

# 論文 塩化物イオン高含有コンクリート中の SUS 鉄筋との接触が普通鉄筋の腐食に与える影響

安藤 智史\*<sup>1</sup>・河野 広隆\*<sup>2</sup>・服部 篤史\*<sup>3</sup>・石川 敏之\*<sup>4</sup>

**要旨：** ステンレス鉄筋は優れた耐食性を示す一方で、普通鉄筋との接触により異種金属接触腐食を起こす恐れがある。本研究では、塩化物イオンを多量に含有するコンクリート中で普通鉄筋がステンレス鉄筋と接触している場合に、異種金属接触が腐食を加速させることがあるかどうかを検討することを目的とし、塩化物イオン濃度、ステンレス鉄筋の種類、腐食促進法を実験要因として異種金属接触実験を行った。その結果、コンクリート中の塩化物イオン濃度が  $9\text{kg/m}^3$  以下の条件では、普通鉄筋とステンレス鉄筋の接触が普通鉄筋の腐食を加速させることはなかった。

**キーワード：** ステンレス鉄筋, 異種金属接触腐食, 塩化物イオン高含有, 腐食促進試験

## 1. はじめに

ステンレス鋼は、強固な不動態皮膜を鋼材表面に形成することで高い耐食性を発揮する。そのため、ステンレス鉄筋をコンクリートの補強用鋼材として使用することで、特に厳しい腐食性環境下における鉄筋コンクリート構造物の大幅な耐久性向上が期待できる<sup>1)</sup>。

実構造物にステンレス鉄筋を用いる場合、ステンレス鉄筋の価格が普通鉄筋に比べ数倍～10倍と高価であるため、経済性を考慮し、塩化物イオンが侵入しやすい最外縁の鉄筋や帯鉄筋にステンレス鉄筋が使用され、塩化物イオン濃度の少ない内部の鉄筋に普通鉄筋が使用されるという鉄筋の使い分けが行われる可能性がある。このような構造物では、異種金属の接触が生じることになる。ステンレス鋼は普通鉄筋に比べ貴な電位を示すため、これらの2種の鉄筋が接触すると、ステンレス鉄筋がカソードになり、普通鉄筋がアノードになる。その結果、普通鉄筋側からステンレス鉄筋側に電子が供給され、電子を放出した普通鉄筋は腐食が促進される。このようにして、ステンレス鉄筋と普通鉄筋間で異種金属接触腐食が生じる可能性がある。

この問題に対して、篠田ら<sup>2)</sup>の研究により、塩化物イオン濃度が  $1.2\text{kg/m}^3$  以下の条件では、ステンレス鉄筋と普通鉄筋の接触による腐食は設計上は問題とならないことが確認された。しかし実構造物では、建設時には予期しなかった原因により、コンクリート中の塩化物イオン濃度が  $1.2\text{kg/m}^3$  以上となる場合がある。

そこで本研究では、コンクリート中の塩化物イオン濃度が  $1.2\text{kg/m}^3$  以上の条件で、普通鉄筋とステンレス鉄筋

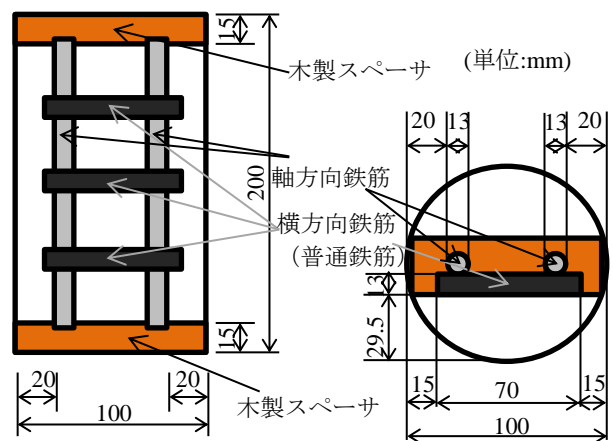


図-1 供試体詳細

の異種金属接触腐食が問題となるかどうかについて検討した。

また、ステンレス鉄筋と普通鉄筋の異種金属接触部の腐食の測定に自然電位法が有効かどうかは未知数であるが、今回の腐食測定方法の1つとして自然電位法を用いることでその有効性について検討した。

## 2. 実験概要

### 2.1 供試体および実験要因

図-1に示すように、 $\phi 100\text{mm} \times 200\text{mm}$  のコンクリート円柱供試体の中に、軸方向に2本と軸直角方向(横方向)に3本の鉄筋を配置した。配置には木製スペーサとプラスチック製のケーブルタイによる結束を用いた。

コンクリートの配合を表-1に、供試体一覧を表-2に

\*1 京都大学大学院 工学研究科都市社会工学専攻 (学生会員)

\*2 京都大学大学院 工学研究科都市社会工学専攻教授 工博 (正会員)

\*3 京都大学大学院 工学研究科都市社会工学専攻准教授 工博 (正会員)

\*4 京都大学大学院 工学研究科都市社会工学専攻助教授 博士(工学)

表-1 示方配合

塩化物イオン濃度	粗骨材最大寸法	空気量	水セメント比	細骨材率	水	セメント	細骨材	粗骨材	AE 減水剤	塩化ナトリウム
kg/m <sup>3</sup>	mm	%	%	%	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	cc/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>
1.2	15	4.5	60	44.7	179	300	798	986	750	1.98
3	15	4.5	60	44.6	179	300	795	986	750	4.95
6	15	4.5	60	44.5	179	300	790	986	750	9.89
9	15	4.5	60	44.3	179	300	785	986	750	14.8

表-2 供試体一覧

供試体	横方向鉄筋	軸方向鉄筋	Cl <sup>-</sup> 濃度(kg/m <sup>3</sup> )	腐食促進法	
				AC 法	WD 法
普-1.2	普通鉄筋(SD295) (測定対象)	普通鉄筋(SD295)	1.2	○	○
普-3			3	○	×
普-6			6	○	×
普-9			9	○	○
316-1.2		SUS316	1.2	○	○
316-3			3	○	×
316-6			6	○	×
316-9			9	○	○
304-1.2		SUS304	1.2	○	○
304-3			3	○	×
304-6			6	○	×
304-9			9	○	○
410-1.2		SUS410	1.2	○	○
410-3			3	○	×
410-6			6	○	×
410-9			9	○	○

示す。横方向鉄筋(普通鉄筋)のみを測定対象とし、軸方向鉄筋に3種のステンレス鉄筋を用いた。また比較のために軸方向鉄筋に普通鉄筋を用いた供試体も作成した。

コンクリート中の塩化物イオン濃度は、練混ぜ時に細骨材を塩化ナトリウムで置換することで 1.2kg/m<sup>3</sup> から 9kg/m<sup>3</sup> の間の4水準とした。

腐食促進法にはオートクレーブ法と乾湿繰返し法の2方法を採用した。

供試体は、オートクレーブ法用にはすべての鉄筋種類、塩化物イオン濃度の組み合わせにつき3個ずつ合計48個を作成した。乾湿繰返し法用には、塩化物イオン濃度が1.2kg/m<sup>3</sup>と9kg/m<sup>3</sup>の場合のみ3個ずつ合計24個を作成した。

## 2.2 腐食促進法

### (1) オートクレーブ法(以下、AC法)

JIS A6205-2003「鉄筋コンクリート用防せい剤」附属書2「コンクリート中の鉄筋の促進腐食試験方法」に準拠した方法を用いた。これは、AC装置を用いて高温高圧状態を維持することで腐食を促進する方法である。AC条件を図-2に示す。供試体をAC装置に入れ、密閉し、3時間で温度約180℃および圧力約1.0MPaまで上昇させた後、その状態を5時間保持した。その後、自然放冷し、AC開始から24時間経過後、試験体を取り出し(このときの装置内の温度は室温より高かった)、20℃の水中に24時間浸漬した。その後再びAC装置に入れ、同様の操作を繰り返して第2回AC開始から24時間経過後に供試体を取り出した。

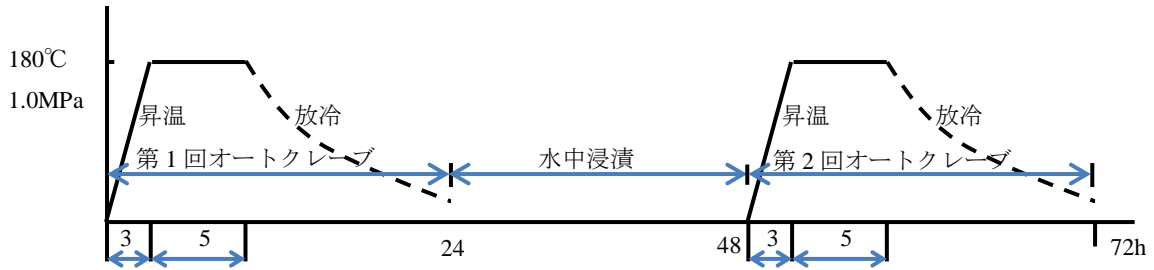


図-2 オートクレーブ条件

(2) 乾湿繰返し法(以下, DW 法)

湿潤を温度 20°C の水中浸漬とし, 乾燥を温度 20°C での恒温空気中環境(湿度は非管理)とした。この条件で湿潤状態 3 日, 乾燥状態 4 日を 1 サイクルとし, これを 35 サイクル(約 8 か月)繰り返した。

2.3 測定項目

横方向鉄筋(普通鉄筋)の腐食を測定対象とし, 全供試体で腐食面積率と質量減少率を測定した。

(1) 腐食面積率

鉄筋表面の腐食を透明シートにマジックインクで黒塗りして写し取り, その黒色面積をデジタル処理して腐食面積を求めるという手法を用いた。

(2) 質量減少率

JCI-SC1 に準じ鉄筋を 10% のクエン酸水素二アンモニウム水溶液(60°C)に 24 時間浸漬し, 腐食生成物を溶解した後に質量を測定して腐食前後の質量変化を求めるという手法を用いた。算出するための式は以下の(1)式を用いた。黒錆の質量は, 腐食していない鉄筋 10 本を同様の工程で処理し, その質量減少量の平均値とした。

$$y = \frac{a-b-cx(1-d/100)}{a-cx(1-d/100)} \times 100 \quad (1)$$

y: 質量減少率

a: 腐食前の質量

b: 腐食除去後の質量

c: 黒錆の質量

d: 腐食面積率

(3) 自然電位

乾湿繰返し法での腐食促進中に要因の組み合わせごとに各 3 個ある供試体のうち 1 個ずつ計 8 個に対し, 自然電位も随時測定した。照合電極(飽和 Ag/AgCl 溶液)の接触箇所を図-3 に示す。横方向鉄筋に対して垂直となる位置と, 横方向鉄筋と軸方向鉄筋の接触点に対して横方向鉄筋の軸から 45° の位置を測定した。測定は湿潤状態の 3 日目に行った。

3. 実験結果および考察

3.1 普通鉄筋の腐食面積率

腐食面積率を図-4 に示す。いずれの腐食促進法の場合

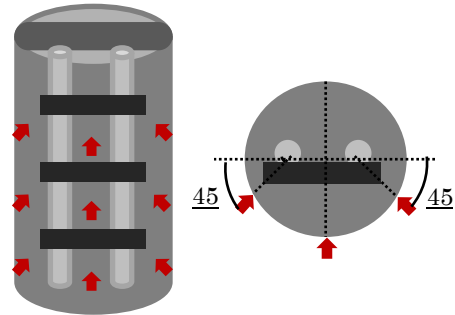


図-3 照合電極による自然電位測定箇所

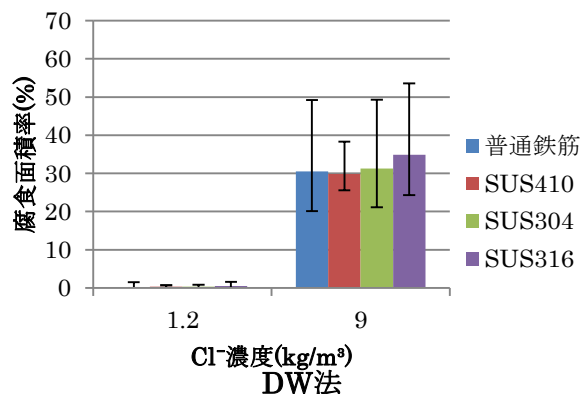
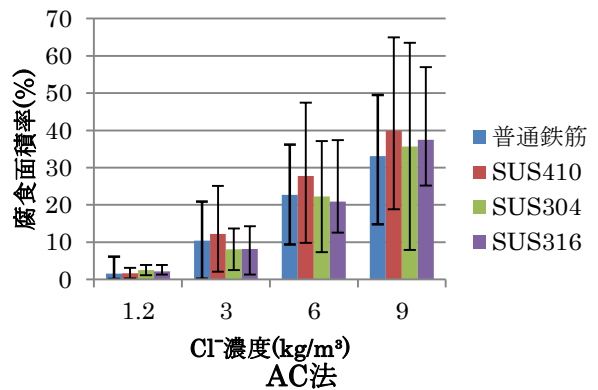
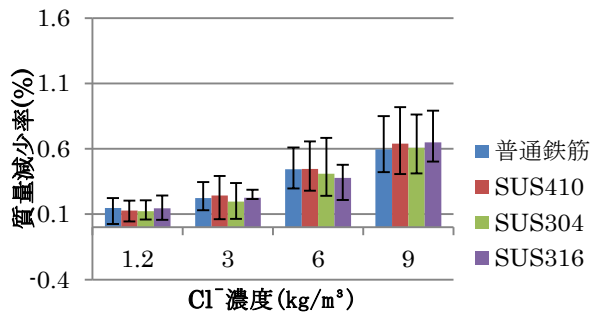
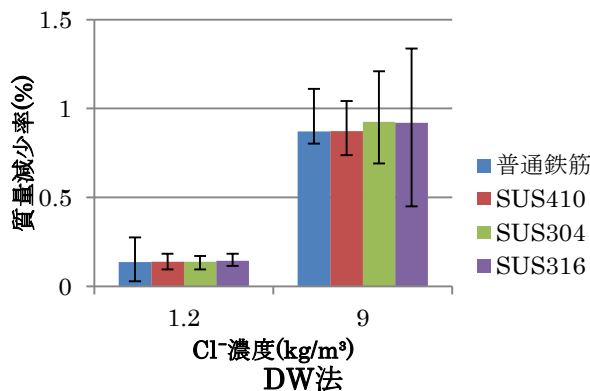


図-4 腐食面積率

でも, 軸方向鉄筋の種類にかかわらず塩化物イオン濃度が上昇するにつれて横方向鉄筋の腐食は増加している。しかし, 軸方向鉄筋の種類の違いによる測定値の差は明確には認められない。



AC法



DW法

図-5 質量減少率

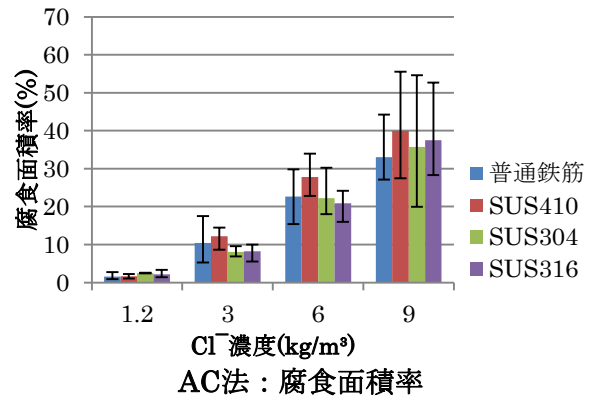
### 3.2 普通鉄筋の質量減少率

質量減少率を図-5に示す。いずれの腐食促進法の場合でも、軸方向鉄筋の種類にかかわらず塩化物イオン濃度が上昇するにつれて横方向鉄筋の腐食は増加している。しかし、軸方向鉄筋の種類の違いによる測定値の差は明確には認められない。

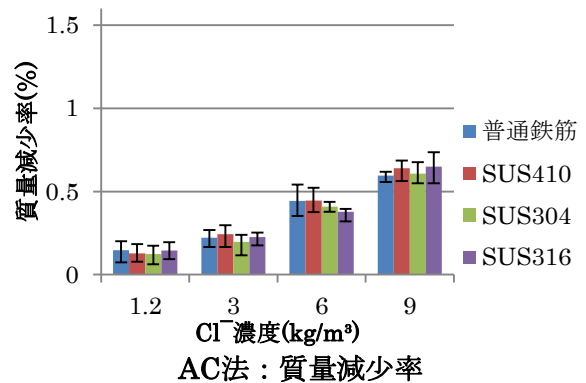
### 3.3 腐食面積率と質量減少率のばらつき

図-4、図-5の棒グラフ上のエラーバー(黒線)は、それぞれの要因の組み合わせにつき3本×3=9本の横方向鉄筋の腐食量の最大値から最小値までの幅であり、測定値のばらつきを示す。軸方向鉄筋の種類の違いによる測定値のばらつきの差は明確には認められない。

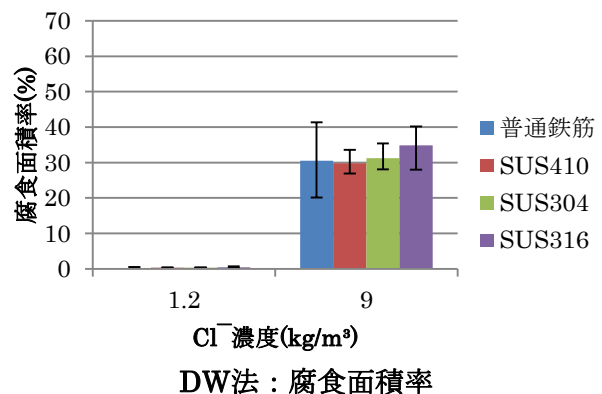
それぞれの要因の組み合わせにつき供試体ごとに3本の鉄筋の腐食量の平均値を取り、その平均値(3個)の最大値から最小値の幅をばらつきとした場合を図-6に示す。この場合は、腐食面積率、質量減少率ともに、図-4、図-5に比べばらつきは大幅に小さくなった。したがって同じ要因の組み合わせでは3個の供試体の腐食量の差は小さく、1個の供試体内の3本の横方向鉄筋の腐食量の差が大きいことが分かる。この理由として、コンクリートを上部から打設したためブリージングにより供試体上部に配置した鉄筋の腐食量が他より大きくなっているということが予想されたがそのような傾向はみられなかった。よってその他の理由として、1個の供試体内の3本の横



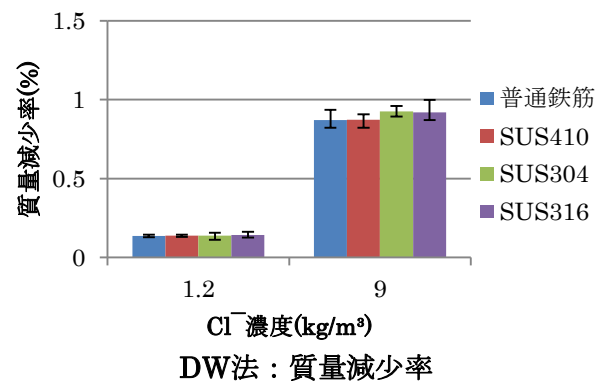
AC法：腐食面積率



AC法：質量減少率



DW法：腐食面積率



DW法：質量減少率

図-6 供試体間における腐食量のばらつき

方向鉄筋は電氣的につながっているため、この3本の鉄筋間で腐食電流が流れることで激しく腐食した鉄筋が他の鉄筋の腐食を請け負うため腐食量に差が出るが、供試

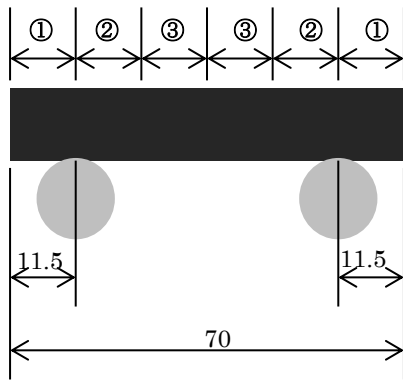


図-7 横方向鉄筋分割図

体間では腐食電流の影響がないためということが考えられる。

### 3.4 腐食面積率の分布

図-7に示すように横方向鉄筋の表面を6等分し、端部から中心部にかけて領域名をそれぞれ①, ②, ③とした。

腐食促進法にAC法を用いた場合の腐食面積率の分布を図-8に、DW法を用いた場合(35サイクル)の分布を図-9に示す。AC法を用いた場合では端部から中心部に行くにつれて腐食面積率が大きくなっているのに対し、DW法を用いた場合では領域②の部分がやや大きな値を示している。AC法での分布の理由は定かではない。しかし、軸方向鉄筋の種類の違いによる腐食分布の違いは明確には認められない。測定値のばらつきについても、軸方向鉄筋の違いによる明確な差は認められなかった。

### 3.5 軸方向鉄筋の腐食

軸方向鉄筋の腐食について、普通鉄筋の場合の質量減少率を、AC法、DW法についてそれぞれ図-10、図-11に示す。なお、軸方向鉄筋は腐食面積率を測定していないため、算出は式(1)のdをCl<sup>-</sup>濃度ごとに横方向鉄筋の場合の値と同じと仮定して求めた。測定上の問題に起因すると考えられる一部の例外を除き、いずれの腐食促進法の場合でも、塩化物イオン濃度が上昇するにつれて質量減少率が上昇する傾向にある。

ステンレス鉄筋の場合は、用いた中では耐食性が低いSUS410で、Cl<sup>-</sup>濃度が9kg/m<sup>3</sup>でDW法を用いた場合に、目視ではわずかに孔食が確認されたものがあった。しかし、それ以外では腐食は認められず、質量減少率はいずれの場合も±0.002%と非常に小さく、誤差の範囲と考えられた。

したがって、軸方向鉄筋の種類の違いによって横方向鉄筋の腐食量に差がなく、軸方向鉄筋の腐食量に差があるため、腐食のメカニズムは鉄筋の接触による接触腐食ではなく横方向鉄筋内のマイクロセル的な腐食になっている可能性があるが、結論を出すことは今後の課題である。

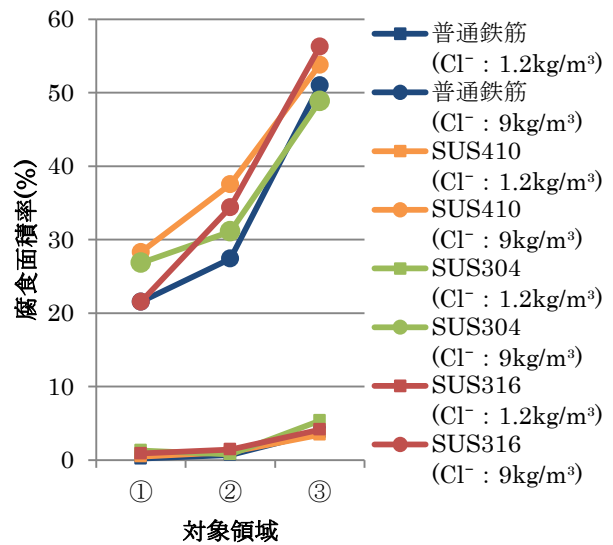


図-8 腐食分布 (AC 法)

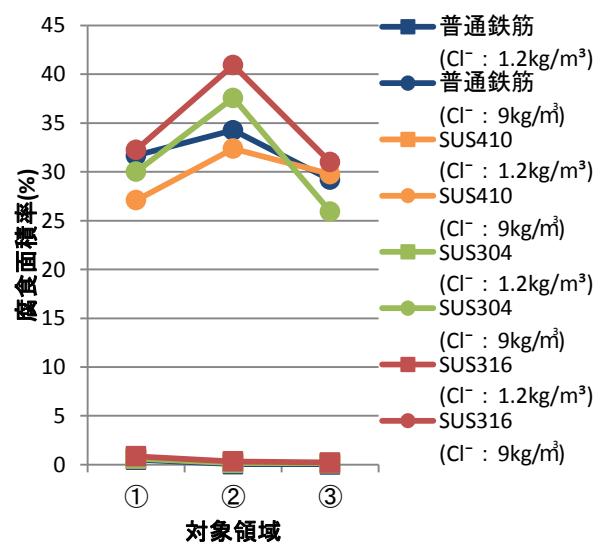


図-9 腐食分布 (DW 法)

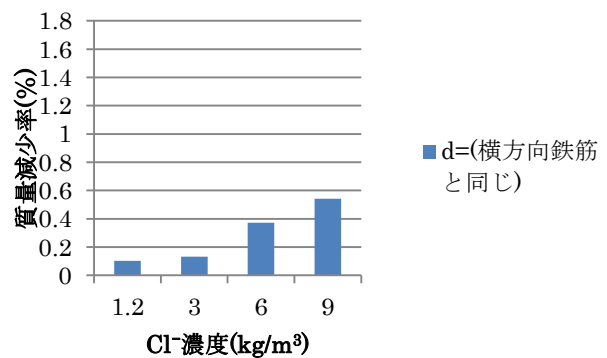


図-10 軸方向鉄筋の質量減少率 (AC 法)

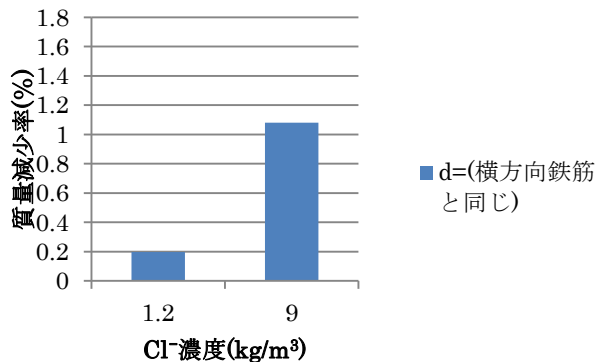


図-11 軸方向鉄筋の質量減少率(DW法)

### 3.6 自然電位

DW環境下での自然電位の測定結果を図-12に示す。横方向鉄筋に対して垂直となる場所に照合電極を接触させた測定値と、接触点に対して横方向鉄筋の方向から見て斜め45°の場所に接触させた測定値で、1供試体内の差はほぼ見られなかった。そこで、垂直となる場所の測定値のみ示した。なお、1供試体につき3本ある横方向鉄筋のそれぞれで測定し、3点の測定値の平均値をその供試体の測定値として示している。

図中、自然電位が青点線より上の領域が「90%以上の確率で腐食なし」の領域、青点線以下で赤点線以上の領域が「不確定」の領域、赤点線以下の領域が「90%以上の確率で腐食あり」の領域である。これらは普通鉄筋に用いられる判定基準<sup>3)</sup>である。

塩化物イオン濃度が1.2kg/m<sup>3</sup>の場合、軸方向鉄筋が普通鉄筋の供試体では軸方向鉄筋がステンレス鉄筋の供試体に比べて低い値を示している。この理由として、ステンレス鉄筋は普通鉄筋に比べてはるかに高い自然電位を示すため、測定対象とした横方向鉄筋に加えて軸方向鉄筋の種類の違いが測定値に影響したことも推定される。しかし、図-12のCl<sup>-</sup>濃度が9kg/m<sup>3</sup>のグラフでは自然電位の測定値のばらつきが大きく、明確な傾向の違いを読み取ることは難しい。照合電極の接触位置や供試体の大きさなどを考慮した測定を行う必要がある。

### 4. 結論

コンクリート中の塩化物イオン濃度が1.2kg/m<sup>3</sup>を超える場合でも、9kg/m<sup>3</sup>以下の条件では、普通鉄筋とステンレス鉄筋の異種金属接触が普通鉄筋の腐食を加速させることはない判断できる。

腐食可能性が低い場合では、ステンレス鉄筋を併用することによって、自然電位の測定値が高くなる。しかし、

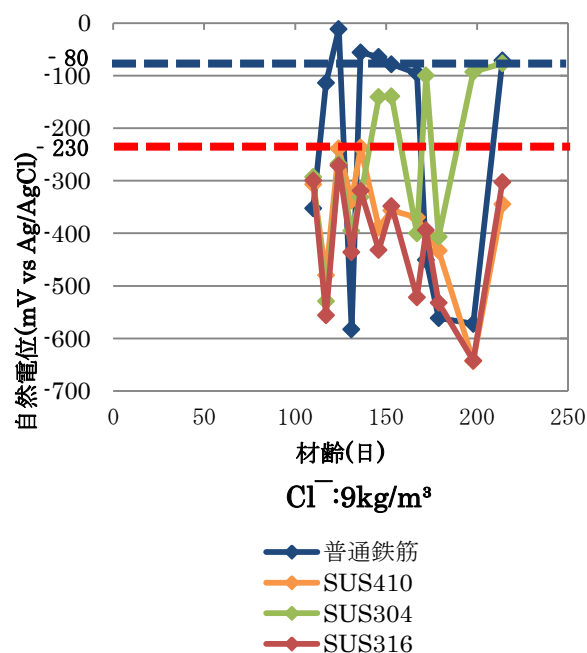
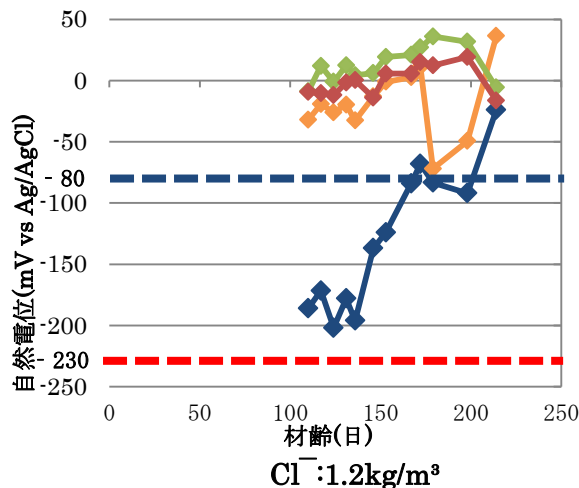


図-12 自然電位の経時変化

腐食可能性が高い場合では、測定値のばらつきが大きく結論を出すには至れなかった。

### 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) 篠田佳男，山路 徹，河野広隆，長瀧重義：コンクリート中のステンレス鉄筋の耐食性能に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.1，2007
- 3) 日本コンクリート工学協会：コンクリート診断技術<sup>3)</sup> 11[基礎編]，2011.2