

港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE
OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No. 1176 JUNE 2008

海洋環境下におけるステンレス鉄筋の耐食性に関する検討

山路 徹

独立行政法人 港湾空港技術研究所
Independent Administrative Institution,
Port and Airport Research Institute, Japan

目 次

要 旨	3
1. 序論	4
2. 使用したステンレス鉄筋の諸特性	4
2.1 ステンレス鉄筋の組成	4
2.2 力学的特性	5
3. 模擬溶液浸漬試験	5
3.1 概要	5
3.2 試験概要	5
3.3 試験結果	5
4. 海洋環境暴露実験	7
4.1 概要	7
4.2 試験体	7
4.3 試験環境	8
4.4 試験項目	8
4.5 小型角柱試験体における試験結果	8
4.6 はり試験体における試験結果	11
4.7 まとめ	12
5. ステンレス鉄筋を用いた港湾コンクリート構造物の初期建設費用および ライフサイクルコストの試算例	12
5.1 概要	12
5.2 ステンレス鉄筋を用いた際の鉄筋腐食に関する照査	12
5.3 初期建設費用およびライフサイクルコストの試算	14
6. 結論	15
謝辞	15
参考文献	16
記号表	16
付録	
付録A 自然電位結果一覧表	17
付録B 腐食減量測定結果	17
付録C 塩化物イオン濃度測定結果	18

Study on Corrosion Resistant Property of Stainless Steel Bars in Concrete under Marine Environment

Toru YAMAJI*

Synopsis

For the application to port reinforced concrete structures under marine environment, corrosion-resistant property of three types of stainless steel bars (SUS430, SUS304 and SUS316) in concrete was studied.

Results obtained are as follows.

1. Three types of stainless steel bars (SUS 430, SUS304, SUS316) had high corrosion-resistant property in concrete under marine environment. The chloride threshold level for corrosion (C_{lim}) of these stainless steels was much higher than that of carbon steel bars. For SUS430, C_{lim} was higher than 14.2 kg/m³. For SUS304, C_{lim} was higher than 12.0 kg/m³. For SUS316, C_{lim} was higher than 14.5 kg/m³.
2. The upper limit of crack width for corrosion in case of stainless steel reinforcement can be increased than that in case of carbon steel bar.
3. In case that stainless steel bar is applied to port concrete structures under marine environment, the life cycle cost can be lower than the case of carbon steel bar.

Key Words: port concrete structure, stainless steel, chloride ion concentration, steel corrosion, crack

* Senior Researcher, Materials Division, Geotechnical and Structural Department
3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan
Phone : +81-46-844-5061 Fax : +81-46-844-0255 e-mail:yamaji@pari.go.jp

海洋環境下におけるステンレス鉄筋の耐食性に関する検討

山路 徹*

要 旨

本研究では、海洋環境下におけるコンクリート中のステンレス鉄筋 SUS430, SUS304, SUS316 の耐食性について検討を行った。得られた知見を以下に示す。

(1) コンクリート中における SUS430, SUS304 および SUS316 の耐食性は非常に優れており、腐食発生限界塩化物イオン濃度の値は普通鉄筋（炭素鋼）の場合よりかなり大きな値を示すことが確認された。SUS430 の場合で 14.2 kg/m^3 以上, SUS304 の場合で 12.0 kg/m^3 以上, SUS316 の場合で 14.5 kg/m^3 以上であると考えられた。

(2) ステンレス鉄筋 SUS430, SUS304 および SUS316 を使用した場合、普通鉄筋の場合と比較すると、鋼材の腐食に対するひび割れ幅の限界値を緩和できることが確認された。

(3) 海洋環境に位置する栈橋上部工におけるライフサイクルコストの試算を行った結果、ステンレス鉄筋を用いて建設した場合、供用年数期間のライフサイクルコストで比較すれば、普通鉄筋を用いて建設し、供用期間中に補修を行う場合より安くなる可能性が示された。

キーワード：港湾コンクリート構造物，ステンレス鉄筋，塩化物イオン濃度，鉄筋腐食，ひび割れ

* 地盤・構造部 主任研究官（材料耐久性能評価担当）
〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 独立行政法人港湾空港技術研究所
電話：046-844-5061 Fax：046-844-0255 e-mail:yamaji@pari.go.jp

1. 序論

海に隣接している港湾コンクリート構造物は、その表面に海水中に含まれる塩化物イオンが供給される。この塩化物イオンはコンクリート中を浸透し、さらには鉄筋周辺まで到達する。この際、鉄筋周辺のコンクリート中における塩化物イオン濃度がある限界量（腐食発生限界塩化物イオン濃度 C_{lim} と呼ぶ）を超えた時に鉄筋の腐食が開始する。「港湾の施設の技術上の基準・同解説¹⁾」(以下、「港湾基準」と呼ぶ)においては、普通鉄筋（一般に使用される炭素鋼製の鉄筋）における C_{lim} として、 2.0 kg/m^3 （コンクリート 1 m^3 に含まれる塩化物イオン量が 2.0 kg ）と設定されている。また、「土木学会コンクリート標準示方書[施工編]²⁾」(以下、示方書[施工編]と呼ぶ)においては、普通鉄筋における C_{lim} として、 1.2 kg/m^3 と設定されている。

代表的な港湾コンクリート構造物である栈橋上部工においては、海上に位置していることから、塩化物イオンが多量に供給され、腐食反応に必要な酸素も十分に供給されるため、非常に厳しい塩害環境にある。写真-1は塩化物イオンが原因でコンクリート中の鉄筋の腐食が開始し、腐食による膨張圧でコンクリートがはく落したものである。このような特に厳しい塩害環境においては、耐食性に優れたエポキシ樹脂塗装鉄筋やステンレス鉄筋などを用いた方が得策であると考えられる。なお、ステンレス鉄筋はエポキシ樹脂塗装鉄筋に比べて高価である。しかしながら、エポキシ樹脂塗装鉄筋の場合、普通鉄筋の周囲のみをエポキシ樹脂で覆っているため、運搬中あるいは施工中においてエポキシ樹脂被覆部が損傷する可能性があり、場合によってはコンクリート打設前にエポキシ樹脂被覆部に対して補修が必要となるケースが生じる。一方、ステンレス鉄筋の場合は、鋼材そのものの耐食性が優れているため、運搬中あるいは施工中にお



写真-1 栈橋上部工（スラブ）における塩害劣化事例（建設後約30年経過）

いて普通鉄筋と同様に扱うことができる。

コンクリート中においてステンレス鉄筋を使用する際には、ステンレス鉄筋の腐食発生限界塩化物イオン濃度 C_{lim} を把握することが重要である。ステンレス鉄筋の C_{lim} に関する研究は、海外においては比較的研究事例^{3),4)}も多い。Pedefferriらはコンクリート中の細孔溶液を模擬した溶液（以下、模擬溶液）を用いて電気化学的手法に基づく評価を行っており、一般的なステンレス鋼である SUS304 の場合で、 $C_{lim}=4$ （%：セメント質量比）程度と報告している（単位セメント量を 300 kg/m^3 とすると $300 \times 4 \% = 12 \text{ kg/m}^3$ に換算⁴⁾）。一方、国内では研究事例は少ない。その中で、太らはコンクリートを練り混ぜる際に塩化物イオンを混入させた試験体において SUS304 で 24 kg/m^3 程度でも腐食が見られなかったと報告している⁵⁾。これらの研究の多くは、練混ぜ時に多量の塩化物イオンを混入させた場合や、模擬溶液やコンクリート試験体を用いて電気化学的手法により評価した場合のものであり、実際の環境に対応する、塩化物イオンを外部から侵入させた場合についての検討は少ない。

そこで本研究では、模擬溶液を用いた鋼材単体の浸漬試験およびコンクリート試験体を用いた海洋環境暴露試験により、ステンレス鉄筋における C_{lim} の検討を行った。そして、実験結果を元にステンレス鉄筋を用いた際の耐久性能照査を行い、その際の LCC（ライフサイクルコスト）の比較を試みた。

2. 使用したステンレス鉄筋の諸特性

2.1 ステンレス鋼の組成

ステンレス鋼は、炭素鋼の耐食性を向上させる目的で 10.5%以上の Cr（クロム）を含有する鋼と定義されている。本試験では、SUS430、SUS304、SUS316 の3種類のステンレス鋼を用いた。ステンレス鋼の組成を表-1に示す。Cr や Mo（モリブデン）等の添加量が増えると耐食性は向上する。表中に耐孔食性指標⁶⁾（ $=\text{Cr}+3.5\text{Mo}+16\text{N}$ 、N：窒素）の値を示している。この値が高いほど腐食が生じにくい。そのため、一般的な耐食性としては、SUS316

表-1 ステンレス鋼の組成の一例

鋼種名称	ステンレス鋼種類	成分(質量%)			耐孔食性指標*
		Ni	Cr	Mo	
SD295(炭素鋼)		-	-	-	-
SUS430	フェライト系	-	16.3	-	16.3
SUS304	オーステナイト系	8.1	18.7	-	18.7
SUS316		10.1	16.8	2.0	23.9

*= $\text{Cr}+3.5\text{Mo}+16\text{N}(\%)$

表-2 ステンレス鋼の力学的特性

鋼種	引張強度 (N/mm ²)	降伏強度 (N/mm ²)	伸び (%)	弾性 係数 (kN/mm ²)	熱膨張 係数 (×10 ⁻⁶)
炭素鋼 (SD295)	568	386	24.3	204	11.0
SUS430	468	244*	30.3	169	10.4
SUS304	672	364*	42.7	162	16.4
SUS316	627	331*	43.8	187	-

*0.2%ひずみ時

が最も優れ、次に SUS304, SUS430 となる。なお、SUS304, SUS430 に関しては、耐食性に優れるとはいっても、ステンレス鋼単体で海洋環境下に使用すると、腐食が生じる。そのため、海水が鋼材表面に直接接するような環境においては、SUS304やSUS430単体では使用されない。

2.2 力学的特性

力学的特性を表-2に示す。SUS304, SUS316 においては、伸びが大きいことを除いて、炭素鋼とほぼ同等の性質を有している。

3. 模擬溶液浸漬試験

3.1 概要

アルカリ環境下および中性環境下における腐食性状を把握するため、コンクリート細孔溶液の模擬溶液中においてアノード分極試験および自然電位の測定を行った。

3.2 試験概要

(1) 試料

試験に用いた鋼種は表-1に示した SUS430, SUS304, およびSUS316の3種類である。試料形状は2×2×0.2 mm であり、試験前に試料表面を脱脂・洗浄したのみで研磨は実施していない。

(2) 試験方法

試験に用いた模擬溶液の組成と測定項目の一覧を表-3に示す。所定の濃度に調整した NaCl および Ca(OH)₂ の混合溶液に吸水性高分子を添加し、ゲル状にしたものを模擬溶液とし、この模擬溶液に試料を挿入して試験を実施

表-3 模擬溶液組成および測定項目

		Cl(%:質量比)			
		1.9	5.0	8.3	12.7
pH	7.2	○	○	◎	◎
	12.5	○	○	◎	◎

○:アノード分極, ◎:アノード分極+自然電位変化

した⁷⁾。なお、模擬溶液の Cl 濃度は 1.9, 5.0, 8.3, 12.7 % (質量比) の 4 水準である。また、Ca(OH)₂ を無添加の場合 (pH=7.2) は中性化したコンクリート中あるいはひび割れ箇所近傍を、Ca(OH)₂ を添加した場合 (pH=12.5) は健全なコンクリート中を想定したものである。

アノード分極試験では、照合電極に飽和 KCl-Ag/AgCl 電極 (以下, SSE), 対極にチタンを用い、20 mV/min. の走査速度でアノード方向へ分極し、100 μA/cm² の電流が流れた電位を測定した。この電位は、鋼材の耐食性の指標となる孔食発生電位として定義されるものである。

自然電位測定では、模擬溶液中に試料および照合電極 (SSE) を挿入し、約 10 日間連続で計測を行った。その後、腐食の有無を確認した。なお、模擬溶液の Cl 濃度は 8.3, 12.7% の 2 水準, pH は 7.2 と 12.5 の 2 水準である。

3.3 試験結果

(1) アノード分極特性および孔食発生電位

図-2に Cl 濃度 12.7 %, pH=12.5 の時のアノード分極曲線を示す。各鋼種の差が明確であり, SUS430, SUS 304,

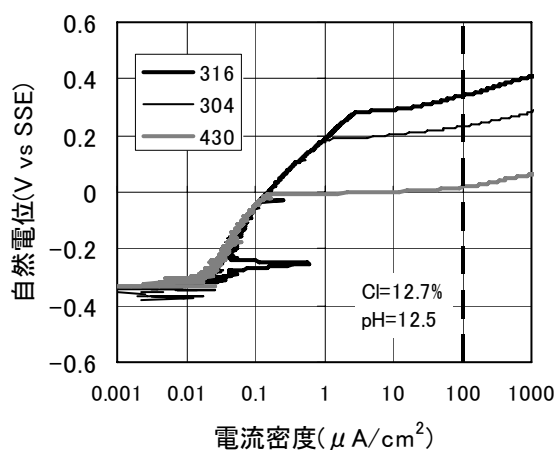


図-2 アノード分極曲線

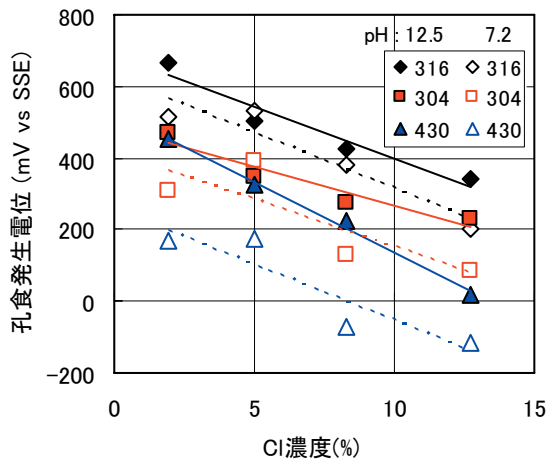


図-3 Cl 濃度と孔食発生電位の関係

SUS316 の順に孔食発生電位が貴であることが分かる。

図-2 から得られる孔食発生電位と Cl 濃度の関係を図-3 に示す。Cl 濃度が高いほど孔食発生電位は卑になっており、また、Ca(OH)₂ を添加した場合 (pH=12.5) の方が貴になっている。

(2) 自然電位変化と腐食の関係

図-4 に模擬溶液中における各ステンレス鋼の自然電位の経時変化を示す。浸漬後の自然電位が孔食発生電位付近もしくはそれより貴な電位を示した場合にのみ腐食が生じた。SUS316 は、全ての試験において腐食は観察されず、SUS304 は Cl 濃度 12.7 %、pH=7.2 の場合にのみ腐食が観察された。SUS430 については、pH=12.5 の模擬溶液中では腐食が観察されなかったが、pH=7.2 の場合では Cl 濃度 8.3 %および 12.7 %のいずれの場合にも腐食が観察された。

以上の結果から、pH=12.5 の場合には、SUS316、SUS304、SUS430 において腐食が開始する Cl 濃度はいずれも 12.7 %以上であり、pH=7.2 の場合には SUS316 では 12.7 %以上、SUS304 では 8.3~12.7 %の範囲内、SUS430 では 8.3 %より低濃度であると推測される。

(3) コンクリート中の濃度への換算

模擬溶液中の Cl 濃度から、コンクリート中における塩化物イオン濃度を下記の方法で換算する。なお、換算方法には確立されたものが無いため、ある一例として文献 8) で示された手法に基づき算定を行った。

1) 細孔溶液量の算定

コンクリート中の体積あたりの細孔溶液量 p (%: 容積比) は、水量 W (kg/m³)、セメント量 C (kg/m³) およびセメントの水和率 h (%) から式(1)で算定される。

$$p = \frac{W - C \times h / 100}{1000} \times 100 \quad (1)$$

ここで、セメントの水和率 $h=20\%$ とした。 $W=150\text{kg/m}^3$ 、 $C=300\text{kg/m}^3$ ($W/C=0.50$) として p を計算すると、9.0%と算定された。

2) 自由塩化物イオン濃度の算定

コンクリート中の自由塩化物イオン濃度 C_v (kg/m³) は、体積あたりの細孔溶液量 p (%: 容積比) および模擬溶液中の Cl 濃度 a (%: 質量比) から式(2)で算定される。

$$C_v = 1000 \times \frac{a}{100 - a} \times \frac{p}{100} \quad (2)$$

3) 固定化塩素濃度の算定

固定化塩素濃度 a_{fix} (%: セメント質量比) は、石田らの

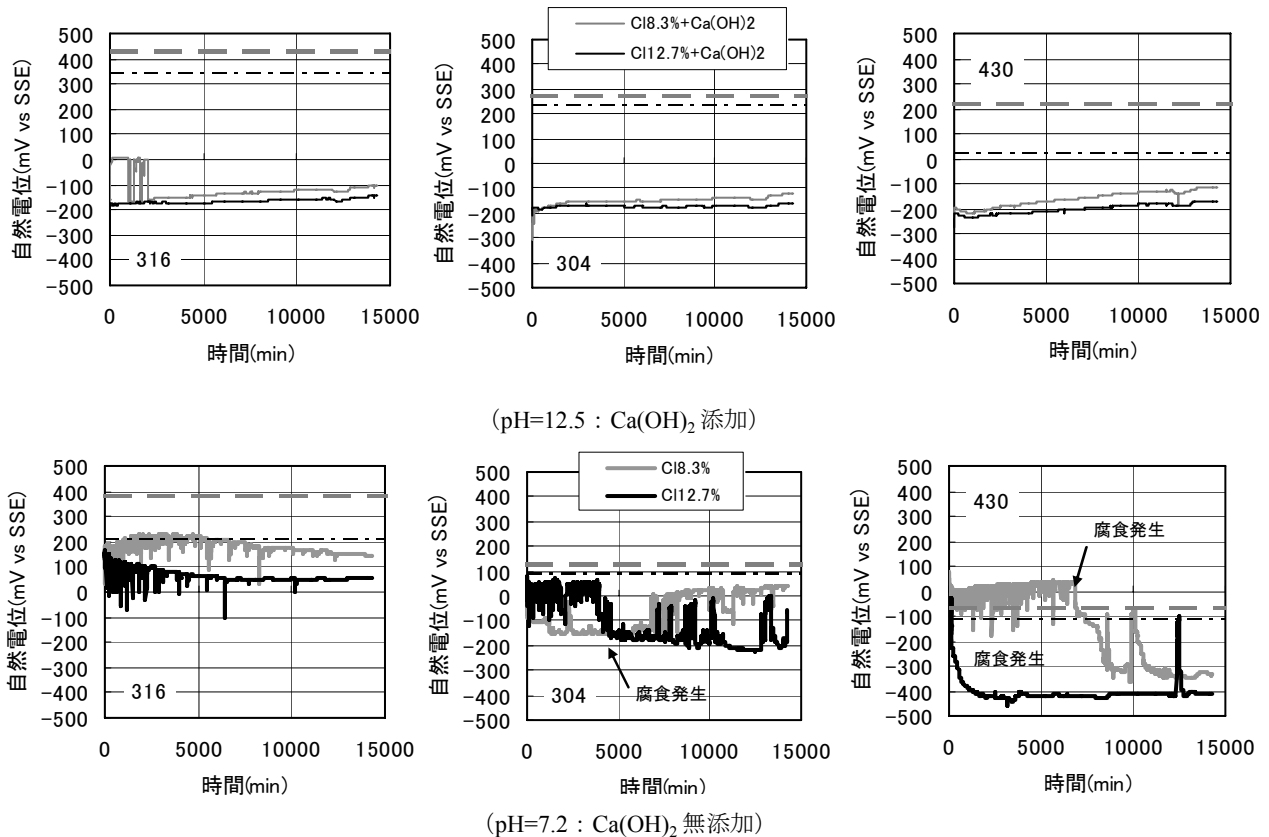


図-4 各ステンレス鋼の自然電位変化 (実線 : 自然電位, 破線 : 孔食発生電位)

表-4 コンクリート中への濃度への換算結果

a(%)	C _v (kg/m ³)	a _{mob} (%)	a _{fix} (%)	C _{fix} (kg/m ³)	C _{tot} (kg/m ³)
12.7	13.1	6.4	3.1	9.4	22.5
8.3	8.1	4.2	2.6	7.8	16.0
5.0	4.7	2.5	2.2	6.6	11.4
3.0	2.8	1.5	2.0	5.9	8.8

研究⁹⁾で得られた塩化物イオン量と固定化塩素量の関係を二直線に近似した式(3)で算定した。

$$\begin{aligned}
 a_{mob} < 0.358 \text{ のとき} & \quad a_{fix} = 4.74 \times a_{mob} \\
 a_{mob} \geq 0.358 \text{ のとき} & \quad a_{fix} = 0.240 \times a_{mob} + 1.615
 \end{aligned}
 \quad (3)$$

ここで、 a_{mob} (%:セメント質量比)は、模擬溶液中の塩化物イオン濃度をセメント質量比に換算したものであり、下式で計算される。

$$a_{mob} = a \times \frac{W}{C} \quad (4)$$

4) 固定化塩化物イオン濃度の算定

コンクリート中における固定化塩化物イオン濃度 C_{fix} (kg/m³)は、固定化塩素濃度 a_{fix} およびセメント量 C から式(5)で算定される。

$$C_{fix} = C \times \frac{a_{fix}}{100} \quad (5)$$

5) 全塩化物イオン濃度の算定

全塩化物イオン濃度は自由塩化物イオン濃度と固定化塩化物イオン濃度の和となる。そのため、コンクリート中の全塩化物イオン濃度 C_{tot} (kg/m³)は式(6)で求められる。

$$C_{tot} = C_v + C_{fix} \quad (6)$$

上記のようにして求めたコンクリート中の塩化物イオン濃度の値を表-4に示す。模擬溶液の試験結果でCl濃度 $a=12.7\%$ の場合は 22.5kg/m^3 の値となった。各ステンレス鋼は12.7%で腐食が生じていなかったため、コンクリート中における腐食発生限界濃度は 20kg/m^3 程度以上である可能性がある。なお、コンクリート中に塩化物イオンを混入させた文献⁵⁾の試験結果においても、SUS304は 20kg/m^3 以上程度でも腐食が生じていない。

以降では、コンクリート外部から塩化物イオンを侵入させることにより、高塩化物イオン濃度環境下でのステンレス鉄筋の腐食の有無を確認し、実環境下における腐食発生限界塩化物イオン濃度について検討を行う。

4. 海洋環境暴露試験

4.1 概要

実際の海洋環境下と同様に、コンクリート外部から塩化物イオンが浸透する場合を想定し、自然海水の散布が1日2回(1回約3時間)繰り返される屋外環境(港湾空港技術研究所内の海水シャワー暴露場)に、鉄筋を埋設した小型角柱試験体を5.7年、はり試験体を5.1年間暴露した。なお、海水シャワー暴露場の改良工事のために海水散布が停止される期間が生じている(小型角柱試験体は100日間、はり試験体は292日間)。

4.2 試験体

(1) 小型角柱試験体

試験体形状を図-5に、試験体配合を表-5に示す。使用したセメントは普通ポルトランドセメント、細骨材は静岡県小笠産山砂(密度 2.61g/cm^3 , 粗粒率 2.65), 粗骨材は茨城県岩瀬産砕石(最大粒径 20mm , 密度 2.64g/cm^3 , 粗粒率 6.71), 練混ぜ水は水道水である。用いた鋼種は表-1に示した普通鉄筋(炭素鋼), SUS430, SUS304 および SUS316 の4種類である。試験体は $100 \times 100 \times 400\text{mm}$ の角柱であり、 $\phi 13\text{mm}$ の丸鋼がかぶり $20, 43.5\text{mm}$ の2箇所埋設されている。なお、丸鋼のステンレス鉄筋は、異形棒鋼を切削することにより作製した。試験体一覧を表-6に示す。暴露後約1, 2.5, 3.8 および 5.7年時に

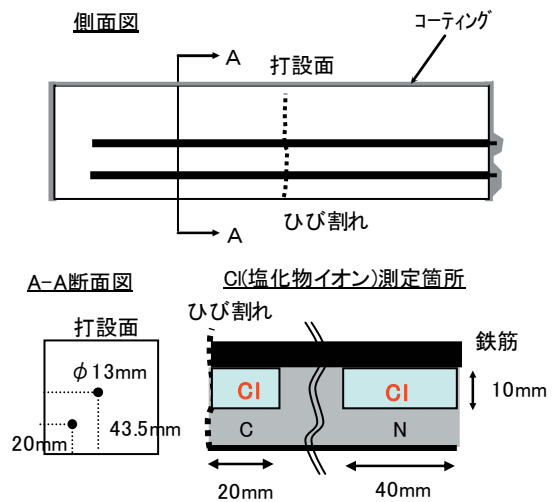


図-5 小型角柱試験体形状

表-5 コンクリート配合

W/C	s/a	単位量(kg/m ³)			
		W	C	S	G
0.6	0.48	158	263	894	980

表-6 小型角柱試験体一覧

1) ひび割れ無し:N

鋼種	かぶり (mm)	腐食の有無(○:有, -:無)			
		1年*	2.5年**	3.8年**	5.7年*
N	20	○	○	○	○
	43.5	-	○軽微	○	○
430	20	/	-	-	-
	43.5	/	-	-	-
304	20	/	-	-	-
	43.5	/	-	-	-
316	20	-	-	-	-
	43.5	-	-	-	-

2) ひび割れあり:C

鋼種	かぶり (mm)	ひび割れ幅(mm)			
		1年*	2.5年**	3.8年**	5.7年*
N	20	0.20	0.20	0.25	0.20
	43.5	0.10	0.10	0.15	0.08
430	20	/	0.20	0.65	0.45
	43.5	/	0.10	0.55	0.50
304	20	/	0.35	0.75	0.50
	43.5	/	0.20	0.75	0.50
316	20	0.70	0.35	0.35	0.80
	43.5	0.40	0.20	0.20	0.75

*解体直前に測定, **暴露前に測定

太字:腐食発生

各1体ずつ試験に供した。なお、一部、暴露前に曲げ載荷によりひび割れを導入した。鉄筋位置におけるひび割れ幅を表-6中に示した。これは暴露前あるいは解体直前にコンクリート表面で測定したものである。

(2) はり試験体

試験体概略を図-6および表-7に示す。試験体寸法は180×300×1800mmであり、曲げ降伏が先行する試験体とした。試験体304-S, 304-L, 304-L-CIに対してステンレス鉄筋(SUS304)を用い、試験体N-S, N-L, N-L-CIに対して普通鋼(SD295)を用いた。また、304-L-CIおよびN-L-CIについては、腐食環境をより厳しくするため、塩化物イオンを3.0kg/m³コンクリート中に混入した。使用したセメントは普通ポルトランドセメントであり、コンクリートの水セメント比は0.612(単位セメント量292kg/m³)である。また、28日圧縮強度は24.4N/mm²である。暴露後1.0, 3.0および5.1年時に各1体ずつ試験に供した。

4.3 試験環境

実際の海洋環境下と同様に、コンクリート外部から塩化物イオンが浸透する場合を想定し、自然海水の散布が1日2回(1回約3時間)繰り返される屋外環境(港湾空港技術研究所内の海水シャワー暴露場)に、鉄筋を埋設

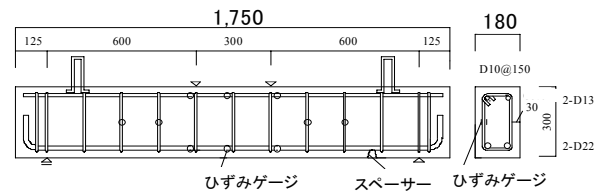


図-6 はり試験体形状

表-7 はり試験体一覧

No	初期Cl量 (kg/m ³)	事前の載荷状況		最大 ひび割れ 幅(mm)	解体 時期 (年)	腐食の 有無
		主筋	せん断 補強筋			
304-S	0	降伏	弾性	0.7	5.1	無
304-L	0	降伏	降伏	2.0	3.0	無
304-L-CI	3.0	降伏	降伏	2.0	1.0	無
N-S	0	降伏	弾性	1.5*	5.1	有
N-L	0	降伏	降伏	2.5*	3.0	有
N-L-CI	3.0	降伏	降伏	2.0	1.0	有

*暴露前の値

した小型角柱試験体およびはり試験体を暴露した。

4.4 試験項目

(1) 小型角柱試験体

試験体解体時に、コンクリート中の塩化物イオン濃度および鉄筋腐食面積率を測定した。

塩化物イオン濃度の測定は、JCI-SC4に準拠して行った。鉄筋位置の塩化物イオン濃度は、図-5に示す場所から試料を採取し、粗・微粉砕後、電位差滴定法によりコンクリート中の塩化物イオン濃度を測定した。また、材齢1年時のみ、鉄筋を埋設していない試験体(150×150×150mm)を用いて、塩化物イオン濃度分布を測定した。

鉄筋腐食面積率の測定は、腐食部分を透明フィルムに写し取るにより行った。

(2) はり試験体

塩化物イオン濃度の測定は、小型試験体同様の方法で実施した。鉄筋位置の塩化物イオン濃度は、図-5同様に、ひび割れ近傍から試料を採取し、測定を実施した。濃度分布は、はり底面から試料を採取し、測定を実施した。腐食面積率についても小型試験体同様の方法で実施した。

4.5 小型角柱試験体における試験結果

(1) 腐食面積率

図-7にひび割れ無しの場合の腐食面積率の時間変化を示す。なお、腐食の有無については表-6中にも示して

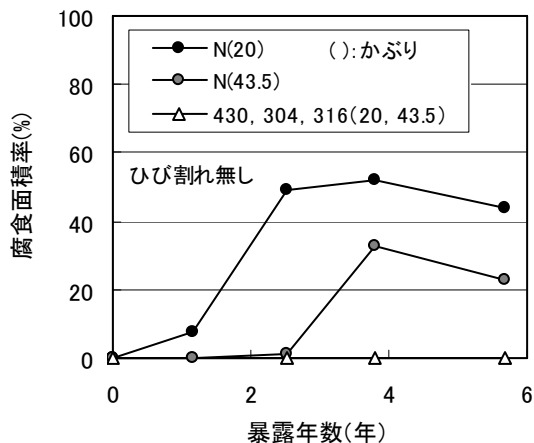


図-7 腐食面積率の変化（ひび割れ無し）

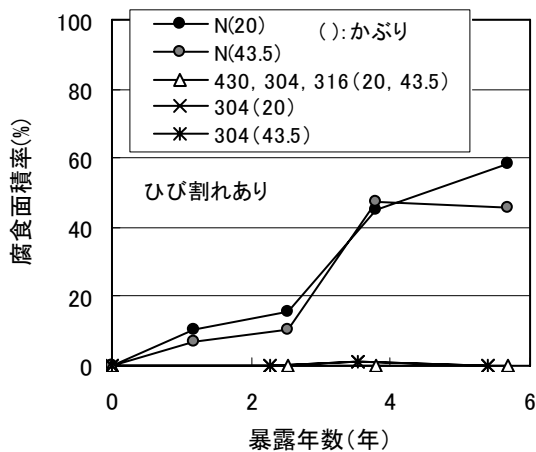


図-8 腐食面積率の変化（ひび割れあり）

いる。普通鉄筋の場合、腐食が徐々に進行していることが分かる。一方、ステンレス鉄筋にはいずれも腐食が認められなかった。

図-8 にひび割れ有りの場合の腐食面積率の時間変化を示す。なお、腐食の有無については表-6 中にも示している。普通鉄筋の場合、かぶりの違いにかかわらず、暴露1年の時点で腐食が開始していることが分かる。一方、SUS430 と SUS316 はいずれも腐食が観察されなかった。SUS304 については、暴露3.8年時にのみ、海水が直接接触していたと推測されるひび割れ部で腐食が観察された。なお、腐食の形態は指で拭けば取れるような液状のものであった。腐食が観察された理由などについては(3)で述べる。

(2) 鉄筋位置における塩化物イオン濃度

暴露1年時に測定した、コンクリート中における塩化物イオン濃度分布を図-9に示す。表面から内部に浸透していることが分かる。また、Fickの拡散方程式の解を用いて、最表面の塩化物イオン濃度 C_0 を算出すると 12.1

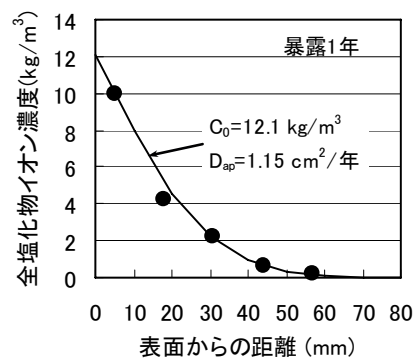


図-9 塩化物イオン濃度分布

kg/m^3 であった。 C_0 の値は、暴露環境が湿潤した環境の場合、時間が経過しても漸増あるいは一定値であることが多いため、この値(12.1)が本暴露環境において到達し得る塩化物イオン濃度の最大値である可能性もある。

図-10 は、各鉄筋位置の塩化物イオン濃度と腐食面積率の関係を示す。なお、暴露3.8年時の結果は、塩化物イオン濃度の測定値が存在しないため掲載していない。普通鉄筋の場合、「港湾基準」における腐食発生限界塩化物イオン濃度である 2 kg/m^3 を超えると明確な腐食が見られた。各ステンレス鉄筋の場合、高濃度となっても腐食が生じておらず、 C_{lim} が 2 kg/m^3 よりもかなり大きいことが分かる。図-10 中に各ステンレス鉄筋において、測定された最大値を記入している。SUS430 で 14.5 kg/m^3 、SUS304 で 12.0 kg/m^3 、SUS316 で 14.2 kg/m^3 であった。すなわち、腐食発生限界塩化物イオン濃度 C_{lim} は少なくともこれらの値以上であると言える。

(3) ひび割れ近傍での腐食に関する考察

図-11 は、かぶり位置のひび割れ幅と腐食面積率の関係を示す。腐食が見られた SUS304(暴露3.8年)の場合、ひび割れ幅が比較的大きく、 0.75 mm であった。ひび割れ幅が大きいことで、海水が直接接触し、腐食が生じやすい状況であったと考えられる。また、この結果は、ステンレス鉄筋の耐食性が SUS304 や SUS430 程度の場合、ある程度ひび割れ幅を制御し、海水が直接接触するのを防ぐ必要があることを示唆するものであると言える。

写真-2 は、腐食が見られた SUS304(暴露3.8年)と腐食が見られなかった SUS430(暴露3.8年)におけるひび割れ面の状況を示す。腐食が見られていない SUS430 の方はひび割れ面に变色が見られないが、腐食が確認された SUS304 の方はひび割れ面全面にわたって茶色に変色していることが分かる。これは、ひび割れの内部まで海水が直接供給され、海水が鉄筋に直接接していたことを意味している。写真-2 における両者の違いは、SUS304

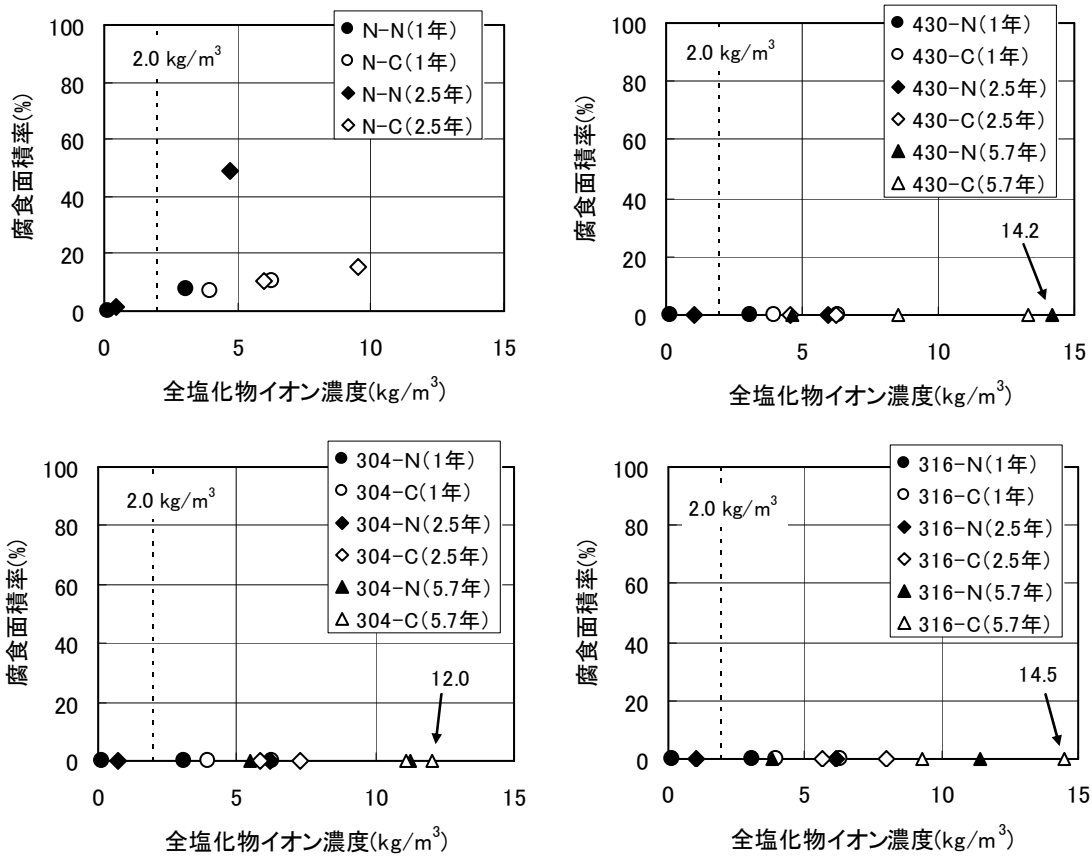


図-10 塩化物イオン濃度と腐食面積率の関係

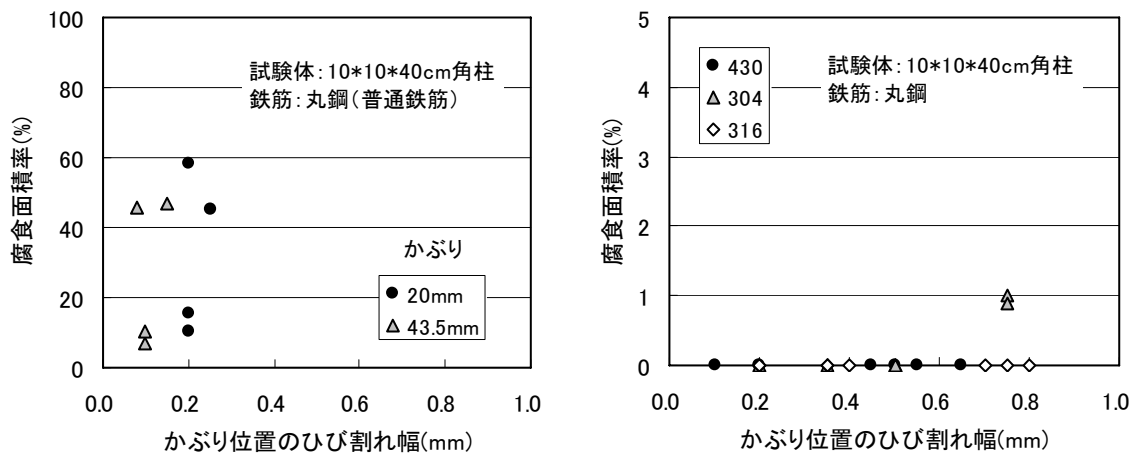


図-11 ひび割れ幅と腐食面積率の関係

の方が SUS430 よりひび割れ幅が大きかったためと考えられる (SUS304 : 0.75mm, SUS430 : 0.65mm)。なお、これらの結果は鉄筋が丸鋼の場合のものである。丸鋼であるために、通常使用される異形鉄筋の場合と比べて鉄筋とコンクリートの付着が十分でないことが、より腐食しやすい環境を作り出した可能性も考えられる。通常使用される異形鉄筋の場合の結果については、4.6 に述べている。

一方、普通鉄筋の場合には、かぶりが 20 あるいは

43.5mm と非常に小さいこともあり、かぶりの位置のひび割れ幅が 0.1~0.2mm 程度でも暴露後 1 年には腐食が生じていた。それに対してステンレス鉄筋の場合は、かぶり位置のひび割れ幅が 0.5mm 程度では全く腐食が確認されなかった。この結果は、ステンレス鉄筋における鋼材の腐食に対するひび割れ幅の限界値（上限値）は、普通鉄筋の場合と比べて、大幅に緩和可能であることを示すものである。

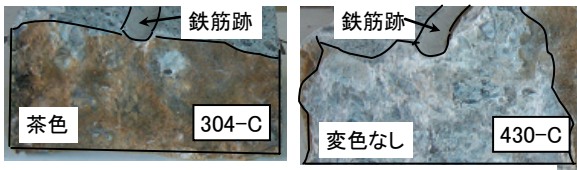


写真-2 ひび割れ面の変色状況 (暴露 3.8 年)

4.6 はり試験体における試験結果

(1) 腐食面積率

図-12 に鉄筋腐食面積率の分布を示す. なお, 位置 0 cm は試験体の中心位置である. 普通鉄筋の場合, 明確な腐食が観察されており, 特にはり中心位置などひび割れが存在している位置で腐食量が多くなっていた. 一方, ステンレス鉄筋 (SUS304) の場合, どの試験体においても目視により腐食は観察されなかった.

(2) 鉄筋位置における塩化物イオン濃度

図-13 は塩化物イオン濃度分布である. 暴露 5.1 年時において, ひび割れが無い主筋位置では 5 kg/m^3 程度, セン断補強筋位置では 7 kg/m^3 程度の塩化物イオンが浸透していた. にもかかわらず, SUS304 においては腐食は観察されていないため, 限界塩化物イオン濃度 C_{lim} はこれらの値以上であると言える.

図-14 はひび割れ付近の鉄筋表面における塩化物イオン濃度を示すため, ひび割れ幅と塩化物イオン濃度の関係で整理したものである. 10 kg/m^3 程度の値を示すものが多く, 最大の濃度は 12 kg/m^3 程度であった. しかしながらどの鉄筋に腐食は見られていない. この結果から, 図-10 同様に, SUS304 の C_{lim} は 12 kg/m^3 以上であるといえる.

(3) 鋼材の腐食に対するひび割れ幅の限界値に関する考察

図-15 は SUS304 の場合の, かぶり位置のひび割れ幅と腐食面積率の関係である. 最大で 2 mm 程度のひび割れ幅の場合でも腐食が観察されなかった.

「土木学会コンクリート標準示方書[構造性能照査編]¹⁰⁾」では, 鋼材の腐食に対する許容ひび割れ幅 (ひび割れ幅の限界値) w_a を表-8 中の式で求めてよいとしている (注: 2008 年に改訂され, 名称が「許容ひび割れ幅」から「ひび割れ幅の限界値」と変更される予定である). ここで, c : かぶりである. 表中には, はり試験体における $c=30\text{mm}$ および 40mm , 港湾 RC 構造物における標準的な値である 70mm , それよりも大きい 100mm の値を代入した w_a の値を示した. 今回のはり試験体の結果 (SUS304 製の異形鉄筋における結果) において, 測定されたひび割れ幅はこれらの値を大きく上回っているに

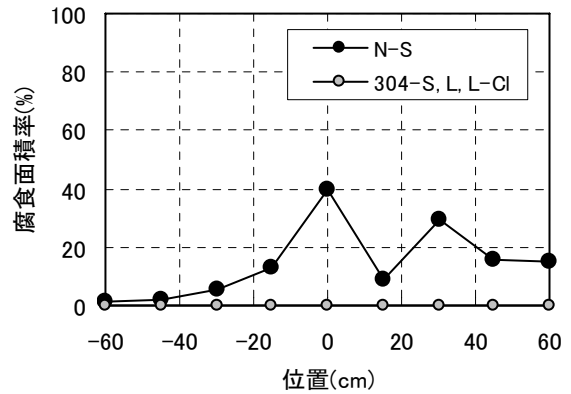


図-12 腐食面積率の分布

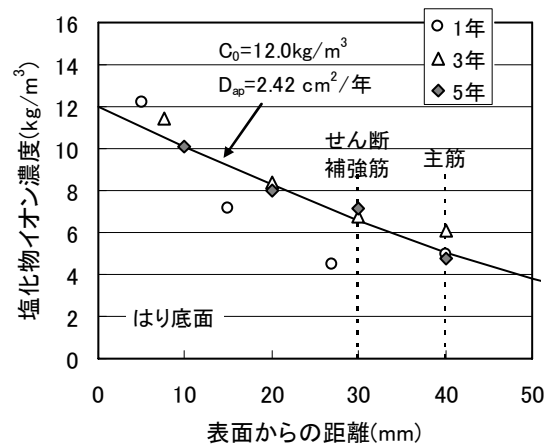


図-13 塩化物イオン濃度分布

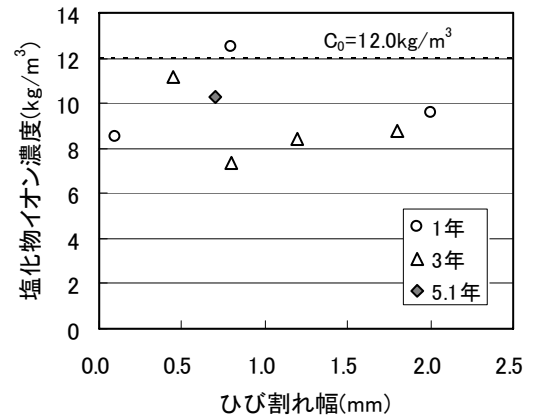


図-14 ひび割れ近傍の鉄筋位置における塩化物イオン濃度

にもかかわらず, 腐食が観察されなかった. すなわち, 4.5 (3) でも述べているように, ステンレス鉄筋を使用する際は, 普通鉄筋の場合と比較して, 鋼材の腐食に対するひび割れ幅の限界値 (上限値) を緩和できることが分かる.

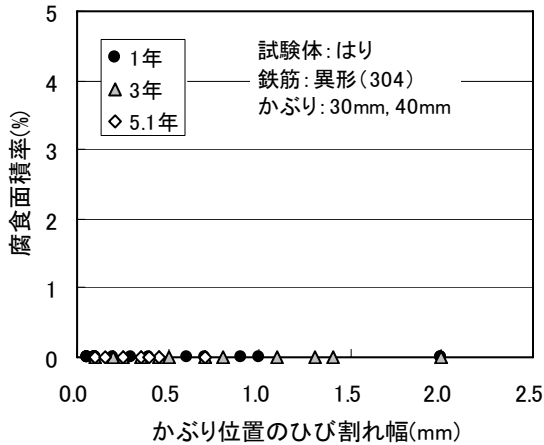


図-15 ひび割れ幅と腐食面積率の関係

表-8 鋼材腐食に対するひび割れ幅の限界値 w_a ¹⁰⁾
(普通鉄筋の場合)

		一般の環境	腐食性環境	特に厳しい腐食性環境
		w_a	0.005c	0.004c
c (mm)	30	0.15	0.12	0.11
	40	0.20	0.16	0.14
	70	0.35	0.28	0.25
	100	0.50	0.40	0.35

4.7 まとめ

本章で得られた知見を以下にまとめる。

- (1) ステンレス鉄筋の腐食発生限界塩化物イオン濃度
コンクリート中における SUS430, SUS304 および SUS316 の耐食性は非常に優れており、腐食発生限界塩化物イオン濃度の値は普通鉄筋の場合よりかなり大きな値を示すことが確認された。小型角柱試験体における鉄筋位置の塩化物イオン濃度と鉄筋腐食面積率の関係 (図-10) より、SUS430 の場合で 14.2 kg/m^3 以上、SUS304 の場合で 12.0 kg/m^3 以上、SUS316 の場合で 14.5 kg/m^3 以上であると考えられた。なお、3. の模擬溶液浸漬試験結果や既往の知見⁵⁾等から推測すると、これらの値以上の値となる可能性が高い。小型角柱試験体に関しては、暴露試験を継続中であり、暴露期間が 10~15 年程度となった際に本検討と同様の調査を実施し、腐食発生限界塩化物イオン濃度に関する検討を行う予定である。

- (2) ステンレス鉄筋使用時における鋼材腐食に対するひび割れの限界値

小型角柱試験体の試験結果において、ステンレス鉄筋 SUS430, SUS304 および SUS316 を使用した場合、かぶり位置(今回は 20 および 43.5mm)のひび割れ幅が 0.5mm 程度であっても、腐食が確認されなかった。一方、普通

鉄筋の場合は、かぶり位置 (今回は 20 および 43.5mm) のひび割れ幅が 0.1~0.2mm 程度で腐食が発生していた。はり試験体の結果においては、鉄筋 (異形) が SUS304 の場合、最大で 2 mm 程度のひび割れ幅の場合でも腐食が観察されなかった。以上の結果は、ステンレス鉄筋 SUS430, SUS304 および SUS316 を使用した場合、普通鉄筋の場合と比較して、鋼材の腐食に対するひび割れ幅の限界値を緩和できることを示すものである。

5. ステンレス鉄筋を用いた港湾コンクリート構造物の初期建設費用およびライフサイクルコストの試算例

5.1 概要

港湾コンクリート構造物の中で最も厳しい塩害環境下に位置している栈橋上部工について、「港湾基準」に基づき、鉄筋腐食に関する照査を行い、そして初期建設費用および LCC (ライフサイクルコスト) 計算を試みる。なお、鉄筋コンクリート構造物の耐久性能照査においては「土木学会示方書」に準拠し、初期建設費用および LCC 計算方法については文献 11) を参考にした。

5.2 ステンレス鉄筋を用いた際の鉄筋腐食に関する照査

設計対象の栈橋の断面を図-16 に、耐久性能照査の際の主要な条件一覧を表-9 に示す。なお、「港湾基準」において、鉄筋コンクリート構造物である栈橋上部工の耐久性能照査は、鉄筋位置の塩化物イオン濃度 C_d が供用年数の間に C_{lim} を上回らないように、コンクリートの品質等を定めるという簡便な手法をとっている。この際、鉄筋位置における塩化物イオン濃度 C_d の将来予測は、Fick の拡散方程式の解である式(7)を用いて行う。

$$C_d = \gamma_{cl} C_o \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{0.1c}{2\sqrt{D_d t}} \right) \right) \quad (7)$$

ここで、

γ_{cl} : 鉄筋位置における塩化物イオン濃度の設計用値 C_d のばらつきを考慮した部分係数で、一般に 1.0 とすることができる。

C_o : コンクリート表面における想定 Cl 濃度

c : かぶり (コンクリート表面から鉄筋表面までの距離) の期待値

D_d : 見かけの塩化物イオン拡散係数の設計値

t : 設計供用年数

$\operatorname{erf}(s)$: 誤差関数, である。

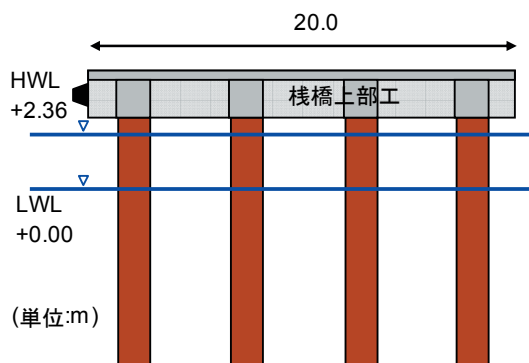


図-16 設計断面

表-9 計算条件

材料	セメント	N	BB
	W/C	0.55	
パラメータ	D_d (cm ² /年)	1.56	1.04
	C_0 (kg/m ³)	15.1	
	c (mm)	50	
	t (年)	100	

今回の試算において、かぶり c については、「港湾基準」における一般環境での最小値である 50 mm と設定した。 C_0 については、「港湾基準」における最大値である 15.1 kg/m³ と設定した。 D_d については、「港湾基準」に示されている以下の方法により求めた。

塩化物イオンに対する設計拡散係数 D_d は、式 (8) により求められる。

$$D_d = \gamma_c D_k + \left(\frac{w}{l} \right) \left(\frac{w}{w_a} \right)^2 D_0 \quad (8)$$

ここで、

γ_c : コンクリートの材料係数. 一般に 1.0 としてよい。

D_k : コンクリートの塩化物イオンに対する拡散係数の特性値 (cm²/年). 式 (9) により求められる。

D_0 : コンクリート中の塩化物イオンの移動に及ぼすひび割れの影響を表す定数. 一般に 200 cm²/年としてよい。

w : ひび割れ幅 (mm)

w_a : ひび割れ幅の限界値 (mm)

w/l : ひび割れ幅とひび割れ間隔の比

$$w/l = 3 (\sigma_{se} / E_s + \epsilon'_{csd})$$

σ_{se} : 鉄筋応力度の増加量 (N/mm²)

E_s : 鉄筋のヤング係数 (N/mm²)

ϵ'_{csd} : コンクリートの収縮およびクリープ等によるひび割れ幅の増加を考慮するための数値。

コンクリートの塩化物イオンに対する拡散係数の特性値 D_k は、式 (9) を用いて定めることができる。

$$D_k = \gamma_p \alpha D_p \quad (9)$$

普通ポルトランドセメントを使用する場合

$$\log D_p = -3.9(W/C)^2 + 7.2(W/C) - 2.5 \quad (10)$$

高炉セメントやシリカフェームを使用する場合

$$\log D_p = -3.0(W/C)^2 + 5.4(W/C) - 2.2 \quad (11)$$

ここで、

α : 換算係数で、普通ポルトランドセメントを使用する場合は一般に 0.65, 高炉セメントやシリカフェームを使用する場合は一般に 1.0 としてよい。

γ_p : D_p の精度に関する安全係数で、一般に 1.0 としてよい。

D_p : コンクリートの拡散係数の予測値 (cm²/年)。

設計拡散係数 D_d 算出の際は、セメントを普通ポルトランドセメント (N) および高炉セメント B 種 (B) とし、W/C=0.55 とした。また、ひび割れに関するパラメータは、文献 11) を参考に $w/l=0.00158$, $w_a/w=1.0$ とした。これらの値を代入して算出した D_d は表-9 中に示されている。

これらの値を用い、式 (7) を用いて 100 年後における塩化物イオン濃度分布を予測した結果を図-17 に示す。この結果より、かぶりが 50 mm の場合、鉄筋位置の塩化物イオン濃度は 12 kg/m³ 程度まで増加する。一方、4. で実施されたステンレス鉄筋の実験結果において、どの鋼種も 12 kg/m³ では腐食は発生していなかった。すなわち、今回使用したステンレス鉄筋であれば、100 年間腐食しないこととなる。すなわち、供用期間中において、コンクリート構造物に対する補修は不要となる。

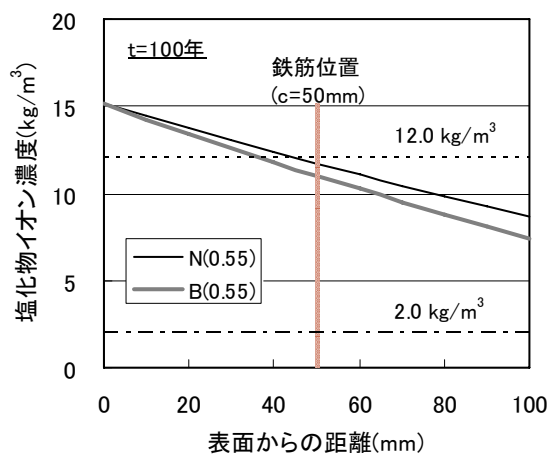


図-17 100年後の塩化物イオン濃度分布

一方、普通鉄筋の場合において、腐食発生限界塩化物イオン濃度 C_{lim} を「港湾基準」における $C_{lim}=2.0 \text{ kg/m}^3$ と設定し、この条件以外は表-9 の計算条件として鉄筋腐食が開始する時期 ($C_d = C_{lim}$ となる時期) を計算すると、セメントが N (W/C=0.55) でかぶり 50mm の場合は 3.5 年、セメントが B (W/C=0.55) でかぶり 50mm の場合は 5.3 年で腐食が開始する結果となる。なお、この結果は設定した計算条件が非常に厳しいことに起因するものである。

5.3 初期建設費用およびライフサイクルコストの試算

初期建設費用および LCC を試算する際において、ステンレス鉄筋の種類は特に定めず、材料単価が普通鉄筋と比べて 5 倍、10 倍の場合について計算を行った。

文献 11) において、図-16 の設計断面に対して、普通鉄筋をかぶり 70mm、コンクリートの水セメント比 W/C=0.45 (セメントは普通ポルトランドセメント) とした場合における上部工の初期建設費用の試算が行われている。この試算結果を元にしてステンレス鉄筋の場合の初期建設費用および LCC の試算を行う。ステンレス鉄筋の場合については、文献 11) の試算結果において、かぶりや W/C は普通鉄筋の場合と同じとして、鉄筋の単価のみを変化させることにより算出した。初期建設費用の試算結果の例を図-18 に示す。なお、普通鉄筋の場合の費用を 1.0 として、それに対する比で示している。ここで、N は普通鉄筋、S-5 は単価が普通鉄筋の 5 倍、S-10 は 10 倍を意味している。初期建設費用は、S-5 で普通鉄筋の約 1.2 倍、S-10 で約 1.4 倍となった。単価が 10 倍となっても総工費としては 1.5 倍にも満たないこととなる。

LCC の計算結果は仮定条件によって大きく異なる。ここでは、文献 11) における LCC 試算結果の一部を、「港湾基準」における計算手法に基づき、再計算したものを参考にして比較を行う。図-19 は、図-18 での普通鉄筋における初期建設費用を元に、LCC の時間変化を試算し

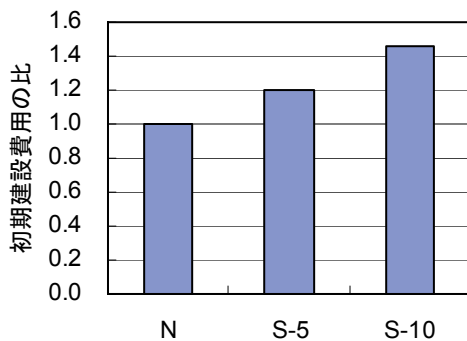


図-18 初期建設費用の比

た例である。なお、普通鉄筋の場合の初期建設費用を 1.0 として、それに対する比で示している。ここで、B-1 は供用前にコンクリート表面に塗料などによる被覆を行い、随時塗り替えを行った場合、B-2 は供用前には何も行わず、劣化が進行し始めた時期に鉄筋に電気防食を行った場合である。計算条件を一覧を表-10 にまとめた。詳細については、文献 11) に示されているので概略のみを以下説明する。

i) B-1 の場合

供用前にコンクリート表面に塗料などによる被覆を行っているため、鉄筋腐食に関する照査は行っていない。ただし、表面を被覆した材料が 10 年で劣化すると想定し、10 年ごとに塗り替えを行うとした。

ii) B-2 の場合

塩化物イオンがコンクリート中に侵入し、鉄筋腐食が

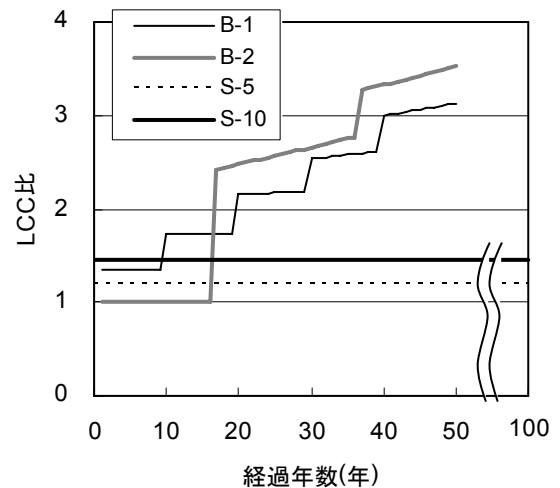


図-19 LCC 比の時間変化

表-10 劣化予測における計算条件

B-1	条件: 初期から被覆. 10年ごとに塗替 ¹¹⁾		
	パラメータ	設定値	参考文献・式
B-2	条件: 腐食ひび割れ発生後に電気防食 ¹¹⁾		
	D_d	0.9	文献1), 11)
	C_0	14.3	文献1), 11)
	C_{lim}	2.0	文献1)
	$c(\text{mm})$	70	文献11)
	鉄筋腐食開始時期(年)	12.6	式(7)
	$\phi(\text{mm})$	29	文献11)
	腐食ひび割れが発生する腐食量(mg/cm^2)	24.1	文献12)
	腐食速度($\text{mg}/\text{cm}^2/\text{年}$)	6.0	文献12)
	腐食開始～腐食ひび割れまでの期間(年)	4.0	
腐食ひび割れ発生時期(年)	16.6		

開始・進行すると、腐食による膨張圧でコンクリートに鉄筋腐食ひび割れが生じる。この時点で、電気防食による補修を実施することとした。なお、腐食ひび割れが発生する腐食量および鉄筋の腐食速度の値は、文献 12)の値を参考に設定した(表-10中に掲載)。

ステンレス鉄筋を用いた場合(S-5, S-10)、初期建設費用は普通鉄筋を用いた場合に比べて確かに高い。しかしながら、普通鉄筋の場合、B-1の試算結果が示すように、初期に被覆を行った時点ではほぼ同等の費用がかかり、1回でも塗り替えを行うとステンレス鉄筋を用いた場合より高くなることが分かる。一方、電気防食(B-2)による補修を実施する場合、1回でも対策を実施するとその時点でステンレス鉄筋の初期建設費用よりはるかに高くなることが分かる。すなわち、ステンレス鉄筋(S-5, S-10)を使用した場合、栈橋上部工の初期建設費用は普通鉄筋の場合よりも1~1.5倍程度高くなるが、供用期間中に各種補修が必要となるような厳しい環境下においては、LCCで比較すると安くなる場合があることが分かる。

なお、初期建設費用LCC試算結果は、構造物の条件、環境条件など各種条件によって大きく変化するため、ここで示した試算結果はある一例にしか過ぎないことを明記しておく。

6. 結論

海洋環境下におけるコンクリート中のステンレス鉄筋 SUS304, SUS316, SUS430 の耐食性、すなわち腐食発生限界塩化物イオン濃度 C_{lim} について検討するため、コンクリート中を模擬した細孔溶液中にステンレス鋼を浸漬させ、各種試験を実施した(模擬溶液浸漬試験)。その結果得られた知見を以下に示す。

(1) コンクリート中に相当する $pH=12.5$ のアルカリ環境における SUS430, SUS304 および SUS316 の耐食性は非常に優れており、非常に厳しい腐食性環境(今回の最大 Cl 濃度=12.7(%:質量比))においても腐食が生じないことが確認された。一方、 pH の低い中性環境(今回は $pH=7.2$) の場合、SUS430 は $Cl=8.3$ (%)で腐食が発生し、SUS304 は $Cl=12.7$ (%)で腐食が発生した。このことから、ステンレス鉄筋の腐食発生限界塩化物イオン濃度はコンクリートの中性化の影響を受けることが分かる。

また、ステンレス鉄筋を埋設したコンクリート試験体(小型角柱試験体およびはり試験体)を、自然海水が供給される環境下(海洋環境下)に長期間暴露し、各種試

験を実施した(海洋環境暴露試験)。この際、ひび割れの影響を確認するため、一部の試験体には暴露前にひび割れを導入した。得られた知見を以下に示す。

(2) コンクリート中における腐食発生限界塩化物イオン濃度の値は普通鉄筋(炭素鋼)の場合よりかなり大きな値を示すことが確認された。SUS430 の場合で 14.2 kg/m^3 以上、SUS304 の場合で 12.0 kg/m^3 以上、SUS316 の場合で 14.5 kg/m^3 以上であると考えられた。

(3) 小型角柱試験体の結果において、ステンレス鉄筋 SUS430, SUS304 および SUS316 を使用した場合、かぶり位置(今回は 20 あるいは 43.5mm)のひび割れ幅が 0.5mm 程度であっても、腐食が確認されなかった。一方、普通鉄筋の場合は、かぶり位置(今回は 20 あるいは 43.5mm)のひび割れ幅が 0.1~0.2mm 程度で腐食が発生していた。はり試験体の結果においては、鉄筋(異形)が SUS304 の場合、最大で 2 mm 程度のひび割れ幅の場合でも腐食が観察されなかった。以上の結果は、ステンレス鉄筋 SUS430, SUS304 および SUS316 を使用した場合、普通鉄筋の場合と比較して、鋼材の腐食に対するひび割れ幅の限界値(上限値)を緩和できることを示すものである。

そして最後に、海洋環境暴露試験で得られた結果から、コンクリート中における腐食発生限界塩化物イオン濃度を仮定し、海洋環境に位置する栈橋上部工におけるライフサイクルコストの試算を行った。その結果得られた知見を以下に示す。

(4) ステンレス鉄筋を用いて建設した場合、供用年数期間のライフサイクルコストで比較すれば、普通鉄筋を用いて建設し、供用期間中に補修を行う場合より安くなる可能性が示された。

(2008年3月10日受付)

謝辞

模擬溶液浸漬試験の遂行に関しては、東京電力(株)平崎敏史氏(元港湾空港技術研究所特別研究員)に多大なご協力を頂きました。

海洋環境暴露試験(小型角柱試験体)の試験体の製作から実験の遂行に関しては、大同特殊鋼(株)水間誠治氏、山川正克氏に多大なご協力を頂きました。また、山梨大学 高橋良輔氏(元港湾空港技術研究所研究官)、ピーエス三菱(株)青山敏幸氏(元港湾空港技術研究所依頼研修生)には、実験の遂行に関して多大なご協力を頂きました。

海洋環境暴露試験(はり試験体)の実験の遂行に関し

ては、大同工業大学山本俊彦教授に多大なご協力を頂きました。

ライフサイクルコストの試算に関しては、(株)日本港湾コンサルタント山内浩氏(元港湾空港技術研究所依頼研修生)に多大なご協力を頂きました。

また、海洋環境暴露試験(小型角柱試験体)の開始時には、(株)ナカボーテック 阿部正美氏(元港湾空港技術研究所主任研究官)からご指導頂きました。また、九州大学 濱田秀則准教授(元港湾空港技術研究所材料研究室長)には、本研究の開始時から遂行、取りまとめまでの長きにわたり、多大なご指導を頂きました。

皆様に対してこの場を借りて厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) (社)日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説(下), pp.486-491, 2007
- 2) 土木学会：コンクリート標準示方書(施工編), p.24-28, 2002.
- 3) The concrete society : Guidance on the use of stainless steel reinforcement, Technical report No.51.
- 4) Pedferri.P, et. al : Behavior of stainless steel in concrete, Repair and rehabilitation of reinforced concrete structures: The state of art, American Society of Civil Engineers, 1998.
- 5) 太星鎬, 野口貴文, 兼松学, 宇城工 : 塩化物イオンを含んだコンクリート中の各種 Cr 鋼防食鉄筋の腐食抵抗性に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, pp.803-808, 2003
- 6) ステンレス協会編：ステンレス鋼便覧, 日刊工業新聞社, p.1362, 1994,
- 7) 望月紀保：コンクリート中の鉄筋の腐食・防食評価技術に関する研究, 秋田大学博士論文, 1998
- 8) 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, 2008 (投稿中)
- 9) 石田哲也, 宮原茂禎, 丸屋 剛：ポルトランドセメントおよび混和材を使用したモルタルの塩素固定化特性, 土木学会論文集 E, Vol.63, No.1, pp.14-26, 2007.1
- 10) 土木学会：コンクリート標準示方書[構造性能照査編], p.97, 2002.
- 11) 土木学会：土木学会コンクリート標準示方書に基づく設計計算例[栈橋上部工編], コンクリートライブラリー116, pp.81-115, 2005.
- 12) (財)沿岸技術研究センター：港湾の施設の維持管理技術マニュアル, pp.201-208, 2007.10

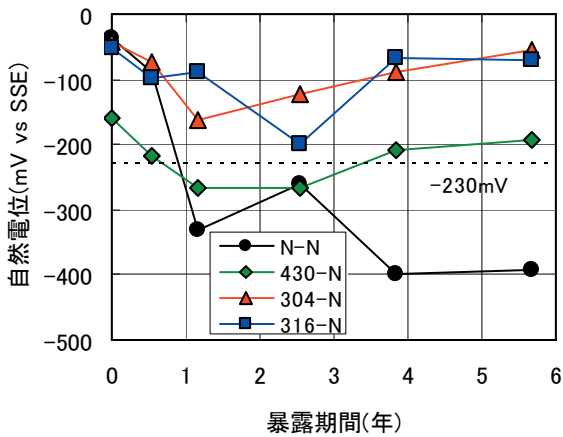
記号表

W/C	： 水セメント比
x	： コンクリート表面からの距離(mm)
$C(x,t)$	： コンクリート表面から $x(mm)$ 離れた位置の塩化物イオン量(kg/m^3)
C_d	： 鉄筋表面におけるCl ⁻ 濃度
C_0	： 表面塩化物イオン量(kg/m^3)
D	： 見かけの塩化物イオン拡散係数($cm^2/年$)
t	： 時間(暴露年数)(年)
erf(s)	： 誤差関数
C_{lim}	： 腐食発生限界塩化物イオン濃度
c	： かぶり c_0
w_a	： ひび割れ幅の限界値(許容ひび割れ幅)

付録

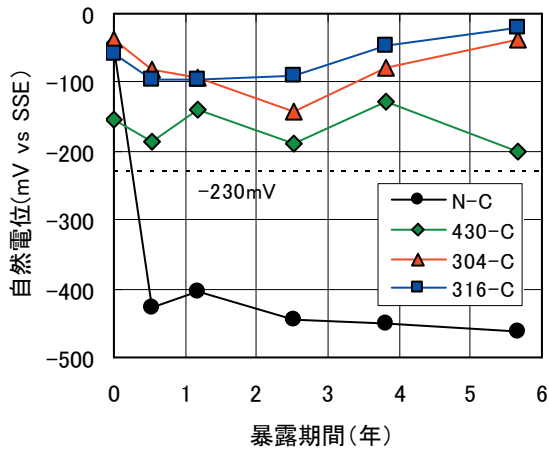
付録A 自然電位測定結果

自然電位は、試験体を20℃の自然海水に1日程度浸漬させた後、照合電極として飽和KCl-Ag/AgCl電極（以下、SSE）を用い、これをコンクリート表面に接触させることにより測定を行った。調査結果一覧を付図A.1～A.2に示す。なお、図中の「-230mV」は、ASTM C 876によれば、「90%以上の確率で腐食」と判定されるしきい値である。普通鉄筋の場合は-230mVを下回っており、腐食が発生していることが分かる。



付図-A.1 自然電位変化

(ひび割れ無し, かぶり 43.5mm の場合)



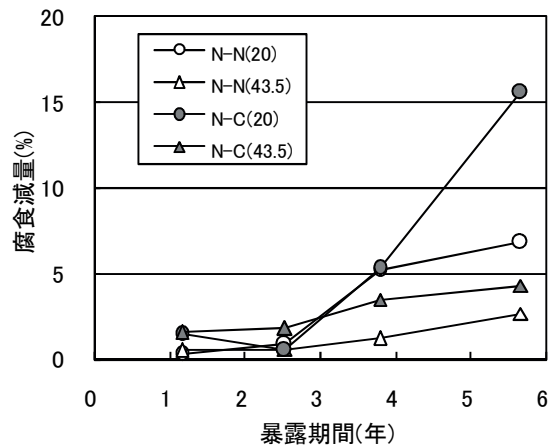
付図-A.2 自然電位変化

(ひび割れあり, かぶり 43.5mm の場合)

付録B 腐食減量測定結果

普通鉄筋(N)の場合の腐食減量変化を付図B.1に示す。時間とともに増加していることが分かる。また、ひび割れがある場合の方が腐食減量は多く、かぶりが小さいほど腐食減量が多くなっている。

なお、ステンレス鉄筋の場合は腐食減量が認められないので掲載していない。



付図-B.1 腐食減量の変化

付録 C 塩化物イオン濃度測定結果

小型角柱試験体の鉄筋位置における塩化物イオン濃度の値を付表C.1に示す。

付表 C.1 鉄筋位置の塩化物イオン濃度

1)ひび割れ無し:N

鋼種	かぶり (mm)	暴露期間(年)			
		1	2.5	3.8	5.7
N	20	3.1	4.7		
	43.5	0.2	0.5		
430	20	3.1	5.9		14.2
	43.5	0.2	1.0		4.6
304	20	3.1	6.2		11.2
	43.5	0.2	0.7		5.5
316	20	3.1	6.1		11.4
	43.5	0.2	1.0		3.8

2)ひび割れあり:C

鋼種	かぶり (mm)	暴露期間(年)			
		1	2.5	3.8	5.7
N	20	6.3	9.5		
	43.5	4.0	6.0		
430	20	6.3	6.3		13.3
	43.5	4.0	4.6		8.5
304	20	6.3	7.3		12.0
	43.5	4.0	5.9		11.1
316	20	6.3	8.0		14.5
	43.5	4.0	5.6		9.3

太字:腐食発生

港湾空港技術研究所資料 No.1176

2008. 6

編集兼発行人 独立行政法人港湾空港技術研究所

発行所 独立行政法人港湾空港技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号

TEL.046(844)5040 URL.<http://www.pari.go.jp/>

印刷所 株式会社 大成社

Copyright © (2008) by PARI

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of PARI

この資料は、港湾空港技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は港湾空港技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。