

ステンレス PC 鋼材の耐食性に関する検証

今井 昌文*1・田所 裕*2・吉村 公一*3・横松 英賢*4

ステンレス PC 鋼材の耐食性を、腐食発生限界塩化物イオン濃度の推奨値が設けられているステンレス鉄筋と孔食電位を相対比較することで検証した。腐食発生限界塩化物イオン濃度の推奨値が大きいステンレス鉄筋の鋼種ほど孔食電位が高いことの確認を踏まえて、試験に供したステンレス PC 鋼材 (SUS304N1 ほか) は、緊張力の有無にかかわらずステンレス鉄筋 SUS304 より高い孔食電位を示したことから、ステンレス鉄筋 SUS304 と同等以上の耐食性を有するものと推察した。また、遅れ破壊試験より、ステンレス PC 鋼材の SUS304N1 および SUS821L1 は、遅れ破壊に対する感受性が低いことを確認した。

キーワード：ステンレス PC 鋼材、孔食電位、遅れ破壊

1. はじめに

ステンレス鋼材の最大の特徴は、普通鋼材に比べて“錆にくい”ことである。その“錆にくさ”について、ステンレス鉄筋では、「ステンレス鉄筋を用いるコンクリート構造物の設計施工指針(案)」において、腐食発生限界塩化物イオン濃度 (以下、 C_{lim} と呼ぶ) で定量的に示されている¹⁾。

したがって、ステンレス PC 鋼材の実用化にあたっては、その耐食性を定量的に示す必要があると考えられる。材質が同じであれば耐食性能も同じとも考えられるが、通常、鉄筋が熱間圧延加工で製造されるのに対し、PC 鋼材は熱間圧延に加えて冷間引抜加工と熱処理により製造される。また、常時作用する引張応力の最大値については、たとえば SD345 の鉄筋が 180 N/mm^2 (降伏強度の 52%) であるのに対し、B 種の PC 鋼より線は 1116 N/mm^2 (引張強さの 60%) と大きいことなど、鉄筋と PC 鋼材では製造方法や使用状態が大きく異なる。

耐食性の評価に関する試験方法については、ステンレス鉄筋を対象とした既往の論文で、試験溶液の pH や塩化物イオン濃度をパラメータとした試験方法が紹介されているが、これらは特殊な試験設備に加えて高度な専門技術を要する試験方法となっている^{2, 3, 4)}。

よって、本研究では、ステンレス PC 鋼材の C_{lim} を定量的に求めるのではなく、ステンレス鉄筋とステンレス PC 鋼材の孔食電位を比較し、孔食電位によってステンレス PC 鋼材の耐食性が評価できるかについて検証した。

2. 試験概要

2.1 孔食電位試験

試験は「JIS G 0577 ステンレス鋼の孔食電位測定方法 A 法 ($1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 塩化ナトリウム水溶液試験方法)」を参考に行い、ステンレス鉄筋とステンレス PC 鋼材の孔食電位を比較した。また、ステンレス PC 鋼材については、張力負荷 (引張強さの 70%) の有無が孔食電位におよぼす影

表 - 1 ステンレス鋼材の化学成分規格

適用	分類	種類の記号	化学成分 (mass %)								
			C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	N
ステンレス鉄筋	フェライト系	SUS410L	≤0.030	≤1.00	≤1.00	≤0.040	≤0.030	—	11.00 – 13.50	—	—
		SUS304	≤0.08	≤1.00	≤2.00	≤0.045	≤0.030	8.00 – 10.50	18.00 – 20.00	—	—
	オーステナイト系	SUS316	≤0.08	≤1.00	≤2.00	≤0.045	≤0.030	10.00 – 14.00	16.00 – 18.00	2.00 – 3.00	—
ステンレス PC 鋼材	オーステナイト系	SUS304N1	≤0.08	≤1.00	≤2.50	≤0.045	≤0.030	7.00 – 10.50	18.00 – 20.00	—	0.10 – 0.25
		SUS316N	≤0.08	≤1.00	≤2.00	≤0.045	≤0.030	10.00 – 14.00	16.00 – 18.00	2.00 – 3.00	0.10 – 0.22
	二相鋼	SUS821L1	≤0.030	≤0.75	2.00 – 4.00	≤0.040	≤0.020	1.50 – 2.50	20.50 – 21.50	≤0.60	0.15 – 0.20
		SUS323L	≤0.030	≤1.00	≤2.50	≤0.040	≤0.030	3.00 – 5.50	21.50 – 24.50	0.05 – 0.60	0.05 – 0.20
		SUS329J4L	≤0.030	≤1.00	≤1.50	≤0.040	≤0.030	5.50 – 7.50	24.00 – 26.00	2.50 – 3.50	0.08 – 0.30

*1 Masafumi IMAI：日鉄住金 SG ワイヤ (株) 建材営業部

*2 Yutaka TADOKORO：新日鐵住金ステンレス (株) 研究センター

*3 Koichi YOSHIMURA：鈴木住電ステンレス (株) 技術開発部

*4 Hidetoshi YOKOMATSU：日鉄住金 SG ワイヤ (株) 製造技術部

響についても検証を行った。

(1) 供試材

ステンレス鉄筋の供試材は、「JIS G 4322 鉄筋コンクリート用ステンレス異形棒鋼」に依った。ステンレス鉄筋供試材およびステンレス PC 鋼材供試材の化学成分規格を表 - 1 に示す。ステンレス PC 鋼材については、もっとも一般的であるオーステナイト系ステンレス鋼のなかでも高強度の SUS 304N1 と SUS316N に加え、応力腐食割れ抵抗性に優れた二相ステンレス鋼の SUS821L1, SUS323L および SUS329 J4L を選定し、それぞれについて通常の PC 鋼材と同様に冷間引抜による伸線加工と熱処理を施して供試材とした。

(2) 試験片

塗布型試験片（被検面以外をシリコン樹脂で塗装した試験片）を作成した。被検面は、① 600 番湿式研磨仕上げ→② 硝酸中にて不動態化処理→③ 試験直前に 600 番乾式研磨とした。②と③間において、被検面（面積 1 cm²）以外をシリコン樹脂でコーティングした。試験片の径、長さおよび試験本数を表 - 2 に示す。

(3) 試験方法

試験溶液には、30℃の 1 mol/L 塩化ナトリウム (NaCl)

表 - 2 孔食電位試験片の径、長さ、試験本数

種類の記号	試験条件	径 (mm)	長さ (mm)	試験本数 (本)
SUS410L	無負荷	5.5	120	6
SUS304		3.0		6
SUS316		3.0		6
SUS304N1		3.4		3
SUS316N		3.4		4
SUS821L1		2.7		3
SUS323L		2.7		6
SUS329J4L		2.7		6
SUS304N1	引張強さの 70% 負荷	3.4	200	3
SUS821L1		2.7		3

表 - 3 遅れ破壊試験片の径、長さ、試験本数

種類の記号	径 (mm)	長さ (mm)	試験本数 (本)
SUS304N1	3.4	350	6
SUS821L1	2.7	350	6

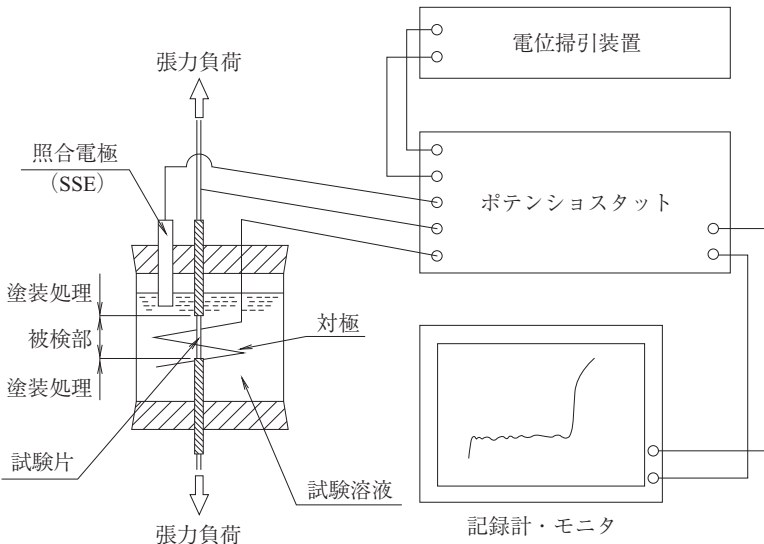


図 - 1 孔食電位試験装置図

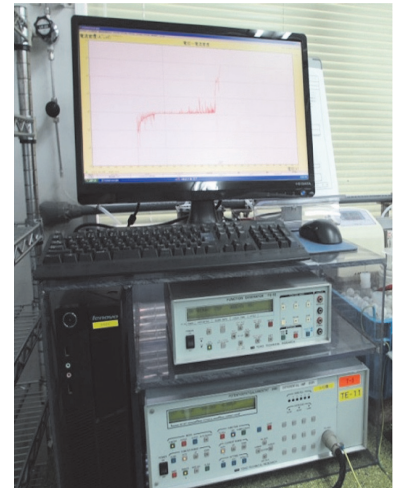


写真 - 1 モニタ, 電位掃引装置, ポテンシostat

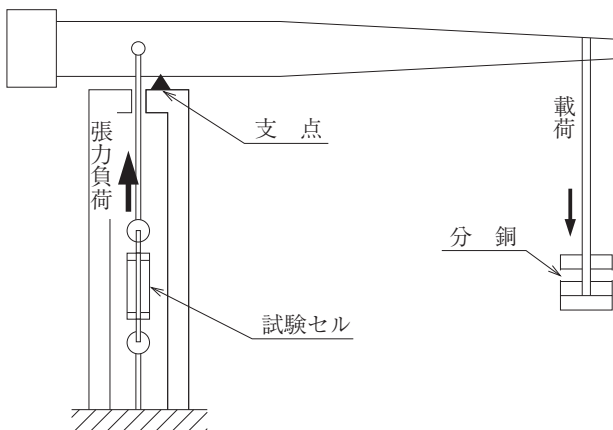
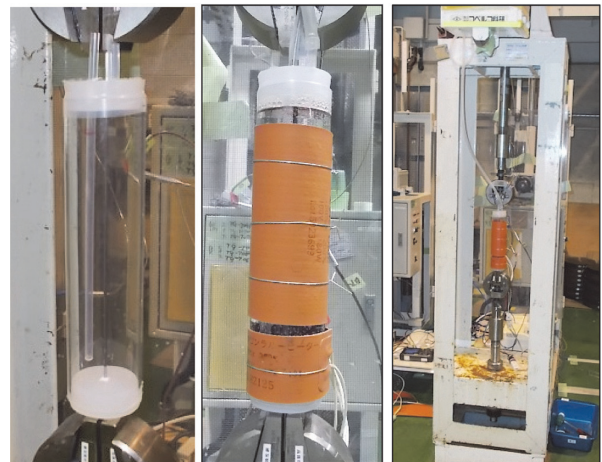


図 - 2 遅れ破壊試験装置図



(a) 試験セル内試験片状況 (b) 試験セル試験溶液保温状況 (c) 載荷部

写真 - 2 遅れ破壊試験状況

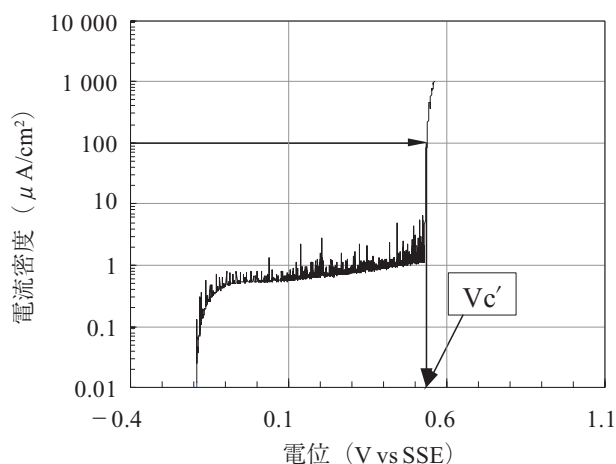


図 - 3 アノード分極曲線の一部

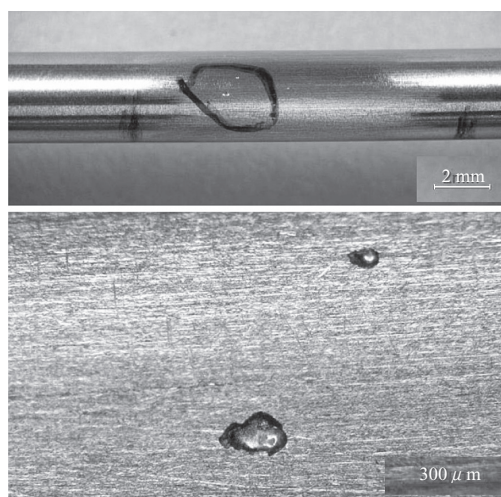


写真 - 3 試験後、試験片の孔食状態

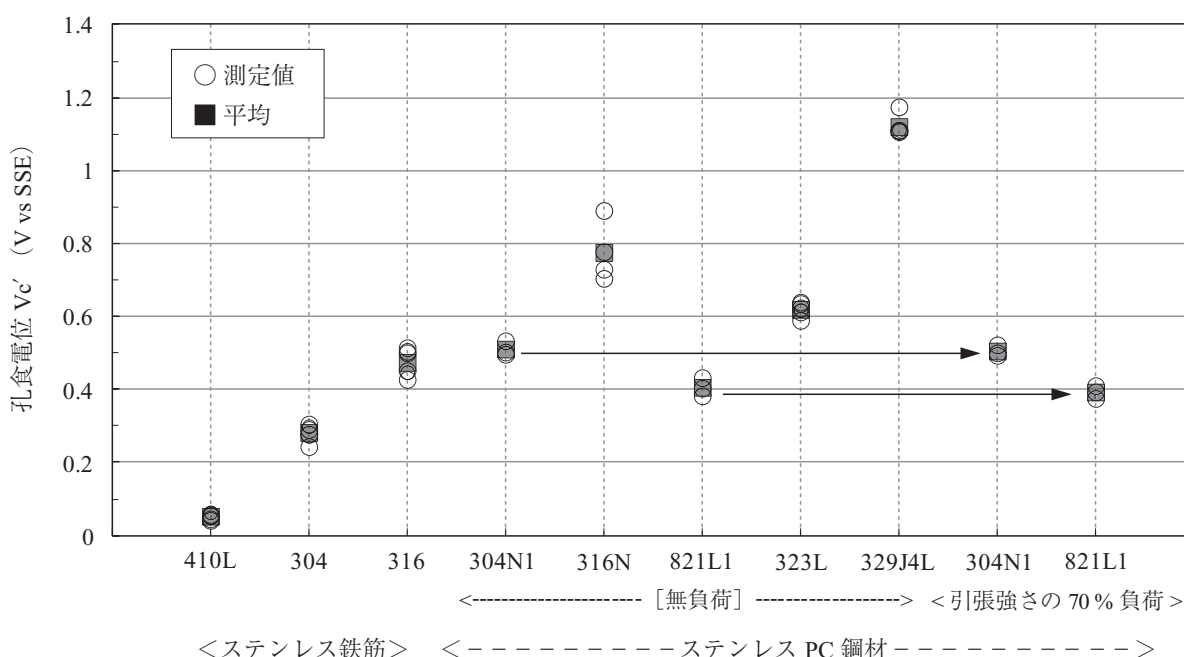


図 - 4 孔食電位の測定結果

水溶液を使用し、電解槽に入れた試験溶液にアルゴンを通じて脱気を行った。その後、試験溶液中に試験片の被検面を完全に浸し、10分間放置後、試験装置のポテンシostatによって自然電位から電位掃引速度 20 mV/min の動電位法で、アノード電流密度が 1 000 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ に達するまで行った。アノード分極曲線において、電流密度 100 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ に対応する電位を孔食電位とした。照合電極には飽和塩化銀電極 (SSE) を使用した。孔食電位試験装置を図 - 1 に、モニター、電位掃引装置およびポテンシostatを写真 - 1 に示す。表 - 2 に示す試験片について、1 試験片あたり 1 回の測定を行った。ステンレス PC 鋼材の SUS304N1 および SUS821L1 については、張力を与えない無負荷の状態の試験に加えて、引張強さの 70% の張力を負荷した状態での試験も行った。

2.2 遅れ破壊試験

試験は、FIP に定める水素脆化促進試験方法を参考に

い、試験片の破断時間を比較した⁵⁾。なお、1 試験片あたりの試験時間は 50 時間を限度とした。

(1) 供試材

試験には、ステンレス PC 鋼材の SUS304N1 および SUS821L1 を供した。

(2) 試験片

試験片は、600 番湿式研磨仕上げの後、アセトンで脱脂した。試験片の径、長さおよび試験本数を表 - 3 に示す。

(3) 試験方法

試験は、図 - 2 に示す試験装置を用いて行った。図 - 2 の試験セル内において、50℃の 20% チオシアン酸アンモニウム (NH_4SCN) 水溶液内で試験片 (被検長は 205 mm) に引張強さの 80% の定荷重を付与し、試験片が破断するまでの時間を測定した。試験状況を写真 - 2 に示す。

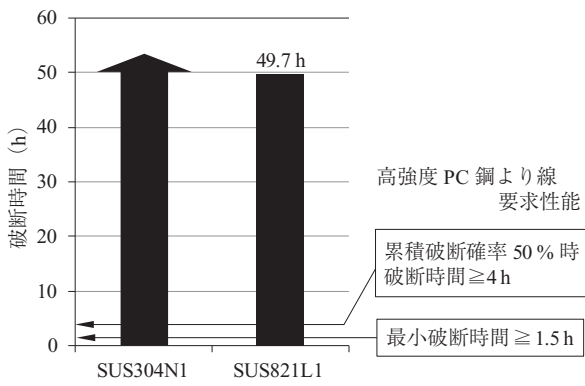


図 - 5 遅れ破壊試験 最小破断時間

3. 試験結果および考察

3.1 孔食電位試験

アノード分極曲線の一例を図 - 3 に示す。電流密度 $100 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ に対応する電位 V_c' を孔食電位とした。孔食電位試験後における試験片の孔食状態を写真 - 3 に、孔食電位 V_c' の全測定結果を図 - 4 に示す。測定値はばらつきも小さく、鋼種の性能を評価できるひとつの指標となるものと推察できる。

ステンレス鉄筋の孔食電位は、SUS410L < SUS304 < SUS316 (高) であり、それぞれの鋼種の C_{lim} の推奨値である $9 \text{ kg}/\text{m}^3$ 、 $15 \text{ kg}/\text{m}^3$ 、 $24 \text{ kg}/\text{m}^3$ と大小関係はよく一致している。これより、孔食電位によりステンレス鋼材の耐食性が評価できるものと判断した。張力負荷の無い状態について、ステンレス PC 鋼材 SUS304N1 の孔食電位は、ステンレス鉄筋 SUS304 の孔食電位より高い。これは、供試材の化学成分に因るものと推察されるが、ステンレス PC 鋼材 SUS304N1 は、ステンレス鉄筋 SUS304 を超える、あるいはステンレス鉄筋 SUS316 と同等の耐食性を有しているものと推察できる。ステンレス PC 鋼材 SUS316N の孔食電位はステンレス PC 鋼材 SUS304N1 より高く、高い耐食性能が期待できる。二相ステンレス鋼である SUS329J4L の孔食電位は、試験に供したステンレス PC 鋼材のなかでもっとも高い値を示した。ステンレス PC 鋼材の SUS304N1 および SUS821L1 について、PC 鋼材の使用状態を想定した引張強さの 70% を負荷した試験より、張力の負荷が孔食電位に及ぼす顕著な影響は認められなかった。

3.2 遅れ破壊試験

ステンレス PC 鋼材の SUS304N1 および SUS821L1 の、各 6 本の試験片について行った遅れ破壊試験の最小破断時間を図 - 5 に示す。図には、高強度 PC 鋼より線における遅れ破壊破断時間の要求性能を併示した⁶⁾。図 - 5 に示すように、SUS304N1 の最小破断時間は 50 h 以上 (試験時

間内での破断なし)、SUS821L1 の最小破断時間は 49.7 h であり、高強度 PC 鋼より線における最小破断時間の要求性能の 1.5 h より長いことから遅れ破壊に対する感受性は低いものと推察される。

4. おわりに

ステンレス PC 鋼材とステンレス鉄筋について、単線の供試材の孔食電位により耐食性を相対比較した試験および遅れ破壊に関する試験より得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 本試験の範囲内において、ステンレス鉄筋の孔食電位は SUS410L < SUS304 < SUS316 (高) の関係にあり、指針における C_{lim} の推奨値である $9 \text{ kg}/\text{m}^3$ 、 $15 \text{ kg}/\text{m}^3$ 、 $24 \text{ kg}/\text{m}^3$ と大小関係は一致することが認められた。これより、孔食電位によりステンレス鋼材の耐食性が評価できるものと判断した。
- (2) 本試験の範囲内において、ステンレス PC 鋼材 SUS304N1 の孔食電位は、張力負荷の有無にかかわらずステンレス鉄筋 SUS304 の孔食電位より高い。したがって、ステンレス PC 鋼材 SUS304N1 は、ステンレス鉄筋 SUS304 と同等以上の耐食性を有するものと推察した。
- また、ステンレス PC 鋼材 SUS316N、SUS821L1、SUS323L および SUS329J4L についても、ステンレス鉄筋 SUS304 より高い孔食電位であり、同等以上の耐食性を有するものと推察できる。
- (3) ステンレス PC 鋼材の遅れ破壊について行った本試験の範囲内において、SUS304N1 および SUS821L1 は、遅れ破壊に対する感受性は高強度 PC 鋼より線より低いことを確認した。

参考文献

- 1) 土木学会：ステンレス鉄筋を用いるコンクリート構造物の設計施工指針 (案)、2008.9
- 2) 田所 裕, 佃 有射, 山路 徹, 丸屋 剛, 二羽淳一郎：ステンレス鉄筋のコンクリート中における腐食発生塩化物イオン濃度に関する実験的研究, 土木学会論文集 E Vol.65 No.4, pp.522-529, 2009.11
- 3) 佃 有射, 加藤 碩, 丸屋 剛, 山路 徹：ステンレス鋼材の腐食発生限界塩化物イオン濃度に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.30 No.1, pp.1119-1124, 2008
- 4) 山路 徹, 濱田秀則, 水間誠治, 山本俊彦：海洋環境下におけるステンレス鉄筋の耐食性に関する研究, 土木学会論文集 E Vol.66 No.2, pp.207-220, 2010.6
- 5) FIP : Report on prestressing steel : 5. Stress corrosion cracking resistance test for prestressing tendons, September, 1980
- 6) プレストレストコンクリート技術協会：高強度 PC 鋼材を用いた PC 構造物の設計施工指針, 2011.6

【2018年1月30日受付】