



21世纪土木建筑科技和  
管理创新系列丛书

# 桩伴侣（变刚度桩）

## 对直接基础与间接基础的优化作用

薛江炜 ◆ 著

Pile Partner (Variable Rigidity Pile) Optimized  
Research On Direct And Indirect Foundations



知识产权出版社

全国百佳图书出版单位



21世纪土木建筑科技和  
管理创新系列丛书

# 桩伴侣（变刚度桩）

## 对直接基础与间接基础的优化作用

薛江炜 ◆ 著

Pile Partner (Variable Rigidity Pile) Optimized  
Research On Direct And Indirect Foundations



知识产权出版社

全国百佳图书出版单位

## 内容提要

桩伴侣是中国发明专利“桩头的箍与带箍的桩”的俗称，专业学术名称为“变刚度桩”。本书探索了桩伴侣的作用机理和承载性状，对该技术进行了初步研究。桩伴侣将复合地基、复合桩基等不同形式的桩基整合为“广义复合桩基”，伴侣对桩头的应力分担和改变桩土共同工作的方式有助于桩基的安全和经济上的节约。在岩土工程基础理论方面，本书还推导了等效偏心法证实地基承载力并不唯一。本书可供从事岩土工程、结构工程、道桥工程的技术人员参考，也可以作为土木类研究生教学参考书。

责任编辑：段红梅 祝元志

责任校对：韩秀天

封面设计：刘 伟

责任出版：卢运霞

## 图书在版编目（CIP）数据

桩伴侣（变刚度桩）对直接基础与间接基础的优化作用 / 薛江炜著. —北京：知识产权出版社，2014. 1

ISBN 978 - 7 - 5130 - 2311 - 5

I. ①桩… II. ①薛… III. ①复合桩基 - 研究 IV. ①TU473. 1

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2013）第 230806 号

## 桩伴侣（变刚度桩）对直接基础与间接基础的优化作用

薛江炜 著

---

出版发行：知识产权出版社

社 址：北京市海淀区马甸南村 1 号

邮 编：100088

网 址：<http://www.ipph.cn>

邮 箱：[bjb@cnipr.com](mailto:bjb@cnipr.com)

发行电话：010 - 82000860 转 8101/8102

传 真：010 - 82005070/82000893

责编电话：010 - 82000860 转 8513

责编邮箱：[13381270293@163.com](mailto:13381270293@163.com)

印 刷：北京中献拓方科技发展有限公司

经 销：新华书店、网上书店及相关销售网点

开 本：787mm × 1092mm 1/16

印 张：15.5

版 次：2014 年 1 月第一版

印 次：2014 年 1 月第一次印刷

字 数：253 千字

定 价：68.00 元

ISBN 978 - 7 - 5130 - 2311 - 5

---

出版权专有 侵权必究

如有印装质量问题，本社负责调换。

## 前 言

桩伴侣是中国发明专利“桩头的箍与带箍的桩”(200710160966.1)的俗称:桩头侧面上下一定高度范围设置一闭合环形箍,箍的内径大于桩头的外径,箍与桩是分开的,桩与桩头的箍通过桩间土和垫层的传力来协同工作,组合成带箍的桩。因其具有对桩竖向支承刚度简单灵活调整的特性,故称其专业学术名称为“变刚度桩”。为了深入了解桩伴侣的作用机理和承载性状,本书对该技术进行了初步研究。本书主要的研究成果、创新和结论包括以下几方面。

(1) 桩伴侣的发明路径和发明目的在于人为地将桩土共同受力体的某些环节削弱或增强,改变桩土共同工作的方式,使承载和沉降性状向预定的方向发展,实现工程上可以接受的较大总体沉降与较小差异沉降和较小工后沉降,从而极大地促进岩土工程的技术进步和经济上的巨大节约。

(2) 认为以相对的深和浅来划分基础类型不尽合理,提出用“直接基础”和“间接基础”的表述来划分基础类型,直接基础可简单定义为能够直接将荷载传递到上层天然地基的基础;间接基础也可定义为穿过上部持力层将荷载传递到下部持力层并间接影响上层天然地基的基础,这样一种分类方法同时包含了地基与地基两方面的因素,更客观地反映地基与基础之间相互依存、相互影响、相互作用的关系。

(3) “用沉降量换承载力”的等价说法或具体解释是地基承载的良性循环,即“上部荷载增大→压实地基土→地基土性质改善→可以承担更大的荷载→进一步压实地基土→地基土性质更加改善→……”;思考或质疑了现有地基承载力研究绝对对称体系假设的合理性、很长的滑移线是否具有工程意义、滑移线形式是否可能因“弹性核”破裂而改变、作用于滑移线上的附加应力对抵抗剪切滑动的贡献能否被忽略等问题;

探讨了设置桩伴侣对直接基础破坏形式的影响。

(4) 选择适宜的滑移线可以将地基承载力问题转化为倾覆问题来研究。有桩伴侣的地基基础非常符合较小刚体位移的“圆弧滑动和向下冲剪”假设,滑移线是以基础底板宽度为直径的一个半圆,圆心位于基础底板的中心,基于莫尔库伦强度理论,以符拉蒙的附加应力解答推导出考虑附加应力和土自重的滑移线上土剪力对基底中心抵抗力矩的解析解,将所有的倾覆力矩归结为等效偏心,得到了评价地基承载力的等效偏心法;与通常的地基承载力的计算方法不同,等效偏心法不仅考虑土体性质、基础宽度、埋深等因素,同时考虑了上部结构的等效偏心来综合评价地基承载力,不同的等效偏心对应不同的地基承载力值,等效偏心越小则承载力越大。经初步对比,不考虑地震等水平荷载形成的等效偏心因素,在静力荷载下太沙基公式的极限承载力所对应的相对等效偏心  $\Delta FB$  在 0.154 左右,而承载力标准值所对应的相对等效偏心  $\Delta FB$  在 0.188 左右。以等效偏心法分析了桩伴侣“止沉”与“止转”的计算思路,中桩对于“止转”力矩的贡献很小,基桩设置应当重点加强边桩、角桩。

(5) 论述了间接基础的缺点;进行了复合桩基优化设计对间接基础改进的局限分析;提出个别安全系数的概念解释和质疑常规变刚度调平“内强外弱”的结果,指出当只有基础底板沉降均匀这唯一的一个控制参数时,间接基础调平只能调整桩下部支承刚度的单一手段是产生变刚度调平优化设计调平的结果不符合常理的重要原因;桩伴侣具有调整桩上部支承刚度的能力,可均匀布桩,甚至局部加强边桩、角桩,增大抵抗整体倾覆的能力,适当调整桩顶与基础底板的距离,即边桩、角桩预留沉降大一些,中桩预留沉降小一些就可以实现变刚度调平。

(6) 比较分析了桩伴侣的类似技术;指出应用刚性桩复合地基时,应当注意地下室井坑破坏隔震、褥垫层模量影响隔震,此外,常规采用褥垫层的刚性桩复合地基还存在承载力“被平均”、基础既经济又不安全、“流动补偿”导致垫层流失等缺点。

(7) 按照有限元收敛准则判断桩伴侣的极限承载力有不同程度的提高,但有限元模拟和现场实测证明伴侣对于按照传统方法判定承载力的无显著影响,桩伴侣承载力的提高依赖于沉降量的增大和土塑性的充分发挥,需要打破土原有的本构关系并建立新的体系,有限元软件本质

上难以模拟出现“拐点”的“止沉”曲线，最好的方法还是试验；研究了刚柔桩复合地基静载荷试验时设置伴侣对桩土应力比的影响，设置伴侣后桩顶应力大幅度减小，伴侣附近桩间土的应力大幅度提高，证实伴侣较好地起到了替桩头分担荷载作用，伴侣的作用可解释为由于桩顶向上刺入垫层发生剪胀增大了垫层的内摩擦角，也可以理解为由于伴侣的约束作用增大了桩顶上方垫层土柱受到的被动土压力。

(8) 提出整合复合地基和复合桩基的桩伴侣的承载力计算公式并以位移调节装置试验的数据进行了验证，建议复合地基技术规范修改为：“仅采用褥垫层技术的刚性桩复合地基中的混凝土桩应采用摩擦型桩，如果有可靠措施能够保证桩土相继同步共同工作时，桩顶与基础底板之间的土或垫层不会发生整体剪切破坏或其他滑移型的破坏，则刚性桩复合地基中的混凝土桩应采用端承效果好的桩型，桩端尽量落在好土层上”；推导了桩伴侣的整体承载力安全系数，只要下部持力层稳定安全系数总能保证大于等于2；建议对于不同的抗震设防等级的建筑，采用不同的安全系数，用适度的不均匀沉降作为检验建筑工程实体质量的外部荷载，衡量建筑工程的施工和设计质量水平；桩伴侣具有“止沉”的沉降特性，沉降主要是上部地基土的压缩，提出以影响深度小的直接原位压板试验作为沉降量计算和桩伴侣设计的方法，以及“整体倾斜”极限状态作为变刚度调平“概念设计”的实用方法；应用桩伴侣对某处理桩缺陷事故案例合理方案进行优化。

(9) 建议将承台与土之间的摩擦力小或地基土约束力差的低承台桩基称为“非典型高承台桩基”，将其从“典型的低承台桩基”中细分出来；不改变直接基础的属性，有限元数值模拟桩伴侣的改进证实：伴侣是承台向地基土传递水平荷载的可靠媒介，即使承台与土之间摩擦力小，也可大幅度减小基桩的应力和位移，对于桩身范围地基土模量低的“非典型高承台桩基”的水平承载性状也有一定的改善；低承台桩基的水平承载性状本质上取决于桩间土抵抗水平荷载的能力；当桩顶与基础底板预留沉降空间，将传统的桩基础由间接基础改造为直接基础后，数值模拟表明桩与承台脱离开更加促进了伴侣作用的发挥，水平荷载作用下桩身应力大幅度降低；伴侣自身受到的内力较大，且较为复杂；提出罕遇地震时伴侣可作为耗能构件、首先牺牲伴侣的基桩抗震的概念设计方法。

岩土工程是土木工程的重要部分，是一项传统而又现代的工程技术，本人作为桩伴侣的发明者，对相关技术的开发应用进行了较为深入的研究，目前该技术还在不断提升之中，希望能与广大专家学者及读者交流。

## 目 录

|                                         |     |
|-----------------------------------------|-----|
| 第一章 绪论 .....                            | 1   |
| 1.1 概述 .....                            | 1   |
| 1.2 桩伴侣的“发明路径” .....                    | 7   |
| 1.3 地基基础新的分类方法：直接基础和间接基础 .....          | 22  |
| 1.4 研究内容 .....                          | 25  |
| 第二章 对地基承载力的再认识以及桩伴侣对直接基础的优化 .....       | 27  |
| 2.1 地基承载力研究综述和存在的问题 .....               | 27  |
| 2.2 评价地基承载力新方法“等效偏心法”的推导过程 .....        | 48  |
| 2.3 “等效偏心法”与其他承载力计算方法的对比 .....          | 57  |
| 2.4 桩伴侣“止沉”与“止转”的计算思路和基桩设置的<br>讨论 ..... | 62  |
| 第三章 间接基础存在的问题和引入“伴侣”的改进 .....           | 68  |
| 3.1 间接基础的优点和缺点 .....                    | 68  |
| 3.2 复合桩基优化设计对间接基础改进的局限分析 .....          | 78  |
| 3.3 褥垫层复合地基技术对间接基础改进的缺陷分析 .....         | 89  |
| 3.4 与桩伴侣类似技术研究综述与对比分析 .....             | 100 |
| 3.5 桩伴侣对间接基础改进方式的探讨 .....               | 117 |
| 第四章 竖向荷载作用下桩伴侣工作性状研究 .....              | 119 |
| 4.1 基于计算不收敛准则的桩伴侣极限承载力有限元分析 .....       | 119 |
| 4.2 桩伴侣竖向承载计算初探 .....                   | 126 |
| 4.3 桩伴侣安全度评价初探 .....                    | 137 |
| 4.4 桩伴侣沉降量研究初探 .....                    | 142 |
| 4.5 桩伴侣在处理基桩缺陷事故中的“应用”一例 .....          | 147 |
| 第五章 水平荷载作用下桩伴侣工作性状研究 .....              | 150 |
| 5.1 研究基桩水平承载性状和概念抗震的重要性 .....           | 150 |



|                                |     |
|--------------------------------|-----|
| 5.2 非典型高承台桩基与带伴侣的桩工作性状比较 ..... | 161 |
| 5.3 水平荷载作用下带伴侣的桩工作性状数值分析 ..... | 171 |
| 5.4 伴侣与承台工作性状的初步分析 .....       | 180 |
| 第六章 结论和今后的研究方向 .....           | 199 |
| 参考文献 .....                     | 204 |
| 附录1 桩头的箍与带箍的桩 .....            | 228 |
| 附录2 一种改变桩受力状态的方法 .....         | 232 |
| 附录3 曾发表的主要论文及科研情况 .....        | 237 |
| 后记 .....                       | 239 |

# 第一章 绪 论

## 1.1 概述

1964年12月13日，毛泽东<sup>[1]</sup>在周恩来第三届人大报告的草稿上加了一段话：“人类的历史，就是一个不断地从必然王国向自由王国发展的历史。这个历史永远不会完结……在生产斗争和科学实验范围内，人类总是不断发展的，自然界也总是不断发展的，永远不会停止在一个水平上。因此，人类总得不断地总结经验，有所发现，有所发明，有所创造，有所前进……”这段关于辩证法的论述讲客观事物是发展的、变化的，永远不会停止；讲必然与自由的对立统一，正确与错误的对立统一；讲得精彩动人，时隔近半个世纪后读来仍觉自然、清新、时尚。

自人类由恩格斯<sup>[2]</sup>所称的“攀树的猿群”，通过劳动逐步走下树杈，经历了从狩猎到农业、从洞穴到房屋的漫长过程。房屋是一种创造物，一种新的事物，一种独立于洞穴观念的庇护所<sup>[3]</sup>。房屋总是从自然形式中找到灵感。这些形式的建构来源于土地上的各种原料，如泥土和芦苇。房屋的造型或来自洞穴的“圆”，或来自树木的“直”。源于人类的“巢居”生活的“干阑式建筑”其形成过程和典型的外貌的追溯历史如图1-1<sup>[4]</sup>所示，从广义上讲，地基处理技术的“基桩”与“建筑”同步诞生。

木屋采用高架，主要是为了临空避水防潮，但其采用柱桩合一的“高承台桩基”，显然需要昂贵的代价才能满足其竖向和水平“承载力”的要求，于是人类在建筑工程地基处理领域进行了第一次“扬弃”，放弃了“树桩”、“木桩”，将直立行走的双脚和房屋（基础）直接踏在坚

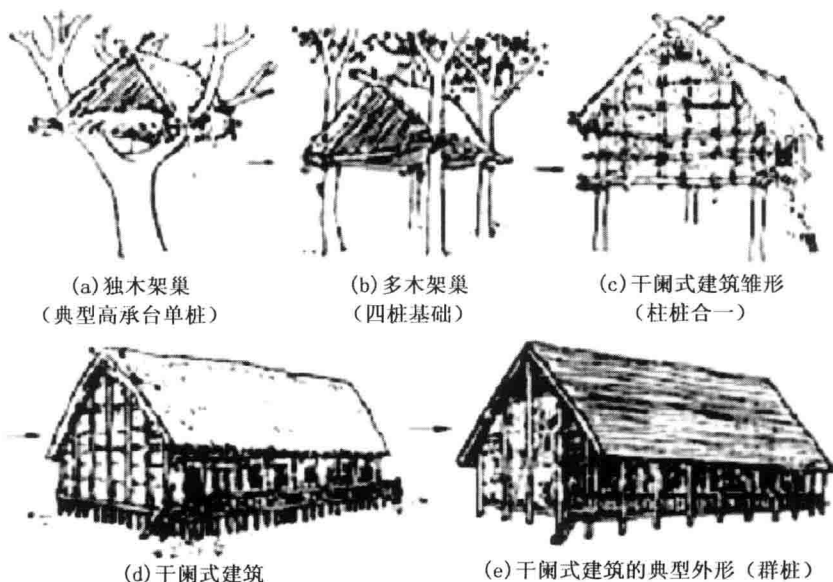


图 1-1<sup>[4]</sup> “干阑式建筑”及其“基桩”的形成过程

实的大地上。

万丈高楼平地起！人类的建筑实践活动不可能从天而降，而是根植于我们赖以生存的大地，数千年来，浅基础和天然地基是房屋建筑地基基础形式的主流，只是在特殊的情况下才选择桩基础，例如桥梁。1953年，四川成都青杠坡出土了一些汉代墓砖，年代约在公元前200年至公元200年间，其上所刻画の木桥显示每排桥墩备有木桩4根，桩顶设有木梁构成排架，桥上辎车骏马奔驰而过，栩栩如生。它是我国用木桩造桥的最早佐证之一，是岩土工程史上难得的珍品（图1-2<sup>[4]</sup>）。

随着建筑材料、建造技术的发展，建筑高度和基底附加应力的增大，浅基础和天然地基逐渐无法满足承载力或沉降的要求，人类开始了深基础或人工地基的探索。上海嘉定法华塔位于上海市嘉定区嘉定镇，始建于元代至大年间，为七层四方砖木结构楼阁式塔，塔高40.83m。在对法华塔进行修缮的过程中，经清理和测绘，发现法华塔塔心室地面呈正方形，地表以下为三层青砖，厚约33cm，砖间用糯米浆白灰泥勾缝。青砖以下为四层毛石条基础，相邻两层石条相互垂直，石条规格多为长0.9m、宽0.2m、厚0.25m，石条基础以下的地基采用满堂木桩加

固，木桩长 1.5m 左右，直径 9~12cm。在满堂木桩的中间又用石条砌筑一长方形地宫，上盖石板（图 1-3<sup>[5]</sup>）。

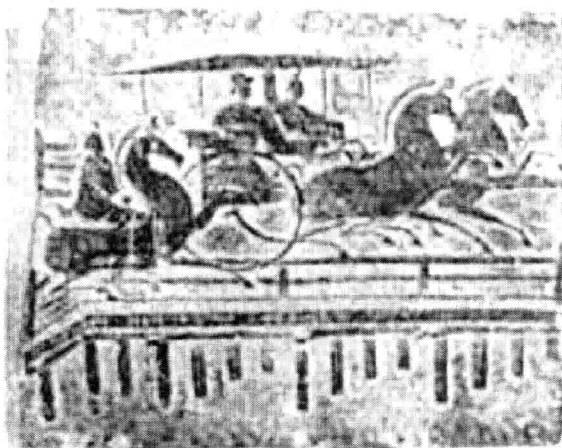


图 1-2<sup>[4]</sup> 汉代墓砖画上的木桩造桥

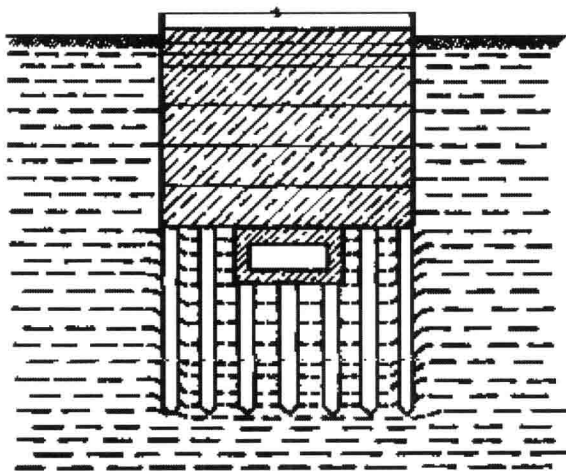


图 1-3<sup>[5]</sup> 上海嘉定法华塔地基处理示意图

在水泥和现代基桩施工技术发明以前，尽管基桩的使用经历了漫长的历史时代，但能利用的桩型只是由天然材料做成的桩体，如木桩和石桩，长度有限，竖向荷载下的变形模量或支承刚度也与天然地基处于基本相当的数量级，这样，人类在建筑工程地基处理领域进行了第二次

“扬弃”，并且无意间自然地实现了桩土的“共同作用”（即复合桩基）。

现代意义上基桩的应用和发展与工业革命相伴：一方面，工业技术为地基工程提供了强大的生产手段；另一方面，包括基桩在内的建筑业服务于现代工业和社会发展的要求。作为土木工程师，我们不仅能看到地上耸立了多少宏伟的建筑，我们还能感知地下的岩土和基桩不事张扬地默默承受。新中国成立以来，随着我国社会主义建设事业的飞速发展，作为地基处理的各种柔性桩、半刚性桩、刚性桩复合地基和桩基础已逐渐成为工程建设中常规的基础形式。尤其是近年来超高层和重工业厂房等建筑物、构筑物的兴建，更加促进了刚性桩日新月异的发展，强度更高，体量更粗、更长，形成多种工艺、多种桩型、多种构造。在竖向增强体的发展过程中，世界各国的岩土工程师们进行了和进行着无数次大大小小的“扬弃”。

“扬弃”就是“否定之否定”，前提是继承，目的是发展，特征是标新立异，本质是反传统。笔者申报并获得授权的中国发明专利“桩头的箍与带箍的桩”，就是在综合了桩基础、褥垫层复合地基、桩帽、大直径薄壁筒桩、预留净空、位移调节等众多现有技术基础上的一个“杂交”体，其命名也颇有创意。

（1）直观上可称为“套箍桩”，只是桩周围有“箍”并无新意，也不会获得发明专利授权。

（2）“箍”与竖向增强体之间分开，使得两者之间在水平与竖向的受力和变形既相互独立又相互影响，特别是当调整竖向增强体的顶部与基础底板（承台）之间的距离或垫层的模量时，其整体竖向支承刚度也可相应地发生较大改变，因此，“带箍的桩”专业的学术名称不妨称为“变刚度桩”，或“变刚度调平桩（变刚度的根本目的是调平底板沉降均匀）”。

（3）竖向增强体的顶部与基础底板（承台）之间预留净空或设置低于模量较低的垫层后，虽然降低了其初始支承刚度，但随着净空减小或垫层压实，竖向增强体的后期支承刚度逐渐恢复或增大刚度降低的阈值，具有柔中带刚或刚中带柔的工程特性（褥垫层复合地基也具有区别于桩基础的类似的特性），因此，取中国古代著名女性将领的名字，称为“木兰桩”、“桂英桩”也很生动形象。

（4）刚性竖向增强体竖向承载能力虽然很强，但作为细长的杆件，

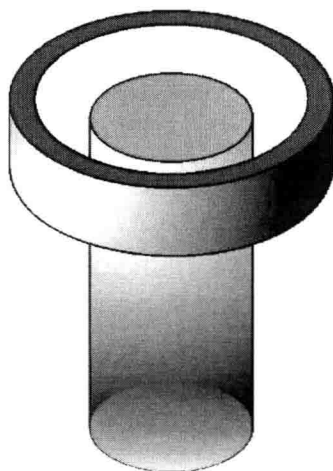


图 1-4 “桩伴侣”示意

其水平承载能力却很弱，特别是桩头通常是基桩最薄弱的部位需要额外增强，工程实践中也有局部增大桩头尺寸、局部加强桩身上部配筋或者对空心桩顶局部填充等做法和规定，但都是依附于竖向增强体上并不独立，而同样是增强，“箍”与竖向增强体之间却是分开的，另外，类似于结构专业无梁楼盖的柱帽，“箍”还具有增强基础底板（承台）刚度的作用，再考虑到“箍”不仅仅分担竖向增强体的水平荷载也间接影响其竖向承载等多种因素，因此，笔者更倾向于称其为桩伴侣（Pile Partner），或者是伴侣桩（Partner & Pile）、侣伴桩（Pile with Partner）这样一个貌似与工程不搭界，甚至带有点文艺和浪漫情愫的名称，在此，摘录借用著名诗人舒婷的代表作《致橡树》的诗句却可以解释、阐述和理解桩伴侣名称的合理性。

我如果爱你——  
绝不像攀缘的凌霄花，  
借你的高枝炫耀自己……  
我必须是你近旁的一株木棉，  
作为树的形象和你站在一起……  
你有你的铜枝铁干……  
我有我的红硕花朵……  
我们分担……

我们共享……

仿佛永远分离，

却又终身相依。

……

幸运的是，生逢鼓励创新、提倡“偏执”的时代，桩伴侣不仅是岩土论坛、QQ 群等网络平台近年的热门词汇，而且，桩伴侣及其初步理论在业内也得到了一定程度的认可和支持鼓励。感谢建设部 2008 奥运工程及全国重大基础工程创新技术成果应用交流会、第三届全国岩土与工程学术大会、2012 年全国吹填土地基处理学术研讨会、2012 土木工程与交通运输国际学术会议（ICCET 2nd）等主办方所给予笔者专题报告介绍桩伴侣的机会，同时，随着一些文章的发表，桩伴侣已成为工程索引 EI 检索的正式条目<sup>[309~312]</sup>。

实践是检验真理的唯一标准，笔者多年来一直没有放弃向业主、设计单位和施工单位尽力争取桩伴侣在工程中应用的机会，然而，虽然业界专家学者基本认可桩伴侣在理论上或多或少的“正能量”，但由于建筑工程的单件性、投资巨大等特性，以及设计严格遵守“规范”不逾矩，传统上对于沉降和承载力的认识以及对于基桩承受地震等水平荷载的忽视，甚至还有近年国内房地产业投资火爆“不差钱”等原因，桩伴侣目前仍无工程应用，桩伴侣的研究“很差钱”。

因为没有工程实例，本书的写作框架和行文特征难免与常规的工学论著有所不同，于是，在研究深度上的欠缺以增大广度加以弥补，在数学工具应用难度上的欠缺以基础理论的突破加以弥补，在具体工程计算上的欠缺以一般的理论假设和推导加以弥补，这样本书的研究也就天然地存在着假设有余而求证不足、创新有余而数据不足的缺陷。

本书始终遵循着揭示问题——解决问题的最基本的研究路线，事实上，桩伴侣技术主要就是针对目前桩基础或褥垫层复合地基这两种常规的基桩构造形式所各自存在缺陷而提出的改进，但广大学者和工程技术人员对褥垫层复合地基已研究应用数十年，桩基础甚至应用数十万年，相关研究已非常精细、精准、精致，而本书的研究对象桩伴侣还仅仅是一个新生儿，作为多种既有技术的“杂交”体，桩伴侣的“DNA”结构（即构造形式）显然更加复杂，初期的研究以笔者匹夫之力不可能达到目前基桩计算和理论推导的深度和难度，而且在岩土工程的研究中

也更应当注重基本概念的把握和经验数据的修正,因此,本书的研究方法首先应将复杂问题简单化,抓住主要矛盾和矛盾的主要方面,影响或变革业内长期形成的惯性思维和路径依赖,同时为后续研究和工程应用抛砖引玉。

感谢并期待您的理解、支持或参与,欢迎具有实质性内容的意见和建议。谢谢!

## 1.2 桩伴侣的“发明路径”

专利的发明有运气和灵感的因素,往往不合常理,但也遵循一定的客观规律。本节概要回顾桩伴侣发明过程中的“所见所闻”——“路径”,印证桩伴侣“怎么来?为啥来?来干啥?”的历史逻辑。本节的部分内容参考了笔者的硕士论文《刚性桩的头、身、脚——地基处理领域专利创新方法的研究和实践》的研究成果<sup>[7]</sup>。

### 1.2.1 “桩前时代”

所谓“桩前时代”,有时代的特征,反映了工业文明的程度相对较低的“生态”状况,但也并不特指一定的时代,更重要的是代表了一种岩土工程研究和应用的“时尚”或设计人员的“心态”,是对“天然”(地基)的“向往”、“敬畏”和“崇拜”,“桩前时代”有两位杰出代表:一位是浮基础,又可称为浮力基础或补偿基础;另一位是各种薄壁空间结构式基础,它们在本质上都是强调对天然地基最大限度地利用,对桩伴侣发明和研究有很大的启发。

(1) 如果是淤泥土,浮基础的概念很好理解:将一个重量很大的建筑物部分地沉入地下,整个建筑物就象浮在水中的船那样会浮在淤泥上面,但由于浮力概念是专指基础低于地下水位时所引起的静水浮托力,浮基础或浮力基础的表述并不准确,而且对于其他较为坚硬的地基也无法解释。为此,墨西哥工程师 Zeevaert(泽法尔特)称它为补偿性基础,意思是指建筑物的重量被移去的土重所平衡,它从本质上包含了更为广阔的概念,补偿性基础就是在建筑物设计中使建筑的重量约等于建筑位置移去的总土重(包括水重)的基础。显而易见,设置了利用地下空间(非实心)的地下室的箱形和筏形基础(包括桩—箱和桩—



筏基础)都可按照补偿基础原理进行设计<sup>[10]</sup>。20世纪60年代,日本利用补偿性基础原理在大阪湾深厚软淤土上成功建成几幢30层高楼,采用5层地下室的卸土几乎补偿了上部结构的绝大部分荷载(韩选江<sup>[11]</sup>对此有专门研究)。

由此引发思考:通常高层建筑会设置地下室,根据地下室埋深与上部结构的荷载的对比关系基础处于一定比例的补偿状态。若要达到完全补偿,可能会因深基坑施工难度较大而不经济,设置竖向增强体(打桩)技术的进步以及施工时可不必进行基坑开挖的优点从而成为高层、超高层建筑地基基础的优选。在由一定比例(部分)补偿的天然地基基础向设置基桩的人工地基基础的转化过程中,能否平稳地过渡?如何最大限度地利用原有天然地基的补偿性?

另外,由于补偿状态不同,高层建筑主楼与裙房之间的沉降差异如何协调?特别是当设置竖向增强体满足承载要求后,一方面需要被动地对主楼与裙房各自的沉降进行精确计算<sup>[12]</sup>,另一方面,能否人为主动地控制施工和使用各阶段的沉降从而避免主楼与裙房之间的后浇带?

(2)薄壁空间结构式基础是指各类地基与基础的接触面为折曲面的基础形式,包括锥壳式基础、条形长折板基础及折板式浮筏基础等,能和新填土(素填土、杂填土)、软土(淤泥及淤泥填)等软弱地基很好地共同工作,空间作用使基础下的受力地基产生三向受力状态,同时又使基础与地基接触面上产生与基础转动方向相反的摩擦力及摩擦弯矩,根据薄壁结构式的基础受力后产生弹性变形的特性可以将其设计成弹簧垫式的结构直接放在柱子与地基之间,吸收一部分地基传来的地震能转化为基础的变形能,而将剩下的一部分地震能再传到上部结构,这样就减少了上部结构的震害<sup>[13]</sup>。

梅国雄、周峰、黄广龙、宰金珉<sup>[14]</sup>研究了补偿基础出现较大沉降的现象,认为这可能与目前普遍采用的施工方法有关。基坑开挖过程对于基坑底面来说相当于一个卸载过程,在卸荷作用下,在基底以下一定范围内将产生拉应力(或回弹应力),基坑将发生回弹变形,坑底土也随即发生隆起,理论研究和实测结果均显示坑底土体的隆起量并不均匀,而是呈倒扣的“锅底形”,基坑中间的土体隆起量大,四周的隆起量小。为了方便施工和保持坑底土的平整,基坑底隆起的土体通常情况下均被挖去。在这种情况下基坑底土进入再压缩阶段时,基坑底面实际