

高 Mn 非磁性 PC 鋼棒の諸特性について

坪 野 秀 良*
西 村 強*
山 岡 幸 男*
山 下 茂 喜*

1. 緒 言

最近の大型新技術開発は、核融合、超伝導送電、MHD 発電、磁気浮上列車など超磁場技術を用いるものも多く、周囲の構造物が強磁性体であると、磁気に乱れが生じ装置本体の効率低下が懸念されるため非磁性材料が要求され、新鋼種の開発も盛んに行われている^{1)~5)}。

ところで我々は以前に「耐食性 PC 鋼材の諸特性」としてステンレス PC 鋼線について報告し⁶⁾、その中で磁性も鋼の 1/100 ほどに小さく非磁性としての用途も考えられることを示したが、今回、さらに磁性の低い PC 鋼棒を開発したので、以前のステンレス鋼線⁶⁾や通常用いられている高炭素鋼棒と比較して特性を報告する。

2. 供 試 材

表-1 に、用いた供試材の化学成分を示す。

表-1 化学成分 (wt%)

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
高 Mn 非磁性鋼棒	0.70	0.75	14.50	0.025	0.005	—	*
ステンレス PC 鋼線	0.084	0.48	0.77	0.034	0.020	8.58	19.10
高炭素鋼棒	0.73	0.30	0.70	0.020	0.020	—	—

* 数%添加されている。

今回開発した非磁性鋼棒は 14.5% の Mn を含んでいる。ステンレス PC 鋼線は前報⁶⁾と同じ成分である。

表-2 は供試材の機械的性質である。高 Mn 鋼は JIS B 種、高炭素鋼棒は C 種級の強度レベルである。高 Mn 鋼は伸びが 22% と高い。以上の供試材について以下に示す種々の特性を調べた。

表-2 機械的性質

	線径 (mm)	降伏強さ		引張強さ		伸び (%)	絞り (%)	ヤング 率 (kg/mm ²)
		(kg)	(kg/mm ²)	(kg)	(kg/mm ²)			
高 Mn 非磁性鋼棒	9.2	7200	108	8320	125	22	30	18200
ステンレス PC 鋼線	4.0	2150	171	2260	180	2.5	50	16000
高炭素鋼棒	11.0	11500	122	12700	135	10	35	20900

* 神鋼鋼線工業(株) 研究開発部

3. 試験条件

3.1 引張試験

インストロン型引張試験機を用い標点距離 100 mm、引張速度 10 mm/分で -150°C~600°C までの引張特性を求めた。

3.2 レラクセーション試験

自動追尾式試験機を用い、実引張強さの 70% の初荷重で 250°C までの温度について 10 hr のレラクセーション値を求めた。高温の試験は熱風循環式の間接加熱とし、±1°C に制御した。

3.3 疲労試験

容量 50 ton の引張疲労試験機を用いて 500 サイクル/分の繰返し速度で破断回数を求め、高 Mn 非磁性鋼棒と高炭素鋼棒を比較した。応力条件は JIS G 3109 「PC 鋼棒」に示されている規格引張強さの 60% を下限応力とし(高 Mn 鋼は 66 kg/mm²、高炭素鋼棒は 75 kg/mm²)、応力幅を 10, 20 kg/mm² とした。

3.4 透磁率

一般にステンレス鋼や高 Mn 鋼は焼鈍し状態では透磁率は 1.0 であり、非磁性であるが、加工を受けると磁性が上昇する傾向がある。そこで供試材に種々の加工を与え、透磁率を測定することによって非磁性の程度を比較した。測定は 200 エルステッドの磁場をもつソレノイド中に試験片を挿入し、ソレノイドの磁場を逆転させたときのガルバノメータの振れの読みから式(1)を用いて透磁率 μ を計算した。

$$\mu = 1 + 0.98 \times \frac{T}{A} \dots\dots\dots(1)$$

ここに、

μ : 透磁率

T : ガルバノメータの読み (mm)

A : 試験片断面積 (mm²)

3.5 X 線回折

供試材によって磁性の程度が相違する原因を明確にするため、60% 加工材の X 線回折を行い、加工による磁

性上昇の原因を調べた。回折条件は電圧 40 kV, 電流 20 mA, ターゲット CoK α , 走査速度 1 度/分である。

3.6 熱膨張係数の測定

コンクリートに埋設されている鋼材は熱膨張が問題となる場合があるので, ダイアルゲージ式測定器により RT~100°C までの平均の熱膨張係数を求めた。

3.7 応力腐食試験

PC 部材では応力腐食特性は重要な特性と考えられており, 応力腐食に敏感な材料は使用が制限されることになる。そこで 表-2 の供試材について実引張強さの 70% の応力を負荷し破断時間を求めた。高 Mn 非磁性鋼棒については通常高炭素鋼棒などに用いられている 20% NH₄NO₃ 水溶液 (80°C) 以外にオーステナイト系ステンレス鋼での応力腐食試験液である 42% MgCl₂ 水溶液 (140°C) も併用し破断状況を観察した。

3.8 腐食試験

一般的な錆やすさを調べるため 5% NaCl+1% H₂SO₄

水溶液中での腐食減量を求め, 全面腐食の程度を比較した。

4. 実験結果

4.1 金属組織

写真-1 に供試材の金属組織を示す。高 Mn 非磁性鋼棒は降伏強さや引張強さを調整するため弱加工を受けた組織になっている。高炭素鋼棒はパーライト, ステンレス PC 鋼線は強加工を受けたファイバー状オーステナイト組織である。

4.2 機械的性質, レラクセーション特性

図-1 に -150~600°C までの引張特性値の変化を示す。引張強さは低温域で上昇し, 高温域では低下する。結晶構造がオーステナイトである高 Mn 鋼やステンレス PC 鋼線では 300°C 付近で引張強さの低下率が停滞するが, パーライト組織の高炭素鋼棒では 150°C に停滞がみられ, 結晶構造の違いによる差がみられるようである。



高Mn非磁性鋼棒

50 μ



高炭素鋼棒

50 μ



ステンレスPC鋼線

25 μ

写真-1 供試材の金属組織

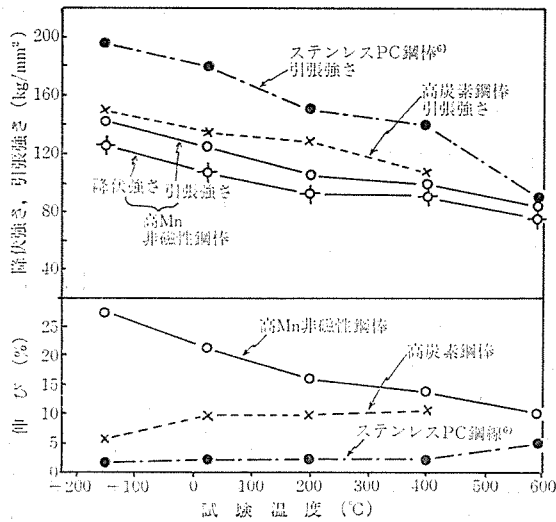


図-1 引張特性

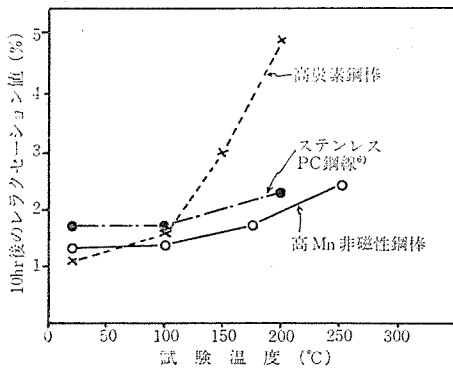


図-2 レラクセーション特性

高 Mn 非磁性鋼棒の伸びは大きいという特徴も認められる。

図-2 はレラクセーション特性である。室温では高炭素鋼棒のレラクセーション値は小さいが、オーステナイト組織である高 Mn 鋼、ステンレス鋼は温度に対する依存性が小さいため 200°C では高炭素鋼棒の 40% 程度の小さい値を示すという特徴がみられる。

図-3 は高 Mn 鋼非磁性鋼棒と高炭素鋼棒の S-N 曲線である。高 Mn 鋼の場合、M10 転造ねじ定着では高炭素鋼棒に比べて疲労強度は劣るが、ボタンヘッド定着によりかなり向上し、両端を樹脂定着にすると高炭素鋼棒並の疲労強度が得られることがわかる。普通、結晶構造がオーステナイトのものはフェライトの高炭素鋼の材料に比して疲労特性は劣ると言われているが、その原因を調べてみたものが 図-4 である。図-4 (b) は低ひずみ域での応力-ひずみ関係で、高 Mn 鋼は高炭素鋼棒より低応力域から線図が曲がり始めており、塑性変形が起りやすいことを表わしている。したがって疲労に対しても高炭素鋼棒は弾性疲労を起こしているのに対して高

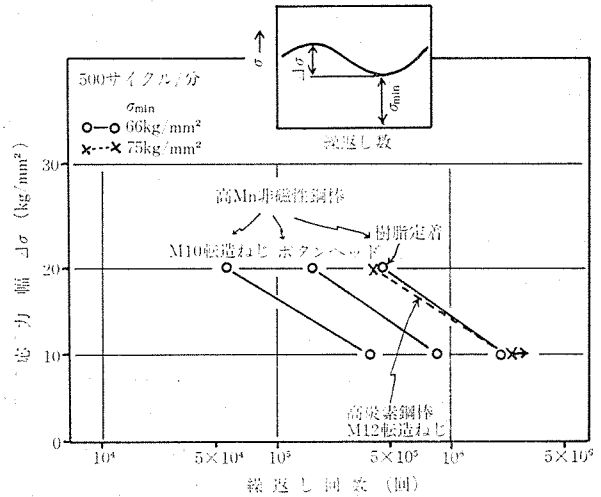


図-3 高 Mn 非磁性鋼棒と高炭素鋼棒の S-N 曲線

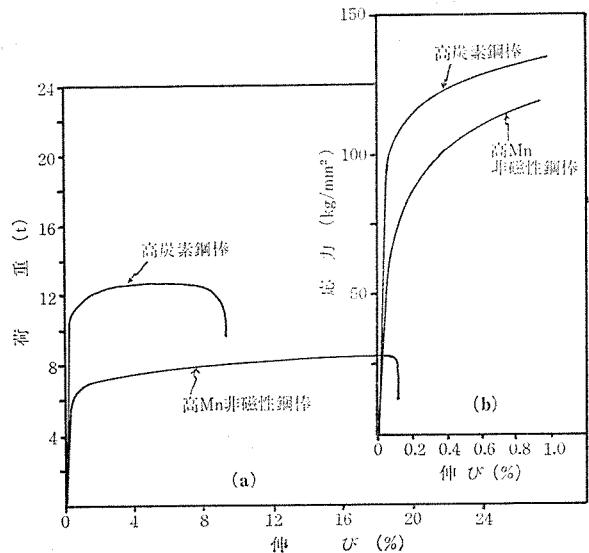


図-4 高 Mn 非磁性鋼棒と高炭素鋼棒の応力-ひずみ曲線

Mn 非磁性鋼棒は一種の塑性疲労試験を行っていることになり、疲労強度が低くなる一原因と考えられる。

4.3 透磁率

図-5 に透磁率の測定結果を示す。高 Mn 非磁性鋼は加工によってもほとんど磁性は増加せず、磁性に対して非常に安定な材料であることが明白である。文献²⁾によると、非磁性であるという範囲は透磁率 1.5 以下と言われており、高 Mn 鋼棒は完全に非磁性ということが出来る。図-6 はこの原因を探るために行った X 線回折の結果である。図より明らかなごとくステンレス PC 鋼線加工によって磁性が増えるのは強磁性相の (110) α' マルテンサイトが生成されるためであり、これに反して高 Mn 非磁性鋼棒では (10・0) や (10・1) の非磁性 α マルテンサイトは出現するが強磁性マルテンサイトは出現せず、したがって非磁性材料として取扱いできることに

ンクリート中で実用化されているという報告もあり⁸⁾、この程度の膨張係数の差は問題ではないと考えられる。

4.5 応力腐食, 全面腐食特性

表-4 に応力腐食試験での破断時間を示す。

表-4 応力腐食特性

	試験液	試験温度	負荷応力	破断時間 (hr)
高 Mn 非磁性鋼棒	20% NH ₄ NO ₃	80°C	実引張強さ×0.7	8.5
	42% MgCl ₂	140°C	"	45.7
ステンレス PC 鋼線	"	"	"	0.4
高炭素鋼棒	20% NH ₄ NO ₃	80°C	"	5.0

NH₄NO₃ 溶液中では、高 Mn 非磁性鋼棒は現状の高炭素鋼棒と同程度の破断時間を示し、実用上問題はないと考えられる。また、オーステナイト系ステンレス鋼の応力腐食テストで多用されている MgCl₂ 溶液中では高 Mn 鋼はステンレス鋼線よりかなり破断時間が長く、本鋼種は塩化物応力腐食割れに対しても特に敏感ということでもないようである。なお MgCl₂ 中ではステンレス PC 鋼線は短時間で破断するが、本テストはあくまで促進試験であり、前報⁶⁾ で述べたごとく、3% NaCl 水溶液中で3年間も割れは起こっておらず(現在7年間)、強加工したステンレス PC 鋼線も実用上、室温では応力腐食は生じないとして取り扱うことが可能である。

写真-2 は応力腐食試験によって生じたクラックの伝播経路を示したものである。NH₄NO₃ 溶液中では高 Mn 非磁性鋼はオーステナイト粒界割れであり、高炭素鋼棒はブロック粒界(注: パーライト組織の中でフェライトの結晶方位が同一の領域をブロックと言う)で割れている。一方、MgCl₂ の塩化物溶液中では高 Mn 非磁性鋼棒、ステンレス PC 鋼線ともに特に組織との明白な対応はみとめられないようである。

図-7 は一般的な発錆の程度に比例すると考えられる

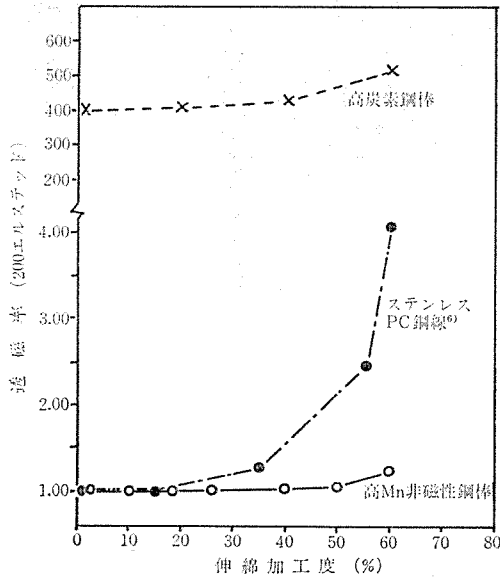


図-5 加工度と透磁率の関係

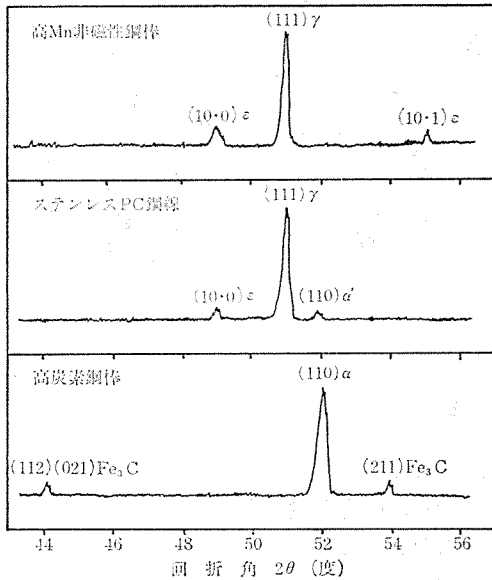


図-6 X線回折図形(60%加工材)

なる。高炭素鋼棒が磁性に対して非常に敏感なことは図-5 より明らかである(透磁率は400~500)。

4.4 熱膨張係数

表-3 に結果を示す。

表-3 熱膨張係数 α

	α RT~100°C (×10 ⁻⁶ /°C)
高 Mn 非磁性鋼棒	16.0
ステンレス PC 鋼線	18.5
高炭素鋼棒	12.1

高 Mn 非磁性鋼棒はコンクリートの膨張係数⁷⁾ 10×10⁻⁶/°C に比べて大きい値であるが、この鋼種と同類の高 Mn 鋼はすでに国鉄の磁気浮上列車用鉄筋としてコ

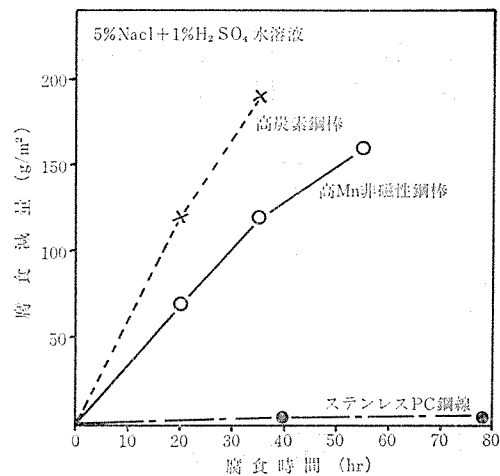
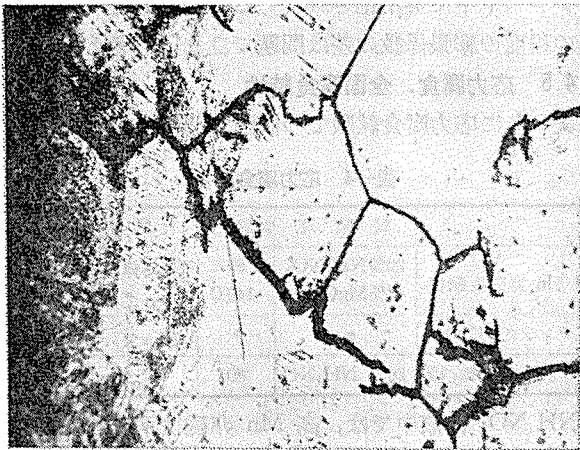
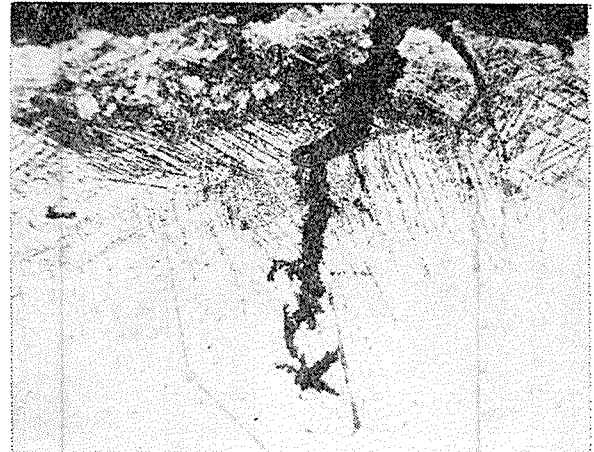


図-7 全面腐食特性



高Mn非磁性鋼棒
20% NH₄NO₃

50μ



高Mn非磁性鋼棒
42% MgCl₂

50μ



ステンレスPC鋼線
42% MgCl₂

200μ



高炭素鋼棒
20% NH₄NO₃

25μ

写真-2 応力腐食割れの伝播状況

全面腐食特性の比較である。高 Mn 非磁性鋼棒は現用の高炭素鋼棒より少し優れているが、ステンレス PC 鋼線と比べて特に高耐食材料ということではない。

5. あとがき

上述のごとく、現用高炭素鋼棒と同一の強度レベルを有し、しかも完全非磁性材として取り扱うことができる

PC 鋼棒の諸特性が明らかとなった。レラクセーション特性、熱膨張、応力腐食、発錆性等には実用上特に問題は見当たらない。疲労については、オーステナイト鋼特有の性質が現われ、低い値であるが、定着部の改良により現用高炭素鋼棒に匹敵する特性を得ることができた。

現在、表-5 に示すように、JIS G 3109 に規定された A, B, C 種の強度レベルの鋼棒の製造が可能となっている。

表-5 高 Mn 非磁性鋼棒の標準特性

強度 レベル	降伏強さ		引張強さ		伸び (%)	レラクセーション 値 (%) 10hr	透磁率 (200Oe)
	(kg)	(kg/mm ²)	(kg)	(kg/mm ²)			
9.2mm	A種	≥ 5320	≥ 80	≥ 6310	≥ 95	≥15	≤1.10
	B種	≥ 6310	≥ 95	≥ 7310	≥110	≥10	
	C種	≥ 7310	≥110	≥ 8310	≥125	≥ 5	
11.0mm	A種	≥ 7600	≥ 80	≥ 9030	≥ 95	≥15	≤1.10
	B種	≥ 9030	≥ 95	≥10450	≥110	≥10	
	C種	≥10450	≥110	≥11880	≥125	≥ 5	
13mm	A種	≥10620	≥ 80	≥12600	≥ 95	≥15	≤1.5
	B種	≥12600	≥ 95	≥14600	≥110	≥10	

参 考 文 献

- 1) 加藤, 石田他: 電気製鋼, 49-2 (1978), p. 91
- 2) 沢: 日本金属学会会報, 18-8 (1979), p. 573
- 3) 日下: 特殊鋼, 9 (1960), p. 56
- 4) 大野, 加藤他: 住友金属, 30 (1978), p. 189
- 5) 大内, 高坂: 鉄と鋼, 65 (1979), p. S374
- 6) 川端, 山岡: プレストレストコンクリート, 18-2 (1976) p. 44
- 7) 土木学会: コンクリート標準示方書 (昭和49年度)p. 21
- 8) 日刊金属特報新聞, 昭和 55.8.16

【昭和 55 年 12 月 5 日受付】