

チタン製のワイヤーセンサーを用いた鉄筋電位計測に関する実験的検討

金沢大学自然科学研究科環境デザイン学専攻 ○亀田 浩昭

(株)ピーエス三菱 正会員 博士(工学) 青山 敏幸

(株)ピーエス三菱 正会員 工博 石井 浩司

金沢大学理工研究域地球社会基盤学系 特任教授 正会員 工博 鳥居 和之

Abstract : A titanium wire sensor (hereinafter referred to as the present technology) was developed as a new reference electrode for steel corrosion of concrete structures. The reference electrode is buried in the vicinity of the steel material in the concrete and measures the potential of the steel material near the burial and judges the corrosion. However, there is a disadvantage that it can not be detected if the corrosion position is different from the buried position. In this case, it is not economical to move and measure the portable collating electrode on the concrete surface. By using this technology of a long sensor as a new usage of the present technology it becomes possible to detect the potential of a wide range of steel materials. In this study, we compare the potentials of steel materials measured using this technology with different lengths in small specimens and large specimens, and verified that long sensors showed average potential.

Key words : Wire sensor , Rest potential , Salt damage , Rebar corrosion

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予防保全的な対策が重要となっている。橋梁などの構造物の定期点検が義務化され、致命的な劣化にいたる前に予防保全的な対策を施し、構造物の長寿命化を図ることを基本としている。

わが国においてコンクリート構造物の耐久性を低下させている要因の一つに塩害が挙げられる。塩害劣化を早期に確認するためには、非破壊検査手法を用いることが一般的である。塩害による鋼材腐食の非破壊検査手法として、鋼材の自然電位計測や分極抵抗計測等がある。前者は計測が容易であり計測値が比較的安定し判断が容易であるが、後者は計測が難しく時間を要するとともに計測値の判断が困難であるために、わが国においては主として前者が採用される場合が多い。前者は市販されている照合電極と呼ばれるセンサーをコンクリート中に埋設、または、コンクリート表面を移動させ鋼材電位を計測している。いずれの方法においても計測された鋼材の電位は、設置された照合電極付近の鋼材のそれであり、広範囲に鋼材電位を把握するためにはコンクリート表面を移動させる方法を採用する必要がある。一方、著者らは取扱が容易で安価な直径3mmのチタン製ワイヤーセンサー（以後、ワイヤーセンサーと称す）を開発¹⁾しており、従来は長さ50~1000mmのワイヤーセンサーを用いて鋼材電位を計測していたが、ワイヤーセンサー自体の長さを長くすることで広範囲の鋼材電位の計測の可能性を検討している。本研究は、従来よりもワイヤーセンサーの長さを長くした場合に計測された鋼材電位と腐食状態との関係について検討を加えたものである。

2. 試験概要

試験は鋼材腐食の方法、試験体の設置環境を試験要因として試験を行い、シリーズⅠ、Ⅱ、Ⅲから構成されている。シリーズⅠは小型試験体を用い、強制的にアノード分極させた鋼材ピースを模擬腐

食部分とし、さまざまな長さのワイヤーセンサーで鋼材電位を計測した。シリーズⅡは大型試験体を製作し、塩水噴霧することで鋼材腐食を促進させ、シリーズⅠと同様にさまざまな長さのワイヤーセンサーで鋼材電位を計測した。シリーズⅢは大型試験体を海岸沿いに暴露し、さまざまな長さのワイヤーセンサーで鋼材電位を計測した。

2. 1 シリーズⅠ

(1) コンクリート配合および使用材料

RCはり試験体のコンクリート配合を表-1(Ⅰ)に示す。水セメント比は40%とし、普通ポルトランドセメントを使用した。材齢7日と28日における圧縮強度は、それぞれ40N/mm²、51N/mm²である。

表-1 コンクリート配合表

試験体 シリーズⅠ～Ⅲ	W/B (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					
			W	B		S	G	
				C	FA			
(Ⅰ) RCはり	N	40	43.6	170	425	—	745	991
(Ⅱ) PC桁	H	38.7	46.3	150	388	—	813	955
(Ⅲ) PC桁No.4	H	38.7	46.3	150	388	—	813	955
(Ⅲ) PC桁No.5	FA	34.8	44.6	150	366	65	762	958

(2) 試験体の形状・寸法

RCはり試験体の形状・寸法を図-1に示す。RCはり試験体は、150mm×150mm×2100mmとし、主筋はD13を6本、スターラップはD13を200mmピッチで配置した。また、試験体の上下面および側面の鋼材かぶり厚は20mmとした。試験体の内部には、長さが2000mm、1000mm、500mm、250mm、125mmと異なるワイヤーセンサー(①～⑤)をプラスチック棒で固定した。なお、暴露は温度25℃、湿度70%の室内環境とした。

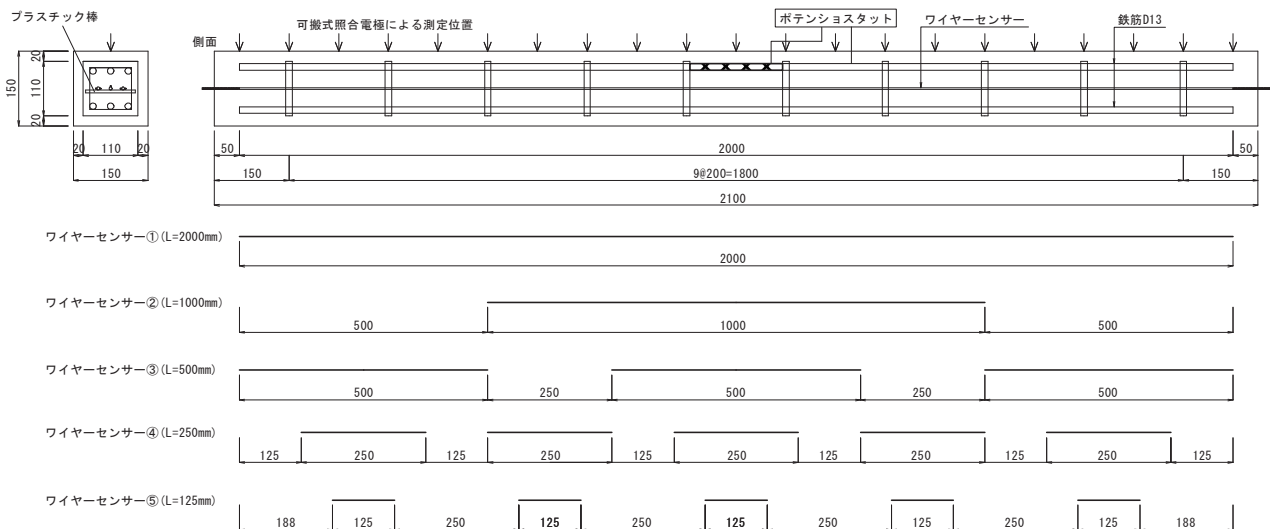


図-1 RCはり試験体の形状・寸法

(3) 試験方法

はり中央部に、鉄筋両端部を塩化ビニル管で保護することで内部鋼材との電氣的導通がない状態の鋼材を、ポテンシオスタットを用いて鉄筋電位を強制的にアノード方向に変化させた時の鋼材電位を計測した。鋼材電位は、ワイヤーセンサーと可搬式の飽和銀塩化銀照合電極(以下SSEと称す)を用いて計測した。可搬式での計測位置は、はり天端中心位置で長さ方向100mm間隔とした。

2. 2 シリーズⅡ

(1) コンクリート配合および使用材料

PC桁暴露試験体のコンクリート配合を表-1(Ⅱ)に示す。本試験体は、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強度が50N/mm²、材齢14時間でのプレストレス導入時の強度が35N/mm²を満足する配合である。セメントは早強ポルトランドセメントを使用した。

(2) 試験体の形状・寸法

PC桁試験体の形状・寸法を図-2に示す。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本配置した。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。桁の両端部2.0mの範囲は、下面に20mmの切欠きを設け、桁端部の鋼材かぶりを小さくした。試験体の内部には、市販の鉛照合電極と、照合電極と平行にした状態でワイヤーセンサーを設置した。ワイヤーセンサーは、桁の両端部3mの範囲に180mm、980mm、2980mmと長さの異なるワイヤーセンサーである。なお、試験体は平均気温15℃、平均湿度70～80%の屋外環境（石川県白山市八束穂地内）に暴露し、桁の両端部の側面と下面から、塩水（3%NaCl溶液）を常時浸透させ、桁端部の塩分浸透を促進させている。

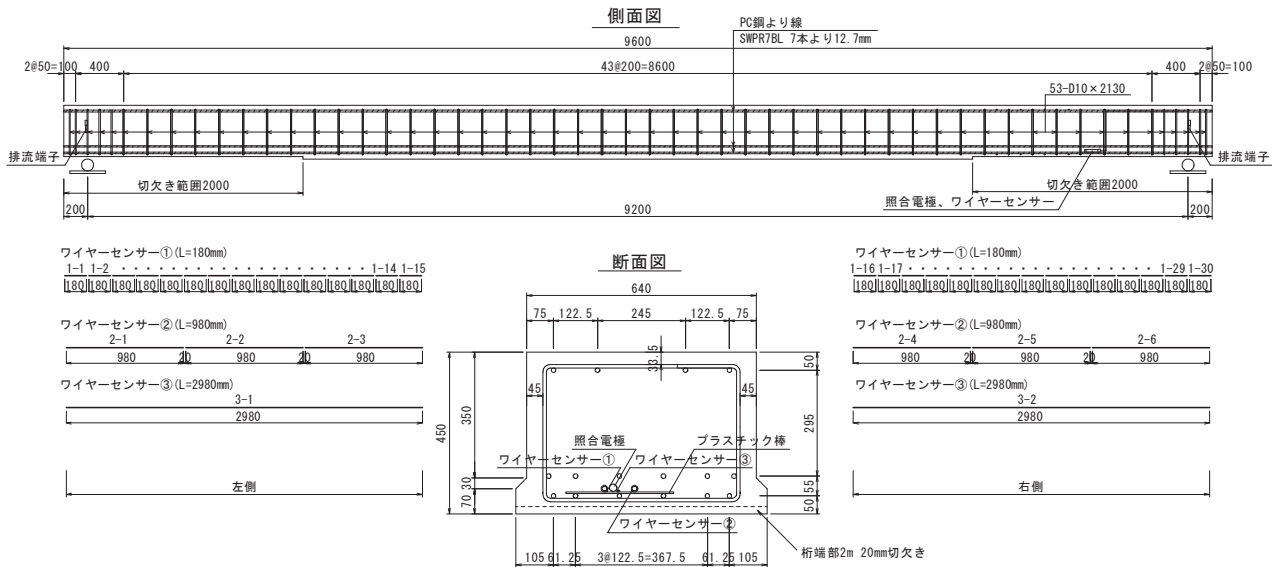


図-2 PC桁試験体（シリーズⅡ）の形状・寸法

(3) 試験方法

試験は2～3ヶ月に1回の頻度で、長さの相違するそれぞれのワイヤーセンサーおよびPC桁の図-2の側面図右側に埋設した鉛照合電極を用いて鋼材電位を計測した。

2. 3 シリーズⅢ

(1) コンクリート配合および使用材料

PC試験体のコンクリート配合を表-1(Ⅲ)に示す。PC桁試験体2本のうち試験体No. 4は、シリーズⅡと同じコンクリート配合とした。試験体No. 5は、分級フライアッシュ（七尾大田石炭火力発電所産、JIS A 6201 Ⅱ種相当）を使用し、打割り置換率15%のコンクリート配合とした。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。

(2) 試験体の形状・寸法

PC桁試験体の形状・寸法を図-3に示す。PC桁試験体は、プレテンション方式のPC桁とし、全長6.1mのS106-325の規格のPC桁である。PC鋼材には、12.7mmのPC鋼より線を計7本配置した。また、スターラップは、D6の鉄筋を200mmピッチで配置した。PC桁試験体の下面のかぶりは27.5mmである。試験体の内部には、市販の鉛照合電極と、照合電極と平行にした状態でワイヤーセンサーを設置した。ワイヤーセンサーは、980mm、5980mmと長さの異なるワイヤーセンサー(①～②)をプラスチック棒で固定した。試験体は、2本とも海岸線から20～30m付近の実際の塩害環境下で暴露している。

(3) 試験方法

試験は約3ヶ月に1回程度の頻度で、長さの相違するそれぞれのワイヤーセンサーおよびスパン中央部に埋設した鉛照合電極を用いて鋼材電位を計測した。

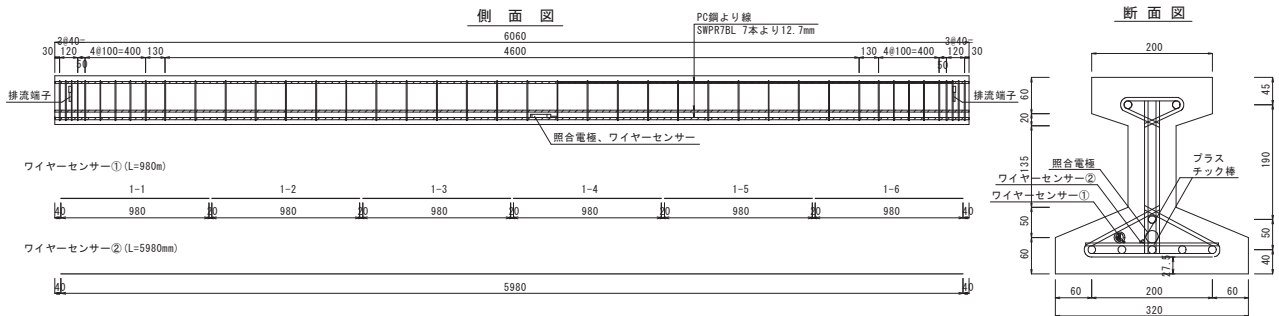


図-3 PC桁試験体 (シリーズⅢ) の形状・寸法

3. 試験結果と考察

(1) シリーズ I

図-4では、支間中央部の鉄筋電位を強制的に3段階 (-100mV, -300mV, -500mV) に変化させた場合と分極させない状態での、SSEとワイヤーセンサーのはり軸方向の電位の計測結果を示す。電位を分極させない場合と-100mVに変化させた場合は、電位の変化が小さいため、SSEとワイヤーセンサーの電位が-60mV程度と-100mV程度でほぼ一致している。また、ワイヤーセンサーの長さの違いによる影響は見られない。一方、-300mVと-500mVに変化させた場合は、SSEの計測値が支間中央部でそれぞれ-305mVや-509mVとなり、長さをもっとも短い125mmのワイヤーセンサーの電位とほぼ一致している。長さの短いワイヤーセンサーの電位は、支間中央部以外でもSSEの電位と一致している。表-2より、1mや2mの長いワイヤーセンサーの電位は、それぞれの長さでのSSEの平均電位とほぼ一致していることから、長いワイヤーセンサーは平均電位の卑化よりワイヤーセンサーを設置した区間に進行した腐食の可能性を検知できることが確認された。

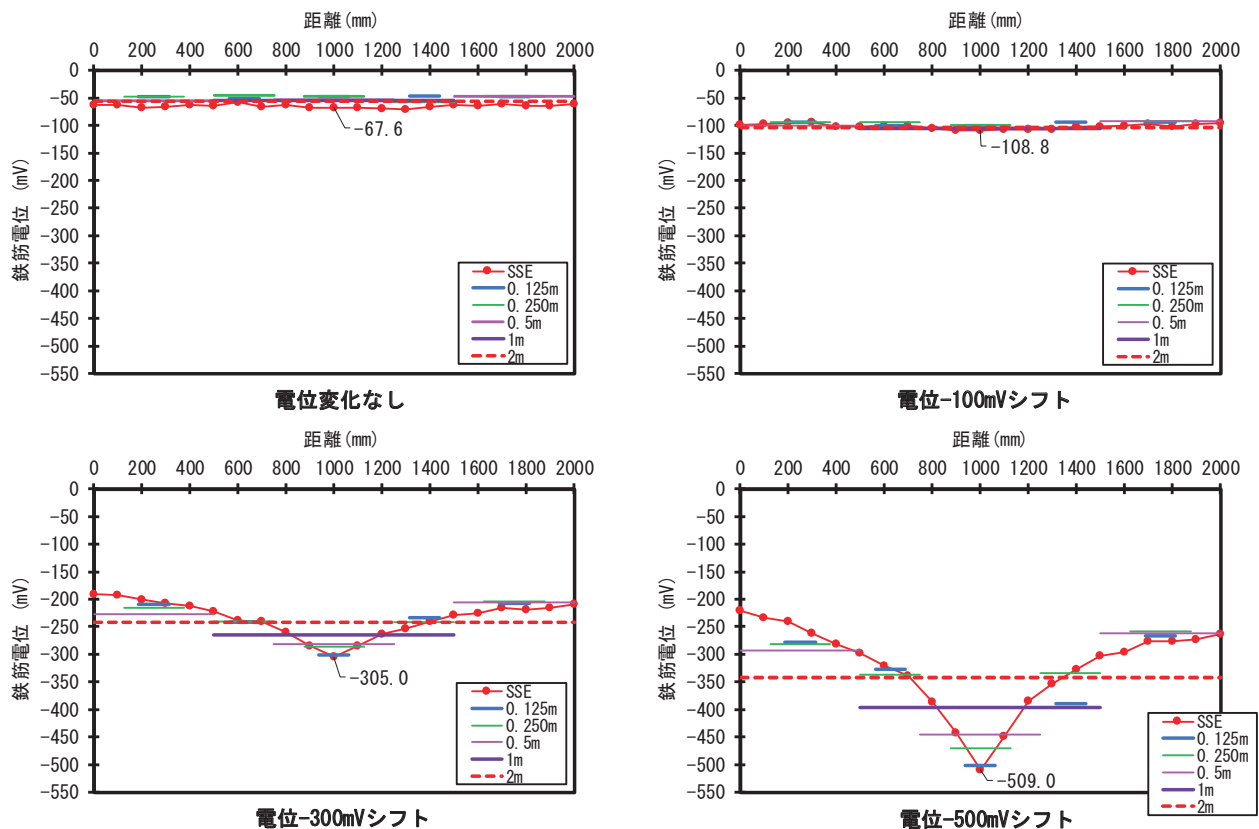


図-4 ワイヤーセンサーとSSEの鉄筋電位の関係

表-2 1m, 2mのワイヤーセンサーとSSEの平均電位

測定ケース	1m, 2mの平均電位 (mV)			
	WS-1m	SSE-1m	WS-2m	SSE-2m
電位変化なし	-55	-66	-56	-65
電位-100mVシフト	-105	-105	-104	-102
電位-300mVシフト	-266	-256	-242	-234
電位-500mVシフト	-396	-374	-341	-321

(2) シリーズII

図-5では、桁の左側(1-1~1-15区間)と右側(1-16~1-30区間)の桁端部3m範囲におけるワイヤーセンサーの鉄筋電位の計測結果を示す。右側のグラフには桁端から約1mのところに埋設した鉛照合電極の電位をSSEに換算(-680mV)した電位も併記した。左側のグラフの電位は、計測時期によりワイヤーセンサーの長さの違いでばらつきが見られたが、電位が卑に変化する傾向は計測できている。右側のグラフの電位は、ワイヤーセンサーの長さの違いによるばらつきが小さく、鉛照合電極の電位とも一致している。また、暴露開始からの鉄筋電位の変化も一致していることから、塩害による腐食の経時変化の傾向を検知できる可能性が確認された。なお、左側と右側の傾向の違いについては今後の課題とする。

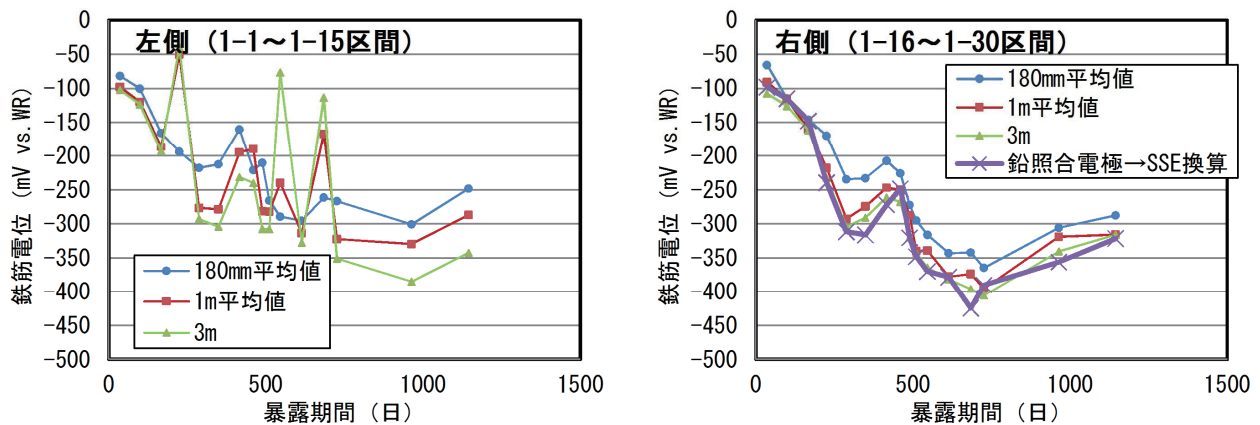


図-5 暴露期間の各ワイヤーセンサーの鉄筋電位の推移

(3) シリーズIII

図-6では、暴露開始から979日までのうち、19日、868日、979日時点でのワイヤーセンサーの鉄筋電位の計測結果を示す。暴露初期から868日までは、鉄筋電位の大きな変化は見られなかった。暴露開始から979日経過した時点では、1mのワイヤーセンサーの電位が桁の両端部で卑に変化し、6mのワイヤーセンサーの電位はその平均的な電位に近い値を示した。両端部の電位が卑に変化した理由は、桁端部のPC鋼材が露出していたことによる腐食の影響が考えられる。本試験では、実際の塩害環境下においても鋼材腐食を長いワイヤーセンサーを用いて計測できる可能性が確認された。なお、HとFAの試験体による電位の違いは、現段階では顕著に見られなかった。今後も継続的に計測を行い、フライアッシュ混和の影響をワイヤーセンサーで把握する予定である。

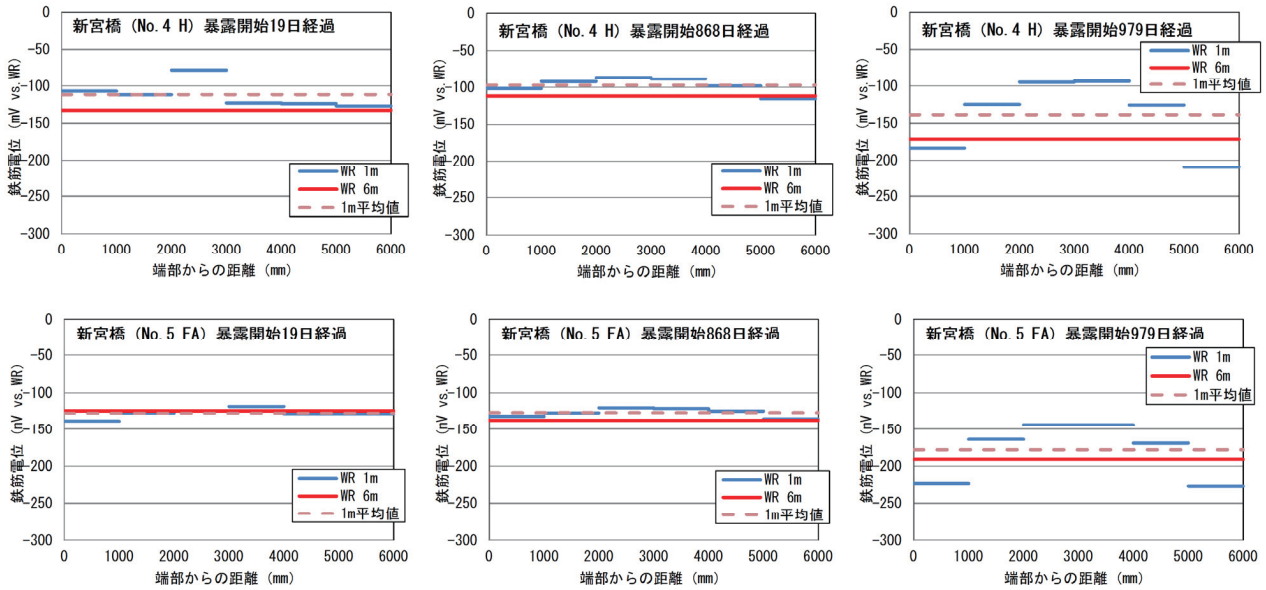


図-6 ワイヤセンサー1mと6mの鉄筋電位

4. まとめ

本研究では、ワイヤセンサーの新しい使用方法として長いワイヤセンサーを使用し、3つの試験体を用いて広範囲の鉄筋電位の計測による試験を行った。以下に本実験の範囲で得られた知見をまとめる。

- 1) シリーズⅠの小型試験体の試験より、長いワイヤセンサーの電位は、SSEの平均電位と一致したため、センサー区間の鋼材電位の平均値を示すことが確認された。また、長いワイヤセンサーは平均電位の卑化より局部的に進行した腐食の可能性を検知できることが確認された。
- 2) シリーズⅡの大型試験体の試験より、塩分浸透による鋼材電位の経年変化に対し、長いワイヤセンサーは鉛照合電極の電位とほぼ一致し、電位の変化の傾向も一致することが確認された。
- 3) シリーズⅢの大型試験体の試験より、実際の塩害環境下において、桁端部の腐食傾向を長いワイヤセンサーで検知できたことから、局部的な腐食の可能性を長いワイヤセンサーを用いても把握できることが確認された。

本研究は、長大試験体を用い鉄筋腐食を線的に把握した結果である。今後、平版試験体を用い平面的な把握の可能性、最適なワイヤセンサーの長さ、ASTM基準²⁾を考慮し平均化した場合の鉄筋腐食の判定方法等の課題を解決する予定である。

参考文献

- 1) Rahmita Sari Rafdinal ら, THE FEASIBILITY STUDY OF EMBEDDED WIRE SENSOR FOR CORROSION MONITORING OF CONCRETE, プレストレストコンクリート工学会 第26回シンポジウム論文集, pp. 663-666, 2017.
- 2) 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

謝辞

SIP戦略的イノベーション創造プログラム「コンクリート橋の早期劣化機構の解明と材料・構造性能評価に基づくトータルマネジメントシステムの開発(研究開発責任者:鳥居和之 金沢大学)」の一環の研究成果である。また、試験体の計測は(株)ピーエス三菱のラーミタサリ氏に実施していただいた。ここに関係各位に感謝申し上げる次第である。