

論文 電気防食を実施した鉄筋コンクリート部材のアルカリシリカ反応と耐荷性状

鳥居和之*¹・西村敏明*²・石井浩司*³・川村満紀*⁴

要旨：コンクリート構造物のアルカリシリカ反応と耐荷力に及ぼす電気防食の影響を検討することを目的とし、反応性骨材を含有するコンクリート梁試験体を対象として3年間屋外にて電気防食を実施した。コンクリート梁試験体に発生したひび割れの観察及び膨張量の測定より、電気防食の適用によりコンクリート梁試験体のアルカリシリカ反応は顕著に促進されることが明らかとなった。また、曲げ載荷試験の結果より、カソード鉄筋の周囲でアルカリシリカ反応が局部的に進行したことが原因と考えられる最大耐力の低下が確認された。

キーワード：電気防食、アルカリシリカ反応、耐荷力、酢酸ウラニール蛍光法

1. まえがき

海水や融雪・融氷剤により損傷を受けた鉄筋コンクリート構造物の維持管理及び補修・補強が重要な課題となっており、恒久的な対策の一つとしてコンクリート中の鉄筋の腐食を電気化学的に停止する電気防食法が実用化されている。電気防食法の適用においては、鉄筋への直接的な影響としての水素脆性破壊の発生やコンクリートとの付着強度の低下の問題等が指摘されているが、コンクリート自身への影響としてはアルカリシリカ反応（ASR）の促進によるひび割れ発生の問題が重要である〔1〕。すなわち、鉄筋コンクリート構造物に直流電流を印加すると、カソードとなる鉄筋周りにはアルカリイオン（ Na^+ , K^+ ）が集積し、カソード反応により OH^- が生成されるので、反応性骨材を含有する鉄筋コンクリート構造物ではこれまで損傷が見られなかった場合でも直流電流の作用によりアルカリシリカ反応による損傷が新たに発生する可能性がある。実際、著者らは、電気防食を実施したコンクリート梁試験体にてASRひび割れが顕著に促進されることを確認している〔2, 3〕。

本研究は、電気防食を実施したコンクリート梁試験体の曲げ載荷試験を実施し、コンクリート梁の耐荷力に及ぼすASRひび割れの影響について明らかにするとともに、コンクリート梁内のアルカリシリカ反応の局部的な進行度との関連性について調べることにより、直流電流作用下でのASRの促進機構について検討したものである。

2. 実験概要

使用セメントは、普通ポルトランドセメント（ R_2O 量=0.75%、RC配合）と、早強ポルトランドセメント（ R_2O 量=0.58%、PC配合）である。細骨材は非反応性の川砂（富山県早月川産）であり、

*1 金沢大学教授 工学部土木建設工学科、工博（正会員）

*2 （株）西松建設、工修

*3 （株）ピー・エス 技術研究所主任研究員、工博（正会員）

*4 金沢大学教授 自然科学研究科、工博（正会員）

表-1 コンクリートの配合とアルカリ量

配合 種類	セメント 種類	スランプ (cm)	空気量 (%)	s/a (%)	W/C (%)	単位量(kg/m ³)					アルカリ量(kg/m ³)	
						セメント	水	細骨材	粗骨材	減水剤	無添加	添加
RC配合	普通	8±2	2±1	42	53	308	164	784	1125	—	2.3	4.7
PC配合	早強	8±2	2±1	37	35	440	155	650	1174	3.96	2.6	5.0

粗骨材は非反応性の碎石（富山県早月川産）と主たる反応性鉱物として火山ガラスを含有する黒崎安山岩碎石（石川県能登半島産、JIS A5308化学法（Sc=228mmol/l、Rc=131mmol/l））であり、両者を重量比で1:1で混合したものを使用した。コンクリートの配合は鉄筋コンクリート部材（RC配合）及びプレストレストコンクリート部材（PC配合）の代表的なものとし、RC配合及びPC配合について、アルカリ無添加とアルカリ添加（2.4kg/m³のアルカリをNaOHの形で練り混ぜ水に混入）の2種類のものを作製した。また、アルカリを添加したRC配合試験体において、全面をエポキシ樹脂により塗装したものを作製し、ASRの抑制効果についても検討した。コンクリートの配合とアルカリ量を表-1に示す。コンクリート梁試験体は、20×30×200cmであり、圧縮鉄筋及び引張鉄筋にD13の鉄筋（SD345）をそれぞれ2本用い、せん断補強筋はD6の鉄筋（SD295）を15cm間隔に配置した。電気防食システムは外部電流を用いた導電性塗料方式とし、試験体の底面のみに施工した。有効高さは23.75cm、かぶりは6.25cmとした。また、同一の配合で円柱供試体（φ10×20cm）を作製した。コンクリート梁試験体は材令28日で屋外暴露するとともに電流を印加し、日射にさらされる建物屋上にて約3年間暴露した。電気防食時の電流密度は50mA/m²であり、電流を印加しないものとの比較を行った。カソード鉄筋を引張側にして実施したコンクリート梁試験体の曲げ荷重試験の概要を

図-1に示す。また、コンクリート梁試験体のカソード鉄筋付近から採取したコンクリートコアを使用し、酢酸ウラニール蛍光法によるアルカリシリカゲルの生成状況及び蛍光顕微鏡によるASRひび割れの観察を行った。

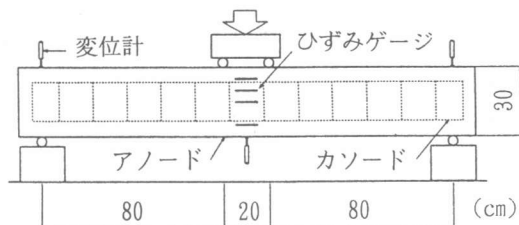


図-1 コンクリート梁試験体の曲げ荷重試験の概要

3. 実験結果及び考察

3. 1 屋外暴露円柱供試体のASRひび割れと強度特性

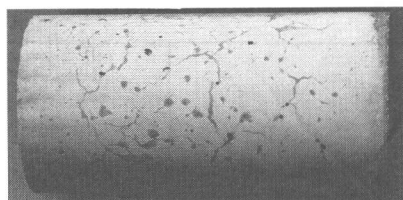
表-2に屋外に3年間暴露したコンクリート円柱供試体の強度特性を示す。RC配合供試体は、アルカリ添加の有無に関係なく、ASRひび割れの発生及び圧縮強度、弾性係数の低下は認められなかった。屋外暴露したRC配合供試体にてASRが発

表-2 屋外に暴露したコンクリート円柱供試体の強度特性

材令	配合 (アルカリの添加)	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (×10 ⁴ N/mm ²)	C1透過量 (クローン)*
28日	RC配合(なし)	27.0	2.7	—	—
	RC配合(あり)	21.3	2.2	—	—
	PC配合(なし)	57.6	3.8	—	—
	PC配合(あり)	50.0	3.7	—	—
3年	RC配合(なし)	28.2	3.2	2.85	6100(H)
	RC配合(あり)	29.6	3.5	3.13	4210(H)
	PC配合(なし)	61.6	5.4	3.87	1620(L)
	PC配合(あり)	52.2	3.7	2.53	1960(L)

*急速塩化物イオン透過性試験(AASHTO T277)による評価
(H:High, M:Moderae, L:Low, VL:Very Low)

生しなかったのは、供試体自体が小さく、水セメント比が大きいと、降雨などの影響でアルカリ成分が外部に溶出したことが原因であり、酢酸ウラニール蛍光法で供試体内部を観察した際にもアルカリシリカゲルの生成は全く認められなかった。一方、PC配合供試体は、アルカリ添加の場合には半年後に、アルカリ無添加の場合には1年後にASRによる微細なひび割れが供試体表面に発生し、屋外暴露の経過とともにひび割れは顕著なものになった（写真－1 参照）。酢酸ウラニール蛍光法では、両供試体ともアルカリシリカゲルによる発色が観察されるとともに、蛍光顕微鏡観察より安山岩粒子の周辺に微細な内部ひび割れが多数形成されているのが確認できた。また、PC配合供試体のASRひび割れは、コンクリート表面から5mm程度であり、粗骨材との界面にて停止していることも観察された。このため、PC配合供試体では、ASRの進行度の相違よりアルカリ添加のものの圧縮強度及び弾性係数はアルカリ無添加のものよりも低下した。アルカリ無添加のPC配合供試体（アルカリ含有量



写真－1 円柱供試体のひび割れ状況
(PC配合アルカリ添加)

2.6kg/m³)は、アルカリの総量規制値(3.0kg/m³)以下にも拘わらず、ASRひび割れが発生したのは非常に興味深い点である。今回、コンクリートバーの膨張試験(JCI AAR-3、38℃の湿気箱養生)も合わせて実施したが、自然環境下における屋外暴露の条件は屋内での促進試験条件よりも過酷であり、コンクリートの配合と反応性骨材との組み合わせによってはアルカリの総量規制値以下でも実構造物ではASRによるひび割れが発生する可能性があることを示している「4」。

3. 2 コンクリート梁試験体の曲げ載荷試験時の耐荷力とひび割れ状況

表－3にRC及びPC配合試験体の曲げ載荷試験時のひび割れ、降伏及び最大の各荷重値を示す。コンクリート梁試験体は、ASRの進行度には関係なく、全てコンクリート上縁部の圧潰による曲げ破壊を生じた。ASRひび割れが発生したコンクリート梁では、ASRによるケミカルプレストレスの効果により最大耐力は大きく低下しないことが報告されている「5」。実際、電流を印加しない場合には、RC及びPC配合試験体ともにアルカリ添加によりASRひび割れが顕著に増加したにも拘わらず、ASRひび割れの発生によりコンクリート梁試験体の最大及び降伏荷重が低下することはなかった(RC-1とRC-3、PC-1とPC-3の比較参照)。一方、長期間電流を印加した場合には、ASRによる影響が小さかったRC-2試験体を除いて、コンクリート梁試験体の最大及び降伏荷重は電流を印加しない場合に比較してそれぞれ10～20%及び15～20%低下した。また、PC配合試験体では、長期間電流を印加することにより最大荷重時の変位もかなり大きくなった。

表－3 曲げ載荷試験時のひび割れ、降伏及び最大の各荷重値

試験体名	電流印加	アルカリ添加	樹脂塗装	ひび割れ荷重(tf)	降伏荷重(tf)	最大荷重(tf)	最大荷重時変位(mm)
RC-1	×	×	×	3.20	7.05	8.69	33.5
RC-2	○	×	×	3.80	7.95	8.66	13.8
RC-3	×	○	×	3.00	7.55	8.71	16.9
RC-4	○	○	×	3.20	6.40	7.66	17.8
RC-5	○	○	○	2.60	6.55	7.80	13.8
PC-1	×	×	×	5.00	9.35	10.37	14.3
PC-2	○	×	×	4.80	7.40	9.40	33.7
PC-3	×	○	×	4.40	9.45	10.44	23.5
PC-4	○	○	×	4.40	7.40	8.56	31.0

(○:あり, ×:なし)

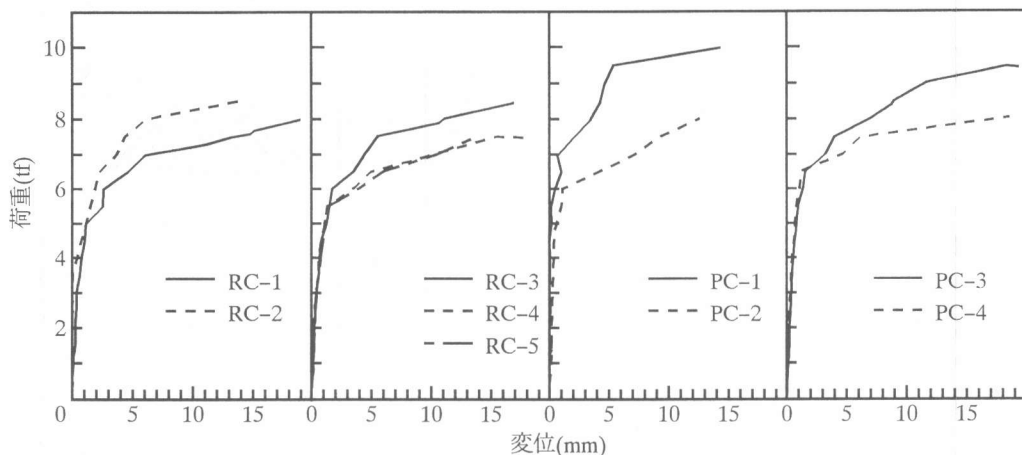


図-2 RC及びPC配合梁試験体の荷重-変位曲線

図-2及び図-3にRC及びPC配合試験体の荷重-変位曲線及び曲げ載荷試験後のひび割れ状況を示す。RC-4及びRC-5試験体には、暴露3年目の夏にカソード鉄筋の上に水平方向のひび割れ(幅0.1mm程度)が発生した。このため、RC-4及びRC-5試験体の載荷時には、パイゲージにより水平方向のひび割れの影響についても検討したが、ひび割れ幅の変化はほとんど見られなかった。写真-2に蛍光顕微鏡によるコンクリートコアのASRひび割れの観察結果を示す。RC-4及びRC-5試験体に発生した水平方向のひび割れを含めて、コンクリート表面のASRひび割れ(幅0.1~0.2mm程度のものが多い)の深さは2~3cm程度であり、ASRひび割れはかぶりの1/2程度の位置で停止していた。従って、ASRひび割れは引張鉄筋まで到達していなかったが、RC-4及びRC-5試験体では

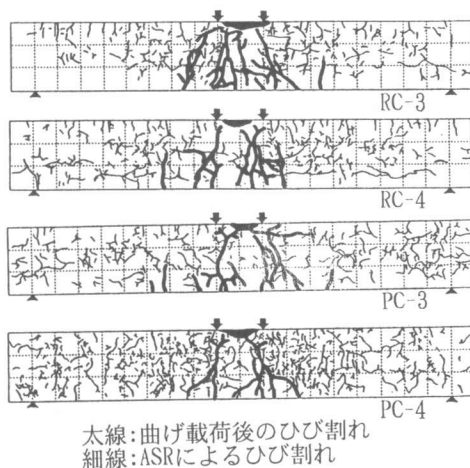


図-3 RC及びPC配合梁試験体のひび割れ状況

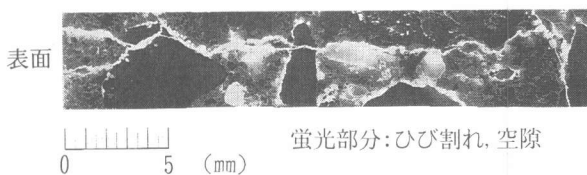


写真-2 蛍光顕微鏡によるコンクリートコアのASRひび割れの観察結果(PC-4)

曲げひび割れが引張鉄筋の位置に達すると、引張鉄筋に沿うひび割れ及び上縁部のコンクリートの圧潰が急速に進行するのが観察された。一方、PC-3及びPC-4試験体には、ASRによる微細なひび割れが試験体全面に発生しており、ASRひび割れの発生は電気防食を実施したPC-4試験体にてとくに顕著であった。PC-4試験体には、RC-4及びRC-5試験体に発生したような水平方向のひび割れは認められなかったが、コンクリート梁試験体の破壊に至る過程はほぼ同様であった。

3. 3 コンクリート梁試験体の耐荷力に及ぼすASRの影響

電気防食のASRに及ぼす影響を図-4に示す。

コンクリートの細孔溶液中では、 Na^+ 、 K^+ と OH^- が平衡状態にあるので、直流電流を印加することにより、 Na^+ 、 K^+ はカソード鉄筋に移動し、カソード反応により鉄筋周囲の OH^- 濃度が上昇する。また、直流電流の印加は、電気浸透による水分の移動も促進させるので、電気防食を長期間実施した場合にはカソード鉄筋の周囲にてASRが局部的に進行することが予測される〔6〕。

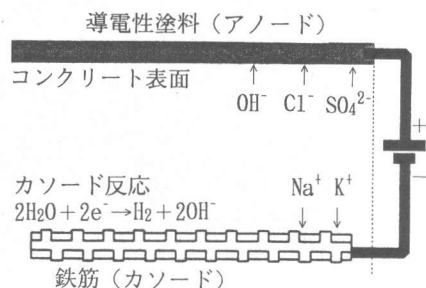


図-4 電気防食のASRに及ぼす影響

表-4に酢酸ウラニール蛍光法によるコンクリートコアのアルカリシリカゲルの生成状況の評価を示す。酢酸ウラニール蛍光法は、アルカリシリカゲルに選択的に取り込まれたウラニールイオンが紫外線照射時に黄緑色に発色することを利用して、ASRの進行状況を調べるものであり、本研究ではアルカリシリカゲルの生成状況の観察に基づいてASRの進行度を5段階で評価している。電流を印加しない場合には、コンクリート表面部、カソード付近及び内部におけるアルカリシリカゲルの生成状況には大きな相違は認められなかった。

表-4 酢酸ウラニール蛍光法によるアルカリシリカゲルの生成状況の評価

試験体名	コンクリート表面 (アノード)	鉄筋付近 (カソード)	内部
RC-1	×	×	×
RC-2	×	△	△
RC-3	△	△	△
RC-4	△	◎	◎
RC-5	△	●	◎
PC-1	△	△	△
PC-2	△	○	○
PC-3	○	○	○
PC-4	○	●	●

●:かなり多い, ◎:多い, ○:中程度,
△:少ない, ×:ない

一方、電流を印加した場合には、コンクリートコア全体でASRがかなり促進されているとともに、とくにカソード鉄筋の周囲でアルカリシリカゲルが多く生成しているのが観察された（写真-3参照）。また、エポキシ樹脂塗装を実施したRC-5試験体でも、カソード鉄筋の周囲にはアルカリシリカゲルが多量に生成しており、エポキシ樹脂塗装によるASR抑制効果が小さいことも実証された。

同様にコンクリート梁試験体側面の膨張量の測定でも、直流電流を印加した場合にはカソード鉄筋付近の膨張量が大きくなることが確認されている〔2,3〕。また、RC配合試験体では直流電流の印加によりカソード鉄筋に沿った水平方向のひび割れも発生している（写真-4参照）。酢酸ウラニール蛍光法の観察結果と合わせると、電流を印加したコンクリート梁試験体にて耐荷力が低下した原因は、カソード鉄筋（引張側鉄筋）の周囲で局部的に進行したASRの影響で鉄筋界面の組織が比較的広い範囲にわたり脆弱化し、鉄筋とコンクリートとの付着強度が低下したことによるものと考えられた。



アノード（底面）↑

写真-3 アルカリシリカゲルの生成状況

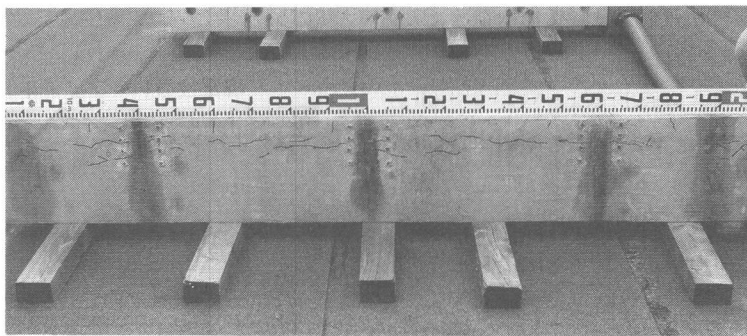


写真-4 カソード鉄筋に沿う水平方向のひび割れ(RC-5)

4. 結論

電気防食を実施したコンクリート梁試験体の耐荷力に及ぼすASRの影響について検討した結果をまとめると、次のとおりである。

- (1) 自然環境下に長期間暴露したコンクリート供試体では、アルカリの外部への溶出がASRの進行に大きな影響を及ぼし、アルカリの総量規制値以下 (3.0kg/m^3) の条件でもASRが発生する場合があった。
- (2) 電気防食を実施したコンクリート梁試験体では、直流電流の作用によりカソード鉄筋付近のひび割れの発生が顕著となり、ASRが促進された。
- (3) 電気防食を実施しないコンクリート梁試験体では、ASRによる損傷の程度に関係なく曲げ載荷時の耐荷力は低下しなかった。
- (4) 電気防食を実施したコンクリート梁試験体では、カソード鉄筋の周囲でASRが局部的に進行し、鉄筋とコンクリートとの付着強度が低下した。その結果、電気防食を実施したコンクリート梁試験体では、曲げ載荷時の最大耐力が低下した。

参考文献

- [1] Page, C.L., et al.: Development of Alkali-Silica Reaction in Reinforced Concrete Subjected to Cathodic Protection, Proc. of the 9th Inter. Conf. on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, London, pp. 774-781, 1992
- [2] Torii, K., et al.: Influence of Cathodic Protection on Cracking and Expansion of the Beams due to Alkali-Silica Reaction, Proc. of the 10th Inter. Conf. on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Melbourne, pp. 653-660, 1996
- [3] 石井浩司, 鳥居和之, 川村満紀, 松本一昭: コンクリート構造物のアルカリシリカ反応に及ぼす電気防食の影響、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 18, No. 1, pp. 861-866, 1996
- [4] 竹内勝信, 川村満紀, 鳥居和之, 谷川 伸: 自然環境下に暴露したコンクリートのアルカリシリカ反応による膨張とひび割れ、コンクリート工学論文集、Vol. 6, No. 1, pp. 11-19, 1995
- [5] 棚橋和夫, 岩永武士, 小柳 洽, 浅野幸夫: ASRによって劣化したRC梁及び柱の力学的挙動について、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 18, No. 1, pp. 843-848, 1996
- [6] Bertolini, L., et al.: Effects of Electrochemical Chloride Extraction on Chemical and Mechanical Properties of Hydrated Cement Paste, Advances in Cement Research, Vol. 8, No. 31, pp. 93-100, 1996