桩。下面先讨论在荷载作用下各类桩体复合地基的荷载传递机理,然后讨论复合地基位移场特点。复合地基荷载传递机理和位移场特点是复合地基设计和优化的理论依据。

散体材料桩在荷载作用下桩体发生鼓胀变形,依靠桩周土提供的被动土压力维持桩体平衡,承受上部荷载的作用。散体材料桩的承载能力主要取决于桩周土体的侧限能力,单桩承载力的一般表达式可用下式表示:

$$p_{pf} = \sigma_m K_p \quad (1)$$

式中: σ_m —桩侧土能提供的侧向极限应力;

K_p —桩体材料的被动土压力系数。

若天然地基土体抗剪强度较低,在成桩过程中又不能得到提高,采用散体材料桩加固地基,地基承载力提高幅度是不大的。由公式(1)可知,散体材料桩的承载力并不是随着桩长的增加而增大的。从承载力角度看,散体材料桩满足一定的长度即可,但增加散体材料桩的长度对减小地基沉降是有利的。

粘结材料桩在荷载作用下,桩侧摩阻力的发挥依靠桩和桩侧土之间存在相对位移的趋势或产生相对位移。若桩侧和桩侧土体间不存在相对位移或相对位移趋势,则桩侧不能产生摩阻力,或者说桩侧摩阻力等于零。桩端阻力的发挥则依靠桩端向下移动或存在位移趋势,否则桩端阻力等于零。理论上,理想刚性桩在荷载作用下,如果桩体顶端产生位移 δ ,则桩底端的位移 δ_b 也等于 δ ,因为理想刚性桩在荷载作用下轴向压缩量等于零。

但是理想刚性桩是不存在的,所有的工程桩都是可压缩性桩。工程实测资料表明,桩侧摩阻力和桩端端阻力并不是同步发挥的,桩侧摩阻力的发挥早于桩端端阻力的发挥,上层桩侧摩阻力的发挥早于下层桩侧摩阻力的发挥。因此对于可压缩性桩,在荷载作用下桩体发生压缩,桩底端位移 δ_b 小于桩顶端位移 δ 。若桩土相对刚度较小,在荷载作用下,桩体本身的压缩量等于桩顶端的位移量,桩底端相对于周围土体没有产生相对位移而且无产生相对位移的趋势,则桩端端阻力等于零。若桩土相对刚度较小,在极限荷载作用下,桩体一定长度内的压缩量已等于桩顶端位移,则该长度以下的桩体与土体间无相对位移及位移倾向,故该长度以下桩体对桩的承载力没有贡献。对桩的承载力有贡献的桩长称为有效桩长。当实际桩长大于有效桩长时,桩的承载力不会增大。

段继伟^[13]采用数值分析研究了桩长与极限承载力的关系。在其他条件相同的条件下,随着桩长的增加,桩的极限承载力开始增加很快,后来增加幅度减小,最后趋于某一数值,如图 1 所示。也就是说当桩长超过某一桩长 l_0 时,继续增加桩长,桩的极限承载力增加很小,桩长 l_0 可称为有效桩长。桩土相对刚度较小的桩可称为柔性桩。

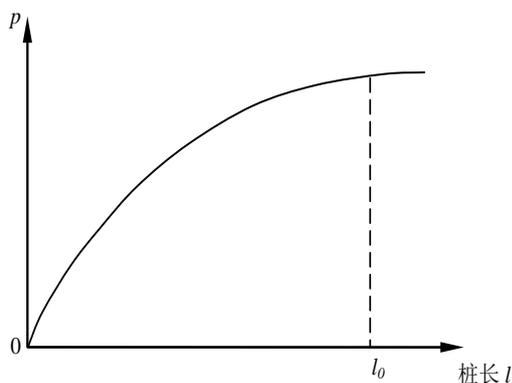


图 1 桩长与极限承载力关系示意图

Figure 1 Schematic graph of relationship between pile length and ultimate bearing capacity

如何较好地发挥地基土体和增强体在提高承载力和减小沉降方面的潜能,需要了解复合地基承载力特性和变形特性。将复合地基加固区视为一复合土体,采用平面有限元分析。设荷载作用面和复合地基加固区范围相同,复合地基加固区为宽度 4.0 m,深度 9.0 m,土体模量为 2 MPa,加固区复合模量为 60 MPa,在荷载作用下均质地基和复合地基中应力泡分别如图 2 (a) 和 (b) 所示。作用荷载为 1 kN,应力泡从内到外依次为 900 N, 700 N, 500 N, 300 N, 100 N。由图可知,与均质地基相比,复合地基中高应力区往下移,而且高应力值减小,附加应力影响范围加深。

比较分析图 2 (a) 和 (b) 可知,与均质地基(或称浅基础)相比,桩体复合地基中桩体的存在使浅层地基土中附加应力减小,而使深层地基土中附加应力增大,附加应力影响深度加深。这一应力场特性决定了复合地基的位移场特性。曾小强^[14]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的地基沉降情况。场地位于宁波甬江南岸,属全新世晚期海冲积平原,地势平坦,大多为耕地,地面标高为 2.0 m,其土层自上而下分布如下:

I_2 层:成因时代为 mQ_{43} ,粘土,灰黄~黄褐色,可塑;厚层状,含 Fe、Mn 质,顶板标高为 1.87~2.27 m,层厚为 1.00~1.20 m。

I_3 层:成因时代为 mQ_{43} ,淤泥质粉质粘土,浅灰色,流塑;厚层状,含腐烂植物碎屑,顶板标高为 0.77~1.27 m,层厚为 1.4~2.0 m。

II_{1-2} 层:成因时代为 mQ_{42} ,淤泥,灰色,流塑;薄层理,下部可见鳞片,土质细粘,软弱,顶板标高为 -0.53~-1.05 m,层厚为 12.62~15.2 m。

II_2 层:成因时代为 mQ_{42} ,淤泥质粘土,深灰色,流塑;局部贝壳富集,土质细粘,软弱,顶板标高为 -13.62~-15.83 m,层厚为 12.1~25 m。

各土层土的物理力学性质指标如表 1 所示。

搅拌桩复合地基设计参数为: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。

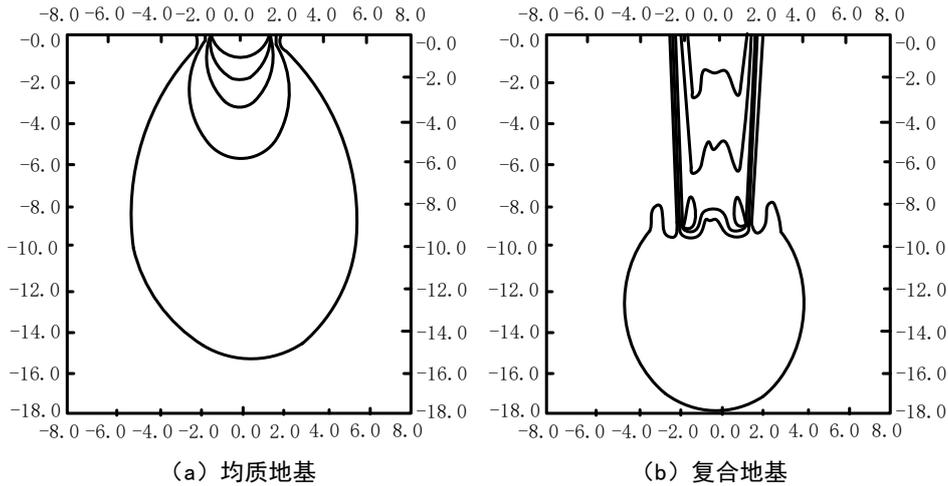


图2 复合地基中应力泡

Figure 2 Stress bubble in composite foundation

表1 各土层物理力学性质指标

Table 1 Physical and mechanical properties of each soil layer

| 土层 | 编号 | 天然含水量 w/% | 容量 r ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$) | 孔隙比 e | 塑性指数 I_p | 压缩系数 a_{1-2} / MPa^{-1} | 压缩模量 E_s / MPa | 无侧限强度 q_u / kPa |
|---------|-------------------|-----------------------|---|------------------------------|-------------------------------|--|--|--|
| | | | | | | | | |
| | | c / kPa | φ° | 压缩模量 E_s / MPa | 极限承载力 P_u / kPa | 极限摩阻力 f_u / kPa | 水平 $k_h \times 10^{-7}$ / $(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$ | 垂重 $k_v \times 10^{-7}$ / $(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$ |
| 粘土 | I ₂ | 33.02 | 19.06 | 0.91 | 23.22 | 0.42 | 4.44 | 59 |
| 淤泥质粉质粘土 | I ₂ | 41.76 | 18.09 | 1.14 | 15.28 | 0.83 | 2.50 | 32 |
| 淤泥 | II ₁₋₂ | 54.15 | 16.93 | 1.52 | 20.69 | 1.59 | 1.47~2.98 | 48.6 |
| 淤泥质粘土 | II ₂ | 48.00 | 17.31 | 1.36 | 21.65 | 0.69 | 2.58~3.56 | 79.8 |

图3表示采用浅基础和采用水泥土桩复合地基的沉降情况，图中1'、2'、3'分别表示复合地基加固区压缩量、复合地基加固区下卧层压缩量和复合地基总沉降量。图中1，2，3分别表示浅基础情况下（地基不加固）天然地基压缩量与浅基础下卧层压缩量、浅基础和下卧层总压缩量。由图中可以看出，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土层由于加固区存在其压缩量比浅基础相应的土层压缩量要大（ $2' > 2$ ）。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，说明采用复合地基对减小沉降是有效的。由于附加应力影响范围加深，较深处土层压缩量增大。图3表明要进一步减小

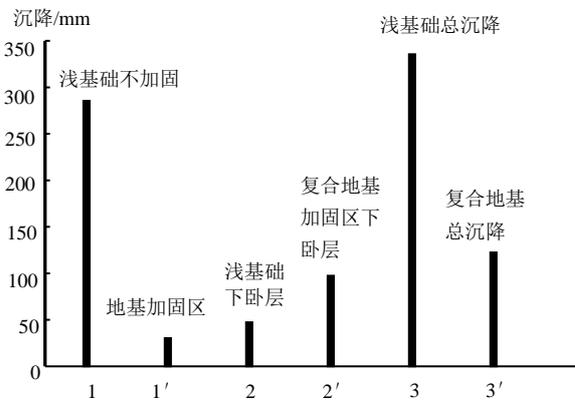


图3 加固效果比较图

Figure 3 Comparison chart of reinforcement effect

复合地基沉降量, 依靠提高复合地基置换率, 或提高桩体模量来增大加固区复合土体模量以减小复合地基加固区压缩量 1' 的潜力是很小的。进一步减小复合地基沉降量的关键是减小复合地基加固区下卧层的压缩量。减小下卧层部分的压缩量最有效的办法是增加加固区厚度, 减小下卧层中软弱土层的厚度。

复合地基位移场特性研究为复合地基合理设计或优化设计提供了基础, 指明了方向。

2 基础刚度对复合地基工作性状的影响

早期复合地基多用于建筑工程, 无论是条形基础还是筏板基础都有较大的刚度。建筑工程中的复合地基, 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计算方法和参数的选用方法都是基于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复合地基承载力和沉降计算。然而工程实践表明, 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复合地基设计, 复合地基实际承载力比设计值小, 实际产生的沉降值比设计值大。有的工程还会发生失稳破坏。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复合地基承载力和沉降计算是偏不安全的, 这一现象引起人们的重视。

为了探讨基础刚度对复合地基性状的影响, 我们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的影响作了较为系统和全面的分析。吴慧明^[15]在宁波大学校园内进行了刚性基础和柔性基础下复合地基模型试验。

试验场地工程地质情况如下: 表层为耕植土, 然后是淤泥质粘土, 约 0.60 m 厚, 下面是淤泥层, 层厚大于 20 m。试验用桩为水泥土桩, 直径 200 mm, 桩长 2.0 m。桩长 2.0 m, 水泥掺入量为 18%, 水泥土桩龄期 50 d, 复合地基置换率采用 15%。

完成的现场试验有: 原状土承载力试验; 单桩竖向承载力试验; 刚性基础下复合地基承载力试验和柔性基础下复合地基承载力试验。原状土承载力试验采用 275×275 mm 刚性荷载板进行试验。刚性基础下复合地基荷载试验示意图和柔性基础下复合地基荷载试验示意图分别如图 4 (a) 和 (b) 所示。

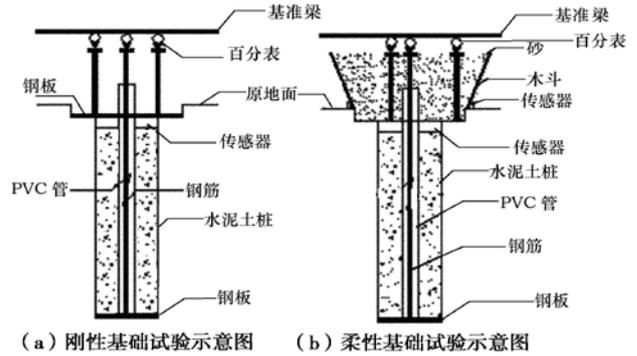


图 4 刚性基础和柔性基础下复合地基模型试验
Figure 4 Model test of composite foundation under rigid foundation and flexible foundation

图 5 为原状土地基静载荷试验荷载-沉降曲线。图 6 为水泥土桩单桩载荷试验荷载-沉降曲线。由试验曲线可得原状土地基的极限承载力为 3.20 kN (275×275 mm 荷载板)。单桩极限承载力为 1.75 kN (L=2.0 m, Φ120 mm)。

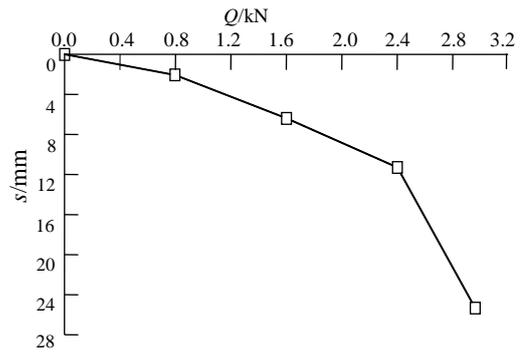


图 5 原状土地基载荷试验荷载-沉降曲线
Figure 5 Load-settlement curve of undisturbed soil foundation

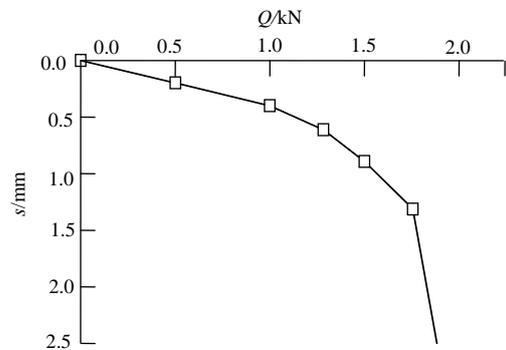


图 6 水泥土桩单桩载荷试验荷载-沉降曲线
Figure 6 Load-settlement curve of single cement soil pile

表2 刚性基础下复合地基载荷试验结果

Table 2 Load test results of composite foundation under rigid foundation

| | | | | | |
|-----------|------|------|------|------|--------|
| 总荷载/kN | 1.60 | 3.20 | 4.80 | 6.40 | 6.60 |
| 桩承受的荷载/kN | 1.08 | 2.32 | 3.53 | 3.95 | 3.42 |
| 土承受的荷载/kN | 0.52 | 0.88 | 1.28 | 2.45 | 3.18 |
| 桩头及土沉降/mm | 0.72 | 1.25 | 1.95 | 5.89 | >10.00 |
| 桩底沉降/mm | 0.02 | 0.04 | 0.15 | 0.28 | >5.00 |

表3 柔性基础下复合地基载荷试验结果

Table 3 Load test results of composite foundation under flexible foundation

| | | | | | | |
|-----------|------|------|------|------|------|--------|
| 总荷载/kN | 1.60 | 2.30 | 3.00 | 3.65 | 4.25 | 4.80 |
| 桩承受的荷载/kN | 0.36 | 0.47 | 0.57 | 0.62 | 0.69 | 0.78 |
| 土承受的荷载/kN | 1.24 | 1.83 | 2.43 | 3.03 | 3.56 | 4.02 |
| 桩头沉降/mm | 0.48 | 0.79 | 1.26 | 1.66 | 2.34 | 3.56 |
| 土沉降/mm | 1.38 | 2.00 | 2.94 | 3.92 | 5.82 | >10.00 |
| 桩底沉降/mm | 0.30 | 0.47 | 0.61 | 0.74 | 1.06 | 1.72 |

刚性基础下复合地基载荷试验测试成果和柔性基础下复合地基载荷试验测试成果分别如表2和表3所示。

从表2可知,刚性基础下复合地基静载荷试验中,当荷载为6.40 kN时,沉降为5.89 mm,认为此时桩开始进入极限状态。刚性基础下复合地基中桩首先进入极限状态,其极限承载力为3.95 kN,大于自由单桩静载试验中的单桩极限承载力1.75 kN。此时土尚未进入极限状态。当复合地基中桩进入极限状态后,荷载继续增加桩间土也随即进入极限状态,此时土承担的荷载为3.18 kN,相应极限承载力为49.40 kPa,也大于原状土静载试验所得的极限承载力42.30 kPa。

从表3可知:与刚性基础下复合地基载荷试验不同,柔性基础下复合地基静载荷试验中,复合地基中土首先进入极限状态。此时复合地基总荷载为4.25 kN,土分担的荷载为3.56 kN,相应的极限承载力为5.54 MPa,大于原状土静载试验所得的极限承载力。而此时桩的荷载分担为0.69 kN,远低于桩的极限承载力,其强度发挥度很低。当荷载进一步施加至4.8 kN时,桩的荷载分担也只有0.78 kN,远远低于其单桩极限承载力,但此时基础沉降已很大,复合地基已处于破坏状态。

由以上分析可知,刚性基础下桩和土的沉降保持一致,在相同沉降变形时,正常条件下桩首先承受较大荷载,并首先进入极限状态,随后土亦进入极限状态。柔性基础下桩和土的变形可相对自由发展,正常条件下土首先承受较大荷载,

并随荷载增加率先进入极限状态,而桩的承载力较难得到充分发挥。由试验成果还可知:刚性基础下复合地基中桩的极限承载力比自由单桩的极限承载力大,刚性基础下复合地基中土的极限承载力和柔性基础下复合地基中土的极限承载力均比原状土地基的极限承载力要大。

图7为刚性基础下复合地基载荷试验荷载-沉降曲线,图8为柔性基础下复合地基载荷试验荷载-沉降曲线。由表2和表3,或图7和图8均可得到:刚性基础下复合地基极限承载力大于柔性基础下复合地基极限承载力;荷载水平相同时,柔性基础下复合地基的沉降要大于刚性基础下复合地基的沉降。刚性基础下复合地基中桩和土的沉降是相同的,而柔性基础下复合地基中桩和土的沉降是不相同的,桩的沉降小于土的沉降。桩体复合地基在土体荷载作用下,桩顶会刺入土体。

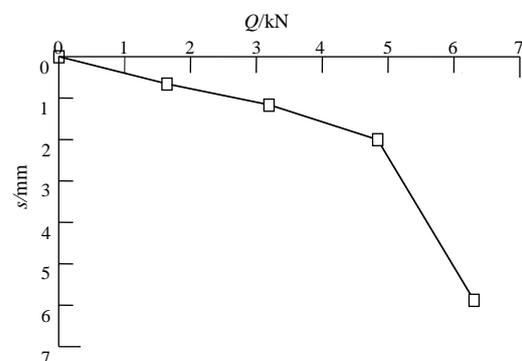


图7 刚性基础下复合地基载荷试验荷载-沉降曲线
Figure 7 Load-settlement curve of composite foundation load test under rigid foundation

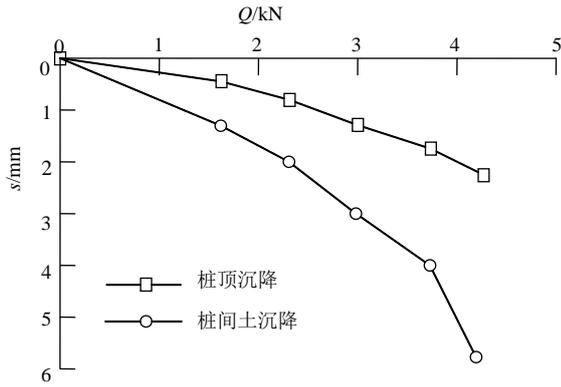


图 8 柔性基础上复合地基荷载试验荷载-沉降曲线

Figure 8 Load-settlement curve of composite foundation load test under flexible foundation

加荷过程中刚性基础上复合地基中桩土应力比的变化趋势与柔性基础上复合地基中桩土应力比的变化趋势也不同。刚性基础上复合地基中桩土应力比随着荷载增加而增大，直至桩体到达极限状态，然后随着荷载继续增加而减小。刚性基础上复合地基中桩土应力比与荷载水平关系曲线如图 9 所示。图 10 表示柔性基础上复合地基中桩土应力比与荷载水平关系曲线。柔性基础上复合地基中桩土应力比随着荷载增加而减小，直至土体到达极限状态，然后随着荷载继续增加而增大。在工程应用荷载水平阶段，刚性基础上复合地基中桩土应力比随着荷载增加而增大，而柔性基础上复合地基中桩土应力比随着荷载增加而减小。

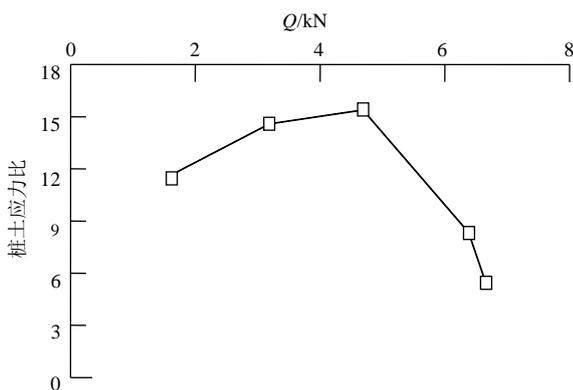


图 9 刚性基础上复合地基桩土应力比与荷载水平关系

Figure 9 Relationship between pile-soil stress ratio and load level of composite foundation under rigid foundation

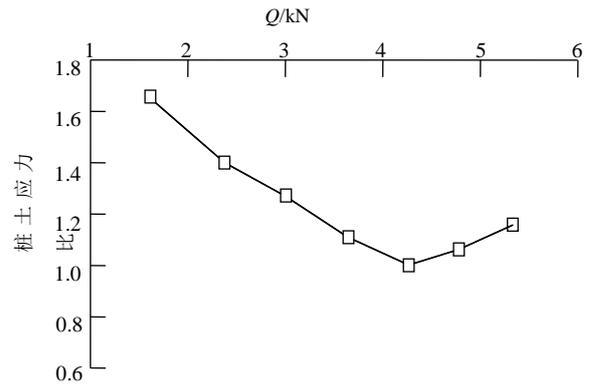


图 10 柔性基础上复合地基桩土应力比与荷载水平关系

Figure 10 Relationship between pile-soil stress ratio and load level of composite foundation under flexible foundation

研究表明，在荷载作用下柔性基础上桩体复合地基性状与刚性基础上桩体复合地基性状有较大的差别，在柔性基础上桩体复合地基设计中不能简单搬用在刚性基础上桩体复合地基设计中的设计计算方法和设计参数。

3 形成工程技术应用体系

复合地基理论和技术历经几十年的发展，已在我国工程建设中得到广泛应用，理论和技术水平得到不断提高。

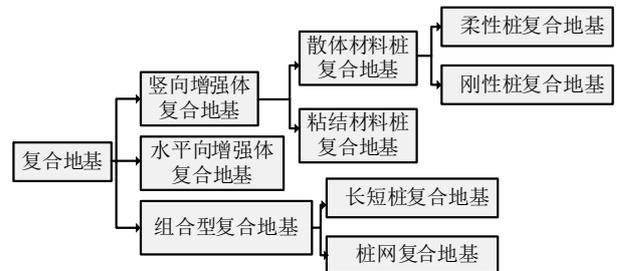


图 11 复合地基分类

Figure 11 Composite foundation classification

基于理论研究和工程实践成果，根据增强体的特性^[16]和荷载传递机理^[13,17]对复合地基进行合理分类(图 11)，建立了各类复合地基承载力、沉降设计计算方法，以及复合地基稳定分析方法，为复合地基从理论走向工程应用铺平了道路^[18-21]；建立了考虑上部结构惯性作用和地基振动共同影响的复合地基拟静力抗震分析方法^[22]，为复合地基抗震设计计算提供了理论基础；编写、出版了系列复合地基领域著作、设计与施工指南，主办复合地基技术培训班，普及、推广复合地基

技术；编写复合地基技术规程规范，为复合地基设计、施工和检测提供了全面的依据和支撑。如：我国第一部地方标准浙江省《复合地基技术规程》^[10]于2008年颁布，第一部国家行业标准《刚-柔性桩复合地基技术规程》^[11]于2010年颁布，第一部国家标准《复合地基技术规范》^[12]于2012年颁布。

复合地基技术历经几十年的发展，在我国已形成工程技术应用体系。

4 复合地基对基础工程学的贡献

当天然地基能够满足建筑物对地基的要求时，通常采用浅基础（shallow foundation）；当天然地基不能满足建筑物对地基的要求时，需要对天然地基进行处理形成人工地基以满足建筑物对地基的要求。桩基础（pile foundation）是软弱地基中最常用的一种人工地基形式。经过地基处理形成的人工地基多数可归属为两类：一类是在荷载作用范围内的天然地基土体的力学性质得到普遍的改良，如通过预压法、强夯法、以及换填法等形成的土质改良地基。这类人工地基承载力与沉降计算基本上与浅基础相同，因此可将其划归浅基础。另一类是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^[23]，形成复合地基（composite foundation）^[24]。例如水泥土复合地基、碎石桩复合地基、低强度混凝土桩复合地基等^[25]。根据上述分析，浅基础、复合地基和桩基础已成为工程建设中常用的三种地基基础型式^[26]。

图12至图14分别为浅基础、桩基础和复合地基的示意图。在浅基础中，上部结构荷载是通过基础板直接传递给地基土体的。图13（a）和（b）分别表示端承桩和摩擦桩。按照经典桩基理论，在图13（a）所示的端承桩桩基础中，上部结构荷载通过基础板传递给桩体，再依靠桩的端承力直接传递给桩端持力层。不仅基础板下地基土不传递荷载，而且桩侧土也基本上不传递荷载。在图13（b）所示的摩擦桩桩基础中，上部结构荷载通过基础板传递给桩体，再通过桩侧摩阻力和桩端端承力传递给地基土体，而以桩侧摩阻力为主。图14（a）和（b）分别表示设垫层和不设垫层的两类复合地基。在图14（a）所示的复合地基中，上部结构荷载通过基础板直接同时将荷载传递给桩体和基础板下地基土体。对散体材料

桩，由桩体承担的荷载通过桩体鼓胀传递给桩侧土体和通过桩体传递给深层土体。对粘结材料桩由桩体承担的荷载则通过桩侧摩阻力和桩端端承力传递给地基土体。图14（b）与（a）不同的是由基础板传递来的上部结构荷载先通过垫层再直接同时将荷载传递给桩体和垫层下的桩间土体。垫层的效用不改变桩和桩间土同时直接承担荷载这一基本特征^[27]。

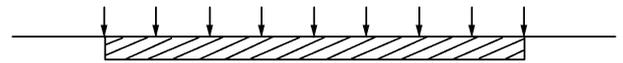
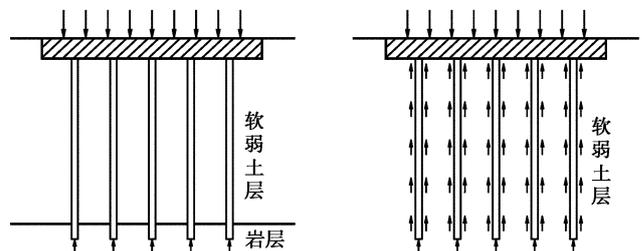


图12 浅基础

Figure 12 Shallow foundation

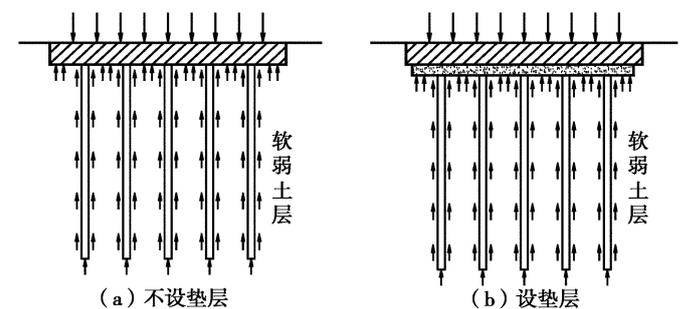


(a) 端承桩基础

(b) 摩擦桩基础

图13 柔性基础下复合地基桩土应力比与荷载水平关系

Figure 13 Pile foundation



(a) 不设垫层

(b) 设垫层

图14 复合地基

Figure 14 Composite foundation

通过上述对浅基础、桩体复合地基和桩基础荷载传递路线的分析，可以认为桩体复合地基是介于浅基础和桩基础之间的，如图15所示。浅基础、桩基础和复合地基三者之间并不存在严格的界限，是连续分布的。复合地基置换率等于零时就是浅基础。复合地基桩土应力比等于1时也就是浅基础。若复合地基中不考虑桩间土的承载力，复合地基承载力计算则与桩基础相同。摩擦桩基础中若能考虑桩间土直接承担荷载的作用，也可属于复合地基。或者说考虑桩土共同作用也可将其归属于复合地基。复合桩基是一种桩基础，也可认为是一种复合地基^[1]。



图 15 浅基础、复合地基和桩基础

Figure 15 Shallow foundation, composite foundation and pile foundation

5 发展展望

复合地基的优点是可以较充分利用天然地基和桩体两者各自承担荷载的潜能, 具有较好的经济性。在设计中, 可以通过调整复合地基中的桩体刚度、长度和复合地基置换率等设计参数来满足地基承载力和控制沉降量的要求, 具有较大的灵活性, 特别是可有效控制沉降。复合地基工程实践促进了复合地基理论的发展, 复合地基理论的发展又进一步指导了复合地基技术的发展。在我国已建成复合地基技术应用体系。各种复合地基在土木工程中得到广泛应用, 复合地基与浅基础、桩基础已成为土木工程建设中常用的三种基础形式。复合地基理论与工程实践的发展也促进了基础工程学的发展, 复合地基已成为基础工程学的重要内容。

展望复合地基的发展, 笔者认为在复合地基计算理论、复合地基新技术、复合地基施工工艺、复合地基质量检测等方面都具有较大的发展空间, 都有很多工作需要做。复合地基的发展需要更多的工程实践积累, 需要理论上的探索, 需要设计、施工、科研和业主单位共同努力^[28]。

笔者认为应继续重视下述几个研究领域的研究工作:

- (1) 复合地基荷载传递规律, 荷载作用下地基应力场和位移场特性;
- (2) 复合地基沉降和工后沉降计算方法;
- (3) 复合地基固结理论和沉降随时间发展规律;
- (4) 复合地基稳定分析方法;
- (5) 按沉降控制复合地基设计理论;
- (6) 动力荷载和周期荷载作用下各类复合地基性状;
- (7) 复合地基新技术;
- (8) 复合地基测试技术等。

展望我国复合地基的发展, 可以相信在理论和工程实践两个方面都会有不断的进步, 复合地基理论和技术会进一步发展和完善。

参考文献:

- [1] 龚晓南. 广义复合地基理论及工程应用[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(1): 1-13.
- [2] 龚晓南. 复合地基引论(一)[J]. 地基处理, 1991, 2(3): 36-42.
- [3] 龚晓南. 复合地基引论(二)[J]. 地基处理, 1991, 2(4): 1-11.
- [4] 龚晓南. 复合地基[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1992.
- [5] 龚晓南. 复合地基理论与实践[M]. 杭州: 浙江大学出版社.
- [6] 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.
- [7] 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, 2007.
- [8] 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, 2018.
- [9] 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.
- [10] DB33/1051-2008 复合地基技术规程[S]. 2008.
- [11] JGJ/T 210-2010 刚-柔性桩复合地基技术规程[S]. 2010.
- [12] GB/T 50783-2012 复合地基技术规范[S]. 2012.
- [13] 段继伟, 龚晓南, 曾国熙. 水泥搅拌桩的荷载传递规律[J]. 岩土工程学报, 1994, 16(4): 1-8.
- [14] 曾小强. 水泥土力学特性和复合地基变形计算研究[D]. 杭州: 浙江大学, 1993.
- [15] 吴慧明, 龚晓南. 刚性基础与柔性基础下复合地基模型试验对比研究[J]. 土木工程学报, 2001, 34(5): 81-84.
- [16] 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): 48-48.
- [17] 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, 1992.
- [18] 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.
- [19] 孙林娜. 复合地基沉降及按沉降控制的优化设计研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
- [20] 连峰. 桩网复合地基承载机理及设计方法[D]. 杭州: 浙江大学, 2009.
- [21] 田效军. 粘结材料桩复合地基固结沉降发展规律研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- [22] 黄明聪. 复合地基振动反应与地震响应数值分析[D]. 杭州: 浙江大学, 1999.
- [23] 杨晓军. 土工合成材料加筋机理研究[D]. 杭州: 浙江大学, 1999.

- [24] 龚晓南. 地基处理技术及其发展[J]. 土木工程学报, 1997, 30(6): 3-11.
- [25] 龚晓南, 卞守中. 二灰混凝土桩复合地基技术研究[J]. 地基处理, 1997, 31(1): 3-9.
- [26] 龚晓南. 复合桩基与复合地基理论[J]. 地基处理, 1999, 10(1): 1-15.
- [27] 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): 67-73.
- [28] 龚晓南. 有关复合地基的几个问题[J]. 地基处理, 2000, 11(3): 42-48.



2019年岩土工程西湖论坛：地基处理新技术、新进展 (2019年10月18~20日, 杭州)(第1号通知)

在广泛征求意见的基础上, 拟定于2019年10月18~20日在杭州召开岩土工程西湖论坛(2019)。岩土工程西湖论坛(2019)的主题为: 地基处理新技术、新进展。围绕论坛主题“地基处理新技术、新进展”, 对近年来地基处理新技术、新方法、新设备、新工艺等进行交流, 促进我国地基处理技术水平不断提高, 更好地为工程建设服务。

会前将围绕该主题在中国建工出版社出版岩土工程西湖论坛系列丛书第3册:《地基处理新技术、新进展》。邀请广大岩土工程技术人员围绕论坛主题积极投稿, 踊跃参与。

会议主题

地基处理新技术、新进展

专题研讨会

岩土工程西湖论坛(2019)

会议时间地点

2019年10月18~20日 杭州

出版专著

将围绕该主题在中国建工出版社出版岩土工程西湖论坛系列丛书第3册:《地基处理新技术、新进展》。邀请广大岩土工程技术人员围绕论坛主题积极投稿, 踊跃参与。

岩土工程西湖论坛组委会

联系人: 陆水琴(0571-88208775, lusq87@163.com)

浙江大学滨海和城市岩土工程研究中心网址:

<http://www.zjdxyt.com>