

# 論文 ステンレス鋼鉄筋のコンクリート中での耐食性に関する実験的研究

小島 正朗\*1・梅国 章\*2・下澤 和幸\*3

**要旨:** コンクリート中に埋設したステンレス鋼鉄筋 (SUS304, SUS410L) の耐食性を, コンクリート中の塩化物イオン量, 中性化の有無およびかぶり厚さを水準として, 普通鋼 (SD345) と比較評価した。ステンレス鋼鉄筋の耐食性は極めて高く, 厳しい条件下では腐食を生じたが, 軽微であり普通鋼と比べて腐食量は僅かであった。本実験では, 普通鋼鉄筋の発錆限界塩化分イオン量とされる  $1.2\text{kg/m}^3$  と同程度の腐食減量になるときの塩化物イオン量は, SUS304, SUS410L でそれぞれ  $24\text{kg/m}^3$  以上,  $15\text{kg/m}^3$  程度であった。また, 中性化も同時に生じている極めて厳しい状況下では, SUS304, SUS410L でそれぞれ  $24\text{kg/m}^3$  以上,  $3\text{kg/m}^3$  程度であった。

**キーワード:** ステンレス鋼鉄筋, SUS304, SUS410L, 中性化, 塩化物イオン量, 発錆限界塩化物イオン量

## 1. はじめに

コンクリートが健全であれば, 埋設された鉄筋 (普通鋼) は, 表層が不動態皮膜で保護されるので, 腐食を生じることはない。しかし, コンクリートの中性化や, コンクリート中の塩化物イオン濃度が限界濃度を超えると, 不動態皮膜が壊れ鉄筋腐食が起きるため, 耐久性の問題が起きてくる。

一方, ステンレス鋼のように普通鋼と較べて耐食性が高い鉄筋を適用すれば, 著しく耐久性の高い鉄筋コンクリート造を実現できる可能性がある。ステンレス鋼は, Cr 含有量が 10.5% 以上の鋼材であり, Cr の薄い酸化皮膜が鋼材表面に形成され, これが保護皮膜として働き, 普通鋼よりも極めて高い耐食性を示す。ステンレス鋼はコストが普通鋼の数倍~十数倍と高価であるが, 劣化の懸念される部位に限定するなど工夫して適用すれば, コストを抑えて構造物の建替を延長することができ, LCC, LCCO<sub>2</sub> でメリットが期待できる<sup>1)</sup>。

ステンレス鋼鉄筋のコンクリート中での耐食性に関しては, 我が国ではまだ研究例も少なく<sup>2)-4)</sup>, 発錆限界塩化物イオン量, 中性化した場合の耐食性, 発錆後の腐食の進展については十分なデータが蓄積されていない。本研究では, ステンレス鋼のコンクリート中での耐食性に関する基礎データの取得を目的に, 主成分が Cr-Ni 系の SUS304 と, Cr 系の SUS410L の 2 種類のステンレス鋼鉄筋について, コンクリート中での耐食性を評価した。

## 2. 実験概要

### 2.1 実験の因子水準と組合せ

実験の因子水準の組合せを表-1 に示す。条件は, 塩害等によりコンクリート中に塩化物イオンが侵入し内在する場合と (以下, AC シリーズ), 塩害に加え, コンクリートが中性化した場合の非常に厳しい条件 (以下, CAC シリーズ) の 2 通りとした。CAC シリーズは, 中性化が進行する条件では乾燥収縮ひび割れが入る可能性が高いことを想定し, 試験体にあらかじめひび割れを導入した。

### 2.2 使用材料

#### (1) ステンレス鋼鉄筋

ステンレス鋼鉄筋と, 比較用の普通鋼鉄筋の主要成分および機械的性質を表-2 に示す。SUS304 は, 一般耐食用として広く使用されているオーステナイト系の Cr-Ni 鋼である。SUS410L は, Ni を含まず Cr 含有量を

表-1 因子水準の組み合わせ

シリーズ	コンクリート			鉄筋		
	記号	塩化物イオン量 (kg/m <sup>3</sup> )	中性化	ひび割れ	鋼種	かぶり厚さ D(mm)
塩化物シリーズ (AC シリーズ)	AC-1	1.2	無	無	SUS304 SUS410L SD345	15, 30
	AC-2	3				
	AC-3	9				
	AC-4	15				
	AC-5	24				
塩化物+中性化シリーズ (CAC シリーズ)	CAC-1	0.6	有	有	SUS304 SUS410L SD345	15, 30
	CAC-2	1.2				
	CAC-3	3				
	CAC-4	9				
	CAC-5	24				

\*1 (株) 竹中工務店 技術研究所 主任研究員 工修 (正会員)

\*2 (株) 竹中工務店 技術研究所 企画部課長 博士 (工学) (非正会員)

\*3 (財) 日本建築総合試験所 試験研究センター 主査 (正会員)

表-2 使用した鋼材の化学成分および機械的性質

鋼材種類	化学成分(%)							機械的性質		
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	0.2%耐力(*降伏点) (N/mm <sup>2</sup> )	引張り強さ (N/mm <sup>2</sup> )	伸び (%)
SUS304	0.06	0.31	1.71	0.033	0.026	8.02	18.72	395	597	50%
SUS410L	0.008	0.36	0.33	0.023	0.004	—	12.67	332	494	33%
SD345	0.23	0.20	0.87	0.029	0.014	—	—	363*	575	22%

表-3 コンクリートの調合

粗骨材の最大寸法(mm)	スランプ (cm)	水セメント比(%)	空気量 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				高性能 AE 減水剤
					水	セメント	細骨材	粗骨材	
20	18±2.5	60	4.5±1.5	49.9	180	300	861	927	C×0.35%

13%程度に抑えたフェライト系のクロム鋼で、SUS304より耐食性は劣るものの経済性に優れたものである。ステンレス鋼鉄筋は、ステンレス本来の耐食性を得るために酸洗いにより黒皮除去処理を施すのが一般的であることから、いずれのステンレス鋼鉄筋も酸洗いした製品を用いた。比較用の普通鋼鉄筋 (SD345) は、一般的な黒皮付きのものを用いた。

(2) コンクリート

コンクリートの調合を表-3 に示す。セメントは、普通ポルトランドセメント (3社混合、密度 3.15g/cm<sup>3</sup>) を用いた。細骨材には山砂 (表乾密度 2.56g/cm<sup>3</sup>, 吸水率 1.65%) を、粗骨材には砕石 2005 (表乾密度 2.70g/cm<sup>3</sup>, 吸水率 0.56%, 実積率 58.2%) を用いた。また、混和剤は、ポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤を用いた。コンクリート中の塩化物イオン量(Cl<sup>-</sup>)は、0.6~24kg/m<sup>3</sup>の範囲となるよう、NaCl 試薬 (特級) をコンクリート練り混ぜ時に混入した。

2.3 試験体の形状および寸法

試験体の形状および寸法を図-1 に示す。鉄筋は、両端 50mm をエポキシ樹脂で防錆処理した。同種の鉄筋が、かぶり厚さ 15mm, 30mm となるようウレタンフォームで型枠内に固定しコンクリートを打設した。CAC シリーズの試験体は、かぶり厚さ 15mm, 30mm の各面に、3点曲げ荷重によって幅 0.3~0.4mm 程度のひび割れを導入し、その後、ひび割れを導入した 2面を除く 4面をエポキシ樹脂でコーティングした。

2.4 養生方法

(1) 初期養生および促進中性化養生

コンクリート打設 24 時間後に脱型し、材齢 1 週まで温度 20±2℃, 湿度 90±5%の室内で養生した。その後、材齢 4 週まで温度 20±2℃, 湿度 60±5%の室内で気中養生し、AC シリーズは、その後、腐食促進養生を行った。

CAC シリーズは、気中養生中に、ひび割れの導入とエポキシ樹脂によるシールを行い、材齢 4 週から炭酸ガス濃度 5±0.2%, 温度 20±2℃, 湿度 60±5%の条件で、促進中性化養生した。同時に作製した 10×10×40cm 供試体で中性化の進行状況を確認し、中性化深さ 15mm 程度になるまで促進中性化養生を施した。その後、腐食促進養生した。

(2) 腐食促進養生

所定の初期養生を終えた試験体を、腐食を促進する目的で、温度 40±2℃, 湿度 10±5%の乾燥過程 4 日間、温度 40±2℃, 湿度 95±5%の湿潤過程 3 日間を 1 サイクル (合計 7 日) とする乾湿繰り返し養生を行った。CAC シリーズは、全ての試験体の促進中性化養生を終了するまで、試験体をビニール袋に密封保管し、腐食促進養生を同時に開始した。

2.5 試験項目および試験方法

試験項目および試験方法を表-4 に示す。

AC シリーズでは、ステンレス鋼を腐食促進養生 35, 70 サイクル終了後に、比較用の普通鋼は、15, 35, 70

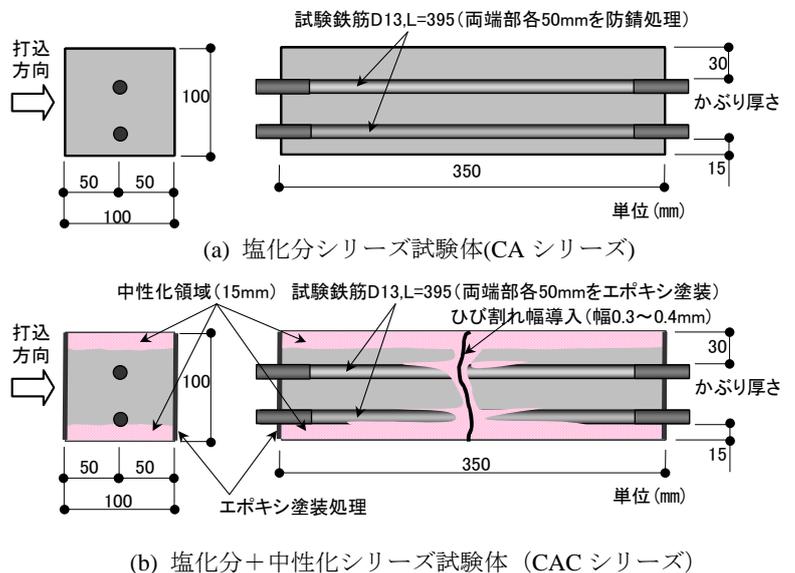


図-1 試験体の形状

サイクル終了後に、腐食試験を実施した。

CAC シリーズは、促進中性化養生の終了後と、腐食促進養生 15, 30 サイクル終了後に腐食試験を実施した。

腐食面積率は、鉄筋表面に透明シールを貼り付け、腐食部分を黒インクにて転写した後、画像処理装置を用いて測定した。

腐食減量は、脱酸素溶液を用いて錆を除去して測定した。錆の多い鉄筋は、脱酸素溶液に約 12 時間浸漬した後、プラスチックブラシを用いて流水により洗浄して錆を除去した。錆の少ない鉄筋は、錆部分に、脱酸素溶液を浸漬したウェスを数分間湿布した後、プラスチックブラシを用いて流水により洗浄して錆を除去した。錆除去作業を終えた後、エタノールにて脱脂し、電子天秤（読取限度 0.001g）を用いて質量を測定した。

塩化物イオン量は、AC シリーズ、CAC シリーズの腐食促進養生開始時に、試験体表面から 15mm 間隔に切り出した試験片に対し、JIS に準拠して、電位差滴定法により全塩分量を測定した。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 コンクリートの試験

##### (1) フレッシュコンクリートの特性および圧縮強度

コンクリートの試験結果を表-5 に示す。塩化物イオン量が多いほど、空気量はやや多くなる傾向であった。フレッシュコンクリート中の塩化物イオン量の測定結果は、混入量の 80~95% 程度の値であった。

圧縮強度は、塩化物イオン量が大きくなるほど低下し、塩化物イオン量が 24kg/m<sup>3</sup> では、0.6kg/m<sup>3</sup> の場合に対して約 35% 圧縮強度が低下した。NaCl を 9kg/m<sup>3</sup> まで混入したモルタルの特性の報告<sup>5)</sup>では、強度低下は 10% 程度であったが、本実験では、大量に混入したこともあり、低下幅が大きかったと考えられる。今回のように大量に塩化物をコンクリート中に混入する場合と、外部から徐々に塩化物イオンが侵入してくる場合とでは、水和生成物や細孔構造、細孔溶液の特性が異なっている可能性もあるが、塩化物イオン濃度が異なる場合の、鋼材種別による耐食性の差異は評価可能と考えられる。

表-4 試験項目および試験方法

区分	試験項目	試験方法
フレッシュ コンクリート	スランプ	JIS A 1101
	空気量	JIS A 1128
	塩化物量	JIS A 1144
硬化 コンクリート	圧縮強度	JIS A 1108
	中性化深さ	JIS A 1153
	塩化物イオン量	JIS A 1154
鉄筋腐食	腐食面積率	JCI-SC1
	腐食減量	JCI-SC1

##### (2) コンクリートの中性化

CAC シリーズにおいて、塩化物イオン量 9kg/m<sup>3</sup> 以下の試験体では、促進養生 4 ヶ月以内に目標の約 15mm まで中性化が進行した。塩化物イオン量が 24kg/m<sup>3</sup> の場合は、約 1 年の間、促進中性化養生を行ったが、中性化深さは 7.5mm であった。目標値を下回ったが、試験体にはあらかじめひび割れを導入しており、部分的には鉄筋近傍まで中性化していると判断し、促進中性化処理を終え、CAC シリーズの鉄筋腐食量の初期値を測定した。写真-1 に、初期値測定時に CAC シリーズ 24kg/m<sup>3</sup> の試験体の中性化状況を確認した状況を示す。あらかじめ曲げひび割れを導入したこと、この時に鉄筋に沿ったひび割れも生じたこと、試験体の小口から腐食ひび割れが生じたこと等の理由で、いずれの試験体も、かぶり厚さ 15mm の埋設鉄筋の位置まで、中性化が到達している状況を確認できる。

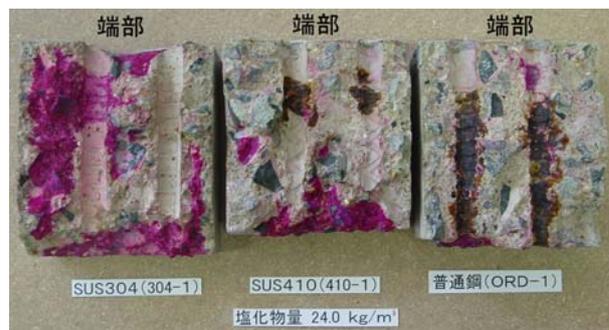


写真-1 中性化の状況 (塩化物イオン量 24kg/m<sup>3</sup>)

表-5 コンクリートの試験結果

No	シリーズ		塩化物イオン量 (kg/m <sup>3</sup> )	フレッシュコンクリートの試験結果				硬化コンクリートの試験結果		
	AC	CAC		スランプ (cm)	空気量 (%)	塩化物イオン量 (kg/m <sup>3</sup> )	温度 (°C)	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )		促進中性化深さ (mm)[促進日数]
								1 週	4 週	
1	—	CAC-1	0.6	18.0	4.1	0.58	20.7	26.3	36.5	18.0[119 日]
2	AC-1	CAC-2	1.2	18.5	4.6	1.12	20.8	26.4	34.5	19.5[119 日]
3	AC-2	CAC-3	3	18.5	5.1	2.70	20.9	25.8	31.7	16.5[110 日]
4	AC-3	CAC-4	9	21.0	5.7	7.72	20.7	22.1	27.0	14.5[110 日]
5	AC-4	—	15	19.0	6.0	12.19	19.5	20.0	26.6	—
6	AC-5	CAC-5	24	18.0	5.3	18.32	19.5	16.7	23.8	7.5[342 日]

### (3) コンクリート中の塩化物イオン

腐食促進養生を開始前の、ACシリーズ、CACシリーズのコンクリート中の全塩分量を測定した結果を図-2に示す。ACシリーズは、やや表層の濃度が高い傾向であった。気中養生中の水分の表面への移動に伴って、塩化物イオンが表層に移動したためと考えられる。一方、中性化処理を終えたCACシリーズでは、中性化に伴う塩化物イオンの濃縮現象<sup>9)</sup>により、表面から15~30mmの位置で最も濃度が高くなっていた。AC、CACの両シリーズとも断面内に塩化物イオン濃度の勾配が認められるものの、鉄筋位置付近では、ほぼ計画どおりの塩化物イオン量であることが確認できた。

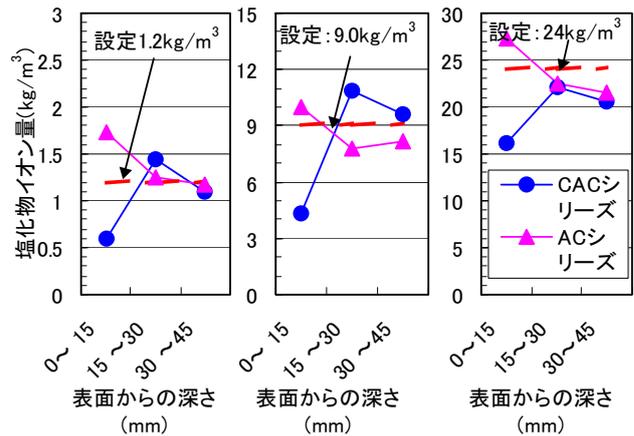


図-2 塩化物イオン量(全塩分)の測定結果

### 3.2 腐食試験

#### (1) 腐食面積率

図-3に、腐食促進養生サイクルと腐食面積率の関係を示す。図-4に、塩化物イオン量と腐食面積率の関係を示す。

また、鉄筋の発錆状況のスケッチを図-5、図-6に示す。また、ステンレス鋼鉄筋の腐食部の実体顕微鏡写真を写真-2に示す。

ACシリーズのSUS304では、塩化物イオン量9kg/m<sup>3</sup>で70サイクルにおいて、写真-2(a)の例に示すような

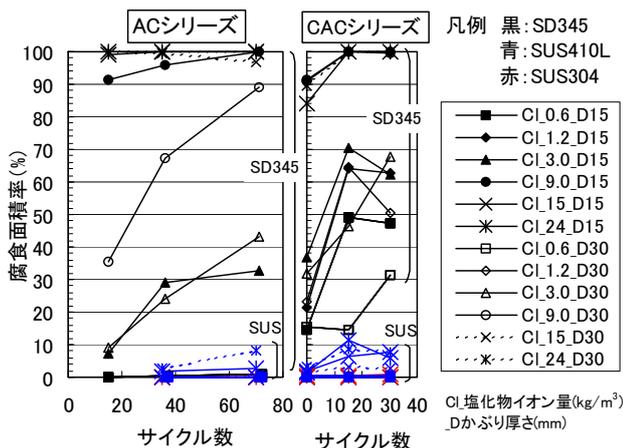


図-3 腐食促進養生サイクル数と腐食面積率の関係

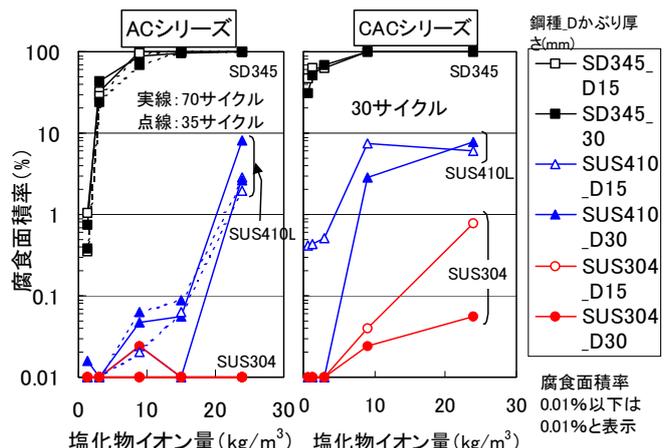


図-4 塩化物イオン量と腐食面積率の関係

塩化物	位置	SUS304	SUS410L	SD345
1.2 kg/m <sup>3</sup>	型枠面側	(腐食は認められない)		
	内部側			
9.0 kg/m <sup>3</sup>	型枠面側	(腐食は認められない)		
	内部側			
15 kg/m <sup>3</sup>	型枠面側	(腐食は認められない)		
	内部側			
24 kg/m <sup>3</sup>	型枠面側	(腐食は認められない)		
	内部側			

図-5 ACシリーズ 70サイクル後の腐食状況(かぶり厚さ30mm)

塩化物	位置	SUS304	SUS410L	SD345
0.6 kg/m <sup>3</sup>	型枠面側	(腐食は認められない)		
	内部側			
9.0 kg/m <sup>3</sup>	型枠面側	(腐食は認められない)		
	内部側			
24 kg/m <sup>3</sup>	型枠面側	(腐食は認められない)		
	内部側			

図-6 CACシリーズ 30サイクル後の腐食状況(かぶり厚さ15mm)

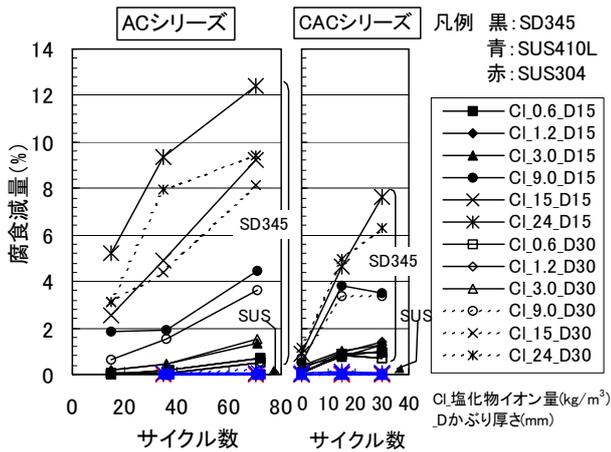


図-7 腐食促進養生サイクル数と腐食減量の関係

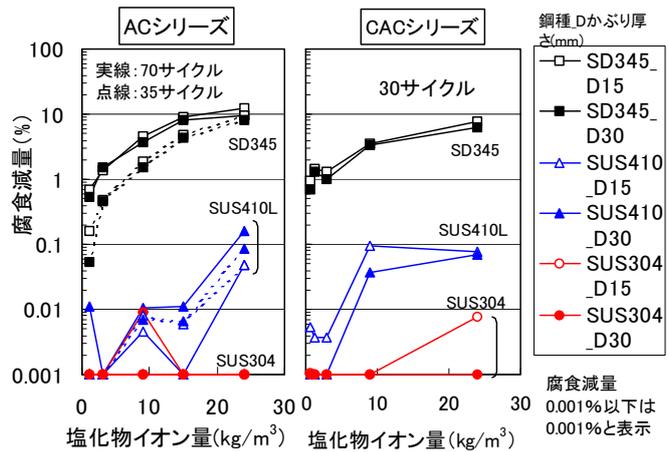


図-8 塩化物イオン量と腐食減量の関係

1mm程度の斑点状の非常に小さな点錆が3個(腐食面積率0.03%)生じていたが、これを除くと、塩化物イオン量24kg/m<sup>3</sup>でも全く錆は生じていない。SUS410Lは、SUS304の場合より腐食が生じており、塩化物イオン量9, 15kg/m<sup>3</sup>で、腐食面積率0.05%、大きさ1mm程度のごく小さい点錆が6~7個生じ、塩化物イオン量24kg/m<sup>3</sup>では局部的ではあるが面的に広がった錆が発生し(図-5)、腐食面積率が0.2~0.6%となった。

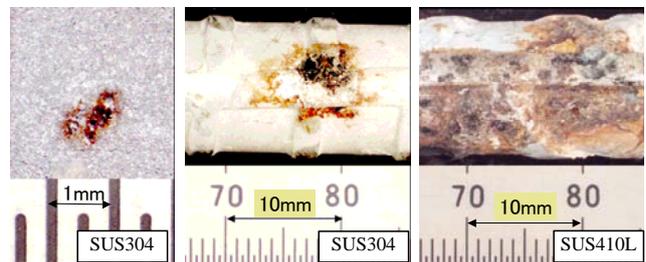
CACシリーズは、塩化物イオン量が0.6~24kg/m<sup>3</sup>内在するうえ、コンクリートを中性化させているため、ACシリーズより条件が厳しく、腐食面積率もやや大きい傾向が伺える。SUS304については、ACシリーズでは全く腐食しなかったが、CACシリーズでは、塩化物イオン量24kg/m<sup>3</sup>の条件で、腐食が生じ、面積率で約1%、9kg/m<sup>3</sup>の条件では、0.05%の面積の腐食が見られた。SUS410Lについては、塩化物イオン量が最も少ない0.6kg/m<sup>3</sup>の条件でも、かぶり厚さ15mmの鉄筋に約0.4%の腐食面積となる腐食を生じた。

### (2) 腐食減量

図-7に、腐食促進養生サイクルと腐食減量の関係を示す。また、塩化物イオン量と腐食減量の関係を図-8に示す。普通鋼は、AC、CACのいずれのシリーズも、腐食促進養生サイクルが進むと腐食減量は10%程度となった。SUS304では、最大でも0.01%程度の腐食減量で、極めて僅かであった。SUS410Lは、塩化物イオン量が24kg/m<sup>3</sup>の場合でも、最大でも0.1%の腐食減量であった。これは、普通鋼鉄筋の発錆限界塩化物イオン量とされる1.2kg/m<sup>3</sup>の条件<sup>7)</sup>での本実験での腐食減量と同等であった。塩化物イオン量が等しいときの腐食減量を各鋼種で比較すると、普通鋼に対しSUS410Lは2オーダー小さく、SUS304では3オーダー以上小さくなった。

### (3) 限界塩化物イオン量の考察

各シリーズにおける、腐食面積率と腐食減量の関係を図-9に示す。ステンレス鋼は普通鋼と比べ、腐食面積が同等でも腐食減量は小さくなっている。写真-2に示



(a)小斑点状の例 (b)面状に広がる例 (c)激しい部位例

写真-2 腐食状況の拡大写真

すように、腐食は、まず小斑点状の点錆(写真-2(a))が生じ、さらに腐食が進むと、面状に染み状の錆(写真-2(b))がみられるようになり、SUS410Lでは、はさらに腐食が進み写真-2(c)のような激しい腐食が生じる。腐食面積率と腐食減量の関係において、ステンレス鋼鉄筋は、普通鋼鉄筋に比べて腐食面積率が大きく、腐食減量が小さくなっているが、この理由として、ステンレス鋼鉄筋にみられる写真-2(b)のような面的に広がった染み状の部分も腐食面積として測定していることが理由として考えられる。腐食面積率では、過大に評価する可能性があるため、ステンレス鋼鉄筋の腐食量の定量評価は、腐食減量のほうが適切であると考えられる。

普通鋼の発錆限界塩化物イオン量を1.2kg/m<sup>3</sup>として、本実験における塩化物イオン量を1.2kg/m<sup>3</sup>の条件での腐食減量である0.1%を限界値と仮定し、SUS304鉄筋、SUS410L鉄筋の限界塩化物イオン量を、図-6~9を元に検討した。

SUS304鉄筋では、塩化物イオンのみの場合(ACシリーズ)には腐食は全く生じず、発錆限界塩化物イオン量としては24kg/m<sup>3</sup>以上となる。

SUS304鉄筋でコンクリートが中性化している場合(CACシリーズ)、塩化物イオン量24kg/m<sup>3</sup>で図-6に示すように一部に面状に広がる染み状の錆が生じたが、腐食減量は0.01%程度とごく僅かなため、限界塩化物イオ

量は  $24\text{kg/m}^3$  以上と判断できる。

SUS410L 鉄筋を使用し、塩化物イオンのみの場合 (AC シリーズ), 塩化物イオン量  $9, 15\text{kg/m}^3$  において,  $1\text{mm}$  程度の斑点状の点錆が数点生じているが, 腐食量は  $0.1\%$  程度で許容範囲内であり, 限界塩化物イオン量は  $15\text{kg/m}^3$  と判断できる。

SUS410L 鉄筋使用し, コンクリートが中性化している場合 (CAC シリーズ), 塩化物イオン量  $0.6\text{kg/m}^3$  からは発錆がみられたが, 面的に広がる染み状の腐食である。腐食減量が  $0.1\%$  を超えない  $3\text{kg/m}^3$  が限界塩化物イオン量と判断できる。

今回の耐食性評価試験は, 水セメント比が  $60\%$  と大きな調合のコンクリートを用い,  $40^\circ\text{C}$  での乾湿繰り返しによる腐食促進養生という厳しい条件の元で, 安全側の評価が可能となるよう実施した。しかし, 試験中に塩化物イオンが移動する影響や, 塩化物イオンが外部から侵入する場合とあらかじめコンクリート中に混入されている場合での違いの影響, 実験と暴露試験との違いなどが指摘されており<sup>7)</sup>, また, 数百年といった長い供用期間を想定する場合には, 許容する腐食減量の限界値を見直す必要があると考えられるので, 今後の課題としたい。

#### 4. 結論

ステンレス鋼鉄筋のコンクリート中での耐食性を, コンクリート中への塩化物イオンの混入量, 中性化の有無を水準とし, 普通鋼鉄筋と比較検討した結果, 以下の知見が得られた。

- (1) 普通鋼鉄筋に比べて, ステンレス鋼鉄筋の耐食性は著しく高い。しかし, 塩化物イオン量の増大や, コンクリートの中性化との複合劣化により, 腐食が生じる。
- (2) ステンレス鋼は, 同じ腐食面積率の場合でも, 腐食減量が普通鋼鉄筋と比べて著しく小さいため, 腐食減量で評価することが妥当である。
- (3) 普通鋼の発錆限界塩化物イオン量を  $1.2\text{kg/m}^3$  と仮定し, 本実験での同条件における腐食減量を限界値として, ステンレス鋼鉄筋の限界塩化物イオン量を設定すると以下のとおりである。
  - a) SUS304 鉄筋, 塩害の場合  
限界塩化物イオン量  $24\text{kg/m}^3$  以上
  - b) SUS304 鉄筋, 塩害+中性化の場合  
限界塩化物イオン量  $24\text{kg/m}^3$  以上
  - c) SUS410L 鉄筋, 塩害の場合  
限界塩化物イオン量  $15\text{kg/m}^3$
  - d) SUS410L 鉄筋, 塩害+中性化の場合  
限界塩化物イオン量  $3\text{kg/m}^3$

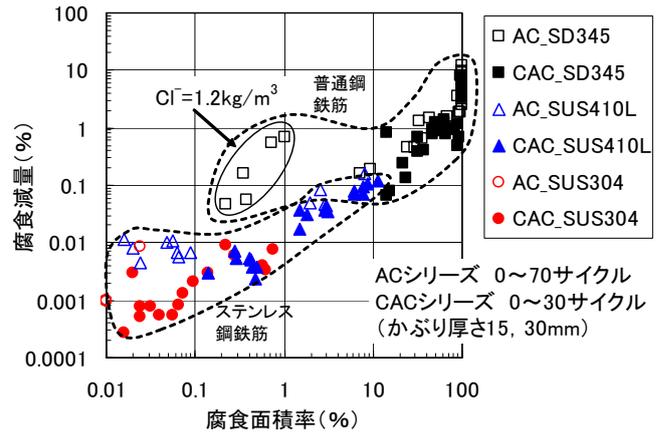


図-9 腐食面積率と腐食減量の関係

本研究は, 国土交通省住宅・建築関連先導技術開発助成事業「ステンレス鋼鉄筋による建築用超高耐久 RC 造の開発」の一環として行われた。

#### 謝辞

研究開発メンバーの新日鐵住金ステンレス (株) には, 写真を提供頂いた。末尾ながら記して謝意を表す。

#### 参考文献

- 1) 五十嵐健: 良質な住宅ストックの普及による  $\text{CO}_2$  削減効果の考察, 日本建築学会, 建築経済委員会第 21 回建築生産シンポジウム 2005.7
- 2) 河村彰男, 山路 徹, 河野広隆, 長滝重義: コンクリート中のステンレス鉄筋の耐腐食性能, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.1019-1024, 2006
- 3) 太 星鎬, 野口貴文, 宇城 工: 塩分を含むコンクリート中の Cr 鋼鉄筋の防食性に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 587 号, pp.39-44, 2005.1
- 4) 太 星鎬, 野口貴文, 宇城 工: 中性化と塩害複合劣化環境下でのコンクリート中の Cr 鋼鉄筋の防食性に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 600 号, pp.29-33, 2006.2
- 5) 宇野祐一, 小林一輔: 塩化ナトリウムの混入がモルタルの諸性状に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.12, No.1, pp.465-470, 1990
- 6) 小林一輔: コンクリートの炭酸化に関する研究, 土木学会論文集, No.433/V-15, pp.1-14, 1991.8
- 7) 土木学会: コンクリート標準示方書【2007 年制定】, pp.119-120