

ステンレス PC 鋼より線の耐食性評価 — プレテンション部材を用いた促進腐食試験 —

今井 昌文*1・田所 裕*2・吉村 公一*3・大即 信明*4

ステンレス PC 鋼より線の耐食性について、SUS304 ステンレス鉄筋の腐食発生限界塩化物イオン濃度の推奨値である 15 kg/m³ の塩化物イオンを混入したコンクリートで製作したプレテンション部材を用いて促進腐食試験を行い、SUS304 ステンレス鉄筋の腐食状態と比較調査した。促進腐食試験の結果、いずれも緊張力が負荷された SUS304N1 ステンレス PC 鋼より線および二相ステンレス鋼の SUS821L1 ステンレス PC 鋼より線には、側線のコンクリートに接する表面にわずかに錆がみられ、PC 鋼より線における単線間の接触部や心線にすきま腐食と想定される錆は認められなかった。さらに、SUS304N1 ステンレス PC 鋼より線および SUS821L1 ステンレス PC 鋼より線の腐食面積率は 0.5 % 以下であり、SUS304 ステンレス鉄筋と同程度であったことから、これらステンレス PC 鋼より線の耐食性は、SUS304 ステンレス鉄筋と同等であるものと評価できた。

キーワード：ステンレス PC 鋼より線，ステンレス鉄筋，促進腐食試験，腐食面積率

1. はじめに

ステンレス PC 鋼材の耐食性については、単線供試材の孔食電位を相対比較した試験より、SUS304N1 ステンレス PC 鋼線および二相ステンレス鋼の SUS821L1 ステンレス PC 鋼線は、緊張力の有無にかかわらず、SUS304 ステンレス鉄筋と同等の耐食性能を有していると考えられることを報告した¹⁾。ここで、既報の孔食電位は中性溶液中の試験であり、供試材は単線である。一方、PC 鋼材が接するコンクリートは、pH12～pH13 の強いアルカリ性である。また、プレテンション方式のプレストレストコンクリートに使用される PC 鋼材は、7 本よりの PC 鋼より線である。よって、より実構造部材に近い状態でのステンレス PC 鋼材の耐食性を確認するため、PC 鋼材に緊張力を負荷したプレテンション部材を用いた促進腐食試験を行い、SUS304 ステンレス鉄筋と腐食状態を比較調査した。

2. 実験概要

SUS304 ステンレス鉄筋の腐食発生限界塩化物イオン濃度の推奨値²⁾である 15 kg/m³ の塩化物イオンを混入したコンクリートで製作したプレテンション部材を用いて促進

腐食試験を行い、ステンレス PC 鋼より線とステンレス鉄筋の腐食状態を比較調査した。

2.1 使用材料

(1) 鋼材

試験には、既報¹⁾に規格を示した SUS304N1 のステンレス PC 鋼より線（以下、SUS304N1-PC と呼ぶ）、SUS821L1 のステンレス PC 鋼より線（以下、SUS821L1-PC と呼ぶ）、SUS304 のステンレス鉄筋（以下、SUS304 鉄筋と呼ぶ）に加え、高炭素鋼よりなる普通の PC 鋼より線（以下、普通 PC と呼ぶ）の 4 種類の鋼材を用いた。PC 鋼より線は 7 本よりの 15.2 mm、鉄筋は異形棒鋼の D16 である。試験に用いた鋼材の機械的性質を表 - 1 に示す。

(2) コンクリート

試験体に用いたコンクリートの示方配合を表 - 2 に示す。コンクリートはプレテンション方式のプレストレストコンクリートを想定した配合とし、JIS K 8150 に規定されている試薬として用いられる塩化ナトリウムを使用して、塩化物イオン濃度として 15 kg/m³ を混入させた。

2.2 試験体の製作

ステンレス PC 鋼より線および普通 PC の試験体はプレテンション方式のプレストレストコンクリート部材、

表 - 1 鋼材の機械的性質一覧表

呼称	呼び名	引張強さ (N/mm ²)	0.2% 耐力 (N/mm ²)	伸び (%)	ヤング係数 (kN/mm ²)
SUS304N1 - PC	7 本より 15.2 mm	1 846 (1 600)	1 500 (1 360)	3.2 (3.0)	165
SUS821L1 - PC	7 本より 15.2 mm	1 846 (1 600)	1 442 (1 360)	3.0 (3.0)	—
SUS304 鉄筋	D16	671 (440)	334 (295)	52 (16)	200*
普通 PC	7 本より 15.2 mm	1 983 (1 860)	1 839 (1 570)	8.4 (3.5)	192

() 内は規格下限値

※：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）の設計値²⁾

*1 Masafumi IMAI：日鉄 SG ワイヤ (株) 建材営業部

*2 Yutaka TADOKORO：日鉄ステンレス (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 Nobuaki OTSUKI：東京工業大学 名誉教授

表 - 2 コンクリートの示方配合

水セメント比 W/C (%)	単位量 (kg/m ³)					
	セメント C	水 W	細骨材 S	粗骨材 G	塩化ナトリウム	
					NaCl	Cl ⁻
38.0	403	153	741	1 032	25	15.2

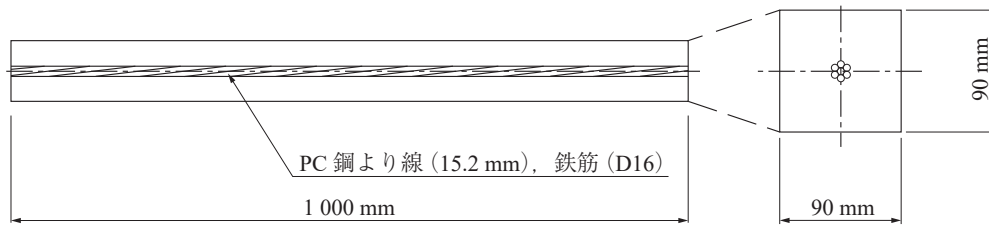


図 - 1 試験体の形状および寸法

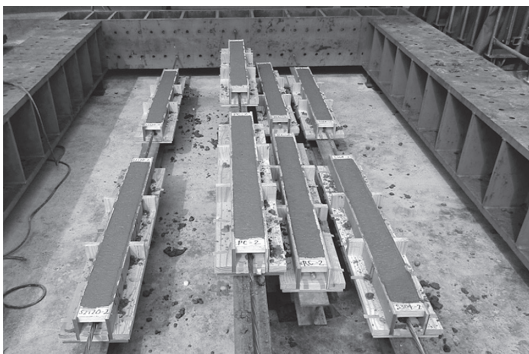


写真 - 1 簡易反力装置による試験体製作状況

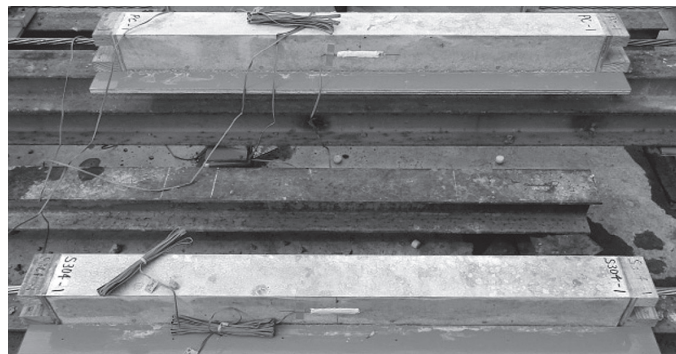


写真 - 2 コンクリート試験体状況

表 - 3 硬化コンクリートの物性

材齢 (日)	圧縮強度 (N/mm ²)				ヤング係数 (N/mm ²)			
	1	2	3	平均	1	2	3	平均
1	43.1	43.9	43.1	43.4	29 007	28 574	29 490	29 024
7	58.5	55.3	57.2	57.0	33 693	32 901	33 069	33 221

SUS304 鉄筋の試験体は鉄筋コンクリート部材とし、それぞれ2体製作した。試験体の形状および寸法を図 - 1 に示す。試験体の長さは、オートクレーブ養生装置の大きさより1000mmとした。ここで、プレテンション方式の定着長は鋼材径の65倍程度であることから、直径が15.2mmのPC鋼より線の場合、約1000mmの定着長を必要とするのに対し、試験体の定着長は両端にそれぞれ500mmしか確保できない。よって、ステンレスPC鋼より線に関する既往の報告³⁾より、定着長は導入緊張力に概ね比例するものと推定し、プレテンション試験体の初期緊張力を通常の約半分の0.4Pu (Pu: PC鋼材の最大試験力の規格値)とした。簡易反力装置による試験体製作状況を写真 - 1に、試験体状況を写真 - 2に示す。また、硬化コンクリートの物性を表 - 3に示す。

2.3 試験方法

(1) 促進腐食試験

促進腐食試験は、JIS A 6205「鉄筋コンクリート用防せい剤」附属書2「(規定)コンクリート中の鉄筋の促進腐食試験方法」を参考に行った。試験体は、コンクリート打設後、材齢1日でプレストレスを導入し、材齢7日まで20℃±2℃の恒温室内で湿布による湿潤養生を行った。

そののち直ちに、図 - 2に示す工程でオートクレーブ養生を行った。写真 - 3にオートクレーブ養生装置内の試験体状況を、写真 - 4に水中養生状況を示す。

(2) コンクリートの塩化物イオン濃度

塩化物イオン濃度の測定に用いたコンクリートは、鋼材に接していた位置から採取した。サンプルの採取位置および切り出し寸法を写真 - 5に示す。サンプル数は、各試験体のほぼ中央より1か所ずつの計8個である。測定は、JIS A 1154「硬化コンクリート中に含まれる塩化物イオンの試験方法 - 塩化物イオン電極を用いた電位差滴定法(0.1 mol/l硝酸銀溶液)」に準拠した。また、試験体のコンクリートは、単位水量が比較的少ない低水セメント比の、ブリーディングが少ない配合である。よって、PC鋼より線の単線間への塩化物イオンの浸透状態を確認するため、単線表面にカーボンテープ(サイズ約5mm×20mm)を巻付けてセメント付着物を剥いで採取し、SEM-EDS(走査型電子顕微鏡エネルギー分散型X線分光分析)による元素分析を行った。

(3) 鋼材の腐食状態

試験体は長さ方向に乾式で3分割したのち、コンクリートを割ってそれぞれの鋼材を取り出した。写真 - 6に試

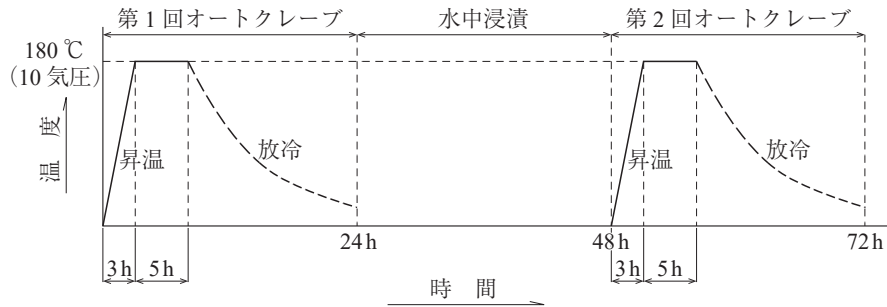


図 - 2 促進腐食試験におけるオートクレーブ養生工程

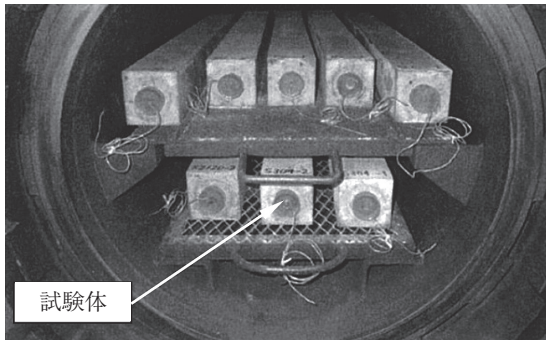


写真 - 3 オートクレーブ養生装置内の試験体状況

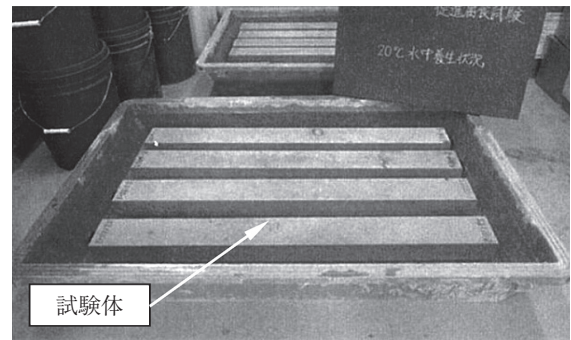


写真 - 4 水中養生状況

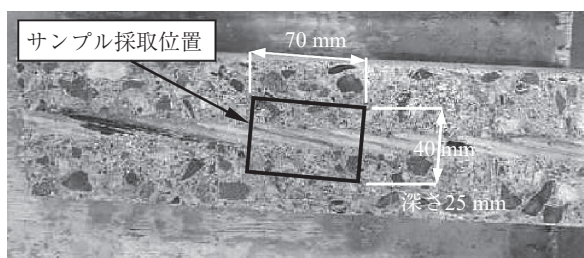


写真 - 5 塩化物イオン濃度測定用サンプルの採取位置および採取寸法

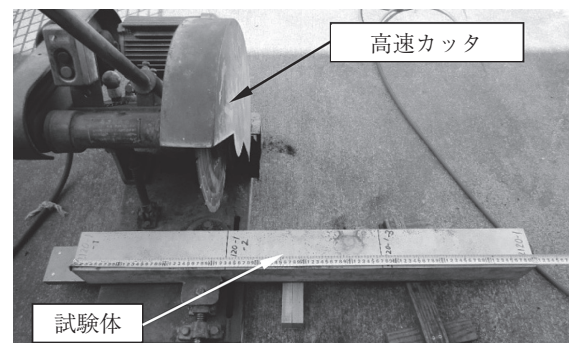


写真 - 6 試験体の切断状況

験体の切断状況を、写真 - 7 にコンクリートの解体状況を示す。腐食状態の観察は、PC 鋼より線の外観およびそれぞれの単線について行った。取り出した鋼材については、それぞれの腐食面積率を計測した。

3. 結果および考察

3.1 コンクリートの塩化物イオン濃度

試験体コンクリートの可溶性塩化物イオン濃度は、最小 9.7 kg/m³、最大 11.5 kg/m³、平均 10.6 kg/m³であった。全塩化物イオン濃度は、最小 11.9 kg/m³、最大 13.8 kg/m³、平均 12.9 kg/m³であり、15 kg/m³より少し小さい傾向が見られた。また、側線の発錆部分および側線や心線の錆なし部分から採取したサンプルにおけるセメント付着物の SEM - EDS による元素分析の結果、サンプルのいずれからもセメント成分 (Ca, Si, Al) および Cl が検出された。サンプルの Cl 含有率は、ペーストの計算値が 2.66 mass% に対し、側線部の平均 (サンプル数 = 6) が 2.73 mass%、心線部の平均 (サンプル数 = 4) が 1.79 mass% と、わずかに心線部の Cl 含有率が小さい傾向が見られたが、一つ

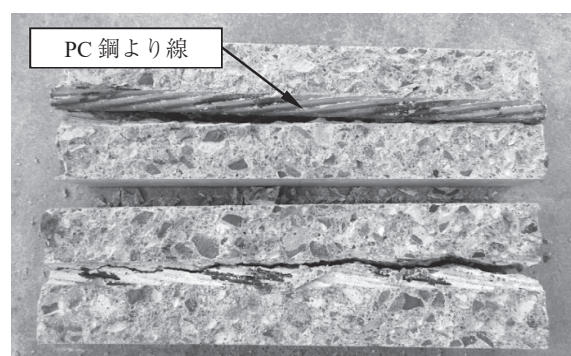


写真 - 7 コンクリートの解体状況 (普通 PC 試験体)

のサンプルにおける採取量が非常に少ないことを考慮すると、誤差の範囲内とも考えられる。

3.2 鋼材の腐食状態

3分割した試験体のうち、中央の部材から取り出したそれぞれの鋼材について腐食状態を調査した。図 - 3(a) に SUS304N1 - PC の腐食状態を、図 - 3(b) に SUS821L1 - PC

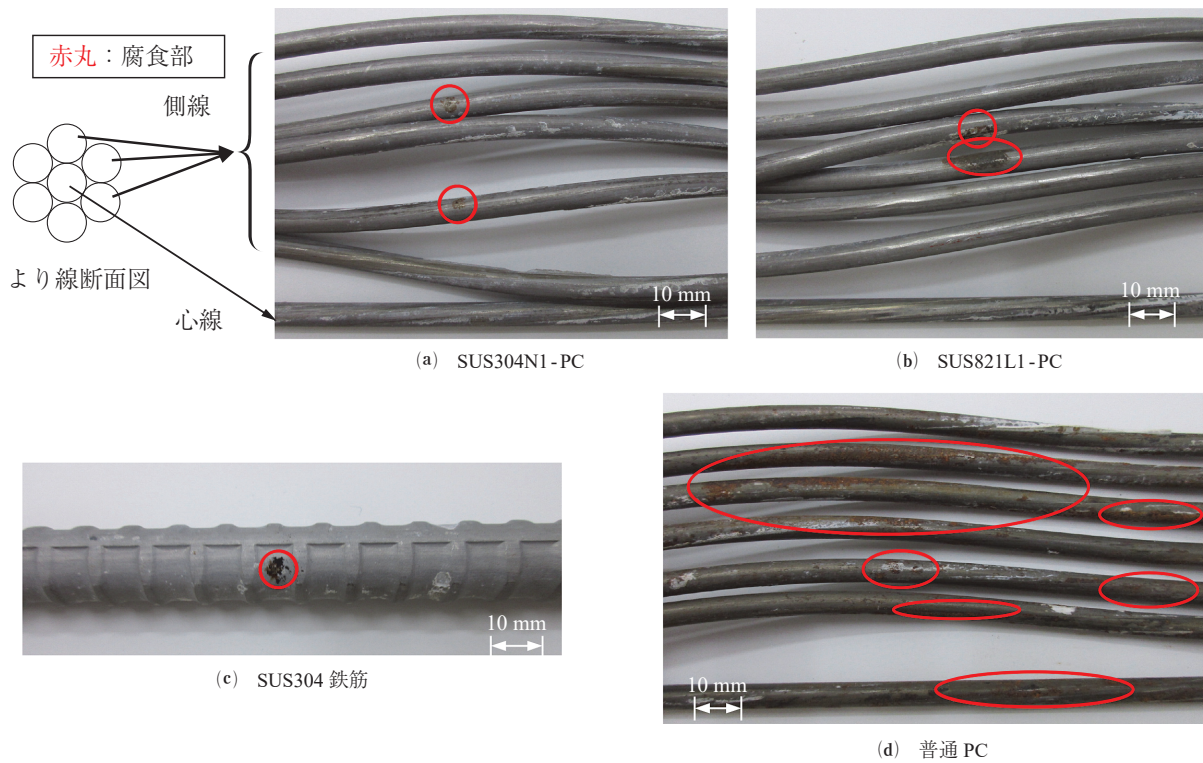


図 - 3 鋼材の腐食状態

表 - 4 鋼材の腐食面積率

	鋼材種類	腐食面積率 (%)
1	SUS304N1 - PC - 1	0.5 以下
2	SUS304N1 - PC - 2	0.5 以下
3	SUS821L1 - PC - 1	0.5 以下
4	SUS821L1 - PC - 2	0.5 以下
5	SUS304 鉄筋 - 1	0.5 以下
6	SUS304 鉄筋 - 2	0.5 以下
7	普通 PC - 1	10
8	普通 PC - 2	12

の腐食状態を、図 - 3(c)に SUS304 鉄筋の腐食状態をおよび図 - 3(d)に普通 PC の腐食状態をそれぞれ示す。図には、腐食部を赤丸で示すとともに、尺度の寸法を示した。図 - 3(d)に示すように、普通 PC は、側線に著しい腐食が見られたのに加えて心線にも腐食が生じており、腐食発生限界塩化物イオン濃度が 1.2 kg/m^3 とされている既存の PC 鋼より線に対して、非常に厳しい腐食環境条件であったことが分かる。図 - 3(a)および図 - 3(b)に示すステンレス PC 鋼より線は、側線の一部に若干の錆が認められたものの、側線間および側線と心線間に、すきま腐食と想定される錆は確認されなかった。錆は、PC 鋼より線の内部からではなく、側線のコンクリート接触部分の一部から発生している。これより、PC 鋼より線の単線間に Cl を含んだセメントが存在していたにもかかわらず、ステンレス PC 鋼より線の内部からは発錆しがたかったことが窺え、PC 鋼より線の内部はいわゆるすきま腐食を発生するほどの厳しいすきまにおける環境ではないと考えられた。腐食面積率の計

測結果を表 - 4 に示す。同表に示すように、SUS304N1 - PC の腐食面積率は 0.5 % 以下であり、SUS304 鉄筋と同等であることから、耐食性についても同等であるものと評価できる。また、SUS821L1 - PC の腐食面積率も 0.5 % 以下であり、SUS304 鉄筋と同等の耐食性を有しているものと評価できる。

4. ま と め

15 kg/m^3 の塩化物イオンを混入したプレテンション部材を用いた促進腐食試験より、緊張力を負荷したステンレス PC 鋼より線の耐食性について得られた知見を以下にまとめる。

- 1) SUS304N1 - PC および SUS821L1 - PC について、緊張力作用下においても、PC 鋼より線の単線間におけるすきま腐食は確認されなかった。
- 2) SUS304N1 - PC および SUS821L1 - PC の腐食面積率は 0.5 % 以下であり、SUS304 鉄筋と同程度であることから、耐食性についても同等であるものと評価できる。

参 考 文 献

- 1) 今井昌文, 田所 裕, 吉村公一, 横松英賢: ステンレス PC 鋼材の耐食性に関する検証, プレストレストコンクリート Vol.60, No.3, pp.61-64, 2018.5
- 2) 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
- 3) 市原哲也, 天藤雅之, 石栗利宏, 小森英樹: ステンレス系 YUS130M 鋼非磁性, 高耐食 PC 鋼線の特性について, 第 4 回プレレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.297-302, 1994.10

【2019 年 10 月 29 日受付】