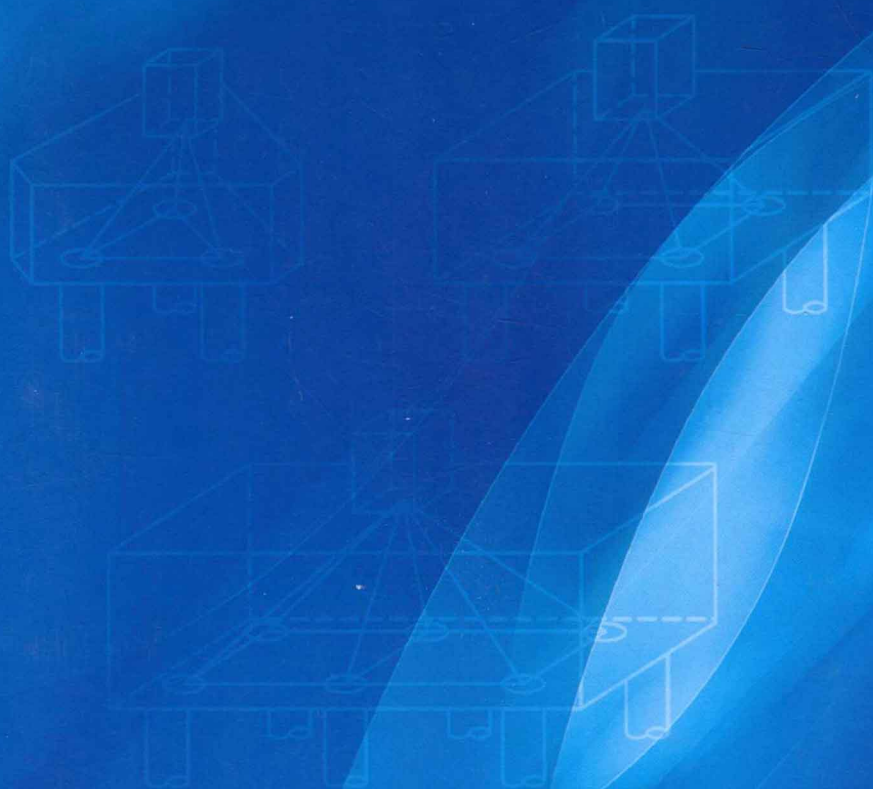


厚承台空间桁架模式 理论与试验

戴国亮 卢建峰 龚维明 著



中国建筑工业出版社

厚承台空间桁架模式理论与试验

戴国亮 卢建峰 龚维明 著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

厚承台空间桁架模式理论与试验/戴国亮等著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2012. 12
ISBN 978-7-112-14902-5

I. ①厚… II. ①戴… III. ①空间桁架—研究 IV. ①TU323.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 281031 号

本书是研究厚承台受力机理的一本专著, 该书系统介绍了厚承台的受力机理和
设计方法, 以及具体实际工程中的应用, 是东南大学课题组 15 年的研究成果总
结。全书包括基本理论、空间桁架模型的建立、承载力计算、设计方法、模型试
验、工程应用、结论与展望等内容。

本书可供从事高层建筑和大型桥梁桩基础设计的工程技术和科研人员, 以及
高等院校师生参考使用。

* * *

责任编辑: 王 梅 杨 允
责任设计: 董建平
责任校对: 张 颖 赵 颖

厚承台空间桁架模式理论与试验

戴国亮 卢建峰 龚维明 著

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)
各地新华书店、建筑书店经销
北京汉魂公司制版
北京富生印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 15¼ 字数: 378 千字
2012 年 12 月第一版 2012 年 12 月第一次印刷
定价: 39.00 元
ISBN 978-7-112-14902-5
(22947)

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)

前 言

随着高层建筑和大跨径桥梁的兴建，桩基承台基础得到了广泛的应用。桩基承台一般在三维应力状态下工作，且受局部应力干扰严重，受力较为复杂，其承载力计算问题一直没有得到很好解决。近年来国内外对桩基承台受力机理进行了探索性研究，在厚承台中采用传统受弯体系的计算模式日益受到挑战和质疑，桁架模型得到广大研究人员的验证，而且被认为是计算理论的一次变革。

东南大学土木学院课题组对厚承台已进行了 15 年的研究，在江苏省科技厅 (BJ97024)、“十一五”国家科技支撑计划项目 (编号 2006BAG04B00)、江苏交通科技项目 (编号 04Y029) 资助下，以大型桥梁和高层建筑为工程背景，进行一系列室内和现场试验研究。结合本课题组多年来对厚承台进行的理论研究、试验分析、有限元模拟和现场检测，现将成果在本书中进行系统总结，在江苏省优势学科 (PAPD) 的资助下，使得本书得以出版。全书包括基本理论、空间桁架模型的建立、承载力计算、设计方法、模型试验、工程应用、结论与展望等内容。本书建立了一套系统的以空间桁架理论为依据的计算方法，推广应用该成果必将取得显著的社会和经济效益。

鉴于影响桩基厚承台受力因素的多样性，其设计方法还有待于进一步研究和实践，我们深信，在广大同行的共同努力下，桩基厚承台的设计方法会得到进一步的完善，并在我国桩基工程中得到广泛应用。

在编写本书的过程中，得到了各位前辈及同行的鼓励和支持，尤其感谢已故的恩师蒋永生教授，也得到了郭宏磊、卢波等博士研究生和吴俊、林松、赵飞宇、刁莹露和余奇异等硕士研究生的帮助，更得到了许多设计人员、施工人员、建设单位的鼎力相助。由于给予帮助的人实在太多，作者难以在此一一致谢，敬希见谅。

限于作者水平，本书必定存在不足甚至错误之处，敬请读者批评指正。

戴国亮 卢建峰 龚维明

撰于东南大学

2012. 10. 11

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 国内外研究现状及存在的问题	2
1.2 国内外规范介绍	7
1.3 空间桁架理论	9
1.4 本书的主要研究内容	11
第 2 章 控制截面法与空间桁架法的界定	12
2.1 采用控制截面法的有关规定	12
2.2 采用空间桁架法的有关规定	17
2.3 桩基承台已有试验数据分析	22
2.4 “薄”、“厚”承台的界定	30
2.5 本章小结	32
第 3 章 承台有限元分析及空间桁架模型	33
3.1 承台有限元分析	33
3.2 模型建立原则及压杆的简化	46
3.3 常见柱下承台桁架模型	47
3.4 常见墙下承台桁架模型	47
3.5 软化空间桁架模型	56
3.6 本章小结	62
第 4 章 厚承台的承载力计算	63
4.1 拉杆屈服承载力	63
4.2 压杆劈裂承载力	63
4.3 压杆两端部的承载力	67
4.4 桩基相对刚度系数	69
4.5 按刚性承台要求确定承台厚度	73
4.6 桩基承台桩反力分配计算方法	81
4.7 本章小结	83
第 5 章 厚承台设计方法	84
5.1 卢建峰方法	84
5.2 卢波方法	92
5.3 本章小结	100
第 6 章 室内模型试验研究	101
6.1 柱下六桩承台试验	101
6.2 墙下的六桩承台试验	111

6.3	大型集群桩基承台试验（九桩和十六桩）	117
6.4	大型集群桩基承台试验（三十四桩）	148
6.5	本章小结	181
第7章	试点工程测试	182
7.1	南京豪景花园住宅	182
7.2	宿迁市电信大厦	188
7.3	新疆伊犁河大桥	193
7.4	苏通大桥	200
7.5	湖南赤石大桥	207
7.6	本章小结	230
第8章	结论与展望	231
8.1	结论	231
8.2	展望	231
参考文献		233

第 1 章 绪 论

桩基承台是广泛应用于工业与民用建筑和大、中型桥梁等工程中的重要构件,它承托上部结构,并将上部荷载传给地基,其作用类似转换结构。承台平面尺寸由桩的数量及布桩方式确定,厚度随着柱、墙(或墩)轴力和单桩承载力的增大而增加。承台通常都处在三维应力状态下,且受局部应力干扰,因此受力较为复杂,其工作机理的认识一直未能统一。

近 20 年来,随着国民经济及建设科技的发展,大型工程不断涌现,尤其最近几年,一批世界瞩目深水桥梁工程在我国顺利建成。随着超长大直径桩的使用,承台厚度不断增加,使其成为三维尺寸相近的块体。以下为国内近年来部分大桥设计施工的基本情况。

铜陵长江大桥为双塔双索面预应力混凝土板梁式斜拉桥,主跨 432m。地基覆盖层厚度为 18m 左右,主要为粉细砂和中粗砂,基岩为软质泥岩。主塔基础采用 19 根直径 2.8m 钻孔灌注桩,圆形承台厚度为 4m。南京长江第二大桥南汊桥为双塔双索面钢箱梁斜拉桥,主跨 628m。地基覆盖层厚度为 30m 左右,主要为细砂及含砾中粗砂,基岩为砾岩和砂砾岩。主塔基础采用 21 根直径 3m 钻孔灌注桩,圆形承台厚度 6m。武汉军山长江大桥主桥为双塔双索面钢箱梁斜拉桥,主跨 460m。地基无覆盖层,基岩为砂质泥岩。主塔基础采用 19 根 2.5m 钻孔灌注桩,圆形承台厚度 6m。南京长江第三大桥主桥为钢塔钢箱梁斜拉桥,主跨 648m。地基覆盖层为黏土、中粗砂及砂砾卵石层,厚度 40~55m,基岩以泥岩为主。主塔基础采用 30 根直径 3m 钻孔灌注桩,哑铃形承台厚度 7.5m。苏通大桥主桥为双塔双索面钢箱梁斜拉桥,主跨 1088m。主塔基础采用 131 根梅花形布置的直径 2.8/2.5m 变截面钻孔灌注桩,承台呈哑铃形,平面尺寸为 50.55m×48.1m,厚度由边缘的 5m 变化到最厚处的 13.324m。湖南赤石特大桥 6、7、8 号主墩下桩数均为 34 根,桩径 3.1m/2.8m,桩长 95.5m,承台平面尺寸为 41.1m×32.3m,承台厚度达 6.5m。上述复杂荷载下的集群桩基(或多排多列桩基)承台,目前尚无统一的设计方法,形成理论研究和设计方法落后于工程实践的局面。

高层建筑桩—筏基础的设计主要依据《建筑桩基技术规范》JGJ 94—2008^[1]和《建筑地基基础设计规范》GB50007—2011^[2]。通常先参考以往工程经验预估板厚,然后分别进行受弯、受剪、受冲切和局部承压验算。由于混凝土的抗拉强度较低,承台厚度通常受控于受冲切承载力验算。近 20 年来,国内设计建造了大批高度超过 150m 的高层建筑,其桩—筏基础筏板厚 2.5~4.5m。正在建设中的上海中心,筏板厚度更是达到 6.0m。

随着承台厚度的增加,桩基承台逐渐从弯曲破坏为主过渡到剪切破坏为主,也即过渡到“厚”承台。对于“薄”承台,即以弯曲破坏为主的承台,可仍然采用以往的建立在“梁式体系”基础上的控制截面法。目前的承台设计方法是按薄板弯曲塑性铰线理论推导而来的,只考虑承台某一特殊截面上的受力,而没有考虑承台内部的完整力流。对于厚承台,仍然沿用上述方法则是不合适的。试验和理论分析都发现^[3~6]:厚承台在弹性阶

段,其跨中截面应力分布已不符合平截面假定;承台顶面混凝土压应变值很小,甚至还可能出现拉应变;从承台破坏状态来看,厚承台是以斜裂缝破坏为标志,钢筋未达到屈服,塑性铰线理论不适用。这就从根本上否定了现行设计方法在厚承台适用性。

国内外对桩基承台受力机理进行了探索研究,桁架模型得到广大研究人员的验证^[3-11],普遍认为这种理论将成为厚承台设计的可靠依据。但目前对于承台的设计方法尚未有统一的理论模式,各国规范差别很大,理论研究不完善。

东南大学土木学院课题组对厚承台设计方法已进行了15年的研究。在江苏省科技厅项目(编号BJ97024)资助下,完成了10个柱(墙)荷载作用下、采用多种新型配筋方式的六桩承台加载试验、数值模拟分析及试点工程现场实测研究;在“十一五”国家科技支撑计划项目(编号2006BAG04B00)和江苏交通科技项目(编号04Y029)资助下,以大型桥梁和高层建筑为工程背景,进行一系列室内和现场试验研究。研究成果表明,厚承台受力机理符合钢筋拉杆及混凝土压杆组成的空间桁架。课题组以空间桁架理论为基础,建立一套系统的承台设计方法,其研究成果居学科前沿。

1.1 国内外研究现状及存在的问题

1.1.1 国内研究现状

目前国内对桩基承台的研究主要集中在三个方面:一是把承台当作一般的双向板,用弹塑性理论分析其力学性能和极限承载力;二是基于大量的足尺或缩尺试件的试验研究和平面有限元或三维非线性有限元方法,分析承台的受力特性、传力机理和极限承载力;三是在桩基承台的混凝土中掺入适量钢纤维,改善其受力性能,进行了相关试验以及理论研究。

沈景华等人(1984)^[12]运用钢筋混凝土板的塑性铰线理论,按机动法的基本原理,研究了三、四、五、六桩承台弯曲破坏时的极限承载力,推导了抗弯强度的上限解并给出了相应的计算方法。但是他所研究的承台的混凝土强度较低,为C10左右,与现在的承台混凝土强度相差很大。

国内的研究大多都是采用试验和有限元相结合。

王家宽等人(1987)^[13]从1983年7月起开展桩基承台的试验研究工作,共制作了85个试件,其中三桩试件12个,四桩试件61个,六桩试件12个,根据试件最典型的破坏形态,给出了桩基承台的受剪切、受冲切和受弯承载力计算方法。同时,按拱式受力体系分析了承台的抗剪承载力,给出承台的抗剪承载力计算公式。

季静等人(1995)^[14]对二、三、四、六桩承台进行了试验研究,共制作了75个试件,其中,二桩承台29个,三桩承台16个,四桩承台14个,六桩承台16个。结果表明,当承台厚度较小时,破坏带有明显的弯曲特征,弯曲裂缝向上发展接近承台顶部,且底部贯通,钢筋达到或接近屈服;当承台厚度较大时,弯曲裂缝发展缓慢或根本不出现,钢筋未达到屈服,试件一旦开裂很快就破坏,表现为冲剪破坏。裂缝出现后,从实测的钢筋应变值来看,承台底部拉应力的传递主要集中在承台周边桩径范围内。在此范围内钢筋起着拉杆作用,柱与桩边线附近混凝土起斜压杆作用,共同构成一个空间桁架传力模式,且随承

台厚度增大而更明显。由此建议厚承台由受冲剪计算确定承台的厚度,根据空间桁架模型,利用静力平衡条件求解拉杆的拉力与钢筋用量。

课题组郭宏磊等人(1997)^[7]进行了比例为1:5的六桩厚承台的模型试验和三维非线性有限元分析。通过六桩厚承台的模型试验和三维非线性有限元分析,指出厚承台的破坏形态是冲切破坏,厚承台的受力体系为带有主要单向压应力的混凝土区域作为压杆,桩顶区域的钢筋作为拉杆的空间桁架,影响压杆强度的两个基本因素是冲跨比和混凝土强度,并指出了我国建筑规范中承台设计的不足。

课题组梁书亭等人(1998)^[8]用21个端头局部轴心受压圆柱体来模拟承台斜压杆的应力场,从而研究斜压杆的受力机理,数据回归得到斜压杆的承载力。他们还对桩基承台的空间桁架设计方法进行了研究,认为桩基承台的传力模式为空间桁架,而且冲切破坏形态可能为拉杆屈服、压杆斜压破坏,以压杆的破坏为控制条件。承台的受冲切承载力实际上就是压杆的承载力。影响承台受冲切承载力的因素主要有配筋形式、配筋量、混凝土强度和冲跨比等。他们还进行了1个型钢混凝土六桩承台和2个不同布筋形式的钢筋混凝土六桩承台的试验研究^[15],指出桩基承台的合理配筋形式应为集中配筋于桩顶拉杆区域内,在压杆处配置钢筋网片将提高斜压杆的强度,从而提高承台的承载力;按空间桁架形式配置型钢骨架将有效提高承台的承载力。

课题组赵飞宇等人(2000)^[5]通过对18层框-筒结构的桩筏基础进行了现场实测研究和有限元分析,验证了墙下六桩承台的受力也符合空间桁架模型,提出了柱-墙下承台按空间桁架理论的计算方法和柱-墙下承台不同荷载情况的荷载等效方法,总结归纳出桩筏基础按两种极限状态的空间桁架理论设计方法,而且编写了厚承台空间桁架理论设计方法的程序,与实测结果吻合较好。

前人对多桩承台空间桁架理论的研究局限于柱下多桩承台,课题组卢建峰(2001)^[6]对不同配筋方式、不同配筋率及不同墙体长度的6个墙下矩形六桩承台的试验研究,与柱下承台相类似,墙(线荷载)下承台受力亦符合以混凝土为压杆、桩径范围内的钢筋作为拉杆的空间桁架模型,承台的破坏为斜压杆劈裂或拉杆屈服。他还提出了薄厚承台的分界线,当距厚(指柱(墙)边至桩中心的距离与承台的有效高度之比)比小于2时为厚承台,反之为薄承台,可以按薄板的计算模式计算;在承台中层设置钢筋网片,能有效地提高承台极限承载力;设置型钢桁架,则在提高承载力的同时,可有效地改善承台的延性;而且初步提出了统一的按空间桁架理论的设计方法,在有限元分析的基础上,探讨了如何建立承台空间桁架模型,给出了柱下承台常见的空间桁架模型,并且依据柱下空间模型研究了墙下空间模型的推导。

课题组吴俊(2000)^[16]、林松(2002)^[17]通过试点工程的现场实测研究,验证了墙下六桩承台的受力也符合空间桁架模型,承台的破坏为斜压杆劈裂或拉杆屈服。在承台中层设置钢筋网片,能有效提高承台的极限承载力,提高延性。

课题组卢波(2007)^[18]对12个承台试件(其中10个九桩承台和2个十六桩承台)进行了静载破坏试验,研究了集群桩基大型承台按软化空间桁架设计的受力机理和破坏模式,也得出了和卢建峰一样的薄厚承台分界线。试件模型发生脆性破坏,其破坏形式为拉杆屈服或压杆破坏。他在前人的基础上提出了适用于桩基承台承载力计算的软化空间桁架模型,建立了桩基承台混凝土之间拉应力与底部受力主钢筋拉应变之间的关系,修正了桁

架拉杆的承载力,给出了拉杆的受拉承载力计算公式。在桁架压杆承载力的计算中,考虑了底部水平钢筋应变对混凝土强度的软化修正,给出了压杆受压承载力和劈裂承载力的计算公式,并对集群桩基承台提出概念设计理念,将压杆简化为压板进行设计。还提出了桩基承台相对刚度参数,并将其作为集群桩基刚性承台的判别标准,在此基础上给出了合理的板厚和桩反力分配的计算公式,初步解决了桩基承台计算中外部荷载条件问题。

侯靖东(2008)^[19]通过有限元程序 ANSYS 对典型的厚承台进行分析,验证了配置水平分布钢筋的厚承台符合以钢筋混凝土压杆和桩顶钢筋为拉杆组成的空间桁架模型,并由试验得出影响压杆承载力的主要因素有混凝土强度、钢筋的配筋率和配置方式、压杆的外围混凝土约束、压杆的长细比,在此基础上提出了压杆承载力的计算公式和厚承台空间桁架模型的设计方法。

张雄文(2008)^[20]采用 ANSYS 软件分析了承台厚度、桩距、桩数、布桩形式等因素对承台传力的影响,揭示了大型群桩基础承台的传力机理。

郭宏磊(2009)^[21]通过对 8 个四桩承台的冲切破坏和有限元模拟分析,得到承台破坏主要以冲切破坏为主,符合空间桁架理论,拉杆的有效范围为 1 倍的桩径。

课题组过超(2010)^[22]等人通过对 1 个九桩双薄壁墩厚承台模型进行室内破坏试验,验证了其受力也符合空间桁架模型。而且通过等效荷载,将作用在承台上的荷载等效为集中荷载,从而建立了较实用的空间桁架模型。

国内对钢纤维混凝土承台也开展了一些研究。

李继祥、许成祥、谷倩、彭少民(1999)^[23]等进行了不同厚度和不同钢纤维掺量的 15 个四桩厚承台的足尺试件进行试验及三维非线性有限元分析。研究指出,钢纤维混凝土四桩厚承台的破坏模式为角桩冲切破坏;钢纤维的掺入可有效地提高承台受冲切承载力,减小承台厚度配筋方式对承台的受冲切能力有较大的影响,并给出了钢纤维混凝土四桩厚承台受冲切承载力计算公式。

孙成访、王敏根、彭少民(2003)^[24,25]等进行了 30 个 1:5 的二桩混凝土和钢纤维混凝土承台试件的静载试验。详细分析了钢纤维对混凝土承台的贡献,能有效降低厚承台的厚度。厚承台的破坏是由于桩柱连线之间的钢纤维混凝土斜柱的劈拉破坏引起的,即钢纤维混凝土斜柱体的主拉应力大于钢纤维混凝土的抗拉强度。试验中未发现因柱冲切而破坏的试件,给出了钢纤维混凝土承台的空间桁架模型。

谷倩(2001)^[26]、孙成访(2005)^[27]研究了钢纤维混凝土承台的受力性能,介绍了钢纤维混凝土二~五桩承台的试验研究和三维非线性有限元分析结果,指出掺入钢纤维可提高承台的受冲切承载力,减小承台的厚度,改善承台冲切破坏的脆性,对厚承台建议采用空间桁架计算模型,钢筋集中布置在桩径范围内比均匀布置在整个宽度范围内的承台承载力可提高约 17%,根据桁架模型可得到纵向钢筋计算公式。

李继祥(2009)^[28]研究了钢纤维混凝土六桩双柱厚承台受力模型和受力机理,结果表明:钢纤维的掺入能有效提高混凝土承台的开裂荷载和极限荷载,延缓承台的开裂,阻裂效果明显;钢纤维混凝土双柱六桩厚承台破坏形态为冲切破坏,其传力模型符合空间拉压杆模型。

从国内研究情况来看,大部分都是通过试验,或者是现场监测,再加上有限元的分析

进行研究。无论是柱下还是墙下厚承台，其破坏方式是拉压屈服或是斜压杆劈裂破坏，基本上也都符合以受压混凝土为压杆、桩径范围内的钢筋作为拉杆的空间桁架模型，但是受压区和节点区的位置和大小等还没有统一。另一方面就是钢纤维的加入会提高承台承载力，增大延性。也就是说人们意识到厚承台的受力机理和设计方法与薄承台有很大的区别，并进行了试验和有限元的研究，但是研究还不成熟，虽然突出了空间桁架理论，但是并未得到统一的设计方法，在应用方面更是空白。

1.1.2 国外研究现状

目前国外对桩基承台的研究主要表现在两个方面，一是对桩基承台的受力机理进行分析，提出能反映承台实际受力机理的传力模型；二是对影响承台承载力的一些因素如承台有效厚度、纵筋配筋率及配筋方式等进行研究。

Gogate、Sabnis (1980, 1984)^[29-30] 用美国 ACI 规范^[31] 的受剪条款对厚承台进行分析；Adeber 等人 (1990)^[3] 介绍了 6 个桩基厚承台的双向剪切破坏试验结果，并对用控制截面方法的 ACI 建筑规范^[31] 和采用拉压杆模型的加拿大规范^[32] 进行了比较。研究结果都表明，ACI 规范计算值与实际破坏荷载相差很大，它忽略了某些特定的参数，如纵向钢筋的作用，过分强调了承台厚度的影响，且不能正确反映试验结果与趋势。承台不同于少量配筋的双向板，其变形在破坏之前很小，属脆性破坏，承台下各桩上荷载分配很不均匀。承台也不同于宽梁，其主要的受剪机理是压杆效应而非梁效应。采用拉压杆模型的加拿大规范，其计算荷载与试验值相差较小，说明拉压杆模型较准确地反映了厚承台的受力性能。压杆的破坏不是混凝土的受压破坏，而是由于压应力的扩散在压杆中引起横向拉力，使压杆纵向破裂而破坏。

Adebar 和 Zhou (1993)^[10] 采用素混凝土圆柱上下受局部荷载的方法，通过在恒定受压面积下改变圆柱体的直径和高度，模拟拉-压杆模型中压杆的受力模式和压杆中由于压应力扩散引起的横向劈裂现象。研究表明，素混凝土压杆的劈裂承载力受外围约束混凝土范围和压杆长细比两种因素的影响，建议可通过限制最大节点区承载应力来避免深梁构件中斜拉破坏的产生。

Sam 等人 (1995)^[33] 对四桩承台进行了三维非线性有限元分析，考虑了软化影响的混凝土多轴抗压强度，混凝土的裂缝和钢筋的屈服因素。

Adeber 等人 (1996)^[4] 在原有工作基础上，根据 48 个桩基承台试验结果的分析，提出了基于拉压杆模型的厚承台设计方法，建议水平钢筋集中放置于桩顶，并以压杆在未劈裂时的最大承载应力作为厚承台受剪承载力的控制指标，最大承载应力与压杆的高宽比有关。

Suzuki 等人 (1998, 1999, 2000)^[34-36] 做了一系列的四桩承台试验，以研究边缘距离（从基础板边缘到桩中心的最短距离）、钢筋布置、承台变截面对桩基承台的影响，为研究者提供了一个极好的试验结果。

Cavers 和 Fenton (2004)^[37] 对一个采用几种不同设计方法设计的四桩承台模型进行了对比试验。第一种模型采用拉-压杆模型进行配筋设计，而承台的厚度、柱、桩的尺寸根据加拿大规范剪切条款设计；第二种模型采用 Adebar 和 Zhou (1993)^[10] 的方法设计；第三种模型采用加拿大规范规定的拉压杆模型进行设计；第四种模型根据 ACI318-95 和

CRSI 手册进行设计。试验对比研究发现,第一种模型被认为是最好的承台设计方法。第一种模型预测的承台承载能力为实验值的 70%,但夸大了尺寸对承台受剪承载力的作用;第二种模型的设计方法过高地估计了承台的承载能力,偏不安全;第三种模型的设计方法采用在荷载作用下承台中并不存在的应力平衡假设而偏于保守;第四种模型的设计由于没有考虑尺寸效应、配筋率较低是不安全的。

Adebar (2004)^[38] 对 Cavers 和 Fenton (2004)^[37] 的部分内容提出异议,比如其研究仅选用小的四桩承台试件、取用设计方法的局限性等。

Woong 和 Kuchma (2008)^[39] 等采用空间桁架理论对 116 个已进行过室内破坏试验的承台进行计算、统计,得到空间桁架理论适用于剪跨比(柱距桩边的最近距离与承台有效厚度比)在 0.49~1.8,且混凝土抗压强度不超过 41MPa 时的情况。

Gautier Chantelot^[40] (2010) 研究了厚承台的剪切破坏,认为空间桁架理论在计算抗剪承载力和剪切破坏模式方面更可靠。虽然目前欧洲、美国、瑞典建筑规范的设计已经基于拉压杆模型,但对承台的冲切破坏的设计过程是建立在缺乏经验或者半经验基础上提出的,经常会导致超筋结构,Gautier Chantelot 提出的拉压杆模型考虑剪力转换机制和杆效应、拱效应的结合,给出了改进的公式,减少了抗剪钢筋的使用量,而且保证受弯钢筋屈服之前不会发生剪切破坏。他的研究是从二维平面拉压杆理论过渡推广到三维拉压杆模型,给出了拉压杆传力模式中节点区三维几何尺寸的确定方法,这种方法考虑了拉杆和压杆在节点区的几何相容性,比较符合实际情况。最后,他通过 Matlab 软件为三维拉压杆模型编制了一个半自动程序,只要定义好统一的节点区几何定义,无论桩柱的数量多少,荷载如何,都能够自动进行各种形式的承台设计,还可以自动优化节点位置,通过实例验算,其结果比规范计算结果更加接近实际,因此非常具有意义。

国外对厚承台的空间桁架研究先于国内研究,在一些国家规范中也提出了简单的空间桁架设计方法,一致认为对桩基厚承台采用空间桁架模型为理论基础的 analysis 研究是很有前途的,可以解释桩基厚承台的传力机理与破坏模式。但应该指出的是,其主要结论和设计方法也是建立在集中荷载下的少桩承台试验的基础上的,系统性的研究不够,虽然国外已经进行了简单的运用,但是各国规范都不统一,而且对于大型集群桩的研究和应用更少。

1.1.3 目前存在的问题

虽然空间桁架模型能很好地解释桩基厚承台的传力机理与破坏模式,但应该指出,目前还没有形成一个系统的设计方法。其问题主要有以下几个方面:

(1) 承台混凝土斜压杆的倾角,各国研究者对于承台斜压杆倾角有很多种不同的理论^[41]。

1) 瑞士规范: $0.5 < \cot\theta < 2$ ($26^\circ < \theta < 64^\circ$)

2) 欧洲混凝土规范: $1 < \cot\theta < 2.5$ ($22^\circ < \theta < 45^\circ$)

3) Macgregor^[42] 建议设计取值 ($25^\circ < \theta < 65^\circ$)

4) Collins 和 Mitchell^[43] 经相容性分析提出:

$$\theta_{\min} = 10 + 110V_u / (\phi f_c^i b_w j_d) \quad (1-1)$$

$$\theta_{\max} = 90^\circ - \theta_{\min} \quad (1-2)$$

式中 V_u ——设计剪力;

ϕ ——强度折减系数, 对抗剪问题取 0.85;

f_c^t ——单轴抗压强度;

b_w ——梁腹厚度;

j_d ——抗弯内力臂。

目前研究认为斜压杆倾角在一定范围内取值即可, 但考虑符合结构的实际受力情况和结构的变形协调, θ 应有比较确定的数值, 关于 θ 值结合不同结构与受力的研究还应深入。

(2) 拉压杆的截面尺寸, 到目前为止, 对于空间桁架模型中的拉杆和压杆的三维截面尺寸还没有一个完整的研究, 各国规范都提出了杆件截面尺寸计算方法, 但很多都是基于二维的, 是否适用于三维的情况还有待进一步的研究。

(3) 节点区混凝土强度验算及截面尺寸的确定。节点区是杆件相交的区域, 应力比较复杂。虽然各国学者对于节点区混凝土有效强度及其截面尺寸有过一定的研究, 但尚未形成共识。节点区的设计是空间桁架模型设计的关键, 这很大一部分程度上制约了空间桁架模型的实际应用。

(4) 大型群桩承台研究较少。迄今为止, 厚承台的研究大多局限在 9 桩以下, 对大型群桩承台的受力机理研究较少。以往研究多基于模型试验或有限元分析, 针对实际工程的现场试验很少, 故其结论尚待检验。

1.2 国内外规范介绍

1.2.1 我国建设规范

我国《建筑桩基技术规范》JGJ 94—2008^[1] 和《建筑地基基础设计规范》GB 50007—2002 规范^[2] 规定, 桩基承台要进行受弯、受剪切、受冲切以及局部承压承载力计算, 确保承台具有足够的承载力。承台受弯计算采用一般受弯构件的计算方法, 不设抗剪钢筋, 受弯计算所确定的纵向受拉钢筋沿承台底部均匀布置。受剪切、受冲切承载力计算考虑了承台柱或桩的剪跨比和冲跨比的影响, 但未反映纵向受拉钢筋对受剪切、受冲切承载力的贡献。

1.2.2 我国交通规范

我国交通运输部混凝土规范^[44] 参照《美国规范 AASHTO—LRFD》^[45] 对承台的正截面受弯承载力计算采用了“梁式体系”计算方法和“撑杆-系杆体系”计算方法。规定当外排桩中心距墩台边缘大于承台高度时, 按“梁式体系”方法计算承台截面; 当外排桩中心距墩台边缘等于或小于承台高度时, 按“撑杆-系杆体系”方法计算承台截面。

“撑杆-系杆体系”计算方法, 回避了常规材料力学公式对短臂深梁不能反映结构材料非线性应变与剪应力不均匀分布等缺陷, 并且在斜截面受剪承载力验算中考虑了配筋率的影响, 此规范不足之处在于计算公式均照搬《美国规范 AASHTO—LRFD》, 缺乏必要的试验验证, 并且美国与中国在结构设计中由于钢筋混凝土质量控制标准、计算公式中采用的材料强度指标、荷载组合系数、材料系数表述方式等的不同, 安全度体系使用方法不一致, 因此规范中桩基承台部分的计算公式与整本规范显得格格不入。如在受剪承载力设计

值计算公式中采用 $\sqrt{f_{cu,k}}$, $f_{cu,k}$ 为混凝土立方体抗压强度标准值, 就难以通过此公式计算桩基承台的受剪承载力极限值。“撑杆-系杆体系”的应用是设计概念的重大变革, 本身的理念就是将弯曲、轴向力与剪切、扭转的相关性统一起来^[46], 也就是说它综合了桩基承台的正截面受弯、斜截面受剪和受冲切承载力验算, 当桩基承台满足“撑杆-系杆体系”的应用条件时, 就不需进行受剪和受冲切验算, 此规范在这点上也没有区分。

1.2.3 美国规范

美国混凝土规范 (ACI 318—02) 未包含专门用于厚桩基承台设计的具体条款, 设计时主要参考浅基础相关设计方法, 将承台的设计分为三个方面: ①受弯承载力计算。规定承台中弯曲临界面的位置取在柱边, 根据此临界面上的弯矩, 确定承台的配筋。规范还规定了配筋方式沿承台全宽均匀分布。②受剪承载力计算。在靠近承台集中力或桩反力处的剪切强度由两个条件控制: 一是承台如同梁的受力状态 (单向作用), 弯剪临界截面取为距离柱边为 d 的截面处, d 为有效高度; 二是破坏由锥体冲切引起 (双向作用), 冲切临界截面取为作用在沿柱周边 $d/2$ 距离处。③柱底局部受压承载力计算。美国规范剪切和冲切临界截面的选取与国内建设部规范是一致的, 但国内规范在桩基承台受剪、受冲切计算时考虑实际破坏面为发生在桩边到柱边的斜面, 临界截面是随桩的位置而变化的, 用剪跨比来修正此因素, 而美国规范所采用的破坏面不随桩的位置而变化, 由此, 剪切没有考虑剪跨比的概念。需要提及一下的是, 美国混凝土规范 (ACI 318-02) 的附录 A 引入了拉压杆方法计算“受扰区”, 但未提及桩基承台的使用。

1.2.4 加拿大规范

加拿大混凝土结构设计规范 (CSA A23.3-04) 规定了类似于牛腿或深梁那样存在不连续区域 (或扰动区域) 的结构 (桩基承台在此范畴), 应采用“一般法”中的拉压杆模型进行设计。拉压杆模型考虑结构内部完整力流, 而不只是某一特殊截面。带裂缝的钢筋混凝土中的内部荷载传递路径近似于一个理想化的桁架。带有主要单向压应力的混凝土区域模拟为压杆, 而主钢筋习惯模拟为拉杆, 拉、压杆相交的混凝土区域模拟为类似于桁架结点的节点区。

1.2.5 前苏联规范

前苏联规范^[48] 规定, 当剪跨比 >1 时, 仍按 45° 角锥体验算; 当剪跨比 ≤ 1 时, 直接取柱边至桩边为角锥体破坏斜面。其计算公式仍建立在受弯构件的基础上, 取内力臂系数为 0.9; 受剪承载力计算中, 分别以无量纲系数 m , α , β 值来反映不同剪跨比对承台受剪、角桩对承台冲切及柱对承台冲切承载力的影响。

1.2.6 英国规范

英国规范^[48] 允许桩承台既可按梁法进行计算, 也可按桁架法进行计算, 并规定桁架法适用于桩数不超过 5 根的桩基承台。按桁架法进行计算, 柱子传来的荷载通过斜推力传到桩上, 维持平衡所必需的拉力则由钢筋来提供, 纵向钢筋应配置在连接桩顶的桩径范围内。关于桁架法的剪力, 如同单独的板式基础一样, 应当验算桩基承台整个宽度上的剪力

和围绕集中荷载的冲切剪力。

总之，对于桩基承台的设计方法，目前还没有统一的理论模式，各国规范差别很大。美国^[31]、前苏联^[47] 和我国住房和城乡建设部规范^[1-2] 均采用控制截面的方法，在受弯设计时，套用受弯构件（梁或板）的计算公式，在受剪或受冲切计算中，考虑了剪跨比的影响进行修正，但忽略了纵向钢筋配筋率对受剪或受冲切强度的影响。英国规范^[48] 和加拿大规范^[32] 均以桁架模型（拉压杆模型）为基础进行受力分析。桁架模型的建立主要依据承台内部应力流分析结果，并假定混凝土内部存在着传递推力的斜压杆。在此基础上，考虑带裂缝混凝土的软化影响，计算结果对厚承台而言更真实。我国交通部规范^[44] 和美国规范^[45] 也引入了拉压杆模型。我国住房和城乡建设部规范计算公式建立在试验统计的基础上，但当前的试验构件均为集中荷载下少桩承台，并且构件混凝土强度很低，大多数为C15 以下^[12]，试验中也未考虑基桩刚度的影响，缺乏清晰的机理分析和足够的理论依据，因此亟须对桩基承台进一步研究，建立正确的计算模型，得出合理的计算公式。

1.3 空间桁架理论

桁架模型最初是由 Ritter (1899)^[49] 和 Morsch (1912)^[50] 提出的，考察桁架模型的基本特点，可参考图 1-1 (a)，图中给出承受均布荷载作用的简支梁的半跨，还表示出弯和剪复合作用产生的裂缝图形。钢筋由靠近受拉边的受弯主筋和沿全跨分布的竖向箍筋组成，结构的作用可由图 1-1 (b) 中的桁架来模拟，主筋作为受拉弦杆，混凝土上翼缘作为受压弦杆，箍筋为竖向受拉腹杆，斜裂缝间的混凝土作为 45° 的受压斜杆。

Marti (1985) 演化了桁架模型，将梁的类似桁架方法更为统一化，使其应用于混凝土构件的“受扰区”(Disturbed Region)。近年来，桁架的概念已由 (Schlaich)^[51]、MacGregor (1988)^[42]、Collins (1991)^[43]、Vecchio (1986, 1988)^[52-53] 及其他人的工作而大大扩展。已经认识到混凝土压杆的倾斜角一般不是 45°，在很大程度上取决于钢筋布置，约在 25°~65° 的范围内，如图 1-1 (c) 所示。图中说明了模型的五个基本组成部分：①压杆，或混凝土单轴受压构件；②拉杆，或钢筋等受拉构件；③桁架杆件相交处的节点，假设为铰接；④在支座处或集中荷载下的“受扰区”所形成的扇形受压区，将力传给梁；⑤将力由一根箍筋传递给另一根箍筋的平行压杆所组成的斜压场。在最初的桁架模型中，并没有考虑变形、协调性要求，也即是建立在塑性理论基础上的。

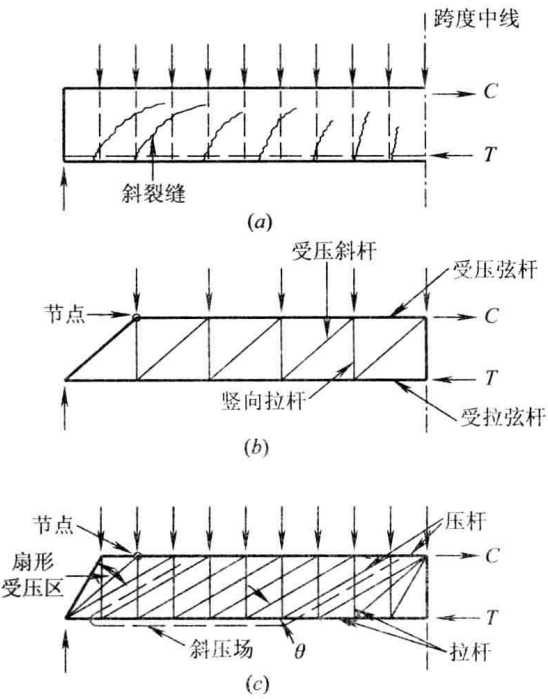


图 1-1 有腹筋梁的桁架模型
(a) 均布荷载梁；(b) 简单桁架模型；
(c) 更真实的模型

拉压杆模型很好地体现了实际构件在给定的荷载和支座条件下应力场的不连续分布。拉压杆模型实际上通过构件内部的力流来表示构件的传力机理，压杆表示压应力流，而拉杆表示拉应力流。压杆和拉杆代表一维应力场，两个或两个以上的拉杆或压杆的交界区为节点区。其中，较成熟的应用拉压杆模型理论为构成平面桁架的构件，如深梁、牛腿等，可合理地解释其破坏机理，计算的极限承载力更准确地符合试验结果。基于拉压杆模型的深梁分析方法的基本特点将由图 1-2 所示的中部加载的深梁来说明，其中加载宽度和支承宽度都与梁同宽。通过对未开裂构件的弹性分析得出主应力方向，用虚线代表压应力迹线，实线代表拉应力迹线。随荷载的增加，将在垂直于拉应力迹线处形成裂缝（即平行于虚线）。最大拉应力沿梁底边作用，而最大的压应力则沿接近平行于荷载至支座的连线方向作用。图 1-2 (b) 表示了内力流的简化模型。压应力迹线用作压杆，如图 1-2 (b) 中虚线；拉应力迹线作为拉杆，如图 1-2 (b) 中实线。主拉杆位于梁底部两支座间，由于荷载下的压力线为先扩散，后集束于支座处，成梭形布置，则需要有次要拉杆辅助作用，其方向垂直于荷载与支座间的斜线。内力流模型可进一步简化为图 1-2 (c) 所示的桁架模型，但此模型对产生的压杆内部的偏斜裂缝无法解释。节点如图 1-2 (c) 中斜线的阴影面积所示，这些区域受双轴压力作用。图 1-2 (c) 所示模型的破坏原因可能为：① 拉杆屈服；② 压杆压坏；③ 节点区压坏。

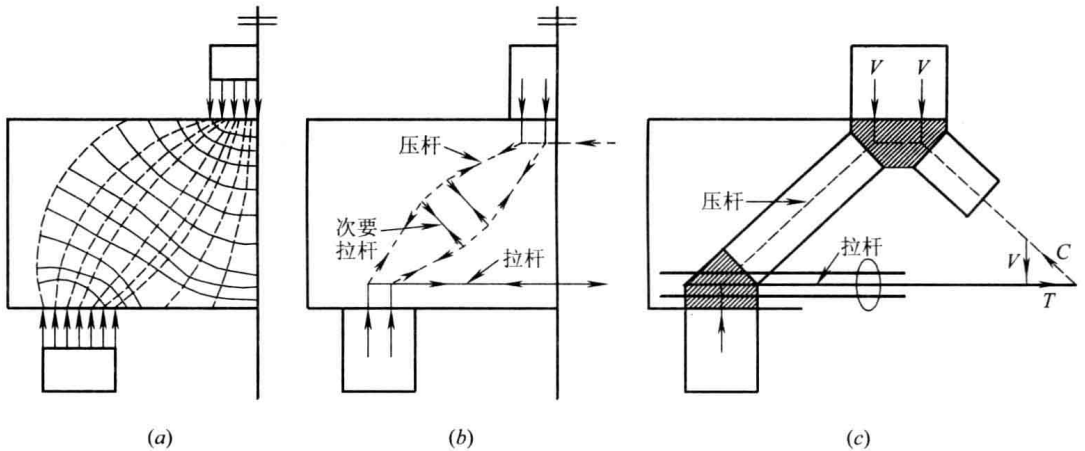


图 1-2 中部加载的深梁

(a) 应力迹迹；(b) 拉压杆模型；(c) 简化的拉压杆模型

拉压杆模型法有双重作用。它一方面可以解释结构的各个必要方面，同时，又为结构设计提供了一种有效的工具。拉压杆模型能有效地帮助设计者决定构件的大小、位置、分布和主筋的锚固问题。桩基厚承台由于桩和柱（或墙、墩）等集中荷载的作用，存在几何和荷载的不连续，亦属于典型的“受扰区”构件，如果考虑的是整个承台内部的“力流”，而不仅仅是某一特定截面上的力，则桩基厚承台也可用拉压杆模型设计，承台在整个加载过程中基本上不发生塑性内力重分布，故也可采用弹性应力分析法^[31]。有限元分析表明其主压应力自桩顶指向柱底，方向十分明确，即自桩轴线出发，指向柱下^[26]，因而将承台中有裂缝的钢筋混凝土内部传力的路径简化为近似的桁架结构，其同一方向主要承受压力的混凝土区域用压杆模拟，受拉钢筋用拉杆模拟，拉压杆交会之处被称为节点区，类似于空间桁架结构中的节点。承台中构成的拉压杆模型是呈三维体系的，故称为

空间桁架模型。

1.4 本书的主要研究内容

1. 通过对国内外桩基承台试验数据的统计分析,提出了用宽高比作为控制指标来判断空间桁架方法和传统控制截面方法的适用界限,满足 $D/h_0 \leq 2$ 为厚承台应采用空间桁架法,不满足此条件的为薄承台应采用控制截面法。同时建议在采用控制截面法时考虑承台底层纵筋对受剪和受冲切的有利作用,从而修正了适用于薄承台设计的受剪和受冲切计算公式。

2. 分别对柱下及墙下六桩承台进行了非线性有限元分析,探讨了厚度取值对承台内应力分布及其破坏形态的影响。分析表明:无论是柱下承台还是墙下承台,只要满足一定的厚度要求,其受力均符合空间桁架理论。对于此类厚承台,极限破坏时,其压杆混凝土应力均小于轴心抗压强度,而压杆中部混凝土拉应力则达到抗拉强度,且破坏时钢筋应力一般均达到屈服强度,即承台破坏源自混凝土劈裂及钢筋屈服。

3. 介绍了常见的柱下、墙下空间桁架模型以及推导出了一些模型参数,还介绍了软化的空间桁架模型。

4. 提出了厚承台承载力的拉压杆的计算公式以及厚承台的设计方法。

5. 对本课题组所做的全部试验研究进行了详细介绍和分析,以及本课题组所做的试点工程研究与理论分析进行了对比,与实际情况符合较好。