

論文

[1167] デサリネーションが鉄筋の付着挙動に与える影響

上田隆雄*1・宮川豊章*2・藤井 学*3・芦田公伸*4

1. はじめに

中性化や塩化物により腐食劣化した鉄筋コンクリート構造物の補修工法として、最近注目を集めている手法が電気化学的手法を用いた補修方法である。デサリネーションはコンクリート中の塩化物の除去を目的とする電気化学的手法であり、現在代表的な電気化学的手法である電気防食の100倍近い電流を用いるものの、ある一定期間だけ通電すれば良いという特色を有している。

デサリネーションの原理を図1に示す。コンクリート中の鉄筋を陰極とし、コンクリート表面に設置した陽極との間に電流が流される。なお、陽極はチタンのメッシュが用いられることが多く、電解質を介してコンクリート表面に設置される。電流が流れるに従って、 Cl^- や OH^- などの陰イオンは陽極に移動し、 Na^+ や K^+ などの陽イオンは陰極に移動する。

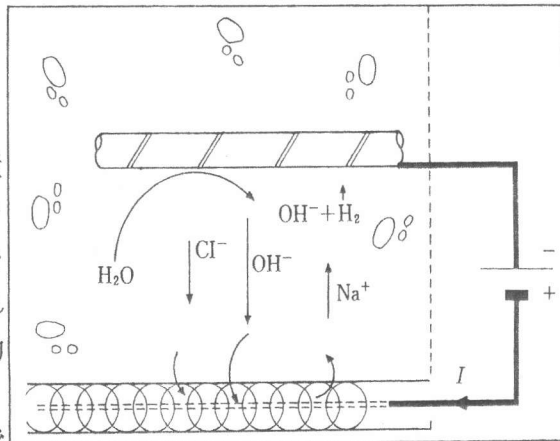


図1 デサリネーションの原理[1]

本研究では、デサリネーションの問題点の一つである鉄筋とコンクリートとの付着挙動へのデサリネーションの影響に注目し、塩分を含んだコンクリートにデサリネーションを施した後、鉄筋近傍のセメントペーストの軟化状況を微小硬度計を用いて測定するとともに、片引試験を行い、通電による影響を検討することとした。また、 Cl^- 、 Na^+ 、 K^+ の分布についても若干の検討を併せて行うこととした。

2. 実験概要

コンクリート配合を表1に示す。

コンクリート中の Cl^- 量としては、比較的厳しい塩害が生じた場合に見られる、 10.0kg/m^3 を最大とした5要因を選んだ。電流密度としては、デ

表1 コンクリートの示方配合

水セメント比 W/C (%)	細骨材率 (%)	粗骨材の 最大寸法 (mm)	単位 (kg/m^3)					
			セメント	水	細骨材	粗骨材	AE剤	減水剤
54	45	13	328	177	801	988	0.82	1.8

サリネーションで従来しばしば用いられている、コンクリート表面に対して 1.0A/m^2 を基本とした。今回の実験においては鉄筋表面に対して 5.0A/m^2 となり、以後鉄筋の表面に対する数値として示す。通電期間としては、通常用いられている4週と、さらに長期とした場合としての8週、12週の3水準を基本とした。供試体は横拘束筋を入れないものと、付着応力低下領域の挙動も併せて見る

*1 京都大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (正会員)
 *2 京都大学助教授 工学部土木工学科、工博 (正会員)
 *3 京都大学教授 工学部土木工学科、工博 (正会員)
 *4 電気化学工業(株)青海工場特殊混和材部研究室、研究員 (正会員)

表2 供試体一覧

①横拘束筋無し												②横拘束筋有り															
塩化物量 (kg/m ³)	0.0						10.0						塩化物量 (kg/m ³)	0.0			4.0			6.0			8.0				
電流密度 (A/m ²)	0.0			5.0			0.0			5.0			電流密度 (A/m ²)	0.0	5.0	0.0	5.0	0.0	5.0	0.0	2.5	5.0					
通電期間 (週)	4	8	12	4	8	12	4	8	12	4	8	12	通電期間 (週)	8	8	8	4	8	8	4	8	8	2	8	4	8	12

ために横拘束筋を配したものの2種類を作成した。詳細を表2に示す。通電は2面通電とし、電流を流さない面にはエポキシ樹脂を塗り、絶縁した(図2参照)。片引試験は土木学会規準「引抜き試験による鉄筋とコンクリートとの付着強度試験方法(案)」を準用して行った。また、化学分析用に別途作成した供試体を用いてCl⁻, N a⁺, K⁺の分布を調べた。供試体の切断方法を図3に示す。微小硬度としては鉄筋の自由端から3 cmの、鉄筋に垂直な断面についてピッカース硬度を測定した。

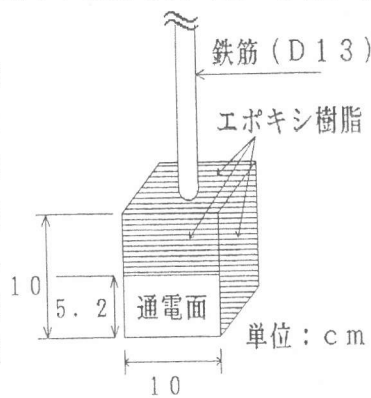


図2 供試体の通電面

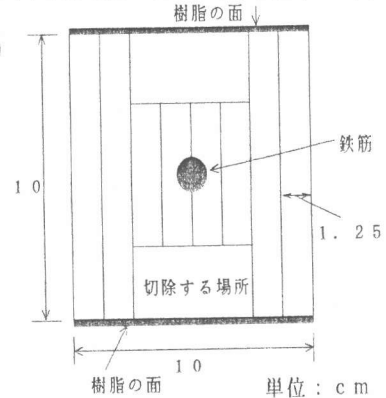


図3 供試体の切断方法

3. 試験結果および考察

3.1 化学分析

通電4週間の供試体中の、セメント量に対する塩化物量の分布状況を図4に示す。通電無しの供試体においては塩化物は鉄筋近傍により多く存在しているのに対して、通電後の供試体は鉄筋に近づくほど塩化物量は減少しデサリネーションの効果が現れている。デサリネーションにおいてCl⁻イオンはコンクリート表面の陽極に向かって移動し、さらにコンクリート表面から抜け出していく。このため鉄筋周辺のCl⁻イオンは減少するが、コンクリート表面のCl⁻イオンはコンクリートから抜け出ていく減少分とコンクリート内部から移動して来る増加分とがあるため、このような分布になると考えられる。コン

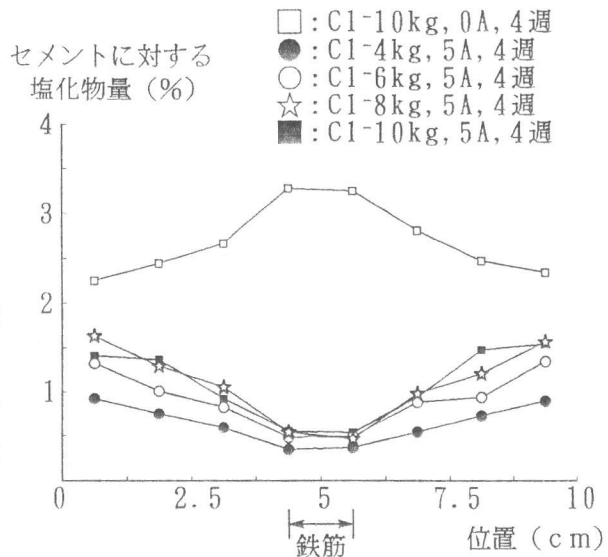


図4 塩化物イオンの分布

クリート中にはフリーデル氏塩として固定化された塩化物がセメント量に対して約0.4%存在することが知られている。Cl⁻量が6.0kg/m³以上の場合、鉄筋近傍の遊離した塩化物をコンクリートから全ては抽出しきれないようである。しかし、Cl⁻量が4.0kg/m³の場合は、塩化物量が最少で0.35%程度となっており、鉄筋近傍の遊離した塩化物をほぼ完全に抽出していると考えられる。

アルカリ (R₂O) 量の分布状況を図5に示す。アルカリ骨材反応の抑制対策の一つとして、アルカリ量を3.0kg/m³以下とする規定がある。Cl⁻10.0kg/m³混入供試体は、通電により、コンクリート

表面のアルカリ量が規定量以下になっているのに対し、鉄筋近傍のアルカリ量は規定量の約6倍になっている。C1⁻無混入供試体は、通電しなかった供試体が全領域で規定量以下であったのに対し、通電した供試体は鉄筋近傍で規定量を越えている。今回測定したアルカリ量は、骨材中に含まれるNa⁺なども含めて測定しているため、厳密には規定値と比較できないが、補修時に塩化物(NaCl)を多量に含んでいる場合には、デサリネーションにより鉄筋近傍に多量のアルカリが集中する可能性があると考えられる。また、X線回折分析によっても鉄筋近傍へのNa、Kの集積が確認された。

□: C1-0kg, 0A, 4週 ■: C1-0kg, 5A, 4週
○: C1-10kg, 0A, 4週 ●: C1-10kg, 5A, 4週

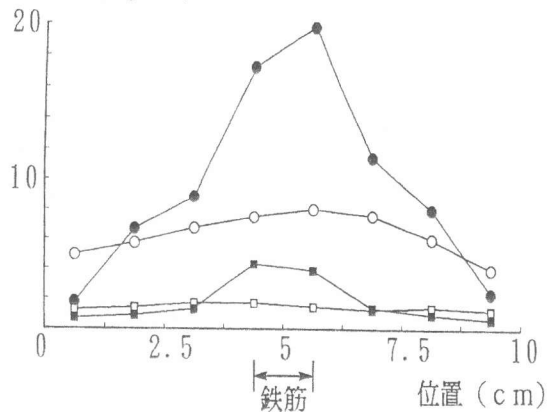
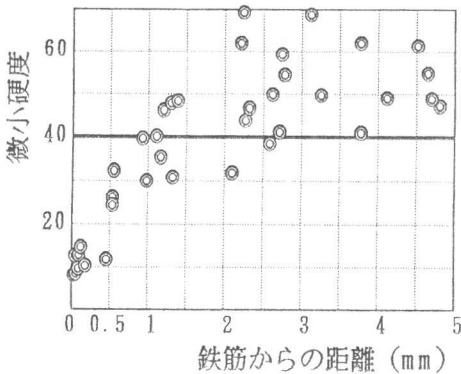


図5 アルカリの分布

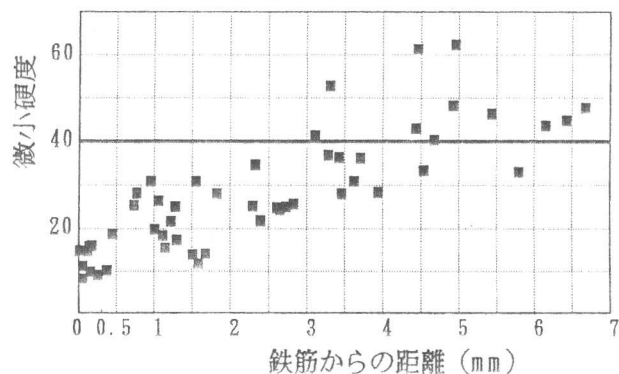
3.2 微小硬度分布

C1⁻量8.0kg/m³で、2.5A/m²を8週通電(積算電流密度3360A・h/m²)した供試体と5.0A/m²を8週通電(積算電流密度6720A・h/m²)した供試体について、鉄筋に垂直な断面のセメントペーストの微小硬度分布を調べた結果を図6に示す。鉄筋とコンクリートとの界面を原点とする直線上にビッカース圧子を下ろしビッカース硬度を測定したが、コンクリート中の骨材部分を避けながらの計測は困難を極め、実際には一直線上では数点しか計測できなかった。図6は鉄筋から放射状に伸びる多数の直線上の硬度を一つの座標系にプロットしたものである。

結果は
かなりば
らついて
おり厳密
な傾向は
つかみ難
いが、大
きな傾向
としてど
ちらの供



① 2.5A/m²



② 5.0A/m²

図6 微小硬度分布

試体も鉄筋に近い部分に柔らかい層ができている事が分かる。また、5.0A/m²の方が積算電流密度が大きいためか、軟化しているセメントペーストの範囲も大きい。鉄筋表面から十分に離れた健全な箇所では、セメントペーストのビッカース硬度は40以上であった。したがって、2.5A/m²では鉄筋表面から3mm程度、5.0A/m²では鉄筋表面から6mm程度の範囲でセメントペーストが軟化しているものと考えられる。

なお、切断した供試体の断面には、鉄筋の周囲に幅が約1cmの黒っぽい部分が観察された。また、鉄筋の表面近くにはさらに色の濃い層が薄く形成されていた。

セメントペースト中のC-S-H相の溶解度積の考え方からすれば[2]、[OH⁻]の増加にともないC-S-H相を形成していたSiO₂がイオンとして溶出していくものと考えられ、3.1に示すようなアルカリの集中によってセメントペーストが軟化するものと考えられる。

3.3 片引試験

(1) 横拘束筋の影響

無拘束で通電無しの供試体は、全て付着応力が最大となった時点でコンクリートが割裂破壊し、その後は測定が不可能となった。これに対し通電を行ったものでは、全てコンクリートが破壊されず鉄筋が抜け出す挙動を示し、最大付着強度の減少が見られた。これに対し横拘束した供試体では、通電による最大付着強度の減少は見られたものの、全て鉄筋が抜け出す挙動を示し、付着応力降下領域の曲線が得られた。この最大付着強度の減少は、通電によって鉄筋付近に集積したアルカリイオンの影響で鉄筋周りのコンクリートのセメントペーストが軟化し、鉄筋とコンクリートとの付着界面が変質したことによるものと考えられ、化学分析の結果とよく一致している。

Cl^- 量 0.0kg/m^3 、通電8週の付着応力-自由端変位曲線を図7に示す。横拘束した供試体は、拘束力によって付着応力が無拘束のものより大きくなっているが、最大付着強度に達するまでを比較すると、無拘束の2曲線は横拘束の2曲線とほぼ相似形を成している。そこで、通電による効果を通電無しの供試体に対する最大付着強度の比で表すこととする。最大付着強度比を用いれば、横拘束の有無を問わず比較することがほぼ可能であると考えられる。

(2) 積算電流密度(鉄筋表面)

従来、 Cl^- の輸率や脱塩率は積算電流密度に依存することが報告されている[1]、[3]。今回の実験では、 Cl^- 量 8.0kg/m^3 で、 2.5A/m^2 を8週流したものと 5.0A/m^2 を4週流したものは共に積算電流密度が $3360\text{A}\cdot\text{h/m}^2$ となる。これらの付着応力-自由端変位曲線を図8に示す。図8より、2本の曲線はほぼ一致していることが分かる。付着強度の低下が、鉄筋近傍へのアルカリ金属イオンの移動に起因しているとする、ナトリウムの混入量を支配する塩化物の混入量が等しく、コンクリート配合も同一ならば、付着強度も積算電流密度にほぼ依存すると考えてよいようである。

(3) 積算電流密度と塩化物量

種々の Cl^- 量での最大付着強度を表3に、積算電流密度と最大付着強度比の関係を図9に示す。

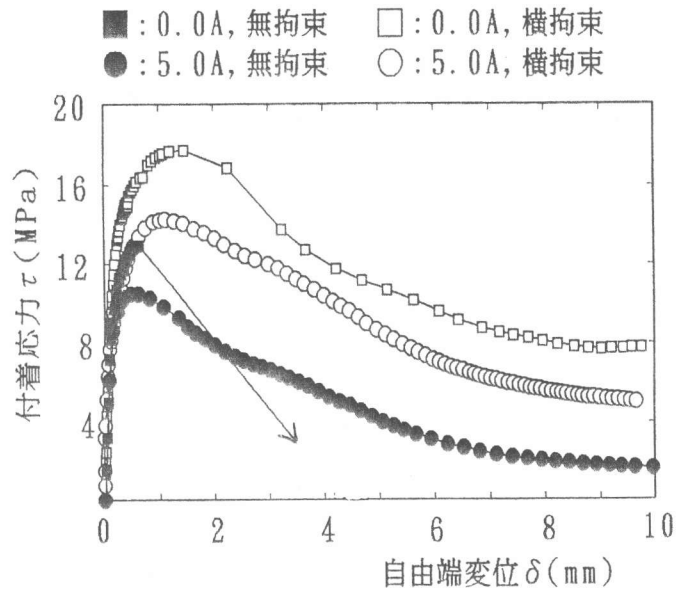


図7 付着応力と自由端変位の関係

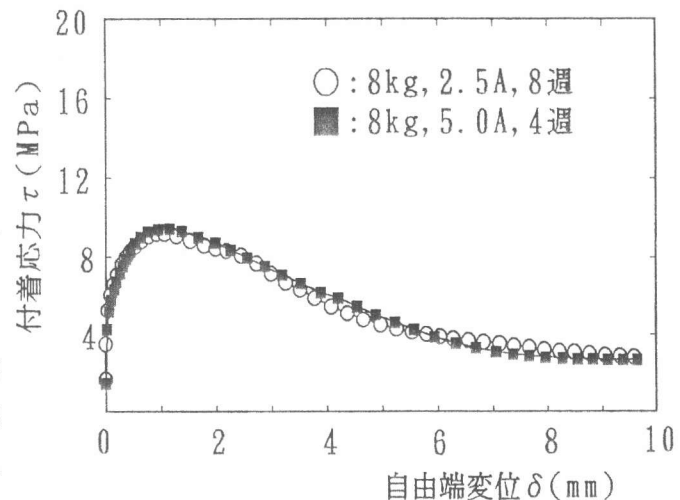


図8 付着応力と自由端変位の関係

微小硬度分布では $2.5A/m^2$ 、積算電流密度 $3360A \cdot h/m^2$ の供試体の方が $5.0A/m^2$ 、積算電流密度 $6720A \cdot h/m^2$ の供試体よりも低硬度領域は小さかったが、最大付着強度比を比較してみると、 Cl^- 量 $8.0kg/m^3$ の供試体において $2.5A/m^2$ の供試体と $5.0A/m^2$ の供試体はほぼ等しい値となっている。このことより、最大付着強度比があまり低下していない、もしくは回復している場合でも、セメントペースト自体は広い範囲で影響を受けている可能性があると考えられる。また、図6より硬度が20以下の非常に軟弱な部分はどちらの供試体も鉄筋のごく近傍に限られていることにより、最大付着強度比にはあまり影響が表れなかったと考えることもできる。

鉄筋近傍に集積したアルカリの影響でセメントペーストが軟化したとすれば、塩化物(NaCl)量が多いほど、また、積算電流密度が大きいほど軟弱な物質が多く生成し、最大付着強度比は小さいと予想することができる。しかし、図9からは必ずしも積算電流密度の増加にともなって一様には低下していないことが分かる。ここで注目されるのは、積算電流密度が $10080A \cdot h/m^2$ の時点で最大付着強度比が回復しているものがあることである。

J. B. Millerらによると、鉄筋表面積に対して $10000A \cdot h/m^2$ 程度まで通電した場合、一度低下していた付着強度が著しく増大する事が報告されている[4]。

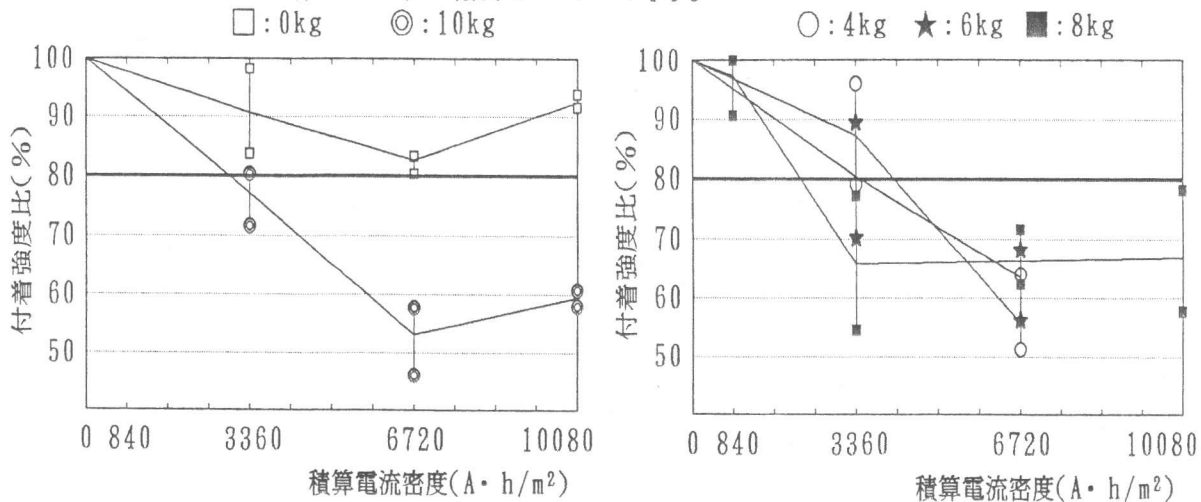


図9 付着強度比と積算電流密度の関係

表3 最大付着強度一覧

①横拘束筋無し

塩化物量 (kg/m ³)	電流密度 (A/m ²)	通電期間 (週)	積算電流密度 (A·h/m ²)	最大付着強度 (MPa)	強度比 (%)
0.0	0.0	4	0	13.34	100
		8	0	12.67	100
		12	0	12.57	100
	5.0	4	3360	12.09	90.6
		8	6720	10.48	82.7
		12	10080	11.62	92.5
10.0	0.0	4	0	10.39	100
		8	0	10.28	100
		12	0	10.49	100
	5.0	4	3360	8.00	77.1
		8	6720	5.53	53.7
		12	10080	9.64	66.8

②横拘束筋有り

塩化物量 (kg/m ³)	電流密度 (A/m ²)	通電期間 (週)	積算電流密度 (A·h/m ²)	最大付着強度 (MPa)	強度比 (%)
0.0	0.0	8	0	17.72	100
	5.0	8	6720	14.36	81.0
4.0	0.0	8	0	16.65	100
	5.0	4	3360	14.52	87.2
		8	6720	9.28	55.7
6.0	0.0	8	0	15.59	100
	5.0	4	3360	12.53	80.4
		8	6720	9.89	63.5
8.0	0.0	8	0	14.44	100
	2.5	2	840	14.03	97.2
		8	3360	9.24	64.0
	5.0	4	3360	9.49	65.7
		8	6720	9.58	66.3
		12	10080	9.64	66.8



ここで、鉄筋で生じるカソード反応は初期の段階では式(1)で示される。しかし、積算電流密度が大きくなると鉄筋近傍において酸素が欠乏するため、二次的な反応として、式(2)がカソード反応となり、軟化したセメントペースト中の水分を消費して再度硬化すると考えられている。

Cl⁻量が4.0kg/m³、6.0kg/m³の最大付着強度比もさらに通電を続ければ回復する事が予想される。

なお、付着挙動を検討するにあたって最大付着強度比の許容値を設定する必要があるが、エポキシ樹脂塗装鉄筋を用いた場合の値を参考にすれば、80%程度が許容値の目安となる。この場合、塩化物イオンをきわめて多量に含まない場合については、積算電流密度としては3360A・h/m²以下、すなわち5.0A/m²であれば4週間以内の通電が目安となろう。

3. 結論

本実験結果をまとめると次のようになる。

- ①デサリネーションは塩害補修工法として有効である可能性が高い。
- ②付着強度の低下は積算電流密度によってほぼ評価が可能であり、この値によってその抑制が可能である。しかし、過大な通電となった場合(例えば、10000A・h/m²を越える通電)の影響を検討する必要がある。

通電停止後、コンクリート表面に移動していたCl⁻や、鉄筋近傍に集積していたアルカリ金属イオンは時間とともに拡散し、新たな平衡状態を形成するものと推定される。鉄筋近傍のNa⁺が通電停止後4ヶ月で半減している例も知られている[5]。ある一定の最大付着強度比に抑える事のできる積算電流量の境界値に達する前に通電を停止し、アルカリの拡散を待つて再度通電を開始すれば、付着は健全なままで塩化物を抽出でき、Cl⁻の再分布による腐食の再発も防げる可能性が高いものと考えられる。

謝辞：本研究を実施するにあたり御指導を頂いた、京都大学 井上 晋助手、同 服部篤史助手および金沢大学 五十嵐心一助手に謝意を表します。

参考文献

- 1) A. J. van den Hondel and R. B. Polder: Electrochemical realkalisation and chloride removal of concrete, Construction Repair, pp.19~24, 1992.9/10
- 2) 西川 直宏: Pore Solution、セメント・コンクリート No.496、pp.33~35、1988.6
- 3) J. E. Bennett and T. J. Schue: Electrochemical Chloride Removal from Concrete : A SHRP Contract Statues Report ,Corrosion '90, Paper Number 316, 1990.4
- 4) J. B. Miller and G. E. Nustad: Effect of electro-chemical treatment on steel to concrete bond strength, Proc. of NASE conference in Sandefjord, Norway, 1993.6
- 5) 宇田川秀行・芦田 公伸・石橋 孝一・半田 実: 直流電流による鉄筋近傍へのNaイオンの集中とその後の再分散、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.15、No.1、pp.829~834 1993.6
- 6) 上田 隆雄・井上 晋・宮川 豊章・藤井 学・芦田 公伸: デサリネーションが鉄筋の付着挙動に与える影響、土木学会第48回年次学術講演会概要集第5部、pp270~271、1993.9