

論文 自然電位法によるコンクリート中の鉄筋の腐食評価に関する研究

枝広英俊*1・十代田知三*2・竹内昌彦*3・山本祐基子*4

要旨:コンクリート中の鉄筋の腐食状況を非破壊で、かつ、補助的手段として調査・判定する方法には、主に自然電位法や分極抵抗法及び交流インピーダンス法等が用いられている。本実験研究では、測定が最も簡易といわれている自然電位法を用いて、かぶりコンクリートの Cl⁻総量や中性化深さ及びかぶり厚さ等の影響と、埋設した鉄筋の腐食状態の違い、さらに孔食を想定して人工的の断面欠損を生じさせた鉄筋の電位を測定するなどによって、それらの関係を定量的に把握し、自然電位法の腐食判定評価に対する適用性に関してその留意事項を明らかにした。

キーワード:鉄筋コンクリート、非破壊試験、自然電位、鉄筋腐食、ひび割れ、補修材

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物(部材)の劣化診断や耐用性診断を行う上で、非破壊試験による鉄筋の腐食評価には、自然電位法や分極抵抗法等の電気化学的診断が補助的手段として用いられている。その際、電位測定値は、鉄筋の種類・径・長さ、かぶりコンクリートのCl⁻量や中性化の程度、ひび割れの有無、または、アルカリ回復剤・補修材使用の可否等によっても差異を生じると予測される。しかし、このような条件下で自然電位法の適用性・信頼性は、必ずしも十分とはいえないのが現状である。

そこで本研究は、シリーズⅠ・Ⅱに分け、シリーズⅠでは、Cl⁻総量を変化させたコンクリート中の鉄筋の種類・径による差異、ひび割れの有無と補修材の影響等が自然電位に与える影響を、中性化促進試験や、オートクレーブによる腐食の促進試験及び屋外自然暴露試験を行うことによって検討した。シリーズⅡでは、化学的侵食を受けるRC部材や、補修時に腐食部分の除去を行った場合の補修前後における断面欠損が電位変化に及ぼす影響等を明らかにすることを目的に、コンクリート中に埋設した鉄筋の一部分を露出させ、その鉄筋の所定箇所腐食及び孔食を想定した断面欠損を作成し、それらの状態と自然電位との関係を検討した。

2. シリーズⅠの実験概要

2.1 実験の要因と水準、使用材料、調査

表-1にシリーズⅠの実験要因と水準を、表-2にコンクリートの調査を示す。使用したセメントは普通ポルトランドセメント(比重: 3.15)、骨材は青梅産砕石(表乾比重: 2.60, 吸水率 0.80%)及び大井川産川砂(表乾比重: 2.59, 吸水率 2.43%)とした。

表-1 実験要因と水準(シリーズⅠ)

要因	水準	
鉄筋(電炉)	種類の記号(径)	SR235(φ13), SD295A(D13, D16) SD345(D19, D25, D29, D51)
	長さ	200mm, 400mm, 1200mm
ひび割れスリット	有り, 無し	
アルカリ回復剤 ひび割れ補修材	アルカリ回復剤注入	
	ひび割れ補修材注入	
	アルカリ回復剤注入+ひび割れ補修材注入	
かぶり厚さ(mm)	補修無し	
かぶり厚さ(mm)	20, 40	
Cl ⁻ 総量(kg/m ³)	0, 0.3, 0.6, 1.2, 2.4	
照合電極	飽和カロメル (SCE)	
	飽和銀-塩化銀 (SSCE)	

表-2 コンクリートの調査

シリーズ	スラン プ (cm)	空気 量 (%)	W/C (%)	単位量(kg/m ³)			AE ^{※2} 減水 剤 (cc/m ³)	
				セ メ ン ト	水	細 ^{※1} 骨 材		粗 ^{※1} 骨 材
I	21	4.0	60	328	196	650	1063	3280
II	18	4.0	60	298	179	769	970	2970

※1 細・粗骨材は表乾重量を示す。

※2 主成分はオキシカルボン酸塩系。

*1 芝浦工業大学助教授 工学部建築学科 (正会員)

*2 芝浦工業大学教授 工学部電気設備学科 工博 (正会員)

*3 芝浦工業大学大学院 建設工学専攻

*4 三菱建設(株) 技術研究所 (正会員)

2. 2 試験項目及び方法

(1) 試験体の形状及び寸法

試験体の形状・寸法は図-1に示す4種類とした。図-1中に示す試験体 A は、室内気中養生後に腐食の促進試験を行った場合の自然電位測定に用い、その他は、屋外自然暴露を行った場合の自然電位の経時変化の測定に供した。

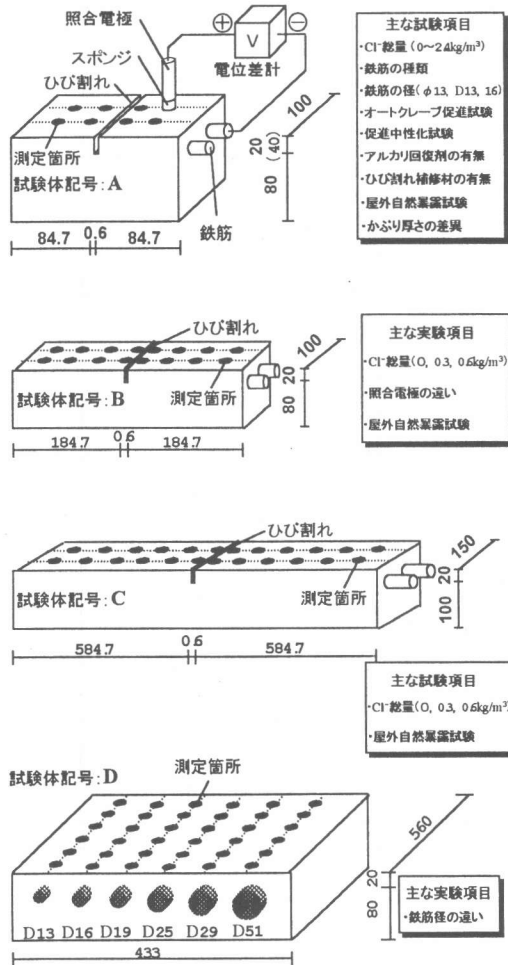


図-1 試験体の形状と自然電位測定方法

(2) 養生方法

材齢2日で脱型し、28日まで気中養生した後、所定の腐食促進試験と屋外自然暴露を行った。

(3) 試験方法

自然電位は、測定前にコンクリート表面を蒸留水で十分に湿らせ、照合電極に飽和カロメル電極

(SCE)を用いて測定した。ただし、試験体 B では、一部の試験で飽和銀-塩化銀電極(SSCE)も併用した。測定箇所は、ひび割れの近傍を含めて、鉄筋1本に対し試験体 A が4箇所、試験体 B が8箇所、試験体 C が12箇所、試験体 D が6箇所とした(図-1参照)。

オートクレーブ(以下、AC と称す)による腐食促進試験は、3時間で180℃、10気圧まで昇温・昇圧し5時間保持した供試体を、自然放冷の後24時間水中浸漬とした。これを1サイクルとし、3サイクル迄行った。腐食の促進試験は、AC 試験のみの場合と、8週間の促進中性化(20℃、60%RH、CO₂10%、中性化深さ5.2~6.5mm)後にAC試験を行う場合の2種類とした。

ひび割れ補修方法は、促進中性化を終了した試験体に、アルカリ回復剤、ひび割れ補修材を所定のひび割れに、ゴムの復元力を利用した注入器具を用い低圧注入した。また、「アルカリ回復剤+ひび割れ補修材」を使用する試験体は、ひび割れにアルカリ回復剤を注入し、含浸させた後にひび割れ補修材を注入した(図-2

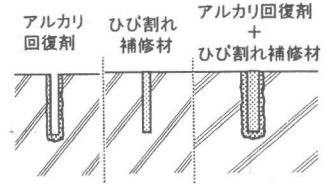


図-2 ひび割れ補修方法

参照)。

3. シリーズIIの実験概要

3.1 実験要因と水準、使用材料及び調査

表-3にシリーズIIの実験要因と水準を示す。ただし、使用材料はシリーズIと同様とし、コンクリートの調査は表-2に示した。

表-3 実験要因と水準(シリーズII)

要因	水準
発錆面積率 (%)	0, 10, 30, 50
断面欠損の深さ (mm)	1, 3, 5, 7
断面欠損の幅 (mm)	3, 5, 10, 20

3.2 試験項目及び方法

(1) 発錆面積率と鉄筋の自然電位

図-3に試験体の形状・寸法を示す。使用した鉄筋は、SD295A D13とした。なお、養生方法は

シリーズ I に準じた。

また、発錆部分は、図-3に示すコンクリート側面から 35mmの位置とした。発錆開始材齢は 28 日とし、発錆を促す溶液には塩酸 (HCl) 35%溶液を用い、これを露出した鉄筋の円周に添って発錆面積率が 0, 10, 30, 50%となるように塗布した。ただし、HCl 溶液は、最初に塗布してから3時間後、1日、3日、5日、7日後に繰り返し塗布した。また、発錆をさせない部分及び健全な鉄筋には、油性調合ペイントを塗布した。

自然電位を測定した照合電極は、飽和カロメル電極 (SCE) とした。図-3に示す測定位置に対して、脱型直後、材齢 14 日と 28 日、HCl 溶液を塗布してから3時間後、1日後、3日後、5日後、7日後に自然電位を測定した。

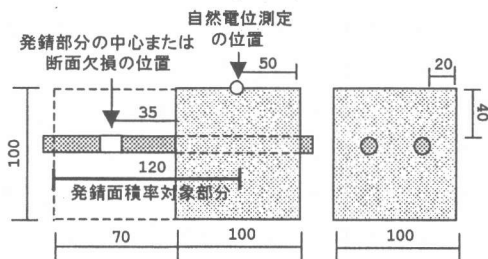


図-3 試験体の形状(シリーズ II)

(2) 断面欠損を生じた鉄筋の自然電位

試験体は、3.2(1)に準じて作成した。

断面欠損の加工は、材齢 28 日に行い、金ヤスリ・金鋸を用いてコンクリートの側面から 35mm の位置に設けた。断面欠損の深さを変化させる場合は、鉄筋の表面から 1, 3, 5, 7mm の深さに切削し、欠損の幅は全て 1mm とした。断面欠損の幅を変化させる場合には、3, 5, 10, 20mm の幅に切削し、欠損の深さは全て 3mm とした(図-4参照)。

自然電位の測定は、脱型直後、材齢 14 日、材齢 28 日の断面欠損の加工直前と直後に行った。

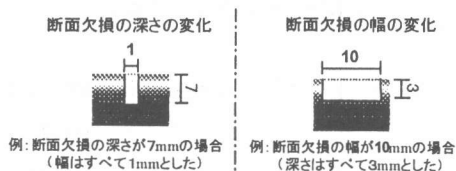


図-4 断面欠損を生じさせた鉄筋の状態

4. 実験結果及び考察

4.1 Cl⁻総量が電位に及ぼす影響

図-5に材齢の違いによる Cl⁻総量と自然電位の関係を示す。脱型時の自然電位は、Cl⁻総量の増大に伴い僅かに卑な値を示す傾向にあった。その後、材齢 28 日までは鉄筋の不動態化によりアノード反応が抑制されて腐食電流が微妙になったこともあり、全体的に貴な方向に向かうが、Cl⁻総量によって明らかな差異を生じた。既往の研究¹⁾によると、鋼に孔食を引き起こす Cl⁻の許容濃度は 0.02M (Cl⁻総量に換算して 0.7 kg/m³)と報告されており、本実験の材齢 28 日でもほぼ同様に 0.6 kg/m³を超えると、約 20~30mV 卑な値を示した。

なお、AC 促進試験後の材齢 42 日では、明らかに発錆が認められた Cl⁻総量 0.3kg/m³を超えた試験体の電位が著しく低下した。

従って、材齢の違いや腐食の程度にもよって多寡はあるが、Cl⁻総量が多くなるに伴って電位は卑な値を示すことが明らかとなった。

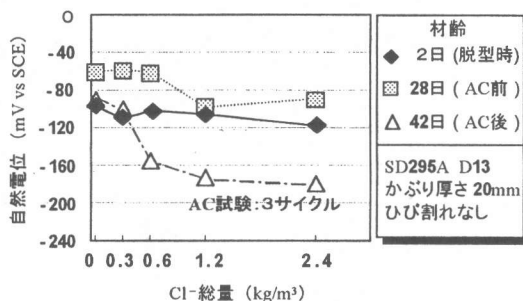


図-5 材齢の違いによる Cl⁻総量と自然電位の関係

4.2 鉄筋の種類・径が及ぼす影響

図-6に鉄筋の種類の違いによる材齢と自然電位の関係を示す。気中養生した材齢 28 日までの SD295A D13 と SR235 φ13 を比較すると、両者とも電位は -50~-150 mV の範囲にあり、かつ、若干のばらつき・多寡を生じてはいるが不動態化による貴な値への上昇が認められた。

従って、鉄筋の種類・記号による差は小さく、腐食判定・評価においては無視できると考えられる。

なお、参考として AC 促進試験後の電位を図-6中に、合わせて Cl⁻総量別の発錆面積率を図-

7に示した。SD295AとSR235の発錆面積率は、表面加工・処理、ミルスケールの厚さ及び化学成分等の違いによって若干異なり、SD295Aが約2～3倍の発錆面積率となったが、自然電位の値及び傾向は類似した結果が得られた。

また、鉄筋の記号と径の違いによる影響を図-1の試験体Dにより比較した(図-8参照)。材齢3箇月までの結果ではあるが、全ての鉄筋の電位は、不動態化により貴な方向に漸増し、材齢28日以降はほぼ安定化する傾向にあった。また、SD295AのD13とD16の電位は、最も卑な値を示し、SD345の太径鉄筋と比較すると20～30mVの差を生じた。

その原因については、鉄筋の種類(記号)・鉄筋径の違い、コンクリートの微妙な含水率の差異、または測定誤差等も考えられるが、今後の長期材齢の結果や多角度からの実験により結論付けたい。

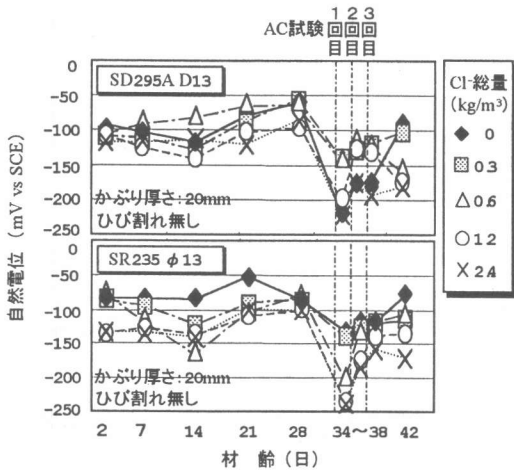


図-6 鉄筋の種類による材齢と自然電位の関係

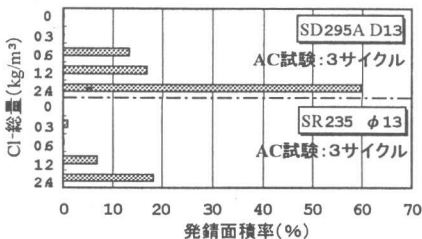


図-7 鉄筋の種類の違いによる発錆面積率

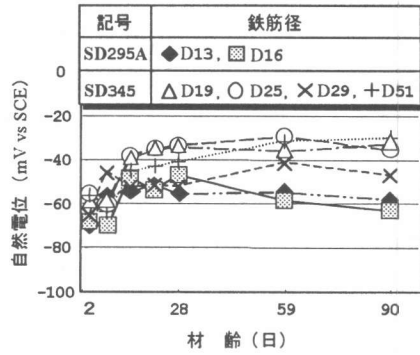


図-8 鉄筋径の違いによる材齢と自然電位の関係

4.3 ひび割れの有無及びかぶり厚さの影響

図-9に材齢87日(3箇月)迄の主な結果を示す。不動態化の進行により、脱型時から認められる電位の貴な方向への増大は、ひび割れ有りが約80mV、ひび割れ無しが約100mVの値を示し、健全な試験体が僅かに大きくなる結果を示したが、有意差とはいえないと判断される。また、「かぶり厚さの小さいものの電位は、大きいものに比べ卑の値を示す」という報告²⁾もあるが、両者とも不動態化が進行中であり、材齢87日までの結果では、必ずしも差異を明確に判定することができなかった。

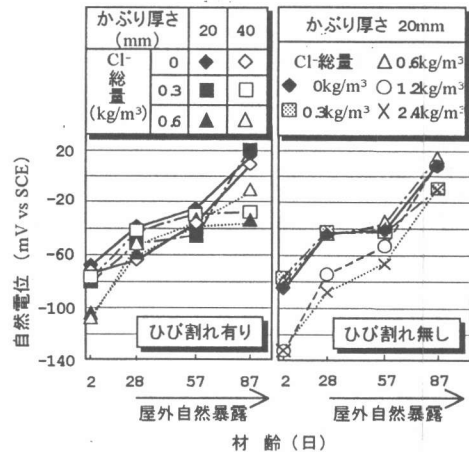


図-9 ひび割れの有無及びかぶり厚さの違いによる材齢と自然電位の関係

4.4 中性化、補修及び腐食促進試験の影響

図-10に主な結果を示す。促進中性化期間中も、不動態化の進行及び中性化による拡散電位差による起電圧の影響³⁾等もあって、促進試験開始

前と比較して約 40~80mV 貴の方向へ漸増した。しかし、本実験の W/C=60%, かぶり厚さ 20mm の条件では、中性化促進試験開始から5週~6週目にかけて貴な値のピークを迎え、その後は設定期間の8週まで急な低下が認められた。

また、AC 促進試験では、1サイクル目に-140~-200mV の最も卑な値を示し、2~3サイクルにかけては逆に貴な方向に増大し、AC 促進試験終了後は再び卑な方向になる傾向を示した。これらは明らかに発錆を生じたこと、水和組織や微細構造の変化及び Cl⁻ が移動したこと等が主因と推測される。

さらに、AC 試験により、補修材を施したものと補修無しの試験体の発錆面積率や電位の変化を測定し比較した(図-10 参照)。その結果、本実験のような過酷な条件下では、発錆面積率に顕著な差異が認められず、かつ、一定の傾向を示さなかった(AC 試験3サイクルで7±4%)ことも起因して、電位測定値に明らかな有意差が認められなかった。

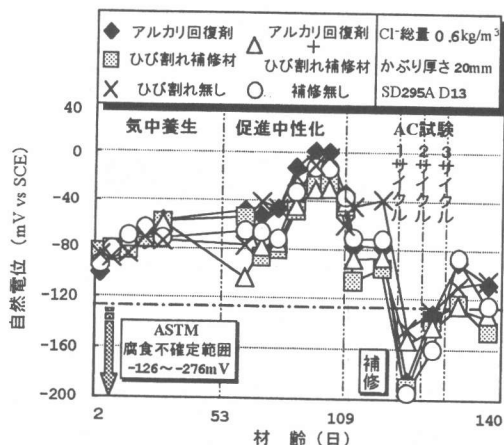


図-10 補修方法の違いによる自然電位の関係

4.5 照合電極の違いによる影響

図-11 に主な結果を示す。図-1の試験体 B を用いて、SCEとSSCEの自然電位を比較すると、多少バラツキはあるが SSCE の測定値が約 20mV 貴の値を示した。SSCE の標準電位が 0.2222V (vs SHE 25°C)、同じく SCE が 0.2680V (vs SHE 25°C) であることから、既往の報告⁴⁾では、「SSCE で測定した値を SCE の自然電位に換算する場合は 46mV マイナスに補正する」とあるが、本実験結果と比較

すると 26mV 程度の差を生じた。その理由として照合電極の電解液濃度の僅かな変化、電極とコンクリートとの接触誤差及びコンクリートの含水量等が微妙に影響し相殺し合った結果と考えられる。従って、測定誤差を最小とするためには、試験時の条件に対する十分な配慮が必要であろう。

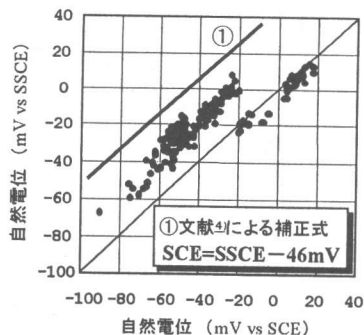


図-11 照合電極の違いによる自然電位

4.6 測定位置の違いによる比較・検討

図-12 に測定位置と自然電位の関係を示す。材齢の経過に伴い自然電位は貴の方向へ移動し、材齢 87日と116日の電位差は僅かであり、電位の安定化傾向が認められた。ただし、測定点の違いによる電位の最大値と最小値の差は 10mV 程度であり、さらに、ひび割れ部分の鉄筋も未発錆のため、差異を生じなかったと推測される。

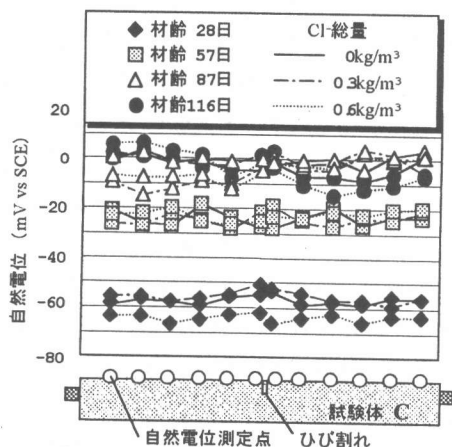


図-12 測定位置と自然電位の関係

4.7 発錆面積率を変化させた場合の検討

図-13 に HCl 35% 溶液を塗布した場合の発錆

面積率の違いと自然電位の関係を示す。塗布前の材齢 28 日までの自然電位は、 $-50 \sim -30\text{mV}$ のほぼ安定した値を示したが、塩酸塗布後は卑な方向へ急に低下した。発錆面積率 10%、30%では、塩酸塗布から7日後に $-100 \sim -70\text{mV}$ 程度の値を示したが、発錆面積率 50%では同じく7日後に約 -170mV と、最も卑な値を示した。

従って、今後は腐食深さとの関係も含めてさらに多くの実験・研究により結論付ける必要はあるが、電位測定結果と発錆面積率を相対比較することによって、腐食評価が可能と思われる目安を得た。

4.8 断面欠損の深さ、幅についての検討

図-14 に主な結果を示す。鉄筋表面に断面欠損を生じさせた場合の測定電位を加工直前と比較すると、必ずしも比例関係にはないが、断面欠損の深さが $5 \sim 7\text{mm}$ の場合には約 $40 \sim 50\text{mV}$ 程度卑な値を、断面欠損の幅が $5 \sim 20\text{mm}$ の場合には $25 \sim 40\text{mV}$ 程度卑な値を示した。従って、今後は自然環境下での化学的侵食や補修時の腐食部分の除去等における実測値との対応も必要と考えられるが、深さ、幅が一定量を超えると明らかに卑な値を示すことが認められた。

5. まとめ

本研究では、非破壊試験による腐食評価を自然電位法によって比較・検討した結果、本実験の範囲内ではあるが、以下の事柄が明らかとなった。

- (1) 自然電位は、 Cl^- 総量の増加に伴って若干卑な値を示し、AC による腐食の促進試験を行った場合は、 $0.3\text{kg}/\text{m}^3$ を超えると著しく低下する。
- (2) 鉄筋の種類・径・かぶり厚さの影響は、材齢 90 日までの自然電位に明確な有意差を生じない。
- (3) 促進中性化試験を行い、鉄筋表面の pH がある程度下がると、電位は急に低下する。
- (4) 照合電極が異なる場合は、標準電位による理論的な補正值以外に、測定誤差を最小とするために測定時の諸条件の配慮が必要である。
- (5) 鉄筋に断面欠損を生じさせた電位は、深さ・幅が一定量を超えると明らかに卑な値を示す。

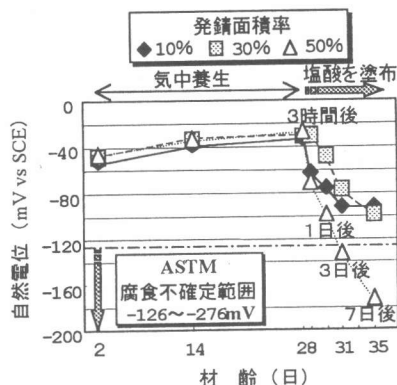


図-13 発錆面積の違いと自然電位の関係

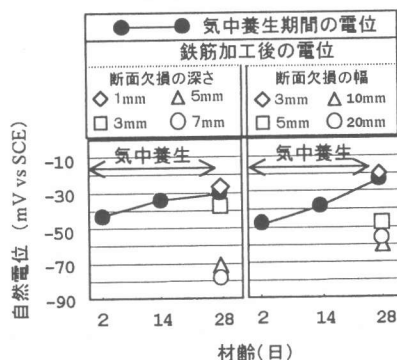


図-14 断面欠損の深さ及び幅を変化させた場合の材齢と自然電位の関係

本実験研究では、初期材齢での検討に留まったが、一部の自然暴露試験は材齢 10 年まで計画しており、今後さらに検討を加えたい。なお、本研究では、三菱マテリアル(株)セメント研究所及び本学卒研生の橋川友明君の協力を得たので深謝する。

参考文献

- 1) 小林豊治:コンクリート中の鋼材の腐食機構, コンクリート工学, Vol.19, No.3, pp25~28, 1981
- 2) 鈴木計夫ほか:電気化学的測定によるコンクリート中の鉄筋の腐食に関する研究, セメント技術年報, Vol.42, pp383~386, 1988
- 3) 武若耕司:コンクリート中の鉄筋腐食機構と自然電位分布の関係について, 第12回セメント・コンクリート研究討論会講演要旨, 1985
- 4) 日本非破壊検査協会編:コンクリート構造物の非破壊試験法, 養賢堂, 1994