

(59) 鋼/P C ハイブリッドバージの縦強度

運輸省船舶技術研究所 正会員 ○松岡 一祥
 大成建設㈱技術研究所 正会員 野口 憲一
 運輸省船舶技術研究所 千秋 貞仁

1. はじめに

コンクリート製の浮遊式構造物では、波浪中での縦曲げモーメントによってひび割れがコンクリートを貫通し、水密性が損なわれることがないように長手方向にプレストレスする必要がある。また、100 m 程度の構造物を一体打設することは困難であり、輪切り状のブロックをプレキャストして、船渠または船台上で緊張、一体化する工法になると予想される。

著者らは、鋼/コンクリートハイブリッドバージについて、局部強度¹⁻⁴⁾、横強度^{5, 6)}などについて検討してきた。ここでは、波浪中の縦曲げに対する強度、縦強度について実験的検討を行う。併せて、実験用模型の製作に当たり、輪切りブロックのプレキャスト、緊張一体化工法について検討した結果を示す。

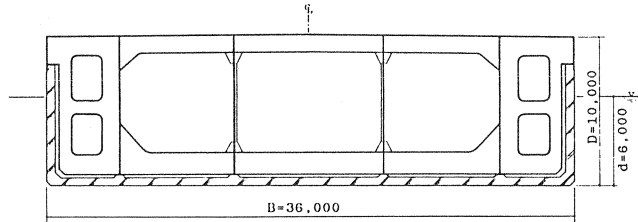


図-1 鋼/P C ハイブリッドバージ断面

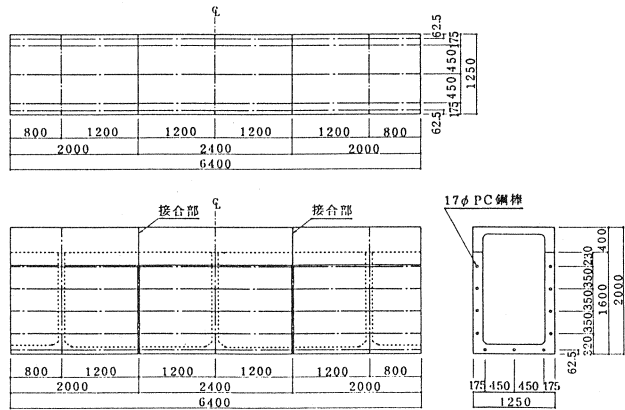


図-2 試験模型 (単位: mm)

2. 構造模型の製作

2.1 模型の形状および寸法

想定構造物は、前報⁹⁾に示した発電プラントバージである。図-1の断面そのままの縮尺模型とすることは、試験機的能力、縮尺率などから現実的でない。そこで、舷側タンク中央から外側を取りだし、船側外板の鋼/コンクリート接合部を主要な検討対象とすることにした。図-2, 3に試験模型を示した。縮尺は基本的には1/4であるが、上下方向には1/5である。図-2は最終的な形状を示している。3個のブロックを結合した、長さ6.4 mの箱梁である。図-3は中央ブロックを示している。

2.2 材料

表-1にコンクリートの配合を、表-2

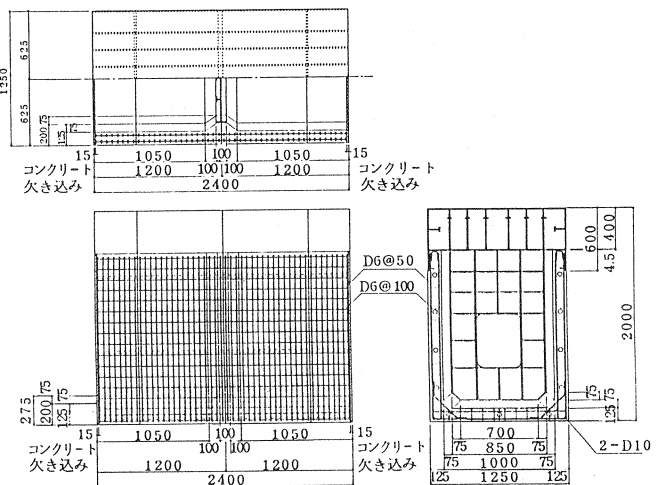


図-3 中央ブロック (単位: mm)

表-1 コンクリートの配合 (kg/m³)

セメント	水	細骨材	粗骨材	混和材
654	240	662	677	1.635

表-2 コンクリートの強度

(kgf/cm ²)	7日	28日
現場養生	312	422
標準養生	455	533

表-3 モルタルの強度 (kgf/cm²)

目地モルタル		グラウト
7日	28日	14日
476	599	474

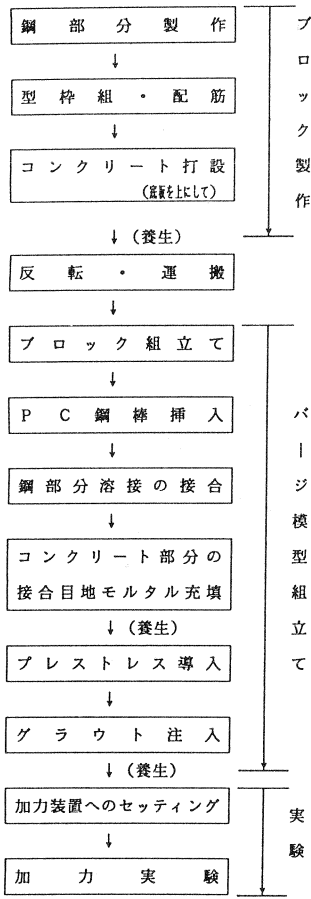


図-4 製造手順

に強度を示した。構造用鋼として、SS41鋼板を用いた。降伏応力は 28 ~ 31 kgf/mm²、引張強度は 44~46 kgf/mm² だった。鉄筋として、径 6 mm、心離 50×100 mm²の溶接金網を用いた。17 mm 径の P C 鋼棒 11 本を用いた。降伏荷重は 20.4 t (降伏応力 90 kgf/mm²)、引張荷重 23.2 t (引張強度 102 kgf/mm²) であった。接合部目地モルタルおよび P C シースグラウト材の強度を、表-3 に示した。

2.3 製作手順

図-4 に製作から試験に至る、ブロック製作、ブロックの接合・緊張の手順を示した。

ブロックは打設しやすいように、船底側を上にして製作した。ブロックの接合は、試験機のベッド上に盤木を配置し、その上で行った。

プレストレスは、P C 鋼棒 11 本当たり 14 t 導入した。11 本の P C 鋼棒のグラウト養生後の引張ひずみ (10⁻⁶) を正規確率紙上にプロットすると図-5 となる。ほぼ正規分布である。平均ひずみ 2713×10⁻⁶ は 12.9 t に、標準偏差 154×10⁻⁶ は 0.7 t に相当する。P C 鋼棒の張力損失は 8% である。

図-6 は、グラウト養生後の断面のプレストレストひずみの分布を示している。船底下縁で 140×10⁻⁶ の圧縮ひずみが導入されている。

ブロック組立時に P C シース位置の手直しを行った以外特に問題はなかった。模型の最終的な重量は 10 トンを少し上回った。

3. 模型試験

左右ブロックの補強リングを支点とし、中央ブロック中心に上から集中線荷した。支点スパンは 4800 mm である。

4. 試験結果

4.1 全体変形

図-7 に、100 t、150 t、200 t 負荷時、および最大荷重負荷後 270 t

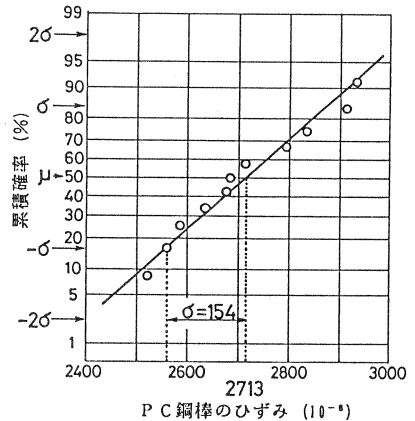


図-5 P C 鋼棒のひずみ (10⁻⁶)

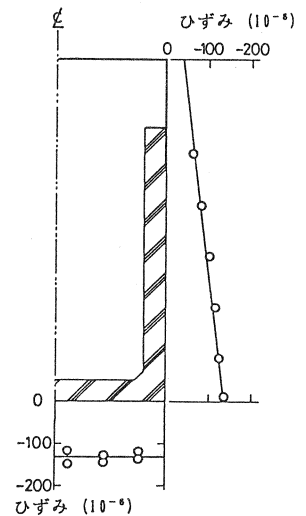


図-6 ひずみ分布 (10⁻⁶)

に荷重が低下した時点での船底の変位を示した。図には 150 tf および 200 tf 載荷の後、除荷時の残留変形も併せて示している。150 tf までは滑らかな変形を示す。荷重 180 tf で、2ヵ所の接合部の一方にせん断ずれが生じた。荷重 200 tf では、ずれ量は 0.7 mm であった。このずれ量は除荷しても変わらなかった。最大荷重までに、ずれ量は 7 mm まで増大した。

4.2 軸方向ひずみおよび曲率

図-8 に3つの断面の軸方向ひずみの分布を示した。なお、ここではプレストレスによるひずみは考慮していない。図には、加えた荷重と断面の曲げモーメントが示されている。○、●は P C 鋼棒、□、■は鉄筋、そして△と▲は模型表面のひずみゲージによる値である。白ぬきの記号は圧縮、黒塗りは引張である。図中、ひずみ 200×10^{-6} の対照値が示されている。

まず、荷重 90 tf における3つの断面の軸方向ひずみの分布を見る。ブロック接合部ではない C 断面は、せん断遅れを伴う箱梁として挙動している。上部鋼構造と下部コンクリート構造とはほぼ完全に一体挙動している。接合部を挟む A および B 断面でのひずみ分布は複雑である。上部鋼構造の軸方向ひずみはほぼ一定である。下部コンクリート構造では曲げによると思われるひずみ分布を示している。合成部における鋼板表面のひずみと P C 鋼棒のひずみに差が生じている。ブロック接合部では、この差は荷重初期段階から生じている。荷重 110 tf でブロック接合部で P C 鋼棒の引張ひずみが 140×10^{-6} を超えると、船底でプレストレスによる圧縮ひずみが消失したと考えられた。しかし、それ以前でも、ブロック接合部近傍では、コンクリートおよび鉄筋のひずみと P C 鋼棒のひずみには差が現れている。

次に、荷重 120 tf におけるひずみ分布を見る。ひずみの履歴などから、この荷重ではなんらかの荷重伝達機構の変化があったと判断された。C 断面では、上部鋼構造と下部コンクリート構造とは、曲率に差はあるものの、合成部のずれはほとんど見られない。一方、ブロック接合部の A および B 断面では、鋼板のひずみと P C 鋼棒のひずみの差が、90 tf の時より拡大している。上部鋼構造の側外板の圧縮ひずみは減少している。断面の下部 1/3 の P C 鋼棒の引張ひずみの増大は大きい。この理由として、110 tf で船底縁のプレストレスひずみが消失した後、120 tf で断面下部 1/3 の接合部が開口し、P C 鋼棒のこの部分にひずみが集中したこと、および、開口部で分担できなくなったせん断力が上部鋼構造に流れたこと、などが考えられる。

図-9 にモーメント-曲率関係を示した。○、●は上甲板と底部の軸方向ひずみから、△と▲は船側部

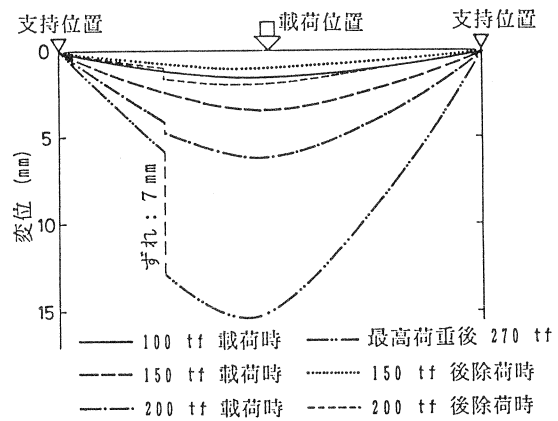


図-7 船底の変位

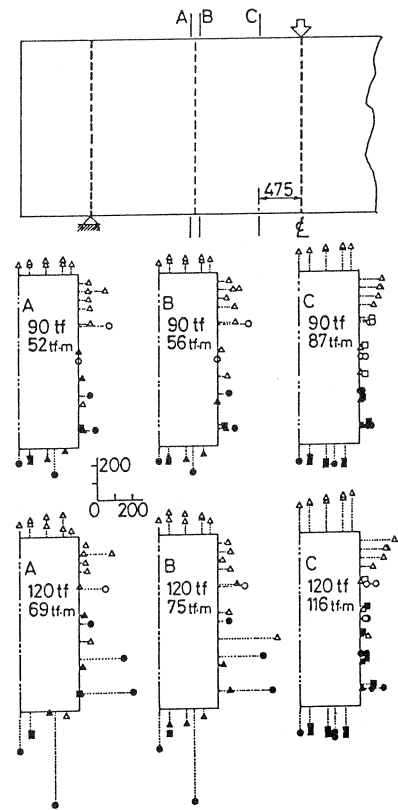


図-8 断面のひずみ分布

のPC鋼棒のひずみから求めた曲率である。白抜きの記号はC断面(図-8参照)、黒塗りはブロック接合面を示している。断面により、荷重とモーメントの関係が異なる。図には、2つの断面が当該モーメントとなる荷重が併記されている。

接合部断面では、66 t・m(荷重 110 t)で底部のプレストレスひずみが消失し、その後の曲率増加は大きい。C断面では、115.5 t・m(荷重 120 t)で底部のプレストレスひずみが消失したが、その後の急激な曲率増加は見られなかった。この2つの断面のプレストレスひずみ消失後のモーメント-曲率関係の差は、鉄筋の有無によると考えられる。ブロックどうしは、上部鋼構造の溶接と目地を介したPC緊張力で接合されており、ブロックを繋ぐ鉄筋はない。そこで、プレストレスによる圧縮ひずみの消失後の剛性低下は著しい。

接合部断面の船側部のPC鋼棒のひずみから求めた曲率が、72~108 t・m(荷重 120~180 t) でばらついている。これは、ブロック接合部の開口の程度によりPC鋼棒のひずみの集中が異なるためであり、接合部にせん断ずれが生じてからは、船側部のPC鋼棒のひずみから求めた曲率と上甲板と底部の軸方向ひずみから求めたひずみとは一致する。

4.3 せん断ひび割れおよびせん断ずれ

載荷装置の微小な変位-荷重変動、AE、あるいは、ひずみゲージの指標値の変動などからは、荷重 100 t 程度で鋼材とコンクリートのずれ、鋼材の黒皮の剝離、鋼材の局部塑性流動あるいはコンクリートのひび割れの頻度が急激に増加したと判断された。しかし、目視で、船側コンクリート部に明白なせん断ひび割れが見いだされたのは、荷重 150 t の時点であった。図-10 に、荷重 150 t に保持した状態で観察されたひび割れを示した。載荷断面の鋼製リング状補強材とコンクリート構造上部接合点から支持位置に向かうひび割れが、断面の中央付近、コンクリート構造の上部に観察される。最終状態(最大荷重後 270 t に保持)で観察されたひび割れを図-11 に示した。比較的密な配筋による

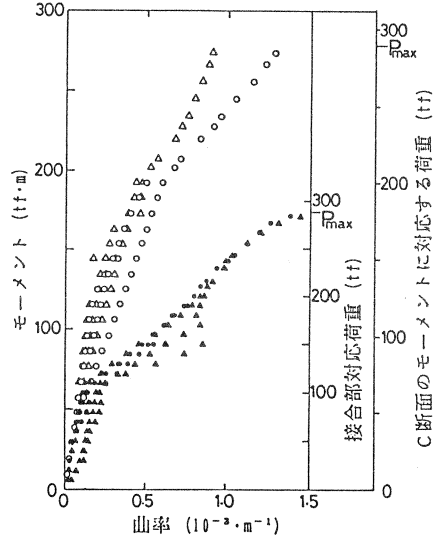


図-9 モーメント-曲率関係

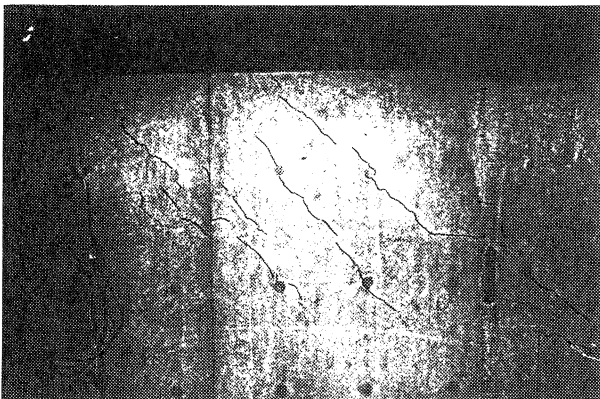


図-10 せん断ひび割れ (150 t)

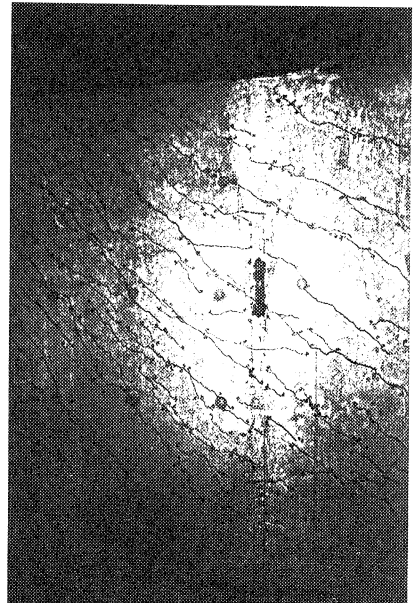


図-11 最終状態

ひび割れの分散が見られる。荷重保持状態でのひび割れ幅は 0.05~0.8 mm であり、除荷後のひび割れ幅は、0.2 mm 以下となった。

図-12, 13 にブロック接合部のずれの様子を示した。ブロック端面と目地モルタルとの打継面でずれが生じている。ブロックと目地モルタルの打継面は4ヵ所であるが、ずれが生じたのはここに示した個所だけである。施工不良などによりこの打継面が特に弱かった可能性もあるが、ブロック接合部の強度をずれが生じた個所で代表させることにする。このずれは、上甲板の座屈など後に続く損傷の引金となった(表-4 参照)。

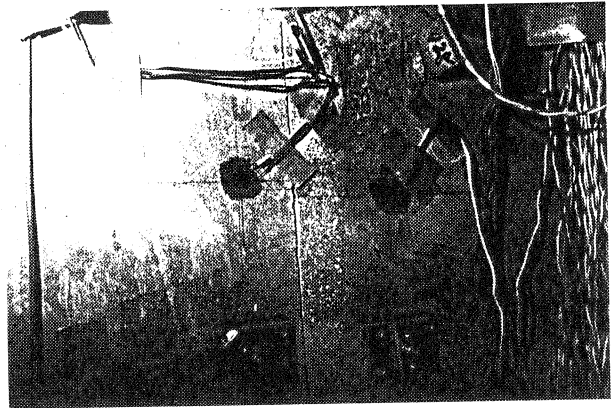


図-12 接合部のずれ変形(その1)

4.4 損傷事象の履歴

ずれが生じたブロック接合部を中心に、生じた損傷の履歴を表-4 に示した。ブロック接合部に加わっていたモーメントが示されている。また、せん断力は表中の荷重の 1/2 である。

ブロック接合部コンクリート全断面開口後、この断面では上部鋼構造の圧縮力と P C 鋼棒の引張力でモーメントが形成される。甲板の弾塑性座屈応力は 20 kgf/mm² と計算されるが、これを用いて崩壊モーメントを求めると 290 tf・m となる。実験における最高荷重時の接合部断面のモーメントは 173 tf・m であり、接合部のずれ変形が甲板にも伝わって、甲板の座屈応力を低下させたと考えられる。

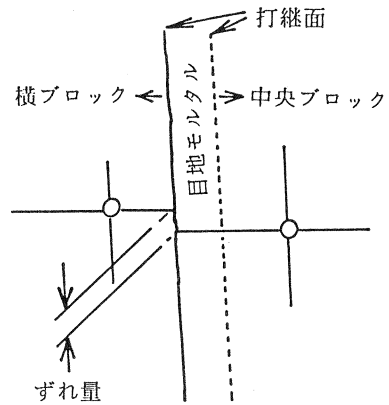


図-13 接合部のずれ変形(その2)

表-4 損傷事象の履歴 (ブロック接合部)

荷重 (tf)	モーメント (tf・m)	事象
—	—	鋼/コンクリート合成部のずれ
100	—	[ずれ, 剥離, ひび割れ?]
110	66	底部プレストレスひずみの消失
120	72	ブロック接合部の下部 1/3 開口 せん断力分担の変化 上甲板一部座屈
150	—	[明確なせん断ひび割れ(図-10)]
180	108	接合部コンクリート全断面開口 上部鋼構造の側板せん断座屈 接合部ずれ変形
289	173	最高荷重 ずれ変形量 7 mm (図-12, 13)

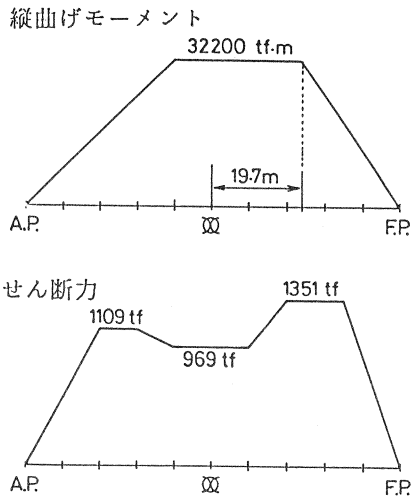


図-14 設計用荷重

5. 想定構造物の縦強度の検討

想定構造物^{6, 7)}の縦強度検討用の曳航時設計波浪外力(縦曲げモーメントおよびせん断力)が、図-14に示されている。これに静水中外力を加えて、表-5に示されるモーメントとせん断力について検討する。なお、ここに示したモーメントはサギング(船底側引張)状態に対する数値である。ホギング(船底側圧縮)については、数値は若干小さい。

表-5 曳航時縦曲げモーメントおよびせん断力

	静水中	波浪中	合計
モーメント (tf・m)	4000	32200	36200
せん断力 (tf)	300	1350	1650

5.1 縦曲げモーメント

想定構造物の縦曲げ剛性を用いて、36200 tf・mのモーメントによる船底縁の引張応力を求めると27.1 kgf/cm²であった。これは、構造全体をPCとした場合⁷⁾の20.2 kgf/cm²に比べて大きい。しかし、構造全体をPCとした場合には、ホギング状態での甲板縁の引張応力28.4 kgf/cm²が必要プレストレス量(試設計⁷⁾では70 kgf/cm²とした)を支配した。ここで検討した輪切りブロックを縦方向に並べ接合緊張する工法では、ブロック接合部が弱点である。しかし、表-4にも見られるように、底部でプレストレスが消失するまでは、縦強度に関する問題は生じない。そこで、船底縁に70 kgf/cm²程度の有効プレストレスを導入すれば、十分と考えられる。

5.2 せん断力

模型試験では、ブロック接合部を除いて、船側部のせん断ひび割れ以外にせん断力による損傷は見られなかった。模型では、荷重150 tfで船側コンクリートに明確なせん断ひび割れが生じた。この荷重は、75 tfのせん断力に相当し、模型の縮尺(上下方向1/5、その他1/4)を考慮するなら、想定構造物の両側の船側で1500 tfのせん断力分担となる。この船側の分担に、縦通隔壁のせん断力分担を考慮すると、表-5に示されたせん断力1650 tfは満足される。しかし、横強度^{8, 9)}あるいは前述の縦曲げモーメントに比べると、せん断ひび割れに対する安全余裕は小さい。

6. さいごに

輪切りブロックを、プレキャストし、接合・緊張して建造する鋼/PCハイブリッドバージの縦強度について、模型試験に基づく検討を行った。得られた主な結論を以下に示す。

- 1) 船底プレストレスの消失後、ブロック接合部の損傷が破壊過程の引金となった。しかし、十分なプレストレス量により所定(曳航時波浪中)の縦曲げ強度を得ることができる。
- 2) 想定構造物は、曳航時波浪中のせん断力にさらされてもせん断ひび割れは生じないと考えられるが縦曲げ強度に比べると安全余裕が小さい。

参考文献

- 1) 松岡・直井：PCバージ底版の強度について、プレストレストコンクリート, Vol. 29, No. 5, p21-, 1987.
- 2) 松岡・直井：PC-鋼合成構造の鋼桁の座屈による崩壊, 第28回研究発表会講演概要, p. 41-, 1988.
- 3) 松岡：PCバージ底版の着底時強度, 日本造船学会論文集, No. 164, p. 387-, 1988.
- 4) 松岡・直井：バージ用PCスラブの集中面外荷重に対する強度, プレストレストコンクリート, Vol. 31, No. 2, p. 33-, 1989.
- 5) Matsuoka, K. and Tanaka, Y. : Transverse strength of hybrid barge, Proc. TECHNO-OCEAN '90, p. 458-, 1990.
- 6) 松岡・田中：鋼/コンクリートハイブリッドバージの横強度, 第2回シンポジウム論文集, 1991(予定).
- 7) 日本造船研究協会：海洋コンクリート構造物の設計技術に関する調査研究報告書, No. 383, 1985.