

機関番号：16101

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2008～2010

課題番号：20360204

研究課題名（和文） 塩害とASRの複合劣化構造物に対する
電気化学的リハビリテーション手法に関する研究研究課題名（英文） Electrochemical rehabilitation method for concrete structures
deteriorated by the combination of chloride attack and ASR

研究代表者

上田 隆雄 (TAKAO UEDA)

徳島大学・大学院リソテクノサイエンス研究部・教授

研究者番号：20284309

研究成果の概要（和文）：

ASR抑制効果の高いリチウム塩を添加したHPFRCCを陽極システムに用いた供試体に対して、 $1\text{A}/\text{m}^2$ の電流密度で8週間または $50\text{mA}/\text{m}^2$ の電流密度で16週間通電したところ、いずれの場合も、十分な鉄筋防食効果が得られた。さらに、通電に伴ってコンクリートのASR膨張抑制効果が認められ、特にHPFRCC陽極層に近い部分における膨張抑制効果が大きかった。また、リチウム塩の種類としては、 LiOH よりも LiNO_3 の方が抑制効果が大きい傾向を示した。

研究成果の概要（英文）：

For investigating the rehabilitation effect of the proposed method, the specimens installing HPFRCC anode layer containing a lithium salt were prepared. As the results of passing electric current in the cases of $1\text{A}/\text{m}^2$ for 8 weeks or $0.5\text{A}/\text{m}^2$ for 16 weeks, the protection effect against a steel corrosion was gained from the treatment in both cases. Moreover, a suppression of ASR-expansion due to the application of the proposed method was shown. The suppression effect was remarkable around the HPFRCC anode layer and LiNO_3 was more effective than LiOH as the additive in HPFRCC.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	4,100,000	1,230,000	5,330,000
2009年度	5,200,000	1,560,000	6,760,000
2010年度	1,800,000	540,000	2,340,000
年度			
年度			
総計	11,100,000	3,330,000	14,430,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：塩害、ASR、コンクリート、HPFRCC、陽極システム、電気化学的手法、
防食効果、膨張抑制効果

1. 研究開始当初の背景

社会基盤構造物の中核を占めるコンクリート構造物は、塩害、中性化やアルカリシリカ反応（以下ASRとする）などによる早期劣化現象が深刻な状況となっており、劣化機構に応じた根本的かつ効果的な対策を講じていく必要がある。

各種劣化機構の中でも、塩害への対策については国内外で研究も進んでおり、特に表面被覆工法や断面修復工法では対処が困難な場合には、電気化学的防食工法が有効であることが明らかになっている。2001年に土木学会から発刊された「電気化学的防食工法設計施工指針（案）」により、今後は電気化学

的防食工法が鉄筋腐食対策の一般的な手法として広く適用されていくことが予想される。一方で、ASRによる劣化は劣化機構が複雑でありその根本的な対策工法は未だ確立されていないのが現状である。特に、寒冷地での凍結防止剤として塩化物が供給される場合や海洋構造物では、外部から供給される塩化物によりASRが促進される塩害とASRの複合劣化事例が数多く報告されている。このような構造物に電気化学的防食工法を適用した場合には、コンクリート中の陰極となる鉄筋近傍に Na^+ や K^+ といったアルカリ金属イオンが集積するために、ASRを促進することが懸念されることから鉄筋腐食対策も採りにくいのが現状である。

2. 研究の目的

本研究では、塩害とASRに対応可能な電気化学的リハビリテーション手法の開発を目的とする。すなわち、コンクリート表面に接着するHPFRCC（微細ひび割れ分散型高じん性セメント複合材料）陽極層にリチウムを含有させることで、HPFRCCからのリチウム供給、HPFRCCによる膨張拘束効果およびひび割れ抑制効果といったASR対策を盛り込むとともに、防食電流の供給により、コンクリート中の鉄筋防食効果が期待できる万能型のリハビリテーション手法である。

本研究目的を達成するために、リチウムを含有するHPFRCCのフレッシュ性状および硬化性状を明らかにするとともに、陽極システムへの利用を想定した配合選定を実施する。さらに、過酷な塩害条件を想定してあらかじめ塩化物イオンを混入・浸透させた反応性骨材を含有する鉄筋コンクリート供試体に対してリチウムを含有するHPFRCC陽極層を接着した後に、電気化学的リハビリテーション手法を適用し、ASRによる膨張抑制効果、鉄筋防食効果および剥落防止・補強効果を確認する。

3. 研究の方法

(1) 平成20年度には、リチウムを含有するHPFRCCそのものの配合条件と諸物性の関係を明らかにするとともに、無筋の反応性骨材含有コンクリート供試体に対して、HPFRCC保護層を接着し、ASRによる膨張抑制効果を検討する。

(2) 平成21年度は、前年度の検討結果を受けて決定した配合条件のHPFRCCを陽極層として、反応性骨材を含有する鉄筋コンクリート供試体（図1参照）に電気化学的補修工法を適用する。この際の供試体として、あらかじめ内在塩分を含有するものと塩水の噴霧によりASRを促進する供試体を用意する。通電処理中および処理後は、コンクリートの膨張率測定、コンクリート中の各種イオン濃

度分布測定およびコンクリート中の鉄筋の電気化学的モニタリングにより、膨張抑制効果と防食効果を確認するとともに、供試体の曲げ載荷試験および陽極システムの接着強度試験などにより、力学的性能についても併せて検討を行う。

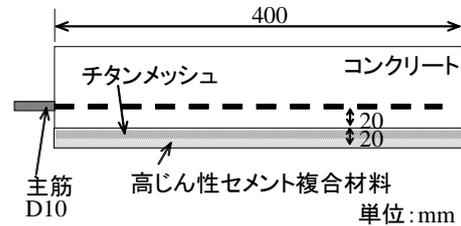


図1 HPFRCC陽極層接着供試体

(3) 平成22年度には、前年度の供試体を促進ASR環境で保管し、長期的なコンクリート膨張率の測定と鉄筋防食モニタリングを実施するとともに、通電処理が陽極システム内のHPFRCC層に与える影響やコンクリート中のアルカリシリカゲルの生成状況について、電顕観察や化学分析により検討を行う。以上の検討結果より、効果的な適用条件および補修設計法の提案を行う。

4. 研究成果

(1) 各種HPFRCCで作製した供試体に関して、曲げ試験で得られた荷重-中央変位曲線を図2に示す。凡例のVはPVA繊維、EはPE繊維を示し、水結合材比の後のOHはLiOH添加、NOは LiNO_3 添加を示している。今回作成した供試体は、すべて曲げひび割れ発生後も荷重と中央変位が増加するたわみ硬化性を示した。また、図2に示したように最大荷重後の荷重低下も緩やかであり大きな曲げじん性が得られていることがわかる。ここで、曲げじん性の大きさを評価する指標として、図2に示した荷重-中央変位曲線と横軸で囲まれた部分の面積を曲げじん性エネルギーと定義した。曲げじん性エネルギーの算出結果を図3に示す。

図2および図3によると、全体的な傾向として、PVA繊維を用いたHPFRCCよりもPE繊維を用いた場合の方が、大きな曲げじん性が得られている。同じW/Bで比較すると、圧縮強度はPVA繊維を用いた場合の方が大きかったが、曲げじん性は強度の小さいPE繊維を用いた場合の方が大きくなった。これは、図2に見られるように、PVA繊維を用いた場合には、ピーク後の荷重低下勾配が比較的大きいことに起因している。このような緩やかな荷重低下を実現するためには、曲げひび割れを跨いだ短繊維がモルタルマトリックスから徐々に引抜けつつ、ひび割れの進展に抵抗する架橋効果が発揮される必要がある。本実験で作製したPE繊維のHPFRCCは空気量が大きく、モルタルマト

リックス強度が小さいために、圧縮荷荷については比較的早期に破壊が進行するが、曲げ荷荷時においては、短繊維による曲げひび割れ架橋効果が発揮されやすかったものと考えられる。これに対して、PVA 繊維を用いた場合には、マトリックス強度が大きい上に、繊維の引張強度も PE 繊維よりも小さいため、繊維の破断が容易に発生したことがじん性低下につながったものと思われる。

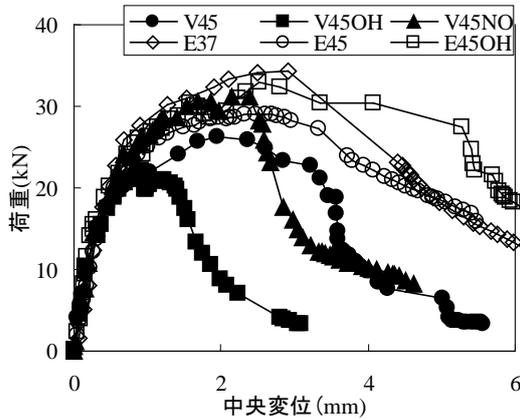


図2 各種 HPFRCC の曲げ荷重-中央変位曲線

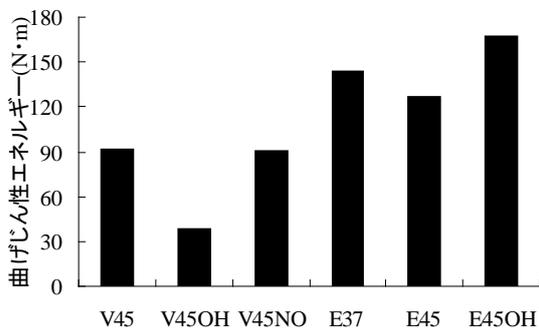


図3 各種 HPFRCC の曲げじん性エネルギー

リチウム塩添加の影響については、PVA 繊維を用いた場合には、圧縮強度の場合と同様に、LiOHの添加によって大きく曲げじん性が低下しているものの、LiNO₃を添加した場合には無添加のものと同程度の曲げじん性を確保している。一方、PE繊維を用いた場合には、LiOHを添加することによって、曲げじん性が大きくなっている。この原因として、LiOHの添加による空気量の減少が考えられる。E45 と E45OHの圧縮強度は同程度であったが、E45OHの方が空気量が小さい分、密実なマトリックスが形成され、高い引張強度を有するPE繊維が有効に作用したものと推定される。以上より、リチウム塩を添加したHPFRCCでも、繊維種類や配合条件を適切に

選定すれば、無添加の場合と同程度以上の曲げじん性が得られることが確認された。

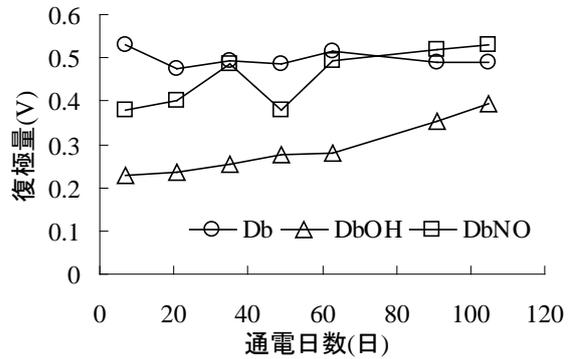


図4 供試体通电中の復極量 (50mA/m²)

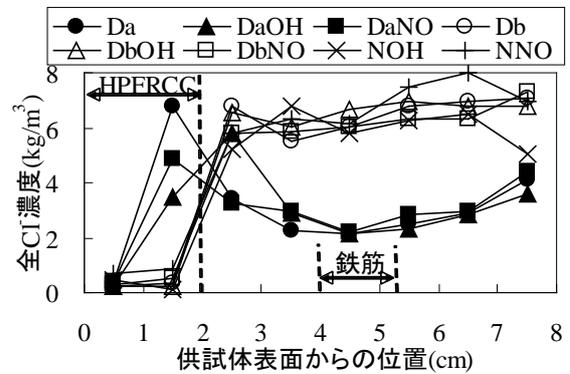


図5 全塩分濃度分布

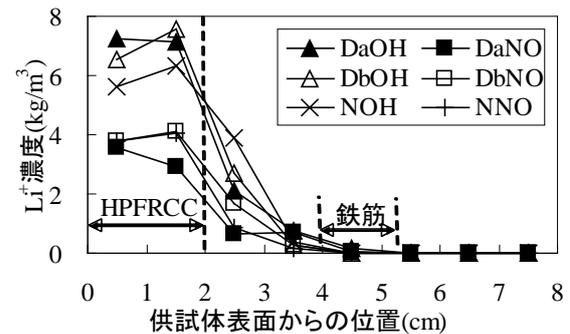


図6 Li⁺濃度分布

(2) HPFRCC陽極層を接着して本研究で提案する工法を電流密度 50mA/m²で適用した鉄筋コンクリート供試体の復極試験の結果を図4に示す。Dbはリチウム塩無混和の場合で、DbOHはLiOH添加、DbNOはLiNO₃添加の場合である。いずれの場合も 100mV以上の復極量が達成されており、十分な防食電流が供給されていたものと考えられる。

通電処理後の供試体中における全塩化物イオン濃度分布を図5に示す。母材コンクリートにおける初期Cl⁻含有量は7.2kg/m³であった。凡例のDaは電流密度1.0 A/m²の通電を表している。このような比較的大きな電流密度を適用した場合、鉄筋近傍のCl⁻量は7.2kg/m³から2.0kg/m³程度まで減少していることが分かる。またHPFRCC陽極層内における塩分濃度が大きくなっているが、これは、暴露面から1.5cmの位置に埋め込まれた陽極材であるチタンメッシュ近傍にCl⁻が集積したためである。LiOHを添加したものは脱塩効果が得られているものの、陽極層に移動したCl⁻量は若干少ない。LiOHを添加した供試体ではLi⁺の輸率が大きくなったことで脱塩効果が若干低下した可能性がある。一方、電流密度50mA/m²の場合には通電に伴う陽極層へのCl⁻の移動はほとんどみられなかった。

通電処理適用後のLi⁺濃度分布を図6に示す。LiNO₃を添加したものに比べてLiOHを添加した場合の方がHPFRCC陽極層内のLi⁺濃度が大きい。これは、同じ単位量でリチウム塩を添加した際、LiOHの方が分子量が小さく、Li⁺添加量は大きくなるためである。この結果、母材コンクリートへのLi⁺浸透量もLiOHを添加した場合の方が大きくなっている。また、電流密度が大きい方がLi⁺浸透深さは大きくなっている。

(3) 提案する工法を適用した供試体のASR膨張挙動を図7に示す。凡例の最初の数字は電流密度、次に添加したリチウム塩種類を示し、末尾のSはHPFRCC陽極層の近く、Dは陽極層から離れた鉄筋の裏側を表している。図7上図によると、無接着供試体は全体的に0.3%以上の膨張を示しているのに対して、HPFRCC接着供試体は、陽極層付近と陽極層反対側で膨張率に差が認められ、HPFRCC陽極層に近い方が膨張率は小さくなっている。ただし、膨張率の値としては比較的大きく、HPFRCCを接着するだけでは、コンクリート膨張率の抑制効果は比較的小さい可能性がある。これに対して、通電を行った供試体は、陽極層付近ではコンクリート膨張率の抑制効果が認められることから、HPFRCC陽極層から供給されたLi⁺がASRを抑制したものと推測される。ただし、電流密度1.0A/m²の場合は膨張率が比較的大きいことから、通電に伴って鉄筋近傍に集積したアルカリ金属イオンの影響も考えられる。

図7下図より、同じ電流密度でもリチウム塩の有無あるいはその種類によってコンクリート膨張率が異なることが分かる。リチウム塩の種類としては、LiOHよりもLiNO₃の方が膨張抑制効果が大きいようである。この原因として、LiOHよりもLiNO₃の方が溶液のpHが低いことが影響しているものと考えられ

る。

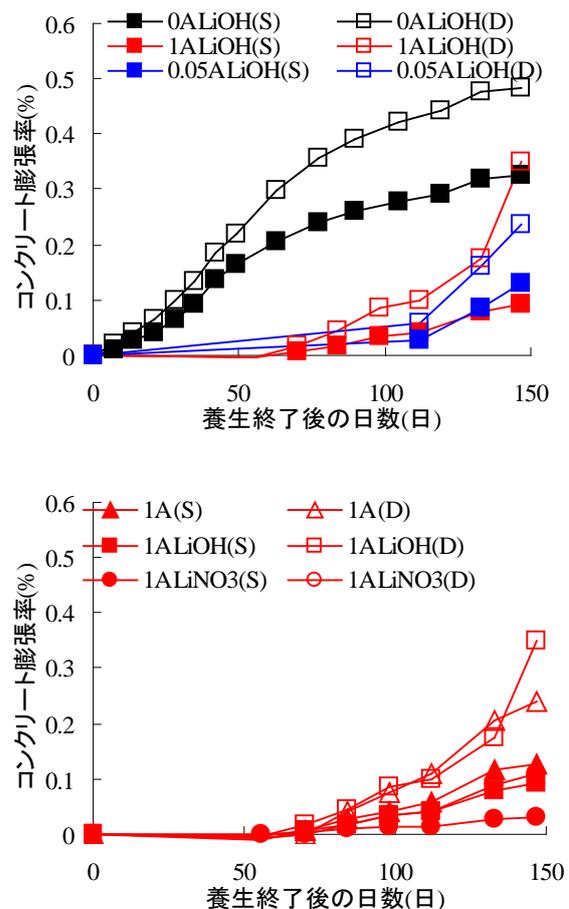


図7 コンクリート膨張率の経時変化

(4) 以上の実験結果より、提案する電気化学的リハビリテーション工法を適用することにより、コンクリート中の鉄筋効果とASRによるコンクリート膨張抑制効果が得られることが分かった。ただし、本工法による効果の持続性や、より適切な通電条件等については不明な部分も残されており、今後の長期的検討が不可欠である。

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5件)

- ① T. Ueda, T. Kameda and A. Nanasawa, A New Electrochemical Rehabilitation for Reinforced Concrete Employing DFRCC Anode System, Separation and Purification Technology, Vol. 79, No.2, 2011, pp. 204-207, peer review
- ② T. Ueda, T. Kameda, T. Maeda and A. Nanasawa, Suppression of ASR expansion due to electrochemical penetration of

lithium supplied by DFRCC anode system, Proc. of the Sixth International Conference on Concrete Under Severe Conditions, Vol. 2, 2010, pp.1229-1236, peer review

- ③ 上田隆雄、亀田貴文、前田崇雄、七澤 章、リチウム含有HPFRCCを陽極システムに用いた電気化学的リハビリテーション手法に関する研究、セメント・コンクリート論文集、No. 63、2009、pp. 523-529、査読有
- ④ 上田隆雄、稲岡和彦、亀田貴文、七澤 章、HPFRCC陽極システムを用いた電気化学的防食工法に関する検討、コンクリート中の鋼材の腐食性評価と防食技術に関するシンポジウム論文報告集、2009、pp. 491-498、査読無
- ⑤ 亀田貴文、上田隆雄、前田崇雄、水口裕之、含有するリチウム塩の種類がHPFRCCの諸特性に与える影響、コンクリート工学年次論文集、Vol. 31、No. 1、2009、pp. 361-366、査読有

[学会発表] (計2件)

- ① 上田隆雄、亀田貴文、七澤 章、リチウム含有HPFRCC陽極層を用いた電気化学的手法によるASR膨張抑制効果、土木学会第65回年次学術講演会、2010年9月1日、福岡大学
- ② 亀田貴文、上田隆雄、前田崇雄、七澤 章、リチウム含有HPFRCC陽極層を用いた電気化学的手法に関する検討、土木学会第64回年次学術講演会、2009年9月4日、北海道大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

上田 隆雄 (TAKAO UEDA)

徳島大学・大学院ソシオテクノサイエンス研究部・教授

研究者番号：20284309

(2) 研究分担者

水口 裕之 (MIZUGUCHI HIROYUKI)

徳島大学・大学院ソシオテクノサイエンス研究部・教授

研究者番号：00035651

橋本 親典 (HASHIMOTO CHIKANORI)

徳島大学・大学院ソシオテクノサイエンス研究部・教授

研究者番号：10180829

渡邊 健 (WATANABE TAKESHI)

徳島大学・大学院ソシオテクノサイエンス研究部・准教授

研究者番号：50332812

研究者番号：50332812

(3) 連携研究者

()

研究者番号：