

論文

[1084] フェロセメントの引張試験におけるひび割れ性能及び付着強度

北村 茂*¹ 佐藤 忠*² 野間 宏平*³ 酒井 謙*⁴

1 まえがき

フェロセメント船の一般的な解釈は「フェロとは主として金網をさし、金網を数層重ねモルタルで補強したものと云える」。この金網を硬鋼線に置き換えた新しい工法で船側外板に相当する供試体を製作し、硬鋼線の太さ及び間隔、モルタルのかぶり厚さを変え、シラスをラテックス系の乳剤で練ったモルタルについて、ひび割れ性能及び付着強度について調べ、FEM計算と比較した。

2 使用材料の特性

硬鋼線の線径は2.3、3.2、4.8、5.8mm (JIS G3506) の4種類を用いた。織金網素線の線径は0.1mmで網目寸法は1mm平方の市販品である。硬鋼線

と金網素線の強度特性を表-1に示す。モルタルはポルトランドセメントに中空軽量骨材(シラス)を混ぜ、ラテックス系の乳剤(LK-50)で練った。モルタルの配合[1]、圧縮強度(JIS A1108)について表-2に示す。

表-2 モルタルの圧縮強度

	圧縮強度 kg/cm ²	歪み ν		弾性係数 kgf/cm ²
		軸方向	円周方向	
モルタル	75.65	2500	425	3.33×10^4
	78.05	2000	560	4.31×10^4
	66.04	1300	500	4.7×10^4

表-1 硬鋼線と金網の素線の強度特性

直径 φ mm	引張強度 0. kgf/mm ²
2.3	175.5
3.2	170.8
4.8	141.5
5.8	145.4
0.1 mm φ 1 mmsq.	43.5

3 供試体の製作

本実験に用いた供試体の形状寸法を図-1に示す。織金網を240mm×60mmの大きさに切断し、長さ480mmの硬鋼線を織金網の上に長手方向(負荷方向)を一致させて置き針金で結束した。試験部から破断するように、試験部80mm間の硬鋼線を2.0、3.0、4.5、5.4mmにサンドペーパーで磨き細くし、線径の影響を調べた。試験用硬鋼線は金網の上に等間隔に並べ、針金で結束し図に示すような4種類の供試体を製作した。供試体の取付は硬鋼線の両端120mmの部分を試験機のチャックに挟んで負荷した。試験部のモルタルに荷重が均等にかかるように供試体の取付部からモルタル補強部まで硬鋼線を通しモルタルで固めた。試験部の硬鋼線からモルタルのかぶり厚さを1、3、5mmになるように調節した。さらに金網側のかぶり厚さは2mmとし、材令7日で実験を行った。

供試体の名称は試験部の線径、硬鋼線の本数、かぶり厚さを数字で示す。例えば、線径2.3mmの硬鋼線が1本、かぶり厚さが3mmの場合は2.0-1-3と表示することにした。

*¹ 運輸省 船舶技術研究所 主任研究官(正会員)

*² ソラ・マリン ヨット自作家全国集団Yメンズクラブ会員

*³ 横浜国立大学 学生 工学部 物質工学科

*⁴ 横浜国立大学 工学部 物質工学科 工博

4 試験方法

供試体の表及び裏面
に対称にゲージ長さ60m
m (G.F. =2.13) の歪み
ゲージを貼付し、歪みを
計測した。歪みゲージに
平行に導電銀ペストの
線を1mm幅で100mm間ひ
いて、モルタルのひび割

れをペスト線が切れたときの電
圧の変化から検出した。試験部
に変位計を表裏面の対称な位置
に取付、標点間80mmの供試体の
試験部の変位を計測した。

試験機は4つの7ms試験機を用
いて荷重をかけた。荷重、クロス
ヘッド変位、試験部の変位及び歪
みを計測した。試験部の変位は
変位計の取付用治具を製作し、
図-2のように取り付けた。荷重、
変位、歪みはトランジェントメ
モリに記録し、XYレコーダ及
びペンレコーダに記録した。計
測結果の1例を図-3に示す。

導電銀ペスト線の切断をモル
タルのひび割れ発生
時期として、その時
の荷重、変位及び歪
みを求めた結果の一
覧を表-4にまとめて
後述する。

さらにモルタルと
硬鋼線の剥離挙動を
知るため、供試体の
試験部及び補強部の
モルタルに16枚の
歪みゲージを貼付し
て歪み分布を求め、
後述するFEM解析との
比較に用いた。試験

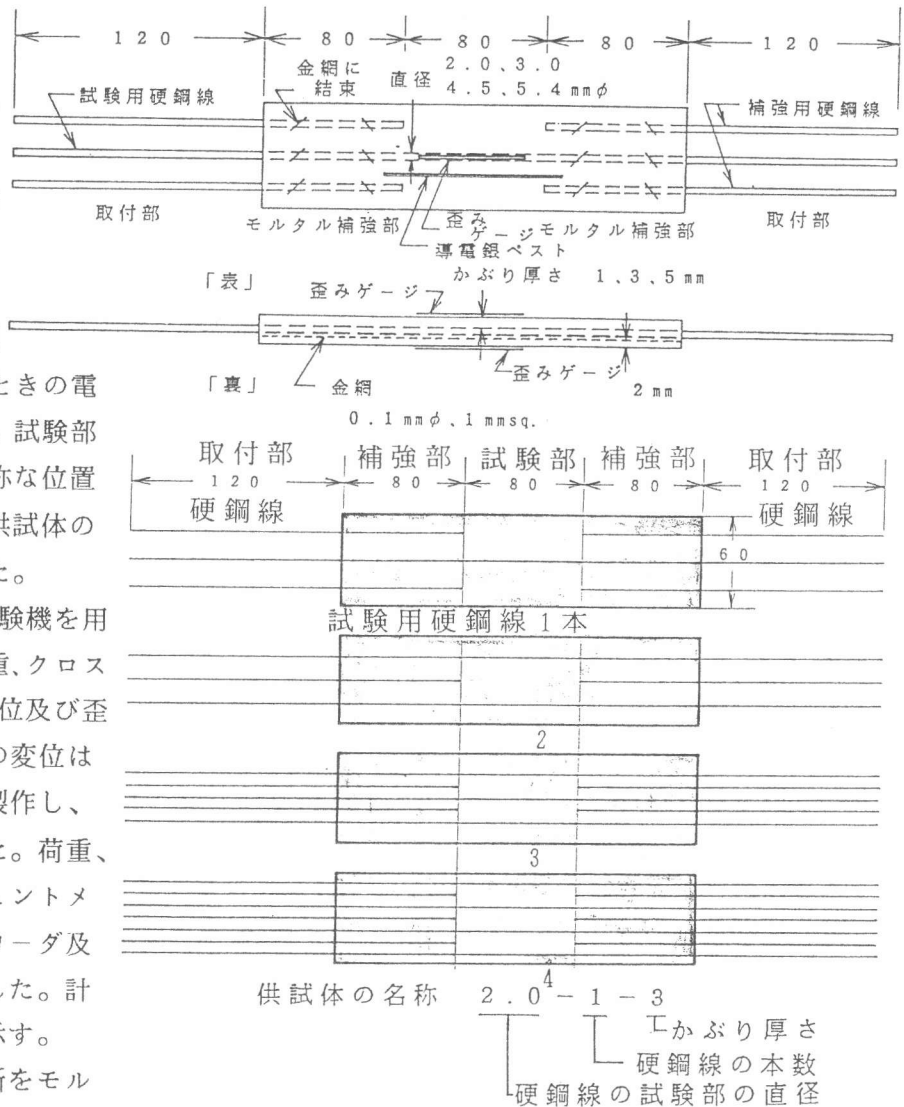


図-1 供試体の形状寸法

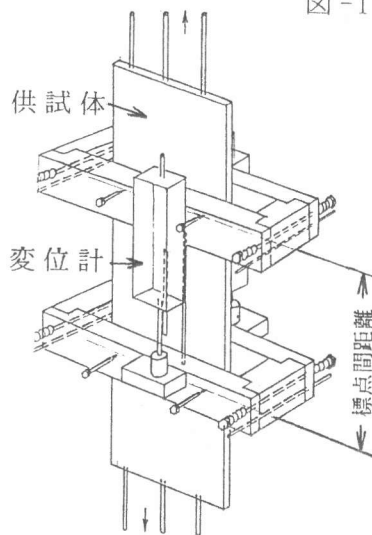


図-2

変位計の取付状況

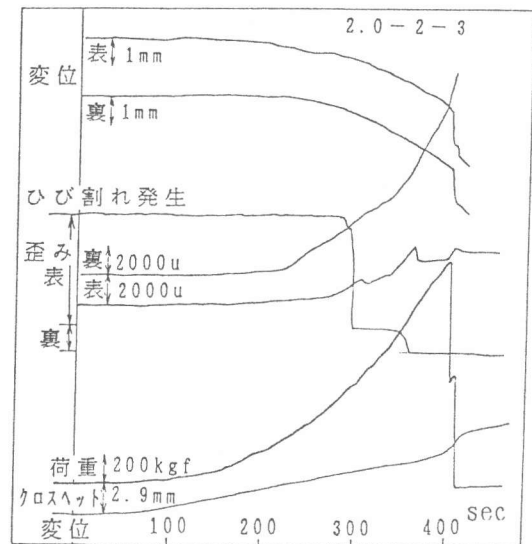
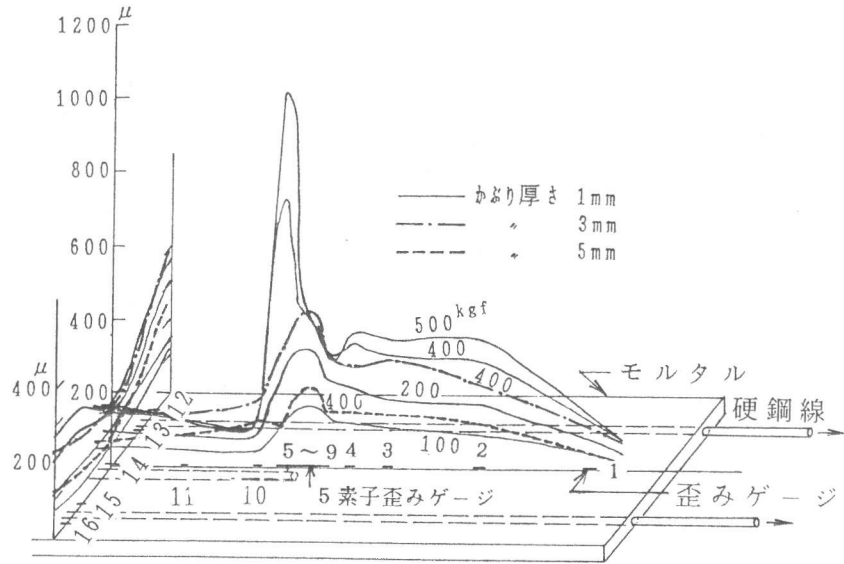


図-3 計測結果の1例

部中央の荷重方向及び荷重に直交方向の歪み分布を図-4に示す。荷重方向では硬鋼線の切断位置で歪みの最大値を示した。荷重に直交方向の歪み分布は供試体を貫通した硬鋼線近傍では歪みは大きく、貫通していない硬鋼線近傍では小さめの値を示した。



5 実験結果及び考察

5.1 硬鋼線の荷重-変位曲線

線径2.3mmの硬鋼線を1, 2, 3, 4及び5本並べて、荷重速度20~30mm/minで引張り破断させた。硬鋼線の荷重-変位曲線はチャック間150mm以外のところから破断したものは除外した。硬鋼線の本数にかかわらず最大荷重の保持時間はほぼ一定になった。硬鋼線の本数に比例して立ち上がりの勾配と最大荷重が増大する傾向を示した。5本の硬鋼線を引張った場合に、1本ずつ破断していく現象が、図-5の荷重の低下に現れた。クロスヘッド変位とチャック間変位の関係は硬鋼線の本数にかかわらず比例した。それらの関係を図の上段に示す。

図-4 供試体のひずみ分布

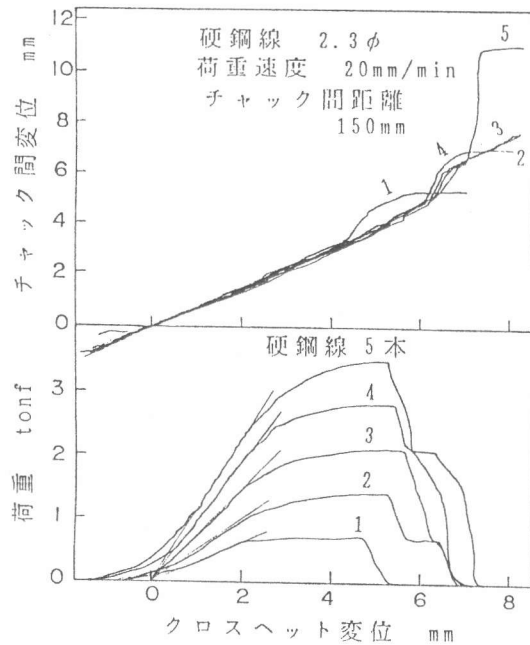


図-5 硬鋼線の荷重-変位曲線

5.2 ひび割れ発生荷重

試験部の硬鋼線が1本の供試体2.0-1-3, 3.0-1-1, 5.4-1-3では硬鋼線のみ荷重-変位曲線(図-5)と殆ど同じ波形を示し、荷重をかける

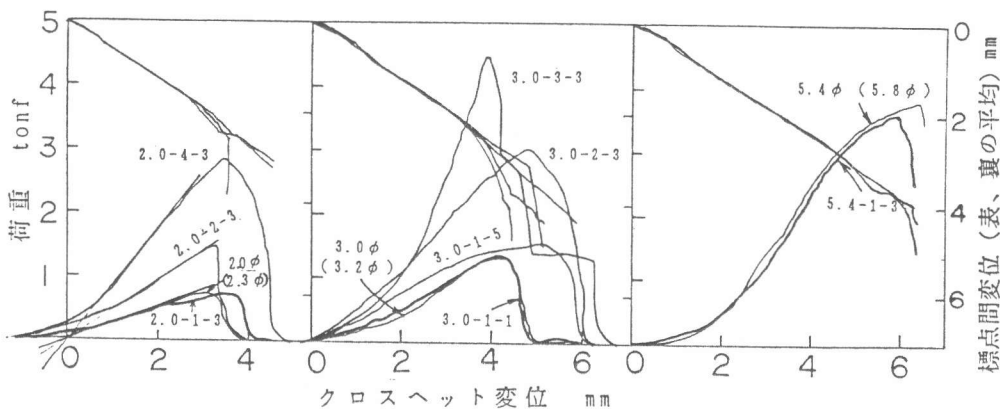


図-6 供試体の荷重-変位曲線

初期の過程でモルタルの影響を受けているものと思われるが、最大破断荷重では硬鋼線の場合と殆ど同じ値を示した。供試体2.0-2-3、2.0-4-3、3.0-2-3では荷重は直線的に上昇し、3.0-2-3では荷重は双曲線状に立ち上がり、それらの関係を図-6に示す。図中の右下りの直線はクロスヘッド変位と標点距離80mm間の表、裏面の変位の平均値で、荷重をかけると硬鋼線の太さにかかわらず、同じ勾配で比例して増大したが、荷重が最大値に近づくにつれて変位の値は直線からずれた。

鋼/モルタルの比率の高い線径4.5mm、5.4mmでは硬鋼線のみ荷重-変位曲線が支配的であった。

硬鋼線の線径が大きくなるほど、表-4のようにひび割れ発生荷重と最大荷重の比が小さくなり0.19まで下がった。

それらの関係を図-7に示す。図-4に示すように、かぶり厚さが厚いほど、モルタルと補強硬鋼線の切断部の境界部に発生するひずみは小さくなった。また、ひび割れ発生荷重は硬鋼線の線径が細いほど高くなった。

モルタルの付着強度を求めるためJIS原案に従って引き抜き試験を行った。その結果を表-3に示す。線径5.8mmの硬鋼線以外は約15kgf/cm²であった。この結果を考慮すれば、硬鋼線の線径が細いほど硬鋼線の周囲のモルタルに作用する領域が少ないためにひび割れに至るまでの荷重が大きくなるものと思われる。硬鋼線が4本でその間隔が最も狭い(14mm)供試体2.0-4-3では表面のひび割れは硬鋼線相互の影響を受けるものと思われる。

5.3 FEM解析

モルタルと鋼線の剥離挙動を知るため、FEM解析を行った。モルタル部分は3角形平面応力要素を用い、硬鋼線は2節点梁要素を用いる。モルタルと硬鋼線の付着を図-8の離散型のボンドリンク要素で表現した。ボンドリンクの付着応力-すべり関係は、実験より得られたものを用いた。ボンドリンク要素は同図に示すように、線要素と平面要素をバネで結び付ける働きをしていて、付

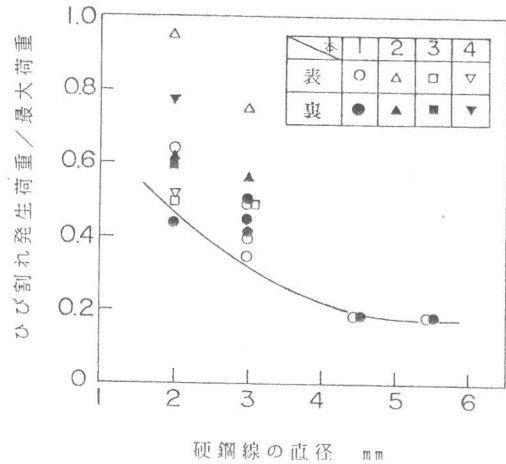


図-7 ひび割れ発生荷重/最大荷重と硬鋼線の太さの関係

表-3 モルタルの付着強度

直径	付着強度
φ mm	τ kgf/cm ²
2.3	15.02
3.2	15.65
4.8	15.60
5.8	12.79

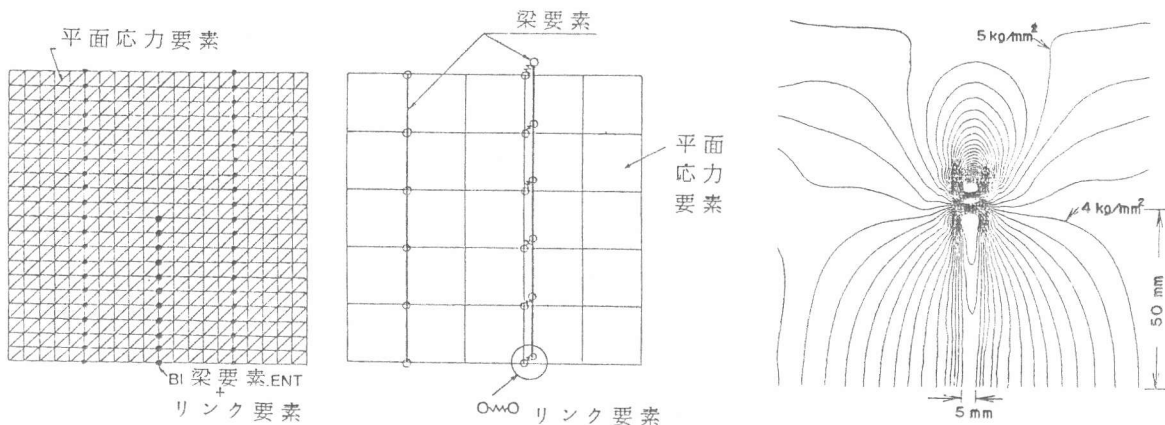


図-8 FEM解析の手法と得られた結果

着応力を節点どうしの相対運動に起因するバネ力で表現する。FEM解析のモデルと得られた結果を図-8に示す。試験片の中央部を対称性を考慮して3角形要素でモデル化し、硬鋼線の位置に梁要素をリンク要素を用いて連結させた。そのバネ定数は、剪断応力方向にたいしては付着強度実験より求められた付着力-すべり関係を用い、また垂直応力方向では無限大のバネ剛性を仮定した。モルタルと硬鋼線近傍の引張方向応力の分布を同図に示すが、両者の境界において大きな歪み集中が発生していることが

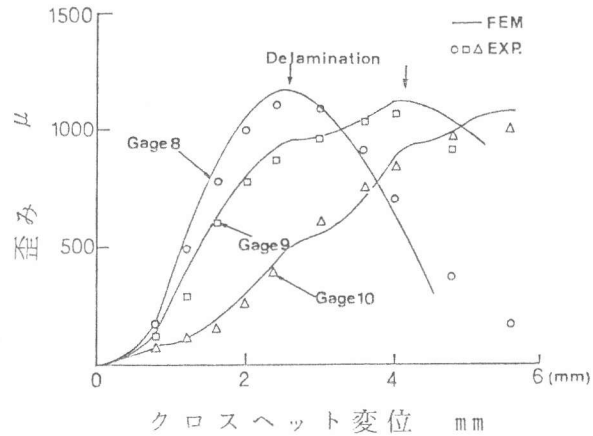


図-9 モルタルの剥離状況

がわかる。応力等高線の間隔は 0.25 kgf/mm^2 である。この歪み集中により剥離が発生するが、剥離の進展を数値解析してみた。剥離進展は、歪み集中による歪み値が最高付着強度を越えたとき、その部位のリンク要素のバネを切断させることによりモデル化している。図-9は硬鋼線の切断部の歪みゲージ(1軸5素子)の出力変化を示しているが、クロスヘッド変位の増大と共に、剥離の進展による歪み減少が発生してゆく様子が認められる。有限要素解析結果は実験結果と非常に良い一致を示している。

5.4 ひび割れ状況

硬鋼線の線径が太いほど、供試体の補強部と試験部との境界の、モルタルと補強硬鋼線の切断部からひび割れが発生しているものが多く見られた。また硬鋼線とモルタルの破断位置の異なる供試体2.0-1-3、5.4-1-3があった。これは先ずモルタルと硬鋼線の剥離が起こり、別々に破壊が進行したものである。硬鋼線の線径が細い2.0mmと3.0mmはモルタルの破断位置と硬鋼線の破断位置とは一致している供試体もあり、モルタルと金網とは同じ位置で破壊していた。表面と裏面とのひび割れの位置、経路はほぼ一致していた。硬鋼線の本数が多いほど、モルタルに伝わる

表-4 ひび割れ発生時の荷重、歪みおよび変位

	鋼/モルタル	ひび割れ発生荷重		ひび割れ発生荷重		最大ひびき		ひび割れ発生ひびき		ひび割れ発生変位		最大変位	
		kgf		/最大荷重		μ		μ		mm		mm	
		おもて	うら	おもて	うら	おもて	うら	おもて	うら	おもて	うら	おもて	うら
2.0-1-3	0.12	460	320	0.64	0.44	3200	4200	2200	2000	0.38	0.18	0.95	0.30
2.0-2-3	0.17	1540	900	0.95	0.62	3400	10000	2600	3900	1.50		1.90	
2.0-3-3	0.24	1070	1300	0.50	0.60	11500	6200	6000	10300	0.30	1.10	0.80	1.35
2.0-4-3	0.31	1500	2250	0.52	0.78	10600	10800	2800	5200	0.30	0.50	0.80	0.90
3.0-1-1	0.20	700	600	0.49	0.42	6000	4700	1400	3400	1.00	0.42	2.90	1.70
3.0-1-3	0.15	600	600	0.40	0.50	5000	3500						
3.0-1-5	0.11	500	600	0.35	0.45	800	7400	400	4400	0.10	0.82	3.90	4.00
3.0-2-3	0.24	2150	1600	0.75	0.56	20000	13000	7000	3000	0.60	0.20	1.30	0.35
3.0-3-3	0.35	2050		0.49		4000	4000	2600	2650	1.00		1.50	
4.5-1-3	0.24	550	550	0.19	0.19	1200	4400	2800	850	0.10	0.20	8.00	7.00
5.4-1-3	0.30	750	750	0.19	0.19	750	12000	3000	1800	0.25	0.10	4.40	4.20

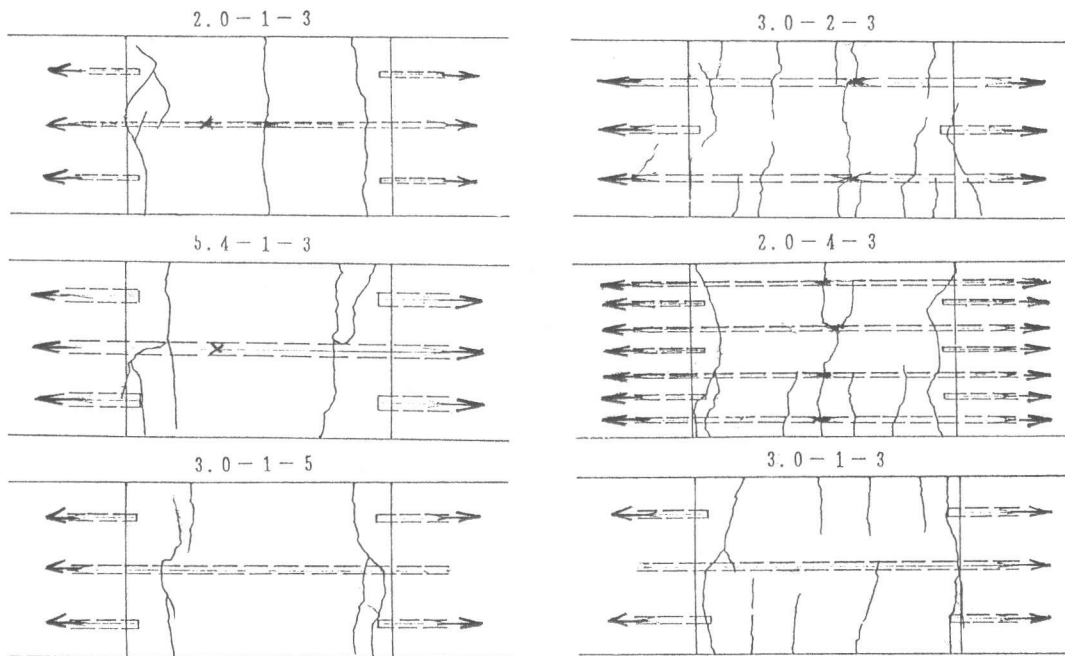


図-10 破断状況のスケッチの1例

応力は分散するために、小さいひび割れが多く発生した。硬鋼線が太いほどひび割れの数は少なく、そのひび割れ幅は比較的大きかった。鋼/モルタルの比が同じ場合（表-4 2.0-3-3, 3.0-2-3, 4.5-1-3）、線径の細い硬鋼線を使用した方が付着に対して有利であり、1本当たりの硬鋼線の付着強度が減少するために、ひび割れは分散し、ひび割れ幅も小さくなった。かぶり厚さが厚いほど、ひび割れの数は少なく、ひび割れ幅は大きくなった。最大荷重に至る前に付着部分ですべりだし、供試体の試験部で破断しないものもあった。これはモルタルのひび割れ性能には影響ないものとして解析した。

供試体の破断状況の1例で破断位置の一致した供試体3.0-2-3, 2.0-4-3一致しない供試体2.0-1-3, 5.4-1-3及び取付部からぬけた供試体3.0-1-5, 3.0-1-3らのスケッチを図-10にそれぞれ示す。

6 結論

新しい工法で製作した船側外板に相当する供試体の引張試験から、得られた結果を要約すると次のようになる。

- (1) 供試体のモルタルは荷重をかける初期の段階で寄与していると思われるが、荷重の増加と共に、硬鋼線とモルタルのずれ（剥離）が起こり、最大荷重近傍では硬鋼線の引張り強度で破断した。硬鋼線の線径が細いほど、モルタルの初期ひび割れ発生荷重は高くなった。
- (2) フェロセメント船に要求されるひび割れ発生荷重を高くするために、硬鋼線の線径を細くした方が有利で、かつひび割れの分散性も良い。
- (3) 歪み分布の最大値が硬鋼線の切断位置で生ずるので、船殻部分に切断位置ができないように、硬鋼線を配置した方がよい。
- (4) 実験より求められた付着強度をもとに、有限要素法で、剥離進展解析を行ったところ、実験値と良い一致が得られた。

参考文献

- 1 北村 茂 他2名;フェロセメントの曲げ試験におけるひび割れ特性の影響、コンクリート論文報告集, Vol. 15, No2, 1993