

专题科技情报资料

第8005号

内部资料

国外水泥船及浮动构筑物

(一)

建筑材料部 苏州水泥制品研究所

一九八〇年六月

国内
交换

PDG

目 录

混凝土船的过去、现在和未来.....	1
大型预应力混凝土船舶结构和建造的若干问题及经济分析.....	10
预应力混凝土造船可能性的研究.....	20
船用砂浆性能的研究.....	30
关于造船用重质混凝土.....	40
水下混凝土结构的耐久性.....	50
大型远洋船舶的船体设计与建造的若干意见.....	60
混凝土船壳.....	70
混凝土船壳的几种形式.....	80
预应力混凝土船壳的设计与施工.....	90
日本建造的混凝土船.....	100
混凝土浮动构筑物.....	110
滑模施工的预应力混凝土.....	120
海洋混凝土构筑物.....	130

国外小资料

混凝土船舶及浮动构筑物国际会议.....	140
混凝土海洋构筑物发展趋势.....	150
海上构筑物国际会议在里约热内卢召开.....	160
菲律宾的预应力混凝土驳船.....	170
已译成中文的有关混凝土与钢丝网水泥船的.....	180

出版消息

混凝土船的过去、现在和未来

Tony C. Liu

在过去 130 多年中,人们断断续续地设计和建造了一些混凝土船。本文将回顾混凝土船的历史,总结船体设计、施工及使用等方面的经验,提出今后的发展趋势及其未来的应用范围。

历史的回顾

1848年,法国的 J. L. Lambot 建造了第一条水泥船。1887年, Gabellini 和 Boon 建造了一艘混凝土单桅帆船《Zeemeuw》号。

从1900年起,许多小型混凝土船和内河混凝土船相继问世,其中包括美国政府使用的第一条钢筋混凝土船《Concrete》号。该船长6米,船体厚3.5厘米,由美国海军陆战队在北美洲五大湖使用。

1902年 Gabellini 建造了第一艘50吨的普通钢筋混凝土驳船,他还建造了许多其它驳船。其中包括1905年下水的驳船《Liquia》号。据报道,该船下水后正常营运了十二年。1910年,英国的驳船《Sandwich》号 and 美国的《先驱》号下水。

第一次世界大战中,由于潜艇的攻击而损失了大批商船,此外制造军火亦急需钢板,美国和美国就开始以钢筋混凝土作为船体材料,并制订了临时造船计划。在战争期间,美国和其他国家建造了许多大型混凝土船。其中大部分是美国建造的,包括最大的《宾夕法尼亚》号(6340吨,130米长)和最成功的《Faith》号(4188吨,97米长)。可是,这些船的设计都沿用钢船线型,耗费了大量钢筋和人工,且自重太大,很不经济。英国建造了混凝土船,其中《Armistice》号(1150吨,62.5米长)直到前几年仍在北海地区建立了千吨级的造船厂。1919年在格洛斯特就建造了一艘千吨级的混凝土船,至今仍漂浮在挪威峡湾。

这一时期共建造了约850,000吨远洋轮,其中不包括

第一次世界大战后,从1918年至1919年虽建造了一些混凝土船,但大批商船滞销,作为货船,混凝土船再也不能与钢船竞争。1919年以后,就不再考虑建造混凝土船。

二次大战期间,美国共有104艘混凝土船,其中一艘至今仍在挪威峡湾。

苏联在第二次世界大战期间也建造了一些钢筋混凝土平底船式构筑物。钢筋混凝土建造大批平底船式构筑物和驳船。

除了平底船式驳船外，两次大战期间混凝土造船业

两次世界大战期间设计和建造的船舶

国 家	第一次世界大战		第二次世界大战	
	设 计	建 造	设 计	建 造
美 国	560	69	200	4
联 合 王 国	250	2		4
德 国	—	5		18
挪威的纳维亚	—	—		2

第二次世界大战结束后，成功地建造了大批钢筋混凝土平底船。例如，1951年建造的网格结构的《Le Havre》号；1962年比利时建造了一艘带小型炼油厂的后张混凝土平底船（55米×24米），后拖至利比亚使用。

自1964年以来，A.A.Yee设计的九艘大型先张预应力混凝土驳船先后在菲律宾建成并投入营运。这些船舶基本上都是2000吨级驳船，用来运载干货和石油产品。它们对搁浅和偶尔碰撞均显示出良好的性能。其康有一艘在越南战争中还经受了水雷爆炸的考验，当时炸坏了一些窟窿，很容易就修复了。

1969年，新西兰建造了大批预应力混凝土驳和采矿船，并营运于南大西洋。从那时起，人们就用这些船只来装运生产水泥用的珊瑚岩砂。

美国成批地生产了钢筋混凝土和部分预应力混凝土船，然后拖航至墨西哥和尼加拉瓜等沿海，沉入浅水区中作为永久性的工作站。新奥尔良的海上混凝土构筑物建筑公司就生产了400艘类似的混凝土船，其上层是一座工厂。

最近，在华盛顿塔科马为大西洋里奇菲尔德公司建造了一座预制预应力混凝土船（该船排水量为68,000吨，尺度为140米×42米×17.7米）。最近将它舾装成液化石油气加工贮存船，已拖航8700海里至印度尼西亚，永久地停泊在爪哇沿海。

使 用 经 验

原始造价

Tuthill认为，第二次世界大战时船舶的实际造价为280美元/载重吨。然而，在生产22艘

同样尺寸(6375吨)的油轮时,模板可反复使用,并不断积累了一些生产经验,到1960年时,从300美元/载重吨降低到135美元;在坦帕建造的24艘自航油轮(5200吨)的造价也从300美元降低到314美元/载重吨。

1911年巴西的混凝土船造价为719美元/载重吨,而钢船却需1782美元。在同时期,巴拿马建造了许多混凝土船,其造价仅为钢船的一半。苏联建造的现代浮船坞,其造价也只有钢结构的60~70%。

A.A.Yee的预应力混凝土船造价比钢船节约16%。苏联有一篇报道指出,用预应力混凝土建造一艘600吨驳船,造价比钢船低12%;比钢筋混凝土船低3.5%。考虑了应力比、重量比和效率比后,T.Y.Lin和P.Y.Chow作出以下结论:预应力混凝土船体的造价是类似钢船体的75%。

生产混凝土船不需要大规模设施,故不用船厂就可建造。必需的主要工具也只是那些土木工程中常用的。普通施工单位和工人建造预应力混凝土船的的施工速度一般要比造钢船快得多。造价主要取决于当地条件。在拥有大量非技术工人,但缺乏造船设备的发展中国家,完全可以大幅度地降低造价。

充分利用成批生产、预制和拼装等工艺的优点,就可提高质量,加快速度,降低消耗,其原始造价是一定能够降低的。

使用价格

由于混凝土船体较重,表面积较大,因此耗油量也大。但A.A.Yee和其他学者指出,混凝土船舵效高,在恶劣气候下的操纵性好,可弥补上述缺陷。

通过对运输和拖运混凝土船坞的燃料消耗为型预应力混凝土船的经济分析,证明混凝土船用价格比钢船大约高13%。

耐久性与维修

只要合理设计和施工,在所有结构材料中,混凝土的耐久性最佳。且

1887年建造的钢丝网水泥船《Zeemeuw》号一直正常营运至今。钢丝网水泥船也显示出高度的耐久性和不需维修等特点。使用富砂浆的

根据临时造船计划,在1919年建造的钢筋混凝土船《S.M.维斯敦湾的浅水中),其用膨胀页岩集料混凝土制成的船体具有长久的耐久性。

对第二次世界大战期间建造的混凝土船的性能进行了研究。二十多年后,这些船舶的壳体仍完整无缺。经长期使用均未进坞,显然没有锈蚀。然而,普通钢船每隔10~18个月,就需进坞清除,重新油漆一次。

A.A.Yee的2000吨预应力混凝土船营运多年后,平均每年的维护费只需2830美元,而1750吨钢船则需8200美元。

浮船坞的费用节约就更可观了。与所有钢船坞相比有时可节约达90%。

根据航海经验,混凝土比钢的耐腐蚀性大,几乎不受海生物腐蚀,而且轻而易于维修。

海生物从混凝土船体上除去，因为混凝土船体上没有锈迹。

据Tutill和其他学者报道：摩克在混凝土船体上。

损坏与修复

与钢船相比，混凝土船的抗冲击性能较差，容易开裂。然而，配置了足够的护舷材后，在拖航和进坞的情况下，混凝土船的抗冲击性能很好。

在冲击力和爆炸击打时，混凝土船不会象钢船那样出现大面积损坏，只是局部开裂破碎。即使受到严重破坏，不用进坞，船在航行中用快凝水泥砂浆在水下就可加固修复。

所有类型混凝土船都采用了防护层钢板的好，在战争中还经受了炸弹与水雷爆炸的考验。例如，在第二次世界大战期间，德国一艘4吨混凝土船因尾端触雷而引起爆炸。该船在舱内进水，但船体没有沉没，经过修理后完成修复；而另一艘并行的同样尺寸的钢船在遭到同一爆炸时，船体严重受损，无法修复。

水害害

营运中混凝土船没有漏水现象。许多报告都强调，即使在最坏条件下，混凝土船依然是安全的。A. Yee也曾经指出，在第二次世界大战期间建造的混凝土驳船，在营运中从未发生过漏水现象，船壳内部仍很干燥。

稳定性

混凝土船体较重，拖航时稳性好，几乎不会出现偏航或振动等现象。

混凝土船的导热系数仅是钢的六分之一，所以混凝土货舱几乎不存在冷凝现象。

发展趋势

远望经济预测预言，到1990年世界将拥有一支30,000艘的大型混凝土船队，比目前增长几倍。其中许多船只将由发展中国家利用简陋设备、材料和人工建造。

普通钢船的耐低温性较差，不适用于装载低温货物。而预应力混凝土船在极低温条件下则表现出极佳的特性。事实上英国已经开始研究并提出用预应力混凝土船装运低温货物。

一家跨国公司过去三年内花了三百万美元设计了世界上第一艘自航液化天然气混凝土船，现已与美国、欧洲和日本的船厂谈判，预计建造12万9千立方米容量的运输船，费用为120万美元，而相同量级的钢船则需150万美元。与此同时，一艘造价为270万美元、262米长的预应力混凝土液化天然气加工、贮存船（非自航）的建造正在谈判中。

在北极地区营运的船舶必须体积大、耐低温、抗冲击强度高、刚性好、抗裂缝扩展和抗磨损。混凝土完全具备这些特性。人们要既安全又经济地开发北极区，就需要大量的混凝土。

船。

混凝土船也可用来运输如尿素等腐蚀性大的特殊货物。

人们相信，最近在澳大利亚组装的《Hay Point》中转站，为今后在深水海域建造中转站积累了重要经验。混凝土沉箱可在港内建造，该港具有完善的起重传送设备，然后拖至现场沉入海底作为重力建筑。

可用大型预制混凝土浮码头单元建造简易军港。这种浮码头单元能够承受1000磅/呎²装卸活荷载、高度集中的轮载和安装门式集装箱起重机。这些组合单元可以在海岸完成构筑物的施工，而后拖航至现场，用适当的支撑和定位系统将码头组合单元定位到所需的高度。上述方法的优点是：造价低、施工期短、可靠、机动性强。

研究和发展方向

必须有效地采用先进技术，才能在海上安全地进行混凝土施工。为此，特提出下列研究和发展方向：

1. 从第一次到第二次世界大战，人们用结构轻混凝土造船取得了很好的效果。事实证明，预应力轻混凝土是一种理想的造船材料，必须进一步研究高强轻混凝土的徐变性能、抗渗性，以及抗蚀性等基本设计资料。

2. 必须制订设计中最基本的抗蚀标准。目前，人们对周围条件的腐蚀、混凝土保护层、工艺、配筋种类和容许裂缝宽度等方面的知识还较零散，必须加以归纳总结。

3. 不论从海洋环境中混凝土的疲劳极限，或者反复循环荷载对裂缝的影响出发，都必须研究各种特殊浪载和风载下结构混凝土的疲劳强度。

4. 必须进一步探索混凝土船舶的施工方法。用小型预制混凝土构件拼装成大型混凝土构筑物是可行的。该技术的优点是：小型构件的质量容易控制，使用方便。

王苏平 译自《AD—AO45706》许如源校

大型预应力混凝土船舶结构和建造的 若干问题及经济分析

T.Y.Lin, Phillip Y. Chow

引 言

从历史上说,采用钢筋混凝土造船是始于钢材短缺的期间,当时必须考虑的是代用材料,也许并不重视经济性。在许多概述钢筋混凝土船舶发展史的文章中,对于这些成果都作了叙述。可以说,在第一批钢筋混凝土船舶正是在第一次世界大战之前和战争期间建造起来的。尽管在1920年至1940年之间就已经做了尝试,而实际重新研究混凝土船的计划是美国海运委员会于1941年~1945年期间制定的,当时钢材供不应求的威胁再次导致采用混凝土作为代用材料这一权宜之计。看来,钢筋混凝土船舶在技术上是可行的,并且它们在实际上也是非常耐久的。但是,由于经济原因,其投资和营运价格都不能和同类钢船相比。

第二次世界大战后预应力混凝土应用的发展给混凝土造船指明了一条新的途径,即不是用普通钢筋,而是使用预应力高强钢筋,使混凝土处于高压之中,以便抑制其开裂,并使裂缝减小到最低限度。A.A.Yee首次在新加坡采用预应力混凝土建造货驳。这些货驳具有2000吨的载重量,总长约200呎,在1975年,长461呎的预应力混凝土液化石油气船,已由ABAM的工程师们在华盛顿的塔科玛建成。同时,正在为北海的石油和天然气生产而动工兴建的混凝土平台(钢筋混凝土和预应力的)有12座以上,这些平台,每座约重150,000到400,000吨。虽然它们不是船舶,但它们是浮动容器,在沉降到海底之前,是拖航至其座落位置的。它们的建造成功表明,混凝土技术已经成熟,并能真正地、经济地用于海洋构筑物。在混凝土海洋构筑物中,特别是在采用预应力的混凝土海洋构筑物中,这个最近的研制热潮,对于海洋运输业,以及对于那些采用预应力混凝土的船舶和其它大型容器较为合适和经济的专业,它显示了某些重要的和耐人寻味的趋势。许多技术报告和诸如B.C. Gerwick教授等先驱工程师们所领导的各种委员会的审议,对这一发展有许多重大的贡献。

从造船工业的角度看,是否使用预应力混凝土的问题,可以在两个主要方面加以分析:

- 1.安全
- 2.经济

在安全方面,有强度,可靠性,可保养性和耐久性等问题。在经济方面,有造价、营运价格、保养和维修等问题。本文打算研究预应力混凝土作为一种船舶材料的基本经济问题,

同时,将指出这种混凝土船舶的优缺点及存在问题的地方。尤其是要涉及目前适于各工业部门的各种结构型式以及建造方法,以便在给定的标准和条件下得到最佳设计。本文试图对作为这些船舶材料的预应力混凝土和钢的基本经济情况加以比较。

作为一种造船材料的预应力混凝土

预应力混凝土作为一种造船材料有其固有的许多优点。现列举如下:

1.混凝土本身是一种来源极广的材料,钢筋和预应力筋的用钢量远远小于普通钢船的用钢量。

2.采用配有高强钢的高强混凝土,并给它们一起施加预应力,可很好地共同工作,从而获得最佳经济效果。

3.采用预制和滑模成型可以大大简化混凝土船舶的建造。快速施工往往是来自那些现今在大型混凝土建筑上得到迅速发展并被证明是优良的技术。

4.只要设计正确和建造得当,混凝土船是极其耐久的,这可由无数现存的,即使不是预应力的混凝土驳船所证明。华盛顿州西雅图的预应力浮桥的优良性能以及在近海地带的许多老的预应力混凝土桩都证实预应力混凝土适于海水环境。人们普遍称赞混凝土船舶只需要少量的维修保养,而钢船则需要定期入坞重新油漆。

5.设计成为钢船等强的混凝土船具有更大的刚度,与结构运动有关的猛烈摇动等问题较少,因此使船舶振动减至最低限度。

6.预应力混凝土和钢筋混凝土具有优良的耐火性。

7.在低温条件下混凝土性能优良。众所周知,混凝土的强度随着温度的降低而增加。这一特性使混凝土作为液化天然气运输船的建造材料或作为北极地带船舶的建造材料,具有无比的优越性。

8.混凝土具有优良的绝缘性能,只要设计正确,在疲劳、冲击和破损状态下,混凝土的表现良好。混凝土能够模塑成多种型状的表面,在曲面中采用预应力不会导致翘曲的趋势。

9.当混凝土在一个以上的方向施加预应力时,其强度通常增加。

10.预应力混凝土不会开裂,极少有渗漏问题,即使有,也是在工作条件下。

从基本观点来看,混凝土用作造船材料,也有一些缺点。现列举如下:

1.与钢船相比,混凝土船较重。由此而来的吃水较大,是一重要的否定之点。然而,采用轻质高强混凝土与高强预应力钢筋相结合能够使这种重量差减少。船型也有助于减少吃水。

2.混凝土船由于材料和吃水大的原因,一般摩擦阻力较大,因此与钢船相比,它们要求使用更大的动力来维持同样的速度。

3.混凝土在受冲击时可能散裂。通过正确施加预应力,调整预应力钢丝束的间距以及加入非预应力钢筋的办法,这种可能性能够被减少。

4.混凝土的质量和重量控制是重要的一条。这也能通过预制和工厂生产大大改进。

5.混凝土渗透造成的腐蚀和在冻融环境中形成盐窝也是一条缺点。现在,通过制备优质

混凝土和采用较好的施工技术可以得到解决。

6. 贯穿混凝土的开孔必须预留, 因为这些开孔的位置在浇筑混凝土和施加预应力之后, 不如钢船那样容易开孔。

与船用预应力混凝土有关的若干问题

对于一些问题的几种可能解决和实际解决的方法, 可顺便简要列举如下:

1. 腐蚀: 虽然知道预应力混凝土比钢耐环境腐蚀, 人们还是以为, 必须采取一定的预防措施来保证这种抗腐蚀性, 例如:

1) 采用密实高强混凝土, 例如用于埃科菲斯克储油罐的。

2) 将混凝土表面涂环氧树脂, 这是众所周知的和经常使用的, 然而, 它需要保养维修, 有如钢船涂漆一样, 需要再涂环氧树脂。

3) 用“聚合物”浸渍, 这属最新发展之列, 虽然商业上有所销售, 但价格高昂, 因此难以用于生产上。

2. 抗冻融: 改进混凝土抗冻融性的方法有数种, 如:

1) 采用加气混凝土, 然而这有降低混凝土强度的缺点。

2) 在外模板上铺设玻璃纤维网作为衬垫, 再在其上浇注混凝土。这一衬垫将控制裂缝的形成, 限制海水对混凝土的渗入。

3. 冲击时的散裂: 冲击时混凝土采取如下措施散裂能够减小到最低限度:

1) 如上所述, 引入玻璃纤维衬垫。

2) 可能时用“聚合物”浸渍, 如上面提到的。

3) 在接近表面处采用钢丝网。如果钢丝的保护层不足时, 需要进行特殊的防腐处理。

4. 混凝土船壳的重量: 这能够用各种方法减轻到最低限度。例如:

1) 采用每立方呎约100到120磅的轻质混凝土。

2) 采用高强混凝土来减小船的重量。

3) 采用“聚合物”混凝土, 除在经受高温的地区以外。

4) 通过充分利用混凝土承受双向力或多向力而获得有效的和最优的船体截面设计。

5. 运行时的摩擦阻力: 这可采用钢模成型优质密实混凝土或将其表面抹光, 或将壳体外面用环氧树脂处理来减小。

6. 质量和重量控制: 达到较好的质量和重量控制的方法包括:

1) 在浇筑混凝土之前和浇筑期间, 严密检查和监督混凝土的生产过程。

2) 连续不断地检验混凝土的重量。

3) 严格控制模板, 以限制在容许公差范围之内的尺寸变化。

7. 如何修复预应力混凝土船壳: 由于局部损坏出现开裂时, 可采用膨胀水泥或不收缩水泥重新浇注混凝土。如果预应力钢丝束损坏或断裂, 就将这部分清理干净, 重新配置钢筋和复盖膨胀混凝土或不收缩混凝土。新钢筋与原来预应力钢筋的拼接需要专门技巧, 才能不降低受损区的局部强度和整体强度。

8. 锚具区的防护：无粘结的预应力钢筋是不能用于造船的，因为有腐蚀危险。如果使用了，则它们的锚具要仔细防护。在钢筋束灌了浆的情况下，锚具区的一些碎裂或损坏则无关紧要。

9. 混凝土的收缩和蠕变：这些问题是众所周知的。因为船舶是一种单独分离的结构物，除应力损失如同预料的那样以外，收缩和蠕变不会产生总体的问题。由于船舶建造持续数月，在结构各部分之间，不同的收缩和蠕变产生的影响，需要加以注意。如果混凝土的性能在不同程度上保持一致，则局部收缩的出现将是很有限制的。如果出现局部开裂，可用环氧树脂将其修复。

10. 交变荷载和疲劳效应：因为这一点在同行中一般都不甚了解，故需详加解释。预应力混凝土具有优良的抗重复荷载的性能，它形成的裂缝不会发展到任何明显的程度。这是因为，只要在混凝土中不出现拉伸开裂，预应力钢筋中的应力幅度就很小，同时也因为混凝土中的压应力幅度一般是很小的。C. E. Ekberg 提出了一种合理的预计受弯预应力混凝土梁疲劳强度的方法。这个方法是利用预应力钢筋和混凝土的疲劳破坏包络线，并将它们和一个梁的应力弯矩图建立关系。

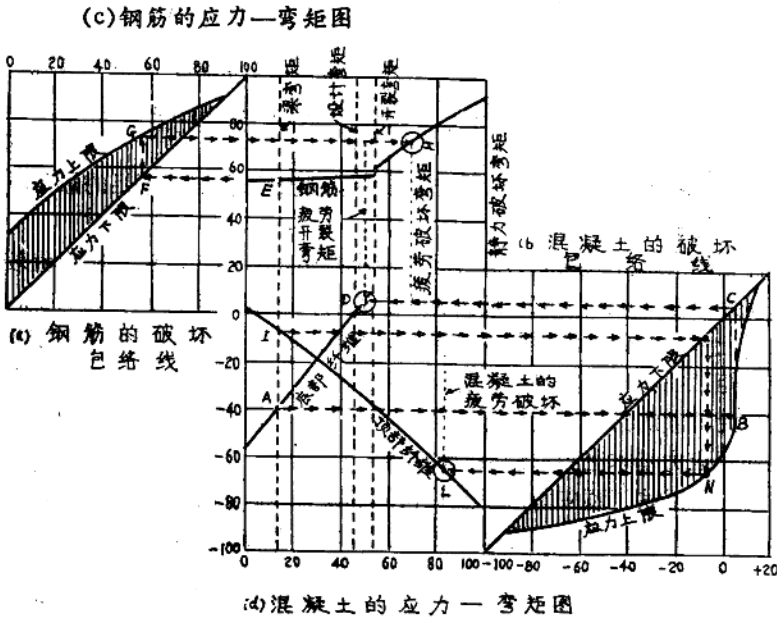


图1 预计预应力混凝土梁疲劳强度的方法

预应力钢筋的典型包络线如图1(a)所示。这个包络线表明，在一百万次荷载循环而达到破坏时，拉应力如何能从一个给定的较低级别增加到一个较高级别，并将所有数值表示为静力抗拉强度的百分比。这样，如果应力下限为0，则钢筋可以抵抗的应力范围计达 $0.27f_s$ 。

但如果应力下限增加到 $0.40f'_s$,则仅可抵抗 $0.18f'_s$ 的应力范围。如果在 $0.90f'_s$ 以上的应力下,在一百万次循环时只要增加很小的应力就会使钢筋破坏。尽管疲劳包络线随着钢的不同而变化,但这里给出的曲线可以看作一个典型的曲线。

混凝土的疲劳破坏包络线如图1(b)所示,这个线与钢的类似。所不同的是,它既包括拉应力,也包括压应力。这个图表明,如果应力下限为0,则 $0.60f'_c$ 的压应力可以重复一百万次循环。如果应力下限为 $0.40f'_c$,则应力范围可能为 $0.40f'_c$ 。如果压应力极限为 $0.20f'_c$,则产生裂缝的拉应力极限为 $0.05f'_c$ 。

钢在梁中的典型应力弯矩图如图1(c)所示,它也是用应力和弯矩各自相对于其静力强度和极限应力矩的比值(无量纲)来表示应力和弯矩。例如,当外力矩为极限静力矩的70%时,钢中的应力表示 $0.80f'_s$ 。同样,图1(d)给出混凝土纤维应力对弯矩的关系,它指出,在一定荷载条件下,不管上部或底部纤维,其拉伸值都较压缩值小。

综合图1中四个部分,便可确定钢或混凝土的疲劳开裂弯矩限度和疲劳极限弯矩限度。从应力弯矩图中代表最低应力值的恒载应力点开始,我们可以画出如下三个轨迹:

钢: E—F—G—H

混凝土顶部纤维: I—J—K—L

混凝土底部纤维: A—B—C—D

“H”点表明,最大弯矩为 $0.68M_{ult}$ 时,钢在一百万次循环时将被拉断。“L”点指出,在最大弯矩为 $0.84M_{ult}$ 时,上部纤维在一百万次循环后被压坏。“D”点表示,疲劳开裂弯矩为 $0.50M_{ult}$ 。

Ekberg采用分析算法研究了预应力值的影响,超配筋和配筋不足的影响,以及开裂特性,得出的结论如下:

- 1.其他条件相同时,降低预应力值会显著减小疲劳破坏弯矩。当预应力值较低时,裂缝较早出现,以及此时钢筋处于较宽的应力范围。这样,上述结论便是明显的了。

- 2.由于混凝土中的疲劳破坏不是控制准则,超配筋一般将增加疲劳强度。某一含钢量出现的最佳疲劳弯矩往往高于静力平衡设计所表示的值。

- 3.恒荷载与活荷载的比率对疲劳开裂弯矩的影响甚微。虽然反复荷载必然减小开裂弯矩,但是,施加预应力基本上会抑制裂缝的出现。

以上插入的一段反映了预应力混凝土优良的抗疲劳性。但是,不容忽视,对每条混凝土船舶都要加以研究。务必使它在容许疲劳应力范围之内发挥效能。

预应力混凝土船舶的建造方法

- 1.预制:毫无疑问,预制是预应力混凝土船舶中一种最经济而又可靠的方法。主要问题是确定预制部件的最佳尺寸和形式,以便符合工厂所能利用的设施。当把预制部件装配在一起时,可采取各种方式将其连接,例如,就地灌浆或灌注混凝土和搭接钢筋(不管是非预应力的或后张的)。许多可能的预制件截面形式将在后面讨论。

- 2.活模成型:包括滑模成型,不管是垂直式还是水平式。船壳体就地浇注时,可采用活

动模板，从一段移到另一段。一般来说，这将包括现场施工。

3. 先张和后张的比较：迄今，只有少量预应力混凝土船是用先张法建造的。先张具有节约灌浆和锚具的优点。另一方面，后张也有其适用的原因。后张钢筋能沿任何曲面布置。预应力钢丝束若长，锚具价格则甚低。如果后张预应力钢丝束是嵌在重金属套管中，则可很好地防止腐蚀。

4. 建造设施：干坞用来总装预制构件或就地浇筑混凝土，这种干坞的尺寸和深度对混凝土船的设计和建造有很大影响。

5. 起重和装卸设备：这种设备的尺寸和型号将决定预制件的重量和尺寸及其装卸程序。

6. 混凝土捣实方法、养护方法、搅拌和混凝土的浇灌，是几乎在任何一给定的条件下都能解决的一般问题。

7. 钢筋网、预应力钢丝束和锚具的制造及它们的布置，在一般条件上同样是有把握的问题。

结构形式及其最佳化的基本见解

假定建造问题对结构形式及总体布置没有限定，这样就能根据这些基本见解使结构设计最佳化，例如：

1. 使全部混凝土承受船上总的力，同时承受局部的力。这些力包括剪力，弯矩，轴向应力和扭转力。在大多数钢船中，不同部分材料要分别抵抗总的力或局部力，以及横向弯矩或纵向弯矩。在混凝土中，同一材料较容易承受双向荷载，如在板中。

2. 既能抵抗总的大弯矩，又能抵抗局部大弯矩的合理结构形式是最理想的。同样希望使结构布局最佳化，以使船的壳体既承载总弯曲，也承载隔板之间的板架弯曲。对于整个的船舶和局部承载能力两者来说，高的剖面模数是使材料和重量减至最低限度的重要因素。

3. 结构形式必须尽最大可能服务于功能要求，例如，混凝土甲板需要的是平面。反之，对于要求强度、节省材料和减少摩擦来说，弯曲的薄壳面可能是最好的。

4. 为了充分利用预应力，下面几点要精心设计：

1) 连接——请注意，各种方法都能用于连接，例如灌浆、环氧树脂、焊接及后张等。

2) 非预应力钢筋——在施加预应力同时采用非预应力钢筋能大大增加船舶的强度，而不致使混凝土超预加应力。

3) 锚具塞紧和防护——在这方面有许多精巧的设计可用于后张结构物。

实际的结构形式

与钢相比，预应力混凝土在实际的结构形式方面能够有广泛的选择。钢船基本上系由钢板所建造，通常是用钢轧成或组成某种类型截面的横梁和纵桁来增加船体的刚度和强度。要是混凝土，那就有许多类型了，例如：

1.板型：以板型使用的预应力混凝土类似建筑工程和桥梁工程中的预应力板。如果板的厚度设计成能承受所有外力，则是不经济的。此时，必须有一定数量的混凝土和预应力钢筋来承受具有一般剖面模数的总弯曲力。为了满足这种剖面模数的需要，对于板要求具有一定的厚度。这个板的厚度必须能横跨隔板、框架、横梁和纵桁构成的中间支撑。若板的厚度不足以横跨必须的距离，就要增加厚度，这样就会增加混凝土船体的重量和造价。于是，当船的尺寸加大和隔板间距增加时，采用简单的板型就不经济了。

2.曲面薄壳：作为对平板建筑的一种替换物，又经考虑使用曲面薄壳建筑，而且，实际上已应用于目前在华盛顿塔科玛建造的驳船上。曲面薄壳形状抗高压是有效的，尤其是当压力均匀时。然而，要注意，当位置发生一定倾斜时，会产生不均匀压力，就必须增加刚性隔板。

3.箱型：作为对简单的平板作用的另一种替换物，箱形断面可以证明是更加有效的，因为它给予了局部更大的剖面模数，因此可以横跨隔离较远的支撑。

4.T型：T形断面是另一种可能性。T型在一翼缘有较高的剖面模数，但在另一翼缘的剖面模数较小。而且，它只能提供一个光滑的表面，在功能上不象箱型那么有效。

5.组合断面：使用预制单的或双的T型，将一面浇注在另一边，使其改变成一个箱子，就可起到组合作用。基本上这与上面第3条中的箱型类似。

6.弓形构造：弓形构造可以组成各种形状的箱型。单箱、双箱、半箱及T型均可采用弓形构造制做。

7.混凝土框架：混凝土框架可用来构成横向和纵向隔舱。这种框架可制成“I”型，矩形，改良的“T”型等，与钢船的建造类似。

8.华夫构造(Waffle Construction)：华夫型带有双向肋，在桥梁和建筑物上已证明是一种经济的形式。然而在船舶构造上，华夫一边上的波形面对于承受局部力可能不是最好的形式。

9.带腹板的空心箱型：空心箱型带有双向腹板。这对预应力混凝土船可能是很有效的，安全而又最理想的形式。它在两边都有光滑的表面，并能承载双向力。这仅仅是一个理论课题；横向腹板无助于承载总力。然而，它有助于增强船对扭转作用的抵抗。

总之，可以指出，带有双向腹板的空心箱形构造，对于大型预应力混凝土船可能是最有效的形式。这种空心箱具有优良的孔隙，能使船的重量减至最低限度，并能提供有效的深度以抵抗局部弯曲。

关于预应力混凝土船与钢船的经济比较的基本见解

预应力混凝土船舶的经济性不能孤立地来讨论，而必须与钢船的经济性联系起来研究。同样，预应力混凝土船舶的强度也不能就其本身而言，而不与钢船的强度要求相比较。迄今，以规范和实施标准为形式的大量知识和情报都是适用于钢船建造的。这些并不适用于预应力混凝土。所以，必须将这些经验知识和要求从钢的改变为混凝土的。这样一来，往往规定混凝土船必须至少具有与钢船同样的强度。实际上，有时要求混凝土船必须具有相对应的

钢船强度的1.25倍。这些规定虽然本身明确，但在实际上非常难以测定，或在实际上难以实现。

用批准的标准进行设计的钢船强度，实际上是不知道的。标准规范要求钢船的剖面模数与钢的给定容许应力相对应。如果对预应力混凝土船提出同样的强度要求，必须将钢的剖面模数和容许应力这两者都改变成预应力混凝土的。钢的容许拉伸应力通常取决于它的具有延性的屈服点，而钢的强度则在其屈服点之上。这在极限拉伸断裂情况下是正确的，但在翘曲情况下不正确，在重复荷载情况下也不正确，因为钢的疲劳强度远低于其屈服点，而与其极限强度无关。

同理，混凝土的容许应力与混凝土的极限强度可以没有直接关系。混凝土容许应力在 $0.45f'_c$ 时产生一个2.2的对抗破坏的明显安全系数，但实际上，实际极限抗弯强度可能相当高。混凝土的抗拉强度是另外的问题。它通常在 $0.10f'_c$ 的范围，但是，当应力超过时，它就不再存在了。换句话说，已开裂的混凝土完全不能承受拉伸。

如果混凝土是预应力的，则情况不同。例如，如果混凝土预加应力至 $0.20f'_c$ ，而该混凝土的抗拉强度是 $0.1f'_c$ ，则该混凝土的抗拉强度将在开裂之前高达 $0.30f'_c$ ，在开裂之后将保持在 $0.20f'_c$ 上。然而，裂缝深度有限的弯曲开裂可能是无关紧要的。同时，如果将总压缩应力限制在 $0.45f'_c$ 时，加在已经预压至 $0.20f'_c$ 的混凝土上的补充压缩应力仅为 $0.25f'_c$ 。现在，假如按外荷载计算，压缩应力仅为 $0.25f'_c$ ，然后将该外荷载加倍，将产生 $0.50f'_c$ 的应力，包括 $0.20f'_c$ 预应力在内的总压缩应力仅为 $0.70f'_c$ 。因此，预应力混凝土中的剩余强度，无论对拉伸应力或压缩应力两者，都不能用计算应力直接表明。

当我们探讨预应力混凝土的剪切强度时，我们又会遇到困难的情况。混凝土的剪切强度取决于许多因素。首先，如果混凝土是单向预加应力的，则其抗剪强度大大增加，如同Mohr应力圆所说明的那样。如果混凝土双向预压，则主拉应力可能很小，因此，其抗剪强度有进一步的改善。如果除在单向或双向预加应力外，还增加非预应力钢筋作为箍筋，则混凝土的抗剪强度仍进一步增加。另一方面，如果大的弯矩和大的剪力存在于同一截面，则在该截面上大弯矩和剪力的联合作用将使混凝土受到不同方式的破坏。这一现象在美国混凝土学会关于混凝土剪力设计规范中作了充分说明。这里弯矩比剪切作用本身更能控制极限强度。因为这个情况，混凝土的剪切强度不能直接与钢相比。

预应力混凝土的抗疲劳性完全不同于钢的抗疲劳性。如上所述，预应力混凝土能承受数百万次的应力范围维持在一定程度之内的疲劳荷载。实际上，除非混凝土开裂和预应力钢筋穿过这些裂缝而遭受高度应力集中，在预应力混凝土中将是不会发生疲劳破坏的。就疲劳强度和应力极限而论，这使预应力混凝土与钢相比处于更为有利的地位。如果钢船的经验设计是以钢的疲劳强度为根据（例如某些采用焊接的自由轮），则预应力混凝土有可能表现得更好，可以不必设计抵抗现在用于钢船设计的那些同样的标称力或经验力。

鉴于上述关于将预应力混凝土与钢的强度作对比的困难，有必要将许多假定和许可范围加以概括，提出情况综述，看在什么样的条件下这一材料可与另一材料相竞争。下一部分将对此加以探讨。

预应力混凝土船体与钢船体的成本比较

预应力混凝土船舶对钢船的经济比较的讨论往往局限于造价方面。众所周知,这两种材料的保养和经营费是不同的,而且一般都认为预应力混凝土船舶因为其自重大而经营费较高。此外,预应力混凝土船舶上机器的成本可能较高,仍然因为其自重较大。同时,人们也认为预应力混凝土船舶的保养维修费用低,因为钢船需要油漆。

由于所建造的预应力混凝土船为数不多,从而不可能做实际成本的比较,或作任何总的结论。然而,对一材料与另一材料成本比较有影响的基本准则加以分析将是很重要的。这样才会清楚看出用两种材料制造船舶时成本比较的主要控制因素。

也许,预应力混凝土船与钢船的成本比较可以在三个主要方面加以分析:

1. 应力比: 这是钢船设计控制的容许应力与预应力混凝土船与此相应的应力之比。
2. 价格比: 它表示某部位每立方码钢的成本与相同部位每立方码混凝土成本之比,后者包括预应力钢丝束与钢筋的成本。
3. 效率比: 它是指在参与承载船的总弯曲的范围内,钢在船舶构造中的效率。这要与预应力混凝土的类似效率相比较,还要表示为在船体中抵抗总弯曲起作用的全部材料的百分比。

现在将这三个比分述如下

应力比

根据钢的强度将可得出其在抗总弯曲时船体断面最外边纤维处的平均容许抗拉应力与抗压应力。它大概在14千磅/时²~20千磅/时²之间。为了讨论目的,可采用平均值17千磅/时²。

混凝土的容许抗拉应力和抗压应力更加复杂得多。然而,对于在总弯曲下的预应力混凝土的容许应力能计算如下: 首先假定,一均匀预应力加于混凝土壳体中,以抵抗平均值为 $0.20f'_c$ 的总弯曲。然后,由于弯曲将允许有一个 $0.25f'_c$ 的增加压缩应力。同时,将允许一个 $0.20f'_c$ 预压缩 + $0.05f'_c$ 容许拉伸的拉伸应力,使总的容许拉伸应力也是 $0.25f'_c$ 。我们知道,预压缩可能是 $0.15f'_c$ 或 $0.25f'_c$,于是容许拉伸应力和压缩应力将可相应地修改。

为了讨论起见,假定混凝土预加应力到 $0.20f'_c$ 的平均值。再假定 f'_c 为5千磅/时²,于是 $0.25f'_c = 1.25$ 千磅/时²,这就是预应力混凝土的抗拉和抗压两者的容许值。

采用上述两个数值,即容许钢的应力17千磅/时²及容许混凝土的应力1.25千磅/时²,则得出有利于钢的应力比 = $17 \div 1.25 = 13.6$ 。这意味着同样体积的钢将比预应力混凝土有效13.6倍多。此外,要注意,这个数值将随着两种材料的平均容许应力而变化。

价格比

这是比较每立方码相应部位钢和每立方码相应部位混凝土的单位成本。此外,相应部位混凝土的成本将包括预应力钢束和附加钢筋的平均数。因为两种材料要求有曲面形状和各种不同形式的开口,所以用来比较的各个材料的假定比率将包括制造复杂的一个修正数。

相应部位钢的价格可能有很大的变化，姑且说每磅30到50美分。取每磅40美分的平均值，则得到 $0.4 \times 490 \times 27 = 5300$ ，它表示相应部位每立方码钢为5300美元。这个价格包括油漆费在内。

现在让我们分析预应力混凝土的成本如下：需要在纵向承受应力或给混凝土施加应力至 $0.20f'_c$ 的预应力的数量可按每磅1.00美元来计算。这意味着每立方码为 $1 \times 490 \times 27 = 13200$ 美元。因为当预应力钢丝束加应力至大约160千磅/时²时，混凝土被预加应力至1千磅/时²，钢丝束数值对混凝土数值之比将是1:160。所以，每立方码混凝土钢丝束的成本 $= 13200 \div 160 = 82$ 美元。在横向给混凝土壳体预加应力的增加数值将是纵向所要求的一半，故每立方码的成本为41美元。需要在垂直方向给混凝土壳体预加应力的钢丝束相对地少些，但可估计为横向钢丝束的一半，所以每立方码混凝土约为20美元。

附加钢筋的成本可估计为每立方码混凝土使用75磅（除预应力钢以外）。如果每磅钢筋的成本估计在40美分，则所有附加钢筋的成本每立方码相应部位将为 $75 \times 0.4 = 30$ 美元。这样，混凝土与所有预应力钢丝束和钢筋加在一起的成本为每立方码 $= 150 + 82 + 41 + 20 + 30 = 323$ 美元。

取上述每立方码钢5300美元和每立方码混凝土323美元这两个价格，我们可以得到有利于预应力混凝土的成本比 $5300 \div 323 = 16.4$ 。此外，我们知道，这一成本比将随着各种条件的不同而变化，在这里只不过为了讨论而已。

效率比

这要测定钢在抵抗总弯曲中的效率。钢船壳体有些重要部分需要承受的压力从水传递给横向或纵向隔板的局部弯曲。此外，需要有一大部分横向隔板给船壳增加刚度。我们可以假设，在百分之70%和75%之间对于抵抗总弯曲是有效的。为了讨论起见，让我们取70%。

对混凝土来说，大部分材料是用来抵抗总弯曲的，这道理很简单。体积大而刚度好的混凝土能在几个方向上比钢更加容易传递荷载，例如平板。此外，经过横向和纵向都预加应力以后，抵抗总弯曲的同样的混凝土能够用来抵抗局部压力和横向弯曲。所以，可以假定，75~80%的混凝土在抗总弯曲时是有效的。为了讨论起见，我们取77%。

这样，钢与混凝土的效率比采用上述平均数值，将是70%对77%，得出的有效值1.1，对混凝土有利。

采用以上讨论的三种主要的比（13.6对钢有利的应力比，16.4对混凝土有利的价格比，以及对混凝土有利的效率比）则可总结为，混凝土相对于钢的总造价，若采用钢的成本指数为100，则混凝土的指数将是 $100 \times 13.6 \div 16.4 \div 1.1 = 75$ 。如果上述假定是正确的，这意味着预应力混凝土船壳体的造价可能仅仅为相同钢船体造价的75%。另外，还要注意这样的事实，即上述假设不一定是正确的。然而它们表示了一定的条件，如果达到了，则这些条件将使混凝土变得比钢经济一些。