

論文

[1138] 永久型枠式電気防食用陽極の開発とその性能に関する検討

武若耕司*1・生田裕二*2・橋口 隆*3・峰松敏和*4

1. まえがき

最近、コンクリート構造物の塩害対策として電気防食が注目され、その実用化に向けた具体的な検討が活発に進められるようになってきた。電気防食の防食性については、原理的にはコンクリート表面からでも内部鋼材を直接防食できる極めて優れたものである。そこで、この防食方法における検討の対象は、これまで主に、防食を安定かつ長期的に行うための通電システムの開発に向けられてきた。特に陽極システムは、電気防食の”心臓部”にあたり、防食の均一性、安定性、耐久性および施工性など、多くの性能が要求される。現在、いくつかの有効な陽極システムが実用化されているが、今後予想される電気防食の需要増加を考え合わせると、陽極システムの各性能に対しさらなる向上も期待されるところである。

一方、永久型枠工法は、コンクリート工事における工期の短縮と労働力の削減を図れることから最近注目を集めている工法の1つである。この工法では、型枠が工場製品として安定した品質を確保できることから、鉄筋のかぶりを確実に計算できること、コンクリートの保護工としての機能も発揮できることなどの利点も有している。本研究では、この永久型枠工法の利点を生かし、電気防食の施工において最も重要かつ手間のかかる陽極施工の簡略化、陽極保護性能の向上、陽極と鉄筋間の確実なクリアランスの確保ならびに、型枠と電気防食の二重防食による鉄筋防食性の改善などを目的とした永久型枠式陽極の開発を試みた。

ここではこの型枠式陽極の概要を示すとともに、その最大の検討課題である型枠の一体性と電気防食性能の関係について、この型枠を使用したはり供試体の静的および疲労載荷時の通電性および鉄筋分極性から検討を行った結果について示す。

2. 永久型枠式陽極の概要

永久型枠式陽極の開発にあたり、型枠本体の材料としては、ある程度の強度と陽極保護性能を確保でき、また、それ自身の鉄筋防食性についても期待できるガラス繊維補強セメントモルタル(以下、GRCと称する)を用いることにした[1]。

また、陽極材料には、取り扱いが簡単で薄い部材中への設置が可能なチタンメッシュ

(酸化貴金属焼き付け被覆付き)を用いた。表-1および

表-1 型枠に使用したGRC用材料

セメント	C社製GRCセメント
細骨材	最大粒径2.5mm種子島海砂 (比重:2.56)
ガラス繊維	耐アルカリガラス繊維 (比重:2.74、繊維長:37mm)
高性能減水剤	ナフタリンスルホン酸塩系

表-2 型枠に使用したGRCの配合

W/C (%)	目標フロー値 (cm)	単体量 (kg/m ³)			繊維量 (%)	SP剤量 (%/C)
		W	C	S		
37	30±1	335	914	914	5	0.85

*1 鹿児島大学助教授 工学部海洋土木工学科、工博(正会員)

*2 鹿児島大学大学院 工学研究科海洋土木工学専攻

*3 インフラテック(株)技術開発部技術課(正会員)

*4 住友セメント(株)建材事業部製品営業課、工博(正会員)

2に、GRCの使用材料および配合を示す。

型枠の製造にあたっては、今回は試作的な意味と実験室レベルでの検討を行うことを考慮し、型枠厚は10mmとした。GRCの施工は、ダイレクトスプレー方式により行った。施工に際しては、まず、5mm厚さまでGRCの施

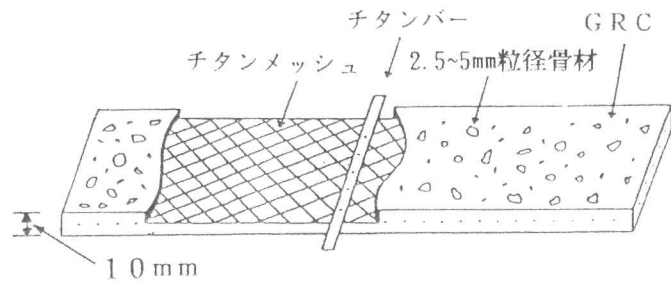


図-1 永久型枠式陽極の概要

工を行い、その上にチタンメッシュを設置した後、さらに5mm厚さで再度GRCを吹き付けた。また、型枠とコンクリートの付着性を確保する目的で、上記施工直後の型枠表面に2.5~5mm粒径の道路用7号砕石を型枠に1kg/m²の割合で均一に撒き、この上からモルタル分のみを薄く吹き付けて骨材を固着させた。なお、この砕石撒き量は、GRC型枠とコンクリートの一体性に関する著者らの既往の研究結果を参考に定めた[1]。図-1に作製した型枠の概要を示す。

3. 型枠の一体性と防食性能に関する検討

3.1 実験概要

(1) 供試体の作製

今回作製した型枠の電気防食用陽極としての性能を検討するために、この型枠を用いて、図-2に示す外寸法12×17×120cmの鉄筋コンクリートはりを作製した。なお、供試体を使用したコンクリートは、セメントとして早強ポルトランドセメント、細骨材として熊本緑川産川砂(比重2.59, 吸水率3.02), 粗骨材として最大寸法20mmの鹿児島谷山産砕石(比重2.56, 吸水率1.97)を用い、水セメント比を60%とし、コンクリート重量比で0.3%のNaClを混入した。なお、水セメント比を比較的大きく設定しさらに塩分を混入した理由は、鉄筋を腐食性環境に置くことによって、電気防食に対してより厳しい条件となることを配慮したものである。供試体は、材令約1カ月まで湿空養生を行った後、載荷実験まで気中に放置した。

(2) 載荷試験の概要

型枠の一体性と防食性の関係について、はり載荷時の通電性ならびに鉄筋分極性の検討により把握することにした。載荷試験は、静的載荷試験と疲労試験を実施した。

静的載荷試験には作製供試体のうち2体を供した。載荷にあたっては、著者らが過去に同様のGRC型枠(ただし、陽極なしのもの)を用いて作製した供試体について実施した耐力試験の結果(表-3)[1]を参考とし、スパン100cm、梁中央の等曲げモーメント区間20cmの条件に対して、まず、4tfまでの載荷を10回繰り返した後、

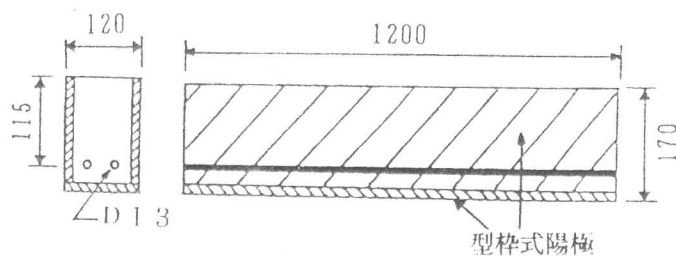


図-2 型枠式陽極付設RC供試体の形状

表-3 GRC型枠付設RC供試体の耐力試験結果[1]

型枠付設の有無	ひび割れ発生荷重 (tf) **	鉄筋応力2000kgf/cm ² 時の荷重 (tf) **	破壊荷重時の荷重 (tf) **
無*	0.58	2.46	6.28
有	2.01	3.91	7.81

*: 型枠付設供試体と外寸法及び有効高さが同一の供試体

** : 荷重は全て、今回の載荷条件と同一の条件に換算した値

最大 6 t f まで載荷を行った。

疲労試験は、3 体の供試体について実施した。スパンおよび載荷位置などの条件は静的載荷試験と同様である。設定荷重レベルについては、いずれの供試体も下限荷重を 0. 25 t f とし、上限荷重については、供試体ごとに、2. 5 t f、3 t f、および 3. 5 t f として、最大 200 万回まで繰り返し載荷を行った。

(3) 電気防食とその効果の確認方法

上記の静的載荷および疲労試験中の各供試体では、底面の型枠のみを陽極として使用して鉄筋に電気防食を施した。その概要を図-3 に示す。

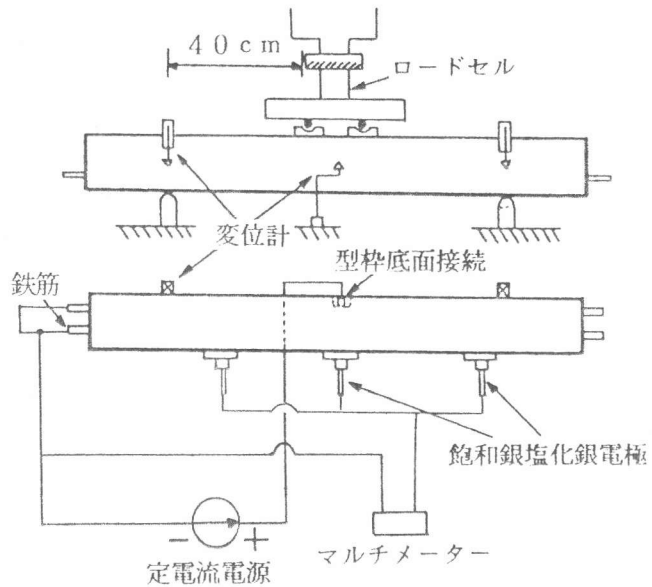


図-3 はりの載荷および通電状況

このうち、静的載荷中の供試体に対しては定電流で通電を行い、その通電量は、載荷の影響が顕著に表れるように陽極単位施工面積あたり 35 mA/m^2 と比較的大きく設定した。疲労試験供試体に対しては、上限荷重 3. 5 t f の供試体のみ定電流 (10 mA/m^2) で通電を行い、他の 2 つの供試体については通電条件を定電圧 1. 5 V とした。なお、通電は載荷試験開始前日から行い、鉄筋電位がある程度安定した状態で載荷試験を実施したが、疲労試験については試験期間が数週間に及ぶことから、その間の電位変化を補正するため、無載荷状態の供試体にも同一条件の通電を行うことにした。

載荷試験中の鉄筋電位は、図-3 に示すように、梁側面に設置した飽和 Ag/AgCl 電極により測定を行った。

3. 2 無載荷状態における型枠式陽極の通電特性

図-4 には、通電後約 20 時間経過した載荷試験直前の各供試体における通電量と鉄筋電位シフト量 (通電前の自然電位と通電時 instant off 電位の差) を取りまとめて示した。なお、同図中には、チタンメッシュ陽極を直接施工した供試体において得られた通電量-電位シフト量関係についての一例[3] も併せて示した。これらの結果から、今回検討を行った永久型枠式陽極を用いることによって得られる鉄筋の分極性は、無載荷の状態ではチタンメッシュを直接施工した場合と遜色のないことが確認された。

3. 3 静的載荷状態における型枠式陽極の通電特性

静的載荷状態で通電を行った供試体における鉄筋電位と載荷荷重の関係を図-5 に、また、鉄筋電位シフト量と載荷荷重の関係を図-6 にそれぞれ示した。これらの結果から、

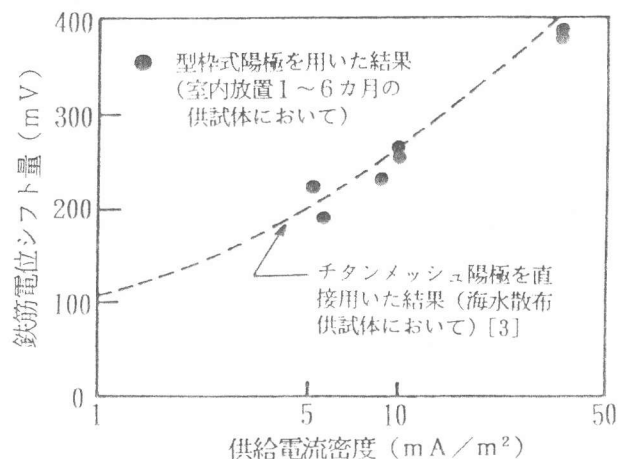


図-4 無載荷状態における供給電流密度-電位シフト量関係

通電による鉄筋の分極特性は、使用状態の荷重レベルに相当する3tf程度までは荷重の影響をほとんど受けないようであるが、その後は、荷重の増加とともに電位シフト量が徐々に減少して、鉄筋の防食性が相対的に低下する傾向にあった。ただし、その低下量は、破壊耐力の約80%近くの荷重レベルでも、分極量全体の20%以内にとどまっておき、少なくとも、本永久型棒式陽極システムが静載荷状態でその性能に大きな問題が生じることはないようである。

なお、このような荷重による電位シフト量減少の原因については、せん断区間よりも等曲げモーメント区間の鉄筋においてその傾向が顕著であること、はりの荷重-たわみ関係とシフト量の変化の傾向に明らかな相関が認められること(図-6)など、荷重に伴う型枠とコンクリートの一体性低下による陽極システムの変状を予想させる状況も見られたが、一方では、①荷重中、目視では型枠の変状が確認されなかったこと、②陽極-鉄筋間の抵抗に起因するIRドロップ(on電位とinstant off電位の差)の大きさは荷重中ほとんど変化していないこと(図-5)および、③定電流の通電を行っているため、型枠-陽極間のわずかな変状では鉄筋への供給電流密度は変化しないと考えられることなど、今回のシフト量減少の原因が型枠以外の問題にあると思われる状況も確認された。この場合、荷重によって鉄筋自身の分極性に变化が生じたことが原因として挙げられる。

3.4 疲労荷重状態における型枠式陽極の通電特性

図-7および8は、それぞれ上限荷重2.5および3tfで疲労試験を実施した通電供試体において測定された鉄筋電

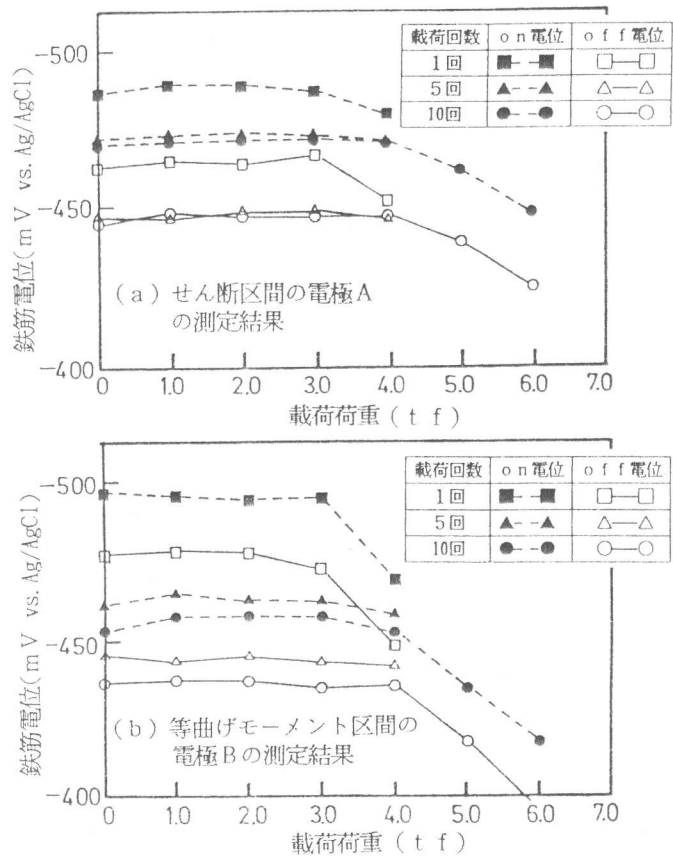


図-5 静載荷中の鉄筋電位と載荷荷重の関係 (通電量: 3.5 mA/m²一定)

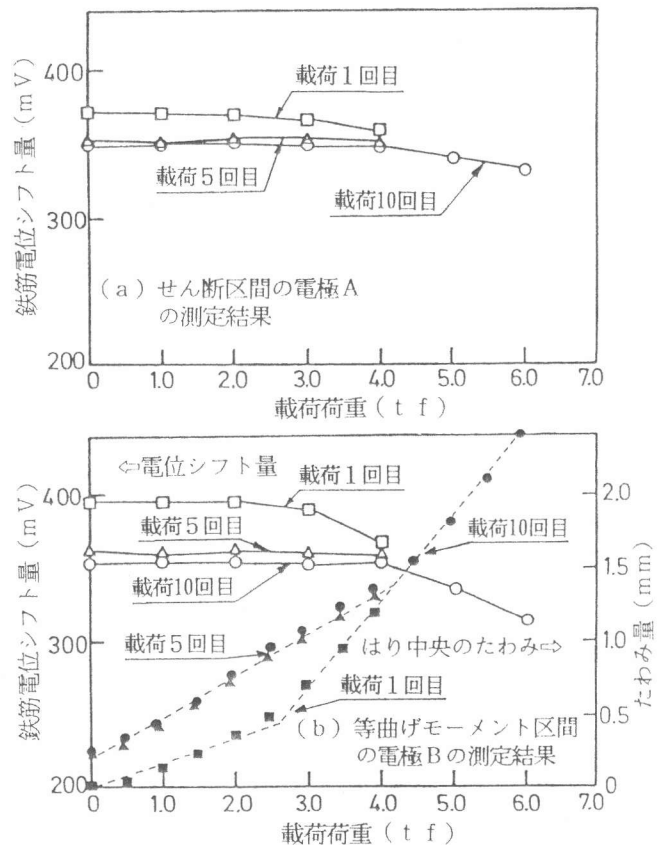


図-6 静載荷中の鉄筋電位シフト量およびはりたわみ量と載荷荷重の関係 (通電量: 3.5 mA/m²一定)

位シフト量の試験中の変化状況を示したものである。なお、これらの場合の通電が定電圧1.5Vの条件で実施されたものであることから、同図中には鉄筋に供給される電流量の変化の状況についても示した。これらのはりは、200万回の繰り返し载荷においても破壊することはなかったが、いずれも、鉄筋への供給電流量は繰り返し回数の増加に伴って徐々に減少し、併せて鉄筋電位のシフト量にも減少傾向が確認された。同時に通電を行った無载荷供試体においては、試験期間中供給電流密度に大きな変化が見られなかったことから、疲労载荷供試体における供給電流量および電位シフト量の減少は、明らかに陽極システムの変状に起因するものと考えられる。また、上限荷重3tfの場合には100万回の繰り返し载荷終了時点において、上限荷重2.5tfの場合には200万回载荷終了時点において、それぞれ急激な電流量の減少が生じたが、これは、型枠とコンクリートに顕著な

剥離が確認された時点と一致している。さらに、上限荷重3tfの場合には、100万回载荷時点で型枠ひび割れ部のチタンメッシュが疲労破断しているのも確認され、このため、A点付近の鉄筋には十分な電流が流れずに、電位シフト量が急激に減少する結果となった。

図-9は、上限荷重3.5tfで疲労試験を実施した供試体における鉄筋電位シフト量の変化の状況を示したものである。この供試体は、繰り返し载荷190万回の時点で鉄筋の疲労破断を生じて破壊した。また、30万回の载荷終了時点で、すでに型枠の剥離も確認された。しかし、この供試体では通電を定電流で行ったこともあり、型枠剥離後から電位シフト量が幾分減少傾向にはあるものの、上述の定電圧条件の場合のような顕著な変化は認められなかった。なお、30万回载荷以降の電位シフト量の減少については、疲労载荷供試体と電氣的に直列接続された無载荷供試体においても同時点より電位シフト量の低下傾向が確認されていることから、荷重変化の際、型枠剥離によって電極間抵抗が急増し電極間電圧が一時的に

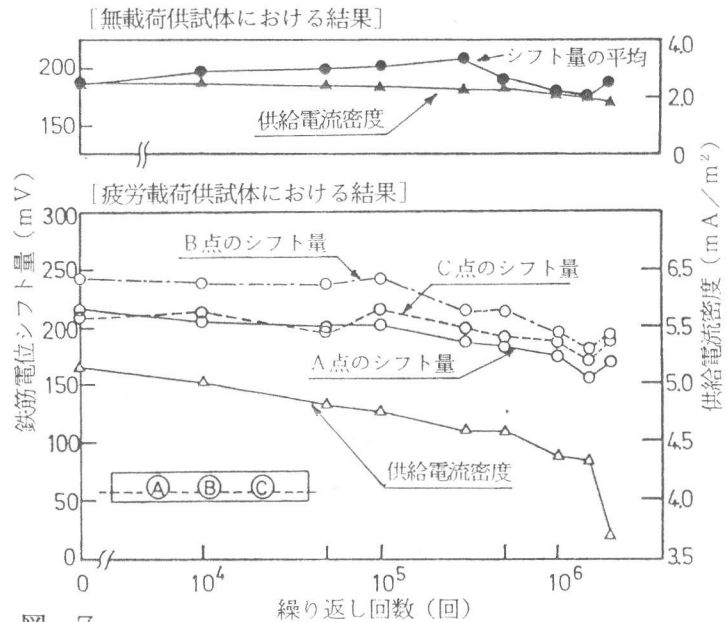


図-7 上限荷重2.5tfの疲労試験供試体における鉄筋電位シフト量および供給電流密度の変化状況 (通電量: 1.5V一定)

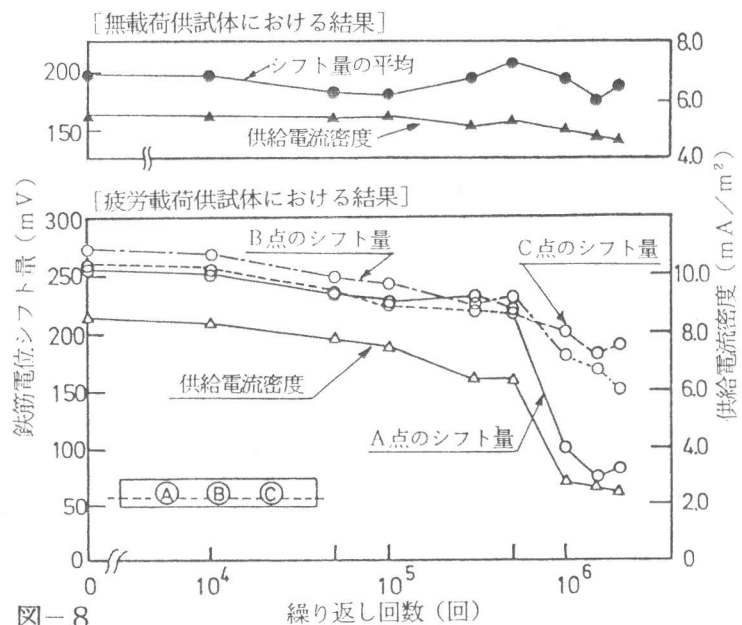


図-8 上限荷重3tfの疲労試験供試体における鉄筋電位シフト量および供給電流密度の変化状況 (通電量: 1.5V一定)

電源容量(20V)を越え、定電流による制御が不十分となった状況も考えられる。

図-10は、はり破壊あるいは陽極トラブルまでの繰り返し回数と応力レベルの関係を取りまとめたものである。なお、応力レベルについては、実構造物では型枠の補強効果は考慮されない場合が多いと考え、上限荷重を同一外寸法の型枠なし供試体の破壊耐力(表-3参照)に対する比で示した。この図からも明らかに、今回の永久型枠式陽極システムでは、繰り返し荷重によって、部材の破壊よりもシステムのトラブルが先行した。これは、主に型枠剥離に起因するものであり、今後この点に関して型枠の品質改善を図る必要がある。

しかし一方、今回の結果を通して、疲労作用を受ける環境での電気防食システムの適用性に関する一般的見解として、陽極システムに目視で確認されるような顕著な劣化が生じなければ、例えば定電圧電源を用いた場合でもおよそ20%程度のシフト量の減少を見込んだ防食設計を行えば、所定の防食性は十分満足されることも確認された(図-7参照)。

4. まとめ

コンクリート構造物の電気防食用陽極として永久型枠式陽極を開発し、その実用性を検討した。その結果、以下のことが確認された。

- (1) 一般の部材においては、本型枠式陽極を使用しても、従来の陽極を用いた場合と同程度の通電性能は確保できる。
- (2) 本陽極の施工された部材に作用する荷重が一時的に終局耐力近くまで達しても、その後の防食性には大きな影響はない。
- (3) 繰り返し荷重を受ける状況では、型枠の剥離が部材の疲労破壊に先行して生じ、この点に関する改善が必要である。ただし、型枠の一体性が確保できれば、疲労環境においても電気防食効果は維持できる。
- (4) 電気防食された部材に荷重が加わると、鉄筋自身の分極抵抗が減少して防食性が低下する場合もある。

参考文献

- 1) 武若耕司ほか：塩害対策を目指したGRC埋設型枠工法の開発に関する基礎的研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 14, No. 1, pp. 143-148, 1992. 6
- 2) 武若耕司ほか：電気防食用陽極として使用できる永久型枠の開発について、土木学会第48回年次学術講演会講演概要集、Vol. 5, pp. 274-275, 1993. 9
- 3) Takewaka, K. and Minematsu, T.: A Cathodic Protection System for Rehabilitation of Marine Concrete Structures, ACI, SP-126, pp. 657-678, 1991. 8

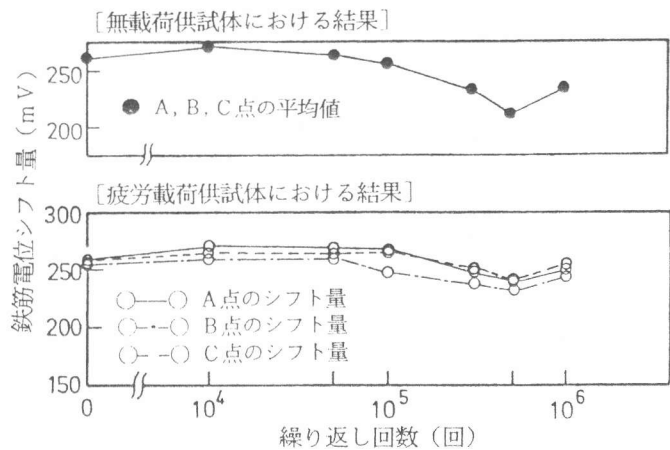


図-9 上限荷重3.5tfの疲労試験供試体における鉄筋電位シフト量の変化状況 (通電量: 10mA/m²一定)

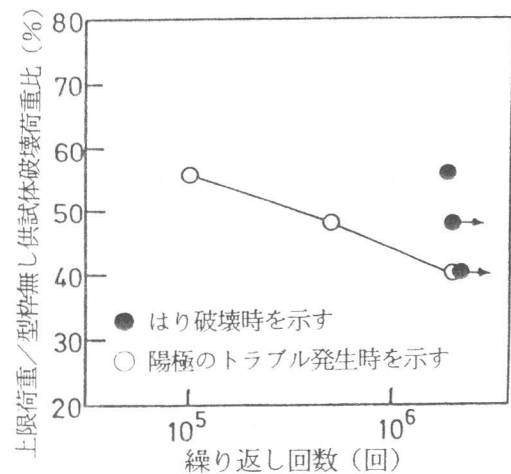


図-10 はりの破壊および陽極トラブルまでの繰り返し回数と応力レベルの関係