

炭素繊維を混和したセメントペーストの圧電特性に関する 基礎的検討

Basic Study on Piezoelectric Effect of Cement Paste Containing Carbon Fiber

Ma Jiachen¹・福山智子²・金侖美³

Jiachen Ma, Tomoko Fukuyama and Yunmi Kim

¹立命館大学大学院 理工学研究科環境都市専攻 博士課程前期課程 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

Graduate Student, Graduate School of Science and Engineering, Ritsumeikan University

²立命館大学准教授 理工学部建築都市デザイン学科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

Associate Professor, Department of Architecture and Urban Design, College of Science and Engineering, Ritsumeikan University

³立命館大学助教 総合科学技術研究機構 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

Assistant Professor, Research Organization of Science and Technology, Ritsumeikan University

To grasp mechanical properties of reinforced concrete (RC) structure, core fracture test is often adopted. Since core sampling requires structural damage, a structure self-monitoring is desirable to assess mechanical properties. The purpose of this study is to develop a self-monitoring method utilizing piezoelectric effect. In this paper, the effects of water content and W/C on the cement paste's piezoelectric properties containing carbon fibers (CF) are examined. Results show that the samples added with CF have good piezoelectric properties in the wet state. However, the self-monitoring of RC structure needs further research about the influence of CF length and content on cement mortar piezoelectricity.

Keywords: Piezoelectric effect, Self-monitoring, Carbon fiber

1. はじめに

日本国内における鉄筋コンクリート (RC) 構造物の使用開始から 100 年あまりが経過し、今後歴史的 RC 構造物の維持管理の需要が高まると考えられる。歴史的構造物の維持管理の際に構造材料の機械的性質に関する情報が必要になる場合があり、一般的な RC 構造物の機械的性質の測定にはコア採取による破壊検査が採用されている。しかし、破壊試験を使用する場合構造体に損傷を与えまた維持管理に要するコスト (人件費や時間など) が増大するなどの課題がある。

これに対し、RC 構造物を対象とした非破壊検査としてコンクリートの圧電効果によるセルフモニタリングが検討されている¹⁾。圧電効果とは、材料が外力により変形する際に材料中の電荷が移動することで発電する現象である。従って、対象の電気的指標を測定すると、材料の力学特性が推定できると考えられる。

松下ら²⁾によると、セメント硬化体の圧電メカニズムは界面動電現象、微小破壊に伴う摩擦電気と内部圧電体の圧電現象など三つの現象により説明されることから、骨材とセメントなどの複合材料であるコンクリートはそれぞれの材料の圧電挙動が複雑になると考えられる。また、セメントは低導電性であり、コンクリート内の電荷が移動しにくいいため、圧電効果による圧電性が劣る。そして、既往研究において導電性が高い炭素繊維をコンクリートに混和することで、コンクリートの圧電性を増幅できることが明らかにされている³⁾。しかし、圧電性に対する水の影響と、炭素繊維によるコンクリートの圧電性増幅のメカニズムに関する検討が不足している。

よって、本研究では、高導電率の炭素繊維を混和したセメントペーストの含水状態および W/C が圧電性に及ぼす影響とそのメカニズムから、炭素繊維がセメント系材料の圧電性に及ぼす影響を検討する。

2. 実験概要

表 1 に実験計画を示し、表 2 は炭素繊維の物性を示す。表 3 にセメントペーストの調合を示す。また、図 1 と図 2 に測定概要と載荷（循環荷重）のモードを示す。セメントペーストは W/C を 40、50、60 (%) のものとし、それぞれの含水状態を湿潤状態 (W) および絶乾状態 (D) とした。また、炭素繊維混入量は供試体体積の 0% と 1% とした。シリカフューム (SF)、Carboxymethyl Cellulose (CMC) 剤と高性能 AE 減水剤の混和量はそれぞれセメント量に対して 15%、0.1%、0.3% とした。供試体の名称は、例えば W/C40%、湿潤試験体、炭素混入量 0% の場合、4-W-0 となる。これらのパラメータにより、圧電性に影響を及ぼすと考えられる試験体の導電率と誘電率を操作する。

図 2 のように、荷重制御は 1kN→5kN→1kN を 1 周期とし、10[kN/min] の速度で 10 回繰り返すこととした。測定項目は供試体のひずみ変化に対する電位であり、それぞれのデータはデータロガーを用いて 1 秒間隔で収集した。

表 1 実験計画

セメントペーストの条件		循環荷重実験		
含水状態	湿潤、絶乾	測定指標	回数	速度
W/C	40、50、60 (%)	電位	10 回	10 kN/min
炭素繊維含量	0、1 (v/v%)			

表 2 炭素繊維の物性

引張強度	引張弾性係数	密度	繊維径	炭素濃度	長さ
4,000 N/mm ²	240 kN/mm ²	1.8g/cm ³	7μm	>90%	1mm

表 3 セメントペーストの調合

供試体	W/C (%)	C (kg/m ³)	W (kg/m ³)	SF(C×0.15) (kg/m ³)	F (kg/m ³)	CMC(C×0.001) (kg/m ³)	AE(C×0.003) (kg/m ³)	圧縮強度 (N/mm ²)
4-W-0	40	1273	507	191	0	1.3	2.5	83
4-W-1		1247	499	187	48	1.3	2.5	113.1
4-D-0		1273	507	191	0	1.3	2.5	103.1
4-D-1		1247	499	187	48	1.3	2.5	124.5
5-W-0	50	1129	562	169	0	1.1	2.3	79.2
5-W-1		1118	559	168	48	1.1	2.3	73.4
5-D-0		1129	562	169	0	1.1	2.3	96.4
5-D-1		1118	559	168	48	1.1	2.3	79
6-W-0	60	1015	607	152	0	1	2	48.2
6-W-1		1004	603	151	48	1	2	64.9
6-D-0		1015	607	152	0	1	2	70.8
6-D-1		1004	603	151	48	1	2	74.8

※C：セメント(密度 2.8g/cm³)、SF:シリカフューム(密度 2.2g/cm³)、CMC：Carboxymethyl Cellulose

AE：High-performance AE water reducing agent、F：Carbon Fiber、供試体の記号：W/C-含水状態-炭素繊維含量

実験に用いたセメントペースト供試体は $\Phi 5 \times 10 \text{cm}$ の円柱である。セメントペーストは、5L のモルタルミキサーを用いて練り混ぜた。まず、セメントおよび SF、CMC 剤の 60 秒間空練りを行った。ここで、SF はセメントペーストの空隙率低減、CMC 剤はその粘性から炭素繊維をセメントペーストに分散したまま固定して供試体の電氣的指標を安定させる目的で使用した。炭素繊維は別途用意した水に入れガラス棒で 60 秒間かき混ぜて分散させ、これを練混ぜ水とした。その後、モルタルミキサーに水を投入し 60 秒間練り混ぜて供試体を作製した。湿潤状態 (W) の供試体は 42 日間水中養生を行い、絶乾状態 (D) の供試体は 28 日水中養生した後 50°C の乾燥炉で供試体が恒量に達するまで（ここでは 14 日）乾燥させた。

電圧の測定には図 1 のように供試体の両面に $\Phi 10 \text{mm}$ の導線を貼り付けた銅板を用いた。また、供試体以外からの導電を防ぐため、絶縁板を銅板と加圧板の間に挟んだ。供試体の載荷方向にひずみゲージを貼り付けて載荷によるひずみ変化および電位変化を測定した。

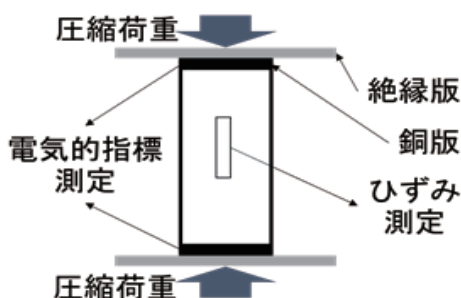


図 1 測定概要

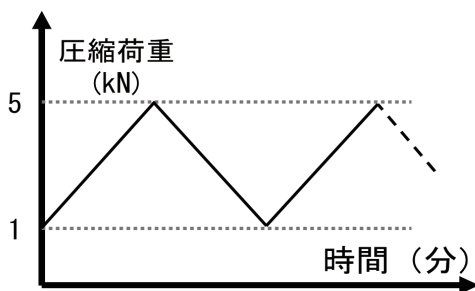


図 2 循環荷重実験モード

3. 実験結果と考察

(1) 含水と炭素繊維による導電率の影響

図 3 に絶乾状態 (D) の電位変動を示す。本報では、載荷に相関する電位変動の周期性が明確であり最大電位と最小電位の差が大きいほど「圧電性が高い」と評価する。炭素繊維なし (CFN) の場合は W/C にかかわらず循環荷重による電位の周期性が見られなかった。これは、セメントペーストの空隙中に水分がなく電荷の移動ができなくなったためと考えられる。これに対し、炭素繊維あり (CFY) の場合、W/C40%は同調合の CFN と同様に周期性がみられなかったが、W/C50%と 60%は載荷サイクルと対応した波形がみられた。

これに関して、図 4 に六面体グラファイト層構造を示す。炭素繊維は蜂巢状に炭素原子 (C) の配列した広い平面 (グラファイト層) が 1 枚おきに規則正しく積み重なったものである。各 C には 4 つの電子が存在し、C と C 間の結合は σ 結合による一重結合である。六面体グラファイトの各 C の σ 結合は 3 つであるため、 π 電子が生じる。グラファイト層間の C と C の間の結合は二重結合で、層間に存在する π 電子が炭素繊維に導電性を与える⁴⁾。このような π 電子の移動の容易性が、載荷に伴う圧電効果の発現に影響したと考える。

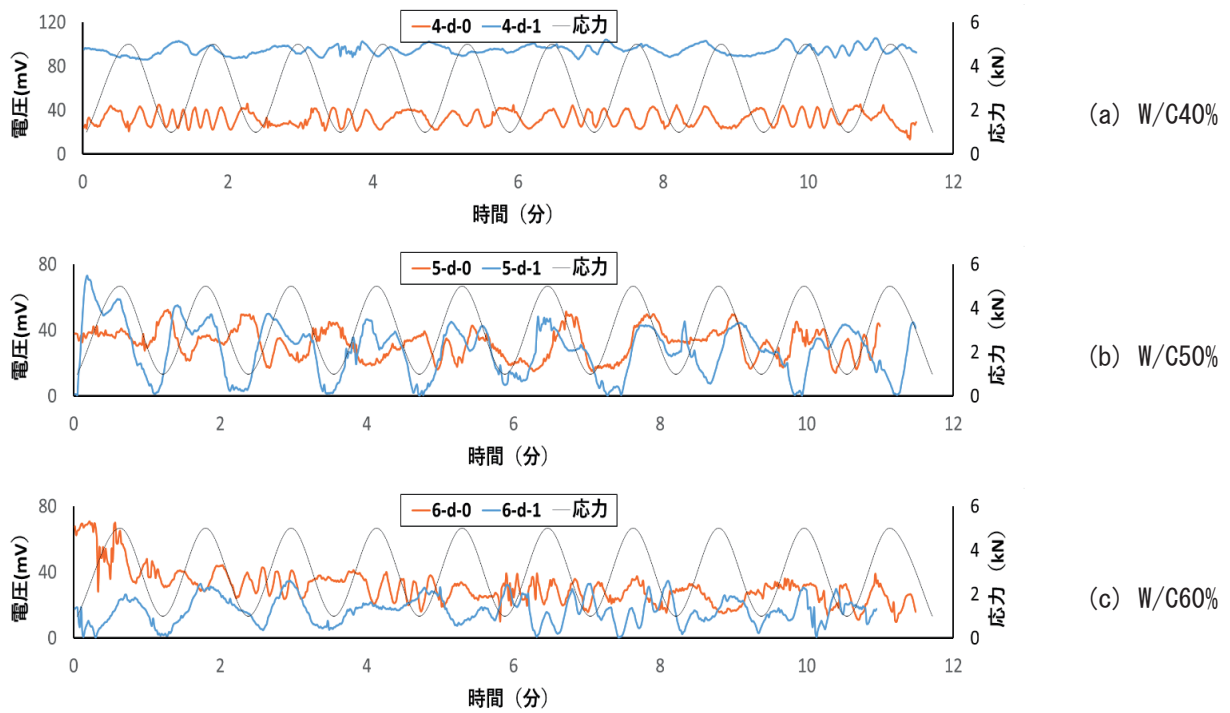


図3 絶乾状態の電位変動

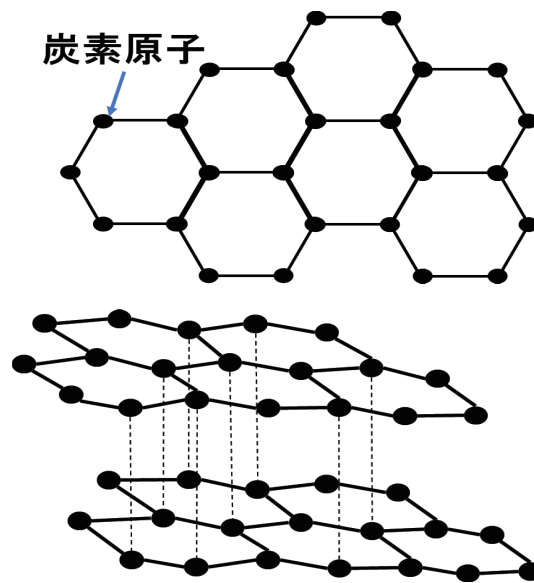


図4 六面体グラファイト層構造³⁾

図5に湿潤状態(W)の電位変動を示す。湿潤状態の電位は、循環荷重のサイクルとともに規則的な波形が現れた。表4に湿潤状態の循環荷重による電位差を示す。電位差は各波形電位の最大電位と最小電位である。表に示すように、湿潤状態の場合、すべてのCFYが同調合のCFNより電位差が約2倍大きくなっている。これは、炭素繊維の優れた導電性および細長い形状(直径 $7\mu\text{m}$ 、長さ $1000\mu\text{m}$ ：アスペクト比：約143)による試験体内の電荷移動経路の形成により分極量が増大し、電位差が増加したためと考える。

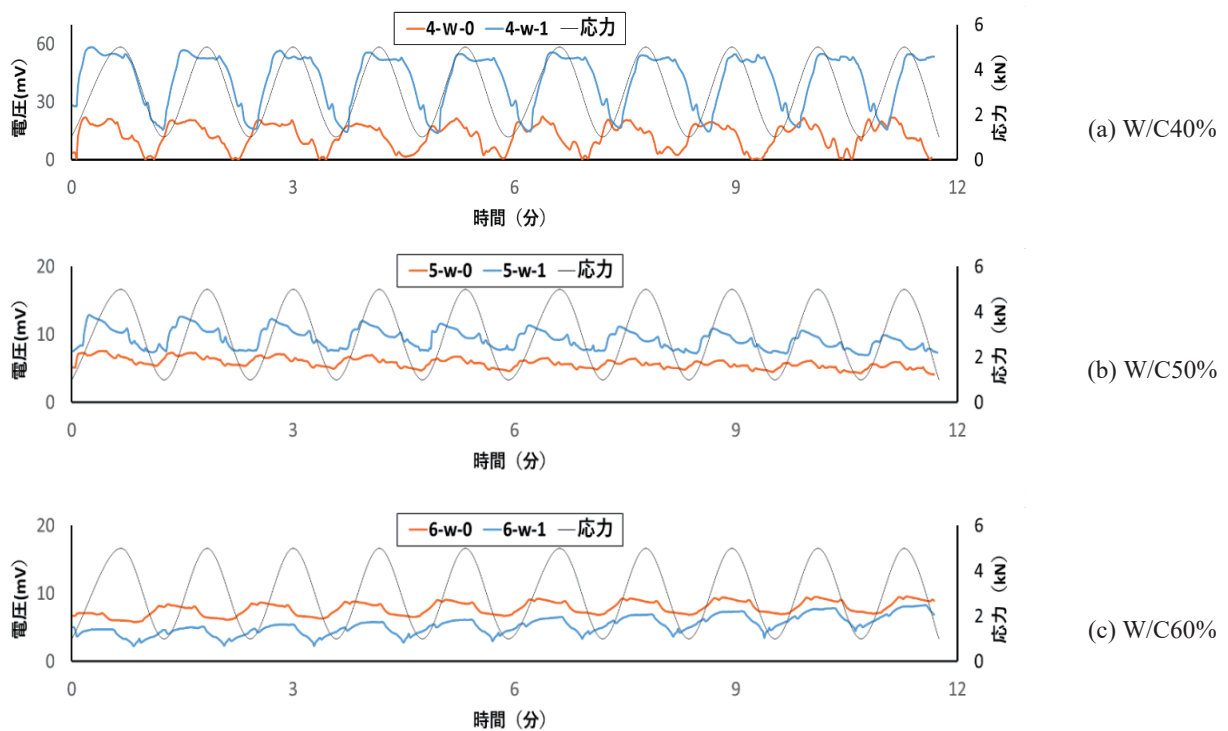


図 5 湿潤状態の電位変動

表 4 循環荷重実験による電位差 (mV)

W/C	CFY	CFN
40%	40±2	20±1
50%	4±0.5	2±0.3
60%	3.5±0.2	2±0.3

※各波形の最大値と最小値の差

(2) 水セメント比による誘電率の影響

循環荷重による電位差は、炭素繊維の有無にかかわらず W/C50%と 60%は 2~4mV であったが、W/C40%の場合は 20~40mV で約 10 倍大きかった。これについて、ここでは圧電電位定数 g と供試体の比誘電率 ϵ_r を用いて検討する。式(1)に示すように圧電電位定数 g は電気変位ゼロの状態単位応力 X を与えた時に生じる電界の強さ E に比例する。つまり、応力が一定の場合、 g が大きいほど載荷時の電位変動が大きくなる。

式(2)について、圧電歪定数 d は応力ゼロの状態単位電界を与えた時に生じる歪に比例し、 g は誘電率 ϵ に反比例する。つまり ϵ が大きいほど、 g は小さくなる。誘電率 ϵ は、極板間に詰められた物質の誘電分極のしやすさを表し、比誘電率 ϵ_r は、物質の誘電率 ϵ と真空の誘電率 ϵ_0 の比である⁵⁾。誘電率と比誘電率は各物質の固有な物性である。

式(3)について、 ϵ が大きいほど ϵ_r は大きくなる。水の比誘電率は 80、コンクリートの比誘電率が 6~8 である。ここでは、モルタルの比誘電率はコンクリートの比誘電率にほぼ同じ⁶⁾と考える。W/C40%の場合、W/C60%に比べてセメントペーストの空隙率が低くなり体積当たりの含水量も低くなる。水の比誘電率はコンクリートより約 10 倍高いため、同体積の供試体全体の誘電率は W/C60%に比べて W/C40%のほうが低くなると考えられる。以上より、誘電率が低いほうが g は大きくなるため電位変動が大きくなったと考えられる。ただし、W/C40%の電位差が W/C50%と 60%の 10 倍になった原因については空隙率などに関する定量的な検討の必要がある。

$$E = gX \quad (1)$$

$$g = \frac{d}{\varepsilon} \quad (2)$$

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \quad (3)$$

ここで、X：単位応力、E：電界、g：圧電電位定数、d：圧電歪定数
 ε_r ：比誘電率、 ε ：物質の誘電率、 ε_0 ：真空の誘電率

4. まとめ

炭素繊維を混和材としたセメントペーストの圧電性向上について検討を行い、以下の成果を得た。

- 1) 炭素繊維を混入することにより電荷の移動性が向上し、供試体の圧電性が向上する。
- 2) 含水状態は電荷の移動性と供試体の誘電率の両面から圧電特性に影響する。
- 3) W/C が 40% の時供試体は良い圧電性を示すが、誘電率の定量化を含めてさらに研究が必要である。

謝辞：本研究は、服部報公会と稲盛財団の助成を受けて実施されました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) Sun Mingqing, Li Zhuoqiu, Mao Qizhao, Shen Darong: A Study on Thermal Self-monitoring of Carbon Fiber Reinforced Concrete, *Cement and Concrete Research*, Vol.29, pp.769-771, 1999.
- 2) 松下哲郎・兼松学・丸山一平・野口貴文：セメント硬化体の応力载荷による電氣的性質の変化に関する研究, *日本建築学会大会学術講演梗概集*, pp.447-448, 2005.08.
- 3) D.D.L. Chung : Self-monitoring structural materials, *Materials Science and Engineering*, Vol.22, pp.57-77, 1998.
- 4) 大谷杉郎：炭素繊維, *高分子化学*, Vol.22, pp.374-378, 1966.
- 5) 高橋弘文：はじめての圧電素子の選び方, *日本音響学会誌*, Vol.72, pp.244-249, 2016.
- 6) 野田一弘・河野広隆・久田真・森濱和正：交流作用時の硬化コンクリートの電氣的性質に関する基礎的研究, *コンクリート工学年次論文集*, Vol.25, No.1, pp.575-580, 2003.