

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年6月3日現在

機関番号：15101

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22560462

研究課題名（和文） 塩害とASRによる複合劣化を受けるRC構造物への電気防食工法の適用性に関する研究

研究課題名（英文） Applicability of cathodic protection to reinforced concrete subjected to chloride induced deterioration and ASR

研究代表者

黒田 保（KURODA TAMOTSU）

鳥取大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：30263487

研究成果の概要（和文）：鉄筋コンクリートへの通電がアルカリ含有量分布およびASR膨張に与える影響について検討を行い、以下の結果が得られた。(1) 供試体に供給する電流密度の増大とともに鉄筋周辺に集積するアルカリ金属イオン量が増大し、その移動量は積算電流密度の大きさに依存していると考えられた。(2) 通電によりASR膨張は助長される。また、電流密度に関するベシマム値の存在が確認された。(3) 現時点では、 $5\text{mA}/\text{m}^2$ 程度の電流密度であればASR膨張は大きく助長されることはなかった。(4) ASRによる膨張率を電流密度と通電期間の関数として表すことができた。(5) 電気防食工法適用前に大きな電流密度 ($1\text{A}/\text{m}^2$, $2\text{A}/\text{m}^2$) を供給することにより、電気防食工法適用中のASR膨張を抑制できた。

研究成果の概要（英文）：Investigation of the effects of electrical current applied to reinforced concrete on alkali content distribution and ASR expansion produced the following results. (1) An increase in the current density in the specimen was accompanied by an increase in the concentration of alkaline metal ions around the reinforcing steel, and the amount of ion migration is considered to depend on the cumulative current density. (2) The current promoted ASR expansion. The dependence of the pessimum value on the current density was also confirmed. (3) A current density of about $5\text{mA}/\text{m}^2$ was not found to promote ASR expansion to a large degree. (4) ASR expansion can be expressed as a function in terms of the current density and current duration. (5) By supplying a large current densities ($1\text{A}/\text{m}^2$, $2\text{A}/\text{m}^2$) before application of the cathodic protection, ASR expansion during application of the cathodic protection could be restrained.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2011年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2012年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学，土木材料・施工・建設マネジメント

キーワード：コンクリート・耐久性・アルカリシリカ反応・塩害・電気防食工法

1. 研究開始当初の背景

塩害による劣化を生じた鉄筋コンクリート構造物において、鉄筋腐食を停止させるための最も効果のある補修工法として電気防食工法がある。しかし、鉄筋コンクリート構造物に電気防食工法を適用した場合に、コンクリート中のアルカリ金属イオン (Na^+ , K^+) が鉄筋近傍に集積するためにASRが助長され、それによる劣化を助長させる可能性があることが指摘されている。塩害とASRによる複合劣化を生じた鉄筋コンクリート構造物に対して電気防食工法を適用する場合には、鉄筋コンクリートへの通電がASRに与える影響について明らかにしておくことが重要である。しかし、国内外において、通電がASRに与える影響について検討された研究例は少ない。現在のところ、鉄筋コンクリートに通電を行った場合に、ASRが助長されたという報告は数例あるが、それらはいずれも電気防食工法で一般的に供給される電流密度の範囲よりも大きい電流密度を供給した結果である。また、電流密度に関してペシマム値が存在し、その値よりも大きな電流密度とすると電流密度の増大とともにASRによって生じる膨張 (ASR膨張) は小さくなるという報告もある。

そこで、本研究では、電気防食工法で一般的に適用される範囲内の電流密度を鉄筋コンクリートに供給し、通電が鉄筋近傍へのアルカリ金属イオンの集積量およびコンクリートのASR膨張に与える影響について検討を行うこととした。さらに、脱塩や再アルカリ化工法などで適用される大きな電流密度 (ペシマム値を超える電流密度) を電気防食を適用する前の短期間供給することによって、電気防食中にASR膨張が助長されるのを抑制できるか否か、その方法について検討することとした。

2. 研究の目的

本研究では、塩害とアルカリシリカ反応 (ASR) による複合劣化を受ける鉄筋コンクリート構造物に対する合理的な補修技術を確立するために、そのような複合劣化を受ける鉄筋コンクリート構造物への電気防食工法の適用性について検討することを目的とした。すなわち、鉄筋コンクリートへの通電がASRによる劣化を助長する可能性が指摘されている中で、コンクリート中のアルカリ金属イオン分布やASRに与える通電の影響を明らかにし、ASRによる劣化を助長させない、あるいは抑制するような通電手法について検討した。

3. 研究の方法

本研究では、塩害とアルカリシリカ反応 (ASR) による複合劣化を受ける鉄筋コンク

リート構造物への電気防食工法の適用性を検討するために、鉄筋コンクリートへの通電がASRに与える影響 (鉄筋周辺へのアルカリ金属イオンの集積量, ASR膨張), 電気防食適用前に大きな電流密度を一定期間供給することによるASR膨張抑制について検討するために、無通電の供試体と通電を行った供試体 (図-1) について、コンクリートのアルカリ含有量分布と供試体の膨張率の測定を行った。なお、コンクリートの水セメント比は $W/C=45\%$ および 60% とし、アルカリ総量を $3\text{kg}/\text{m}^3$ および $8\text{kg}/\text{m}^3$ とした。実験の具体的な方法を以下に示す。

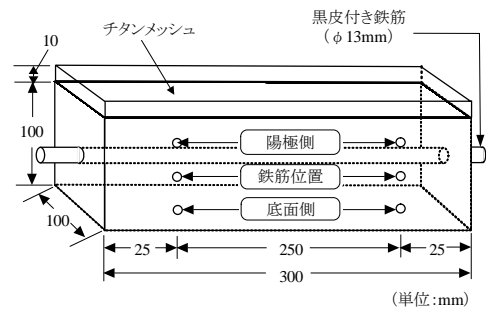


図-1 供試体概略図

(1) コンクリート中のアルカリ含有量分布に及ぼす通電の影響

コンクリート中に含有するアルカリ量の測定には、 $W/C=60\%$ の供試体 (アルカリ総量 $8\text{kg}/\text{m}^3$) を用いた。この配合の供試体に対して、 40°C , R. H. 100%の保存槽で保存した無通電供試体 ($0\text{mA}/\text{m}^2$) および $5, 30, 100\text{mA}/\text{m}^2$ の電流密度となるように通電を行った通電供試体から通電開始直前 (0週), 通電開始後24および48週後に試料を採取して、それらの試料に含有するアルカリ量の測定を行った。試料の採取方法およびアルカリ含有量の測定方法を以下に述べる。

まず、供試体の長手 (200mm) 方向の中央部から厚さ 50mm の試料 ($100 \times 100 \times 50\text{mm}$) を鉄筋軸と直交する方向に切り出した。さら

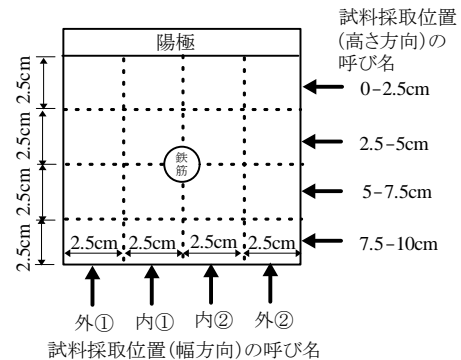


図-2 アルカリ含有量測定用試料の採取位置

に、図-2に示すように、その試料を100×100mm断面に対して1辺が25mmの正方形となるように切断し、これらをアルカリ含有量測定用の試料(25×25×50mm)とした。採取した各試料(25×25×50mm)に対して、建設省(現国土交通省)総合技術開発プロジェクトの「コンクリート中の水溶性アルカリ金属元素の分析方法(案)」に準拠して水溶性アルカリ量(Na₂O量およびK₂O量)を測定し、測定したNa₂O量とK₂O量からコンクリートに含有するアルカリ量(R₂O量)を求めた(R₂O=Na₂O+0.658 K₂O)。なお、各試料の採取位置の呼び名を図-2に示すとおりとする。

(2) ASR膨張に及ぼす通电の影響

W/C=45 および 60%の供試体を40°C, R. H. 100%の保存槽で保存した無通电供試体(0mA/m²)、および電流密度が5, 30, 100mA/m²となるように通电を行った通电供試体に対して、所定の保存期間経過後に長さ変化の測定を行った。このとき、測定時の供試体温度を20°Cとするために、長さ変化測定日の前日に供試体を保存槽から取り出し、それを20°Cの恒温室で24時間静置してから長さ変化の測定を行った。長さ変化の測定は、ダイヤルゲージ(検長250mm, 最小目盛0.001mm)を用いて、1つの供試体につき2つの側面で行い、それぞれの面で長手方向の3つの位置(図-1参照)における膨張率を求めた。なお、図-1に示すように、3つの長さ変化測定位置を、チタンメッシュを設置した面を上にして、上から「陽極側」、「鉄筋位置」、「底面側」と称す。

(3) 電気防食工法適用時のASR膨張抑制方法の検討

電気防食工法適用前に、電気防食工法で適用されるものより大きな電流密度(1A/m², 2A/m²)を一定期間(4週間および8週間)供給して、ASR膨張に対する抑制効果を検討した。すなわち、大きな電流密度を一定期間供給し、その後に無通电(0mA/m²)とした供試体と30mA/m²の通电を行った供試体の膨張率を比較検討した。供試体(W/C=45, 60%)の長さ変化の測定方法は、上記(2)と同様である。

4. 研究成果

(1) コンクリート中のアルカリ含有量分布に与える通电の影響

通电開始直前の供試体のアルカリ含有量(R₂O)分布を図-3に示す。断面内のいずれの位置においても、ほぼ同量のアルカリ含有量(6kg/m³)であった。通电を行なった供試体断面のアルカリ含有量分布の一例として、図-4に100mA/m²で48週間通电を行なった供試体の結果を示す。通电を行なった供試体は、断面の外周部から陰極である鉄筋周辺部(断面中央部)に向かってアルカリ金属イオン(Na⁺およびK⁺)が移動し、そこでそれらが集

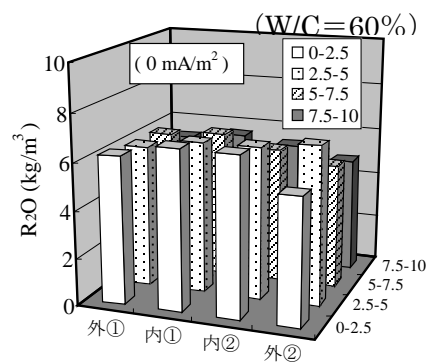


図-3 アルカリ含有量分布(無通电供試体)

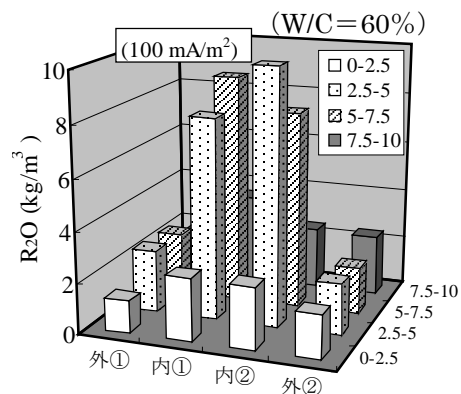


図-4 アルカリ含有量分布(48週)

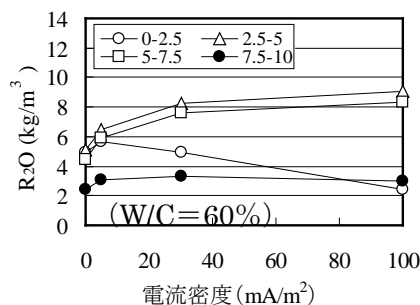


図-5 R₂O量と電流密度との関係(48週)

積していることがわかる。

図-5に、48週間通电を行なった供試体について、高さ方向に2.5cm間隔で切断した試料(「0-2.5」、「2.5-5」、「5-7.5」および「7.5-10」)に含有するR₂O量と電流密度との関係を示す。なお、図に示すR₂O量は、図-2に示す供試体断面のうちの「内①」と「内②」の平均値である。図より、鉄筋に近い「2.5-5」および「5-7.5」の位置では、供試体に供給する電流密度の増大とともにR₂O量が多くなることがわかる。また、電流密度が比較的小さい5mA/m²でも、アルカリ金属イオンが鉄筋方向へ移動している。一方、陽極に近い「0-2.5」の位置では、他の電流密度のもの比べて100mA/m²の電流密度で通电を行った場合にR₂O量が少なくなり、また、鉄筋をはさんで陽極と反対側の「7.5-10」の位置では電流密度の違いによるR₂O量の差は見られない。

「0-2.5」の位置において、電流密度の増大とともに R_2O 量が少なくなるのは、通電によってアルカリ金属イオンが鉄筋方向に移動したためと考えられる。これらのことから、通電期間が同じであれば、供試体に供給する電流密度の増大とともに鉄筋周辺へのアルカリ金属イオンの集積量が多くなると考えられる。

各測定位置（「0-2.5」、「2.5-5」、「5-7.5」、「7.5-10」）における R_2O 量と積算電流密度（電流密度と通電期間の積）との関係を図-6に示す。鉄筋近傍（「2.5-5」および「5-7.5」）では積算電流密度が大きくなるほど R_2O 量は多くなっており、また、積算電流密度が 403mA/m^2 付近で R_2O 量は一定値に収束している。一方、陽極側（「0-2.5」）では通電によってアルカリ金属イオンが鉄筋方向へ移動するため、積算電流密度が大きくなるほど R_2O 量は少なくなる。また、陽極と反対側（「7.5-10」）では、積算電流密度にかかわらず R_2O 量はほぼ一定値となっている。以上のことから、コンクリート中のアルカリ金属イオンの鉄筋近傍への移動量は積算電流密度の大きさに依存していると考えられる。

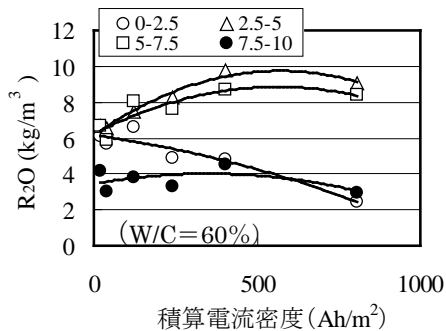


図-6 R_2O 量と積算電流密度との関係

(2) コンクリートの ASR 膨張に与える通電の影響

膨張率の経時変化の一例として、 $W/C=60\%$ の供試体の測定位置「陽極側」について、所定の電流密度（0, 5, 30 および 100mA/m^2 ）で通電を行った場合に生じる膨張率の経時変化を図-7に示す。100 mA/m^2 で通電を行なった供試体を除いて、無通電供試体と比較して、通電によりASR膨張が大きくなっている。図-8は、 $W/C=45\%$ および60%の供試体の「鉄筋位置」における膨張率と電流密度との関係を示したものである。膨張率の結果は、通電期間24, 48, 72, 88 および124週(W)におけるものである。 $W/C=45\%$ の供試体では電流密度の増大とともに膨張率が大きくなった。一方、 $W/C=60\%$ の供試体では30 mA/m^2 の電流密度で通電を行った供試体の膨張率がもっとも大きくなり、100 mA/m^2 の電流密度で通電を行った供試体の膨張率は無通電の

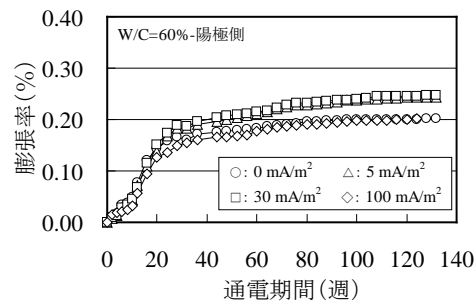


図-7 膨張率の経時変

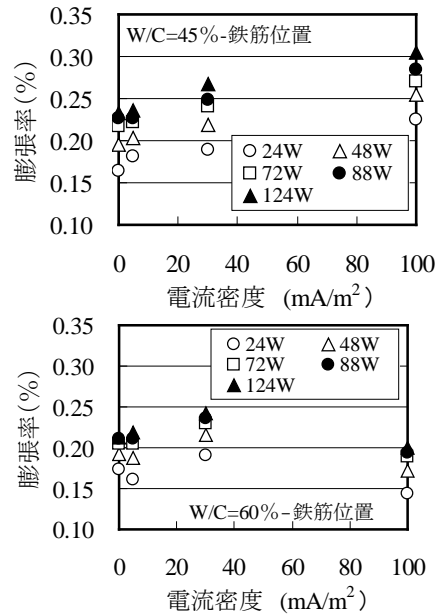


図-8 膨張率と電流密度との関係

膨張率よりも小さくなる傾向を示した。すなわち、既往の研究において報告されている電流密度に関するペシマム値（ASR膨張を最大にする電流密度）が本実験においても確認された。 $W/C=45\%$ の供試体については、通電にともないアルカリ金属イオンが鉄筋周辺に集積してその濃度が上昇したこと、およびカソード反応によって鉄筋周辺に OH^- が発生することから、電流密度の増大とともに膨張率が大きくなったと考えられる。一方、 $W/C=60\%$ の供試体については、電流密度の増大とともに鉄筋近傍のアルカリ量が増加し、ASRによって生成されるアルカリシリカゲルが粘性の低い高アルカリ型($\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ が大きい)のゲルとなること、また、 W/C が大きいコンクリートの方が細孔の量およびその大きさが大きいため、アルカリシリカゲルの粘性低下による膨張圧の減少の影響を大きく受けること、が一因となり、30 mA/m^2 の電流密度で通電を行った供試体の膨張率がもっとも大きくなったと考えられる。

以上のことから、通常の電気防食工法で使用される電流密度よりも大きい電流密度で通電を行った場合、 W/C の相違により、供試体への通電がASR膨張に与える影響が異なる

可能性があると考えられる。また、現在のところ、いずれのW/Cの供試体についても、5mA/m²程度の通電ではASR膨張は大きく助長されていないといえる。

(3) 通電を行った鉄筋コンクリートのASR膨張推定方法の検討

一例として、W/C=45%の供試体について、通電の影響を大きく受けると考えられる「鉄筋位置」における膨張率と通電期間との関係を、最小二乗法により(1)式で近似した。

$$Ex = \frac{t}{a + b \cdot t} \quad (1)$$

ここに、Ex: 膨張率(%), t: 通電期間(週), a, b: 実験定数, である。得られたaおよびbの値と電流密度との関係を図-9に示す。aおよびbの値は、電流密度の増大とともに小さくなる傾向を示した。aと電流密度との関係を直線式で、bと電流密度との関係を累乗式で最小二乗法により回帰した結果をそれぞれの図中に示す。式中のCDは電流密度(mA/m²)である。直線式と累乗式で回帰したところ比較的よい相関が得られた。これらの直線式と累乗式を(1)式に代入すると(2)式が得られる。

$$Ex = \frac{t}{(c \cdot CD + d) + f \cdot CD^g \cdot t} \quad (2)$$

ここに、c, d, f および g は実験定数である。

膨張率の測定値と(2)式により得られる膨張率の計算値との関係を図-10に示す。通電期間の短い(膨張率が小さい)ときに計算値と測定値の差がやや大きいが、通電期間がある程度経過する(膨張率が大きくなる)とその差が小さくなり、両者は比較的よく一致しているといえる。「鉄筋位置」と同様に通

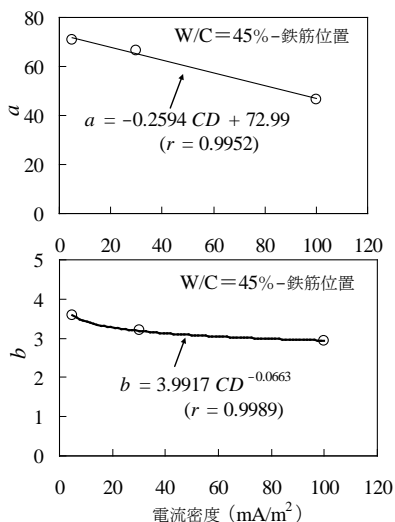


図-9 a および b と電流密度との関係 (W/C=45%)

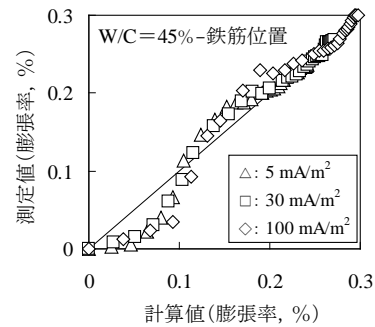


図-10 膨張率の測定値と計算値との関係

電の影響を大きく受けると考えられる「陽極側」についても、膨張率の測定値と(2)式により得られる計算値は比較的よく一致し、この結果はW/C=60%の供試体についても同様であった。したがって、通電を行なったコンクリートのASR膨張は、通電期間と供給した電流密度で評価できる可能性があると考えられる。今後、十分に検討する必要があるが、通電する電流密度や通電期間からASRによる膨張挙動を推定できる手法が確立できれば、ASRと塩害による複合劣化を受けるコンクリート構造物への電気防食工法の適用を検討する際に有効であると考えられる。

(4) 電気防食工法を適用するコンクリートのASR膨張抑制に関する検討

本研究の実験において、ASRの影響を受ける鉄筋コンクリートに対して通電を行うと、供給する電流密度の増大とともにASR膨張は大きくなるが、電流密度に関してASR膨張を最大にするペシマム値が存在することを確認した。すなわち、ペシマム値以上の電流密度を鉄筋コンクリートに供給すると、電流密度の増大とともにASR膨張は小さくなることを確認した。そこで、電気防食適用前に、鉄筋コンクリートにペシマム値を超える大きな電流密度を短期間供給することにより、電気防食工法の適用によってASR膨張が助長されるのを防止する方法について検討した。

図-11は、一例として、W/C=45%の供試体に対して、1A/m²の電流密度を8週間、2A/m²の電流密度を4週間および8週間供給し、その後は通電を行わない供試体の膨張率の経時変化(鉄筋位置)を示す。なお、この図の保存期間には、1A/m²および2A/m²の電流密度を供給した期間も含む。図より、1A/m²および2A/m²の電流密度を供給した供試体は、それらの電流密度を供給していない供試体(図中の凡例: 大電流なし)と比較してASR膨張が抑制されている。また、それらの供試体の中でも、2A/m²の電流密度を8週間供給した供試体のASR膨張が最も抑制されている。一方、1A/m²および2A/m²の電流密度を供給した後に、30mA/m²の電流密度を供給し続けた(電気防食適用を想定)供試体の膨張率の経時変化を図-12に示す。電気防食を適用した供試体にお

いても、その適用前に $1A/m^2$ および $2A/m^2$ の電流密度を一定期間供給することによって ASR 膨張が抑制され、 $2A/m^2$ の電流密度を 8 週間供給した供試体の ASR 膨張が最も抑制された。ここでは図に示していないが、その他の測定位置についても、また $W/C=60\%$ の供試体についても同様に、 $2A/m^2$ の電流密度を 8 週間供給した供試体の ASR 膨張が最も抑制されることを確認した。

以上に得られた研究成果をまとめると、通常の電気防食工法で適用される電流密度を供給した場合においても、通電によりコンクリート中のアルカリ金属イオンは陰極である鉄筋近傍に集積すること、また、ASR 膨張が助長されること（ただし、 $5mA/m^2$ 程度では大きく助長されない）が明らかとなった。また、電気防食工法を適用した鉄筋コンクリートの ASR 膨張を推定する方法を示した。さらに、電気防食工法適用前の一定期間、大きな電流密度を供給することにより、その後の電気防食工法適用中に ASR 膨張が助長されるのを抑制する方法を示した。これらの研究成果、特に、電気防食工法適用中の ASR 膨張推定方法および ASR 膨張抑制方法については、国内外においてそのような研究成果は見られない。今後、ASR 膨張の推定精度や ASR 膨張の抑制効果についてさらにデータを蓄積するし、それらの ASR 膨張の推定方法や抑制方法を確立できれば、それらは ASR と塩害による複合劣化を受けるコンクリート構造物への電気防食工法の適用性を検討する際の有効な方法になると考える。

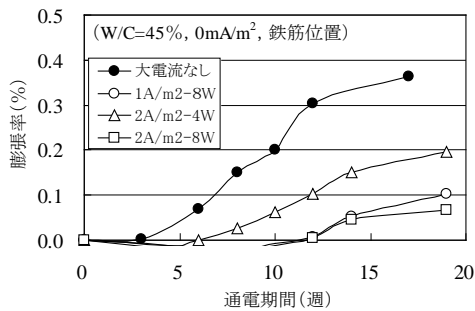


図-11 膨張率の経時変化

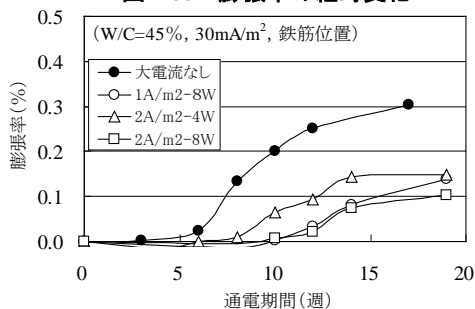


図-12 膨張率の経時変化

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者に

は下線)

[雑誌論文] (計 4 件)

- ① 黒田保, 井上正一, 高井伸一郎, 西林新蔵, 鉄筋コンクリートへの通電がアルカリ含有量および ASR 膨張に与える影響, コンクリート工学年次論文集, 第 35 巻, 査読有, 掲載決定, 2013
- ② 黒田保, 井上正一, 高井伸一郎, 西林新蔵, コンクリートの ASR 膨張に与える保存温度とアルカリ総量の影響, コンクリート工学年次論文集, 第 34 巻, 第 1 号, pp.946-951, 査読有, 2012
- ③ 黒田保, 井上正一, 高井伸一郎, 西林新蔵, コンクリートの ASR 膨張に与える NaOH 溶液濃度と保存温度の影響, コンクリート工学年次論文集, 第 33 巻, 第 1 号, pp.1013-1018, 査読有, 2011
- ④ 黒田保, 井上正一, 吉野公, 西林新蔵, NaOH 溶液に浸せきした安山岩あるいはチャート骨材使用コンクリートの ASR 膨張挙動, コンクリート工学年次論文集, 第 32 巻, 第 1 号, pp.929-934, 査読有, 2010

[学会発表] (計 4 件)

- ① 小田朗, 黒田保, 高井伸一郎, 井上正一, コンクリートの ASR 膨張に及ぼすアルカリ濃度と保存温度の影響, 平成 23 年度土木学会中国支部研究発表会, 平成 23 年度土木学会中国支部研究発表会, 2011 年 5 月 21 日, 岡山大学
- ② M Salihin Bin Salim, Tamotsu Kuroda, Shoichi Inoue and Akira Yoshino, Proposition of accelerated test method to evaluate alkali-silica reactivity of concrete core, 平成 23 年度土木学会中国支部研究発表会, 2011 年 5 月 21 日, 岡山大学
- ③ SALIHIN SALIM, 山田直紀, 黒田保, 吉野公, コンクリートコアの ASR 膨張に及ぼす促進養生条件と反応性骨材の種類の影響, 平成 22 年度土木学会中国支部研究発表会, 2010 年 5 月 15 日, 徳山工業高等専門学校
- ④ 小田朗, 山田直紀, 黒田保, 井上正一, モルタル供試体の ASR 膨張に及ぼす促進養生条件の影響, 平成 22 年度土木学会中国支部研究発表会, 2010 年 5 月 15 日, 徳山工業高等専門学校

6. 研究組織

(1) 研究代表者

黒田 保 (KURODA TAMOTSU)

鳥取大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 30263487