

非磁性PC鋼より線の開発

大石 幸広^{*1}・村井 照幸^{*2}・三上 泰治^{*3}・西村 良文^{*4}・木戸 俊朗^{*5}

1. 緒 言

超電導磁気浮上式鉄道や核融合装置などの極めて強い磁場を利用する施設は、今後ますます増加することが予想される。このような施設の構造物は、強磁場の環境下におかれるため、構造部材中の磁性材料には、時間的に変動する磁場によって渦電流やループ電流などの誘導電流が誘起され、エネルギー損失が生じる^{1),2)}。そのような理由から、これらの構造物には非磁性材料が必要とされている。また、このような構造物には優れた耐荷性、耐久性および破壊や破損に対する安全性も要求され、プレストレストコンクリート製のものが最適と考えられており、構造材料として非磁性のプレストレストコンクリート鋼材の開発が強く要求されている。今回著者らは、超電導磁気浮上式鉄道等に使用されるPC鋼より線を念頭におき、非磁性PC鋼より線を開発を行った。

従来、非磁性鋼材としては、一般に高Mn系オーステナイト鋼およびNi-Cr系オーステナイトステンレス鋼が知られている。ところが、前者は安定なオーステナイト組織を有し磁氣的に安定な低透磁率が得られ、比較的安価であるというメリットがある反面、Mnを多く含有するためPC鋼材として重要な遅れ破壊特性において、環境脆化しやすいという大きな問題がある。一方、後者は代表的なSUS 304を例にとれば、耐食性に優れるというメリットはあるが、PC鋼材に必要とされる強度および伸びが得られず、また伸線加工などの塑性加工によってマルテンサイトが誘起され易いため安定した低透磁率が得られず、十分な強度と非磁性とが両立しない³⁾という問題がある。

著者らは、このNi-Cr系オーステナイトステンレス鋼をベースとして、加工、熱処理方法の検討により、従来抱えていた磁気特性および引張特性における問題点を解決し、安定した低透磁率、PC鋼材として使用できる強度、靱性、リラクゼーション特性および優れた遅れ破

壊特性を有する非磁性PC鋼より線を開発したので以下に報告する。

2. 開発目標

本鋼材の開発にあたっては、PC鋼材すなわちPC鋼線、またはPC鋼棒として使用することができ、さらに非磁性であることを目標とした。具体的には、前述のように超電導磁気浮上式鉄道等への適用を考え、以下に示すような4つの項目に対して目標の設定を行った。

1) 磁气的特性

伸線加工による塑性変形を与えた後に、透磁率が1.01以下(未加工のSUS 304同等)であること。

2) 引張特性およびリラクゼーション特性

引張荷重が160 kN以上、伸びが3.5%以上、およびリラクゼーションが1000時間で8.0%以下であること。

(この引張荷重、伸びおよびリラクゼーションは、JIS G 3536-1994 SWPR7ANの規格に相当する)

3) 遅れ破壊特性

従来の高炭素鋼PC鋼材と同等、もしくはそれより優れた特性を示すこと。

4) コンクリート付着特性

従来の高炭素鋼PC鋼材と同等、もしくはそれより優れた特性を示すこと。

3. 化学成分

試作した開発鋼の化学成分を表-1に示す。オーステナイト組織を安定化させることにより、伸線加工などの塑性変形に伴う誘起マルテンサイトの発生を抑制し、低

表-1 開発鋼の化学成分

(wt%)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	N
0.11	0.29	1.7	0.03	<0.001	11.9	18.3	0.22

*1 Yukihiro OHISHI : 住友電気工業(株) 伊丹研究所無機材料研究部

*2 Teruyuki MURAI : 住友電気工業(株) 特殊線事業部精密ワイヤー部 課長

*3 Yasuharu MIKAMI : 住友電気工業(株) 特殊線事業部 主幹

*4 Yoshihumi NISHIMURA : 住友電気工業(株) 特殊線事業部 PC部 部長補佐

*5 Toshiro KIDO : 住友電気工業(株) 特殊線事業部 PC部

◇研究報告◇

透磁率を達成することを期待して、Ni および Cr をそれぞれ 12 % および 18 % 含有した Ni-Cr 系オーステナイトステンレス鋼を選択した。また、Mn は多量に含有すると耐応力腐食割れ特性を悪化させることから、2 % 未満とした。

表-1 の成分を有する開発鋼を溶製し、熱間圧延により直径 8.75 mmφ の線材を得た後、溶体化処理を行い以下に述べる特性の評価を行った。

4. 加工特性

4.1 伸線加工硬化特性

開発鋼の圧延材に対し、加工度（伸線加工における断面減少率）60 % までの伸線加工を行った。そのときの加工硬化曲線を図-1 に示す。加工度が上昇するに伴って強度は向上するが、伸びが低下し、加工度が 60 % に達すると目標値を下まわる。したがって、伸線加工度は 60 % までとし、目標とする強度に対しては後述する時効特性との組合せにより達成することを考えた。そこで時効特性および遅れ破壊特性の評価には 56.5 % の伸線加工材を使用した。

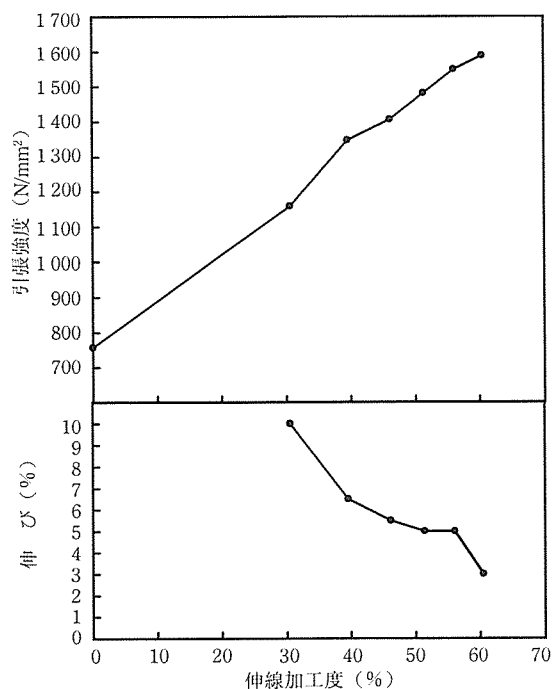


図-1 開発鋼の加工硬化曲線

4.2 磁気特性

図-2 に伸線加工度と透磁率の関係を示す。比較材として、オーステナイト系ステンレス SUS 304 の透磁率を同時に示す。SUS 304 は加工度が増加するに伴って、透磁率が著しく増大する。これは、塑性加工により加工誘起マルテンサイトが生成され磁性をもつためである³⁾。一方、開発鋼はオーステナイト組織が非常に安定

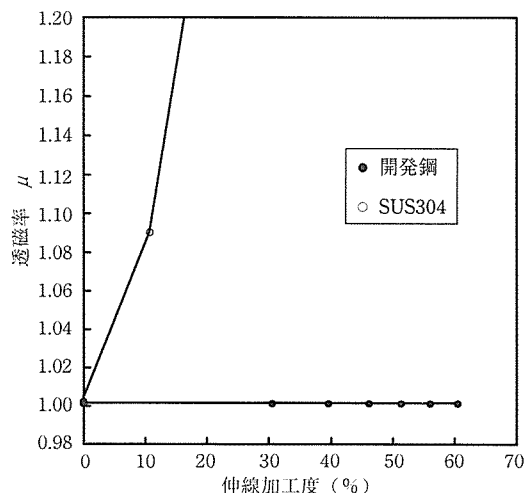


図-2 加工度による透磁率の変化

しており、加工度の増加による透磁率の変化はほとんどなく、60 % までの加工をほどこしても 1.001 の低透磁率を保持しており、目標とする透磁率 1.01 以下を十分に満足している。

5. 時効特性

図-1 に示した加工度 56.5 % で伸線加工を行った線材を、200℃から 600℃の間の温度域で 15 分間加熱し、冷却後室温にて引張特性を評価した。この結果を図-3 に示す。

350℃以上の温度域で引張強度は大きく向上し、500℃から 600℃の間でさらに向上する。これは、2 種の現象によって強度が向上していると考えられる。前者はその

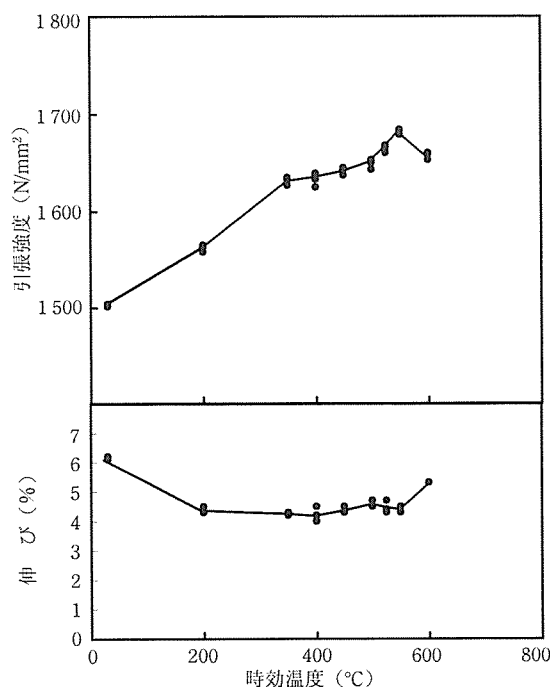


図-3 引張特性に及ぼす時効温度の影響

温度域から考えて C による歪み時効であると考えられる。また、後者は微細な Cr 炭化物の析出により強度が上昇しているものと考えている。また、600℃以上に加熱すると、塑性加工によって与えられた歪みの解放が生じ強度が低下するものと考えられる。

一方、伸びは 350℃から 600℃までの強度が向上する温度域では、加熱温度に依存せず同程度の値を示すが、600℃の加熱では伸びの回復が認められる。これは、前述のように加工歪みの解放現象のあらわれと考えられる。

以上のことより、本開発材を 500℃から 600℃で時効することによって、高強度、高靱性の非磁性鋼線が得られることが明らかとなった。具体的には、引張強度 1 685 N/mm²、伸び 5.0 % を達成し、目標とする引張特性を大きく上まわった。

6. 遅れ破壊特性

PC 部材の製造工程も含め長年の使用期間において緊張負荷状態下での腐食に対する耐久性を明らかにするため、定荷重遅れ破壊試験、SSRT (低歪み速度引張試験) を行った。評価は、従来の高炭素鋼と比較することによって開発した開発鋼の遅れ破壊に対する健全性を調べた。

6.1 定荷重遅れ破壊試験

供試材の化学成分および引張特性を表-2 に示す。開発鋼に加え比較材として高炭素鋼線 (JIS SWRS 82 A)

表-2 供試材化学成分と引張特性

	化 学 成 分 (wt%)							引 張 特 性	
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	引張強度 (N/mm ²)	伸び (%)
開発鋼	0.11	0.29	1.7	0.03	<0.001	11.9	18.3	1 685	5.0
高炭素鋼	0.82	0.18	0.54	0.01	0.01	-	-	1 681	7.0

表-3 定荷重遅れ破壊試験の試験条件

試 験 液	試 験 A	試 験 B
		NH ₄ SCN (20 % 水溶液)
試 験 温 度	50℃	室 温
試 験 片	丸 線	丸 線
負 荷 荷 重	引張荷重の 70 %	引張荷重の 80 %
試 験 時 間	最大 120 時間まで	最大 120 時間まで

表-4 定荷重遅れ破壊試験結果

	破 断 時 間 (h)	
	試 験 A (NH ₄ SCN 水溶液)	試 験 B (HCl 水溶液)
開 発 鋼	未 破 断 >135 h, >134 h, >125 h	未 破 断 >160 h, >134 h
高 炭 素 鋼	81 h, 70 h	44 h, 51 h, 51 h

を用いた。2 種の供試材は同程度の引張強度を示している。表-3 に試験条件を示すが、NH₄SCN 水溶液および HCl 水溶液の 2 種類の腐食液を用い、試験は最大 120 時間まで行った。

表-4 に結果を示すが、NH₄SCN 水溶液では、高炭素鋼が 70~81 時間で破断したのに対し、開発鋼は 120 時間以上経過しても破断していない。また、HCl 水溶液においても高炭素鋼が 44~51 時間で破断したのに対し、開発鋼は 120 時間以上経過しても破断していない。このことから、開発鋼である非磁性鋼は従来の高炭素鋼よりも優れた遅れ破壊特性を有していることがわかる。

6.2 SSRT (低歪み速度引張試験)

供試材として表-2 に示した開発鋼線および高炭素鋼線を用いた。表-5 に試験条件を示すが、シリコンオイル中での試験を非腐食環境下における基準とした。それに対し、人工海水中での試験結果を対比することにより遅れ破壊特性を評価した。また、水素による遅れ破壊感受性を評価するため、人工海水中において試験片をカソード側に電位を保持した試験も行った。

表-5 SSRT の試験条件

試 験 液	シリコンオイル	人 工 海 水
試 験 温 度	90℃	
歪 み 速 度	1×10 ⁻⁵ /s	
保 持 電 位	-	自然, -1.5 V
試 験 片	平行部長さ 20 mm, 平行部直径 2.5 mmφ	

図-4 に自然浸漬における人工海水中での最大応力値および破断時間 (伸び) を、シリコンオイル中での値を基準とした割合で示す。開発鋼は、人工海水中における最大応力の低下が高炭素鋼より小さく、破断時間 (伸び) の低下は認められないことから、優れた遅れ破壊特性を示すことがわかる。

また、図-5 に試験片の電位をカソード側にチャージ (-1.5 V) した際の最大応力値および破断時間 (伸び)

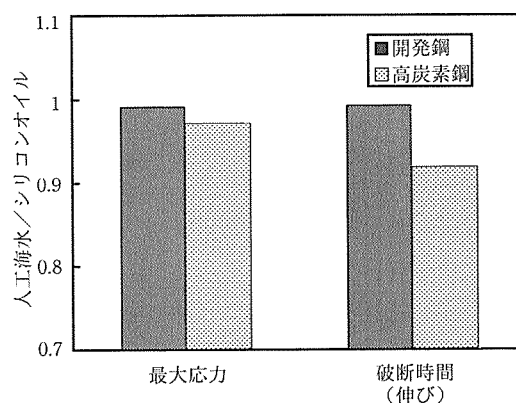


図-4 人工海水中での SSRT における最大応力および破断時間 (伸び) の比較

◇研究報告◇

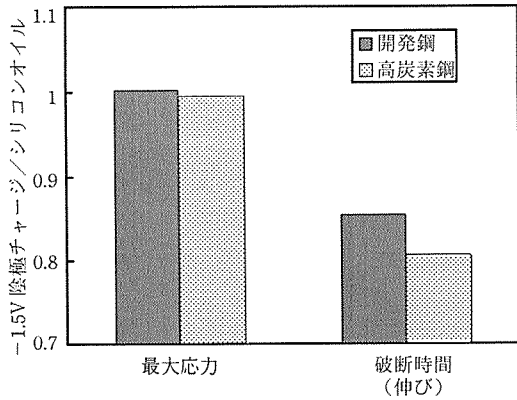


図-5 陰極チャージした SSRT における最大応力および破断時間 (伸び) の比較

を、シリコンオイル中での値を基準とした割合で示す。開発鋼は、陰極チャージした際の最大応力値および破断時間 (伸び) の低下が、高炭素鋼より小さく、優れた遅れ破壊特性を示すことがわかる。

また、図-6 に開発鋼および高炭素鋼の各環境下での応力-時間 (歪み) 曲線を示す。開発鋼は高炭素鋼と比較して、どの環境下においても、最大応力値を示した後の伸びが大きいことがわかる。試験片をカソード側にチャージ (-1.5 V) した高炭素鋼では、最大応力値に達した後ほとんど伸びることなく破断に至っており、明らかな脆化現象が認められる。

写真-1 および写真-2 に開発鋼および高炭素鋼のシリ

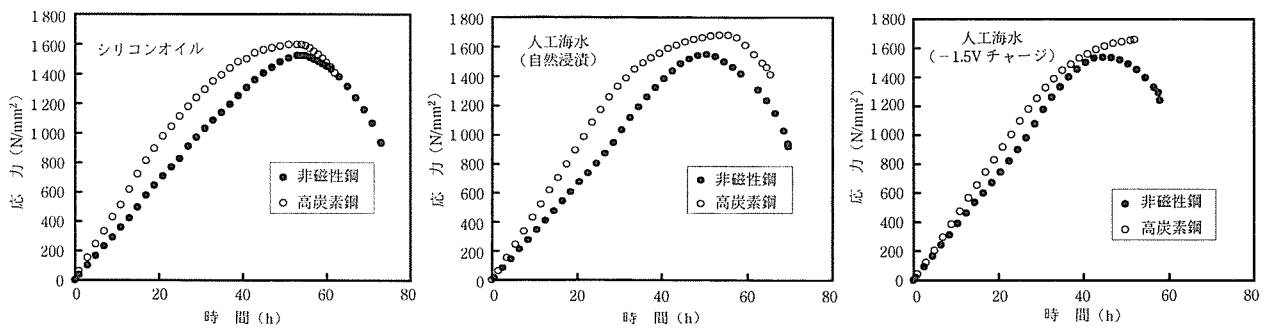


図-6 応力-時間 (歪み) 特性

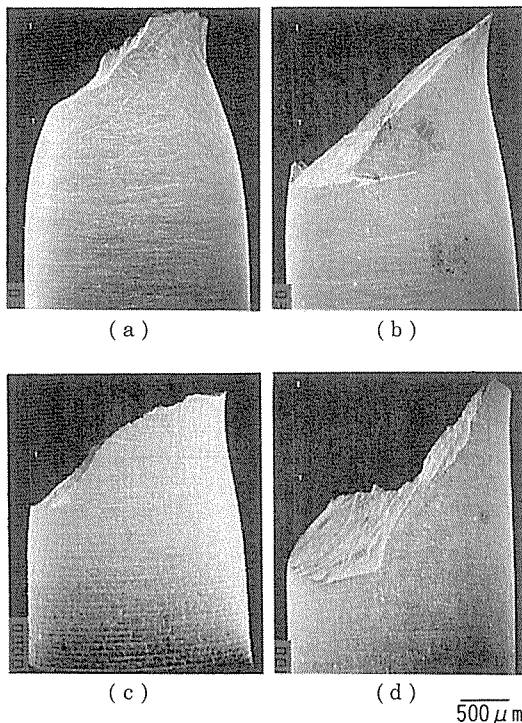


写真-1 SSRT 試験における破断部近傍の状況
サンプルおよび試験環境は以下のとおり
(a) 開発鋼; シリコンオイル中破断
(b) 開発鋼; -1.5 V チャージ
(c) 高炭素鋼; シリコンオイル中破断
(d) 高炭素鋼; -1.5 V チャージ

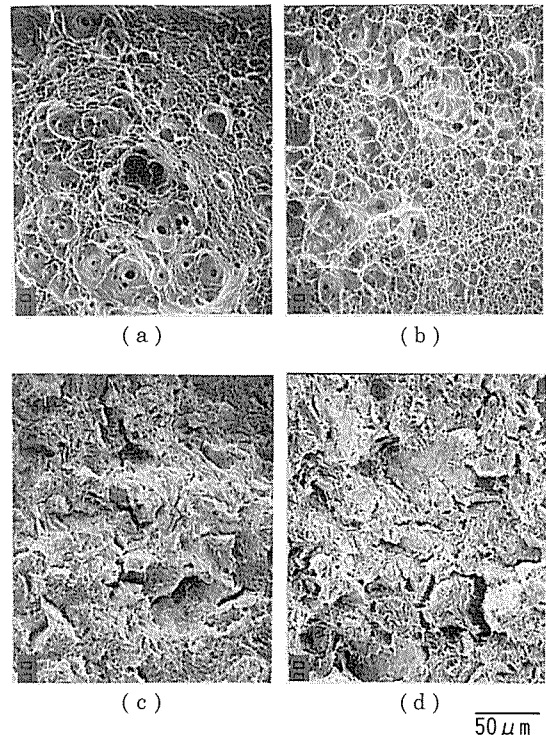


写真-2 SSRT 試験における破断面
サンプルおよび試験環境は以下のとおり
(a) 開発鋼; シリコンオイル中破断
(b) 開発鋼; -1.5 V チャージ
(c) 高炭素鋼; シリコンオイル中破断
(d) 高炭素鋼; -1.5 V チャージ

コンオイル中および-1.5 V カソード側にチャージした試験片の破断部近傍の状況と破断面を示す。開発鋼は、どの環境下においても高炭素鋼より絞りが大きく、また延性のあるディンプル状の破面を示している。開発鋼、高炭素鋼ともに人工海水中で電位を付加することによって絞り値が低下しているが、その低下の割合は高炭素鋼の方が大きい。

以上のことから、SSRT 試験においても開発鋼は高炭素鋼より優れた遅れ破壊特性を示すことがわかる。

7. より線の引張特性およびリラクセーション特性

表-1 に示す成分の開発鋼を用い、より線を試作し、その機械的特性を評価した。線径は引張荷重 160 kN 以上を確保するため、若干太径化し 12.7 mm とした。評価結果を表-6 に示す。

今回開発した非磁性 PC 鋼より線は、引張荷重、伸びおよびリラクセーションのすべての機械的特性において、目標値を満たしており PC 鋼より線として十分使用に耐えうるものである。

また、開発鋼に対して以下に述べるような蒸気養生試験を行った。負荷荷重 112 kN とし蒸気により 75°C に加熱し 24 時間保持したが破断は認められず、試験後のサンプルの機械的特性においても試験前との変化はみられなかった。

8. コンクリート付着特性

プレテンション方式によるコンクリート表面歪み分布の測定から、開発した非磁性 PC 鋼より線のコンクリート付着伝達長さを調査した。これと同時に PC 鋼より線の滑り込み量を調査した。

供試材は表-7 に示す引張特性を有する非磁性 PC 鋼より線に加え、比較材として 12.4 mm の高炭素鋼 PC 鋼より線を用いた。

試験条件を表-8 に示すが、コンクリート表面歪み分

布はコンクリート試験体の両側面に貼付した歪みゲージを用いてプレストレス導入直後に測定した。また、PC 鋼より線の滑り込み量は緊張側および固定側の PC 鋼より線に固定した変位計を用いて、プレストレス導入直後の変位計固定位置とコンクリート端面の距離の変化を測定することにより調査した。

図-7 にプレストレス導入直後の開発鋼および高炭素

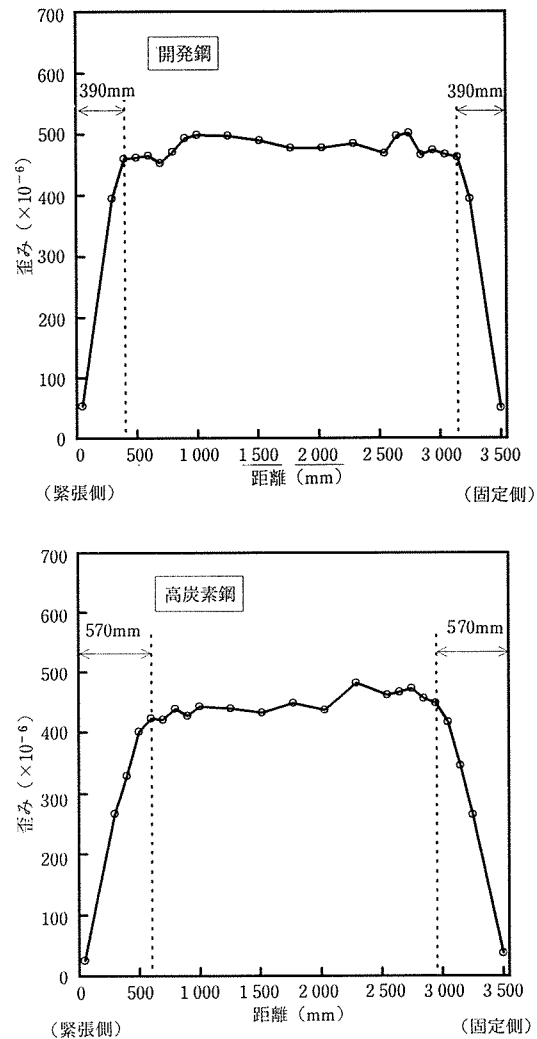


図-7 歪み分布

表-6 開発鋼の引張特性およびリラクセーション特性

項目 供試材	線径 (mm)	引張荷重 (kN)	引張強さ (N/mm ²)	0.2% 永久伸びに 対する荷重 (kN)	0.2% 永久伸びに 対する耐力 (N/mm ²)	伸び (%)	弾性係数 (kN/mm ²)	リラクセーション (1 000 時間後) (%)
7 本より線	12.7	163	1 650	150	1 520	4.0	175	2.0
JIS G 3536-1994 SWPR7AN	12.4	≥160	-	≥136	-	≥3.5	-	≤8.0

表-7 供試材の引張特性

	線径 (mm)	引張荷重 (kN)	0.2% 永久伸びに 対する荷重 (kN)	伸び (%)	弾性係数 (kN/mm ²)
開発鋼	12.7	163	150	4.0	175
高炭素鋼	12.4	167	153	6.6	192

表-8 コンクリート付着試験の試験条件

コンクリート試験体形状	100×100×3 550 mm
コンクリート圧縮強度	403 kgf/cm ²
緊張荷重	112 kN ($P_{ti} \times 0.7$)

◇研究報告◇

鋼の歪み分布を示す。コンクリート付着伝達長は開発鋼が390 mmであり、高炭素鋼が570 mmであった。

また、除荷後の供試材端部の移動量は開発鋼で1.16 mmであり、高炭素鋼で1.73 mmであった。

以上のことから開発鋼は、通常の高炭素鋼PC鋼より線と同等以上のコンクリート付着性を示すことがわかる。

9. 考 察

前述の遅れ破壊試験の結果から、今回の開発鋼が従来の高炭素鋼と比較して、優れた遅れ破壊特性を有することが明らかとなったが、その機構に関し水素脆性の観点から調査した。

図-8は、NH₄SCN 溶液中で定荷重遅れ破壊試験を行った際、81時間で破断した高炭素鋼および同じく81時間で破断していない開発鋼の試験片に含有される水素量の測定を行った結果である。

測定方法は、昇温速度80℃/minでサンプルを加熱し放出される水素を検出する方法である。昇温中に水素を検出した時は昇温を停止し温度を保持する。この検出方法により、材料中での水素のトラップのされ方の違いがわかる。すなわち、低温で検出される水素ほど弱いトラップサイトにトラップされた水素であり、検出温度によってそのトラップの強弱の比較が可能である。昇温速度にもよるが、400 K から 500 K で検出される水素は、室温で移動可能な水素であり遅れ破壊、すなわち水素脆性に寄与するといわれている^{4)~6)}。また、図-8において検出水素量は相対的な水素量を示しており、全水素量は不活性ガス融解-熱伝導度法により測定した。

図-8をみてわかるように、開発鋼は試験の前後で含有する水素量は変化していない。すなわち水素を取り込み難い材料であることがわかる。また、検出されている温度域が、941 K から 978 K の間の高温域であり、含有している水素が室温では容易に移動できないことを示唆している。

一方、通常の高炭素鋼では、試験前は0.1 ppm以下とほとんど水素を含まないが、試験後(破断後)では6.1 ppmと大幅に増加している。すなわち多量に水素を取り込んでいる。また、取り込まれた水素は、514 K および 737 K で検出されており、低温側(514 K)で検出された水素は室温でも十分に移動可能な水素であり、水素脆性を引き起こす主因となるものと考えられる。

以上のことから、開発鋼は高炭素鋼と比較して水素を取り込み難く、またたとえ水素が内部に存在しても、非常に強いトラップサイトに捕獲されており、水素脆性に寄与しないことがわかる。これらの理由から、開発鋼は高炭素鋼より水素脆化を生じにくい材料であると考えられる。

10. 結 言

強磁場を利用する施設、特に超電導磁気浮上式鉄道のガイドウェイに使用することを念頭に置き、Ni-Cr系オーステナイトステンレス鋼をベースに非磁性PC鋼より線の開発を行い、以下に示す結果を得た。

- 1) 本鋼材は0.1 C-12 Ni-18 Cr系のオーステナイト系ステンレス鋼である。
- 2) 透磁率は、圧延後および60%の伸線加工後でも1.001の低透磁率を示す。

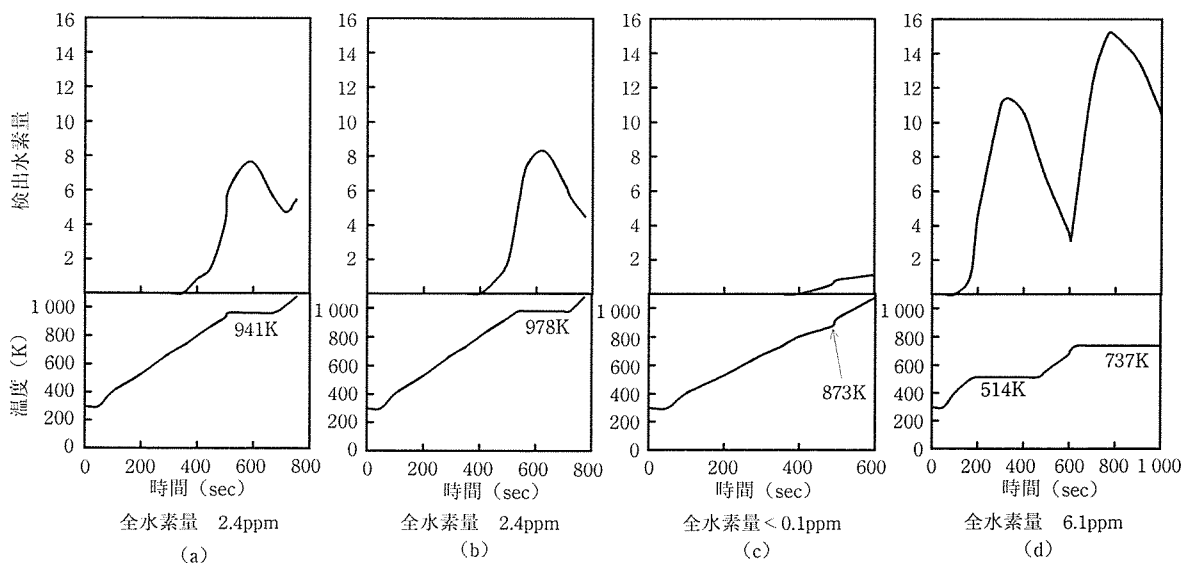


図-8 定荷重遅れ破壊試験片の水素分析結果

- (a) 開発鋼-試験前 (b) 開発鋼-NH₄SCN 溶液 81 時間浸漬 (未破断)
(c) 高炭素鋼-試験前 (d) 高炭素鋼-NH₄SCN 溶液 81 時間浸漬 (破断)

- 3) 伸線加工後の時効処理では、時効温度によって2段階で時効し、500℃から600℃の間で時効処理をすると最も高い強度が得られる。
- 4) 上記3)を考慮して製造された12.7 mmの7本より線では、引張荷重163 kN、伸び4.0%、リラクゼーション2.0%を示し、降伏強度、弾性係数も良好な値を示した。
- 5) 遅れ破壊特性は、定荷重遅れ破壊試験およびSSRTを行い、通常の高炭素鋼PC鋼より優れた特性を示した。
- 6) コンクリート付着特性は、通常の高炭素鋼PC鋼と同等以上の特性を示した。

以上のことより、本報告で示したオーステナイト系ステンレス鋼を用い、所定の製造方法により製造されたより線は、非磁性かつPC鋼としての要求特性を満足しており、超電導磁気浮上式鉄道をはじめとする磁気関連分野への利用が期待される。

謝 辞

今回、非磁性PC鋼より線の開発にあたって(財)鉄道総合技術研究所の涌井室長に多大なる御指導、御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。

参 考 文 献

- 1) 市川篤司, 穴見源八, 田村勝司, 志村雄三: 鋼構造物の浮上式鉄道への適用に関する研究, 鉄道総研報告, Vol. 4, No. 8, pp. 33~41, 1990
- 2) 村田信之, 岡田勝也, 佐藤勉, 穴見源八: 浮上式鉄道構造物の渦電流による磁気抗力と低磁性材の使用範囲について, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol. 46, pp. 668~669, 1991
- 3) 藤田輝夫: ステンレス鋼の熱処理, 日刊工業新聞社, p. 189, 1977
- 4) N. Suzuki, T. Miyagawa, S. Gotoh and T. Takahashi: Wire Journal International, Nov., p. 36, 1986
- 5) 高井健一, 関 純一, 山内五郎: 耐遅れ破壊特性に優れたSi及びSi, Ca複合添加高強度鋼の水素吸蔵特性, 鉄と鋼, Vol. 80, No. 3, pp. 243~248, 1994
- 6) 松山晋作: 高強度鋼の遅れ破壊, 鉄と鋼, Vol. 80, No. 9, pp. 679~684, 1994

【1995年2月13日受付】