

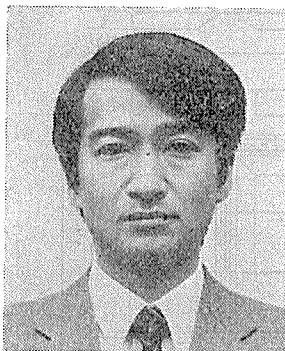
PC バージ底版の強度について

松 岡 一 祥*
直 井 保**

1. はじめに

海洋構造物へのコンクリートの適用には、その重量/強度比が大きな障害となる。しかし、運用システムの中で代船が得難い場合や、巨大で適当な船渠 (dock) が無い場合など、定期的な入渠による維持・補修が困難な時には、鋼構造で必要とされる重防食の施工あるいは現地での補修に要する経費などを勘案してコンクリートの使用が有利な場合もある。バージでは、プラント搭載あるいは原油など鉱産物の一次貯蔵を目的とする場合などがあてはまる。このようなオペレーション上の制約をうける構造物では、補修の困難な接水部、すなわち側外板下部および底版にコンクリートの使用が期待される。ここでは、バージ下部を PC 構造とした場合の底版をとりあげる。なお、構造重量低減のために、内部構造材には鋼板の使用を想定している。

波浪中の PC バージには、両端自由梁としての縦曲げモーメントとせん断力が加わる。せん断力に対しては、側外板などが荷重を分担する。曲げモーメントは、主に甲板と底版の面内力として分担される。水密性が要求される底版には、設計縦曲げモーメントに応じたプレストレスを導入する必要がある。さらに、底版には水圧や積荷による荷重、あるいは座礁や着底時の荷重に対する局部強度も要求される。そこで、一般的な PC バージの底版は、板中央面上に縦方向 (長手方向) に PC 鋼材を置き縦曲げ時の水密性を保証し、両側に鉄筋を配置して面外荷重に対する局部強度を確保する。



* Kazuyoshi MATSUOKA
運輸省船舶技術研究所構造強度部



** Tamotsu NAOI
運輸省船舶技術研究所構造強度部

本報告は、長さ 100 m 程度の鋼-PC ハイブリッドバージを想定して、1/5 縮尺模型で底版の強度についての検討を行った結果を示すものである。検討項目は、鋼-コンクリートハイブリッド底部のプレストレスひずみの分布、PC 床版の曲げ強度、座礁時などを想定した貫入抵抗試験である。プレストレスひずみについては、FEM による解析結果との比較を行った。曲げ強度については、ひび割れ発生強度と崩壊強度に注目して検討を行った。貫入抵抗については、簡略な算定法を示しその有効性を確かめた。

2. 材料、試験片および実験方法

2.1 材 料

表-1 の配合のモルタル¹⁾を使用した。セメント量が 600~700 kg/m³ のモルタルは海洋環境においても 15 年以上の耐久性が保証されている²⁾。図-1, 2 にこのモルタルのヤング率とポアソン比の測定例¹⁾を示した。図中 σ は付加応力、 σ_t は引張強さ、 σ_c は圧縮強さである。点線は圧縮での応力-ひずみ関係を 3 次関数と仮定したもので、図-9 の点線と対応している。測定結果とは若

表-1 モルタルの配合

単位重量 (kg/m ³)				W/C (%)	C/S (%)
水 (W)	セメント (C)	砂 (S)	混和材		
238	648	1266	4.86	37	50

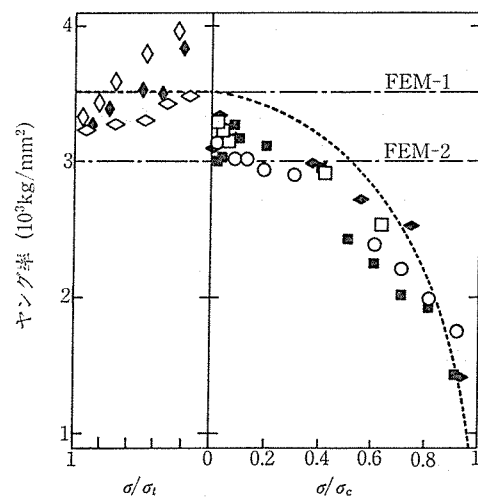


図-1 モルタルのヤング率¹⁾

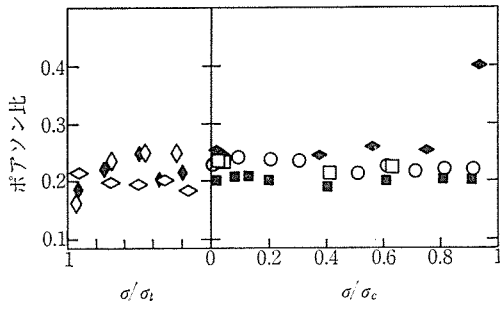


図-2 モルタルのポアソン比¹⁾

表-2 鉄筋の試験結果

直径 (mm)	降伏応力 (kg/mm ²)	引張強度 (kg/mm ²)	伸び (%)
5.97	39.1	61.8	29

干異なるが、引張側でのヤング率も考慮して参考値として示している。

鉄筋として直径 6 mm 丸棒の溶接金網 (縦方向鉄筋間隔 100 mm, 横方向 20 mm) を用いた。ダクトとして配線用鋼管 (外径 19.1 mm, 内径 15.9 mm) を用いた。表-2 に鉄筋の材料試験結果を示した。

PC 鋼材として 7 本より 9.3 mm ストランドを使用した。材料試験結果を表-3 に示す。応力-ひずみ関係は下式³⁾を採用した。

$$\sigma(\epsilon) = E_s \epsilon \quad (\sigma < \sigma_s)$$

$$\sigma(\epsilon) = \sigma_s \left\{ 1 + \frac{(\epsilon - \epsilon_s)/\epsilon_s}{A + B(\epsilon - \epsilon_s)/\epsilon_s} \right\} \quad (\sigma > \sigma_s)$$

ただし、 $\sigma_s = E_s \epsilon_s$

式中の材料定数は表-4 に示されている。

ハンチ上面材、鋼製桁、定着部支圧板などの鋼製補強材には SS 41 鋼板を使用した。

表-3 ストランドの試験結果

0.2% 耐力 (kg)	最終耐力 (kg)	弾性率 (kg/mm ²)	伸び (%)
9 200	10 000	19 800	6.6

表-4 ストランドの材料定数

E_s (kg/mm ²)	σ_s (kg/mm ²)	A	B
19 800	142	0.227	2.93

表-5 試験片番号、配筋形式など

番号	配筋形式	かぶり (mm)	モルタルの強度 (kg/mm ²)		鉄筋比 (%)	
			圧縮	引張	縦方向	横方向
# 1	RC-L	6	5.68	0.380	0.603	2.827
# 2	RC-T	6	5.68	0.380	0.603	2.827
# 3	PC-L	12	5.90	0.418	1.166	2.827
# 4	RC-L	12	5.90	0.418	0.603	2.827
# 5	RC-T	12	5.97	0.444	0.603	2.827
# 6	PC-T	18	5.97	0.444	1.166	2.827
# 7	RC-L	18	5.32	0.442	0.603	2.827
# 8	RC-T	18	5.32	0.442	0.603	2.827
# 9	RH-T	12	4.83	0.439	0.870	2.827
#10	PH-T	18	5.14	0.458	1.009	2.827
#11	PH-L	12	4.90	0.445	1.009	2.827

2.2 試験片

表-5 に試験片の番号、配筋形式、かぶり厚さ、モルタルの強度および鉄筋比を示した。図-3~5 は試験片の形状である。表-5 の配筋形式で、RC および PC

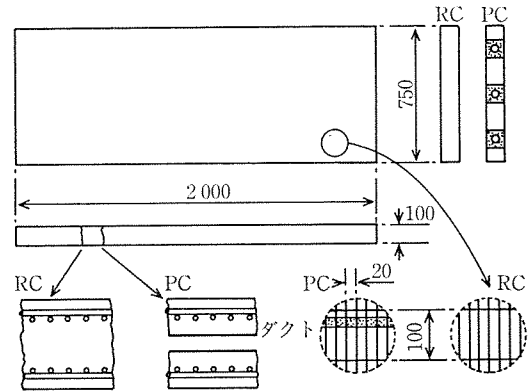


図-3 平板試験片 (試験片 # 1~# 8, 単位 mm)

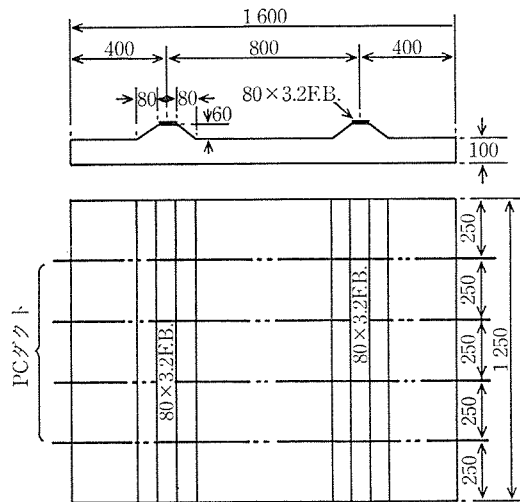


図-4 ハンチ付き試験片 (試験片 # 9, 10, 単位 mm)

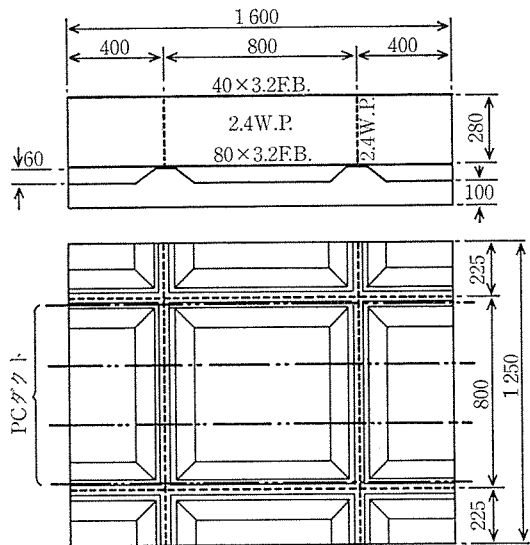


図-5 合成 PC 試験片 (試験片 # 11, 単位 mm)

は PC 鋼材の有無を示している (図-3 参照)。RH および PH は、鋼製桁を接合するためのハンチを持つ試験片である (図-4 参照)。ハイフンの後の L および T はそれぞれ表面側の鉄筋の方向が縦方向および横方向であることを示している。図-5 に示されている試験片 # 11 は、ハンチ上面材に鋼桁を溶接したハイブリッド PC 構造となっている。

2.3 実験方法

試験片 # 3, 6, 10, 11 (PC, PH 形式) は、試験前にプレストレスひずみの測定を行った。ストランド 1 本当たりの有効緊張力は試験片 # 6 を除き、6.85 トンであった。試験片 # 6 の有効緊張力は、5.86 トンであった。緊張後グラウトは行わず、アンボンドタイプとした。

試験片 # 1~8 は 4 点曲げ試験に供した (図-6 参照)。モーメント一定区間で、変位の差分から平均曲率を求めた。試験片 # 9, 10 は 3 点曲げ試験に供した (図-7 参

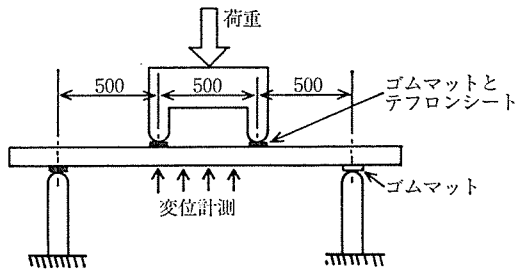


図-6 4点曲げ試験 (試験片 # 1~# 8, 単位 mm)

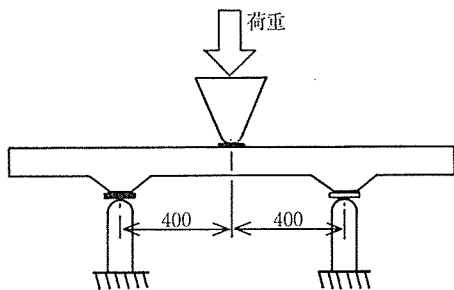


図-7 3点曲げ試験 (試験片 # 9, 10, 単位 mm)

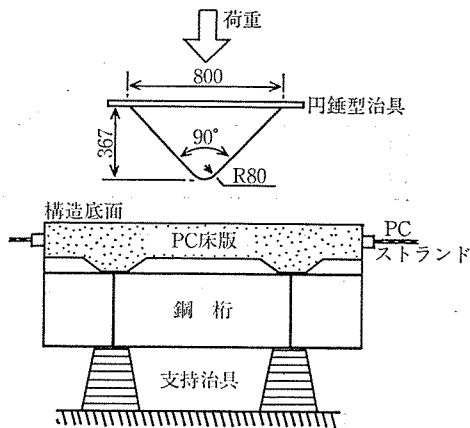


図-8 貫入試験 (試験片 # 11, 単位 mm)

照)。測定項目はひび割れ発生強度と最終強度である。

試験片 # 11 に対しては、岩を想定した鋼製円錐の貫入試験を行った (図-8 参照)。

3. 解析方法

3.1 プレストレスひずみ

ハンチのない平板試験片 # 3, 6 では、断面剛性から計算した。ハンチのある試験片 # 10, 11 では、平面ひずみ要素あるいは 6 面体要素による FEM 解析を行った。モルタルはヤング率 $3.5 \times 10^3 \text{ kg/mm}^2$ (FEM-1) あるいは $3.0 \times 10^3 \text{ kg/mm}^2$ (FEM-2), ポアソン比 0.2 とした (図-1, 2 参照)。鋼材はヤング率 $2.1 \times 10^4 \text{ kg/mm}^2$, ポアソン比 0.3 とした。平面ひずみ要素による解析では、各層で合成則によりヤング率およびポアソン比を定めた。6 面体要素による解析では、コンクリート中の鉄筋は無視した。解析範囲は平面ひずみ要素では、ハンチ中央から試験片中央まで、6 面体要素では、対称条件を考慮して試験片の 1/4 の領域とした。なお、乾燥収縮は考慮していない。

3.2 曲げ強度

軸力平衡、断面平面保持を仮定し、ひび割れ深さとモーメントおよび曲率の関係を、材料非線形を考慮したイタレーションで求めた。計算に使用した応力-ひずみ関

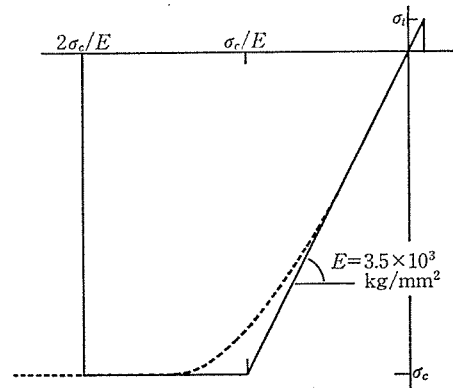


図-9 モルタルの応力-ひずみ関係

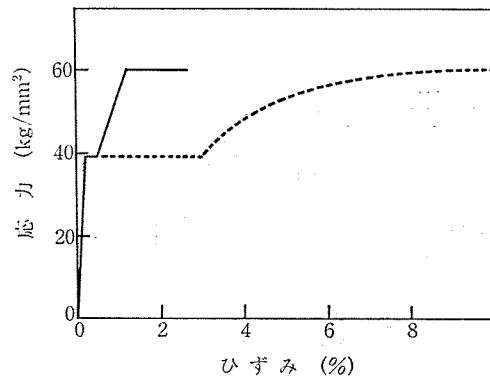


図-10 鉄筋の応力-ひずみ関係

係を図—9, 10 に示す。

横方向鉄筋をこえてひび割れが内側に進展する現象をもってひび割れ発生とした⁴⁾。これは、かぶりの部分には乾燥収縮などによりひび割れの起点となる微小な亀裂が存在すると考えているためである。

ひび割れ断面における力の釣合から、モーメント-曲率関係を求める場合、鉄筋が降伏すると、ひび割れ断面での曲率は、4点曲げ試験の変位から求められる平均曲率に比べ大きくなる。ひび割れ断面における計算から平均的な曲率を求めるには、鉄筋の塑性ひずみを小さく見積もる方法が簡便である。本報告では、図—10 の2つの応力-ひずみ関係を用いている。図中の点線は実際の応力-ひずみ関係である。実線は平均曲率の計算に用いたものであり、塑性ひずみを実際の1/10程度と小さく見積もっている。

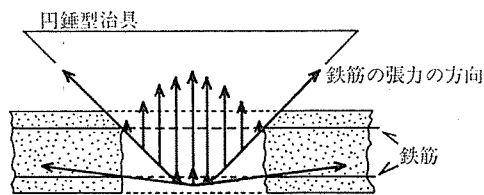
モーメント-曲率計算の最大モーメントをもって崩壊強度とした。

3.3 貫入抵抗

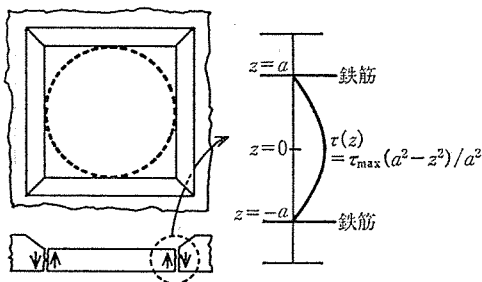
試験片 #11 の貫入試験におけるひび割れ発生荷重は、4辺固定正方形板の中央集中載荷における最大モーメントがひび割れ発生モーメントとなる荷重として算定した。

貫入初期には、上述ひび割れ発生荷重を貫入抵抗とした。貫入量が増大し、破砕領域のコンクリートが荷重を分担しなくなると、鉄筋の張力(降伏応力を上限とする)により円錐型治具を支えるものとして、貫入抵抗を求めた(図—11 参照)。この方法は鉄筋とコンクリートとの力の伝達を考慮する必要がないため計算が容易である。

上述の計算モデルは破砕領域がハンチ部に及ぶと適用できない。そこで、その適用上限をハンチ部に内接する



図—11 貫入時の鉄筋張力



図—12 打抜き時のせん断応力分布

円筒の打抜き状態までとし、図—12 のせん断応力分布を仮定してこの上限値を決定した。なお、最大せん断応力は下式⁵⁾が成立するものとして定めた。

$$\tau_{\max} = (0.252 - 0.0246 \sigma_c) \sigma_c \quad (\text{kg/mm}^2)$$

ここに、 σ_c (kg/mm²) はコンクリートの圧縮強度である。

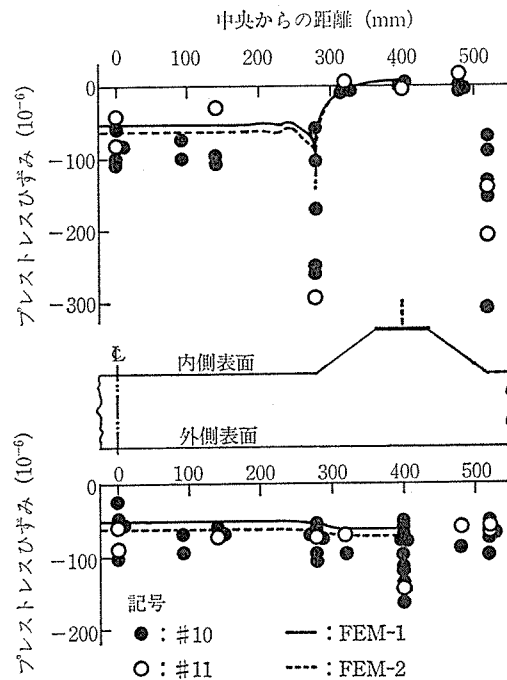
4. 結果の検討

4.1 プレストレスひずみ

図—13 にハンチまわりのプレストレスひずみの分布を示した。平面ひずみ要素による計算結果 (FEM-1 および FEM-2) を併記した。測定、計算ともに、ハンチ立上がり部でのひずみの集中を示している。測定結果は計算結果に比べ、ハンチ立上がり部で 100 μ 程度、板体平行部で数 10 μ 大きなひずみとなっている。これは、計算では乾燥収縮を無視しているためと考えられる。ハンチ部では引張のプレストレスひずみが生じているが、その大きさ、維持・補修の容易な内側表面であることなどを考慮すれば、特に対策を施す必要はない。

図—14 に試験片 #11 の鋼-コンクリート合成部 (図中桁断面) および試験片中央部 (図中底板断面) のプレストレスひずみの分布を示した。6面体要素による計算結果を併記した。桁断面のコンクリートには前述と同様に、乾燥収縮の影響が見られる。しかし、鋼桁では計算結果と測定結果とはよく一致している。

以上から、プレストレスひずみはコンクリートの乾燥収縮の影響を除けば、FEM で計算可能であることがわ



図—13 ハンチまわりのプレストレスひずみ分布

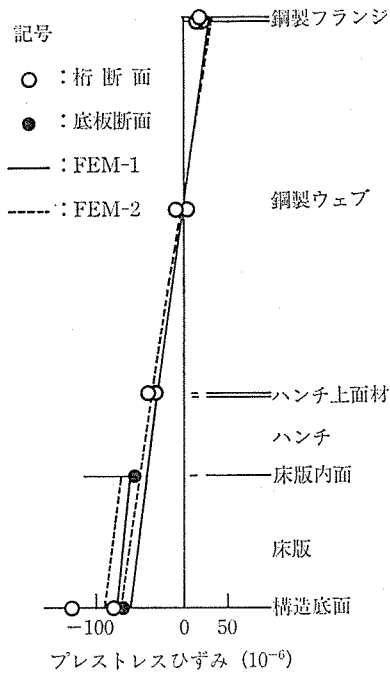


図-14 鋼-コンクリート合成部のプレストレスひずみ分布

かる。なお、コンクリートのヤング率を変えた FEM-1 と FEM-2 との計算結果の差は、乾燥収縮の影響に比べれば小さい。

4.2 曲げ強度

4.2.1 モーメント-曲率関係

RC の例として試験片 #5 のモーメント-曲率関係を図-15 に、PC の試験片 #3,6 のモーメント-曲率関係を図-16, 17 に示した。

RC の図-15 を見ると、計算ではひび割れ発生後ひび割れが横方向鉄筋の位置から安定成長の位置まで急速に進展する跳び移り現象が見られる。実験ではひび割れ発生からモーメント 0.5 ton·m までひび割れによる荷重低下と急激な曲率の増加が見られる。計算で引張側鉄筋が降伏する 0.65 ton·m のあたりでは、実験でも鉄筋

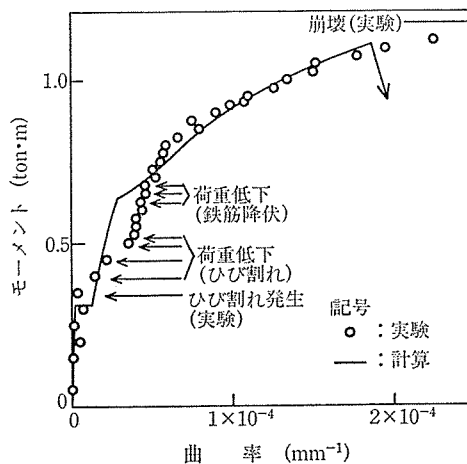


図-15 モーメント-曲率関係 (試験片 #5)

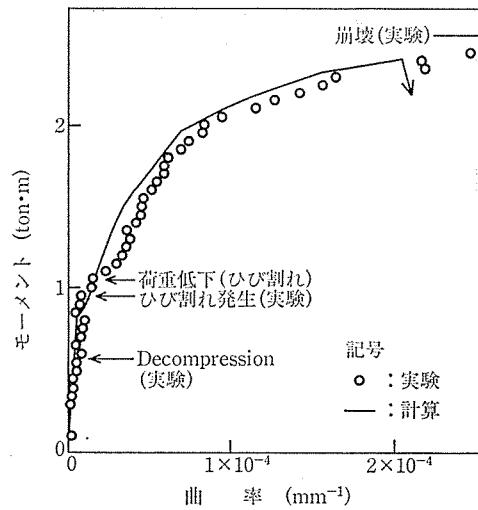


図-16 モーメント-曲率関係 (試験片 #3)

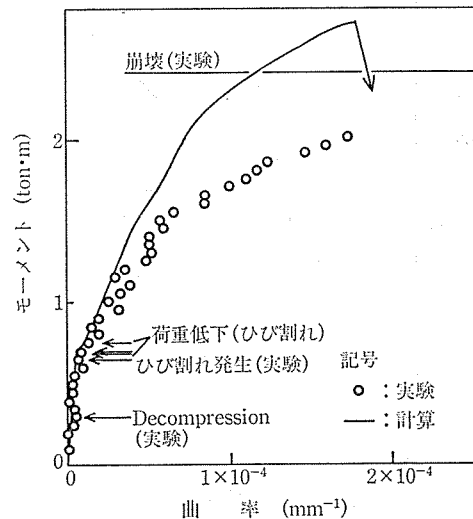


図-17 モーメント-曲率関係 (試験片 #6)

の降伏によると考えられる小刻みな荷重低下が観察された。

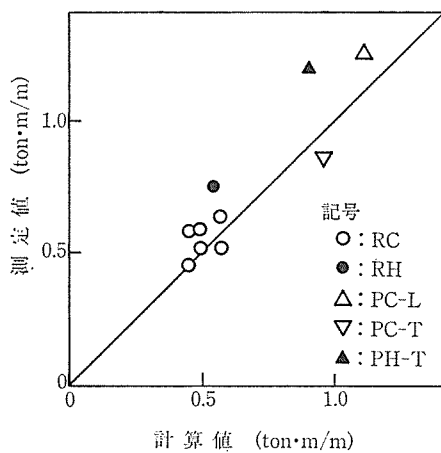
PC の図-16, 17 を見ると、ひび割れ発生後の跳び移り現象は実験でも計算でも観察されない。試験片 #3 では、計算結果と実験結果はよく一致しているが、試験片 #6 では、モーメント 1.5 ton·m 以上で測定された曲率が計算結果より大きくなっている。これについては、崩壊強度の検討で取り扱う。

4.2.2 ひび割れ発生強度

ひび割れ発生強度および最終強度の測定値と計算値とを表-6 に示した。図-18 はひび割れ発生強度の計算値と測定値を比較して図示したものである。次の崩壊強度(図-19 参照)に比べると、計算による推定精度は若干劣る。ここで採用した横方向鉄筋を越えるひび割れの進展をもってひび割れ発生とする方法は、配筋精度の影響を大きく受けるため結果がばらついたものと思われる。

表—6 結果の比較

試験片番号	ひびわれ発生強度		崩壊強度	
	測定値	計算値	測定値	計算値
	モーメント (ton・m)		モーメント (ton・m)	
# 1	0.435	0.338	1.200	1.199
# 2	0.475	0.423	1.150	1.151
# 3	0.950	0.839	2.550	2.404
# 4	0.440	0.368	1.203	1.153
# 5	0.388	0.429	1.150	1.158
# 6	0.645	0.723	2.405	2.702
# 7	0.340	0.333	1.175	1.114
# 8	0.388	0.368	1.230	1.121
# 9	0.938	0.672	2.813	2.522
#10	1.500	1.133	4.003	3.748
	荷重 (ton)		荷重 (ton)	
#11	14.00	9.60	54.00	48.34



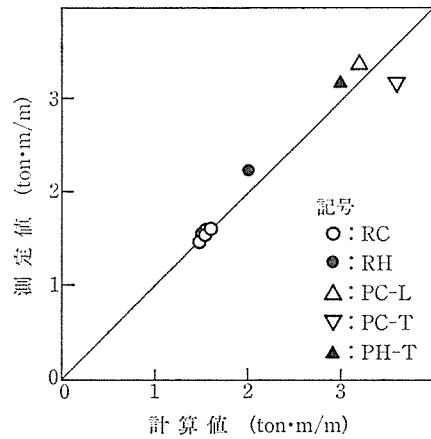
図—18 ひびわれ発生モーメント

図を見ると、3点曲げのRHとPH（試験片#9と#10）の測定値が計算値に比べて大きいのが目につく。4点曲げでは、微小な亀裂が一定モーメント区間のかぶりに必ず存在し、これがひび割れ発生の起点となるが、3点曲げの載荷線上には、この亀裂が必ずしも存在しないため、3点曲げのひび割れ発生荷重が大きくなったと思われる。

表—6の試験片#11のひび割れ発生荷重の計算値と測定値を比較すると、この差は3点曲げの場合よりさらに大きい。3.2節に示した本報告のひび割れ発生モーメントの計算方法は、微小な亀裂の存在を仮定し、はじめから引張側かぶり部のコンクリートを無視している。そこで、最高モーメントの負荷領域が、面、線、点の順で小さくなるほど、かぶり部の微小な亀裂の影響は小さくなり、ひび割れ発生強度は計算値に比べて大きくなる。

4.2.3 崩壊強度

図—19に崩壊強度の計算値と測定値を比較して示した。ひび割れ発生強度に比べると、計算による推定精度は良好である。曲げ崩壊強度の算定精度は仮定したコンクリートの応力-ひずみ関係に依存する。圧縮側コンク



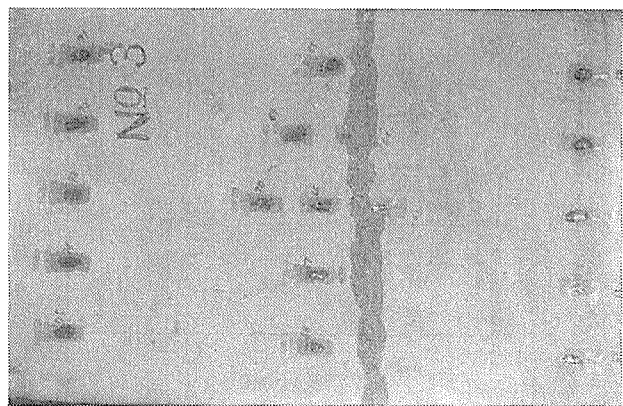
図—19 崩壊モーメント

リートの応力ブロックに一般に認められるものを採用すれば、十分な算定精度が得られるはずである。ここで採用した応力ブロック（図—9参照）は安全側予測値を与えるものと期待された。

図—19の中でPC-T（試験片#6）の計算値だけが危険側予測となっている。試験片#6は、外側鉄筋が横方向で応力導入の後4点曲げ試験に供したものである。同じ配筋で応力導入を行わずに4点曲げを行った試験片#8、同じ配筋で応力導入の後3点曲げを行った試験片#10、および、外側鉄筋が縦方向で応力導入の後4点曲げを行った試験片#3（PC-L）の計算結果は、すべて安全側である。すなわち、

- i) PC板で外側鉄筋がPC鋼材方向に垂直
- ii) 圧縮側表面に面外荷重が加わらない（4点曲げ）の2条件が満たされると、ここに示した方法で得られる値より崩壊強度は小さくなっている。

写真—1, 2はPC-L（試験片#3）およびPC-T（試験片#6）の圧縮側表面の最終状態を示している。写真—1の試験片#3の剝離領域は表層の一部に限られている。しかし、写真—2の試験片#6では、横方向鉄筋の位置が広範囲にわたって剝離面となっている。試験片#



写真—1 最終状態 (PC-L; #3)

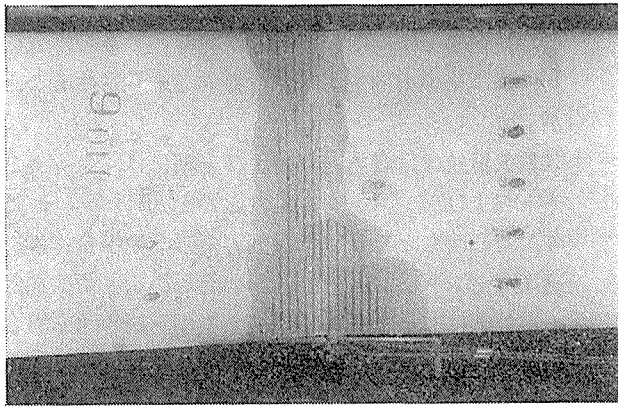


写真-2 最終状態 (PC-T; #6)

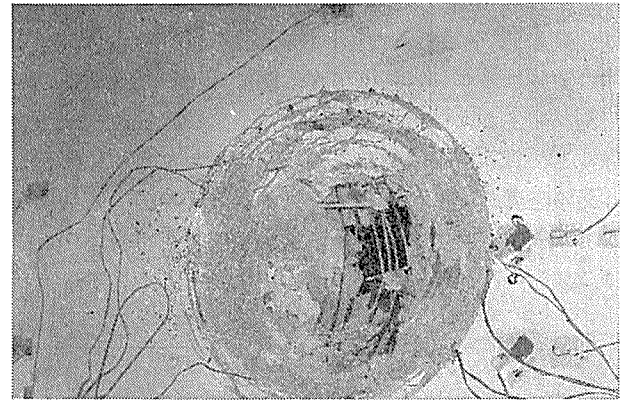


写真-3 最終状態 (貫入試験; #11)

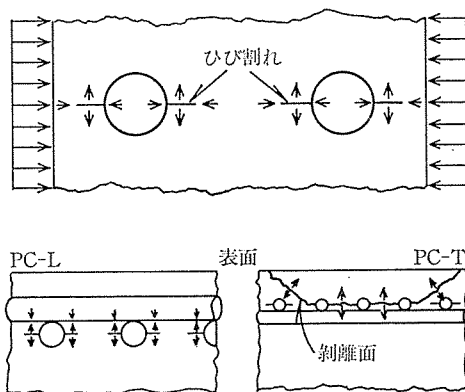


図-20 配筋による表層コンクリート剥離機構の違い

6では、この剥離面より外側のコンクリートが有効に荷重を分担しなかったものと思われる。

図-20 は試験片 #3 と #6 の圧縮側コンクリートの剥離機構の違いを概念的に示したものである。圧縮側では、鉄筋とコンクリートの剛性の違いにより、横方向鉄筋の間でひび割れが生じやすくなる。試験片 #3 (PC-L) では外側に縦方向の鉄筋があるため、このひび割れの成長は妨げられる。そこで、試験片 #3 では圧壊に至るまで表層のコンクリートは分離せず一体として挙動する。試験片 #6 (PC-T) では、縦方向鉄筋が内側にあるため、表層のコンクリートは圧壊に至る前に剥離して荷重を分担しなくなる。図-17 の試験片 #6 のモーメント-曲率関係を見ると、1.5 ton・m 以上では計算結果に比べて試験片の曲げ剛性が著しく低下している。これは、上述のように圧縮側表層のコンクリートが荷重を分担せず有効板厚が減少したためと考えられる。

浮遊式構造物にとって、構造重量の低減は重要な課題である。かぶりコンクリートも力を分担するものとして設計できることが望ましい。そこで、2方向配筋の表層側鉄筋はその方向を PC 鋼材方向と一致させる方がよいと思われる。

4.3 貫入抵抗

貫入試験のひび割れ発生荷重および崩壊荷重は、表-6 の番号 #11 の欄に示されている。崩壊荷重の欄の計算値は、図-12 による打抜きせん断力である。試験終了後の外観を写真-3 に示した。

図-21 に貫入量-貫入抵抗関係を示した。図を見ると、計算結果と実験結果とは、ひび割れ発生時のピーク値、貫入量 50 mm 程度、および、貫入量 170 mm 以上の状態を除けば、比較的よく一致している。不一致の原因としては、鉄筋の張力により押し込み力を支えているとする本計算モデルでは、初期および末期のコンクリートの荷重分担が評価されていないことがあげられる。ひび割れ発生荷重の差は、曲げ強度の検討でも述べたように、1点集中荷重の場合、コンクリート中の微小な亀裂がひび割れ発生に影響を与えていないために生じたと考えられる。

ひび割れ発生時のピーク荷重およびその後の腰掛け部の荷重は、座礁/着底時の設計で重要となる。これらの値は、ひび割れ発生モーメントを増大させることで改善できる。そこで、プレストレス量を適切に設定することにより所定の強度の確保は容易である。

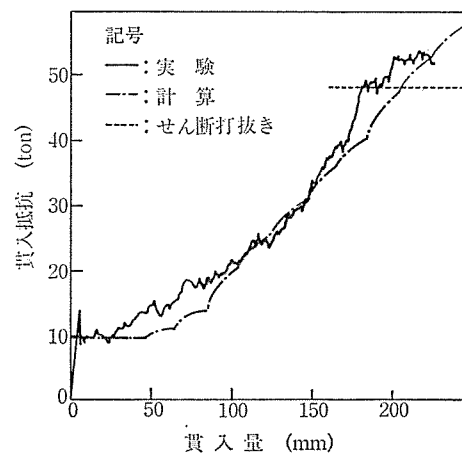


図-21 貫入量-貫入抵抗関係

座礁／着底以外の、船舶との衝突時などを考えるには、貫入量-貫入抵抗曲線の描く面積と衝突してくる物体の運動エネルギーとの関係が重要である。貫入初期のひび割れ発生および末期のコンクリートの打抜きの段階を除くと、貫入抵抗に対しては鉄筋の張力が大きな影響を与えると考えられる。そこで、ある程度の損傷を前提として、衝突時吸収エネルギーと貫入量の関係を設定するには、鉄筋の配置についての検討が重要である。

5. 結 論

ハイブリッド PC バージの底板について、プレストレスひずみの測定、曲げおよび貫入試験を行い、検討の結果以下の結論を得た。

- ① 鋼-コンクリートハイブリッド底板のプレストレスひずみは、コンクリートの乾燥収縮の影響を除けば FEM で算定できる。
- ② 4 点曲げの一定モーメント区間における平均曲率は、ひび割れ断面の鉄筋の塑性ひずみ量を小さく見積もって求めることができる。
- ③ 3 点曲げによるひび割れ発生モーメントは、4 点曲げの場合より若干大きい。1 点集中荷荷の場合にはさらに大きい。
- ④ 配筋方向、PC 鋼材配置方向、および、モーメン

トの負荷方法によっては、圧縮側かぶりコンクリートが荷重を分担しない可能性がある。そこで、表層側鉄筋はその方向を PC 鋼材方向と一致させることが望ましい。

- ⑤ 貫入抵抗は、貫入初期および末期には、コンクリートおよびプレストレス量の影響をうける。そこで、着底時などひび割れが許容できない場合には、適切なプレストレス量を選ぶ必要がある。衝突などの事故時について、ある程度の損傷を許容する場合には、ひび割れ発生後の貫入抵抗の増加は鉄筋の張力によるため、設計吸収エネルギーと許容貫入量から鉄筋量を定める必要がある。

参 考 文 献

- 1) 遠藤，松岡，直井：モルタルの材料強度に及ぼす試験方法の影響，昭和 55 年度春期船舶技術研究所研究発表会講演集（1980）
- 2) 田村ほか：海水の作用をうける PC 管カバーコートモルタルに関する試験，セメント技術年報 34（1980）
- 3) 例えば，神山：PC ばりの強度と変形の一計算方法，PC 技術協会第 12 回研究発表会講演概要（1972）
- 4) 松岡，遠藤，直井：曲げ荷重をうけるフェロセメント部材の強度，昭和 55 年度春期船舶技術研究所研究発表会講演集（1980）
- 5) 伊藤：セメント工学，森北出版（1977），p. 87
【昭和 62 年 4 月 23 日受付】

◀刊行物案内▶

プレストレストコンクリート構造物設計図集（第 2 集）

本書は協会設立 20 周年行事の一環として、前回発行した設計図集の様式にならい編集した、その第 2 集です。協会誌第 10 巻より 21 巻に亘る巻末折込付図を主体とし、写真ならびに説明を付し、その他参考になる PC 構造物についてとりまとめた設計図集で、PC 技術者の座右に備え付けるべき格好の資料と考えます。

希望者は代金（現金為替または郵便振替 東京 7-62774）を添え、下記宛お申し込みください。

体 裁：B 4 判 224 頁

定 価：9,000 円（会員特価 7,000 円） 送 料：1,000 円

内 容：PC 橋梁（道路および鉄道）74 件，PC 建築構造物 25 件，その他タンクおよび舗装等 10 件

申 込 先：（社）プレストレストコンクリート技術協会