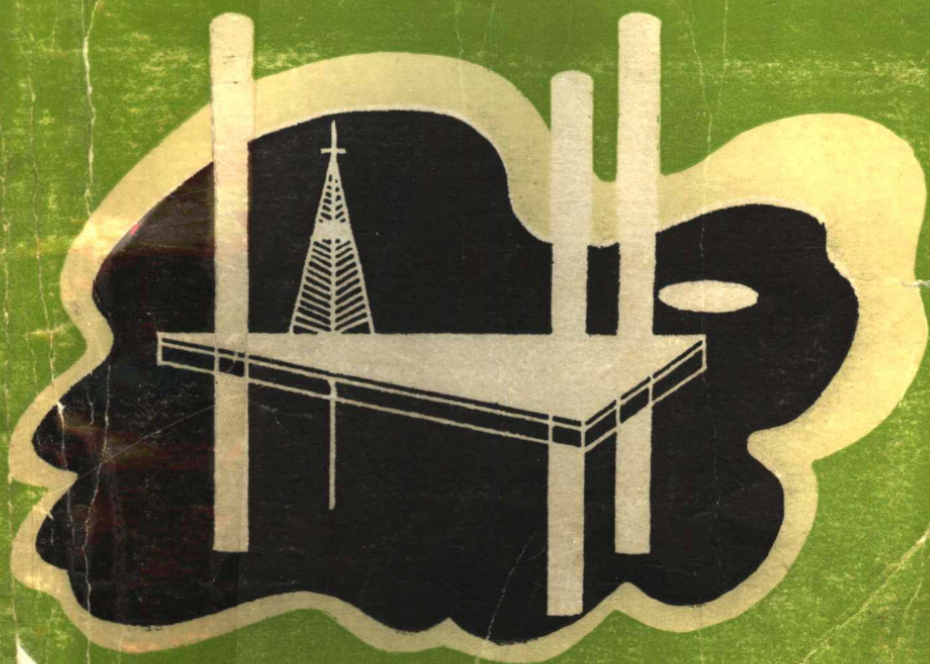


海洋石油建筑工程丛书



近海混凝土



数据加载失败，请稍后重试！

海洋石油建筑工程丛书

近海混凝土平台

王惟诚 孙绍述 宋玉普 编著

海洋出版社

1992年·北京

内 容 简 介

本文为《海洋石油建筑工程丛书》之一种。混凝土平台是近二十年来出现的一种新型近海工程结构物，是开发近海油田中很有发展前途的平台结构型式之一。本书较全面系统地介绍了混凝土平台的发展概况，及其设计、建造和安装的理论和方法。全书共分十章，第一章概述了近海混凝土平台的发展简史、现状及今后的发展趋向；第二章介绍了设计的基本原则和要求；第三章为环境荷载的计算；第四章至第九章分别为平台的选型、浮态特性、地基基础、静力分析、动力分析、截面设计；第十章简略介绍了平台建造和安装的程序和方法。本书可作为从事近海工程及海岸工程设计、施工和科研人员的参考书；也可作为高等院校海洋工程和海岸工程专业的高年级学生及研究生的教学参考书。

近海混凝土平台

王惟诚 孙绍述 宋玉普 编著

海洋出版社出版（北京市复兴门外大街1号）

新华书店北京发行所发行 海洋出版社印刷厂印刷

开本：850×1168 1/32 印张：21.4375 插页：2 字数：400 千

1992年8月第一版 1992年8月第一次印刷

印数：1-400

ISBN 7-5027-1385-9/TE·2 定价：14.00元

序 言

钢筋混凝土平台是本世纪70年代出现的一种新型近海工程结构物。当时,由于北海埃科菲斯克油田发现大量油流急待开发,而北海的海况又十分恶劣,采用传统的钢导管架平台,海上打桩作业时间太长,施工作业遇到了很大困难;加上当时国际市场的钢材价格上涨,促使在北海首先发展了这种新型的平台结构型式。1973年夏,世界上第一座大型近海混凝土贮油罐在北海埃科菲斯克油田落成,它的建造成功为欧洲北海及世界其它海区广泛采用这种平台结构型式开辟了道路。由于它具有贮油能力大,节省钢材,海上施工作业时间短,抗腐蚀、抗疲劳、抗事故破坏能力强,维修费用低等优点,因此在短短的几年内即得到很大的发展。到目前为止,世界上已建成各种混凝土平台22座,还有几座正在建造和设计中。从设计水深看,已建成混凝土平台的设计水深最小为15m,最大为155m,并已完成适用于300—350m水深的深水混凝土平台设计及适应更深水域的浮式钻采联合平台的设计。从适应海区的环境条件看,目前大多数混凝土平台集中在北海,但近年来波罗的海和南美巴西近海都先后建成了浅水混凝土平台。对北冰洋有严重冰冻和流冰影响的海区,以及软土和极软土地基的海区,也都完成了很多能适应各种恶劣环境条件的混凝土平台设计方案。总之,混凝土平台已经成为开发近海油田中很有发展前途的一种平台结构型式。

我国拥有漫长的海岸线,沿海广阔大陆架海区内蕴藏着极其丰富的油气资源。目前渤海、南黄海及南海的北部湾、珠江口和莺歌海海域正在开展对外合作,大量的海上油田急待我们去开发。如何设计、建造适合我国具体条件的近海钻井、采油、贮油

及装载油平台结构物的任务已经摆在我们的面前。从世界近海平台结构发展的历史看，在70年代钢筋混凝土平台出现之前，近海油田开发中主要是采用钢结构的平台。我国从60年代开始进行海上油田的勘探与开发工作，目前所建的近海平台也全都是钢导管架结构的型式。我国是一个发展中的社会主义国家，当前钢产量的水平还不高，特别是一些优质的海洋平台用钢，自己还不能大量生产，需要花大量外汇从国外进口。一座近海钢导管架平台，按水深不同，大约要用几千吨到上万吨钢材，几十座或几百座平台所需的用钢量是十分可观的。因此发展近海混凝土平台，节省国家四化建设中急需的钢材，特别是优质的海洋用钢，发展一条结合我国具体国情的近海油田建设技术路线是具有重大现实意义的。

我国是一个发展水利圬工结构物及桥涵结构物较早的国家，建国以后，在中国共产党的领导下成功的建设了像长江大桥、湛江港口及新安江水电站等大大小小上百项水上、海上混凝土结构的建设工程，取得了丰富的设计和施工实践经验。但对这种大型的近海混凝土钻井、采油平台，世界上目前已建成的也不过二十几座，总的来说这方面的设计和施工实践经验还是很有限的，国内的经验就更为缺乏。早在1965年我国即开始进行座底式的近海混凝土钻井平台设计工作，1977年又进行了渤海的近海固定式混凝土多用平台设计，但由于种种原因均未能实现。1983年开始又对我国南海北部湾近海油田采用混凝土平台结构，进行了系统的论证工作。虽然从十多年设计和研究的工作中，我们也积累了一些经验。但在我国毕竟还缺乏直接实践的工程建设经验。目前，我国第一座自行设计、施工的近海钢筋混凝土平台正在筹备建设中，相信不久的将来，随着我国各个近海油田的相继开发，将有更多的混凝土平台出现在我国的海洋上。目前的矛盾是：一方面大量的工程设计和施工任务有待我们去完成，但另一方面我们这方面的知识和工程经验还是不足的，而且使人遗憾的是直到目前为止，还没有一本系统的介绍近海混凝土平台设计和施工的专著。

为了适应我国近海油田建设发展形势的需要，将国内外目前已有的工程设计和施工经验集中起来编辑出版，以便指导未来的设计和施工工作是我们责无旁贷应尽的光荣任务。

可喜的是，近年来在国内外各种刊物和学术会议的论文中，发表这方面的文章已越来越多，使编著者有可能充分利用目前所能收集到的国内外混凝土平台设计、施工以及使用经验方面的资料，结合编著者本人多年来教学和科学研究的经验，编辑了本书奉献给我国正在蓬勃发展的年轻的近海油田建设事业。由于编著者的学识和水平有限，编辑时间比较仓促，缺点和错误在所难免，诚恳希望广大读者给予批评指正。

本书共分十章，第一、二、四、五、六、十章由王惟诚执笔；第三章由孙绍述执笔；第七、八、九章由宋玉普执笔；王惟诚任主编，赵国藩审校。本书编写过程中，何广纳、张瑞丰同志对部分章节作过审阅，提出宝贵意见，特此表示感谢。

编著者

1986.2.

目 录

第一章 概 论	(1)
第一节 概 述.....	(1)
第二节 重力式混凝土平台简介.....	(7)
第三节 混凝土平台的发展趋向及研究课题.....	(26)
第二章 重力式混凝土平台的设计原则	(31)
第一节 平台设计的一般要求.....	(31)
第二节 海洋环境条件及设计标准.....	(33)
第三节 平台结构的设计方法.....	(35)
第四节 荷载分类与组合.....	(38)
第五节 平台设计的主要工况.....	(47)
第三章 海洋环境荷载	(58)
第一节 风荷载.....	(58)
第二节 波浪荷载.....	(77)
第三节 冰荷载.....	(97)
第四节 地震荷载.....	(113)
第四章 平台结构型式及基本尺寸	(133)
第一节 混凝土平台的分类.....	(133)
第二节 混凝土平台结构选型.....	(136)
第三节 平台主要轮廓尺寸的确定.....	(143)
第四节 甲板结构及其与腿柱的连接.....	(159)
第五节 裙板与定位桩.....	(165)
第六节 防冲刷系统.....	(169)
第七节 系泊系统.....	(171)
第五章 混凝土平台的浮态特性	(176)

第一节	混凝土平台的沉浮性·····	(176)
第二节	混凝土平台的静稳性·····	(179)
第三节	混凝土平台的动稳性·····	(200)
第四节	混凝土平台的破舱稳性计算·····	(213)
第五节	混凝土平台漂浮施工及拖运过程中的运动特性·····	(216)
第六章	地基与基础 ·····	(233)
第一节	概 述·····	(233)
第二节	现场勘测与土壤试验·····	(239)
第三节	基础型式及地基处理·····	(240)
第四节	平台基础整体稳定计算·····	(243)
第五节	平台地基的变形计算·····	(273)
第六节	裙板及定位桩贯入阻力的计算·····	(288)
第七节	平台基底局部接触应力的计算·····	(296)
第八节	周期性动力效应对平台地基基础稳定及变形的影响·····	(301)
第九节	改善地基的措施·····	(310)
第十节	混凝土平台地基的原型观测·····	(314)
第七章	混凝土平台结构分析 ·····	(318)
第一节	混凝土平台结构的计算特点·····	(318)
第二节	平板结构的内力计算·····	(319)
第三节	壳体的基本方程·····	(333)
第四节	各种荷载作用下圆筒壳的内力计算·····	(342)
第五节	静水外压作用下回转壳体的内力计算·····	(358)
第六节	单个壳体的稳定计算·····	(361)
第七节	组合壳体的内力查表法·····	(367)
第八节	圆筒壳贮油罐的温度内力·····	(393)
第九节	混凝土板壳结构的有限单元法分析·····	(405)
第八章	结构的动力分析 ·····	(428)

第一节	概 述	(428)
第二节	单自由度系统的动力特性	(429)
第三节	单自由度系统分析实例	(434)
第四节	多自由度系统的动力分析	(444)
第五节	混凝土平台的三维动力分析	(452)
第九章	重力式混凝土平台的结构设计	(467)
第一节	普通钢筋混凝土构件的截面设计	(467)
第二节	有限预应力混凝土构件的截面设计	(471)
第三节	部分预应力混凝土构件的截面设计	(488)
第四节	结构的疲劳验算	(492)
第五节	结构的构造要求	(507)
第六节	钢筋混凝土平台的防腐	(527)
第十章	混凝土平台施工	(535)
第一节	施工的一般程序	(535)
第二节	坞内罐体基础预制	(539)
第三节	漂浮水上接高或临时着地施工	(550)
第四节	港内安装上部甲板及模块	(553)
第五节	海上拖运	(556)
第六节	平台定位、下沉、安放	(564)
第七节	事故性破坏及修复工程	(568)
第八节	工程实例	(570)
附表		
附表 3-1		(586)
附表 7-1 至 7-42		(593)
附表 9-1 至 9-10		(662)

第一章 概 论

第一节 概 述

钢导管架平台及重力式混凝土平台是目前近海油田开发中最主要的两种平台结构型式。从数量上看,钢导管架平台占绝大多数,到1985年为止,全世界近海固定式平台估计共有3970座左右,其中混凝土平台只有22座,仅占0.55%。从建造技术和使用经验看,钢导管架平台发展的历史长,已具有丰富的设计施工技术和使用经验。在1973年北海埃科菲斯克(Ekofisk)海上钢筋混凝土贮罐平台建成以前,海上油田开发中几乎清一色地采用钢导管架平台,直到本世纪60年代末,欧洲北海埃科菲斯克油田发现了大量油流。由于开发油田的急需,而北海的海况又十分恶劣,如果采用传统的钢导管架平台需要在海上打桩作业的时间长,遇到很大困难。再加上当时国际市场钢材价格上涨,促使在北海发展了一种新型的重力式钢筋混凝土结构的平台型式。他们利用在港口工程中建造近岸混凝土防波堤和海上重力式灯塔的经验,于1970年开始设计了这座大型的重力式混凝土贮罐平台。这座海上贮罐平台直径92m,高约100m,贮油能力100万桶($16 \times 10^4 \text{ m}^3$)。1971年开始建造,1973年6月建成,油罐外面采用开孔消浪壁(Jarlan壁)的型式。它的设计和建造成功,为在欧洲北海及世界其他海区广泛地采用重力式混凝土平台提供了极为宝贵的经验。紧接着在1975年北海又有两座康迪普(Condeeep)重力式混凝土平台及一座多雷斯(Doris)混凝土平台相继建成投产,而且在头几年中每年以建造3—6座的速度发展,到1978年北海共建成

类似的混凝土平台13座。与此同时,在北海以外的其他海区,也建成了四座浅水重力式混凝土平台。到1985年为止,世界上总共建成重力式混凝土平台22座,其中北海16座,波罗的海2座,墨西哥湾1座,南美洲的巴西近海3座。除此之外,还有9座正在订货或建造中。表1-1为目前世界各近海油田已建成投产的重力式混凝土平台基本情况一览表^[1-6]。

从十多年的实践经验来看,重力式混凝土平台具有下列优点:

(1) 在一个平台上可完成多种功能。一个多功能的混凝土平台可以完成钻井,采油(处理),贮油及系泊装载油等海上油田的几种作业或全部作业。特别是其庞大的沉箱基础兼作海底贮油罐,因而提高了平台的使用率,简化了近海油田的工程建设。

(2) 节省钢材。同样水深的混凝土平台与钢平台相比,钢材可节省三分之一到四分之一。如与完成同样生产功能的一组钢平台比,总用钢量将比钢平台少得多。而且大部分是建筑钢,无需用优质钢。

(3) 可提供较大的甲板面积和负载能力,有利于布置上部模块间的安全距离和分区。必要时可供两台钻机同时打井,加快打井速度。混凝土平台在漂浮状态作为一个浮体,有较大的负载能力,可使甲板及更多的设备在港内安装好再往外海拖运,使在外海安装设备模块的作业时间大为缩短。同时不需要在外海打桩,不需要租用昂贵的大型起重船和打桩船等大型海上施工设施,海上作业的工作量要比钢平台小得多,这一点对海况恶劣的海区尤为重要。

(4) 钻井、采油的工作条件好。导管和立管可安装在腿柱里面,免受风、浪、流、冰等自然环境因素的影响。受力好、安全,且可防止海洋污染。

(5) 混凝土的抗海水腐蚀、抗磨损、抗疲劳的性能比钢结构好。维修费用低,使用寿命长。

(6) 混凝土平台有很强的抗各种事故荷载的能力,如抗火

灾、爆炸、落物和船舶碰撞等能力远较钢导管架平台强。

(7) 混凝土平台的建筑材料, 世界上大多数国家和地区都能生产, 易于就地取材。混凝土施工技术要求低, 较易掌握, 技术工人易于培训。

任何事物都是一分为二的, 重力式混凝土平台也有它的弱点和缺点, 主要的缺点有:

(1) 材料耗量大, 运输量大。如北海一座混凝土平台的混凝土用量达 $5 \times 10^4 - 14 \times 10^4 \text{ m}^3$, 加上甲板及设备总重量最大达 $82 \times 10^4 \text{ t}$, 给施工场地和材料运输都造成很大困难。

(2) 对地基的要求高。在海底的地基是不易处理的, 因此要求地基具有一定平坦度和承载能力, 而且下面不能有松砂或软粘土等夹层, 以防平台在地震或周期性波浪荷载作用下产生破坏。

(3) 深水平台要求有较深的施工水域及航道。拖航阻力大, 需配备有大马力的拖轮。

由于混凝土平台具有上述较突出的优点, 因此从1973年第一座近海贮油平台建成至1978年短短五年内, 北海就出现了13座大型的混凝土平台。同时在巴西近海及墨西哥湾也相继建成了四座浅水混凝土平台, 这可谓混凝土平台的鼎盛时期, 但由于它本身存在的某些弱点, 如对地基承载力及施工水域水深, 拖运航道的水深等要求较高, 使它推广至世界其它海区造成了一定的困难和限制。特别是70年代后期, 大型打桩锤的出现, 海上打长桩和大口径桩技术的发展及新钢种抗疲劳和抗腐蚀性能的改善, 以及焊接技术的发展等, 都对钢平台提高竞争能力提供了有利的条件。因此, 从1978年至八十年代头两年内混凝土平台的订货相对有所减少。

1979年艾德、安德森及朗恩(O. Eide, K. H. Andersen及T. Lunne)等人在Boss'79第二次会议, (second International Conference on Behaviour of offshore, structures)

上发表了北海已建13座混凝土平台在建造过程和使用初期地基基础特性方面的实测资料,说明混凝土平台在技术上是完全可靠的,观察的结果与设计预测的十分吻合^[7]。接着Svein Field等人1982年在OTC上发表了11座混凝土平台的使用经验^[8],世界各国有关机构和学者从环境荷载分析、设计标准、计算理论、大型计算程序的建立以及混凝土材料特性和施工方法技术等各方面。做了大量的试验和研究工作。在总结十几个平台设计、制造、安放及使用经验的基础上,有关的国家和团体还制定了近海混凝土平台的设计与施工规范。这一些工作都对进一步发展近海混凝土平台起到积极的作用。特别是十多年来平台的实际使用经验,使有些石油公司也开始认识到混凝土平台的优点。不但在技术上安全可靠,而且在某些方面比钢平台强,如抗疲劳、抗海水腐蚀和事故性荷载破坏的能力比钢平台强。有的研究结果证明,当水深不太大时,在平台使用期限内,几乎可以不考虑疲劳的损伤和海水腐蚀的破坏。由于事故性荷载产生的破坏,北海的混凝土平台发生过两次,但只产生一些局部破损,未引起大的整体破坏,而且在平台不停产的条件下很快进行了修复^[9]。而与此同时,北海钢平台发生的腐蚀和疲劳损伤及事故性破坏的事件达60次之多^[10]。在材料特性的发挥上,混凝土平台的潜力也是比较大的,现有规范对强度和裂缝限制方面的要求还可以大大放宽^[11]。近年来,对预应力混凝土,高强度混凝土及轻骨料混凝土研究成功及应用,大大提高了混凝土平台的耐久性抗事故破坏的能力。在经济效果上,混凝土平台下部结构的直接成本较低,一般只占钻井、采油平台总成本的10%到20%,而80%到90%属甲板和设备成本,钢平台和混凝土平台相差不大。据1973年—1979年间的统计,北海钢筋混凝土平台下部结构的相对成本如图1-1^[12]。而且一个多功能混凝土平台完成的作业远非一个钢平台所能完成,必须用几个钢平台及其它集输贮运设施才能完成相应的作业。另外,两种平台的维修,以及最后拆除所需费用的差

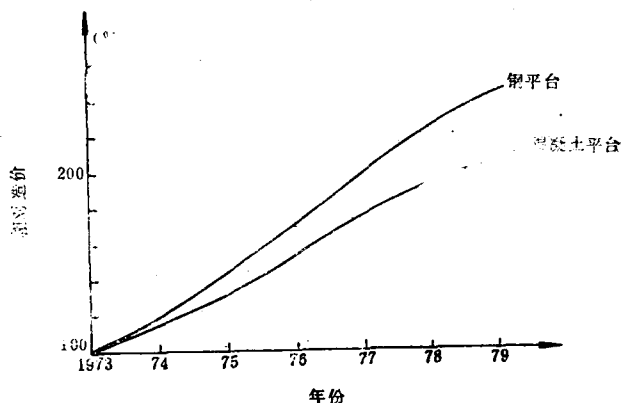


图 1-1 钢平台和混凝土平台相对成本逐年变化图

别也是不容忽视的。根据国外的经验,钢导管架平台,海底管线等钢结构每年需要有大量的潜水维修工作,其维修费用很高,年维修费一般约为其造价的5—7%。而混凝土平台基本上无需维修,年维修费只约为其造价的0.05—0.10%。另一点是所需海上安装的作业时间短,如北海斯塔福约德B平台从拖运、定位、沉放到基础下灌浆,全部海上施工作业只用了18天,而标志80年代海上平台安装新水平的塞尔维扎(Cervza)3号钢平台,海上安装时间也花了一个多月^[13]。所以混凝土平台的安装费用比钢平台低。仍以北海平台为例,一般钢平台在海上起吊及安装模块需要100万—250万个劳动小时,混凝土平台在岸边作业仅需50万—100万个劳动小时就足够了。如每小时吊装劳动的费用在海上按100—200美元计,相应岸边每个劳动小时吊装的劳动费用只需60美元。由此仅吊装工作节省的费用就相当可观^[14]。还未计及钢平台在海上大量打桩所需增加的费用。据北海现有平台的投资统计分析,钢平台的安装费用约占其总投资的13—14%,而混凝土平台只占其总投资的8%,平台安装费用与平台结构费用的比,钢平

台为1.04，而混凝土平台仅为0.58。因此，混凝土平台在近海油田的开发中仍然具有较大的竞争力，近几年在北海及其它海域对混凝土平台的兴趣越来越大，定货也开始增加，如近期就要开发的北海北部格尔法克斯（Gullfakes）油田，斯雷普那（Sleipner）气田、奥塞伯（Oseberg）油田和特娄勒（Troll）气田都计划要采用混凝土平台的结构方案，并已开始定货。

目前在欧洲北海仍然是研究和发展重力式混凝土平台最为活跃的地区，挪威、英国、联邦德国、法国等国正积极的参加研究和进一步开发、推广。他们除了研究发展常规水深的混凝土平台结构型式外，还提出了很多用于浅水、极浅水、深水（至350m水深），用于淤泥软基以及北冰洋流冰极为严重海区的混凝土平台方案，并提出了用于更深水域的浮式钻井及采油的混凝土平台方案。除此之外，在其它海域如巴西，印度尼西亚及日本等国也对混凝土平台发生了很大的兴趣。1977—1978年巴西近海3座浅水混凝土平台及墨西哥湾1座浅水平平台的建成，以及联邦德国1984年在波罗的海建成的两座浅水混凝土平台的事实，都有力的说明：重力式混凝土平台不但可以在北海建造，而且可以在其它海域建造；不但适用于中等水深，而且也可以在浅水中成功的应用；并且相信在不久的将来可在350m的深水中应用。

在我国从60年代开始就曾考虑过设计座底式的混凝土钻井船。1977年开始对渤海采用重力式混凝土平台可行性进行了大量的试验研究和方案论证工作。初步探索的结果说明在我国近海油田的开发中，采用混凝土平台的方案是可行的。1983年为了进一步论证重力式混凝土平台在我国南海应用的可行性，在国家经委的主持下，再一次组织了国内的有关单位进行方案设计和有关的理论技术研究工作。提出了适用于南海我国某些海区的重力式混凝土平台方案，研究结果也充分说明在我国南海海域发展混凝土平台是完全可行的，是符合我国国情的。混凝土平台在我国近海油田的开发中也必将得到很好的应用和发展。

第二节 重力式混凝土平台简介

一、重力式混凝土平台的组成

重力式平台是一个依靠其本身的重量座落在海床上来保持自身稳定的近海水工建筑物。

主要由基础底座，腿柱及上部结构三部分组成（如图 1-2）。

1. 基础底座：

平台在海水中，承受着巨大的环境外力，为保持其稳定，就必须有一个足够大的基础。如北海 100 多米水深，平台基础的宽度（直径）为 100m 左右。整个基础底座由若干个罐体组合而成，这些空心的罐体恰好与采油平台需要容量大的贮油罐结合起来。平台靠其本身

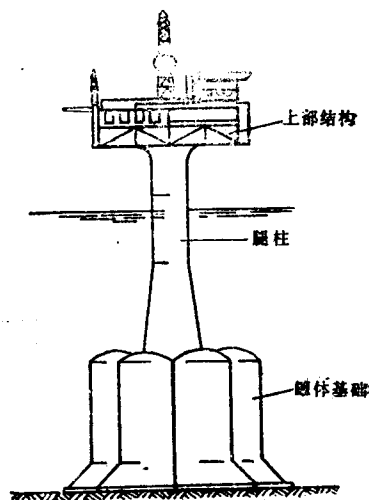


图 1-2 重力式混凝土平台示意图

的自重及贮油罐中装的油、水重量及压载物的重量来抵抗风、流、浪、冰等自然环境外力的作用，维持整个结构物的稳定。另外巨大的罐体基础，在平台漂浮施工，往外海拖运及安放下沉等施工过程中还可以作为一个浮体，提供足够的浮力，以保证平台在各施工阶段的稳定性。

2. 腿柱

腿柱的作用是支承上部甲板，并将其上的荷载传递到下部基础及海底地基上去。同时也可作为钻井导管和采油立管直通海底的通道及各种管道、人员上下及吊装生产设备等的通道，在其中