

[1066] コンクリート中の鉄筋への誘導電流に関する実験的研究

飯田和弘（関電工電力開発本部）

高永敏行（関電工電力開発本部）

正会員 富田六郎（日本セメント中央研究所）

正会員 ○綾田隆史（日本セメント中央研究所）

1.はじめに

大電力を効率的、かつ経済的に輸送する際に採用されている単相のガス絶縁母線は、コンクリート基礎からの離隔距離が短く、漏洩磁束による電磁誘導作用によりコンクリート中の鉄筋に電流が誘起され、コンクリート構造物に温度上昇、ひびわれおよび付着強度の低下等悪影響を与えることが予想される。本研究はこのような障害の発生する可能性を考慮して、種々の条件のもとでRC部材の鉄筋に誘起される電流量を測定し、誘導電流特性に及ぼすコンクリートの影響及びその防止策、さらに過大な電流が流れた場合の鉄筋コンクリート部材の特性について検討したものである。

2. 実験方法

2.1 供試体の製造方法

供試体は図-1に示す2種類の断面形状のRCばかりで、長さは1500mmである。コンクリートは、水セメント比60%のものを基本に、高強度としたもの及び2種の繊維を用いたもので、繊維の混入率を変化させた7種類について試験を行った。繊維の混入は電気的な特性を変えることを主目的としたため骨材寸法は同一とした。なお基準のコンクリートにリグニン系のAE減水剤を用い、他のコンクリートにはナフタリン系及びメラミン系の高強度用減水剤を用いた。これらコンクリートの配合を表-1に示す。使用材料は、セメントが普通ポルトランドセメント、細骨材は富士川産川砂、粗骨材は青梅産砕石である。

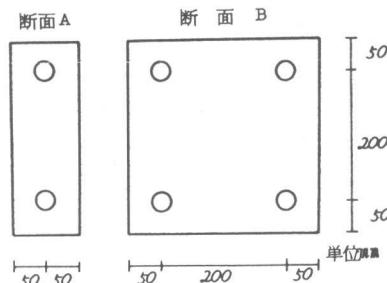


図-1 供試体の断面形状

表-1 コンクリートの配合条件

記号	種類	G _{max} (mm)	W/C (%)	S/a (%)	単位量 (kg/m ³)					(C×%)	
					水	セメント	細骨材	粗骨材	繊維	減水剤	増粘剤
N	基準コンクリート	60	44	168	280	840	1073	—	0.25 ¹⁾	—	
H S	高強度コンクリート			156	347	818	1044	—	1.2 ²⁾	—	
CF 1	炭素繊維コンクリート	60	60	210	350	1027	689	16	1.5 ³⁾	0.24)	
CF 2	炭素繊維コンクリート			250	417	869	580	33	3.0 ³⁾	0.44)	
SF 0.5	鋼繊維コンクリート	20	45	190	317	1085	726	39	1.0 ²⁾	—	
SF 1.0	鋼繊維コンクリート			190	317	1077	721	78	1.5 ²⁾	—	
SF 1.5	鋼繊維コンクリート			190	317	1069	716	117	2.0 ²⁾	—	

1) リグニン系減水剤 2) ナフタリン系減水剤 3) メラミン系減水剤 4) 消泡剤 C×0.1%を含む

増粘剤としては市販の水溶性セルロース系のものを、消泡剤はトリプチルfosfateを主成分とするものを用いた。炭素繊維は繊維長6mm、繊維径 $18\mu\text{m}$ のピッチ系のものを、鋼繊維は繊維長30mm、アスペクト比60のせん断ファイバーを用いた。鉄筋はSD30A相当の2種類の異形鉄筋を用いた(D19, D22)。

2.2 電磁誘導試験方法

試験方法の概要是図-2に示すように外径60mm、厚さ7mm、長さ2600mmの銅パイプ模擬母線に交流電流を流し、それによってコンクリート中の鉄筋に発生する誘導電流 A_1 を電流計で測定した。7種類のコンクリートについて、2種の断面形状及び2種の鉄筋径を組み合わせ表-2に示すものについて試験を行った。

母線電流 A_0 は500、1000、1500及び2000Aに、供試体と母線との距離 h は100、200及び400mmに変化させてそれぞれに対応する誘導電流 A_1 を測定した。

次に誘導電流を防止する方法としては下記について検討した。

(1)アルミケースによる母線被覆

外径200mm、厚さ4mmのアルミケースで母線を被覆した。

(2)金属板およびコンクリートによる供試体被覆

a. 厚さ4mmの鋼板で供試体の全周を被覆した。 b. 厚さ4mmのアルミ板で供試体の全周を被覆した。 c. 断面100×300mmの同一配合のコンクリートで両側面を被覆した。

(側面のかぶりが10cm増加)

3. コンクリートの性状

フレッシュコンクリートの性質、標準養生材令28日における圧縮強度、並びに電磁誘導供試体と同一の気中養生を行い、誘導電流の測定を行なった材令(4~7週)における圧縮強度をとりまとめて表-3に示した。

各種コンクリートの導電率測定結果についても表-3に示した。なお測定方法は10×10×40cmの供試体の両端に5cmの深さまで鋼棒を埋め込み、測定時のコンクリートの状態としては70°C、30% R.H.および20°C、60% R.H.で乾燥したもの、ならびに飽水状態のもので試験を行った。

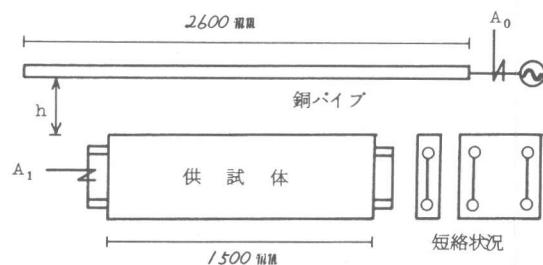


図-2 試験の概要

表-2 試験の組合せ

種類	N	HS	CF 1	CF 2	SF 0.5	SF 1.0	SF 1.5
断面	D19	○	○	○	○	○	○
	D22	○	○	○	-	-	-
A	D19	○	○	○	-	-	-
	D22	○	○	○	-	-	-
断面	D19	○	○	-	-	-	-
	D22	○	○	-	-	-	-
B							

表-3 コンクリートの性状

種類	フレッシュコンクリートの性質		圧縮強度 (Kgf/cm ²)		導電率 (s/m) × 10 ⁻³		
	スランプ (cm)	空気量 (%)	標準	気中	70°C, 30% R.H.	20°C, 60% R.H.	20°C, 水中
N	11.5	2.5	349	258	0.42	0.47	8.0
H S	13.5	2.7	594	438	0.50	0.49	3.4
C F 1	6.5	3.9	303	302	1.30	0.58	10.3
C F 2	7.0	3.7	—	312	2.33	1.22	3.5
S F 0.5	15.5	4.8	310	302	0.40	0.44	4.8
S F 1.0	14.5	4.9	299	298	0.42	0.51	12.3
S F 1.5	14.5	5.5	311	277	0.44	0.58	8.9

4. 誘導電流測定結果及び考察

4.1 母線の電流及び母線との距離と誘導電流

鉄筋径 19 mm の母線電流と誘導電流との関係を断面 A 及び B について図-3 に示す。母線電流が大きいほど、また母線との距離が小さいほど鉄筋に誘導される電流は大きくなっているが、その値は母線電流の 0.8~1.0% 程度である。これは、変電所において接地線に流れる誘導電流の最大値が、主回路電流に対して約 20% であるのに比べて相当小さい。(1)

今回の試験方法で電磁誘導によって生ずる起電力 V (v) は (1) 式で表すことができる。

$$V = j \omega M \ell A. \quad \dots \dots \quad (1)$$

ここで ω = 角周波数(1/s)、 ℓ = 鉄筋の長さ(m)、 h_1 、 h_2 = 母線と鉄筋の距離(m) ($h_1 < h_2$)

μ_0 = 真空の透磁率(H/m)、M = 単位長さ当たりの相互インダクタンス(H/m)

なお $M = \mu_0 / 2 \pi \cdot \ell n (h_2/h_1)$; 断面 A

$$= \mu_0 / 2 \pi \cdot \ell n ((h_2 + h_2^2 + 0.1^2) / (h_1 + h_1^2 + 0.1^2)) \quad ; \text{断面 B}$$

また供試体内の 2 本の鉄筋を短絡した

ループのインピーダンス Z_s (Ω) は

ループの長さ及び鉄筋径から決り、誘導電流 A_1 (A) は (2) 式のようになる。

$$A_1 = V / Z_s \quad (A) \quad \dots \dots \quad (2)$$

図-3 の破線は (2) 式より求めたものである。図より実測値は計算値よりも大きな値を示している。例えば断面 A で母線との距離が 100 mm の場合計算値では母線電流に対する比が約 0.7% であるのに対し、実測値では 1% 前後である。しかし母線電流及び母線との距離から鉄筋に誘導される電流を求める場合は (2) 式で実用的な値を得ることができると考えられる。本試験では装置の都合で電流の最大値は 2000 A としたが、実際のガス絶縁母線では 20000 A 程度の電流が流れることも考えられ、この場合にも (2) 式を利用す

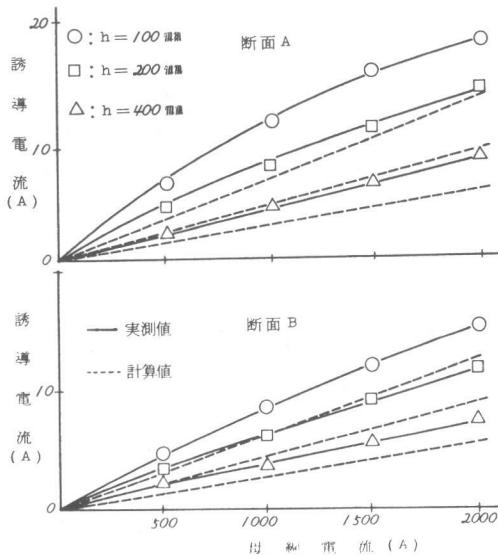


図-3 母線電流と誘導電流

ることで誘導電流を推測することができよう。

4.2 コンクリートの種類及び鉄筋径と誘導電流

コンクリートの強度すなわち密度の違いによる誘導電流への影響、炭素繊維及び鋼纖維混入による誘導電流への影響をそれぞれ図-4及び5に示す。

高強度になるとコンクリートが密となりコンクリートの透磁率が小さくなると一般にいわれており、そのため誘導電流は図-4から明らかのように若干減少する。また図5から炭素繊維や鋼纖維をコンクリートに混入すると、混入量の増加に伴い、誘導電流は増加する傾向が認められる。これは、導電性物質であるこれら纖維の混入により供試体の透磁率が増加したためと考えられる。また、供試体を飽水状態にしても導電率が大きくなるため、誘導電流は若干増加する。

鉄筋径が大きくなると鉄筋のインピーダンスが小さくなり、図-4に見られるように誘導電流は大きくなる。

4.3 誘導電流の遮へい効果

母線をアルミケースで被覆した場合及び供試体を金属板で被覆した場合の結果を図-6に示す。母線被覆では誘導電流を低減できないが、金属板で被覆すると鋼板で約60%、アルミ板で約50%の低減効果がみられる。

鋼板やアルミ板による供試体被覆は、外部に母線があって母線による影響が被覆した空間の内部に入らないようにする受動的被覆であり、直接的に誘導電流を低減できる。これに対して被覆物内部に母線が存在し、外部に母線による影響が及ばない様にする能動的被覆は接地の程度によってその効果が相当に変化する。今回の試験では接地が不十分であったためアルミケースで十分磁束が吸収されず、母線で発生した磁束がほとんど外部に漏洩したため誘導電流を低減できなかつたと考えられる。

被覆効果に最も影響を与える吸収損失は、板の厚さ

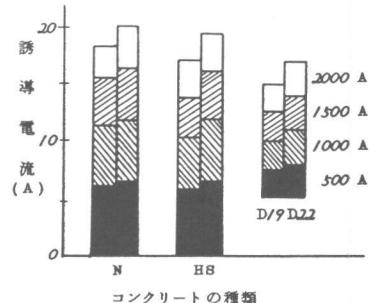


図-4 コンクリートの種類と誘導電流

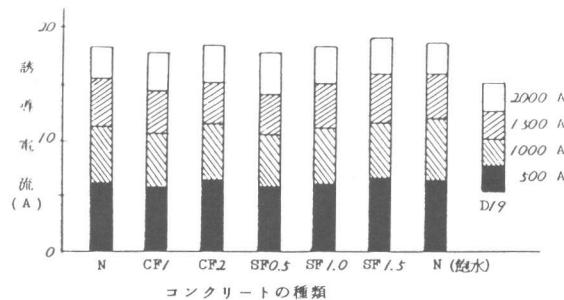


図-5 コンクリートの種類と誘導電流

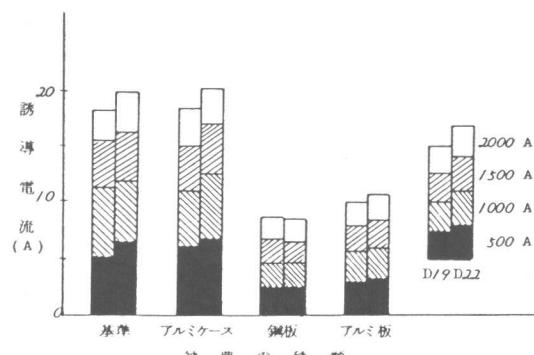


図-6 被覆の種類と誘導電流

が等しい場合、比透磁率 μ_r と銅に対する比導電率 G との積の平方根に比例する。鋼板及びアルミ板のこの値は文献によれば、それぞれ 10 及び 0.78 となりこの値からも鋼板の遮へい効果の大きいことがうなづける。(2)

図-7 はかぶりが大きくなつた場合の誘導電流の結果である。D19 ではほぼ同じであるが、D22 では若干減少した。供試体を用いてかぶりを大きい状態にすると受動的被覆効果により若干誘導電流を低減できる。

5. 鉄筋への通電試験

断面 $200 \times 200\text{mm}$ 、長さ 1000mm で断面中心に 1 本の鉄筋を配置した供試体を用い、鉄筋に過大な電流が流れた場合を想定し、通電時のコンクリートの破壊状況等を調べた。図-8 は通電に伴う鉄筋の温度変化を示したものであり、200 A では鉄筋温度が 50°C に上昇するが、供試体にほとんど変化はみられない。しかし 400 A の場合 D16 では 1 時間で、D19 では 1.5 時間でまた 600 A の場合 D16 では 10 分で、D19 では 15 分で鉄筋と垂直方向に断面を貫通するひびわれが発生した。鉄筋の通電により鉄筋温度が上昇するため、鉄筋の熱膨張による直接的な引張応力とコンクリートに生ずる温度勾配による表面での引張応力が加算され、鉄筋温度が $70 \sim 90^\circ\text{C}$ に達した時点で、表面から横断方向のひびわれが生じたものと考えられる。通電量をさらに増加すると 1 分以内で鉄筋温度が $150 \sim 200^\circ\text{C}$ に達し、コンクリートにひびわれが発生する、という文献もある。(3)

また図-8 に示す温度履歴を与えた供試体及び基準となる通電していない供試体から、鉄筋の付着強度用の供試体を切斷作成し、片引き試験を行つて付着強度と自由端の鉄筋のすべり量の関係を求め

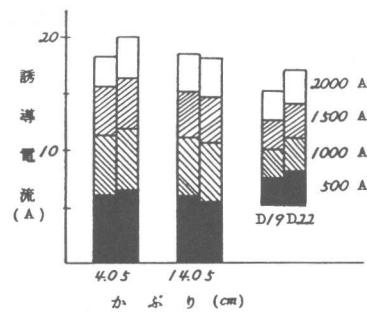


図-7 かぶりと誘導電流

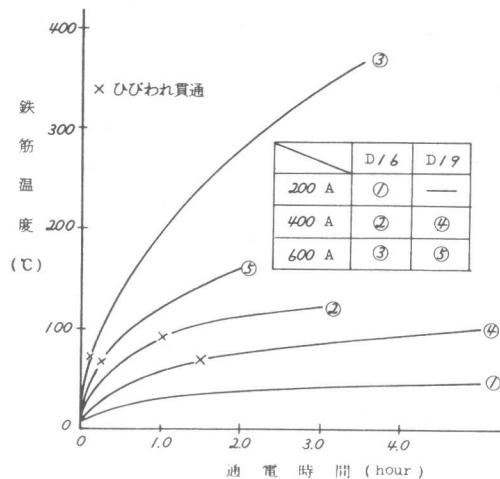


図-8 温度履歴

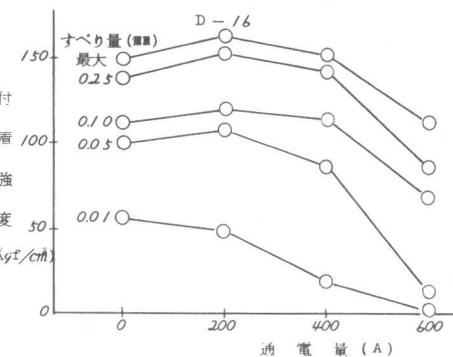


図-9 通電後の付着強度

た結果を図-9に示す。600A通電後の供試体はすべてのすべり量において付着強度の低下を生じ、またすべり量が小さい時には400A通電後の供試体においても付着強度の低下が見られた。すなわち、鉄筋の温度が100°C程度まで上昇することで、付着強度が損なわれる可能性がある。

電気エネルギーが熱エネルギーに変換すると仮定すれば(3)式がみちびかれる。

$$V \cdot I \cdot t = J \cdot C \cdot \gamma \cdot L \cdot T \times 1000 \quad (\text{ジュール}) \cdots \cdots (3)$$

ここで V = 鉄筋の両端の電位差 (V), I = 電流 (A), t = 通電時間 (s), J = ジュール定数 ($4.2 \text{J}/\text{cal}$), C = 鉄筋の比熱 ($\text{kcal}/\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}$), γ = 鉄筋の単位重量 (kg/m), L = 鉄筋の長さ (m), T = 上昇温度 (°C)

したがって電流に関する条件 ((3)式左辺) が一定で、鉄筋の長さを同一とすれば上昇温度 T を小さくするためには鉄筋の単位重量 γ を大きくすればよい。すなわち鉄筋径を大きくすれば上昇温度を抑えることができ、本試験の結果においても鉄筋径が大きいとひびわれ発生の時間が長くなっていることを見付けている。

4.2より鉄筋径が大きくなると誘導電流が若干大きくなっているが、鉄筋の上昇温度は鉄筋径の二乗に反比例して小さくなっていること、鉄筋径を大きくすることは誘導電流による温度上昇を抑えるのに有効と言える。

6.まとめ

実際の構造物は鉄筋の短絡状況、コンクリートの含水率、熱拡散の状況、接地条件等電気的特性に影響を及ぼす多くの要因が複雑に介在しており、電流が誘起された場合の鉄筋コンクリート部材の挙動を推測することは難しい。本試験は比較的単純なモデル供試体を用いることによって、RC部材への誘導電流及び通電時のコンクリートの破壊状況を基礎的に検討したものであり、その結果以下の結論を得た。

- (1) 部材内の鉄筋に誘導される電流は、母線電流が増大するほど、また母線との距離が短くなるほど大きくなり、母線との距離が100mmの場合母線電流の1%程度である。
- (2) 部材内の鉄筋に誘導される電流を理論計算から推測することが可能である。
- (3) コンクリートに導電性物質を混入した場合、混入量の増加に伴い鉄筋に誘導される電流は若干大きくなる。また供試体が飽水状態であると誘導電流は若干大きくなる。
- (4) 部材を導電率及び透磁率の大きな金属で被覆すると、誘導電流を大幅に低減することができる。厚さ4mmの鋼板で部材を被覆することにより誘導電流を約60%低減できる。
- (5) コンクリートの密度を大きくすると誘導電流は若干小さくなる。またかぶりを大きくすることでも誘導電流をわずかに小さくできる。
- (6) 部材内の鉄筋径が大きいほど誘導電流は大きくなる。しかしながら、鉄筋に流れる電流が等しければ鉄筋径の二乗に反比例して鉄筋の温度上昇は小さくなる。したがって、誘導電流による鉄筋の温度上昇を抑えるためには鉄筋径を大きくすることが有効である。
- (7) 本試験の方法によれば、400A以上の通電でRC部材内にはひびわれが発生する。また鉄筋温度が100°C程度まで上昇することで、付着強度の低下が生ずる。

参考文献

- (1)木村、高見他：500kv変電所における接地電流の実態、関西電力総研報告、N023 p.p.230-234、1979.
- (2)荒木庸夫：電磁妨害と防止対策、東京電気大学出版局 p.p.129-131、1980.
- (3)笠井、川村：鉄筋の加熱によるコンクリートのとりこわしに関する研究、日本建築学会論文報告集号外 p.p.109、1966.