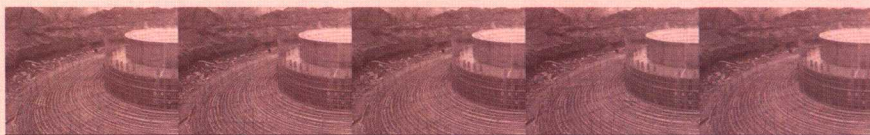


岩土工程技术创新与实践丛书



# 基于工程实践的大直径素混凝土桩 复合地基技术研究

RESEARCH ON COMPOSITE FOUNDATION WITH LARGE-DIAMETER  
PLAIN CONCRETE PILES BASED ON ENGINEERING PRACTICE

康景文 毛坚强 郑立宁 陈继彬 著

中国建筑工业出版社

岩土工程技术创新与实践丛书

# 基于工程实践的大直径素混凝土 桩复合地基技术研究

康景文 毛坚强 郑立宁 陈继彬 著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

基于工程实践的大直径素混凝土桩复合地基技术研究/康景文等著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2018. 12  
岩土工程技术创新与实践丛书  
ISBN 978-7-112-22917-8

I. ①基… II. ①康… III. ①大直径桩-混凝土管桩-复合桩基-研究 IV. ①TU473. 1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 254646 号

本书以超高层建筑为工程背景, 基于对卵石地基、红层泥质软岩地基及其组合地层地基的工程特性的勘察研究, 采用理论分析、现场试验、数值模拟等多种方法, 开展了以既有理论为支撑的室内外大直径桩复合地基模型试验、现场大直径素混凝土桩复合地基原型试验, 以及大直径素混凝土桩复合地基加固机理、承载特性、变形特性及计算模型等理论研究, 形成了大直径素混凝土桩复合地基设计理论方法, 并通过工程再实践验证所获取的理论方法的可靠性和可行性, 得出了整套适于高层建筑地基处理的大直径素混凝土桩复合地基的理论分析方法, 扩展了复合地基理论利用范围, 一定程度上完善了现行设计方法。

本书可供从事岩土工程勘察、设计、施工、检测和监测及科研的人员和工程技术人员参考, 也可作为相应学科专业的研究生和高年级本科生学习使用的参考资料。

责任编辑: 王 梅 杨 允 辛海丽  
责任校对: 焦 乐

岩土工程技术创新与实践丛书  
基于工程实践的大直径素混凝土桩复合地基技术研究  
康景文 毛坚强 郑立宁 陈继彬 著

\*  
中国建筑工业出版社出版、发行 (北京海淀三里河路 9 号)  
各地新华书店、建筑书店经销  
北京科地亚盟排版公司制版  
北京圣夫亚美印刷有限公司印刷

\*  
开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 16½ 字数: 410 千字  
2019 年 2 月第一版 2019 年 2 月第一次印刷  
定价: 65.00 元  
ISBN 978-7-112-22917-8  
(33029)

版权所有 翻印必究  
如有印装质量问题, 可寄本社退换  
(邮政编码 100037)



# 《岩土工程技术创新与实践丛书》

## 总 序

由全国勘察设计行业科技带头人、四川省学术和技术带头人、中国建筑西南勘察设计院有限公司康景文教授级高级工程师主编的《岩土工程技术创新及实践丛书》即将陆续面世，我们对康总在数十年坚持不懈的思考、针对热点难点问题研究与总结的基础上，为行业与社会的发展做出的积极奉献表示衷心的感谢！

该《丛书》的内容十分丰富，包括了专项岩土工程勘察、岩土工程新材料应用、复合地基、深大基坑围护与特殊岩土边坡、场地形成工程、工程抗浮治理、地基基础鉴定与纠倾加固、地下空间与轨道交通工程监测等，较全面地覆盖了岩土工程行业近 20 年来为满足社会经济的不断发展创造科技服务价值的诸多重要方面，其中部分工作成果具有显著的首创性。例如，近年我国社会经济发展对超大面积人造场地的需要日益增长，以解决其所引发的岩土工程问题为目标，以多年企业与高校联合开展的系列工程应用研究为基础，对场地形成工程的关键技术研究填补了这一领域的空白，建立起相应的工程技术体系，其在地形成工程所创建的基本理念、系统方法和关键技术的专项研究成果是对岩土工程界及至相近建设工程项目的一项重要贡献。又如，面对城市建设中高层、超高层建筑和地下空间对地基基础性能和功能不断提高的需求，针对与之密切相关的地基处理、工程抗浮和深大基坑围护等岩土工程问题，以实际工程为依托，通过企业研发团队与高校联合开展系列课题研究，获得的软岩复合地基、膨胀土和砂卵石层等不同地质条件下深大基坑围护结构设计、地下结构抗浮治理等主要技术成果，弥补了这一领域的缺陷，建立起相应的工程技术体系，推进了工程疑难问题的切实解决，其传承与创新的工作理念、处理工程问题的系统方法和关键技术成果运用，在岩土工程的技术创新发展中具有显著的示范作用。再如，随着社会可持续发展对绿色、节能、环保等标准要求在加速提高，在工程建设中积极采用新型材料替代生产耗能且污染环境的钢材已成为岩土工程师新的重要使命，针对工程抗浮构件、基坑支护结构、既有建筑加固和公路及桥梁面层结构增强等问题解决的需求，以室内模型试验成果为依据，以实际工程原型测试成果为验证支撑，对玄武岩纤维复合筋材在岩土工程中的应用进行深入探索，建立起相应的工程应用技术方法，其技术成果是岩土工程及至土木工程领域中积极践行绿色建造、环保节能战略所取得的一个创新性进展。

借康景文主编邀约拟序之机，回顾和展望“岩土工程”与“岩土工程技术服务”以及其在工程建设行业中的作用和价值发挥，希望业界和全社会对“岩土工程”的认知能够随着技术的创新与实践而不断地深入和发展，以共同促进整个岩土工程技术服务行业为社会



会、为客户继续不断创造出新的更大的价值。

岩土工程 (geotechnical engineering) 在国际上被公认为土木工程的一个重要基础性的分支。在工程设计中,地基与基础在理念上被视为结构(工程)的一部分,然而与以钢筋混凝土和钢材为主的结构工程之间确有着巨大的差异。地质学家出身、知识广博的一代宗师太沙基,通过近 20 年坚持不懈的艰苦研究,到他不惑之年所创立的近代土力学,已经指导了我们近 100 年,其有效应力原理、固结理论等至今仍是岩土工程分析中不可或缺的重要基础。太沙基教授在归纳岩土工程师工作对象时说“不幸的是,土是天然形成而不是人造的,而土作为大自然的产品却总是复杂的,一旦当我们从钢材、混凝土转到土,理论的万能性就不存在了。天然土绝不会是均匀的,其性质因地而异,而我们对其性质的认知只是来自于少数的取样点 (Unfortunately, soils are made by nature and not by man, and the products of nature are always complex...As soon as we pass from steel and concrete to earth, the omnipotence of theory ceases to exist. Natural soil is never uniform. Its properties change from point to point while our knowledge of its properties are limited to those few spots at which the samples have been collected)”。同时他还特别强调岩土工程师在实现工程设计质量目标时必须考虑和高度重视的动态变化风险:“施工图只不过是许愿的梦想,工程师最应该担心的是未曾预测到的工作对象的条件变化。绝大多数的大坝破坏是由于施工的疏漏和粗心,而不是由于错误的设计 (The one thing an engineer should be afraid of is the development of conditions on the job which he has not anticipated. The construction drawings are no more than a wish dream. ....the great majority of dam failures were due to negligent construction and not to faulty design)”。因此,对主要工程结构材料(包括岩土)的材料成分、几何尺寸、空间分布和工程性状加以精准的预测和充分的人为控制的程度的差异,是岩土工程师与结构工程师在思考方式、技术标准和工作方法显著不同的主要根源。作为主要的建筑材料,水泥发明至今近 195 年,混凝土发明至今近 170 年,钢材市场化也近百年,我们基本可以通过物理或化学的方法对混凝土、钢材的元素及其成分比例的改变加以改性,满足新的设计性能(能力)的需要,并进行可靠的控制;相比之下,天然形成的岩土材料,以及当今岩土工程师必须面对和处理、随机变异性更大、由人类生活或其他活动随机产生和随机堆放的材料——如场地形成、围海造地和人工岛等工程中被动使用的“岩土”(包括各类垃圾),一是材料成分和空间分布(边界)的控制难度更大,其尺度远远大于由钢筋混凝土或钢结构组成的工程结构体;二是这些非人为预设制作、组分复杂的材料存在更大的动态变异特性,会因气候条件、含水量、地下水等条件变化和场地的应力历史的不同而不同。从这个角度,岩土工程师通常需要面对和为客户承担更大的风险,需要综合运用地质学、工程地质学、水文学、水文地质学、材料力学、土力学、结构力学以及地球物理化学等多学科、跨专业的理论知识,借助岩土工程的分析方法和所积累的地域工程实践经验,为建设开发项目提供正确、恰当的解决方案,并选用适用的检测、监测方法加以验证,以规避在多种动态变化的不确定性因素

下的工程风险损失。这是岩土工程师们为客户创造的最首要和最基本的价值，并且随着建成环境的日益复杂和社会对可持续发展要求的不断强化，岩土工程师还要特别注意规避对建成环境产生次生灾害和对自然环境质量造成破坏的风险。岩土工程师这种解决问题的方法和过程，显然不同于结构工程中主要依靠的力学（数学）计算和逻辑推理，是一种具有专业性十分独特的“心智过程”，太沙基将其描述为“艺术”或“技艺”（“*Soil mechanics arrived at the borderline between science and art. I use the term “art” to indicate mental processes leading to satisfactory results without the assistance of step-for-step logical reasoning.*”）。

岩土工程技术服务（*geotechnical engineering services* 或 *geotechnical engineering consultancy activities* 或 *geotechnical engineers*）在国际也早已被确定为标准行业划分（SIC: *Standard Industry Classification*）中的一类专业技术服务，如联合国统计署的 CPC86729、美国的 871119/8711038、英国的 M71129。以 1979 年的国际化调研为基础，由当年国家计委、建设部联合主导，我国于 1986 年开始正式“推行‘岩土工程体制’”，其明确“岩土工程”应包括岩土工程勘察、岩土工程设计、岩土工程治理、岩土工程检测和岩土工程监理等与国际接轨的岩土工程技术服务内容。经过政府主管部门及行业协会 30 多年的不懈努力，我国市场化的岩土工程技术服务体系基本建立起来，其包括技术标准、企业资质、人员执业资格及相应的继续教育认定等），促使传统的工程勘察行业实现了服务能力和产品价值的巨大提升，“工程勘察行业”的内涵已发生了显著的变化，全行业（包括全国中央和地方的工程勘察单位、工程设计单位和科研院所）通过岩土工程技术服务体系，为社会提供了前所未有、十分广泛和更加深入的专业技术服务价值，创造了显著的经济效益、环境效益和社会效益，科技水平和解决复杂工程问题的能力获得大幅度的提升，满足了国家建设发展的时代需要。从这个角度，可以说伴随我国改革开放推行的“岩土工程体制”，是传统勘察设计行业在实现“供给侧结构性改革”的最大驱动力。

《岩土工程技术创新及实践丛书》所介绍的工作成果，是按照岩土工程的工作方法，基于前瞻性的分析和关键问题及技术标准的研究所获得的体系性的工作成果，对今后的岩土工程创新与实践具有重要的指导意义和借鉴的价值。

因此，由于岩土工程的地域、材料的变异性和施工质量控制的艰巨性，希望广大同仁针对新的需要（包括环境）继续开展基于工程实践的深入研究，不断丰富和完善岩土工程的技术体系以及市场管理体系。这些成果是岩土工程工作者通过科技创新和研究服务于社会可持续发展专项新需求的一个方面，岩土工程及环境岩土工程（*geo-environmental engineering*）在很多方面应当和必将发挥越来越大的作用，在满足社会可持续发展和客户日益增长新需求的进程中使命神圣、责任重大，正如由中国工程院土木、水利与建筑工程学部与深圳市人民政府主办、23 位院士出席的“2018 岩土工程师论坛”的大会共识所说：“岩土工程是地下空间开发利用的基石，是保障 21 世纪我国资源、能源、生态安全可持续

发展的重要基础领域之一；在认知岩土体继承性和岩土工程复杂多变性的基础上，新时期岩土工程师应创新理论体系、技术装备和工作方法，发展智能、生态、可持续岩土工程，服务国家战略和地区发展。”

《岩土工程技术创新及实践丛书》中的工作成果既是经过实际项目建设实践验证和考验的理论及方法的创新，也是时代背景下的岩土工程与其他科学技术的交叉融合，既为项目参与者提供基础认识，又为岩土工程领域专业人员提供研究思路、研究方法，同时也为工程建设实践提供了宝贵的经验。我相信有许多人和我一样，随着《岩土工程技术创新及实践丛书》的陆续出版，将会从中不断获得有价值的信息和收益。



---

中国勘察设计协会

副理事长兼工程勘察与岩土分会会长

中国土木工程学会

土力学及岩土工程分会副理事长

全国工程勘察设计大师

2018年12月28日



# 前 言

## 1. 直面工程挑战

红层地区地层一般为上部厚度不大的砂卵石覆盖层和下伏厚度变化较大、风化程度及厚度不同的软质基岩（砂岩、泥岩）。此类地区的高层建筑因地下结构的设置基础埋深较大，基础常以卵石不同风化程度的软质基岩作为持力层。而一般的全风化、强风化泥岩其地基承载力约 250kPa~350kPa、天然单轴抗压强度约 0.5MPa~1.5MPa、软化系数约 0.05~0.5、变形模量约 15MPa~25MPa、泊松比约 0.25~0.50，无法满足高层建筑荷载对地基的要求。对于此类地基承载力不足问题，通常采用筏基、桩基及桩-筏等基础方案，基桩因须穿过全风化、强风化泥岩层进入承载力较高的中等风化泥岩层长度较大，而且全风化、强风化泥岩承载力几乎得不到发挥，造成了一定的浪费。岩土工程师面临着对复合地层地基如何处理、如何利用概念设计解决处理后软岩地基满足上部结构荷载要求的难题。

20 世纪 60 年代我国引进碎石桩等地基处理技术和复合地基概念，随着复合地基技术在我国土木工程建设中推广应用。水泥土桩复合地基的应用促进了柔性桩复合地基理论发展，CFG 桩复合地基的应用形成刚性桩复合地基概念，并进一步形成散体材料为增强体的狭义复合地基理论和各种强度黏结材料桩及长-短桩、不同直径组合布置等不同形式增强体的广义复合地基理论，为复合地基技术的应用和扩展奠定了理论基础和坚实的依据。

为能充分利用上覆砂卵石、全-强风化泥岩的天然地基承载力和降低地基基础造价及加速工程建设，自 2005 年开始，中国建筑西南勘察设计院研究院有限公司根据多年工程经验，集勘察、设计、检测及监测等多专业的优势，复合地基理论为基本依据，以砂卵石、全风化-强风化泥岩为处理对象，率先采用大直径素混凝土桩复合地基技术方案解决工程实际问题，并经过近十年的室内试验、现场监测、理论分析和工程验证，最终形成了一套软岩大直径素混凝土桩复合地基技术。

## 2. 突破现行技术标准束缚

《建筑地基基础设计规范》GB 50007 中明确规定：作为建筑地基的岩土可分为岩石、碎石土、砂土、粉土、黏性土和人工填土；复合地基按增强体材料分为刚性桩、黏结材料桩和无黏结材料桩复合地基；复合地基设计应满足建筑物承载力和变形要求；复合地基承载力特征值应通过现场复合地基载荷试验确定，或采用增强体载荷试验结果和其周边土的承载力特征值结合经验确定；《建筑地基处理技术规范》JGJ 79 中明确规定：复合地基为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，适用于处理素填土、杂填土、松散砂土及碎石土、粉土、粉质黏土以及浅层存在欠固结土、湿陷性黄土、可液化土等特殊土地基；《复合地基技术规范》GB/T 50783 中进一步明确规定，复合地基为以桩作为地基中的竖向增强体并与地基土共同承担荷载的人工地基（竖向增强体复合地基）；复合地基中桩体的横截面积与该桩体所承担的复合地基面积的比值为置换

率；刚性桩复合地基为以摩擦型刚性桩作为竖向增强体的复合地基。

无论是《建筑地基基础设计规范》GB 50007、《建筑地基处理技术规范》JGJ 79 还是《复合地基技术规范》GB/T 50783 均遗留了一些不明确的问题，如复合地基所处理对象包括了淤泥和淤泥质土、冲填土、杂填土或其他高压缩性土层等软弱地基，并未明确复合地基是否适用于处理软岩地基；又如采用的竖向增强体应满足处理后地基土和增强体通过一定的沉降量使桩和桩间土共同承担荷载，但并未明确在增强体几乎不发生沉降变形（桩端置入一定强度的中等风化岩层，直径大于 800mm 具有显著置换效应的增强体）或仅由桩顶“刺入”褥垫层使桩间土沉降变形的“复合地基”是否仍符合复合地基理论，而且对荷载作用下无论是桩体变形还是软岩变形均为有限的软岩地基，采用何种工程措施实现“一定的沉降量使桩和桩间土共同承担荷载”；再如刚性桩复合地基中的刚性桩应采用摩擦型桩，但当增强体并非是完全的摩擦型桩而是端承摩擦型、摩擦端承型甚至是桩端进入中等风化泥岩的端承型刚性桩是否能形成复合地基等，诸多问题需要通过工程实践突出束缚才能得以有效解决。

### 3. 面向问题的解决途径

以往砂卵石、软岩地基的利用方法有：（1）嵌岩桩，设计时，桩端进入中等风化或者微风化较完整岩层中，使端阻力充分发挥，并考虑桩身强度对其承载力的控制作用；（2）桩筏基础，桩基与筏型基础联合作用，上部荷载较大、天然地基承载力不能满足要求或者沉降要求较高且采用筏板基础时，将地基能够承担之外的其余上部荷载利用筏板刚度作用通过少量的桩传递至深层地基；（3）复合桩基，在桩顶设置位移调节器或者弹性支座，利用其变形实现承台下地基土能够承担部分上部荷载，一定程度上利用承台下地基土的承载力，实现桩土共同作用。

嵌岩桩通常桩身较长，且不能发挥桩间承载力相对较高的岩石地基的竖向承载力作用，可能出现桩体或桩嵌入的岩基部分发生突变型破坏；桩筏基础发挥桩间岩石地基承载力作用有限，通常发挥不足天然地基自有承载能力的 30%；复合桩基不仅施工难度大和对结构不利，且在设计上与桩筏基础、复合地基难以有效界定。因此，根据复合地基的概念，依据现行国家、行业标准既有的设计方法，结合桩顶设置位移调节器的做法，我们率先提出了在复合地基理论框架基础上，利用基础底板与桩顶之间设置褥垫层可实现桩-土之间相对沉降差的机制，以及利用增强体端部软岩和桩身材料具有一定压缩变形的特性，使桩顶有向上“刺入”“沉降”变形及桩身及桩底向下“刺入”“沉降”变形的设计思想，并将 CFG 桩复合地基设计方法提出大直径素混凝土桩复合地基解决实际工程问题的技术方案。

### 4. 漫长而艰辛的求证历程

#### （1）“牛刀初试”

2005 年初，某工程项目由 5 栋 40 层~42 层高度为 119.90m 住宅塔楼以及 3 层地下室组成，钢筋混凝土剪力墙结构，拟采用筏板基础，地基基础设计等级甲级，抗震设防烈度 7 度。塔楼筏基要求地基承载力特征值不小于 700kPa。因基础底板设计置于厚度较大的强风化泥岩上，按现行标准修正后的强风化泥岩承载力仅为 495kPa，仍不能满足筏基所需的地基承载力要求。若采用桩筏基础，必须以中等风化泥岩作为桩端持力层，桩长基本在 18m 以上，最长达 24m，基础造价较高。根据我们提出的软岩复合地基的技术方法，利用

现行规范中 CFG 桩桩复合地基设计方法,对基底以下强风化泥岩采用设置 C15 素混凝土桩作为增强体和 300mm 厚碎石褥垫层形成复合地基进行处理,增强体直径 1.1m,桩端持力层为强风化泥岩层,桩长 7.5m,间距 3.2m 正方形布置,桩土面积置换率为 0.10。由于此处理方案尚无先例借鉴,因此,实施中对桩端基岩和桩间基岩分别进行了大量的静载荷试验,并对建筑物的沉降进行直至符合沉降稳定标准的近 2 年的变形观测。结果表明,各栋建筑沉降不足 15mm,倾斜值均远小于 1%。限值,节约基础工程造价约 400 万元及缩短施工工期。通过本工程的实践证明,复合地基处理软岩地基方案切实可行,并具有一定的安全性。尤其此项目经受“5·12”汶川地震的考验,增加和树立了我們继续开展软岩复合地基使用的信心。

### (2) 关键技术研究

经过初步实践尝试,确立技术方案可行,但仍存在一些疑问。如现有小直径桩(小于等于 600mm)复合地基设计方法是否完全适合大直径桩(大于 800mm)软岩复合地基设计?是否存在优化空间?此种增强体桩端置于岩基上的复合地基的是否完全符合小直径桩复合地基承载机理等等。为此,我们展开了大直径素混凝土桩复合地基的深入研究,主要内容包括:①桩-土变形协调特征与承载机理研究;②设计理论及设计方法研究;③设计参数优化研究,包括大直径素混凝土桩复合地基的适用范围、设计原则、设计要点、参数取值及修正方法。此过程历经近 3 年的不断补充、调整和完善,建立了一套可供实用但仍须实践检验的设计理论及方法。

### (3) 工程测试验证

工程 I:项目由 10 栋 45 层高 149.4m 住宅楼、2 层地下车库组成,框剪结构、筏板基础埋深 12.60m,最大基底压力约为 900kPa;地基以砂卵石层、含石膏强风化及中等风化泥岩为主。采用大直径素混凝土桩复合地基方案,桩身混凝土强度等级 C20,桩径 1.3m,等边三角形满堂布置,桩间距 3.0m,桩长 12m,桩端嵌入中等风化泥岩深度 300mm,同期进行的数值模拟预测分析结果表明能够满足结构设计要求。项目实施期间,对此工程进行了全程的桩身应力和应变、桩间土压力监测和建筑物沉降观测。结果表明,大直径素混凝土桩基本呈端承型桩受力特征;桩顶下 2 倍桩径范围内出现负摩擦阻力;桩土应力比基本随荷载增大而增大,最终稳定在 15~18 之间;建筑沉降稳定在 15mm~25mm 之间。

工程 II:项目中 8 号住宅楼,地上 32 层、地下 2 层,框架-剪力墙结构,筏板基础埋深 10.70m,最大基底压力约为 600kPa;地基为硬塑黏土层、含卵石黏土层和全风化泥岩及强风化泥岩,上部的硬塑黏土层、含卵石黏土层和全风化泥岩含水量较高,承载力偏低且分布不均。设计采用大直径素混凝土桩组合 0.4m 直径 CFG 桩复合地基,大直径素混凝土桩桩径 1.1m,间距 2.8m 正方形布置,桩长 11m,桩身混凝土强度等级 C20;0.4m 直径 CFG 桩桩长 4.0m~6.0m,间距 1.4m 正方形布置,桩端进入持力层硬塑黏土层或含卵石黏土层不小于 500mm,桩身混凝土强度等级为 C10。项目实施期间对桩身受力及变形、桩间土压力和沉降等进行监测。结果显示,大直径素混凝土桩组合 0.4m 直径 CFG 桩复合地基工作正常;大直径素混凝土桩基本呈端承型特征,CFG 桩基本呈摩擦型桩的受力特征;大直径素混凝土桩顶下 1.5 倍~2 倍桩径、CFG 桩顶下 4 倍桩径范围内出现负摩擦阻力;大直径素混凝土桩与 CFG 桩的桩顶应力比为 4~6,大直径素混凝土桩顶与桩间土应

力比为 12~13, CFG 桩顶应力与桩间土应力之比为 2~4。

工程Ⅲ:项目由 5 幢 33 层高度 108.9m 住宅楼组成,剪力墙结构,设地下室 2 层,筏板基础,基底平均压力约为 700kPa。基础下存在厚度 0.5m~4.4m 全风化泥岩、2.0m~9.7m 强风化泥岩及其下的中等风化泥岩。采用大直径素混凝土桩复合地基,桩径 1.1m,间距 2.6m 正方形布置,混凝土强度等级 C20, 300mm 厚碎石褥垫层。项目实施期间对桩受力及变形、桩间土压力和沉降等内容进行监测。结果显示,桩及桩间土均未达到上部结构设计要求的设计状态;桩上部 3 倍桩径范围存在负摩阻力;大多数桩底压力超过了其桩身最大轴力(荷载)产生压力的 30%,呈摩擦端承型桩的受力特征;平均桩-土应力比值为 2.94;与设计承载力相比,桩轴力较小,桩间土承受压力较为合适。

#### (4) 优化设计研究和标准形成

分析工程实际监测资料发现,按目前采取小直径桩复合地基的设计方法,虽沉降变形与按分层总和法计算结果基本相符,且桩间岩基发挥比较充分,但大直径素混凝土桩复合地基中桩设计承载力发挥不够,存在一些如桩径、桩长、桩间距、桩位布置、褥垫层合理厚度等可以优化的空间。因此,自 2010 年开始,通过设计计算结果和监测成果对比分析,逐步对前期研究成果进行完善及优化,最终于 2014 年初形成了四川省地方标准《大直径素混凝土桩复合地基技术规范》。

#### (5) 工程推广应用

2013 年开始进行大规模推广应用,代表性工程项目:11 幢 33 层住宅楼,地基承载力特征值应不小于 580kPa;45 层商住楼,复合地基承载力特征值 550kPa~650kPa;133m 写字楼,复合地基承载力特征值 700kPa;3 幢 72 层住宅楼,地基承载力特征值应不小于 1300kPa;199m 商业中心,复合地基承载力特征值 1200kPa~1500kPa;333m 高综合大楼,复合地基承载力特征值 1500kPa~1700kPa 等。同时,仍持续对复合地基承载力特征值要求大于 1000kPa 的工程项目进行全过程监测,以期后续补充、进一步优化此项技术提供可靠的资料支撑。

### 5. 认识与展望

通过近十年的研究表明,大直径素混凝土桩复合地基即使桩端进入通常认为不可压缩的软质岩基中,通过在基础下设置一定厚度的褥垫层压缩变形的协调,仍可实现桩和桩间土共同承担荷载。同时也表明,复合地基中增强体承载类型不仅限于摩擦型,端承型同样适用。相比常用的桩-筏基础方案,软岩复合地基更好地利用了软岩的天然承载能力,且成桩工艺可以多种,具有更好的经济性和推广利用前景。

2014 年 6 月,经文献查新结果,“国内外未见通过大直径(大于 800mm)素混凝土桩复合地基的受力变形特征和作用机理进行力学分析测试,建立软岩大直径素混凝土桩复合地基设计理论,研究该复合地基新技术在高层建筑工程中的应用的文献报道。”目前,虽已有较多采用大直径素混凝土桩复合地基处理软岩地基的成功实例,但其理论研究和设计方法仍存在不足,如套用 CFG 桩复合地基的设计方法、设计参数和沉降变形仍依托经验取值以及大直径素混凝土桩对软岩是增强效应还是置换效应起控制作用等问题需要进一步探讨,仍须继续开展深化研究。

通过软岩复合地基技术的研究与应用的十年实践可见,任何一项岩土工程技术创新,都要经过步履艰辛、漫长求证的过程磨砺。但岩土工程的不确定性决定其技术问题层出不穷



穷，且潜能巨大，尚须岩土同仁经受实践考验，共同进取，以促进岩土工程技术进步与发展！

借此机会，我们特别感谢对本书的研究给予大力支持的参与研究的西南交通大学师生和中国建筑西南勘察设计院研究院有限公司设计研发中心以及项目实施单位的全体员工，除了项目组成员的付出外，相关研究顺利推进和完成离不开中国建筑西南勘察设计院研究院的有关领导和专家的大力支持，在此深表致谢。同时，要特别感谢在研究过程中给予过悉心指导的各位专家：于志强教授、李耀家教授级高级工程师、梁勇教授级高级工程师、黄荣教授级高级工程师。感谢中国建筑科学研究院滕延京研究员、沈小克勘察设计大师在百忙中审阅书稿，并撰写序言。

参与本书编写的人员有中国建筑西南勘察设计院研究院有限公司颜管辉级高级工程师、符征营高级工程师、陈海东高级工程师、代东涛高级工程师、贾鹏高级工程师、黎鸿高级工程师、杨致远高级工程师、崔同建高级工程师、章学良高级工程师、罗宏川高级工程师、胡熠博士、纪智超工程师和钟静工程师等。

借此机会，向付出艰辛劳动的参编人员和提供基础材料及工作成果的全体人员致以崇高的敬意和衷心的感谢！

康景文

2018年12月于成都

# 目 录

|                                       |    |
|---------------------------------------|----|
| 第1章 绪论 .....                          | 1  |
| 1.1 复合地基技术 .....                      | 1  |
| 1.2 刚性桩复合地基 .....                     | 4  |
| 1.3 素混凝土桩复合地基技术 .....                 | 7  |
| 1.4 大直径素混凝土桩复合地基技术 .....              | 8  |
| 1.5 本章小结 .....                        | 10 |
| 第2章 面向工程需要的素混凝土桩复合地基问题 .....          | 11 |
| 2.1 概述 .....                          | 11 |
| 2.2 普通直径素混凝土桩复合地基的局限性 .....           | 11 |
| 2.3 大直径素混凝土桩复合地基尝试 .....              | 19 |
| 2.4 基于现行设计方法的大直径素混凝土桩复合地基中存在的问题 ..... | 26 |
| 2.5 本章小结 .....                        | 27 |
| 第3章 现行素混凝土桩复合地基设计方法研究 .....           | 29 |
| 3.1 概述 .....                          | 29 |
| 3.2 素混凝土桩复合地基理论基础 .....               | 29 |
| 3.3 现行素混凝土桩复合地基设计方法 .....             | 34 |
| 3.4 素混凝土桩复合地基与复合桩基特性分析 .....          | 42 |
| 3.5 现行素混凝土桩复合地基设计方法讨论 .....           | 49 |
| 3.6 本章小结 .....                        | 51 |
| 第4章 大直径素混凝土桩复合地基试验研究 .....            | 52 |
| 4.1 概述 .....                          | 52 |
| 4.2 端承型刚性桩复合地基现场试验研究 .....            | 52 |
| 4.3 桩端砂卵石层大直径素混凝土桩复合地基现场试验研究 .....    | 58 |
| 4.4 桩端风化软岩大直径素混凝土桩复合地基现场试验研究 .....    | 63 |
| 4.5 本章小结 .....                        | 70 |
| 第5章 大直径素混凝土桩复合地基工程实验研究 .....          | 71 |
| 5.1 概述 .....                          | 71 |
| 5.2 世纪城大直径素混凝土桩复合地基工程测试研究 .....       | 71 |

5.3 柏仕公馆大直径素混凝土桩复合地基工程测试研究 ..... 78

5.4 塔子山壹号大直径素混凝土桩复合地基工程测试研究 ..... 85

5.5 ICON 云端大直径素混凝土桩复合地基工程测试研究 ..... 94

5.6 大直径素混凝土桩复合地基工程特性分析 ..... 101

5.7 本章小结 ..... 105

第 6 章 大直径素混凝土桩复合地基设计计算方法研究 ..... 106

6.1 概述 ..... 106

6.2 基础-褥垫层-桩-土协同作用分析 ..... 107

6.3 基于筏基-褥垫层-桩-土协同作用的桩、土应力及沉降计算 ..... 112

6.4 地基反力系数计算 ..... 127

6.5 算例验证 ..... 128

6.6 基于桩-土变形协调计算方法的复合地基设计方法 ..... 134

6.7 本章小结 ..... 135

第 7 章 大直径素混凝土桩复合地基深化设计研究 ..... 137

7.1 概述 ..... 137

7.2 大直径素混凝土桩复合地基承载特性数值模拟分析 ..... 137

7.3 大直径素混凝土桩复合地基承载力深宽修正数值分析 ..... 145

7.4 大直径素混凝土桩复合地基变刚度特性数值分析 ..... 147

7.5 基坑围护桩对大直径素混凝土桩复合地基影响数值分析 ..... 152

7.6 复合地基地震动力响应数值分析 ..... 154

7.7 大直径素混凝土桩复合地基设计深化建议 ..... 164

7.8 本章小结 ..... 166

第 8 章 大直径素混凝土桩复合地基技术标准研究 ..... 167

8.1 概述 ..... 167

8.2 勘察要求 ..... 167

8.3 设计 ..... 170

8.4 施工 ..... 175

8.5 验收与监测 ..... 180

8.6 本章小结 ..... 184

第 9 章 大直径素混凝土桩复合地基的工程应用 ..... 185

9.1 概述 ..... 185

9.2 ICON 云端项目大直径素混凝土桩复合地基工程 ..... 185

9.3 半岛城邦项目大直径素混凝土桩复合地基工程 ..... 191

9.4 锦蓉佳苑 1 号楼项目大直径素混凝土桩复合地基工程 ..... 199

9.5 蓝光锦绣城 3 号地块工程大直径素混凝土桩复合地基工程 ..... 202

9.6 其他大直径素混凝土桩复合地基工程 ..... 205

9.7 本章小结 ..... 206

第 10 章 结论与展望 ..... 207

10.1 结论 ..... 207

10.2 展望 ..... 210

研究成果 ..... 212

    专题 1: 成都地区泥质软岩工程特性研究 ..... 212

    专题 2: 大直径素混凝土桩复合地基试验及应用研究 ..... 220

编后语 ..... 243

参考文献 ..... 245



# 第1章 绪 论

我国自然条件和地理条件复杂、多变,根据相关资料显示,国土面积 65% 是山地或丘陵,55% 的面积不适宜人类生活和生产,由此决定了城市化进程中将会面临诸多复杂的地质问题和环境问题。“十三五”规划纲要亦明确规定工程建设按照高质量发展的要求,如何在当前形势下既保证工程质量又节省工程投资显得十分重要和迫在眉睫。而自改革开放以来,国内土木工程建设结构复杂、规模大、体量大、投资大的趋势明显,要求地基提供的承载力越来越高、控制变形的标准越来越严格,使得包括复合地基在内的地基处理技术得以推广和应用,产生了比较好的经济性。

1990 年,中国建筑学会地基基础专业委员会在黄熙龄院士主持下在河北承德召开了我国第一次以复合地基为专题的学术讨论会,交流和总结了当时复合地基技术的应用情况,有力地促进了复合地基技术在我国的发展。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复合地基理论和实践讨论会,进一步促进了复合地基理论和实践水平的提高。近些年来,我国不少学者和专家对复合地基理论和实践开展了比较深入的研究及总结,大量新型复合地基技术涌现,如 CFG 桩(水泥粉煤灰碎石桩)、PCC 桩(现浇混凝土大直径管桩)以及组合型刚性桩复合地基等。

我国建设工程场地和地基土种类较多,如砂卵石土层、岩溶场地和软岩地基,分布广且工程特性复杂,地基处理技术面临着前所未有的难题和挑战。在对特殊场地地基土和特殊性岩土地基的地基处理的工程实践中,遇到了诸多需要解决和深入研究的问题。例如,砂卵石地层中透镜体或软弱夹层的处理问题、岩溶地基处理以及软岩的互层构造持力层选择、崩解性与深层腐蚀性和溶蚀空洞等处理方法以及增强体选型问题。本着对当前复合地基中增强体作用和刚性桩复合地基承载机理的认识及经济合理性考虑,基于现场模型试验和工程实测成果的总结、分析和研究,作者团队所在的单位经过多年的努力,成功研发了用于砂卵石地层地基和红层软岩地基及其组合地层地基的大直径素混凝土桩复合地基(Composite Foundation with Large-diameter Plain Concrete Piles)地基处理技术,形成了相应的技术标准并已得到了广泛的应用和推广,取得了显著的社会效益和经济效益。

## 1.1 复合地基技术

### 1.1.1 复合地基分类

复合地基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

按一定比例设置加筋材料，形成增强体，形成由天然地基土体和增强体两部分组成，从而使上部作用荷载由天然地基土体和增强体共同承担。由于处理地基是由两种或两种以上不同刚度的材料所组成，因而形成的复合地基无论是在水平方向还是在竖直方向，均呈现为非均质性和各向异性。

根据复合地基增强体布设的方向以及承担荷载的工作机理，可将复合地基分成水平向增强体复合地基和竖向增强体复合地基两大类（图 1.1）。水平向增强体复合地基主要是指在水瓶方向增设筋带的人工地基，例如在天然地基水平方向加入土工织物、土工格栅等形成的复合地基；竖向增强体复合地基也称为桩式复合地基，通常简称为桩土复合地基或直接称为复合地基。本书仅涉及桩土复合地基。部分文献或技术标准从不同的角度出发，列出了复合地基的多种分类方法，如按增强体刚度、材料及性状、桩型数量和增强体方向等（表 1.1）。

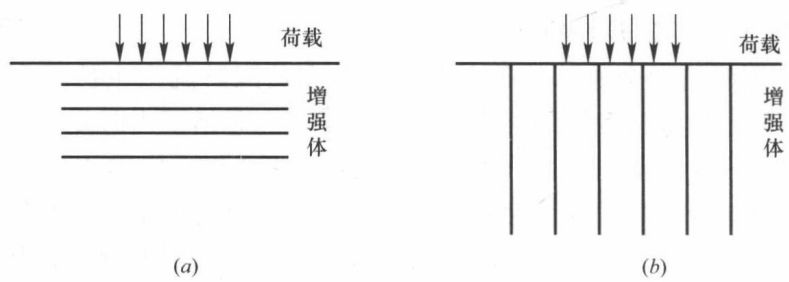


图 1.1 复合地基示意图  
(a) 水平向增强体复合地基；(b) 竖向增强体复合地基

| 复合地基分类        |                 |          | 表 1.1               |
|---------------|-----------------|----------|---------------------|
| 分类方法          | 类型              |          | 桩型举例                |
| 按增强体刚度        | 柔性桩复合地基         |          | 砂桩、碎石桩等             |
|               | 半刚性桩复合地基        |          | 水泥土搅拌桩、旋喷桩、夯实水泥土桩等  |
|               | 刚性桩复合地基         |          | CFG 桩、素混凝土桩、预制桩等    |
|               | 散体材料桩复合地基       |          | 砂桩、碎石桩等             |
|               | 水泥土类桩复合地基       |          | 水泥土搅拌桩、旋喷桩等         |
|               | 混凝土类桩复合地基       |          | CFG 桩、混凝土桩、预制桩      |
| 按增强体材料特性      | 散体材料桩复合地基       |          | 碎石桩等                |
|               | 有粘结强度材料桩复合地基    | 低粘结强度材料  | 石灰桩等                |
|               | 有粘结强度材料桩复合地基    | 中等粘结强度材料 | 水泥土桩、搅拌桩、夯实水泥土桩     |
|               | 有粘结强度材料桩复合地基    | 高粘结强度材料  | CFG 桩、混凝土桩等         |
| 按增强体强度与原土的相关性 | 增强体强度与原土有关的复合地基 |          | 水泥土搅拌桩、粉喷桩、旋喷桩等     |
|               | 增强体强度与原土无关的复合地基 |          | CFG 桩、素混凝土桩等        |
| 按增强体类型数量      | 单一桩型复合地基        |          | 如同一桩型 CFG 桩复合地基     |
|               | 多桩型复合地基         |          | CFG 桩长短桩、CFG 桩+碎石桩等 |
| 按增强体方向        | 竖向增强体复合地基       |          | 砂石桩、水泥土桩、CFG 桩等     |
|               | 水平向增强体复合地基      |          | 土工格栅、土工布等           |