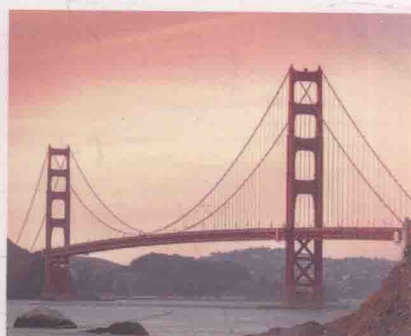
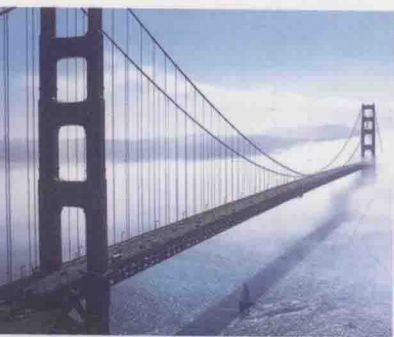


大型沉井设计、施工及监测

穆保岗 朱建民 龚维明 编著



中国建筑工业出版社

大型沉井设计、施工及监测

穆保岗 朱建民 龚维明 编著

中国建筑工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

大型沉井设计、施工及监测/穆保岗等编著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2015. 7

ISBN 978-7-112-18083-7

I. ①大… II. ①穆… III. ①沉井-设计②沉井施工-施工监测 IV. ①TU473.2②TU753.64

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 086522 号

本书重点介绍大型沉井在设计、施工、现场监测、发展动态等多方面的内容,并结合近年来与此相关的科研成果和工程实践,理论与实践结合、图文并茂。全书共分 5 章,分别为绪论、大型沉井的施工、大型沉井设计计算、大型沉井的现场监测、大型沉井设计施工的若干问题探索研究。

本书可供从事沉井设计、施工、监测的工程设计、施工、科研人员参考,以及高校相关专业师生参考阅读。

* * *

责任编辑:王梅杨允

责任设计:李志立

责任校对:张颖赵颖

大型沉井设计、施工及监测

穆保岗 朱建民 龚维明 编著

*

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

北京红光制版公司制版

北京中科印刷有限公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 11¼ 字数: 279 千字

2015 年 12 月第一版 2015 年 12 月第一次印刷

定价: 28.00 元

ISBN 978-7-112-18083-7

(27322)

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

《大型沉井的设计、施工及监测》一书是东南大学土木工程学院岩土工程方向多年来科研与实践相结合的产物。自 2007 年以来，东南大学参与了泰州长江大桥、南京长江四桥、马鞍山长江大桥等大型悬索桥梁沉井基础部分的科研与实践活动，并参与了多项拟建桥梁沉井基础的咨询工作，深感大型沉井基础在项目实施中存在诸多需要总结及改进之处，于是我们近期组织了该书的编写，力争反映大型沉井的最新进展。

本书着重于桥梁领域大型沉井在设计、施工、现场监测、发展动态等多方面的内容，并结合东南大学近年来与此相关的科研成果；注重章节之间的逻辑性，图文并茂，力争提供给读者更多的有效信息。

编写分工中，第 1、2、3、5 章由穆保岗编写，第 4 章由朱建民编写，全书由龚维明教授审核。

编写过程中参考引用了很多同行的专著、教材、图片、文献资料等，前人的辛勤工作为我们的编写提供了坚实的理论基础和素材，在此不能一一列出，此外中交第二公路工程局的牛亚洲高工提供了很多素材和帮助，在此一并致谢，并真诚期望得到各位同行的批评指正，以利于我们的不断提高。

本书出版获得了①国家重点基础研究发展计划（973）项目（2013CB036304），②江苏省自然科学基金（BK2011614），③东南大学土木工程优势学科建设项目，联合资助。

2014 年 10 月

目 录

第1章 绪论	1
1.1 沉井的发展历程	1
1.1.1 沉井的分类	1
1.1.2 沉井的历史	4
1.2 沉井的应用实例	5
1.2.1 建筑市政部分	5
1.2.2 国内在桥梁及水利工程上的应用	7
1.2.3 国外的应用	13
1.3 国内外研究现状	16
1.3.1 沉井的现场测试研究现状	16
1.3.2 沉井模型实验的发展现状	17
1.3.3 沉井下沉阻力的数值模拟研究现状	17
1.3.4 沉井的设计理论发展	20
第2章 大型沉井的施工	22
2.1 沉井的构造和施工方法	22
2.2 沉井下沉方式	25
2.2.1 沉井降排水下沉	25
2.2.2 沉井不排水下沉	29
2.2.3 半排水下沉施工工艺	31
2.3 助沉技术	33
2.3.1 泥浆润滑套技术	33
2.3.2 砂套助沉工艺	34
2.3.3 大型沉井的空气幕助沉工艺	36
2.4 首节沉井的拼接和接高	40
2.4.1 地基处理	40
2.4.2 沉井接高	45
2.5 清底及封底	57
2.5.1 封底施工	57
2.5.2 封底混凝土检测	58
2.6 填芯及顶板施工	58
2.6.1 填仓施工	58

2.6.2 沉井顶板施工·····	60
2.7 沉井常见施工事故及对策·····	62
2.7.1 沉井偏斜·····	62
2.7.2 沉井拒沉·····	63
2.7.3 沉井突沉·····	63
2.7.4 井内流砂·····	63
第3章 大型沉井设计计算·····	64
3.1 沉井设计的一般原则·····	64
3.2 荷载·····	65
3.2.1 水压力和土压力的计算方法·····	65
3.2.2 侧摩阻力的计算·····	66
3.2.3 刃脚反力的计算·····	69
3.3 稳定系数和下沉系数·····	71
3.4 下沉期的沉井设计工况·····	73
3.4.1 沉井底节验算·····	73
3.4.2 沉井井壁计算·····	74
3.4.3 沉井刃脚受力计算·····	76
3.4.4 混凝土封底的计算·····	82
3.5 浮运沉井的计算·····	83
3.5.1 浮运沉井稳定性验算·····	83
3.5.2 浮运沉井露出水面最小高度的验算·····	84
3.6 沉井基础的计算·····	84
3.6.1 沉井作为整体深基础的设计与计算·····	84
3.6.2 抗浮验算·····	89
第4章 大型沉井的现场监测·····	90
4.1 沉井结构应力应变监测·····	90
4.1.1 受力分析·····	90
4.1.2 钢壳底板应力应变·····	91
4.1.3 隔墙底部钢筋应力应变·····	92
4.1.4 沉井顶部钢筋应力应变·····	93
4.1.5 混凝土应变·····	94
4.2 支承反力、土压力和摩阻力监测·····	95
4.2.1 沉井刃脚反力·····	95
4.2.2 隔墙底部反力·····	96
4.2.3 沉井侧壁土压力和摩阻力·····	97
4.3 沉井变位·····	98
4.3.1 沉井下沉期的几何姿态·····	98

4.3.2	沉井下沉期的底部开挖地形	99
4.3.3	沉井封底、填芯及上部结构施工期	99
4.3.4	正常使用期	100
4.4	对周边环境的影响	100
4.4.1	重要堤防的监测	100
4.4.2	周边建筑的监测	101
4.5	仪器和数据线的保护	101
4.5.1	仪器的保护	101
4.5.2	数据线的保护	101
4.6	监测数据分析与处理	103
4.6.1	监测频率	103
4.6.2	监测重点	103
4.6.3	预警信息	103
4.6.4	报表提交	103
4.7	监测实例——南京长江第四大桥北锚碇沉井	103
4.7.1	仪器布置及安装	105
4.7.2	下沉情况	106
4.7.3	应力情况	107
4.7.4	应力控制点	108
4.7.5	其他说明	109
4.8	监测实例——马鞍山长江大桥南锚碇沉井	109
4.8.1	仪器布置及安装	110
4.8.2	下沉情况	111
4.8.3	应力情况	112
4.8.4	应力控制点	114
4.8.5	混凝土应变情况	115
第5章	大型沉井设计施工的若干问题探索研究	116
5.1	大型沉井的主要问题	116
5.1.1	大型沉井的特点	116
5.1.2	首次下沉高度选择	117
5.1.3	下沉指标计算	120
5.1.4	开挖方式对沉井安全性的影响	126
5.2	土体支承刚度对下沉期沉井内力的影响分析	127
5.2.1	计算参数	128
5.2.2	计算步骤和杆件编号	128
5.2.3	各工况计算结果	129
5.3	马鞍山长江大桥南锚沉井实测下沉阻力分析	133
5.3.1	仪器布置	134

5.3.2 下沉曲线 134

5.3.3 下沉阻力分析 135

5.4 沉井下沉期荷载分布特征的细观实验研究 141

5.4.1 实验模型介绍 141

5.4.2 沉井侧壁土压力值分析 143

5.4.3 沉井下沉时的影响范围分析 144

5.4.4 沉井下沉过程 PFC 分析 146

5.4.5 结论 149

5.5 沉井-桩复合基础试验研究 150

5.5.1 试验模型 150

5.5.2 沉井-桩复合基础竖向承载性能分析 152

5.5.3 单桩水平荷载下变形和承载特性曲线 155

5.5.4 小结 165

5.6 分体式组合沉井的设想 165

参考文献 171

第1章 绪 论

1.1 沉井的发展历程

沉井基础是以沉井法施工的一种地下结构物或深基础形式。

沉井施工时，在地面或坑内制作开口的钢筋混凝土或钢结构井身，待其达到强度要求后，用合适的方法在井筒内分层挖土并运出，随着井内土面的逐渐降低，沉井筒壁靠其自重或其他方法克服与土壁之间的摩阻力与刃脚反力，不断下沉并逐步加高井筒，直至设计标高，然后封底。若沉井作为地下结构物使用，则在其顶端再接筑上部结构，当沉井仅作为建筑物基础使用时，井筒内常用素混凝土或砂石填充，如图 1-1 所示。

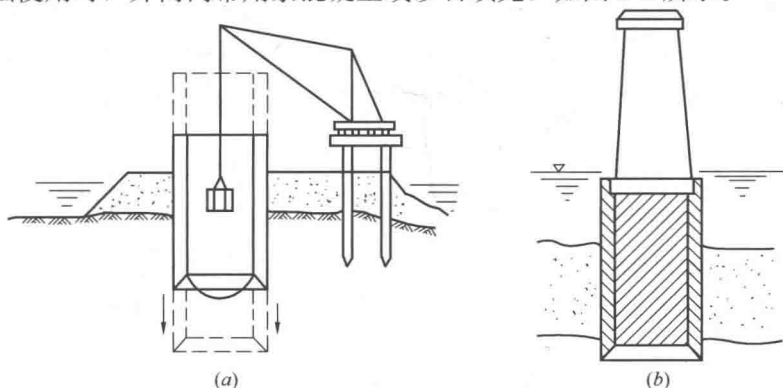


图 1-1 沉井基础示意
(a) 沉井下沉；(b) 沉井基础

沉井结构具有整体性强、体积大、结构强度高、变形小、刚性好等优点，且其内部空间可以充分利用，能够满足各种使用要求。预先制作好的沉井通过一定的方法能够下沉至设计位置，因此几乎可以适用于各种复杂的地质条件，如淤泥质土、流砂土及坚硬土层等，也能应用于水中作业，如在水流中建造桥梁。

由于沉井结构是在地面上制作完成的，其施工条件相对地下的施工条件要好，且避免了在地下水土中混凝土的浇筑问题，因此沉井结构本身的施工质量易于控制、质量能够得到保障且经济、便利。沉井在施工建造时占地面积较小，其结构本身就可兼作下沉中的围护结构，开挖时无需放坡和专门的基坑围护支挡结构，挖土量较少，对邻近建筑物和周围环境的影响也较小。

1.1.1 沉井的分类

1.1.1.1 按沉井横截面形状分类

(1) 单孔沉井

单孔沉井的孔形有圆形、矩形等之分（图 1-2a）。圆形沉井承受水平土压力及水压力的性能较好，而方形、矩形沉井受水平压力作用时断面会产生较大的弯矩，因而圆形沉井的井壁可做得比方形及矩形井壁薄一些。但方形及矩形沉井制作方便，使用时比圆形沉井空间利用效率高，为改善方形及矩形沉井转角处的受力条件，并减缓应力集中现象，常将其四个外角做成圆弧过渡。

（2）单排孔沉井

单排孔沉井有两个或两个以上的井孔，各孔以内隔墙分开并在平面上按同一方向布置。按使用要求，单排孔也可以做成矩形、长圆形及组合形等形状（图 1-2b）。各井孔间的隔墙可提高沉井的整体刚度，在下沉施工期，可利用其调整承压面积，使沉井能较均衡地取土下沉。常用作市政工程中的工作井，顶进工程中的出发井或到达井。

（3）多排孔沉井

多排孔沉井即在沉井内部设置数道纵横交叉的内隔墙（图 1-2c）。这种沉井刚度较大，且在施工中易于下沉，如发生沉井偏斜，可通过在适当的孔内反向挖土纠偏。这种沉井的竖向和水平向承载力很高，适于用作平面尺寸大的构筑物的基础，在大型桥梁上常用作中塔基础或悬索桥的锚碇基础。

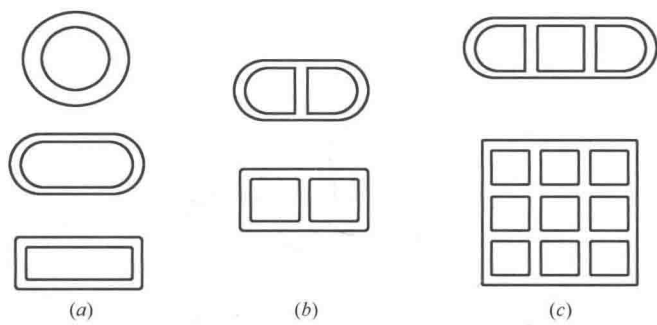


图 1-2 沉井横截面形状
(a) 单孔沉井；(b) 单排孔沉井；(c) 多排孔沉井

1.1.1.2 按沉井竖直面形状分类

（1）柱形沉井

柱形沉井的井壁按横截面形状做成各种柱形且平面尺寸不随深度变化（图 1-3a）。柱形沉井受周围土体的约束均衡，只沿竖向均匀下沉，不易发生倾斜，下沉过程中对周围土体的扰动较小。其缺点是沉井外壁面上土的侧摩擦阻力较大，尤其当沉井平面尺寸较小、下沉深度又较大而土体密实时，其上部可能被土体夹住，使其下部悬空导致“卡井”，容易造成井壁拉裂。因此柱形沉井一般在入土不深或土质较松散的情况下使用。

（2）阶梯形沉井

阶梯形沉井井壁平面尺寸随深度呈阶梯形加大（图 1-3b）。阶梯可设在井壁的内侧或外侧，前者有一定的扩孔作用，常用在密实土体中，以防止下沉困难。由于沉井下部受到的土压力及水压力较上部的大，故阶梯形结构可使沉井下部刚度相应提高。

（3）锥形沉井

锥形沉井的外壁面带有斜坡，坡比一般为 1/20~1/50（图 1-3c）。锥形沉井同井壁外

侧设阶梯的阶梯型沉井类似，也可减少沉井下沉时土的侧摩阻力，但下沉不稳定且制作难度较大，一般避免使用。

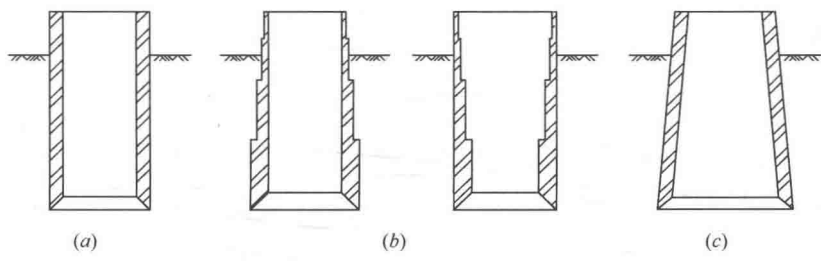


图 1-3 沉井的竖直剖面形式
(a) 柱形沉井；(b) 阶梯形沉井；(c) 锥形沉井

1.1.1.3 其他分类

按沉井的施工方法分类，一般分为陆地沉井和浮运沉井。
位于陆地时，沉井可就地制造、挖土下沉、封底、充填井孔以及浇筑顶板。一般认为当水深小于 3m，流速 $\leq 1.5\text{m/s}$ 时，可采用砂或砾石在水中筑岛，周围用草袋围护；若水深或流速较大，可采用围堤防护筑岛，当水深较大（通常 $<15\text{m}$ ）或流速较大时，宜采用钢板桩围堰筑岛，其余施工顺序与陆地沉井类似，图 1-4 简单示意了陆地沉井的建造过程。

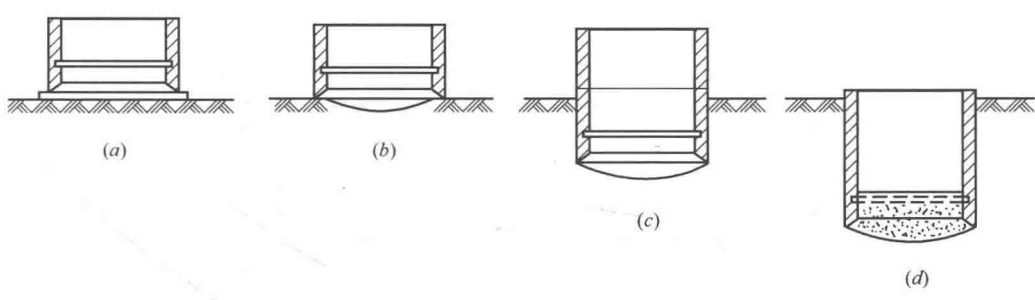


图 1-4 陆地沉井施工顺序示意
(a) 制作第一节沉井；(b) 抽垫木、挖土下沉；(c) 沉井接高下沉；(d) 封底

水深超过 10m 时，采用筑岛法已经很不经济，且水上施工也增加了困难，可改用浮运法施工。沉井在岸边做成，利用在岸边铺成的滑道滑入水中，然后用绳索拖引到设计墩位，如图 1-5 所示。

按沉井的建筑材料分类，分为素混凝土沉井、钢筋混凝土沉井、竹筋混凝土沉井、砖砌沉井和钢沉井，现在使用较多的是钢筋混凝土沉井和钢沉井。

素混凝土沉井的特点是抗压强度高，抗拉能力低，因此这种沉井宜做成圆形，只适用于下沉深度不大（4~7m）的软土层中。

砖石沉井适用于深度浅的小型沉井，或临时性沉井，例如房屋纠倾的工作井，深度约 4~5m。

沉井在下沉过程中受力较大因而需配置钢筋，完工后不再承受很大的拉力，因此，在

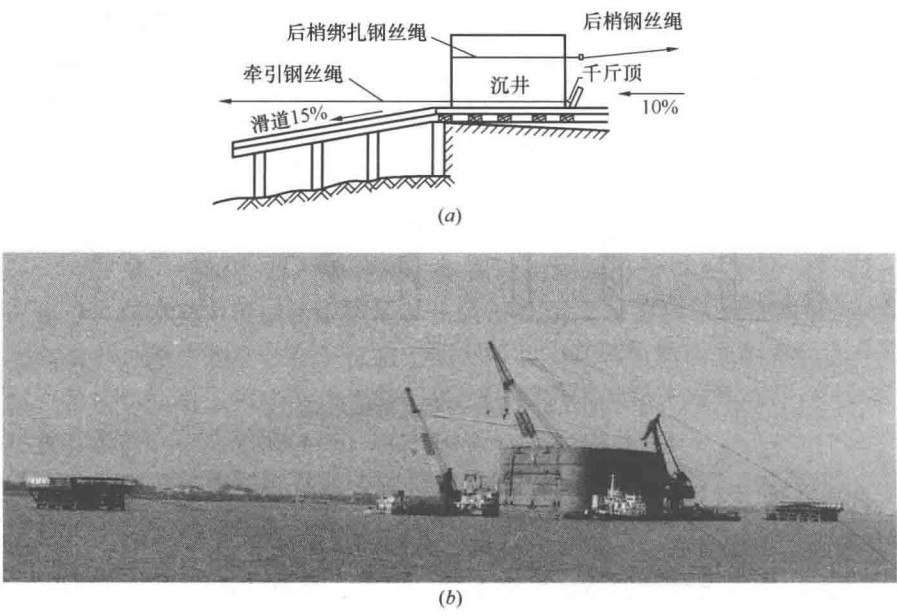


图 1-5 浮运沉井下水示意
(a) 浮运沉井的下滑示意；(b) 浮运沉井的实景照片

南方产竹地区，可以采用耐久性差但抗拉力好的竹筋替代部分钢筋来承受下沉阶段过程中拉力，在沉井分节接头处及刃脚处仍采用钢筋。

1.1.2 沉井的历史

沉井的应用历史悠久，它最早用于古老的掘井作业，而后发展成为一种用混凝土（或钢筋混凝土）等建筑材料制成井筒结构物的施工方法。

在国外，曾有文献记载在罗马帝国的全盛时期跨越泰伯河（Tiber）的桥已经采用了沉井施工，还有文献提到荷兰人也曾使用浅而简易的沉井建造堤岸。有确切记录的是 1738 年，瑞士工程师查尔斯·拉贝雷（Charles Labelye）在泰晤士河（Thames）上建造桥梁时，采用了 80 英尺长、30 英尺宽、16 英尺深的木沉井，该沉井选用长 9 英寸、宽 12 英寸的枞木做骨架并在两边分别覆盖了 3 英寸厚的板，四角使用熟铁条加固。沉井在岸上制作完毕后利用潮水托运到位并下沉，其顶面仅仅高于最低潮水位，施工时利用低潮的间歇时间抽干井内水并使用块石砌筑桥墩，待高潮沉井被淹时暂停施工，如此间歇施工直到桥墩高出水面。这种方法在 10 年后同样应用在罗伯特·麦尼（Robert Milne）建造的泰晤士河第三桥和 1816 年詹姆士·沃克（James Walker）建造的泰晤士河上第一座铁桥中。在 1839 年，法国沙龙尼（Saloney）煤田首次使用沉井施工法。

在沉井的下沉施工方法上，1944 ~ 1956 年间，日本首先采用壁外喷射高压空气的方法（即空气幕法）以降低井壁与土体的摩擦阻力，使沉井的下沉深度达到 156m；20 世纪 60 年代末至 70 年代初，沉井的下沉深度已超过 200m。由于空气幕构造复杂，高压空气耗量大，下沉速度不易控制，控制纠偏技术难度大，该法的推广受到限制。20 世纪 50 年代起，欧洲开始向井壁与土之间压入触变泥浆以降低侧摩阻力，这种方法至今仍广为流

行。目前,国内外已建成的沉井工程中不少深度达到 30m 以上,平面尺寸达到 3000m^2 以上,一些特殊用途的沉井深度可达到 100m 以上。

沉井结构的应用范围十分广泛,主要有以下几个用途:

①可作为直接开发利用的地下空间。如地下储油罐、储气罐、地下蓄水池、污水处理池、地下泵房、地下仓库、地下停车场、地下防空洞、地铁车站、地下商场及地下变电站等,在有些情况下可以连续下沉后纵向贯通形成隧道。

②可作为建筑物或构筑物的基础。包括高层建筑的基础、高耸塔式建筑物的基础、城市高架道路基础、重型设备基础、钢厂高炉基础、港口码头、堤坝水闸等水中构筑物的基础。

③可作为临水或近水构筑物的取水头或取水泵房。

④可作为各种地下生产及运输服务系统的辅助设备。如采矿竖井、排水井、通风井、顶管和隧道盾构施工中的始发井和接收井等。

⑤可作为深基坑的支护结构。特别是毗邻环境复杂,对沉降变形非常敏感的区域。

⑥可作为大型桥梁的基础,适宜中塔基础或悬索桥梁的锚碇基础,可处于岸边或者水中。

1.2 沉井的应用实例

1.2.1 建筑市政部分

随着近代西方科学技术的发展,一些著名的宏伟建筑不断地出现,像伦敦塔桥、巴黎埃菲尔铁塔、纽约布鲁克林桥以及曼哈顿的一些摩天大楼等,而为此提供基础承载的正是沉井技术,见图 1-6。



(a)



(b)

图 1-6 沉井基础的部分应用实例

(a) 伦敦塔桥(水中主塔,沉井);(b) 埃菲尔铁塔(沉箱)

除了作为一般意义上的基础使用外,沉井还经常用于各种地下结构和构筑物,如地下停车场、地下道路、地下水池、大型化工贮藏罐、矿用竖井、岸边取水构筑物、集装箱码

头、防波堤等，如图 1-7，图 1-8 所示。

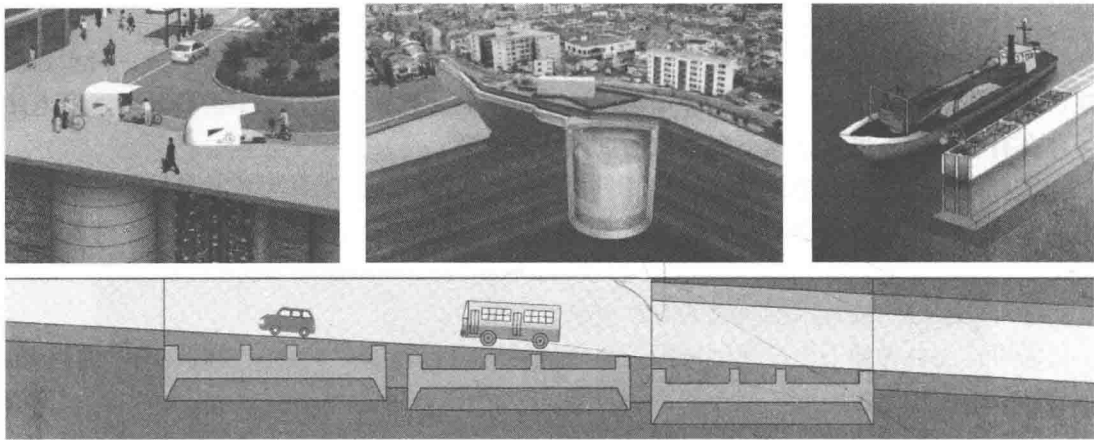
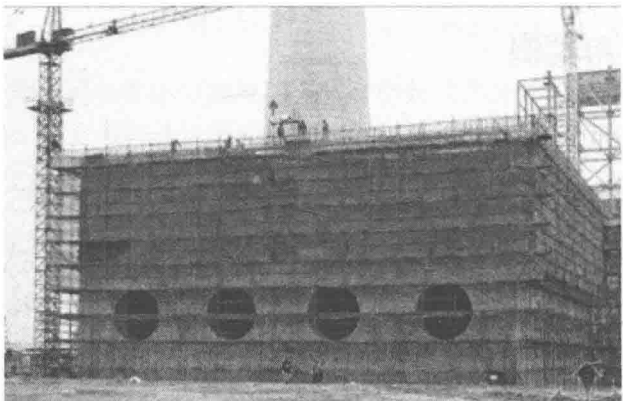
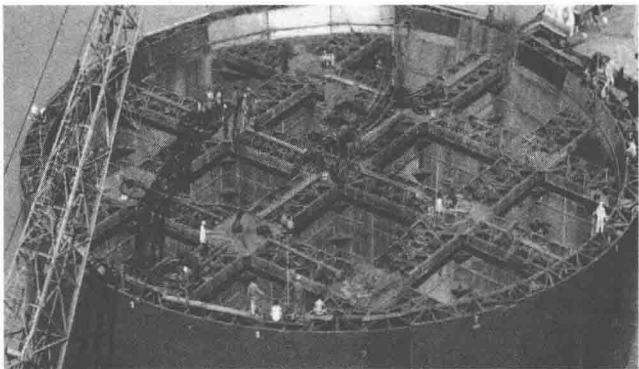


图 1-7 地下结构和构筑物的沉井



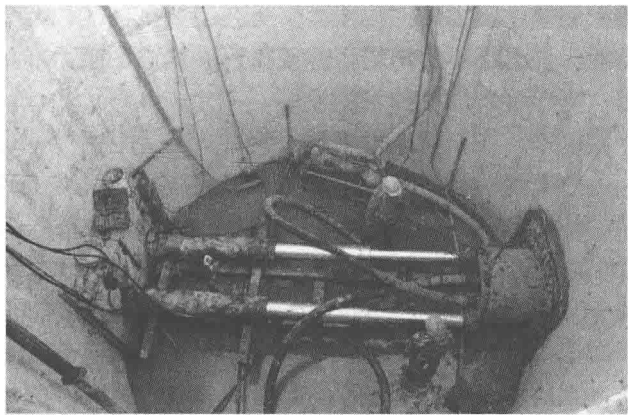
(a)



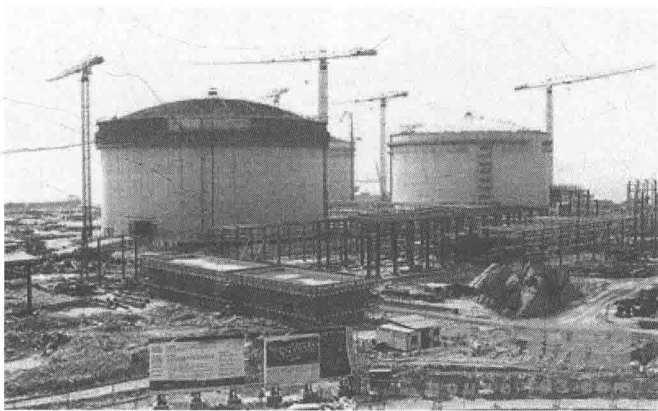
(b)

图 1-8 市政工程中的沉井（一）

(a) 给排水设施中的钢筋混凝土沉井；(b) 污水处理中的钢壳沉井



(c)



(d)

图 1-8 市政工程中的沉井（二）
(c) 顶管中的沉井（工作井）；(d) LNG 储罐取水口沉井

1.2.2 国内在桥梁及水利工程上的应用

20 世纪以来，随着越江、跨海湾、海峡大桥的兴建，中国、日本和西方各国大力发展深水基础，大型沉井作为深水基础的主要形式之一，获得了突破性的发展。

我国应用较多的是在桥梁基础上。近代最早应用沉井技术的成功实例出现在 1894 年 2 月，由詹天佑主持修筑的天津滦河大桥，该桥采用了气压沉箱法施工取得了成功。20 世纪 30 年代由我国著名桥梁专家茅以升主持设计建造的钱塘江大桥，是我国第一座自行设计的大型公路铁路双层两用桥梁，该桥首次采用气压沉箱法掘泥打桩获得了成功，打破了外国人认为“钱塘江水深流急，不可能建桥”的预言。

20 世纪 60 ~ 70 年代是我国大型沉井施工的第一阶段，带有明显的探索性质。

20 世纪 60 年代建设的南京长江大桥，其主桥 1 号墩处于江边滩地，覆盖层很深，沉井直径 20m，下沉深度达 50m。在没有任何经验和可借鉴资料的情况下，建设者通过对土层性质、沉井侧壁土壤摩擦力和刃脚土壤支承力的研究与实践，取得了宝贵的第一手资料，证明了“有如此重量的沉井，在如此地层条件下，是能够下沉到如此深度的”。

20 世纪 70 年代初建设的九江大桥主桥 1 号墩的沉井结构，虽与南京大桥基本一致，

但采用了可以大大减小侧壁摩阻力的“泥浆套”工艺，在沉井侧面与土层之间建立一个泥浆围圈，泥浆的稠度能保证土层不会坍塌，并使得沉井侧面的阻力非常小，这是对南京大桥引桥基础普遍采用“空气幕”助沉技术的发展。

自 20 世纪 90 年代以来，在交通建设领域，沉井的使用往往意味着宏伟工程的出现。以现代悬索桥为例，一些著名的大跨径桥梁多采用沉井作为主塔或锚碇的基础。

1995 年开工 1997 年竣工的江苏江阴长江公路大桥北锚沉井基础长 69m，宽 51m，高 58m，总体规模堪称当时之最。江阴大桥北岸的锚碇采用矩形沉井基础，沉井体积是南京、九江大桥沉井的 11 倍，其平面面积相当于 9.5 个篮球场。沉井置身于 90m 厚的软弱地基中。锚碇工程不同于桥墩，要承受巨大的水平向力，锚碇要坚如磐石般地承受住 6.4 万吨的主缆力，并通过基础传递给地基土层，因此，基础工程成为大桥建设成败的关键。江阴大桥在已有经验基础上，主要依靠沉井的自重下沉入土至 58m 深，坐落在密实中粗砂层上，如图 1-9 所示。

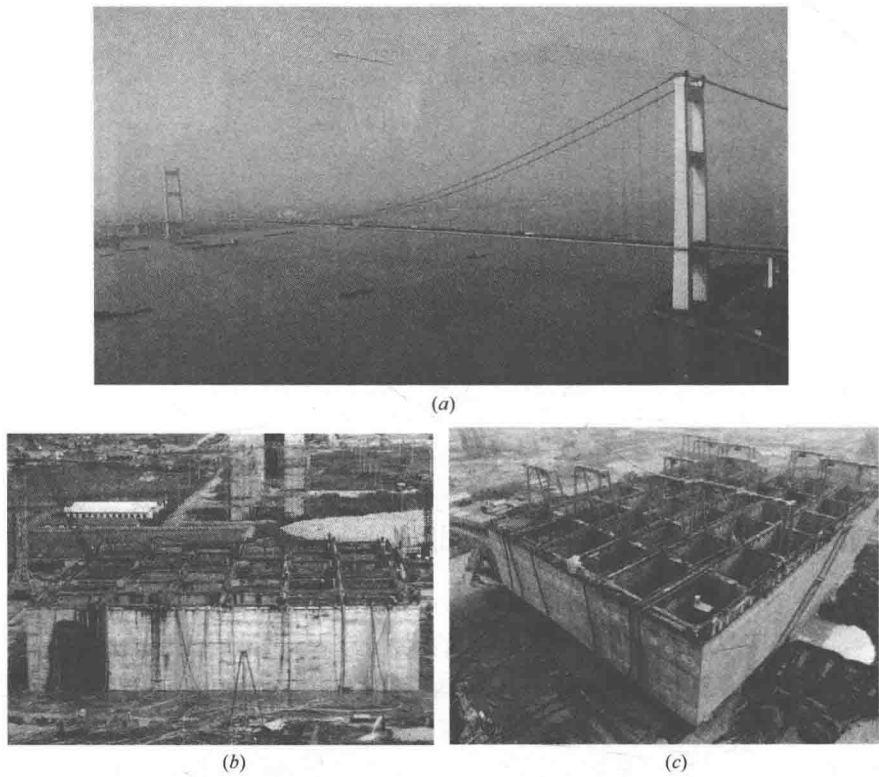


图 1-9 江阴大桥北锚碇
(a) 全桥；(b) 排水下沉；(c) 不排水下沉

1997 年开工 2000 年完成的芜湖长江公铁两用桥，其中铁路引桥的 0161 号桥台采用沉井基础，沉井地处 45m 厚的软土。具有低强度、高压缩性及易产生流变、触变等不良特性，在沉井施工之前采用砂桩挤密的方法加固地基。沉井施工中分 7 节预制下沉，第一节采用排水开挖下沉，其余节采用不排水吸泥下沉。

1998 年 5 月开工至 2003 年 8 月竣工的海口世纪大桥 S、N 主塔沉井全高 20.1m，断面尺寸为 30.4m×19.2m，内分为 15 个方格，外壁厚 1.4m，内隔墙厚 0.8m。沉井下部

14m 高为双壁钢壳，内灌注水下混凝土，上部为钢筋混凝土。设计要求下沉到-36.0m 高程的硬黏土夹砂层，沉井下沉采用了泥浆套助沉措施。如图 1-10 所示。

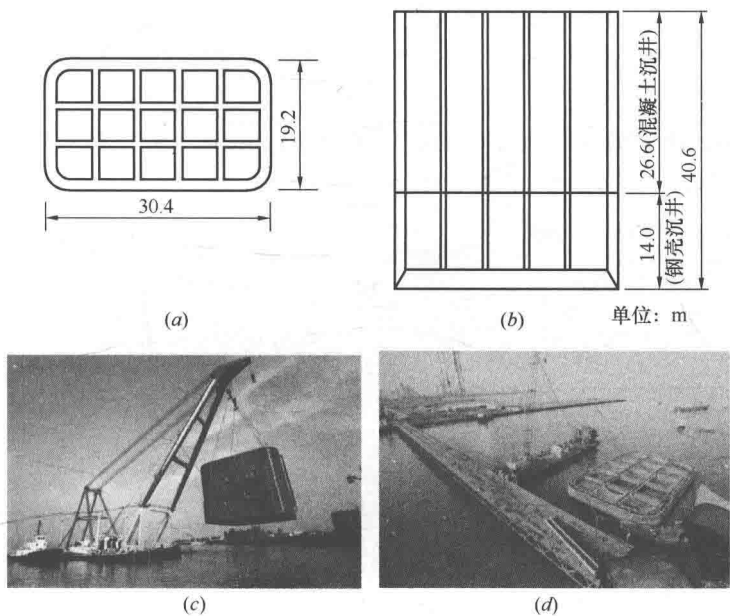


图 1-10 海口世纪大桥 S、N 主塔沉井

(a) 平面尺寸; (b) 立面尺寸; (c) 钢壳沉井吊装; (d) 灌水下沉

2006 年 11 月开工的向家坝水电站的沉井群由 10 个 23m×17m 的沉井组成，前期作为挡土墙及纵向围堰堰基进行二期基坑开挖，后作为二期围堰结构的一部分。1 号~10 号沉井依次沿一期土石围堰成“L”形错开布置，相邻井间距 2m，沉井群在施工过程中采用了泥浆套、空气幕不同的助沉施工措施。如图 1-11 所示。

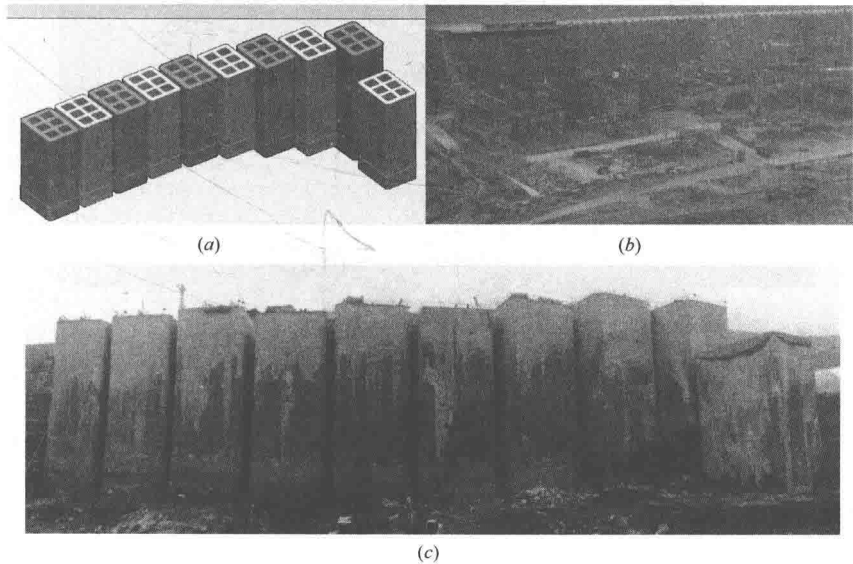


图 1-11 向家坝水电站沉井群

(a) 平面示意; (b) 下沉中实景照片; (c) 下沉前实景照片