

海上人工岛机场规划、 设计与建设

王 诺◎著



科学出版社



作者简介

王诺，1954年生，工学博士，大连海事大学教授，博士生导师。大连理工大学海洋与石油建筑工程专业（学士）、天津大学近海与海洋工程专业（硕士）和大连理工大学管理科学与工程专业（博士）毕业。曾长期供职于中国海洋石油总公司南海西部石油公司、大连港集团有限公司，历任大连港大窑湾港务公司总工程师、大连港设计研究院院长。先后主持完成国家社会科学基金项目、国家自然科学基金项目、教育部人文社会科学基金项目、国家海洋软科学基金项目以及辽宁省科学技术计划项目等9项，政府研究课题、企业咨询及工程技术专题120余项；作为第一作者或通讯作者发表学术论文80余篇，其中20余篇被SCI检索；出版学术著作7部。



科学出版社互联网入口

科学出版社 工程技术分社

电话：(010) 64033541

Email: zhangyanfen@mail.sciencep.com

销售分类建议：港口航道与海岸工程、水利工程

www.sciencep.com



定 价：298.00 元

海上人工岛机场规划、 设计与建设

王 诺 著

国家自然科学基金面上项目(71372087)
辽宁省科学技术计划项目(2012220008)

资助出版

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书是我国第一部关于海上人工岛机场规划、设计与建设的技术应用型学术专著。全书共8章,首先分析海上人工岛机场与海洋环境的适应性、机场运行的安全性以及在我国的建设前景,然后讨论海上人工岛机场的选址与规划、工程设计、软基沉降、施工工艺与管理、环境与生态、监测与维护、问题及展望等内容,总结国内外各人工岛机场在建设过程中的环境保护、交通组织规划、地基沉降预测等经验和教训。本书研究成果可为规划和建设海上人工岛机场的前期论证、总体设计及施工管理提供新的理念和技术支撑,具有较高的学术和实用价值。

本书可供从事交通规划和管理的政府有关部门,机场管理、建设,设计、监理公司,以及从事交通规划研究的高等院校及科研机构的学者、研究人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

海上人工岛机场规划、设计与建设/王诺著. —北京:科学出版社,2018.3
ISBN 978-7-03-055857-2

I. ①海… II. ①王… III. ①机场-规划②机场-设计③机场建设
IV. ①V351②TU248.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 305368 号

责任编辑:张艳芬 王 苏 / 责任校对:郭瑞芝
责任印制:张克忠 / 封面设计:陈 敬

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

http://www.sciencep.com

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018年3月第一版 开本:720×1000 1/16

2018年3月第一次印刷 印张:34 3/4

字数:685 000

定价:298.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

在海上建设大型人工岛民航机场,已被业界公认堪称为 20 世纪文明里程碑的一项伟大工程。日本关西国际机场、日本中部国际机场及中国香港国际机场的先后建成,彻底改变了民航机场只适合建于陆地的传统理念,为新世纪交通枢纽建设翻开了崭新的一页,也为现代科技的发展增添了新的篇章。

如同人类在科学探索中必然要面临各种挑战一样,这些被誉为 20 世纪人类伟大杰作的标志性工程,自规划之初至运营之后,各种问题和争议从未停息过,首先是对海洋环境和生态影响的忧虑;继而是对人工岛超预期沉降的困惑。当人工岛机场终于屹立于波涛之上时,人们面对的不仅仅是成功,还有更多的未知世界等待探索。

实践已经清楚地表明,就人类现有的知识而言,在建设人工岛机场方面还面临着诸多严峻的挑战。这其中包括对于人工岛地基的沉降,还没有完全掌握海洋软土基础的蠕变规律;对于海洋工程施工,还缺乏能够克服各种复杂因素,在实践中选择更为经济、有效的施工工艺和管理方法;对于海洋环境及生态,还没有认清如此大规模的海上人工建筑将对海洋生物、海岸形态以及可能存在的地质灾害等诸多方面带来怎样的潜在影响,而这些,正是本书试图回答的重点问题。

本书的构思和资料收集始于 2003 年。出于对我国建设海上人工岛机场可能性的探索和技术上的准备,作者先后实地考察了日本关西国际机场、日本中部国际机场、日本东京羽田国际机场和韩国仁川国际机场,与中国澳门国际机场和中国香港国际机场的设计、建设者们进行了多次深入的技术交流,积累了大量的第一手资料。能够紧密结合各地已建海上人工岛机场的工程实践,系统回顾这些机场在选址及建设过程中经历的经验教训,这是本书的一大特色。

在此基础上,本书尤为注重理论和方法上的创新,其主要的开创性贡献是:①深入阐述以往所忽略的土体蠕变对机场人工岛沉降的影响,探讨土工模型试验、土体微观结构分析等方法的基本问题及深化研究思路,开拓在土体沉降预测方面的研究方向;②以海洋环境保护、人与自然和谐共生为视角提出工程设计和施工方法的新理念,揭示并构建海上机场规划、设计及建设中的生态文明愿景及其基本方略;③提出计算机数值模拟与卫星遥感分析相结合预测和监督工程建设对海洋环境的影响、卫星雷达技术与现场实测相结合跟踪机场人工岛基础沉降等

现代科学技术手段的应用方法。上述成果已凝练为十几篇论文分别在 SCI、EI 检索期刊上发表,详见书后的参考文献。

当前,我国航空运输业的发展十分迅速,扩建、迁建机场方兴未艾,但由于土地资源日益匮乏,城市经济发展与机场建设用地之间一直存在着尖锐的矛盾。除了上海浦东国际机场、深圳宝安国际机场等利用临海特点向外海区域进行扩建外,我国部分沿海城市已开始筹划将机场迁建至海上,各项实际工程已经大规模地展开,一批刷新世界纪录的人工岛机场建设项目将在未来的几年内接连落成。因此,加紧开展海上人工岛机场建设方面的理论和工程技术研究,总结国内外的历史经验和教训,对我国沿海城市更好、更快地完成扩建或迁建新机场的规划和建设,具有重要的理论和现实意义。

纵观当前国内外海上人工岛机场建设的实践,归纳起来,最应该关注的关键问题主要有两个:一是如何解决对海洋环境和生态的影响;二是如何解决人工岛地基的沉降。可以说,人工岛机场可能是迄今人类在海上完成的规模最大的土木工程,如何评估其对环境及生态系统造成的影响,是 21 世纪生态文明建设的一道待解难题;人工岛机场地基沉降不止,何时结束看不到尽头,更成为我们未来不得不面对的挑战。无论从哪方面看,本书对上述问题所进行的讨论,即使已较为详尽,也不过是刚刚开始,今后还有很多工作要做。

需要特别说明的是,为展现工程方案的优化过程,便于读者研读和探讨,本书较多地介绍和讨论我国当前正在建设的部分人工岛机场的初期成果,各种数据已尽可能做到丰富翔实。但实际中因条件变化,各种方案随着施工的进展已多有调整,所引用的资料与工程建设的最终结果可能会有一定的出入,因而仅供相关研究者参考。作为学术上的探讨,即便早期的一些设想及方案未付诸实施,有些研究成果的作用和意义显现得还不深刻,但其思考的问题和论证过程依然有其重要的研究价值。对于书中存在的疏漏之处,衷心希望读者不吝指出,以便今后改正。作者的电子邮件地址是:Wanguodl@126.com。

最后,感谢国家自然科学基金面上项目(71372087)、辽宁省科学技术计划项目(20122220008)和大连市人民政府的资助。

作者
2018年3月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 基本问题	1
1.1.1 机遇与挑战	1
1.1.2 建设与生存	3
1.1.3 运营与安全	4
1.1.4 发展与变革	10
1.2 案例评述	13
1.2.1 日本长崎机场	13
1.2.2 法国尼斯国际机场	15
1.2.3 新加坡樟宜国际机场	16
1.2.4 日本北九州机场	16
1.2.5 日本东京羽田国际机场	18
1.2.6 日本关西国际机场	21
1.2.7 中国澳门国际机场	25
1.2.8 中国香港国际机场	26
1.2.9 韩国仁川国际机场	28
1.2.10 中国珠海金湾机场	30
1.2.11 日本神户机场	31
1.2.12 日本中部国际机场	31
1.2.13 中国上海浦东国际机场	33
1.2.14 中国深圳宝安国际机场	34
1.2.15 中国厦门国际机场	34
1.2.16 中国大连国际机场	36
1.2.17 中国三亚国际机场	38
1.2.18 中国南海岛礁机场	39
第 2 章 选址与规划	46
2.1 基本问题	46
2.1.1 平面布置	46
2.1.2 乘客交通	50

2.1.3	水上运输	58
2.1.4	鸟类活动	61
2.2	案例评述	63
2.2.1	日本关西国际机场	63
2.2.2	中国澳门国际机场	65
2.2.3	中国香港国际机场	67
2.2.4	日本中部国际机场	73
2.2.5	中国厦门国际机场	75
2.2.6	中国大连国际机场	77
第3章	工程设计	98
3.1	基本问题	98
3.1.1	人工岛设计标准	98
3.1.2	机场人工岛地面高程	107
3.1.3	机场人工岛基础结构	111
3.1.4	波浪物理模型试验	117
3.2	案例评述	117
3.2.1	日本东京羽田国际机场	117
3.2.2	日本关西国际机场	123
3.2.3	中国澳门国际机场	128
3.2.4	中国香港国际机场	131
3.2.5	日本中部国际机场	138
3.2.6	中国深圳宝安国际机场	139
3.2.7	中国厦门国际机场	142
3.2.8	中国大连国际机场	148
第4章	软基沉降	174
4.1	基本问题	174
4.1.1	地质数据获取	175
4.1.2	地基沉降数值分析	177
4.1.3	土工模型试验	190
4.1.4	土体微结构	218
4.2	案例评述	221
4.2.1	日本东京羽田国际机场	221
4.2.2	日本关西国际机场	223
4.2.3	中国香港国际机场	241
4.2.4	日本中部国际机场	244

4.2.5 中国大连国际机场	245
第5章 施工工艺与管理	332
5.1 基本问题	332
5.1.1 软基处理	332
5.1.2 填料获取	336
5.1.3 陆域吹填	338
5.1.4 施工工艺的选择	338
5.1.5 施工管理	343
5.2 案例评述	348
5.2.1 日本东京羽田国际机场	348
5.2.2 日本关西国际机场	353
5.2.3 中国澳门国际机场	374
5.2.4 中国香港国际机场	382
5.2.5 日本中部国际机场	386
5.2.6 中国上海浦东国际机场	386
5.2.7 中国深圳宝安国际机场	394
5.2.8 中国厦门国际机场	402
5.2.9 中国大连国际机场	406
第6章 环境与生态	422
6.1 基本问题	422
6.1.1 环境	422
6.1.2 生态	423
6.1.3 地形、地貌	424
6.1.4 城市噪声	426
6.1.5 热岛效应	426
6.1.6 历史及文化	428
6.2 案例评述	428
6.2.1 日本关西国际机场	428
6.2.2 日本神户国际机场	433
6.2.3 中国大连国际机场	435
第7章 监测与维护	467
7.1 基本问题	467
7.1.1 人工岛地基沉降监测	467
7.1.2 海域污染数值模拟与遥感监测	484
7.1.3 安全管理	486

7.2 案例评述	488
7.2.1 日本关西国际机场	488
7.2.2 日本中部国际机场	505
7.2.3 中国澳门国际机场	507
7.2.4 中国香港国际机场	509
7.2.5 中国大连国际机场	513
第8章 问题与展望	525
8.1 人工岛地基沉降机理	525
8.1.1 地基沉降的系统效应	525
8.1.2 土体变形的内在规律	526
8.1.3 地质勘探方法及成果的不确定性问题	527
8.1.4 土工模型试验方法问题	529
8.2 交通设施与组织	529
8.2.1 桥梁建设	529
8.2.2 综合交通	530
8.3 技术规范与风险辨识	530
参考文献	533
后记	

第 1 章 绪 论

1.1 基本问题

1.1.1 机遇与挑战

世界上最早的海上人工岛机场可追溯到 1975 年建成使用的日本长崎机场。以此为开端,世界各地又相继建设了多个海上人工岛机场,如日本的关西国际机场及中部国际机场、韩国仁川国际机场、中国香港国际机场及澳门国际机场等。目前,在世界上完全离岸布置的人工岛机场中,已建成营运的有 7 座,在建的有 3 座(表 1-1)。有的机场整体或部分坐落在水深较浅的浅滩上,或部分建于陆上、部分延伸到海中(如中国上海浦东国际机场、中国深圳宝安国际机场等),在地理特征上称其为连岸式半岛机场,此类机场数量较多(表 1-2)。

表 1-1 离岸式人工岛机场一览表

机场	建设时间	总投资	面积(填海面积) /km ²	设计年运量 /万人次	跑道数量	水深/m
日本长崎机场	1972~1975	180 亿日元	1.54(0.64)	300	1	9
日本关西国际机场	1987~2007	126.3 亿美元	10.56	3000	2	17~18
中国澳门国际机场	1992~1995	10 亿美元	1.92(1.26)	600	1	2~4
中国香港国际机场	1992~1998	1553 亿港元	12.55(9.38)	8700	2	4~5
日本中部国际机场	2000~2005	62 亿美元	5.8	2000	1	3~10
日本北九州机场	1994~2006	—	3.73	—	1	—
日本神户机场	1999~2006	30 亿美元	2.72	320	1	12
中国厦门国际机场	2010~	—	15.91(25.48)	4500(7500)	2(4)	浅水
中国大连国际机场	2012~	—	20.29	4200(7200)	2(4)	5~6
中国三亚国际机场	2016~	—	24	4000(7000)	2(4)	18~25

注:设计年运量一栏()中数据为极端运量;跑道数量一栏的()中数据为加上预留的 2 条近距跑道。

表 1-2 连岸式半岛机场一览表

机场	建设时间	总投资	面积 /km ²	设计年运量 /万人次	跑道 数量	水深/m
新加坡樟宜国际机场	1975~1981	13 亿新元	13	7000	2	浅滩
日本东京羽田国际机场	1984~1993	—	12.71	9000	3	10~20
中国珠海金湾机场	1992~1995	60 亿元	5.2	1200	1	浅水
法国尼斯国际机场	1975~1979	—	3.89	—	2	浅水
中国上海浦东国际机场	1999~	—	40	8000	5	浅滩
中国深圳宝安国际机场二期	2005~2011	60 亿元	13.23	3000	1	3~5
韩国仁川国际机场	1992~2003	60 亿美元 (一期)	一期 11.72, 二期 9.57	4400	3	浅滩

无论我们承认与否,将机场从陆地移到海岸区甚至海上,主要是对土地资源紧缺的一种无奈,人类利用海洋资源建设机场确实有效地缓解了陆地建设用地紧缺的矛盾。

从城市发展空间的角度来看,海洋显然是正待开垦的处女地。在海上建设人工岛机场不占用耕地,不存在城市建设中经常遇到的拆迁和征地问题,而且海洋人工岛可以远离城市居住区,对城市环境的噪声影响明显减少。建设海上人工岛机场,使得以往十分尖锐的社会问题得以回避,改善了城市居住环境,也节约了城市土地资源。

我国拥有 1.8 万 km 的大陆海岸线,海洋资源十分丰富。从我国的经济版图来看,经济发达地区大都集中在沿海区域,机场扩建需求迅速增加。近年来,尽管填海造地工程投资更高,但原居住者动迁补偿费用急剧攀高,使得建设成本对比发生逆转,通过填海获取建设用地的综合成本逐渐低于陆地,各方面优势尽显。

但是,上述观念上的“突变”,以及新一轮海上人工岛机场建设高潮的到来,却可能使海洋这一人类最后的家园为此承受巨大的代价。例如,在人工岛的建设过程中,因疏浚挖泥、抛填物料等施工所产生的悬浮泥浆会造成水域污染及生态损失;由于填海改变了自然岸线,致使近岸的海域和浅滩缩小,海水流场和海洋环境发生改变,造成沿岸栖息生物的生态环境变异,导致原有生物群落结构的破坏和物种减少、海岸带生态系统发生更迭或重构等,这一影响到底有多大,目前还不得而知。如何科学地去评价,如何采取相应的应对措施,所有这些既敏感又关键的种种疑问都亟须回答。

关于建设海上人工岛机场面临的问题,国外学术界已开展过一些研究,如 Nijkamp 等(2001)从市场效益和社会效果两个方面总结了海上人工岛机场建设得以成功的各种因素,并以中国香港国际机场、日本关西国际机场为例,认为在海上

建设机场具有节约土地资源、改善陆地环境的优点,同时也存在填海建设成本高以及影响海洋生态的弊端;Hulsewé(1999)提出了在国家领海之外海域建设机场是否与国际法相抵触等问题。在我国,这方面的研究相对较少,工程背景主要集中于我国中国交通建设股份有限公司承建澳门国际机场的施工总结上,有关机场规划、平面布置等前期问题基本没有涉及。对于日本等国家海上人工岛机场的研究,也基本停留在概况介绍上,缺少专门的深入研究。总体来说,虽然目前我国在港口建设以及填海工程的规模和强度上已远超世界沿海各国,但对于工程施工对象为机场的人工岛建设,则无论在基础理论、施工技术还是在工程实践上,都还有相当大的差距。

近年来,我国国民经济的发展和交通需求高速增长,推动着我国民航运输机场建设进入了扩建和迁建的高峰期。面对日益减少的土地资源与城市居民对居住环境要求不断提高的矛盾,在有条件的沿海地区将机场迁建到海上,是解决这一矛盾最有效的办法之一。通过几十年的港口建设,我国已具备了进军海洋工程的初步实力,但是,我国内地从未自主建设过离岸式人工岛机场,一系列重大的关键性技术问题(如护岸在消浪、抗震方面的结构设计问题,海洋深厚软土的沉降变形问题,海洋环境及生态的影响问题,海上施工的组织管理问题等)还未碰到,今后必然会面临各种各样的技术难题和挑战。

机场人工岛面临的环境千差万别,每一个具体工程都具有其自身的特点,客观上具有不可复制性。尤其是我国民航机场的运营具有从低水平、低能力迅速进入高水平、高能力的跨时代特征,许多机场已扩展到2条或4条跑道规模,所需人工岛的面积达到 $10\sim 30\text{km}^2$,是日本关西国际机场和中国香港国际机场人工岛面积的数倍,其技术难度远超想象。此外,我国建设海上人工岛机场在技术理论和工程实践上的经验十分有限,仅有的经验主要来源于澳门国际机场的建设实践,该机场人工岛面积仅为 1km^2 ,设置1条飞机跑道,航站楼等重要设施仍在陆地,因而对于海上人工岛机场而言尚不具有代表性。20世纪末建成的香港国际机场虽然属于海上人工岛机场,但位于两个天然岛屿之上,海洋软基特性不是十分明显,地基沉降较易控制,距岸也较近。因此,无论是海上施工工艺和工程管理,还是土体沉降监测和海洋生态环境保护,都将是我国工程界面临的新课题,加紧开展与此相关的重大关键性技术的开发及应用研究,是我国工程界当前最为迫切的重要任务。

1.1.2 建设与生存

海上人工岛机场的出现,是人类经济社会不断发展、土地资源日益贫乏、科学以及工程技术水平进入较高阶段的必然结果。

在各种类别的交通基础设施中,机场是面积最大、功能最复杂的建筑集群。

这一现代科技的产物,不但占地面积广大,建设标准较高,而且对周边空域也具有极其苛刻的要求。作为城市交通的载体和人流的汇集点,机场位置不宜距所在城市中心区太远。对于经济社会已经高度发达、城市活动空间已十分有限的今天,试图在城市市区附近再开辟出足够大的空地建设民航机场显然是极为困难的事情。即使能够承担高昂的经济代价,对城市的未来发展、人类宜居环境的需求和社会的稳定也是不相适应的。为争夺土地,民众与政府之间矛盾不断升级的案例屡见不鲜。

上述问题最突出的当属日本。据不完全统计,从1978年到2004年,日本某市共发生官民冲突700多起,其中大约500起与机场建设有关。有的机场为避免噪声扰民引发矛盾,不得已停止飞机在夜间起降,使机场的使用效率大大降低。有的机场建设与动迁户持续了长达50余年的对峙,多年也建不出1条完整的飞机跑道。经历了几乎是血腥的常年冲突,迫使政府从武力抢夺到道歉退让,期间不断反省,对居者生存权由轻视转向敬畏,对机场选址的可行性也开始从理念上进行调整。

此外,随着科技的进步、工程技术水平的提高,以及港口和海洋工程的大量实践,人工填海造地的能力和效率已经发生了翻天覆地的变化。从开采、挖掘到运输、地基处理等各个工序,已完全实现了机械化和设备大型化。如果条件适宜,甚至在几年内便可填出1座小型城市的陆地面积,这在以前是难以想象的。人类生产能力的大幅度提高,是今天人工岛机场从设想成为现实最根本的原因之一。虽然填海造地在工程投资上会有所增加,但动迁、征地的补偿费用大大降低,综合后总费用明显减少。经济上的巨大收益,成为推动人工岛机场建设的直接动力。

总之,越来越多的沿海城市已开始认识到建设海上人工岛机场的优势。实践表明,在海上建设人工岛机场,不仅可以节约土地资源,降低动迁成本,避免触发社会矛盾,减轻飞机起落产生的噪声和排放气体对城市环境的不利影响,而且,海上人工岛机场的跑道延长线上没有高大建筑和山丘等障碍物,有利于开阔驾驶员的视野,确保飞行安全。可以预见,随着人类科学的进步,海上施工技术水平的提高以及经济上的推动,各沿海城市更多地寻求在海上建设人工岛民航机场将成为未来的一种趋势。

1.1.3 运营与安全

可以肯定,在各种运输方式中,从事故发生的概率角度来看,民航运输的安全性是最高的,这已为各界所公认。但由于民航发生事故时人员生还率极低、一次性涉及的人数较多,对社会的震撼和影响要远高于其他交通事故,因而民航的安全问题尤为引人注目。客观上,不管如何加以防范,各种民航事故不可能完全杜绝,世界各地机毁人亡的重大、特大事故时有发生。这些事故的发生似乎在证明

一个潜在的法则:只要有发生的可能,随着时间的推移,就必然会发生。

统计显示,在民航客机的飞行事故中,降落阶段出现事故占较大比例,如果机场的设计考虑周全,运行环境良好,那么很多事故还是能够避免的,即使发生,其损失也会大幅度降低。因此,完善的机场设计和优异的运行环境,对于提高机场的运营安全具有重要的意义。

必须看到,对于填海建设的机场,尤其是离岸式海上人工岛机场,与陆地机场相比不利的因素主要有两个方面:一是人工岛机场所处的自然环境要比陆地更恶劣;二是与外界的交通联系相对脆弱。离岸式海上人工岛机场坐落于孤岛之上,暴露于开敞无掩护的海洋环境中,海上的灾害性天气会对机场建筑本身构成很大威胁,接连陆岛的桥梁交通的最大弊端是抵御灾害能力较弱。如何应对海上灾害性天气并开展重大事故紧急救援,是人工岛机场在规划设计阶段所必须认真考虑的问题。

毫无疑问,增强海上人工岛机场抵御灾害能力的最有效办法是提高建设标准,同时建立更多的交通通道。如同摩天大楼需要建立多个逃生通道一样,海上人工岛机场可通过开辟水上航线,提高在紧急情况下人员疏散和救援抢险时交通的通达性。为此,离岸式海上人工岛机场一般需要建设相应的泊位,形成水路运输能力,以便在灾害发生时可以同时通过陆上桥梁和海上船舶对滞留在机场的乘客和工作人员进行疏散,并运进救援物资和抢险人员,加快救援速度,及时控制事态发展,使其损失降至最小。

自然灾害是海上人工岛机场安全的最大挑战,尤其是遇到海啸或风暴潮时,海上或临岸机场将面临巨大的考验,日本釜石市建设的防波堤便是其中典型的例子。为防御海浪,当地政府投入了 14.88 亿美元的巨资,花费近 30 年时间,于 2009 年建成纳入吉尼斯世界纪录的世界最大最深防波堤。这座防波堤长 1660m (北堤长 990m,南堤长 670m),海底至堤顶的高度达 63m,堪称雄伟。高潮时,防波堤在水下的高度达 58.5m,露出水面的高度为 4.5m。日本港湾空港技术研究所为此特地出版了《使居民免遭海啸袭击的釜石港防波堤》特辑,称赞这是“港湾工程史上前所未有的防波堤”。然而,这座号称“世界第一”的防波堤,在 2011 年的海啸中,未能挡住海水的涌入,位于海岸附近仙台机场的候机楼、跑道、航空学校、停机坪等一片汪洋,乘客及工作人员不得不爬到候机楼顶层等待救援(图 1-1)。

但是,如果为防止海水入侵建设足够高大的挡浪墙,又会成为飞机起降的障碍。2013 年 7 月 6 日,韩亚航空公司的波音 777 型客机在美国旧金山国际机场降落时机尾折断,引发飞机起火,3 人死亡,180 人受伤。事故的原因是飞机下降的高度过低,其主轮和尾翼碰到了凸起的挡浪墙上,巨大的撞击力导致机尾折断,余下的飞机主体失控冲出了跑道(图 1-2)。



(a) 海水涌入机场,毫无阻挡



(b) 机场一片汪洋



(c) 飞机四处漂泊,乘客在建筑顶层避难



(d) 航站楼成为水中孤岛

图 1-1 日本仙台机场被海水淹没(2011年3月)



(a) 飞机下降角度偏小,尾翼撞击凸起的岸壁后解体



(b) 飞机正常入场角度



(c) 飞机主体冲出跑道后起火燃烧



(d) 折断的机尾



(c) 跑道两侧均设有挡浪墙



(d) 失去尾翼的飞机主体滑入土面区

图 1-2 飞机在美国旧金山国际机场滑出跑道(2013 年 7 月 6 日)

然而,对于某些紧急情况,人工岛四面的海水并非都是不利因素。事实上,柔性水面是飞机迫降的理想区域。当民航客机在降落阶段出现事故时遇到海面,很可能会避免灾难性的后果。例如,印度尼西亚巴厘岛机场是 1 座飞机跑道延伸到海中的连岸型机场,2013 年 4 月 13 日,1 架客机在该机场降落时因机尾发生故障无法减速,最终降落在距机场跑道端部 200~300m 的海面上。尽管机身当即断成两截,但海水形成了巨大缓冲,机上 101 名乘客和 7 名机组人员仅有 45 人受伤,无人死亡(图 1-3)。



(a) 机场鸟瞰图



(b) 跑道两侧只设有简单隔离网,未设刚性障碍



(c) 飞机如同船舶一样漂浮在海上



(d) 机体入水后断为两截,未发生大火