

## (56) ステンレス系YUS130M鋼非磁性、高耐食PC鋼線の特性について

鈴木金属工業(株) 正会員○市原哲也  
 新日本製鐵(株) 鉄鋼研究所 天藤雅之  
 鈴木金属工業(株) 正会員 石栗利宏  
 同上 小森英樹

### 1. はじめに

超電導リニアモーターカー用構造物への非磁性材料の適用に伴い、PC鋼線も非磁性化への研究開発が進められている。プレストレストコンクリートにおけるPC鋼線の特性として非磁性又は高耐食を必要とするPC構造物に対し、低炭素型高強度ステンレス鋼YUS130M鋼によるPC鋼線を開発した。従来非磁性鋼としては高Mn鋼が一般的に知られているが、YUS130M鋼はPC鋼線用としてCr等の合金元素を添加することにより、耐遅れ破壊(応力腐食割れ)特性をより向上させた画期的な新しい鋼種である。YUS130M鋼及びYUS130M鋼PC鋼線の諸特性について報告する。

### 2. YUS130M鋼の化学成分及び物理的性質

YUS130M鋼の化学成分を表1に、物理的性質を表2に示す。金属組織は写真1に示す通り均一なオーステナイト組織である。

表1 化学成分(規格値)

鋼種記号	化 学 成 分 (%)							
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	N
YUS130M	0.07 ~ 0.10	≤1.00	9.00 ~ 10.0	≤0.030	≤0.030	5.00 ~ 6.00	17.0 ~ 19.0	0.20 ~ 0.35

表2 物理的性質

電気抵抗 $\mu\Omega\cdot\text{cm}$	熱膨張係数 $\times 10^{-6}/\text{C}$	熱伝導係数 $\text{cal}/\text{cm}\cdot\text{sec}\cdot\text{C}$	比重 $\text{gr}/\text{cm}^3$	比熱 $\text{cal}/\text{g}\cdot\text{C}$	縦弾性係数 $\text{kN}/\text{mm}^2$
77.0	15.8	0.03	7.77	0.1	166

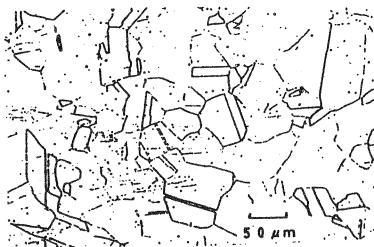


写真1 金属組織(固溶熱処理後)

### 3. YUS130M鋼の磁氣的性質

磁氣的性質として伸線加工率と透磁率の関係を図1に示す。ステンレス鋼の代表鋼種SUS304は伸線加工を受けることにより著しく透磁率が上昇するがYUS130M鋼はPC鋼線レベルの大きな伸線加工率70%以上受けても透磁率は1.005以下で非磁性鋼として非常に安定している。

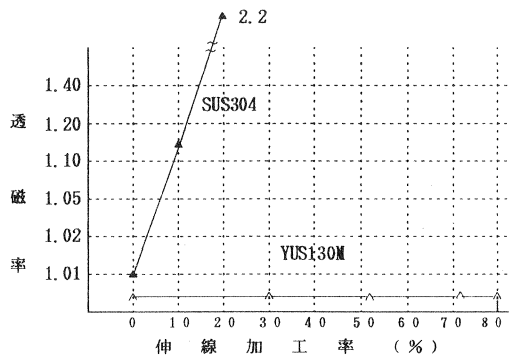


図1 伸線加工率と透磁率

4. YUS130M鋼の耐食性及び耐遅れ破壊(応力腐食割れ)特性

YUS130M鋼をPC鋼線に適用するに際し、JIS G 3536に規定されているPC鋼線製造方法に準じ、線材を熱処理後高強度に伸線加工しその後ブルーイング処理したものを供試材として、各種腐食試験により耐食性及び耐遅れ破壊(応力腐食割れ)特性を調査した。

4-1 供試材

YUS130M鋼を評価するためSUS304、高炭素鋼を比較材とし、供試材の化学成分及び機械的性質を表3に示す。

表3 腐食試験供試材の化学成分及び機械的性質

鋼種	化学成分(%)								実線径 mm	0.2%引張強さ N/mm <sup>2</sup>	引張強さ N/mm <sup>2</sup>	伸び %
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	N				
YUS130M	0.08	0.51	9.17	0.024	<0.001	5.46	17.62	0.275	5.014	1471	1778	3.5
SUS304	0.07	0.40	1.26	0.025	0.005	8.45	18.35	—	5.013	1176	1422	5.0
高炭素鋼	0.77	0.23	0.75	0.020	0.007	—	—	—	5.013	1603	1770	7.0

4-2 試験内容及び方法

腐食試験の内容は次の通り3種類行い、その試験条件を表4、5、6に示す。

- 塩水噴霧試験: JIS Z 2371による。
- 定荷重遅れ破壊試験: 高力ボルトJIS原案法による。
- SSRT(低ひずみ速度引張)試験

表4 塩水噴霧試験条件

試験液	0.5%NaCl + 0.2%H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>
温度	35°C
時間	200時間

4-3 試験結果

1) 塩水噴霧試験

表4の試験条件にて実施した結果、表7に示す通り200時間経過しても、両供試材とも錆の発生は認められず、耐食性に関しては、YUS130M鋼はSUS304と同程度の耐食性を有している。

2) 定荷重遅れ破壊試験

表5の試験条件にて実施した結果、表8に示す通り、高炭素鋼は平均40時間で破断したのに対しYUS130M鋼は200時間越えても未破断であった。

表5 定荷重試験条件

促進液条件	塩酸溶液(PH2) 室温	
試験片	ノッチ付試験片(K <sub>t</sub> =4)	
負荷荷重	引張荷重の70%	
試験時間	200時間	

表6 SSRT試験条件

試験機	東伸工業製卓上ミニSSRT試験機
試験片	平行部長さ20mm、平行部直径2mmφ、平滑試験片
試験液	人工海水、純水、シリコン油
試験温度	90°C、大気開放
保持電位	自然、-800~-1500mV(Ag/AgCl電極)
引張速度	加力速度 2×10 <sup>-3</sup> mm/min → ε̇ = 10 <sup>-6</sup> S <sup>-1</sup>

表7 塩水噴霧試験結果

鋼種	200時間後の発錆
YUS130M	なし
SUS304	なし

表8 定荷重試験結果

鋼種	破断時間
YUS130M	未破断 (>200h)
高炭素鋼	28h 52h

3) SSRT (低ひずみ速度引張) 試験

応力腐食割れ (APC型) 感受性及び水素による遅れ破壊 (HE型) 感受性を評価するために表6に示す条件でSSRT試験を行った。70℃純水中及び90℃人工海水での自然浸漬試験と人工海水中での試験片をカソード側に電位を保持した試験を行った。

(1) 自然浸漬試験

油中での破断全伸び (破断時間) を基準に各環境下での破断伸びの相対比較を図2に示す。YUS130M鋼はいずれの環境下でも伸びの低下は認められず、本試験範囲内では腐食も認められなかった。一方高炭素鋼も伸びの低下は認められなかったが、試験中に全面的に発錆した。

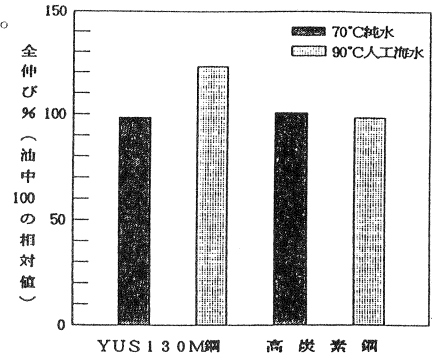


図2 自然浸漬試験での破断伸び比較

(2) 定電位 (カソードチャージ) 試験

- YUS130M鋼及び高炭素鋼を人工海水中、-1.5Vの定電位で水素チャージしながら求めた応力-ひずみ曲線を図3、4に示す。YUS130M鋼では自然浸漬時と変化は認められないが、高炭素鋼では水素の影響で伸びが低下する。
- 図5に破断伸びと保持電位の関係を示す。YUS130M鋼では-1.5Vまで伸びの低下は認められない。伸線加工中にマルテンサイト相が生じるSUS304は-1.5Vで伸びの低下が生じる。
- -1.5Vでカソード分極した試験片の破面を写真2に示す。YUS130M鋼はいずれの電位においても破面形態に変化ないが、高炭素鋼ではカソード側に分極することにより脆性的な破面形態へと変化した。

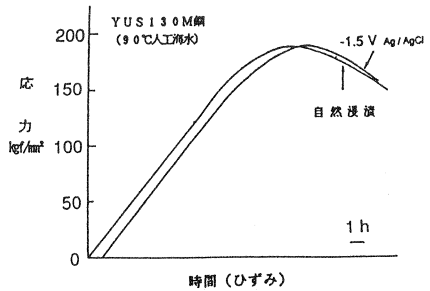


図3 YUS130M鋼応力-ひずみ曲線に及ぼす付加電位の影響

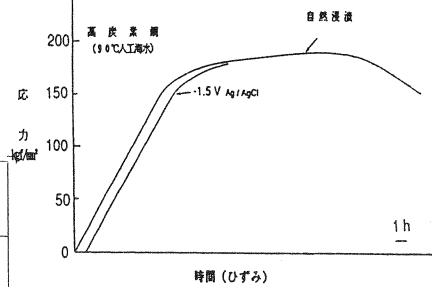


図4 高炭素鋼応力-ひずみ曲線に及ぼす付加電位の影響

保持電位	YUS130M鋼	高炭素鋼
自然浸漬		
-1.5V		

写真2 SSRT試験片の破面形態

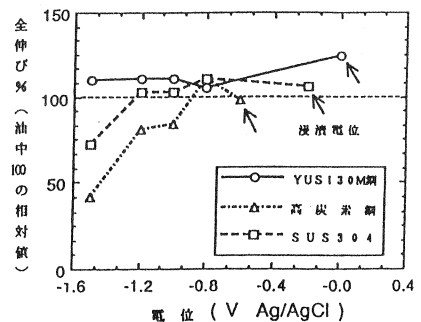


図5 破断伸びと保持電位の関係

5. YUS130M鋼PC鋼線の仕様

YUS130M鋼PC鋼線の標準仕様は次の通りである。

1) 鋼種及び化学成分

鋼種及び化学成分は表1による。

2) 線の種類、呼び名、機械的性質

YUS130M鋼PC鋼線の標準仕様として表9に示す。

3) 寸法及び許容差

寸法及び許容差はJIS G 3536 に準ずる。

4) 透磁率

透磁率は $\mu = 1.01$ 以下とする。

5) 縦弾性係数

縦弾性係数は $166 \text{ kN/mm}^2$ を標準とする。

6) リラクゼーション

常温(20°C)にて規格値の0.2%永久伸びに対する荷重の80%をかけ、10時間後のリラクゼーション値は、3.0%以下とする。

表9 YUS130M鋼PC鋼線の標準仕様

種類	呼び名 (mm)	断面積 (mm <sup>2</sup> )	引張強さ (N/mm <sup>2</sup> )	引張荷重 (≥KN)	0.2%永久伸び に対する荷重 (≥KN)	伸び (≥%)
単線	5.0	19.64	1500	29.4	25.7	4.0
	7.0	38.48	1420	53.8	47.0	4.5
	8.0	50.27	1370	66.8	57.9	4.5
	9.0	63.62	1320	83.9	72.5	4.5
2・3本 より線	2.9×2	13.21	1700	22.6	19.8	3.5
	2.9×3	19.82	1700	33.4	29.8	3.5
7本 より線	9.3	51.61	1630	84.3	71.6	3.5
	10.8	69.68	1600	112	95.1	3.5
	12.4	92.90	1580	147	125	3.5
	15.2	138.7	1510	208	176	3.5

6. YUS130M 鋼PC鋼より線の引張疲労特性試験

YUS130M鋼PC鋼より線の疲労特性を調査するため、高炭素鋼一般PC鋼より線を比較材として引張疲労試験を行った。

6-1 供試材

引張疲労試験用供試材を表10に示す。

YUS130M鋼PC鋼より線はJIS G 3536 SWPR7A 12.4mm 相当の引張荷重に合わせるため実線径を太径化した。

6-2 試験条件

試験条件は次の通りである。

1) 試験機：油圧パルセータ型引張疲労試験機

2) 試験荷重：  
下限荷重を規格引張荷重の60%とする。

3) 振動数： 6.7 Hz

6-3 試験結果

引張疲労試験結果を図6のS-N曲線にて示す。

表10 引張疲労試験供試材

鋼種	引張特性 線径 mm	引張荷重 kN (kgf)	0.2% 耐力 kN (kgf)	縦弾性係数 kN/mm <sup>2</sup> (kgf/mm <sup>2</sup> )	伸び %	ワット %
YUS130M鋼より線	12.88	162.4 (16,600)	150.3 (15,300)	162.2 (16,500)	5.5	1.7
一般PC鋼より線 (SWPR7A)	12.43	168.7 (17,200)	152.0 (15,500)	191.2 (19,500)	7.2	0.4

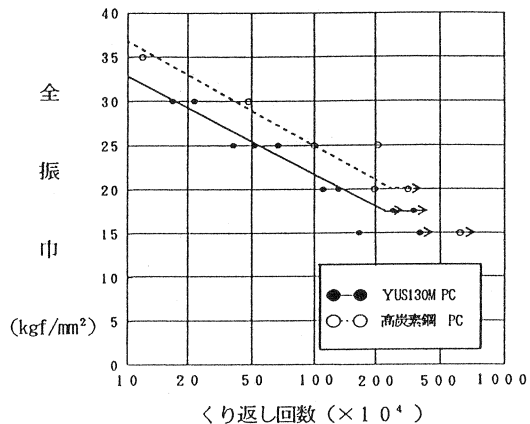


図6 引張疲労特性

7. YUS130M鋼PC鋼より線のコンクリート付着特性試験

YUS130M鋼PC鋼より線のコンクリート付着伝達長さを、プレテンション方式によるコンクリート表面ひずみ分布より測定し、あわせて緊張材のすべり込み量を測定した。

7-1 供試材

供試材は表11に示す通り、比較材として高炭素鋼一般PC鋼より線を用いた。

7-2 試験方法

1) 試験体及び緊張方法

供試材緊張反力受として鋼製ベットにより、図7に示す装置で行った。

試験条件は次の通りである。

○ 試験体寸法

100 × 100 × 2500

○ 緊張荷重

11,410kgf (0.7Pu)

表11 コンクリート付着試験供試材

鋼種	引張特性 線径 mm	引張荷重 kN (kgf)	0.2% 耐力 kN (kgf)	縦弾性係数 kN/mm <sup>2</sup> (kgf/mm <sup>2</sup> )	伸び %	リフト %
YUS130M鋼より線	12.88	162.4 (16,600)	150.3 (15,300)	162.2 (16,500)	5.5	1.7
一般PC鋼より線	12.73	194.2 (19,800)	178.6 (18,200)	191.2 (19,500)	7.2	0.4

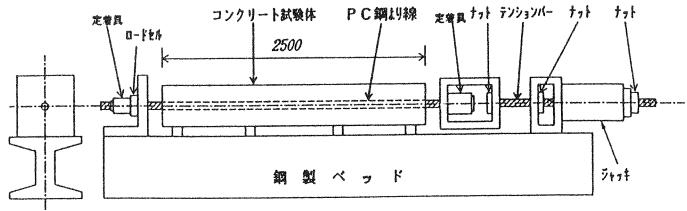


図7 コンクリート試験体及び緊張装置

2) ひずみゲージ貼付位置と

供試材すべり込み量測定位置  
コンクリート試験体に貼付けたひずみゲージ (粒エステルゲージ、 $\ell: 20\text{mm}$ ) の位置 (両側面貼付)、及び緊張側における供試材のすべり込み量測定のための変位計位置を図8に示す。

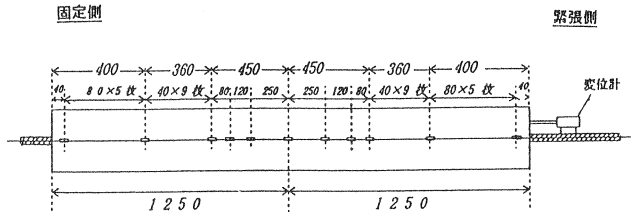


図8 ひずみゲージ位置とすべり込み量測定位置

3) コンクリート試験体製作

コンクリートの配合比及びコンクリート強度試験結果を表12に示す。プレストレス導入はコンクリート強度 $350\text{kgf/cm}^2$ 以上の材令7日で行った。

表12 コンクリート配合比及び強度試験結果

水/砂 %	粗骨材率 %	単位量 $\text{kg/m}^3$				材令7日(導入時) 圧縮強度 ヤング係数 圧縮強度 $419\text{kgf/cm}^2$ ヤング係数 $3.5 \times 10^4 \text{kgf/cm}^2$
		水	砂	細骨材	粗骨材	
46	43	155	337	775	1064	

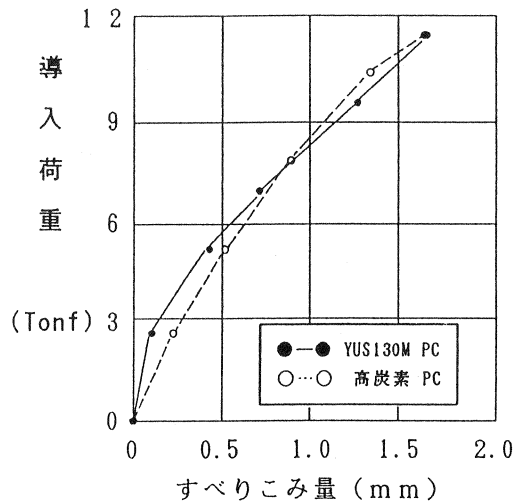


図9 試験体へのすべり込み量

7-3 試験結果

(1)プレストレス導入時における供試材のコンクリート試験体へのすべり込み量の変化を図9に示す。両供試材とも最終すべり込み量は1.6mmであった。

(2)プレストレス導入時のコンクリート試験体のひずみ分布を導入開始から最終導入にいたるまで5段階に分け、その測定値を図10、図11に示す。

図10、図11のプレストレス導入後のコンクリートひずみ理論値は次式より求めた。

$$\varepsilon = \frac{P_i}{E \cdot A} \begin{cases} P_i : \text{プレストレス導入力} \\ E : \text{コンクリートヤング係数} \\ A : \text{コンクリート断面積} \end{cases}$$

(3)コンクリート付着伝達長は図10、図11よりYUS130M鋼PC鋼より線が700mm 高炭素鋼PC鋼より線が600mmであった。

8. まとめ

低炭素型高強度ステンレス鋼YUS130M鋼について、PC鋼線としての諸特性を調査した結果、つぎのことが判った。

- (1)PC鋼線レベルに高強度化しても透磁率は1.003と極めて低磁性である。
- (2)合金元素Cr等を添加することにより、耐食性が向上し、ステンレス代表鋼種SUS304と同等の高耐食材となった。各種腐食試験を行った結果、耐応力腐食割れ(APC型)に優れ、又水素による遅れ破壊(HE型)感受性も小さいことが確認された。
- (3)引張疲労特性は高炭素鋼一般PC鋼線に比較し若干疲労限が低いが実用上問題ないと考える。
- (4)コンクリート付着性については、今回の試験結果より付着伝達長は高炭素鋼一般PC鋼線に比較し若干長い値が得られたが、実用上問題ない付着伝達長であると考えられる。

以上YUS130M鋼PC鋼線は、特性的に非磁性、高耐食性を有し、さらにはほぼJIS G 3536 A種相当の機械的性質が得られる。定着具、接続具、緊張装置関係も一般PC鋼線用がそのまま使用でき、今後超電導リニアモーターカー用構造物、海洋構造物への適用が期待される。

謝辞

YUS130M鋼PC鋼線の開発に当たり(財)鉄道総合技術研究所涌井研究室殿に多大なるご指導、ご助言を頂きましたことを付記し、深く感謝を申し上げます。

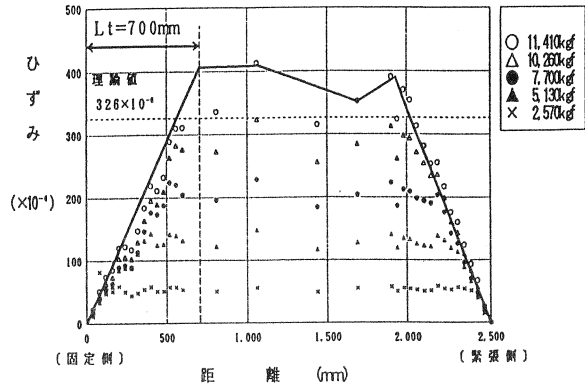


図10 YUS130MPC鋼より線プレストレス導入でのひずみ分布及び付着伝達(Lt)

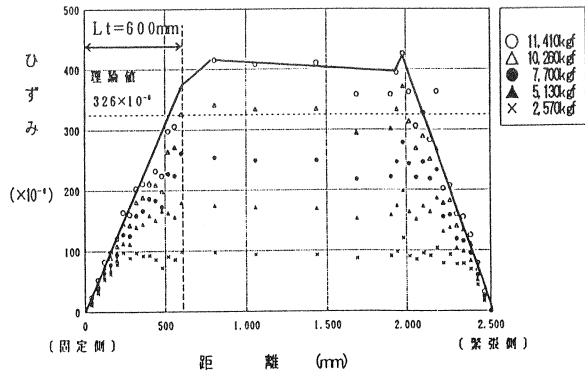


図11 高炭素鋼一般PC鋼より線プレストレス導入でのひずみ分布及び付着伝達(Lt)