

報告

[2062] 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

北村 茂\*1 ・佐久間 正明\*2 ・佐藤 忠\*3

1 まえがき

従来のフェロセメント船は数枚の金網を補強材として、これにモルタルを充填し、強度を金網とモルタルでもたせた複合材料である。本報告は小型船舶の外板を対象とし、金網を硬鋼線に置き換え船殻の強度は硬鋼線でもたせ、モルタルは防水と硬鋼線相互の結束の役目を果たす新しい工法である。船殻の外板に相当する供試体を製作し、曲げ試験を実施し硬鋼線の間隔、モルタルのかぶりの厚さを変えて、水密性重視の立場から、ひび割れ性能と強度等について調べた。

2 使用材料及び試験片の種類

溶接金網の線径0.65mmφで網目寸法10mm平方である。硬鋼線は3.5mmφ、2.0mmφの2種類を用いた。3.5mmφの

表-1 硬鋼線、金網の機械的性質

	$\sigma_y$	$\sigma_u$	応力比 $\sigma_y/\sigma_u$	のび率 %
	kgf/mm <sup>2</sup>	kgf/mm <sup>2</sup>		
3.5φ	126.2	154.9	0.81	6.5
2.0φ	155.9	205.5	0.76	4.0
0.65φ 網目 10x10	28.0	43.0	0.65	35.0

表-2 モルタルの配合

W/C	セメント			骨材 シラス	kg/m <sup>3</sup>	
	セメント	コスミック**	セッタ**		水	混和材
0.30	593	148	11	148	LK-50の 水分 185g 調整用 水 37g	LK-50 固形分 185
	752				222	

\*\* 混和材 \*\* 遅延剤

硬鋼線は船殻のストリンガー（縦通材）とし、2.0mmφの硬鋼線はダイヤゴナル（斜め方向縦通材）として、金網はモルタルの付着と成形用として用いた（試作艇では織金網で線径0.2mmφ、網目寸法1.0mm平方）。硬鋼線と金網の素線の強度特性を表-1に示す。

表-3 モルタルの強度

	圧縮強度	圧縮率	弾性係数
	kgf/cm <sup>2</sup>	%	x 10 <sup>4</sup> kgf/cm <sup>2</sup>
モルタル	67	5.6	3.84
モルタル (スチール ファイバー)	106	5.3	4.50

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。モルタルのスランプ（5x10x15cmJ-7）は8mm、吸収率は26.5%であった。モルタルにスチールファイバーを混入した試験片及び試験片表面に耐蝕性、耐候性を示すコーティング剤を塗った試験片を用いてひび割れ防止効果について調べた。モルタルの配合及び強度特性について表-2及び表-3にそれぞれ示す。

3 曲げ試験片の製作

試験片の寸法は図-1に示すように幅63mm、長さ250mmで厚さは10.5mm、12.2mm、14.4mmである。金網の上に3.5mmφの硬鋼線を30mm間隔で2本平行に並べ、その上に2.0mmφの硬鋼線を直交するように梯子状に10、20、30、40mm間隔に並べ0.2mmφの針金で結束した。その骨組みを木枠の中に入れ、

\*1 船舶技術研究所 主任研究官（正会員）

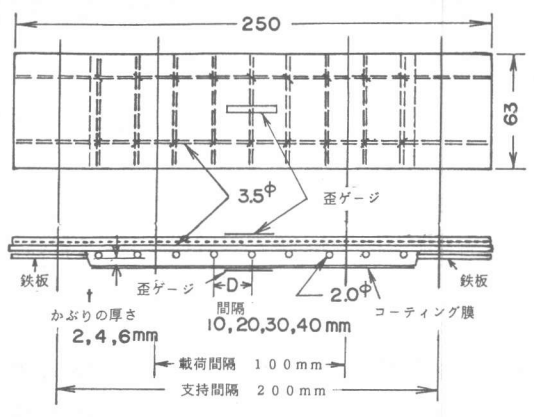
\*2 船舶技術研究所 主任研究官

\*3 ヨット自作家全国集団Yメンズクラブ会員

前述のモルタルを塗り、かぶりの厚さ  $c = 2, 4, 6\text{mm}$  となるように調整した。試験片の支持点のローラが円滑にまわるように、試験片の接触部分に薄い鉄板を取付けた。さらにモルタルにスチールファイバー ( $0.4\text{mm}\phi \times 20\text{mm}$ ) を入れ混入率1.6% (体積百分率) にした試験片及び試験片表面を0.2から0.3mmの厚さにコーティングした試験片を準備し、材令は1週間前後で試験した。

試験片は硬鋼線の間隔を□印、かぶりの厚さ△印の順にmm単位の数字で示し、スチールファイバーを混入した試験片にはF、2種類のコーティング剤を塗った試験片にはE4、E8の記号をかぶり厚さの数字△の後に付けて表示した。

図-1 試験片の形状寸法



#### 4 試験方法

アムスラー試験機を用い、1.0mm/min前後の等速で負荷した。荷重方法は2点荷重とし、ロードセルで荷重を計測し、変位は試験片支持点中央でダイヤルゲージで計測した。ひび割れ強度、撓み、最大荷重及び歪などを求めた。試験片表面のモルタルはひび割れの観察ができるように#300のサンドペーパーで磨き、ゲージ長さ30mmの歪ゲージを試験片中央に長手方向の軸に合わせて表裏面に対称に貼付し、最初のひび割れの発生時期を歪曲線と目視観察とを併用した。

#### 5 試験結果及び考察

##### 5.1 荷重-撓み-歪み曲線

荷重-撓み曲線上にはひび割れ発生開始点  $P_{cr}$ 、弾性比例限を降伏点とし  $P_y$ 、最大荷重点  $P_u$  とした。初期ひび割れの発生は概ね歪ゲージ貼付位置から起こり、ひび割れ発生期間中にひび割れは殆ど発生し、それ以後はそのひび割れの幅を広げながら、最大荷重に達した。最大荷重を過ぎるあたりから荷重点近傍のひび割れ幅が特に大きくなった。ゲージ長さ30mmの歪ゲージ貼付位置にひ

図-2 荷重-撓み-歪みの関係

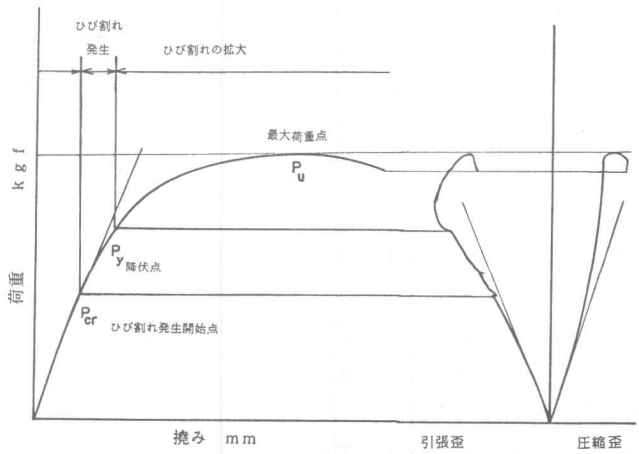
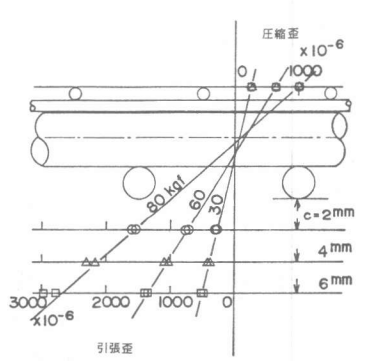


図-3 試験片の表裏の歪みの値



び割れが発生すると引張歪波形は微小な歪の低下を示したが、荷重波形には表れなかった。圧縮歪波形は単調に増加したが、最大荷重をすぎてから急激に増大しはじめた。それらの計測波形の概略を図-2に示す。

かぶり厚さ2、4、6mmの場合、試験片の表裏面の歪の値をプロットし直線で結び縦軸との交点を求めると図-3のようになり、曲げ試験片の中立軸が求められる。中立軸は3.5mmφの硬鋼線の中心線より1.2、1.0、0.3mm下側にきた。荷重が増大すると、中立軸は硬鋼線の中心の方にずれた。

### 5. 2 硬鋼線の間隔とひび割れ強度

モルタルのかぶりの厚さ4mmの場合の硬鋼線の間隔とひび割れ発生及び最大荷重について図-4に示す。初期のひび割れ発生荷重は25から35kgfであった。従来から「ひび割れ発生荷重は金網の種類にかかわらず、主として板厚とモルタルの強度によって決定される」といわれていた[1]。硬鋼線の骨組みにモルタルを塗った試験片(□-4)、モルタルにスチールファイバーを混ぜた試験片(20-4F)、さらに試験片表面をコーティングした試験片(20-4E4)、(20-4E8)の荷重-撓み曲線である。荷重の最大値は(□-4)、(20-4E4)、(20-4F)、(20-4E8)試験片の順に硬鋼線の間隔の狭い試験片ほど大きくなり、コーティングした試験片はさらに大きくなった。(20-4E8)では前者とは異なる挙動を示した。ひび割れ発生荷重は45kgfで1本だけ確認でき、最大荷重でそのひび割れが音をたてて拡大し、荷重が低下した。図中の wire はモルタルを塗っていない硬鋼線の骨組みのみの荷重-撓み曲線である。

### 5. 3 かぶり厚さとひび割れ強度

硬鋼線の配置間隔20mmでモルタルのかぶり厚さ2、4、6mmと変化させた場合について荷重と撓み曲線を図-5に示す。かぶり厚さ2、4、6mmと厚いほど荷重の立上り曲線は緩くなり、最大値は小さくなった。かぶり厚さが厚いほどひび割れ発生部分の変形が大

図-4 荷重と撓み曲線に於ける硬鋼線の間隔とひび割れ強度の関係

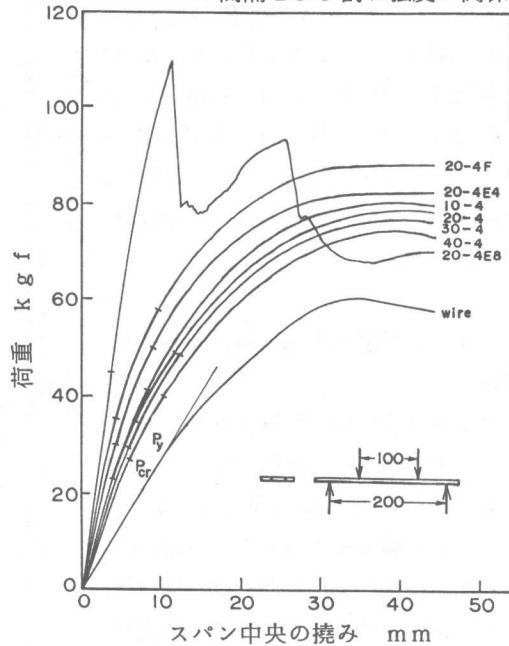
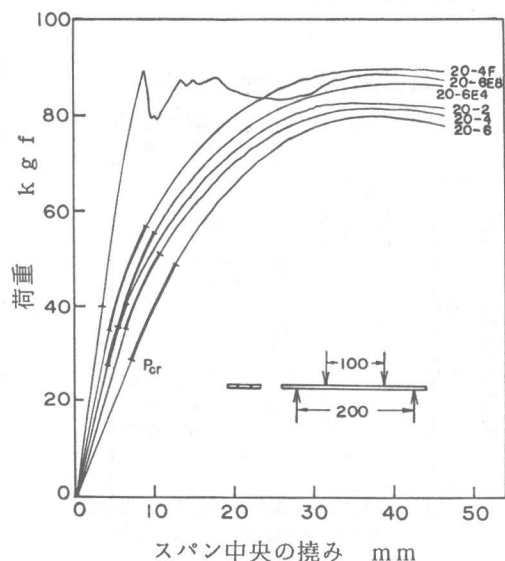


図-5 荷重と撓み曲線に於けるかぶり厚さとひび割れ強度の関係



きくなり、荷重は小さくなった。(20-6E8)では負荷中にひび割れが1本だけ観察され、前述の(20-4E8)と同様に、最大荷重で破断し荷重は低下した。それはコーティング剤の塗膜性能が大きく影響しているものと思われる。

曲げ弾性係数 (E)  $\text{kg/cm}^2$ は

$$E = 0.021W I^3 / \delta I \dots (1)$$

の式で求めた [2]。W; 荷重 (kgf)、l ; スパン間隔 (cm)、 $\delta$ ; たわみ (cm) I ; 硬鋼線の弾性係数  $2.1 \times 10^6 \text{kgf/cm}^2$ と、表-1、3の値を用いて換算した断面二次モーメント ( $\text{cm}^4$ )である。図より求められた曲げ弾性係数は2.1から  $4.1 \times 10^4 \text{kgf/cm}^2$ であった。

#### 5. 4 ひび割れと補強材/モルタルの関係

ひび割れは硬鋼線が配置されているモルタル表面全面わたり発生した。ひび割れの数は載荷点100mm間に発生したひび割れを数えた。補強材とモルタルの比が0.18から0.47の範囲では3.5mmφの硬鋼線2本の曲げ強度に依存するために、補強材とモルタルの比の影響は余り受けなかった。ひび割れ発生荷重と最大荷重との比は0.25から0.67

図-7 初期ひび割れ強度とフェロセメント補強材の比表面積の関係

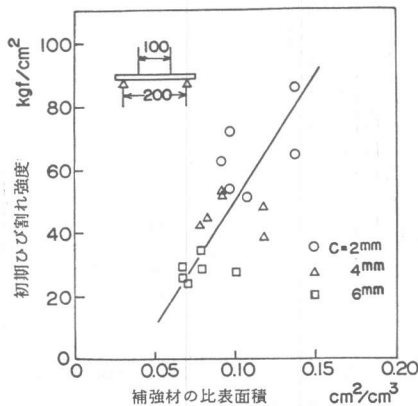


図-6 ひび割れ発生荷重/最大荷重、ひび割れの数と補強材/モルタルの関係

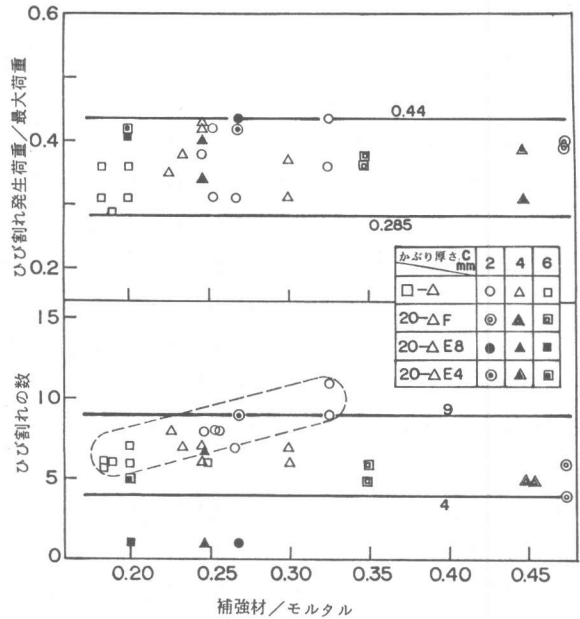
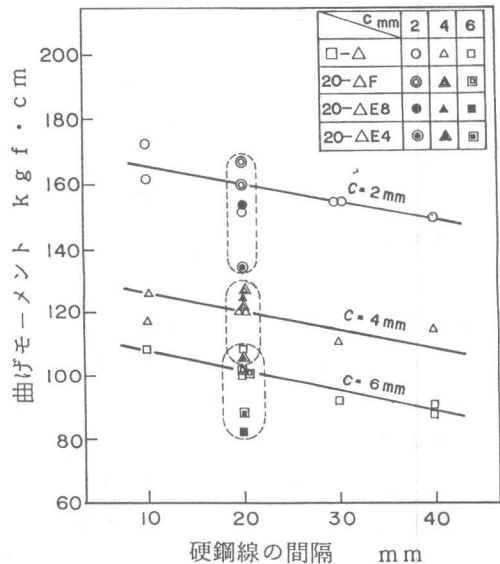


図-8 曲げモーメントと硬鋼線の間隔の関係



であるとの報告もあるが [3]、本実験では0.29から0.44の範囲にあった。ひび割れ発生荷重と最大荷重の比はひび割れ発生荷重は (□-△) では補強材とモルタルの比が大きいほど、かぶりの厚さが薄いほど多くなる傾向になったが、(20-△E8) 以外の (□-△)、(□-△F)、(□-△E4) では、おおよそ4本から9本の範囲にあった。これらの関係を図-6に示す。

除荷後の残留撓みと試験片にかけられた負荷撓みとの比を求めると、いずれの試験片も硬鋼線の曲げ強度の影響を強く受け0.4前後の値となった。

ある限定された範囲内に於いて、初期ひび割れとフェロセメント補強材の比表面積との間には一定の関係があることが示されている。大西らの結果では比表面積 $0.1\text{cm}^2/\text{cm}^3$ に対して初期ひび割れ強度は $20\text{kgf}/\text{cm}^2$ であったが [3]、本実験ではその約4倍の強度であった。それらの関係を図-7に示す。

### 5.5 曲げモーメント

曲げモーメント (M) は次式で計算した。

$$M = \sigma_b \cdot I / y \cdot \dots \dots \dots (2)$$

$\sigma_b$ : 試験片の曲げ強度 ( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ )、 $y$ : 断面図心からの距離 (cm)、ひび割れ発生以後の曲げモーメントは断面二次モーメント I を補正して用いた [4, 5, 6]。かぶり厚さが薄いほど、均等に曲げられるために、曲げモーメントは大きくなった。曲げモーメントと硬鋼線間隔 (D) の関係を求めると硬鋼線の間隔が広がると、曲げモーメントは小さくなり、かぶりの厚さ2mmでは $M_2 = -0.6D + 171$ 、4mmでは $M_4 = -0.6D + 132$ 、6mmでは $M_6 = -0.6D + 114$ の直線で近似でき、(20-△F)、(20-△E4) 及び (20-△E8) はそれらの直線の近傍にきたが、ずれる実験点もあった。これらの関係を図-8に示す。

### 5.6 破壊状況

モルタルの付着強度は図-9に示すように硬鋼線が太いほど滑り剛性は大きくなることを示した [7]。3.5mmφの硬鋼線は $20\text{kgf}/\text{cm}^2$ 、2.0mmφでは $15\text{kgf}/\text{cm}^2$ であった。モルタルの圧縮強度は $67\text{kgf}/\text{cm}^2$ で、

図-9 硬鋼線の太さと付着応力度の関係

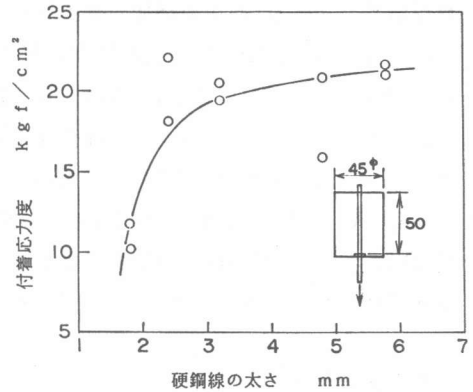


表-4 実験結果の一覧表

試験片	補強材 モルタル	最大荷重 Kgf	ひび割れ発生荷重		ひび割れ の数	曲げモー メント Kgf·cm	弾性係数 Kgf/cm²	残留撓み 負荷撓み
			最大荷重	最大荷重				
10-2	0.33	89	0.44	11 (13)	172	2.3x10 <sup>4</sup>	0.38	
10-2	0.33	84	0.36	9 (13)	162	"	0.38	
20-2	0.27	81	0.31	7 (10)	152	2.3	0.36	
30-2	0.25	80	0.31	8 (11)	155	2.2	0.38	
30-2	0.25	83	0.42	8 (10)	155	"	0.37	
40-2	0.25	80	0.38	8 (12)	150	2.1	0.38	
10-4	0.30	81	0.37	6 (9)	126	2.5	0.31	
10-4	0.30	77	0.31	7 (7)	117	"	0.36	
20-4	0.25	82	0.43	6 (9)	120	2.4	0.36	
20-4	0.25	84	0.42	7 (10)	120	"	0.35	
30-4	0.23	78	0.38	7 (9)	111	2.2	0.36	
40-4	0.23	77	0.35	8 (12)	115	2.1	0.36	
10-6	0.25	88	0.28	6 (8)	109	2.7	0.36	
20-6	0.20	82	0.36	6 (8)	109	2.5	0.40	
20-6	0.20	80	0.31	7 (7)	100	"	0.36	
30-6	0.19	76	0.29	6 (9)	92	2.3	0.34	
40-6	0.18	78	0.36	6 (6)	88	2.1	0.40	
40-6	0.18	80	0.31	6 (7)	91	"	0.35	
20-2F	0.47	86	0.39	4 (6)	167	2.8	0.40	
20-2F	0.47	85	0.40	6 (6)	160	"	0.43	
20-4F	0.45	87	0.31	5 (6)	127	3.0	0.42	
20-4F	0.45	88	0.39	5 (6)	122	"	0.45	
20-6F	0.35	87	0.36	5 (7)	102	3.0	0.43	
20-6F	0.35	88	0.38	4 (5)	101	"	0.44	
20-2E8	0.27	90	0.44	1	153	3.8	0.35	
20-4E8	0.25	112	0.40	1	125	3.8	0.33	
20-6E8	0.20	86	0.41	1	82	4.1	0.33	
20-2E4	0.27	81	0.42	9 (9)	134	3.1	0.40	
20-4E4	0.25	82	0.34	7 (7)	106	3.3	0.41	
20-6E4	0.20	84	0.42	5 (5)	88	3.4	0.42	

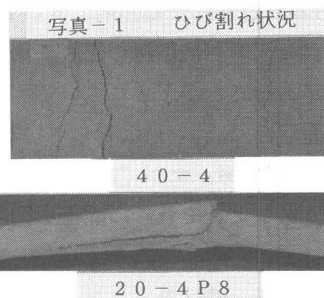
( ) は試験片の支持点間のひび割れ数

圧縮強度より概算した引張強度はその1/10であるとする、 $6.7\text{kgf/cm}^2$ となり、前者の付着強度の値が大きくモルタルと硬鋼線との境界面の剥離より、モルタルからひび割れを起こしやすいことを示す。

ひび割れは試験片の表面から発生し、板厚方向に進展し、硬鋼線の中立軸近傍で折れ曲がり、硬鋼線に添って進展した。表面のひび割れ発生数はかぶり厚さが厚いほど少なくなった。(20-△F)はひび割れの数は(□-△)より幾分少なかった。表面のひび割れに対応する位置の圧縮側の金網に塗り込んだモルタルが太い帯状に突出した。

(20-△E4)ではコーティング膜の下層のモルタルからひび割れが起り、荷重の増加と共にコーティング膜が破れた。(20-△E8)ではひび割れ拡大時期に成長せず、最大荷重でモルタルとコーティング膜とが同時に破れ、ひび割れが板厚方向に進展し、モルタルと硬鋼線と金網とが剥離した。それらの破壊状況の一例を写真-1に示す。

前述のひび割れ状況も(20-△E8)以外はモルタルからひび割れが入り、硬鋼線との剥離はなかった。硬鋼線相互の結束が境界面に作用する剪断応力度を増大させたものと思われる。以上、得られた結果をまとめて表-4に示す。



## 6 あとがき

数枚の金網をモルタルで補強した従来のフェロセメントは重くて、ひび割れが発生しやすく、かつ衝撃に対する強度は充分でない。補強材を硬鋼線に置き換えた新しい工法で製作した曲げ試験で得られた結果を要約すると次の通りである。

(1) 荷重と撓み曲線でひび割れが発生しない領域、ひび割れの発生領域及びひび割れの成長領域とに区別された。

(2) かぶり厚さが薄く、硬鋼線の間隔が狭いほどひび割れ発生は分散性が良い。

(3) 最大荷重に於ける曲げモーメントは硬鋼線の間隔とモルタルのかぶり厚さに依存し一次関数で表示できた。

(4) 試験片の表面をコーティングすることによってひび割れを防止する効果の顕著なものがあった。

(5) ラテックス系のモルタルは硬鋼線相互の結束の役目を十分に果たした。スチールファイバーはひび割れ発生を防止する効果は余り顕著でなかった。

## 参考文献

- 1) 西岡思郎、高羽 登；フェロメントについて、セメント・コンクリート、NO. 350(1976)
- 2) 中野錦一、岡田幸三；フェロメント用モルタルの配合試験、セ技年報、昭和52
- 3) 大西 寛；鋼とコンクリートの新しい組合せ、コンクリート工学、VOL. 17、NO. 7 (1979)
- 4) 村田二郎、中村憲治、南 亮；フェロメントに関する基礎実験、セメント・コンクリート、NO. 374(1978)
- 5) 小柳 治、大野定俊；高張力鋼で補強された高強度コンクリートはりとラジコンクリートはりの挙動について、セ技年報、33 昭和54
- 6) 鈴木計夫、大野義照、佐田裕之；プレストレスト鉄筋コンクリートはりの曲げひびわれ性状に関する研究、セ技年報、34 昭和55
- 7) 角徹三；コンクリートと鋼材の協力、コンクリート工学、VOL. 17、NO7 (1979)