

論文 チタンワイヤセンサーを用いたコンクリート中の鉄筋簡易腐食診断への適用性

杉浦 尚樹*1・青山 敏幸*2・石井 浩司*3・鳥居 和之*4

要旨: 近年, コンクリート構造物の適切な維持管理に対する予防保全的な対策が重要となっている。コンクリート構造物の鉄筋腐食の診断法である電気化学的手法には, 自然電位法や分極抵抗法等があるが, 著者らは従来の照合電極よりも安価なチタンワイヤセンサーを使用した自然電位法の実構造物への適用を目指した。そこで本研究では, 各種の環境条件下にて, 普通コンクリートとフライアッシュコンクリートを使用した試験体中の鋼材における自然電位の経時変化をチタンワイヤセンサーにより計測し, 照合電極の値との相関性を調べることで, 本測定法の実用化における課題を検討した。

キーワード: チタンワイヤセンサー, 簡易腐食診断, 自然電位, 分極抵抗, フライアッシュ

1. はじめに

近年, コンクリート構造物の適切な維持管理に対する重要性がますます高まっている。鉄筋腐食によるひび割れ, 錆汁等の外観の変状が現れる前に予防保全的な対策を講じ, 構造物の劣化の段階を把握することがコンクリート構造物の供用期間を長くするうえで重要であると考えられる。従来, コンクリート構造物中の鉄筋の腐食診断方法として, 自然電位法や分極抵抗法による電気化学的手法が実施されてきた。

自然電位法は, 対象構造物の鉄筋の自然電位を測定することで, 調査時点での鉄筋の腐食傾向を推定する方法であり, コンクリート構造物中の鉄筋腐食を推定する非破壊試験のうち最も実績のある方法である。一方, 分極抵抗法は, コンクリート表面に当てた外部電極から, 内部に微弱な電流を負荷した時に生じる電位変化量から腐食速度と分極抵抗が反比例の関係となることを利用し, コンクリート中の鉄筋の腐食速度を推定する方法である。

自然電位法では, 照合電極を設置した付近のみの鉄筋電位が計測される。照合電極の使い方として, コンクリート表面から鉄筋電位を計測する可搬式照合電極と, あらかじめコンクリート中に埋設する埋設式照合電極に分けられる。両者を比較すると, 前者は現地で測定する際に足場を架設して技術者が計測を行うため作業性が悪く,

またコンクリートの含水率の影響を受けやすいが, 照合電極一つで広範囲の測定が可能であるという利点がある。一方, 後者は事前に配線しておけば足場が不要であり, コンクリート内部に埋設するために含水率の影響を受けにくい, 広範囲の鉄筋電位を計測するには, コンクリート中に大量に照合電極を設置しなければならないため, コストが高くなるという点が問題であった。

そこで本研究では, 従来の照合電極の 1/50~1/100 程度の安価なチタンワイヤセンサー (以下, ワイヤセンサーと称す) と市販の照合電極をはり試験体および PC 桁試験体に埋設し, 両センサーを用いて計測された自然電位の相関性を調べることにより, ワイヤセンサーがコンクリート中の鉄筋の簡易的な腐食診断に適用できるかどうか検討した。また, フライアッシュをコンクリートに混和することによる遮塩性が確認されており¹⁾, はり試験体におけるフライアッシュ混和の有無による自然電位の経時変化の相違についても実験的に検討した。

2. 実験概要

2.1 コンクリートの配合および使用材料

はり試験体および PC 桁試験体に用いたコンクリートの配合を表-1 に示す。コンクリートは, プレテンション方式の PC 桁を対象とし, 材齢 28 日における設計基準

表-1 はり試験体, PC 桁試験体の配合

試験体	W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)						
			W	B		S	G	NaCl	
				C	FA				
はり	H	39.0	40.1	150	385	—	702	1067	—
	FA	34.8	44.6	150	366	65	758	958	—
PC桁	H	38.7	46.3	150	388	—	822	955	18.9
	FA	34.8	44.6	150	366	65	770	955	25.5

*1 金沢大学大学院 自然科学研究科環境デザイン学専攻 (学生会員)

*2 (株) ピーエス三菱 技術本部技術部メンテナンス技術グループ 博 (工) (正会員)

*3 (株) ピーエス三菱 技術本部技術部部長 工博 (正会員)

*4 金沢大学 理工研究域環境デザイン学系 工博 教授 (正会員)

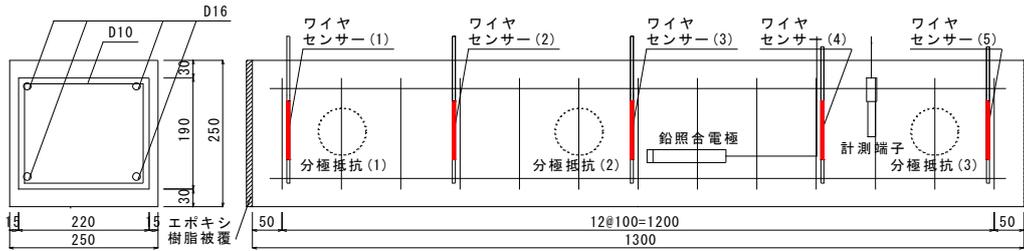


図-1 はり試験体の形状・寸法

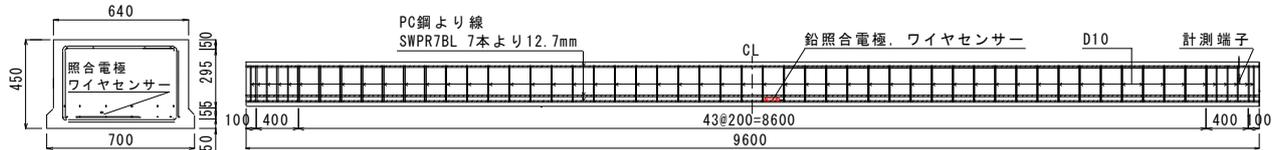


図-2 PC桁試験体の形状・寸法

強度が 50N/mm^2 、材齢 14 時間でのプレストレス導入時の強度 35N/mm^2 を満足する配合である^{2,3)}。はり試験体および PC 桁試験体ともに、フライアッシュを置換しない試験体は H、フライアッシュを置換した試験体は FA と称す。

セメントは早強ポルトランドセメント（密度 3.14kg/cm^3 、ブレン値 $4480\text{cm}^2/\text{g}$ ）を、フライアッシュ（七尾大田石炭火力発電所産、JIS A 6201 II 種相当、密度 2.48g/cm^3 、ブレン値 $4600\text{cm}^2/\text{g}$ ）は分級されたものを使用した。はり試験体は、細骨材に富山県庄川産の川砂（表乾密度 2.57g/cm^3 、吸水率 1.55%、F.M.:2.74）、粗骨材に富山県庄川産の碎石（表乾密度 2.61g/cm^3 、吸水率 0.9%、F.M.:6.69）を、ASR の発生を想定した PC 桁試験体は、細骨材に富山県常願寺川産の川砂（表乾密度 2.61g/cm^3 、吸水率 1.85%、F.M.:2.85）、粗骨材には富山県常願寺川産の川砂利（表乾密度 2.61g/cm^3 、吸水率 1.34%、F.M.:7.09）をそれぞれ使用した。常願寺川産骨材は富山県を代表する火山岩系の反応性骨材であり、安山岩粒子にはオパールやクリストバライトが含まれている。

なお、FA 配合は、はり試験体および PC 桁試験体ともに、フライアッシュの内割り置換率を 15% とした。また、PC 桁試験体は、ASR による劣化を短期間で促進させるために、コンクリートの練り混ぜ時に NaCl を等価 Na_2O 量で H 配合は 10kg/m^3 （塩化物イオン量： 18.9kg/m^3 ）、FA 配合は 13kg/m^3 （塩化物イオン量： 25.5kg/m^3 ）を、それぞれ練混ぜ水に溶かして混入させた。

2.2 試験体の概要

はり試験体の形状・寸法を図-1 に、PC 桁試験体の形状・寸法を図-2 にそれぞれ示す。はり試験体は、 $250\text{mm} \times 250\text{mm} \times 1300\text{mm}$ とし、主筋には、D16 の鉄筋を上側、下側に各 2 本の計 4 本、スターラップには D10 の鉄筋を 100mm ピッチで配置した。また、試験体の上下面の鋼材

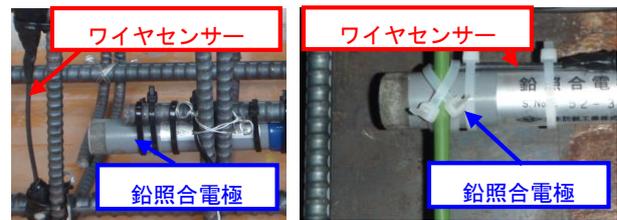


写真-1 照合電極およびワイヤセンサー設置状況

かぶりは 30mm 、側面の鋼材かぶりは 15mm とした。試験体の内部にはリード線付きの鉄筋（以下、計測端子と称す）を内部鉄筋と結束し、電気化学的測定（自然電位法、分極抵抗法）に供した。また、はり試験体のスパン中央部近傍に、市販の鉛照合電極を写真-1 a) に示すように設置した。ワイヤセンサーは、直径 3mm の貴金属被覆された耐食性に優れた棒状のチタンである。はり試験体では、写真-1 a) に示すように、ワイヤセンサーの両端部を自己融着性絶縁テープにより鉄筋と絶縁処理した状態で、スターラップと平行に、図-1 のワイヤセンサー(1)~(5)の位置に設置した。なお、試験体の端部から侵入する塩化物イオンを防ぐ目的で、両端部はエポキシ樹脂により被覆した。

PC 桁試験体は、プレテンション方式の PC 桁とし、JIS A 5373 に規定される全長 9.6m の AS09 桁である。PC 鋼材には、 12.7mm の PC 鋼より線を計 16 本配置している。また、スターラップは、D10 の鉄筋を 200mm ピッチで配置した。PC 桁試験体の両側面のかぶりは 45mm 、上下面のかぶりは 34mm である。はり試験体と同様に、試験体の内部には計測端子を設置した。また各試験体のスパン中央部近傍には、写真-1 b) に示すように市販の鉛照合電極と、照合電極と平行にした状態にワイヤセンサーを設置した。

2.3 暴露環境の条件

はり試験体は、石川県穴水町宮坂橋敷地内(試験体 H-1, FA-1)、石川県輪島市門前町道下樋門敷地内(試験体 H-2, FA-2)、石川県金沢市金沢大学敷地内(試験体 H-3, FA-3)の3か所に暴露した。宮坂橋は、フライアッシュを用いたプレテンション PCT 桁橋が架橋された場所であり、冬場には道路に散布された凍結防止剤のしぶきがかかる場所である。道下樋門は、海岸から約 200m 地点に位置し、飛来塩分の影響を受ける環境である。金沢大学は、屋外の暴露場にて 1 回/週の塩水 (5%NaCl 溶液) を散布し、試験体へ塩分浸透を促進させている。試験体は 2014 年 6 月に製作され、宮坂橋以外の試験体は翌月からそれぞれの地点で暴露を開始し、また宮坂橋の試験体は工場内に保管後、2015 年 6 月から暴露した。なお、測定開始時期は 2014 年 7 月からである。一方、PC 桁試験体は 2015 年 4 月から金沢大学敷地内で屋外暴露し、同時に測定を開始している。

2.4 測定項目

はり試験体は、図-1 のワイヤセンサー(1)から(5)の 5 か所、鉛照合電極の埋設 1 箇所での自然電位の測定を、また、図中に丸印で示した試験体の表面 3 か所で、携帯型腐食診断器 (SRI-CM-III, 照合電極: 銀/飽和塩化銀電極) を用いて自然電位と分極抵抗の測定を行った。分極抵抗については簡易測定とし、測定条件はガード対極を使用せずセンター対極のみを使用する 1 対極センター方式で行い、印加交流電圧 (AC) を 10mV とした。開始周波数および終了周波数を 10Hz および 20mHz とし、分極抵抗を求めた。コンクリート表面を霧吹きで濡らし、コンクリート表面近傍を湿潤状態として測定を行った。

PC 桁試験体は、図-2 に示す位置の鉛照合電極および

ワイヤセンサーによる自然電位の測定と、鉛照合電極位置近傍の PC 桁底面にて携帯型腐食診断器 (SRI-CM-III, 照合電極: 銀/飽和塩化銀電極) を用いて自然電位と分極抵抗の測定を行った。

3. 実験結果および考察

3.1 鉄筋腐食の電気化学的モニタリング

(1) 自然電位法

はり試験体および PC 桁試験体における自然電位の経時変化を図-3 に示す。はり試験体における図中のワイヤセンサーの値は、図-1 の鉛照合電極に近いワイヤセンサー(3)の値を、可搬式照合電極の値は、図-1 の分極抵抗(2)の位置で測定した値をそれぞれ示す。また、自然電位の測定値は、鉛照合電極 (mV vs. PRE) および銀/飽和塩化銀電極 (mV vs. Ag/AgCl) であるので、 $CSE = PRE - 800$ 、 $CSE = Ag/AgCl - 120$ としてそれぞれ飽和硫酸銅電極電位 (mV vs. CSE) に換算した。

はり試験体における鉛照合電極とワイヤセンサーによる自然電位の測定値を比較すると、FA-2(道下樋門)以外は、測定時期によらず全般的に同じような挙動で、電位は時間とともに卑側に推移している。PC 桁試験体についても、H, FA の試験体に関係なく、鉛照合電極とワイヤセンサーは同様の挙動を示している。したがって、ワイヤセンサーは鉄筋の自然電位の変動を的確に評価できると考えられる。

また、鉛照合電極と可搬式照合電極を比較すると、金沢大学にて暴露中のはり試験体 (H-3, FA-3) は比較的值が一致しているが、宮坂橋、道下樋門に暴露した試験体は H, FA 試験体に関係なく、可搬式照合電極で測定した値は、鉛照合電極で測定した値よりも貴側である。一

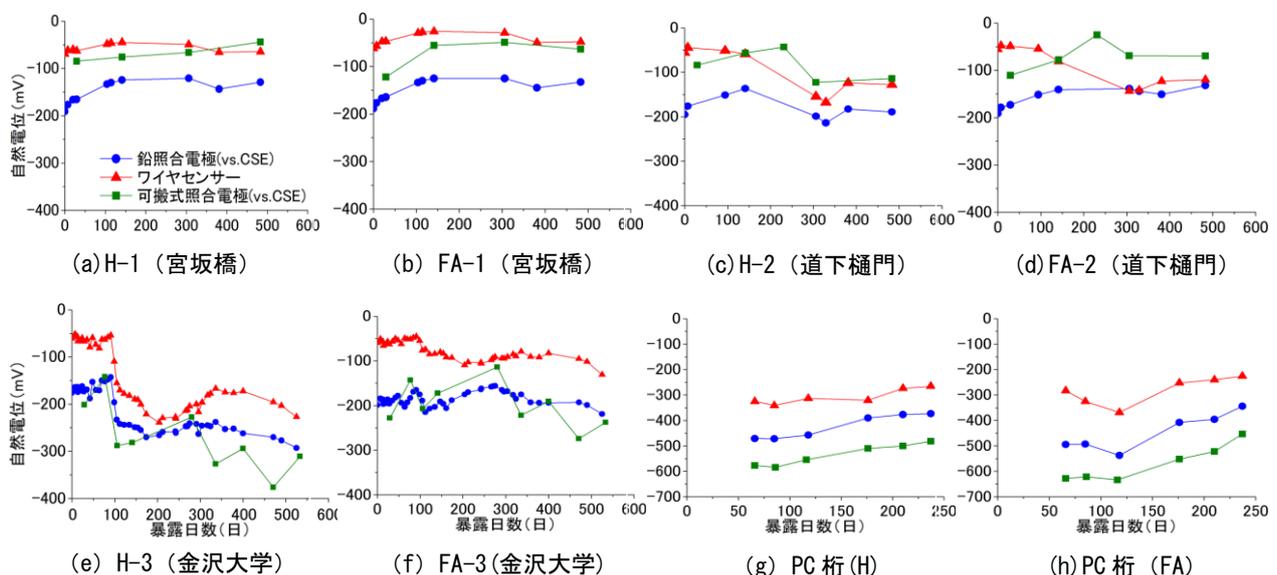


図-3 はり試験体の自然電位の経時変化

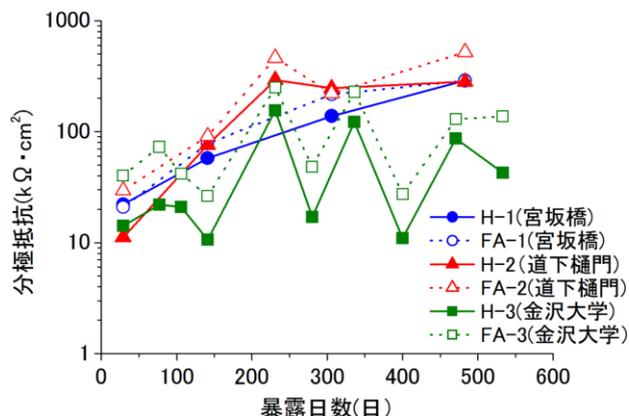


図-4 はり試験体の分極抵抗の経時変化

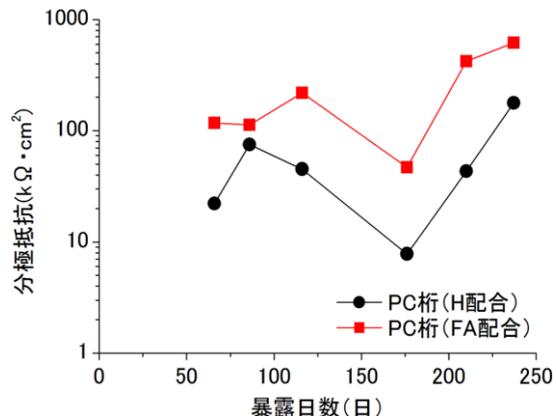


図-5 PC桁試験体の分極抵抗の経時変化

方、PC桁試験体では、可搬式照合電極はかぶりの小さいスターラップの自然電位を測定しているのに対して、埋設式照合電極およびワイヤセンサーは、図-1に示すようにPC鋼より線の位置よりもコンクリート内部に設置したため、PC鋼より線の自然電位を捉えている可能性があること、コンクリート表面から測定している可搬式照合電極ではコンクリートの含水率の変化、すなわちかぶりコンクリートの影響等を受けていることが考えられる。

H-1およびFA-1(宮坂橋)は、試験体製作から約1年間工場内に保管していたため、雨風や飛来塩分の影響を受けていないために、すべての期間においてASTM C 876⁴⁾の腐食判定基準である-200mVより貴側で自然電位が推移しているものと考えられる。

H-2(道下樋門)は、暴露後150日から300日の秋季から春季にかけて、自然電位が卑側に移行した。これは、暴露地点が海岸から約200mの距離に位置しているために、冬季に日本海からの強い北西の季節風による飛来塩分の影響を受けるためであると考えられる。しかし、暴露期間全体を通して、一部の測定結果を除き-200mVより貴側の値であり、現時点では鉄筋が腐食している可能性は低いと推察される。FA-2(道下樋門)はワイヤセンサーの自然電位がH-2(道下樋門)とほぼ同様な挙動で卑側に推移し、鉛照合電極でもほとんど変化が見られなかった。

塩水散布が繰り返されたH-3(金沢大学)は、暴露後100日頃から自然電位が急激に卑側に移行し、鉛照合電極、可搬式照合電極ともに鉄筋腐食が不確定な領域になった。これは、1回/週の塩水(5%NaCl溶液)散布を実施したこと、また夏季から秋季にかけての気温、降雨の影響で鉄筋腐食が急速に進行したことによるものと考えられる。その後、暴露200日から300日にかけて自然電位の貴側への回復があり、さらに暴露後半(夏季から冬季にかけて)に卑側への移行が確認された。同様に、可搬式照合電極は-350mV以下の値も示しており、

実際に試験体で錆汁、浮きが確認された。一方、FA-3(金沢大学)においては自然電位が徐々に卑に移行したものの、鉛照合電極、可搬式照合電極の値から、鉄筋腐食は不確定な領域に留まった。

PC桁においては、多量のNaClが添加されているために、暴露初期から自然電位がすでに卑側にあるが、PC桁(H)、PC桁(FA)ともに暴露期間が長くなるとともに自然電位は徐々に貴側に移行した。また、自然電位の貴側への変化は、PC桁(H)よりもPC桁(FA)の方が大きい傾向にある。両試験体ともに、コンクリートの水和反応が進むとともに自然電位も貴化したものと推察される。

(2) 分極抵抗法

はり試験体、PC桁試験体における分極抵抗の経時変化を図-4および、図-5にそれぞれ示す。はり試験体の分極抵抗の値は図-1の(1)から(3)のワイヤセンサーの平均値を、PC桁試験体は鉛照合電極位置近傍にて測定した値を示す。

図-4に示すはり試験体の分極抵抗の測定結果から、全ての試験体は、暴露日数が経過するにつれ全般的に分極抵抗が上昇する傾向が見られた。暴露初期に全般的に分極抵抗の値が小さかったのは、コンクリートの水和反応が十分に進行していない影響であると考えられる。

H-3(金沢大学)、FA-3(金沢大学)は、他の試験体に比べて分極抵抗の値が小さく、これは図-3の他の試験体に比べて自然電位が卑化している傾向と一致している。また、FA試験体はH試験体よりも分極抵抗の値が大きく、フライアッシュのポズラン反応によりコンクリートの内部組織が緻密化した効果が認められる。

一方、PC桁試験体は、コンクリート製作時にNaClを混入しているために、自然電位の測定結果から判断すると「90%以上の確率で腐食あり」の領域にあるものの、分極抵抗は時間の経過とともに大きくなっており、鋼材の著しい腐食は生じていないものと推察される。この理

由としては、上述した理由の他、はり試験体に比べて鋼材のかぶりが確保されており、水や酸素が供給されにくいためであると推察された。また、PC 桁試験体でも同様に、H 試験体に比べて FA 試験体の方が、分極抵抗が大きい傾向が見られる。

3.2 電気化学的測定におけるチタンワイヤセンサーの有効性

(1) 照合電極とワイヤセンサーの相関性

はり試験体、PC 桁試験体および参納らの実験^{5,6)}で測定した、市販の照合電極とワイヤセンサーの自然電位の相関性を図-6 に示す。ここで、図中の凡例の RC はり(埋設式)は、はり試験体の埋設式照合電極(鉛照合電極)と照合電極から最も近いワイヤセンサー(3)の自然電位の関係を示す。RC はり(可搬式)は、可搬式照合電極(銀/飽和塩化銀照合電極)を用いて、図-1 の分極抵抗(1)、分極抵抗(2)の位置で測定した自然電位と、測定位置から最も近いワイヤセンサー(1)、ワイヤセンサー(3)の自然電位の関係を示す。PC 桁(埋設式)は、PC 桁試験体の埋設式照合電極(鉛照合電極)で測定した自然電位とワイヤセンサーの自然電位の関係を、PC 桁(可搬式)は、可搬式照合電極(銀/飽和塩化銀照合電極)を用いて、ワイヤセンサーを設置した位置に最も近い箇所のスターラップを測定した際の自然電位とワイヤセンサーの自然電位の関係を示す。既往の研究(可搬式)は、参納らの実験で、NaCl の混入の有無、普通セメント配合とフライアッシュを 15% 置換した配合をパラメータとした 500×500×200mm の試験体について、可搬式照合電極(銀/飽和塩化銀照合電極)で測定した自然電位とワイヤセンサーの自然電位の関係を示す。また図中に示す直線は、全ての測定データを直線近似したものである。

図に示す結果から、コンクリートの種類や配合等によらず、ワイヤセンサーと照合電極による自然電位の値は、相関関係が認められる。

RC はり(埋設式)と RC はり(可搬式)を比較すると、RC はり(可搬式)は RC はり(埋設式)に比べて近似曲線からのばらつきが大きい傾向にある。この理由は、図-1 の測定位置に示す通り、可搬式照合電極とワイヤセンサーでは測定位置が異なったことに加え、可搬式照合電極ではコンクリートの含水率やかぶりの影響を受けたことが考えられる。

PC 桁(埋設式)と PC 桁(可搬式)を比較すると、RC はり試験体と同様に、PC 桁(可搬式)は、PC 桁(埋設式)に比べて近似曲線からのばらつきが大きい傾向にある。PC 桁の可搬式照合電極は、かぶりが小さいスターラップの自然電位を測定しているが、埋設式照合電極およびワイヤセンサーは、図-2 に示すように PC 鋼より線の位置よりもコンクリート内部に設置してあり、PC 鋼より

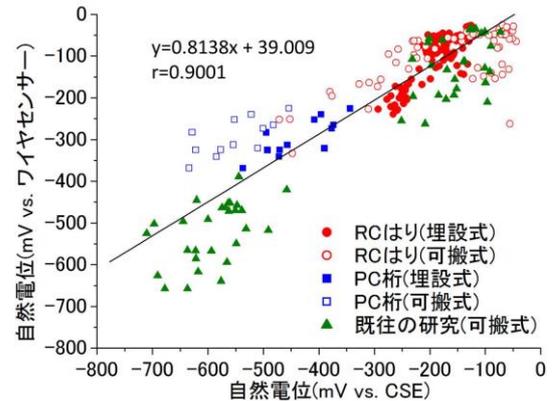


図-6 照合電極とワイヤセンサーの相関(全データ)

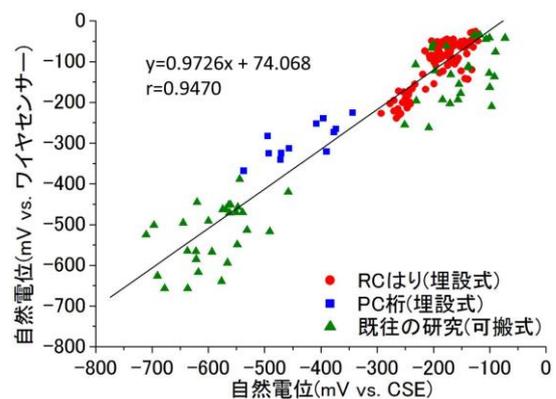


図-7 照合電極とワイヤセンサーの相関
(RC はり、PC 桁の可搬式電極の測定値を削除)

線の自然電位を捉えている可能性があるため、ワイヤセンサーと可搬式照合電極で大きなばらつきが生じたものと考えられる。

RC はり試験体、PC 桁試験体は、可搬式照合電極とワイヤセンサーで測定位置の差異が考えられたことから、これらのデータを取り除いた照合電極とワイヤセンサーの自然電位の相関性を図-7 に示す。

図-7 に示す結果から、照合電極とワイヤセンサーの測定が同じ部位を捉えれば、照合電極とワイヤセンサーのデータのばらつきが小さく、良い相関関係が見られた。

(2) はり試験体の各ワイヤセンサーの自然電位の経時変化

H 配合および FA 配合のはり試験体におけるワイヤセンサー(1)から(5)の自然電位の経時変化を、図-8 および図-9 にそれぞれ示す。電位が貴側にある暴露初期はワイヤセンサーごとの自然電位の差は小さいが、自然電位が卑側に移行するにつれ、特に H 配合のワイヤセンサーの自然電位の差は大きくなっている。したがって、この電位差による腐食の程度の違いを今後検討することで、コンクリート中の鉄筋の腐食状況を把握することができる可能性が考えられる。

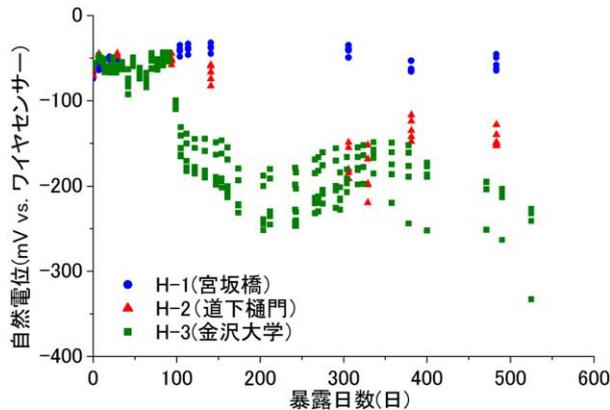


図-8 はり試験体の各ワイヤセンサーの自然電位の経時変化 (H)

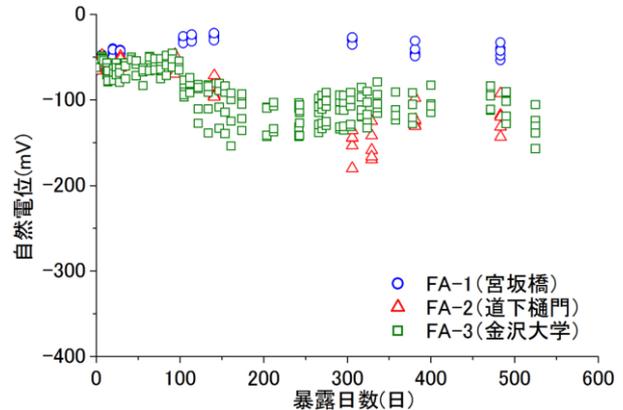


図-9 はり試験体の各ワイヤセンサーの自然電位の経時変化 (FA)

3.3 はり試験体の外観の変状

外観に変状が認められた H-3 (金沢大学) 試験体について、外観の変状と電気化学的測定の結果について考察する。H-3 (金沢大学) は、暴露 6 ヶ月以降に試験体の側面約 250mm 地点に錆汁の発生が確認された。その後、暴露 11 ヶ月以降に、試験体の側面 450mm 付近で浮き、暴露 13 ヶ月には 450mm 付近の浮きが拡大した。さらに、暴露 18 か月には試験体の側面 1050mm 付近に錆汁の発生が確認された。

図-3 e)、図-8 の H-3 (金沢大学) の自然電位の測定結果では、暴露約 3 ヶ月半において自然電位が卑化し、その後暴露約 7 ヶ月までの間は電位の卑化が続いている。

錆汁の発生時期は、自然電位の卑化の時期と一致していることから、自然電位を継続的に測定することにより、鋼材腐食の可能性を的確に評価できる可能性があると考えられる。

4. まとめ

本研究では、安価なチタンワイヤセンサーの自然電位計測における適用性について検討した。

本研究で得られた主要結果を示すと次のようである。

- (1) 市販の照合電極とワイヤセンサーが同じ部位をとらえれば、測定時期やコンクリート中の塩分の影響に関係なく、照合電極とワイヤセンサーに良い相関関係が見られた。
- (2) はり試験体のワイヤセンサーの測定結果より、電位が貴側にあれば各ワイヤセンサーの自然電位の値の差は小さいが、自然電位が卑側に移行するにつれて各ワイヤセンサーの自然電位の値の差が大きくなる傾向が確認された。
- (3) フライアッシュコンクリート試験体は、自然電位が貴側に推移し、かつ分極抵抗の値も大きいことから、コンクリートの塩害対策として有効であった。

謝辞

本研究は、内閣府・科学技術振興機構 (JST) の戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) による研究開発の一環として実施したものであり、関係各位に感謝いたします。

参考文献

- 1) 宮里心一, 鳥居和之, 伊藤始: 北陸産分級フライアッシュによるコンクリートの遮塩性向上効果に関する地域特性を踏まえた評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No1, pp.163-168, 2013
- 2) 山村智, 桜田道博, 小林和弘, 鳥居和之: フライアッシュコンクリートの収縮特性、耐久性および構造特性に関する検討, 第 24 回プレスト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.309-314, 2015
- 3) 桜田道博, 山村智, 鳥居和之, 山中章平: フライアッシュを用いたプレテンション PCT 桁橋 (宮坂橋歩道橋) の施工, 第 24 回プレスト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.315-318, 2015
- 4) ASTM C876-91, Standard Test Method for Half-Cell Potential of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete, Annual Book of ASTM Standards, Vol.03.02, pp.457-462, Jan.1999
- 5) 齋藤匠, 参納千夏男, 芳賀堯, 鳥居和之: 塩害と ASR の複合劣化環境下でのフライアッシュ含有 RC 試験体の暴露性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.983-988, 2006
- 6) 平野貴宣, 参納千夏男, 橋本徹, 鳥居和之: 富山県海岸部における反応性骨材含有 RC 試験体の長期暴露性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.1, pp.1035-1040, 2008