

報告

コンクリート中鋼材の自然電位の測定方法に関する検討

井川 一弘^{*1}・渡辺 博志^{*2}・渡辺 寛^{*3}

要旨：コンクリート中の鋼材の腐食診断手法として自然電位法が多く用いられているが，課題も多く残されている。すなわち，コンクリート表面の湿潤時間，照合電極の種類，その設置位置と鋼材位置との関係およびマクロセルが存在する場合の測定結果の解釈などについて解明するため，供試体による実験を行った。その結果，30 分程度の湿潤時間が必要なこと，正しい換算を行えば照合電極種類には依存しないこと，測定位置は鋼材直上がより正確な結果が得られること，マクロセルの存在によって影響されることなどがわかったのでここに報告する。

キーワード：自然電位法，腐食，非破壊診断，塩害

1. はじめに

自然電位法は，コンクリート中の鋼材の腐食の可能性を判断するための非破壊試験方法として土木学会規準に採択され¹⁾，簡易に実施できる長所を有しているものの，いくつかの点で明らかになっていない課題が残されている。鋼材腐食に関してより正確な判断を下すためには，これらの課題を解決することが望まれている。特に，用いる照合電極の違い，測定面の含水状態，測定位置と鋼材位置の位置関係が，自然電位の値に及ぼす影響については，早急に明らかにすべきであると考えられる。ここでは，2つのシリーズの供試体（A 供試体と B 供試体）を製作し，自然電位の測定を行い，上記の課題について検討を行った。なお，測定に用いた照合電極は，酸化水銀，飽和塩化銀，鉛，および飽和硫酸銅の 4 種類である。

2. 試験条件

2.1 供試体

塩分量は 0 および 9kg/m³ の 2 種類とし，レディーミクストコンクリートに所定量の塩化ナトリウムを加え，練り混ぜを行った後，打ち込んだ。鉄筋は JIS G3149 ,SS400 のみがき丸鋼 φ 13mm

を用いた。養生条件は 7 日間湿空養生後，室内放置とし，材齢約 3 週で，測定面以外の 5 面について塗装した。使用したコンクリートの種類と配合を表-1 および表-2 に示す。

(1) A 供試体

A 供試体は，含有塩分の有無と自然電位の測定値はどのような関係があるか，測定方法（照合電極）によって測定値が異なるか，含水率（測定前の湿潤条件）によって測定値が異なるかどうかを検討する目的で作製した。その形状および電位測定位置を図-1 に示す。A 供試体の種類の表記方法は，例えば水セメント比 55%，塩分量が 9kg/m³ のものは A-55-9 と表すこととする。

(2) B 供試体

B 供試体は，照合電極の設置位置と鉄筋位置との関係で測定値が異なるかどうかを検討するため作製した。その形状および電位測定位置を図-2，図-3 および図-4 に示す。

B-2 供試体は，1 本の鉄筋が塩分量の異なる環境中を貫通している場合である。B-1 供試体は，水平方向に塩分量が異なる環境中に鉄筋がある場合で，マクロセルが水平方向に存在している。B-3 供試体は，上下に塩分量が異なる環境に鉄筋がある場合で，マクロセルが深さ方向に存在し

*1 日本構造物診断技術協会 (正会員)

*2 独立行政法人 土木研究所 工修 (正会員)

*3 日本構造物診断技術協会 (正会員)

表-1 コンクリートの種類

水セメント比 (%)	コンクリートの 種類による記号	設計強度 (N/mm ²)	スランプ (cm)	空気量 (%)	粗骨材の最大寸 法による記号	セメントの種類 による記号
55	普通	21	8	4.5	25	N
70	普通	13.5	8	4.5	25	N

表-2 コンクリートの配合

水セメント比 W/C (%)	細骨材率 S/a (%)	単 位 量 (k g / m ³)				
		水量 W	セメント量 C	細骨材量 S	粗骨材量 G	混和剤量 AE
55	44.3	158	288	801	1018	3.08
70	45.3	159	228	840	1026	2.44

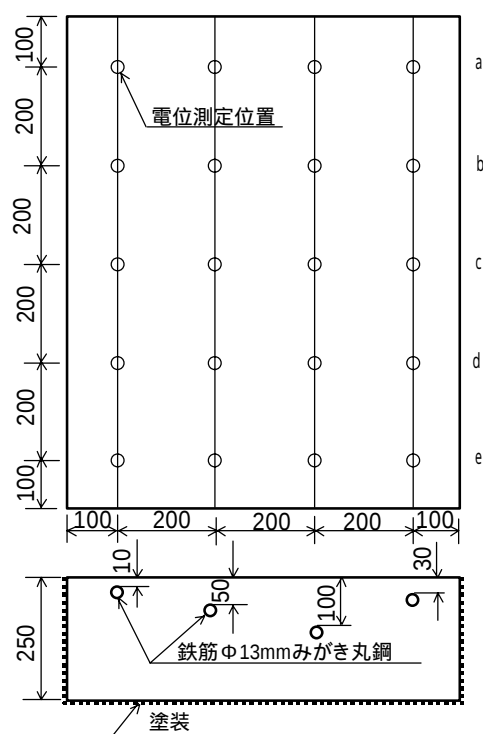


図-1 A 供試体

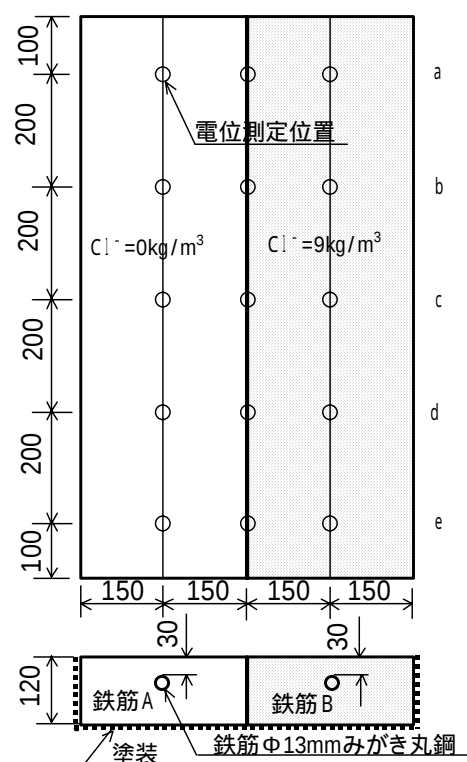


図-2 B 供試体

ている。また、このマクロセルはオン・オフで
きる構造とした。

2.2 自然電位の測定方法

自然電位の測定は、材齢 57 日の時点で実施した。測定方法は土木学会規準に従った。なお、測定結果は、土木学会規準に従い、飽和硫酸銅電極基準に換算し表示した。ただし、温度補正については行っていない。

3. 結果と考察

3.1 含水状態の違いについて

測定面の含水状態と湿潤時間との関係につい

て検討した。試験はA 供試体を用い、測定する 10 分前、30 分前、および 60 分前に測定面に湿布をおき、測定まで湿潤状態に保つこととした。

図-5 は各供試体で測定した結果を示したものである。測定点数は、各供試体あたりほぼ等間隔に 16 点で、その平均値を示した。測定装置は 2 台でいずれも表面水分計（静電容量式）を用いた。2 台の装置で測定した結果は、ほぼ同じ値を示したので、図-5 は一例を示したものである。この結果によると、湿潤時間が長くなるほど含水率の測定値は大きくなる傾向が認められ

るものの、その増加量はわずかであった。それに比較し、コンクリート中の塩分の有無が大きく影響し、水セメント比にかかわらず、塩分有りの方が、含水率が大きい結果となった。

図-6 は湿潤時間を変化させた場合の、供試体の自然電位の測定結果を示したものである。照合電極として、飽和塩化銀電極を用いた場合を示している。

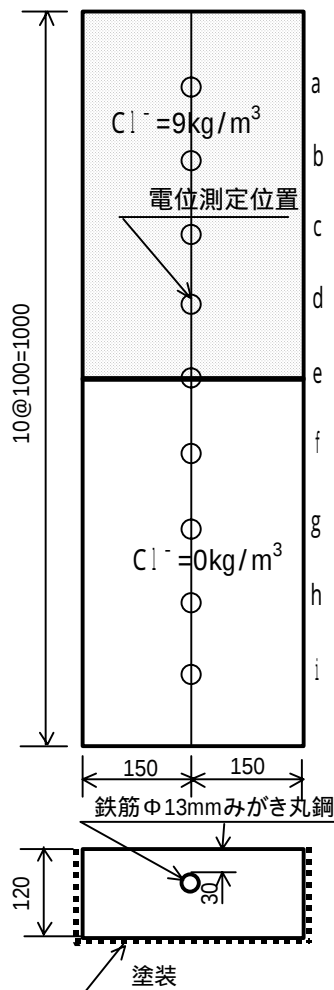


図-3 B-2 供試体

この結果によ

ると、塩分を含まない供試体 A-70-0 では湿潤時間を 10 分とした場合、30 分以上の湿潤時間を確保した場合と比べて、約 20mV 貴な電位を示した。湿潤時間を 30 分および 60 分とした場合の差はほとんど生じていない。

一方、塩分を含む供試体については、かぶり が 10mm の場合を除き、湿潤時間の違いは測定結果にほとんど影響しない。

以上の結果をまとめると以下のことが言える。コンクリート表面での含水率の測定値は、湿潤時間の増加に伴い増加し、コンクリートの含水量を反映したものであることが明らかになった。しかし、コンクリート中に塩分を含まない供試体において、自然電位の値に明らかに差が生じる 10 分の湿潤時間から、自然電位の値が安定する 30 分の湿潤時間までの含水率の増加量は、A-55-0 で 0.25%、A-70-0 で 1.04%と、わずか

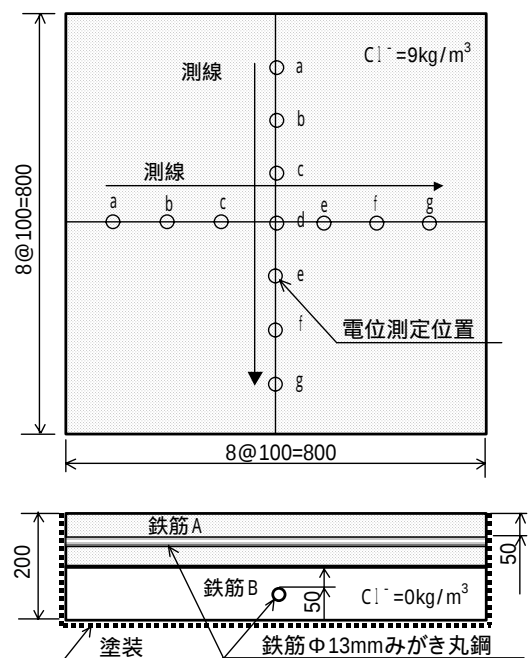


図-4 B-3 供試体

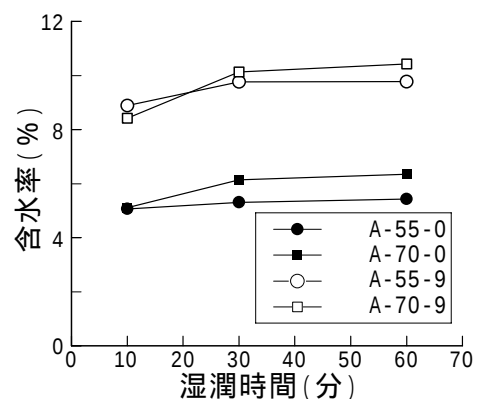


図-5 コンクリート表面の含水率測定結果

であること、またコンクリート中の塩分量が及ぼす影響は、これよりもはるかに大きいことから、自然電位測定にあたっての測定面の湿潤条件を、含水率の値で規定することは困難であると考えられる。なお、塩分を多く含むコンクリートでは、今回の試験結果によると、表面の含水状態にあまり注意を払わなくても、ほぼ一定の自然電位が得られる（すなわち、含水状態にあまり依存しない）が、かぶりが小さい場合は、湿潤状態の違いが大きな影響を及ぼす場合もある。この理由については今のところ不明であり、今後の検討課題である。

なお、以降に述べる自然電位の測定結果に関

する考察は湿潤時間を 30 分以上とって得られた結果について論じた。

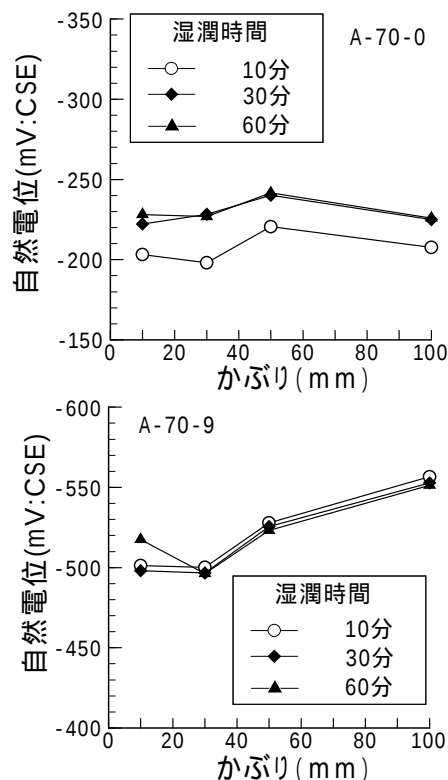


図-6 湿潤時間と自然電位の関係 (A 供試体)
(上：塩分 0kg/m^3 ，下：塩分 9kg/m^3)

3.2 照合電極の違いについて

(1) A 供試体での測定

酸化水銀電極による測定結果の一例を図-7 に示す。図は測定点 a から e まで 5 点の平均値で示した。その結果は、コンクリート中の塩分の有無により大きな差が生じていた。また、図-8 に飽和硫酸銅電極による測定結果を示す。

このように、同一供試体について、湿潤時間を 30 分以上とって得られた自然電位の測定結果は、照合電極の種類によらずほぼ同じ値を示した。すなわち、照合電極の換算を適切に行えば、異なる照合電極を用いても、再現性が非常に高い測定結果が得られるものと考えられる。

なお、かぶりの影響および水セメント比による差は明確には認められなかった。

(2) B 供試体での測定

図-9 は、B-2 供試体の自然電位の軸方向分布を示したものである。図中には、酸化水銀およ

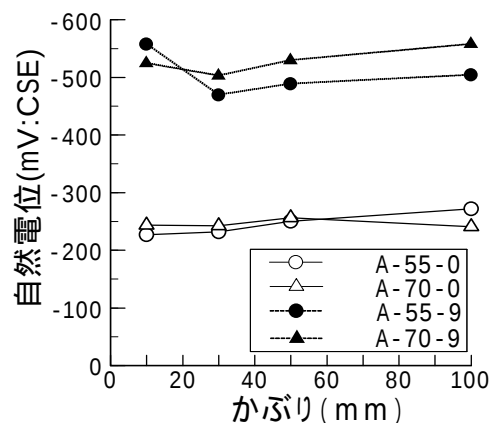


図-7 A 供試体における自然電位測定結果
(使用照合電極：酸化水銀電極)

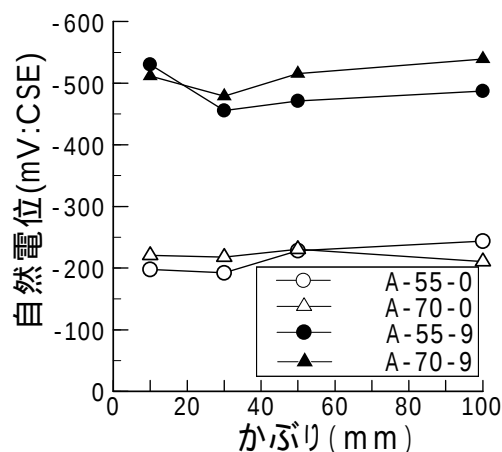


図-8 A 供試体における自然電位測定結果
(使用照合電極：飽和硫酸銅電極)

び飽和硫酸銅電極を用いた場合を示している。自然電位の測定結果は、塩分量が変化しているところで、自然電位の値も変化し、コンクリート中の塩分量の多い側で自然電位は卑な値を示している。塩分量が少ない側で照合電極の異なる場合の測定結果に若干の差が認められるものの、上記の傾向はいずれの場合でも明確に認められる。このことから、一本の鉄筋が、塩分量の異なる環境を貫いている場合でも、塩分の有無に応じた違いが、自然電位に反映されるものと考えられる。

なお、図-9 中には、同一の水セメント比のコンクリートを用いた場合の A-70-0 供試体および A-70-9 供試体で B-2 供試体と同じかぶりを持つ場合の、自然電位の測定結果を点線で示してい

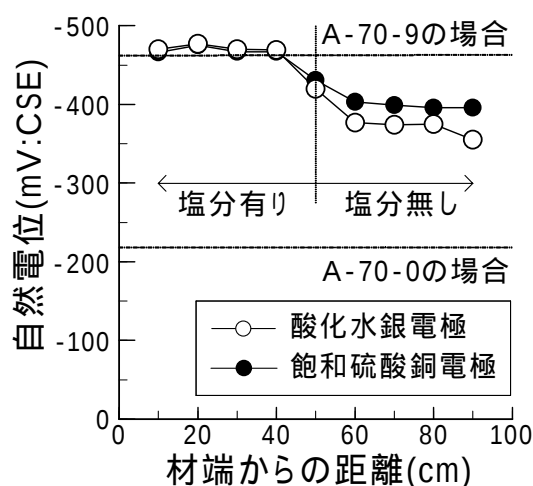


図-9 B-2 供試体で測定した自然電位の分布

る。A-70-9 供試体での測定結果と比較すると、B-2 供試体の塩分量が多い領域での測定結果とほぼ同じ値が得られている。一方、B-2 供試体で塩分を含まない領域と、A-70-0 供試体での測定結果を比較すると、B-2 供試体での電位はかなり卑な方向にずれていることが分かる。これは、マクロセルの形成による分極の影響が現れたためであると考えられるが、詳細については、B-1 供試体での測定結果の考察で述べることとする。

3.3 複数の鉄筋が存在する場合

自然電位を測定する場合の測定位置については、鉄筋の直上とするのが原則である。しかし、場合によっては、鉄筋の直上でない位置で自然電位を測定する場合もあり、このような場合での自然電位の測定結果の解釈は必ずしも明らかにされていないものと考えられる。ここでは、複数の鉄筋が存在する場合の測定点の捉え方について検討することとした。

(1) 2本の鉄筋が平行に配置されている場合

それぞれの鉄筋を個別に接続して自然電位を測定した場合、および2本の鉄筋を短絡させて自然電位を測定した場合について検討を行った。自然電位の測定位置と鉄筋の関係は図-2に示すとおりである。

図-10は酸化水銀電極を照合電極として測定した自然電位の結果を示したものである。鉄筋Aに接続して自然電位を測定した場合の測定結果

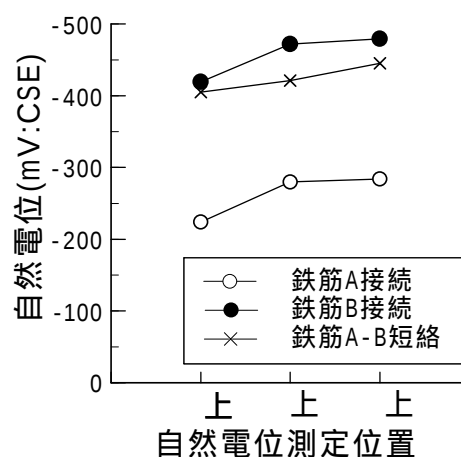


図-10 B-1 供試体での自然電位測定結果

は-220～-280mV(vs CSE)となり、測定位置によってわずかに差が生じている。一方、鉄筋Bに接続した場合は、-420～-480mV(vs CSE)となった。Aシリーズの供試体で単体の鉄筋について測定した場合、鉄筋Aと同じ条件に相当する測定結果は-220mV程度、鉄筋Bに相当する結果は-460mVとなった。従って、B-1 供試体において各鉄筋個別に接続した場合に測定された自然電位は、おおむねA供試体で測定した自然電位の値と一致していることが分かる。ただし、測定位置と鉄筋の位置関係について考えると、鉄筋Aおよび鉄筋Bとも、鉄筋直上で測定した値と、鉄筋から離れた位置で測定した値には60mV程度の差が生じていて、鉄筋直上で測定した値の方が、A供試体で単体の鉄筋について測定した値に近くなっている。以上の結果からいえることは、自然電位の概略値を得るには、測定対象となる鉄筋から離れた地点で測定しても良いが、より正確な測定結果を得るためには、測定対象となる鉄筋直上で測定することが原則であると言える。次に、鉄筋Aと鉄筋Bを短絡させた場合、鉄筋Bの直上の自然電位は短絡によりわずかに貴な方向にシフトし、鉄筋A直上の自然電位は大幅に卑な方向にシフトした。このような電位のシフトが生じた理由は短絡によりマクロセルが形成され、分極が生じたためであると考えられる。ここで、塩分を含まない鉄筋Aの分

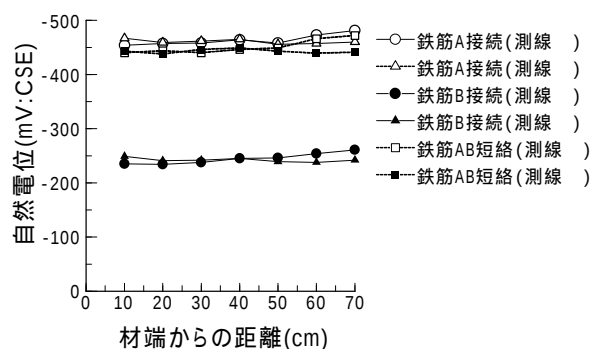


図-11 B-3 供試体での自然電位測定結果

極抵抗が大きいいため、分極による電位の変動が大きくなったものと考えられる。実構造物では鉄筋は電氣的に導通のある状態に置かれているものと考えられるので、B-1 供試体のように、各鉄筋が短絡した状態で測定しているものと考えられる。従って、マクロセルの形成状況によっては、カソード側となる鉄筋でも分極の影響により卑な電位が測定される場合があると考えられる。

(2) 2本の鉄筋が直交している場合

2本の鉄筋を直交して配置した B-3 供試体の自然電位測定結果について検討する。この場合もそれぞれの鉄筋を単体で接続する場合と、短絡させてから測定した場合の2通りの方法をとった。供試体は図-4 に示すとおりであり、上層部は塩分(9kg/m³)を含み、下層部は塩分を含んでいない。測線は、塩分を含む上層側にかぶり3cmで配置された鉄筋Aの直上であり、測線は、塩分を含まない下層にかぶり15cmで配置された鉄筋Bの直上に位置している。

自然電位の測定結果を図-11 に示す。この結果によると、各鉄筋個別に接続して測定した自然電位の値は、測定位置によらず、ほぼ一定の値になり、鉄筋Aに接続した場合は鉄筋Aの、鉄筋Bに接続した場合は鉄筋Bの自然電位が測定され、接続されていない鉄筋の影響はなかった。ここで B-1 供試体では、供試体の鉛直打継位置でコンクリートの含有塩分量が変化していたため、測定位置(上、上、上)によって電位の測定結果に差が生じたが、B-3 供試体では水

平打継位置を境にして塩分量を変化させているため、測線上での塩分量は同一である。このために、B-3 供試体では B-1 供試体と異なり、測定位置によって自然電位の値にほとんど差が認められなかったものと考えられる。

また、鉄筋Aと鉄筋Bを短絡させた場合の自然電位の値は B-1 供試体の場合と同様に、分極の影響を受け、塩分を含まない鉄筋Bの電位が卑な方向に移動したものと考えられる。

4. まとめ

- 1) コンクリート中の塩分の有無により、鉄筋の自然電位は明確な差が生じる。
- 2) 照合電極を変えても、換算を適切に行えば、照合電極による差はほとんど認められない。
- 3) 測定面の湿潤時間が異なると、得られる自然電位の値に差が生じる場合がある。特に、塩分を含まない場合には湿潤時間により測定値に差が認められ、少なくとも30分程度の湿潤時間が必要になると考えられる。
- 4) 自然電位の測定結果を正確に測定するには、鉄筋直上に測定位置を設ける必要がある。ただし、自然電位の概略値を把握したい場合には、特に鉄筋位置の直上に測定位置を限定しなくても良いものと考えられる。
- 5) 含有塩分量の異なる環境に置かれた鉄筋を短絡させた場合に測定される自然電位は、マクロセルの形成による分極が生じるため、腐食を生じないと考えられる鉄筋であっても卑な電位が測定される場合がある。

5. おわりに

本報告は、独立行政法人土木研究所と日本構造物診断技術協会で実施した共同研究の成果の一部である。

参考文献

- 1) 土木学会規準：コンクリート構造物における自然電位測定方法，JSCE-E601-2000，2000.12