预应力混凝土应用于海洋结构工程的机理及前景

陈　宁
（武汉理工大学　武汉　430063）

摘　要:结构混凝土材料经过一个多世纪的开发、应用，对其破坏机理的内、外因及相应的加强措施，如采用钢纤维混凝土、钢筋混凝土和预应力混凝土进行深入研究，以使这一材料不仅能代替钢结构，节省材料，还用于钢材无法涉及的领域，如核电站安全壳、海上采油平台、储油罐等；通过分析混凝土破坏实质，约束效应和加强措施，探讨在海洋工程中的应用前景。

关键词:结构混凝土　约束　加强　预应力混凝土结构　海洋工程

1 混凝土破坏实质及约束效应

混凝土是一种由水泥、水、粗骨料、细骨料经拌合、成型、养护28天后形成的复合建筑材料。其中，水泥石是经水泥水化反应、凝胶体逐渐凝结、硬化的化学一物理过程而形成。由于混凝土的复杂组分及形成过程，使其受力作用后，因水泥石结晶体、砂、骨料的硬质成分胶结后所形成的骨架具有一定的弹性变形性能，而其中凝胶体、气孔及微细界面裂纹会使混凝土呈现塑性变形性能、徐变性能。混凝土具有强度随时间而增大的特性外，因这两重性使混凝土在卸载后，其弹性变形除瞬时回复外，尚能随时间增长而略有回弹（如短期荷载时的弹性后效、长期荷载的徐回等）呈现部分弹性性能；同时无论在短期荷载，还是长期荷载作用下，亦会呈现明显的塑性性能，尤其处于高应力状况下，其塑性变形均显著增大。

通过试验研究可知，荷载较小时，混凝土的变形是以弹性骨架的变形为主，尚存少量凝胶体粘性流动、空隙变形等；随着荷载增大，经超声波脉冲速度变化、噪声测听以及X 光观测表明，混凝土中不仅会呈现前述变形，其中内部空隙、界面微细裂缝两端受力过程中会出现应力集中现象，由于混凝土轴心抗拉强度约为1/ 17~ 1/ 8 的混凝土立方体抗压强度，裂缝会沿垂直于拉应力方向延伸、发展、加宽，致使混凝土试件体积增大。如混凝土垫板、试件间未涂润滑油的立方体受压试件，破坏时可见明显的大致平行受压方向，垂直于横向变形方向的裂缝，X光可观测到裂缝型态及其发展过程；加载至破坏的应力与应变、变形间的关系见图1。

通过侧向加压可提高混凝土强度，如图2所示，混凝土圆柱体三向受压时，由于侧向压力存在，限制了其横向变形，且能有效降低缝隙两端的拉应力，抑制了裂缝的延伸和发展，从而大大提高了混凝土的强度和延性。

实际中常采用不同的方式加强混凝土，提高其强度，除加强振捣、养护，减少孔隙、填充环氧树脂以改善其微观结构，更多的是以不同的约束方式提高混凝土构件抗弯、拉能力及改善其塑性性能，使之由脆性材料变为类似“弹性”材料的工作性能，或使结构具有与抗压能力相匹配的抗拉承载能力，乃至于改善其抗冲击能力、抗疲劳强度、耐磨性能等各项混凝土性能，被增强了的混凝土不仅可用于修建陆上建筑物，而且也能用于水上如处于严重腐蚀环境中的海洋工程，增强的结构混凝土被视为优选材料。

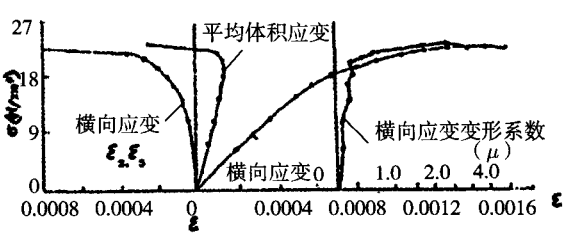

图1　纵向应变、横向应变、平均体积应变、横向变形系数与应力的关系

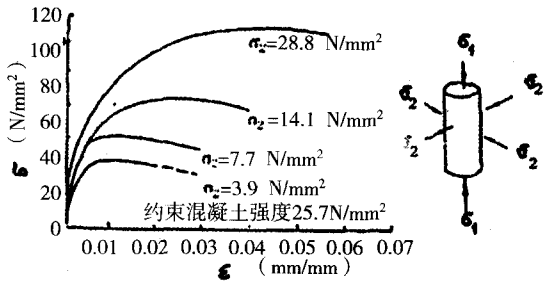

图2 混凝土圆柱体三向受压试验时轴向应变曲线

2 约束混凝土的方式及其在海洋工程中的应用前景

2.1 约束混凝土的方式

2.1.1 内约束混凝土

在混凝土浇筑前或浇筑中，模板内绑扎钢筋骨架或预留孔道设置预应力筋、或掺入加强材料，使之与混凝土共同承受外界作用；这些材料应具有与混凝土之间良好的粘结强度，一致的变形，相近的温度线膨胀系数，以免在受力过程或温度变化时，因应变不一致而产生内应力而破坏。

1）微观约束 — 钢纤维、玻璃纤维掺入混凝土内，以从混凝土微观结构上增强混凝土局部抗拉、压能力；

2）宏观约束 — 采用非预应力或预应力柔性钢筋或劲性钢材（如型钢）被动或主动替代混凝土受拉，类似弹性材料具有良好的抗弯拉能力；后者还具有良好的抗裂性能、耐久性等。

还有介于两者之间的钢丝网混凝土，如钢丝网水泥船。

2.1.2 外约束混凝土

1）径向约束混凝土 — 螺旋箍筋柱、钢管混凝土以及通过环外压力灌浆造成径向约束；

2）纵向约束混凝土 — 混凝土补强时纵向设置角钢、横向以缀板相连，或纵向设置体外预应力束强力约束以增强混凝土，用于建筑物及桥梁设计或修复中。

通过钢纤维、玻璃纤维、预应力、非预应钢筋、钢丝和钢绞线以及劲性钢材、钢管被动或主动置于混凝土中或混凝土外改善混凝土的性能，其强度、延性大为增加。以使各种混凝土结构在陆上建筑物和构筑物中占了很大的比重；在近海和海洋结构工程中，也占有不可忽略的地位，为人类生存空间的拓展，开辟了新的领域。

2.2 结构混凝土在海洋工程中的应用前景

作为海洋工程优选材料之一——结构混凝土材料经过一个多世纪的开发、研究和应用，采用上述不同的约束方式，加强混凝土材料，使之具有不少良好的工作性能，如一定的强度、良好的抗裂性、尤其是抵御海水侵蚀能力、结构的耐久性、稳定性、抗冲击能力和抗疲劳强度等。另外，在耐火性、防泄漏保护环境方面，亦有其特点。在上世纪数十年中，结构混凝土，尤其是强力约束的预应力混凝土，在实践中已有不少成功的实例，证明它在海洋工程中是适宜的材料，甚至其耐腐蚀性方面也成为不可替代的材料。以使在今后人类海洋工程的广阔天地有无限前景，其也将成为这一领域的首选材料。

2.2.1 北海混凝土重力结构发展概况

自1973年挪威（N）在北海Ekofisk海域所建第一座依靠巨大的重量立于海床，靠自重保持稳定的采油平台以来，储油罐采用预应力混凝土结构不乏枚举，至1981年就在北海建起了17座平台和储油舱，其主要功能及相关技术数据如表1；表中编号2、3、8、10、11和17 6座平台均采用如图3所示结构型式和组成；编号为7的平台钢筋用量达13 930t；17座平台的混凝土用量见表1（5）栏。工程之巨，发展之迅，令人叹为观止。90年代预应力混凝土平台已建在深达300 m以上海域。

除上述结构型式外，还有混凝土三角支撑结构、混凝土浮式生产平台等（如图4），由于混凝土重力式平台一般不便移动，无法重复利用，若设计成可移动式将提高重复利用率。

2.2.2 典型北海采油平台（N）

海洋工程发展十分迅速，从上世纪30~40年代近海至70年代深海，如1989年挪威在北海建造的石油开采平台，由24只直径28m、高5m的油罐和用以支承重50000 t钢结构的4根混凝土管柱组成。混凝土结构总高度达262m，混凝土总用量240000m³，普通钢筋70000t、预应力钢筋3600t；预应力后张水平束主要设置于底板、裙壁

板、环梁和油罐罐壁；竖向束设置于油罐壁及管柱，最长竖向束达198.5m。施工技术先进，油罐共用1800只油压千斤顶提升达56m高仅用42天，混凝土总浇筑量114000m³；平台在近海施工浇筑完后拖运至现场沉入海底20m深的软土中，施工中泵送最大高度达200m；后张束采用VSL体系（5-19、6-19和6-31）。该平台需承受30m高巨浪、地震及高水压的作用，所用混凝土28天强度达79MPa，为高配筋预应力钢筋混凝土结构（最高配筋量，普通钢筋750kg/m² 预应力筋100kg/m²），以适于各种严峻的工作条件。

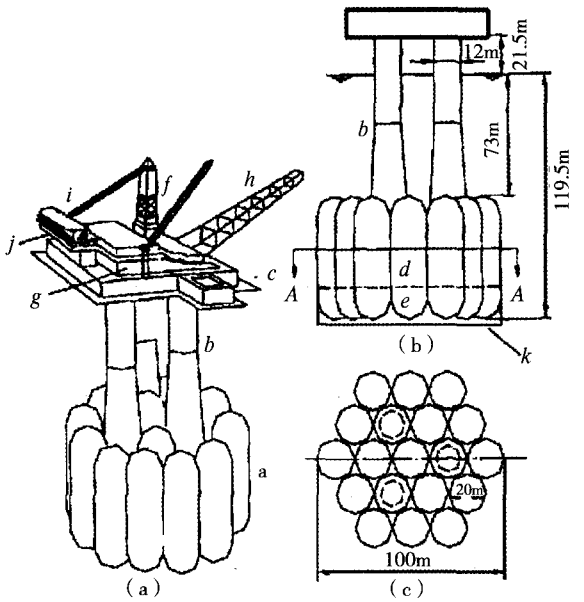

图3 贝瑞尔（Beryl）A condeep型重力结构

a-砼海床沉箱；b-伸到水面砼塔柱；c-舱体支承结构；d-储油；e-砂镇重；f-钻井塔架；g-钻探及生产设备；h-外伸塔；i-直升飞机坪台；j-居住、膳食、设备舱；k-穿入基岩的钢裙套筒。

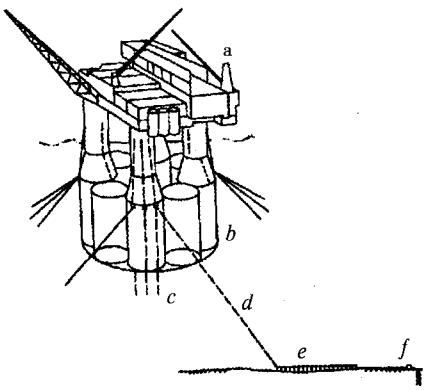

图4 砼浮式生产平台方案

a-生产设备；b-储油罐和浮筒；c-生产升降机；d-固定缆索；e-集桩镇重；f-锚锭。

除上以外，北冰洋CIDS型平台由于采用了预应力混凝土结构，处于浮冰作用的环境下，多年来均安然无恙；同样，纽芬兰所建近海平台亦为这类结构，能承受来自格陵兰冰川的巨大冰山的冲撞。

2.2.3 海上大型浮船工厂

上世纪80年代建成了大型海上浮船工厂，船上工厂达43个之多，包括化工厂、发电厂和水厂等；还建成了北海储油罐、造纸厂以及大型驳船（145×4.5m，深17m，排水量59000t）等。采用预应力混凝土建造近海和海洋上大型浮式工厂，不仅拓宽了人类活动的范围，在人口不断增加、陆地有限的条件下，为人类征服占地表面积79%以上的海洋，开劈了道路；而且，其建造花费较在陆地上建造同样工厂少25%~30%。有资料表明，建造预应力船壳为钢材制作费用的75%，而且前者的耐久性明显优于后者。综上所述，结构混凝土将会是修建海洋能源储罐、能量转换动力站（厂）、海上工厂、航空港（站）、大型平底驳船和潜舰、船只的首选材料。

2.3 预应力增强混凝土船舶建造的可能性

如前所述，随着人们对混凝土材料的不断深入研究、改善其材质、减轻其重量出现了聚合物浸渍混凝土、纤维混凝土、轻质、高强混凝土以及加筋，甚至施加预应力使之有可能用于海洋舰船制造业中，对其可行性探讨如下：

2.3.1 预应力混凝土船舶与钢船比较

对于舰船的航行速度此项应是重要的。这里仅列举美国有关研究，对同样体积的材料两者的应力比、价目比和效率比所得数据，分别为13：14、16：16和1：1.2，预应力混凝土船舶明显优于钢船，从纯结构观点出发，用预应力混凝土制作船壳仅为以钢制作费用的75%。

美国海岸防卫部门认为预应力混凝土的船体具有足够的抵抗冲撞的能力。预应力混凝土船体可以在全厚度内（横向）配置高含量加筋，使该船体吸收能量的能力与钢船体穿透规范所规定的1.5m深度所发出的能量相当。预应力混凝土船舶因自重较大，故在燃料消耗方面不可避免存在一

定问题，值得探讨。

2.3.2 现代技术及存在问题的探讨

1）采用轻质混凝土、不同聚合物浸渍混凝土以及钢纤维或玻璃纤维混凝土，可减轻其重量并能具有更好的耐腐蚀性和抗冲击能力；而钢材提高耐久性只能加厚钢板或改善涂层。

2）采用高强度混凝土、预应力钢材制造，如现混凝土强度可达100MPa 以上（如美国、加拿大及我国工地均获C120高强混凝土）；在实验室中，以高温、高压及特种工艺制作下可高达200MPa以上。同时采用方法1），使之进一步提高，以减轻船体自重成为可能。高强预应力的钢丝强度达1860MPa以上，为普通钢材强度（210~320MPa）数倍，用于应力较大的部位，替代混凝土受拉或受压，受拉时与混凝土变形一致，受压时混凝土使之不宜失稳破坏，可望制成较轻的船体结构。

3）采用PIC（聚乙烯）作船壳表面涂层以减少与水的磨擦阻力，提高船速。

4）根据结构混凝土材料的特点，设计合理的船体形状，采取全浸入水中或半浸式，仅留工作船桥，以增大浮力；也可是组合式，水上部分为钢结构，对水中部分选用增强混凝土结构，上部钢结构与预埋于混凝土内的铁件焊接或栓接，连成一体。在日本，已造成内部为普通钢结构，通过大头螺栓与混凝土连接的预应力钢筋混凝土平底船船体；其整体性好，特别当这些平底船是永久性设置作为浮式船坞使用的时候能达到少维修。

5）用于对航行速度要求不高的如驳船、挖泥船、航空母舰及可移动式空港或海上转运站等。预应力混凝土浮式储存容器在华盛顿州建造，并装备了储罐、冷冻和转运的全套设施，它被拖曳约10000miles（1609.344×10^4m），到达爪哇海之后，被永久地锚定。

6）为防止冲撞致使保护层剥落，造成钢筋在高含量氯离子的环境中腐蚀，可采用环氧加温、喷防腐蚀钢材混凝土结构，能大大提高结构的耐久性。这一防腐工艺国内、外均已采用。

2.3.3 结构混凝土新型船舶的设想

由于钢材与混凝土之间存在良好的粘结力、受力后能变形一致，且有相近的线膨胀系数（钢为1.2×10^{-5}，混凝土为$1.0\sim1.5\times10^{-5}$），故两种材料组合用于土木工程建筑物及海洋钢丝网水泥渔船均有良好的工作性能；综合考虑这两种材料研究成果，根据船体的不同部位的要求选用，会产生意想不到的综合效应，设想如下：

1）为增加船体的稳定性、抗风浪及漂浮物的冲击能力及抵御海水的侵蚀能力，使之具有更好的耐久性，船壳下部或外部采用混凝土结构；内部或上部结构中，部分采用钢结构或玻璃钢结构。

2）以内层钢结构或玻璃钢结构为内模板或施加预应力支架，采用高强度、有粘结或无粘结预应力钢丝对应力较大部位采用先张法或后张法分层纵、横向施加预应力制作之。

3）在钢船内壳与外钢壳模板间，高压灌浆增加混凝土密实度，减少混凝土层厚。

4）增加混凝土的强度、延性、抗冲撞、耐磨性以及耐久性，灌浆中掺入聚合物（如环氧树脂）或钢纤维、玻璃纤维或设置钢丝网，改善其微观结构。

5）采用聚乙烯（PIC）作船体预应力混凝土外壳的表面涂层，减小摩阻力。

6）根据预应力船舶结构自重大，刚度、稳定性好，且能主动改善结构内应力状态，具有较好的抗攻击能力等特点，改变船体造型，以使之有更好的效率，不应硬套过去钢船的造型。

7）利用三向受压混凝土强度、延性大为改善的性能，在上部结构中，尽可能采用螺旋箍筋约束混凝土结构、钢管混凝土或钢管预应力混凝土结构，可大为减轻船体自重。三轴混凝土强度约为单轴混凝土强度的6~7倍（见图2），如C30混凝土，抗压强度可增大至180~210MPa，其强度接近A3 钢；故船体重、燃料消耗及效率等问题，均有可能解决。

8）值得注意的是非金属配筋混凝土结构，即采用树脂粘结的纤维筋（FRP）如碳纤维、玻璃纤维及芳纶（Aramid）纤维等配筋的混凝土结构在上世纪已问世，并引起桥梁、建筑界普遍关注。据专家分析，采用钢索建造的悬索桥，最大

表1　1973年~1981年北海混凝土重力结构平台（储罐）

编号	区域	主要功能	设计浪高（m）	深（m）	混凝土体积（$1\times10^3m^3$）	基础直径（m）	储量（10^6）	安装（年）
1	Ekofisk1(N) 埃科菲斯克	①、②、③	24.0	70	90	92	1.00	1973
2	Beryl A(UK) 贝里尔.	①、②、③	29.0	120	55	100	0.930	1975
3	Brent B(UK) 布伦特	①、②、③	30.5	142	65	100	1.000	1975
4	Frigg CDPL(UK) 弗里格	③	29.0	96	60	101	-	1975
5	BrentC (UK) 布伦持..	②、③、①	30.5	142	105	100	0.650	1978
6	Frigg TPI(UK) 弗里格	③	29.0	104	70	72	-	1976
7	CormorantA(UK) 科莫伦特	②、③、①	30.5	152	115	100	1.000	1978
8	Brent D(UK) 布伦特	②、③、①	30.5	142	65	100	1.000	1976
9	DunlinA(UK) 邓林	②、③、①	30.5	152	89	104	0.850	1977
10	StatfiordA(N) 国家湾	②、③、①	30.5	149	88	110	1.30	1977
11	Frigg TCP (N) 弗里格	⑤、④、	29.0	104	50	100	-	1977
12	Frigg MPC(UK) 弗里格	③	29.0	94	60	101	-	1976
13	Ninian (UK) 尼尼安	④&②、③	31.2	139	142	140	-	1978
14	Petrobras 彼得罗布拉斯	②、③、①	11.0	15	52	52	0.125	1977
15	Petvobras 彼得罗布拉斯	②、③、①	11.0	15	52	52	0.125	1979
16	Petvobras 彼得罗布拉斯	②、③、①	11.0	15	52	52	0.125	1978
17	Stat Fiord B(N) 国家湾	②、③、①	30.5	149	169	169	1.500	1981

表中：1）挪威代号：N；大不列颠和北爱尔兰联合王国代号：UK；
2）主要功能代号：①储藏；②钻探；③生产；④压缩；⑤加工处理。

跨度不宜超过3000m，因超过此极限即使高强钢材对其自重也不堪负荷；而采用自重很轻的树脂纤维筋作悬索材料，其跨度可远超此限值，主跨可达4000~5000m以上。由上可推测，树脂纤维配筋的混凝土船体一旦问世，其自重已非过去水泥船、甚至钢船可比；加上其有混凝土作外壳，有较一般玻璃钢船体所无法比拟的刚度、抗冲击能力。

综上所述，新型钢、混凝土舰船在本世纪将会引起学者们极大的关注，应用多学科的优势创造出新型船舶，具有很多优点：节省钢材、降低造价；良好的抗冲击、抗腐蚀性能、耐久性；下重上轻，在海洋的风浪中，具有一定的稳定性。随着海洋工程中结构混凝土的实验研究和科学应用的深入，对这一领域的开发将有广阔的前景。

参考文献

[1] 周氏，康清梁，童保全. 现代钢筋混凝土基本理论. 上海交通大学出版社，1989. 2
[2] 车宏亚. 钢筋混凝土结构原理. 天津: 天津大学出版社，1990. 3
[3] R. Rark and T. Paulay. Reinforced Concrete Structures. John Wiley&Sons, 1975
[4] F. K. Kong R. H. Evans, CBE Edward Cohen, Frederic Roll. Handbook of Structural Concrete. London. Melbourne. Boston: Pitman Advanced Publishing Program, 1983
[5] 郑建岚. 现代混凝土结构技术. 北京: 人民交通出版社，1999. 8
[6] 赵国藩. 钢筋混凝土结构发展现状及展望. 中国土木工程学会第八届年会论文集，1998. 3
[7] Nina Morgan. Marine Technology Reference. London: Butterworths & Co. (publishers) Ltd. 1990
[8] M. Y. H. Bangash. Structural Details in Concrete. London: Blackwell Scientific Publicatiows. 1992
[9] Ben C. Gerwick. Jr. Construction of Prestressed Concrete Structures(SecondEdition). USA: John Wiley & Sons, Inc. 1992