コンクリートバージ C-BOAT 500 の建造

小林 理市*1・松元 和彦*2・田中 良弘*3 松岡 康訓*4・野口 憲一*5

概要 最近、コンクリートの耐久性に注目した、新しいタイプのコンクリート製海洋浮遊構造物に対する関心が高まってきている。従来、コンクリート製浮遊構造物の短所として、「自重が大きい」という問題があった。筆者らは、コンクリートバージの設計から構造までのプロセスを通じ、軽量で高強度のコンクリートの使用、薄板構造及びプレストレス工法の採用により、自重の軽量化と、更にプレファブ工法の採用により、工期の短縮化を試みた。本報告は、積載能力 500 トンのコンクリートバージの、設計概要、コンクリート材料及び構造部材の基礎実験、バージの建造、及び建造後の海上実験について述べたものである。

キーワード:コンクリート製海洋浮遊構造物,プレストレストコンクリート,軽量コンクリート,高強度コンクリート,プレファブ工法,水密性,疲労強度,波浪荷重,終局強度,ひびわれ耐力,ジョイント,品質管理,スランプ

1. まえがき

北海のエコフィスク油田海域に海底石油掘削兼貯油施設として、コンクリート製構造物の計画、検討が開始された 1960 年代後半頃から海洋コンクリート構造物に対する関心が次第に高まり、世界各地で種々の海洋コンクリート構造物が計画、建造されてきた。すでに北海には十数基のプレストレストコンクリート構造の海底石油掘削及び貯油施設が稼働しており、また、インドネシアのジャワ沖には LPG プラント及び貯蔵施設としてのプレストレストコンクリートバージが使用されている。

これらの海洋コンクリート構造物は海洋開発,特に石油,ガス等の海底資源開発の手段として建造されたものである。一方,コンクリートと船との関係は非常に古く19世紀中頃にフランス人の J.L. Lambot がコンクリートを鉄網で補強する鉄筋コンクリート構造を考案し,1855年の博覧会に鉄筋コンクリートのボートを出品している。その後,第一次,第二次世界大戦時には鋼材の節約を主目的として各国で盛んに鉄筋コンクリート船が建造されており,我国でも数多く建造され,その中には現在海底に着底させ防波堤代りとして第二の使命を果しているものもある。

このコンクリートと船との関係が最近の著しい海洋資

- *1 大成建設(株) 技術本部技術開発部 技師
- *2 大成建設(株) 技術本部技術開発部 係長
- *3 大成建設(株) 技術本部技術開発部 主任
- *4 正会員 大成建設(株) 技術本部技術研究所 主任
- *5 大成建設(株) 技術本部技術開発部 主任

源開発に関連して見直され始め、特に LPG, LNG 等の容積型載積物及びコンクリートの低温特性との組合せ等を考慮することにより、従来、問題にされてきた鉄筋コンクリート船の船体重量増加によるデメリットに関して再検討が加えられ、プレストレストコンクリートバージを含めた各種の海洋浮遊式コンクリート構造物の研究が盛んになってきている。

我が国でも昭和 52 年に土木学会が「海洋コンクリート構造物設計施工指針(案)」を、また昭和50 年に日本海事協会が「プレストレストコンクリートバージ規準」を制定しているようにその機運は高まっている。日本にも近い将来原油、LPG、LNG等の海上備蓄施設、各種洋上プラントバージ、また港湾施設としての大型浮桟橋や浮消波堤、更に超大型構造物として海上空港、海上都市等の海洋浮遊式コンクリート構造物が出現するものと推察される。

この新しい分野の海洋コンクリート構造物へのアプローチとして、今回、次の項目を開発の主目的としてコンクリートバージ「C-BOAT 500」の開発に着手した。

- i) 材料及び構造について
 - ・軽量,高強度且つ乾燥収縮が小さく水密性の高 いコンクリートの適用
 - ・ひびわれ耐力,衝撃耐力及び疲労強度の高い部 材の適用
 - ・船殻の軽量化を図る薄板構造の適用
- ii) 建造について
 - ・品質管理,工期短縮,造船所進水施設使用期間 の短縮等を目的としたプレキャスト方式の適

用,

・プレキャストブロック間ジョイント部の強度, 水密性を確保する材料,構造及び施工法の組合 せ

以下に試作バージの設計,材料,施工の概要について述べる。

2. 設計

2.1 設計の基本的な考え方

今回のバージは、現行の「プレストレストコンクリートバージ規準」(日本海事協会、1975年)が対象としている使用海域や使用目的また規模などの点で若干相違するため、設計にあたっては、日本海事協会の協力を得て、その手順及び算定方法を「設計マニュアル」としてまとめ、それによって進めた。

この「設計マニュアル」は、「プレストレストコンクリートバージ規準」をはじめ、「NV」、「ABS」、「U.S.S.R. REGISTER」などの諸規則、及びフェロセメント的な考えを参考とし、鉄筋コンクリート構造、プレストレストコンクリート構造の原則を逸脱しない範囲で組立てたものである。なお、ひびわれ幅、疲労強度などについては、実大実験による確認を得て進めた。

現行の船級規則は「今まで安全に運航してきた船をベースにする」という経験工学的手法が主体であり,更に使用される鋼材料の性質は,明確であった。そのため,構造部材の断面を直接規定する条文が多く,これをそのまま,コンクリート材料で設計するには無理があった。この点に関して本設計では,いわゆる直接設計法により波浪荷重を求める方法をとった。直接設計法は,最近の船舶の最も進んだ設計法で,波による船体応答と波浪観測資料から確率論的手法により波浪荷重を予測する。断面算定にあたっては,各構造部材の終局強度及び,ひび

われ幅を算定し、部材や応力の種類により定めた安全係数、許容ひびわれ幅に対してチェックした。

2.2 設計の概要

(1) 主要目

本バージの主要目を以下に列挙する(図-1参照)。

(a) 主要寸法

全 長:37.0 m 全 幅:9.0 m 全 高:3.1 m

満 載 吃 水: 2.6 m (乾舷 0.5 m)

(b) 積載能力 積載重量:500 D.W.T.

(c) 主体構造

縦方向PC構造,横方向RC構造

(d) 航 行 区 域 平水区域,非自航(計画最大速度 6 ノット)

(e) 艤 装 曳航用ビット,ボラード,フェアリーダー,防 舷材,倉口蓋,ハッチ,ワイヤーロープ,その

(f) 船 級 日本海事協会: NS*(Smooth Water Service) (P.C. Barge)

(2) 設計荷重

バージは、静水圧のほか波浪による変動水圧を受ける。浮体の長手方向を一本のはりと考えると、波長が浮体の長さにほぼ等しく、波の峯または波の谷がちょうど 浮体中央にきた時、浮体は大きな曲げモーメントを受ける。

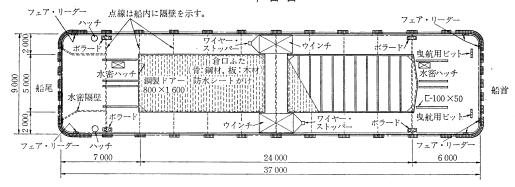
実際の計算にあたっては、東京湾にて就航するものと 仮定して、木更津沖の波浪観測データを用い、直接計算 より波浪荷重を求めた。計算条件としては、満載状態と

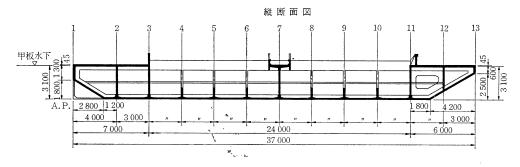
Construction of Concrete Barge C-BOAT 500

Riichi Kobayashi, Kazuhiko Matsumoto, Yoshihiro Tanaka, Yasunori Matsuoka and Kenichi Noguchi Concrete Journal, Vol. 16, No. 11, Nov. 1978, pp. 20~26

Synopsis The success of the ARCO floating terminal construction unleashed a flood of interest in concrete floating sea structures. Up to now, coucrete floating structures had some weak points, one of which was its poor loading capacity because of its heavy weight. In the process of our design and construction of concrete barge, authors tried to lighten the weight of barge by means of using the lightweight and high strength concrete and adopting the structure of thin walls (thickness is 60 mm) and adopting the prestressing method. And, by using the prefabrication technique, they succeeded in shortening the construction period. This paper reports the design of 500 D.W.T. loading capacity concrete barge, the fundamental experiments of the concrete materials and members, the method of barge construction and the field tests on the sea.

Keywords: concrete floating sea structure, prestressed concrete, lightweight concrete, high strength concrete, prefabrication, water tightness of concrete, fatigue strength, wave load ultimate strength, crack resistance, joints, quality control, concrete slamp





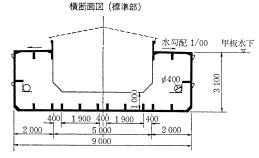


図-1 C-BOAT 500 - 般構造図

バラスト状態で船速6ノットを考えた。

2.3 構造強度

縦強度部材に関しては、あらゆる荷重の組合せに対して、引張応力度が生じない、いわゆるフルプレストレスとした。また横強度及び局部強度部材に関しては、コンクリートの最大ひびわれ幅を、海水に接する側で最大0.08 mm となるよう 断面算定を行った。終局強度に対する安全係数は、部材の種類、破壊形式、荷重状態により異なるが、1.5~2.5 の値を用いた。

2.4 構造形式

(1) 薄板断面構造

船体は、まず多くの荷物を積めるという機能が必要であり、そのため船体自重の軽減化が要求される。これに

対し,薄くて強い部材(一番薄いところで 60 mm)の組合わせにより,構造上の無駄を省いた。

(2) プレキャストブロック工法

将来の大型化を想定し、精度がよく、品質管理の行き とどいたプレキャストブロックを工場生産し、造船所で 組立て、ジョイントする工法を採用した。

(3) 急速ジョイント工法

造船所内でのブロック接合作業を短縮化するために、 急速ジョイント工法を採用した。このジョイントは、接 合時間が短いばかりでなく、プレファブ率(全コンクリート容積のうちプレキャストブロックのコンクリートが 占める割合)が標準部で約 90% と高い。特に、ブロック相互の縦方向ジョイントは、ブロック相互のわずかの 間隙に特殊な結合材を充填して、これが硬化した後プレストレスを導入する方法をとった。なお、プレストレス 導入工法としては、モノストランド VSL 工 法を採用した。

3. 材料及び構造部材の基礎実験

3.1 コンクリートの水密性

バージに使用されるコンクリート材料は、水に浮べるということから、まず水密性が要求される。一般に、コンクリートの水密性に関しては、水セメント比の影響が大きいとされている。本バージのコンクリートは、水セメント比を極力少なくし、更に打設方法の工夫により密実にコンクリートを打込むことにより、図一2に示すような、非常に水密性の高いものとした。コンクリートの水密性の尺

度として,透水係数があるが,このコンクリートは,透水係数を求める実験では水密性が良すぎて測定不可能であった。従って 写真-1 に示すように,水圧 $5\sim15\,t/m^2$ の水圧をかけて拡散係数を求めた。

使用した骨材は、粗骨材及び紙骨材とも人工軽量骨材

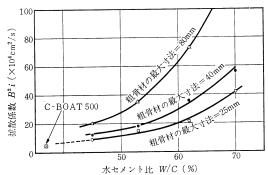
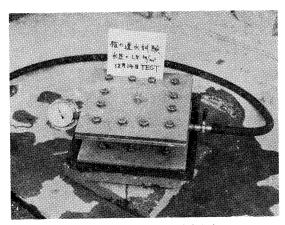


図-2 コンクリートの拡散係数(図中の曲線 は村田二郎:コンクリートの水密性の 研究,土木学会論文集第77号より)



写真―1 コンクリートの水密実験

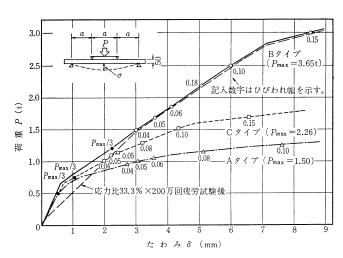


図-3 薄板の荷重-たわみ曲線

とした。また、セメントについては、耐硫酸塩セメント や高炉セメントは用いず、普通ポルトランドセメントを 使用した。

3.2 高強度軽量コンクリート

バージ自重の軽量化には、コンクリート材料そのものの強度、単位体積重量が大きく影響する。骨材や混和剤の選定、配合の工夫により、設計基準強度 $500 \, \mathrm{kg/cm^2}$ 、比重 1.8 で、なおかつ ワーカビリチー が良く、乾燥収縮の小さいコンクリートが開発された。

3.3 薄板の曲げ強度

種々の配筋による薄板の曲げ実験により,曲げ剛性,最終耐力,ひびわれ抵抗のいずれの点でも優れている配筋法を採用した。図一3は,薄板の比較曲げ実験(単位鋼材量は同じ)より得られた,荷重-たわみ曲線で,本バージでは,配筋B及びCを採用した。配筋Bは,曲げ剛性,最終耐力,静荷重に対するひびわれ抵抗が大きく,配筋Cは,その点若干劣るが,耐衝撃性に関して優れているなど,それぞれ特徴があるため,船殻の場所により両者を使いわけて採用した。なお,配筋Bの破線は,応力比33%で200万回の疲労試験後の荷重-たわみ曲線で,初期剛性は低下するが,最終耐力の低下はないことを示している。

3.4 疲労強度

船殻構造部材は、波により常に繰り返し荷重を受けているため、疲労強度が問題となる。R C構造の薄板部材、P C構造のはり部材、更にそれぞれがジョイントされた部材について、実大モデルによる疲労試験を行った。

(1) 薄板の疲労強度

載荷速度 0.2 秒 (一部 2秒) で,薄板の曲げ疲労試

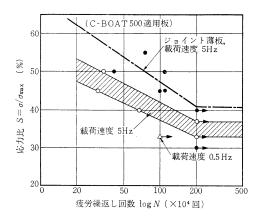


図-4 薄板の S~N 曲線

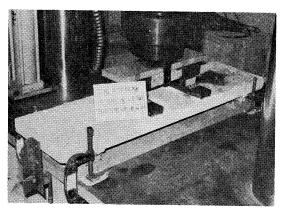


写真-2 薄板の疲労試験

験より得られた $S\sim N$ 曲線と、ジョイントされた薄板の $S\sim N$ 曲線を、図 $\mathbf{-4}$ に示す(写真 $\mathbf{-2}$ 参照)。これより、疲労限は、応力比で $35\sim 40\%$ であると考えられる。

(2) PC はりの疲労強度

波による繰返し荷重は,通常の荷重とは異なり,圧縮と引張が交互に生ずる。そこでPCばりについては,圧縮と引張の交番曲げ疲労試験を行い,波浪荷重状態を再現した(写真—3参照)。この実験より得られた $S\sim N$ 曲線を 図—5 に示す。また,応力比 $\pm 30\%$ で 200 万回の疲労試験後,静的曲げ再試験を行った結果を 図—6 に示す。これより,疲労試験後のPCばりは,無載荷のはりに比べ,初期剛性は低下するが,最終耐力の低下はない。

3.5 ジョイント強度

ジョイントとしては、 横方向に R C 構造 ジョイントが、また縦方向に P C 構造ジョイントが採用された。 いずれも、実大モデルによる、曲げ及びせん 断実験により、ひびわれや最終耐力を確かめた。また、薄板及び P

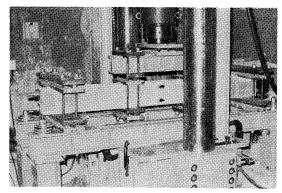


写真-3 PC ばりの疲労試験

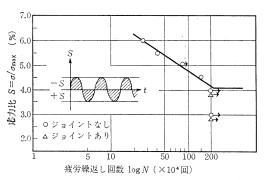


図-5 PC ばりの S~N 曲線

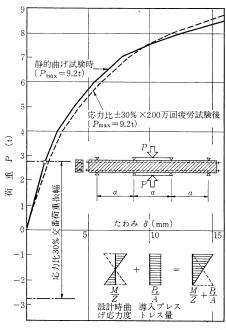


図-6 PC ばりの荷重-たわみ曲線

Cばりの ジョイント については,図-4,図-5 に示すように,同様の試験により強度を確認した。

4. 建 造

4.1 建造概要

試作建造に先立ち使用する材料,特にコンクリート材料について各種の基礎実験,すなわち強度,比重,水密性等の試験の他に,打設,締固め,養生等の施工法についても実物大模型による製作実験を含めて種々の施工実験を行った。その結果,人工軽量骨材を用い,単位水量を極力低減させた高強度コンクリートを使用することとしたが,このような特殊コンクリートを使用するには材料面でも十分な品質管理が必要であり,また,構造形式,部材寸法及び補強筋の配置等からみて,従来の場所打工法では施工精度の面で難点があり,更に将来の大型海洋構造物建造技術の確認等の諸条件を考慮してプレキャスト工法を採用することにした。建造方法としては,プレハブ工場でプレキャストブロックを製作し,これを進水船台に運搬,組立て進水させる方式とした。

4.2 施工実験

施工実験 は主に コンクリート の施工上の 問題点を確認,解決するために行ったものであり,そのいくつかについて述べる。

(1) スランプダウンの経時変化

冬期 (1~2 月)でのコンクリート試験練りでは高性能減水剤を使用した場合適正なスランプを保持しうる時間は、練りまぜ後 10~15 分しかなく急速にスランプが低下する傾向があった。このため、コンクリートの温度を変化させてスランプダウンの経時変化を測定した。その結果、コンクリート温度 28°C では 40 分程度となり、コンクリート温度が高い程スランプダウンの傾向は少ないことが確認された。また、普通ポルトランドセメントでもメーカーの違いにより、スランプダウンの傾向に若干の相違のあることが判明した。

(2) 高性能減水剤の後添加

船首、船尾等の場所打部コンクリートもプレキャストブロックと同一のものを使用したが、特殊配合のコンクリートのため既設のコンクリートプラントでは扱う所がなく、プレキャストブロック製作のプレハブ工場から運搬することにした。しかし、運搬時間が30~40分を要することからスランプダウンの影響を考慮すると、コンクリートの適切な施工は困難と考え、高性能減水剤の規定量の一部をコンクリート打設現場で後添加する流動コンクリートの応用を検討し、その施工性を確認した。

なお、この減水剤を後添加したコンクリートの圧縮強 度は規定量全量を練りまぜ時に添加したものと差は認め られなかった。

4.3 プレキャストブロック製作

プレハブ工場で 製作した プレキャスト ブロック は船首,船尾部を除くバージの中央部,長さ $30\,\mathrm{m}$ の船殻部分を構成するもので, ブロック数は 舷側部ブロック 20 基,船底部ブロック 20 基の合計 40 基である。 ブロックの外形寸法は 輸送上の 制限から,長さ $3.0\,\mathrm{m}$,高さ $3.1\,\mathrm{m}$,幅 $2.0\,\mathrm{m}$,を最大ブロック寸法とし,またブロック重量も製作工場及び組立ヤードのクレーン設備能力から $8.0\,\mathrm{t}/\mathrm{L}$ 以下とした。

ブロックの製作は組立, 脱型作業の施工性を考慮して 数ブロックに分割した鋼製型枠をボルト締めで組立て、 あらかじめ船底,舷側,甲板及び横隔壁部等の数ブロッ クに分けて加工,仮組した鉄筋,シースを所定の位置に 組込み、コンクリートを打設した。型わく組立てに際し ては、従来使用されているセパレータでは漏水の一因に なると考え、特に海水に接する箇所ではセパレーターを 使用せずに型わくの剛性で所定の部材寸法が確保できる 構造とした。コンクリート打設は、舷側部ブロックでは 舷側面を、船底部ブロックでは海水に接する船底面を打 設,均し面とし、コンクリートホッパーを使用して連続 一体打ちとし、またコンクリートの締固めは、部材厚が 60~120 mm と薄く, 更に補強筋が密に配置されている ため主に外部振動機を使用して,十分締固めを行い水密 性の高い緻密なコンクリート部材を製作した。なお,外 部振動機の機種、台数及び取付位置等については、事前 に施工実験を行い、締固め効果及び材料分離の有無等の 確認を行った。

次に養生方法はブロック製作期間が夏から秋にかけて 比較的気温の高い時期であったため、特に促進養生は施 さず、通常の散水養生を行った。

脱型後各ブロックは船底部位となるコンクリート面の 欠陥の有無を検査したのち、反転装置を用いて所定の姿 に直してストックした。

プレキャストブロックのうち、PC鋼線の緊張、定着端となるブロックは部材厚等構造が異なっているため木製型わくを使用したが、鋼製型わくを用いた標準部のブロック製作工程は舷側部で1基/2日、船底部で1基/1日である。

4.4 プレキャストブロック組立構造

プレキャストブロックの組立建造は既設造船所斜路船台の水平区間(勾配 3/1000)を使用して行った。トレーラーで搬入したブロックをH形鋼及びわく組支柱等で組立てられた船台上の所定位置に設置し、PC鋼線用シース位置及び横隔壁ジョイント鉄筋位置を基準とし、更に舷側部ブロック側面の通りも考慮して位置を調整した。ブロック位置微調整後、断面方向4基(舷側部2

基, 船底部2基) のブロック接合を行った。

ブロック接合は各ブロック横隔壁に配置された太径鉄筋をパワーグリップ工法を用いて接続し、他の鉄筋は重ね継手方法として配筋した後、コンクリートを打設し大ブロックを接合した。次に縦方向のブロック接合は、横方向の接合終了後、PC鋼線をプレキャストブロック部分全長に布設し、またブロック間ジョイント目地部に型わく支保工を必要としない型わくを施したのち、特殊な結合材を充填し、硬化後、PC鋼線を VSL 工法用ジャッキで緊張して、一体化した。

次に船首、船尾部分は場所打工法で建造し、プレキャストブロックとの接合は重ね継手による鉄筋コンクリート構造とした。特に船尾部は将来の大ブロック工法の施工技術を確認するために、場所打工法で船尾部全体をブロック製作し、これを船殻中央部分に引寄せ接合する方法をとった。なお、船首、船尾及び水密隔壁等の場所打部にもプレキャストブロックと同一のコンクリートを打設したがこの際、先に述べた高性能減水剤の後添加方式を採用した。

バージの船殻部分が 完成したのち、 船殻内に 深さ約 $1.0\,\mathrm{m}$ まで水を張り船殻の水密性を確認した。

艤装工事は,ブロック組立建造終了後にボラード,クロスビット,防舷材,倉口屋根 その他の 艤装品を 取付け,更に船体外面にお化粧の意味でオレンジ,白,青,三 色 の 船体塗料を 塗布し,船体建造の全作業を終了した。

4.5 進 水

船の進水方法には、各種の方法があるが、今回使用した造船所には台車による進水施設があり、また、試作バージの構造上も台車による縦進水方式が可能なため、船首、船尾付近の水密隔壁個所の2点で支持する台車方式によって進水させた。

進水準備作業としては、架台上に組立建造したバージ を油圧ジャッキで仮支持して、進水台車を所定位置に設 置し、次いでブロック組立ヤードから進水斜路部分まで 船尾側(船尾側から進水)台車をウィンチで曳き移動さ せ、7% の斜路勾配を利用して進水させた。

5. 海上実験

進水後,バージの復原性能を確認する傾斜試験,動揺 試験及び,曳航特性を調べる曳航実験,旋回実験を実施 した。

5.1 傾斜試験. 動揺試験

傾斜試験は,カウンターウェイトを移動しながら,各

段階の船体傾斜を,傾斜計やさげ振りにより測定した。 また,動揺試験も同様の方法により船体に自由動揺を与 えて,電気式傾度計により船体動揺振幅や周期を求め た。

傾斜試験の結果,排水量,重心位置とも計算値と一致し,所定の復原性能が確認された。また,動揺試験より,ローリングの固有周期が3.8秒で,同規模の鋼製バージに比べ固有周期が長く,安定性が良く,動揺しにくいことが分かった。

5.2 曳航実験

実験は、海上が静穏な時(有義波高 10 cm 程度)及び波がある時(有義波高 60 cm 程度)をねらって行われた。実験パラメータとしては、曳航索の長さ、曳航速度、追波向波などをとった。

曳航抵抗は対水速度の2乗に比例するという,一般的な傾向が得られ,抗力係数で $0.6\sim0.8$ と,鋼製バージと同程度の値が得られた。また,曳航時の直進性は非常に良く,船尾に設けられた固定舵(スケグ)が,その性能を発揮していることが確認された。

6. あとがき

今回の試作バージは初めにも述べたように、将来の大型海洋浮遊コンクリート構造物へのアプローチとして、以前から研究開発してきた種々の基礎技術を集積、応用したものであり、この試作バージそのものも長期的な実験供試体と考えている。なお、バージの寸法は試作という開発行為のために決めたもので、特別な使用目的から決めたものではない。しかし、海洋コンクリート構造物としては比較的小規模で、しかも一つの完成した構造物としての機能(積載重量 500 DWT)をもたせたため構造型式、部材寸法等は特殊なものとなったが、全般的にみると将来の大型構造物への汎用性の面では設計、材料、施工の各分野において一応の目標は達成されたと考えている。なお、本バージ設計、建造、復原性試験の結果に対して、日本海事協会により NS*(Smooth Water Service) (P.C. Barge) として船級認定を受けた。

最後に本プロジェクトの実施にあたり、コンクリートの材料、構造面で村田教授(都立大、土木)、船舶としての設計面で元良教授(東大、船舶)、及び日本海事協会の御指導を戴いた。また、このプロジェクトは、(財)日本舶用機器開発協会と共同開発したものである。ここに、厚く御礼申し上げます。