

# 骨材-セメントペースト間の 界面破壊と圧電効果の相関に関する研究

立命館大学 准教授 福山智子

## 概要：

骨材とセメントペーストの界面(遷移帯)はコンクリートの他の箇所(セメントマトリクスや骨材自体)に比べて強度が低く、ひび割れの起点となりうるということが知られている。福山らは、コンクリートの破壊の前兆を検出するため、载荷に伴う発電現象(電流・電圧の変動)に基づく非破壊検査手法の確立を目指して検討を行っている。今回の検討では、特に载荷による材料間の摩擦に着目し、セメントペーストと石材との界面における帯電現象について、石材の形状などをパラメータとして繰り返し载荷と電圧測定を行った。

その結果、セメントペーストのひび割れ発生方向と载荷方向が一致している場合とそうでない場合で電圧波形に差異が生じ、波形の分析・分類によりセメントペースト中やセメントペースト/石材界面など異なる箇所でも発生する破壊を判別できる可能性があること、セメントペーストの破壊を伴わない石材界面のせん断により摩擦帯電が生じてひずみの周期性に依存しない電圧波形が得られることが明らかになった。

キーワード: 骨材界面, 遷移帯, ひび割れ, ひずみ, 電圧

## 1. はじめに

現在日本で供用されている社会インフラなどの鉄筋コンクリート(RC)構造物は、1970年代の高度経済成長期に建設されたものが多い。RC構造物の耐用年数は50年程度であるとされていることから、RC構造物の老朽化は深刻な課題といえる。

この課題に対し、コンクリートの劣化・損傷を萌芽期に把握して適切に維持管理する必要があるが、非破壊での診断は難しく、効率的に内部診断できる手法が必要である。

福山らのグループは载荷に伴う発電現象(電流・電圧の変動)に基づき、コンクリート自体を破壊に関するセンサとして用いる非破壊検査手法確立のため検討を継続している。今回の検討では、特に载荷による材料の摩擦・破壊に着目し、セメントペーストと石材との界面における帯電現象について実験を行った。

## 2. 実験概要

### (1) 試験体概要

図1は試験体概要、表1は試験体に使用したセメントペースト(CP)の調合を示したものである。CP試験体は直径100mm×高さ200mmとし、シリーズ2と3では内部に石材(それぞれ直径20mm×高さ100mmの円柱

と20mm×20mm×100mmの四角柱)を埋設した。

石材を埋設した試験体では圧縮した際にセメントペーストと石材の界面でせん断を発生させるため、石材の上部にスタイロフォームを設置して打設し空洞を模擬した。

シリーズ1とその他シリーズとの比較で石材の有無の影響、シリーズ2と3との比較で石材の形状やCP部のひび割れ・破壊が電圧変動に及ぼす影響を確認した。

### (2) 測定概要

図2は測定概要について示したものである。導線を銅テープで貼付した銅板電極を試験体上下に、銅板と万能試験機の間には絶縁板を設置した。ひずみゲージは下から50mm(石材)、100mm(石材/スタイロフォーム界面)150mm(スタイロフォーム)の位置に貼付した。

表2は载荷条件を示したものである。事前に測定した終局荷重に基づきサイクル1(終局荷重の30%:骨材界面にひび割れ発生<sup>1)</sup>)、サイクル2(50%:CP部分にひび割れが伝播<sup>1)</sup>)、サイクル3(80%:急速な伝播によりひび割れが連続的になる<sup>1)</sup>)を設定し、同一試験体に対し各サイクル6回の繰り返し载荷を行った。

同時に電圧とひずみをそれぞれ周期1秒で測定した。例えば、シリーズ1はサイクル1の条件(最小荷重10kN, 最大荷重172.2kN, 载荷速度1.5kN/sec)で6回载荷した後、サイクル2で最大荷重を287.2kNに変更し6回载荷し、その後サイクル3で载荷を行う。

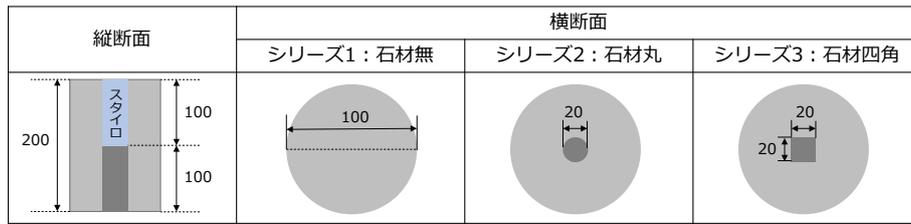


図1 試験体概要 [mm]

表1 セメントペーストの調合

W/C	単位質量(kg/m <sup>3</sup> )	
	W	C
25	439.78	1759.10

C : セメント 3.14g/cm<sup>3</sup>

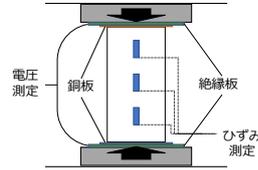


図2 測定概要

表2 荷荷条件

試験体形状	荷重[kN] (応力[N/mm <sup>2</sup> ]) × サイクル数	
	最小	最大
シリーズ1 石材無	10 (1.3)	サイクル1 : 172.2 (21.9) × 6
		サイクル2 : 287.2 (36.6) × 6
		サイクル3 : 460.2 (58.6) → 373.2 (47.5) × 6
シリーズ2 石材丸	10 (1.3)	サイクル1 : 145.2 (18.5) × 6
		サイクル2 : 241.2 (30.7) × 6
		サイクル3 : 386.2 (49.2) → 314.2 (40.0) × 6
シリーズ3 石材四角	10 (1.3)	サイクル1 : 107.2 (13.7) × 6
		サイクル2 : 178.2 (22.7) × 6
		サイクル3 : 284.2 (36.2) × 6

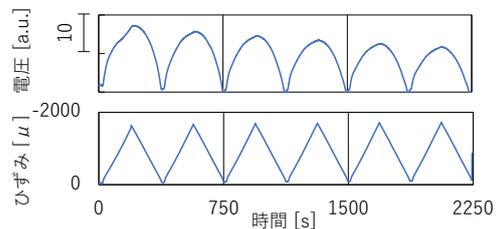


図3 ひずみに伴う電圧変動 (石材四角, サイクル3)

本実験は試験体を終局破壊することを目的としておらず、一部試験体がサイクル3で割れることがあったため、適宜サイクル3の最大荷重を小さくして実験を行った。サイクルを変更するごとに試験体を観察し、界面やセメントペースト部のひび割れの様子を記録した。

### 3. 測定結果と電圧波形の模式化

図3は周期的荷荷に伴う電圧変動の例 (石材四角, サイクル3) を示したものである。圧縮ひずみ (以下, ひずみ) 増大方向を縦軸正とし, CP部のひずみを示す。

図4は, 図3のような測定結果からひずみと電圧の波形を2周期分取り出したもので, 濃いグレーはひずみ増大, 薄いグレーは減少を示している。電圧の波形に注目しているため, 縦軸の目盛は統一しない。

また, 図5は図4の傾向を模式化したものである。シリーズ1 (図4(a)) では, ひずみ増加初期は電圧が若干増加 (a1), さらにひずみが増大すると電圧が減少 (a2) し, ひずみが減少に転じると電圧が回復するが (a3), ひずみが0に近づいたときに再度電圧が減少 (a4) と模式化した。シリーズ2 (図4(b)) はひずみに対して電圧の相関が見られなかった (b1, b2)。シリーズ3 (図4(c)) はひずみの増減と電圧の増減がおおむね一致した (c1, c2)。

### 4. 測定系内の電荷挙動に関する考察

本報告における実験では, CP内部や石材とCPとの界面にひび割れ・摩擦を生じさせることを意図している。電氣的観点から破壊・摩擦界面を見ると, 破碎により新生した界面や摩擦面での電荷形成が考えられ, これが電圧変動として測定できると仮定した。

筆者らのこれまでの実験的・解析的検討<sup>2)</sup>から, 荷荷したセメント系材料においては, ①ひび割れに伴う界面電荷形成と②界面が押し付けあうことによる正負電荷の再結合 (電荷消滅) の2つが同時に発生するとの仮説が得られている。以下では, ひずみ増減に伴う電圧変動の要因について, この仮説と図5に基づき考察する。

シリーズ1では, 系内に石材が存在しないためCP内に生じるひび割れの方向は一様ではなかった。ひび割れ界面増加 (=電荷形成) に伴い電圧が増加 (a1) するが, ひび割れの方向が一意ではないことからひずみが一定以上増大すると界面での再結合が卓越 (a2) したと考えられる。なお, ひずみ減少時は再結合量が減少するため電圧は一時的に増加 (a3) するが, ひずみ減少が継続するとひび割れの新生面が得られないため電圧は減少に転じる (a4)。

シリーズ2では, ひずみの方向にかかわらず石材/CPのせん断界面で摩擦が生じるため電荷生成が継続され, 電圧との間に相関が見られなかったと考えられる。

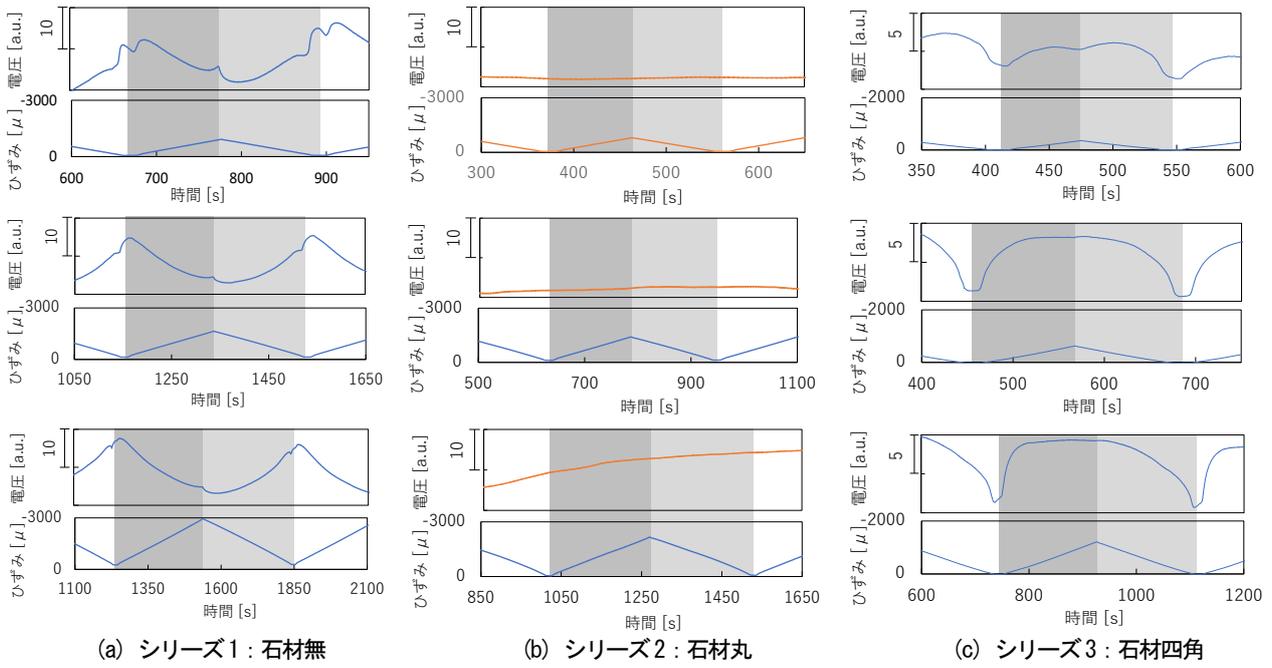


図4 ひずみと電圧変動（上：サイクル1，中：サイクル2，下：サイクル3）

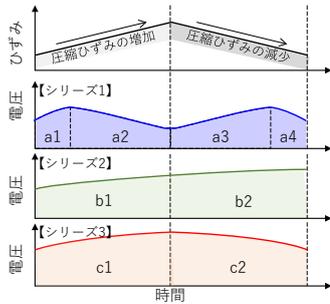


図5 電圧波形の模式化

シリーズ3では、ひび割れの多くが石材の四隅から横断面（図1）方向に放射状に発生していた。このひび割れ界面は荷重により電荷が再結合する向きではないためひずみが増加しても電圧は減少しなかった（c1）と考えられる。

## 5. まとめ

本研究により以下の仮説を得ており今後検証を要する。

- 1) 荷重方向とセメントペーストとのひび割れ発生方向の一致度により電圧波形を分類でき、波形の分析によりセメントペースト中やセメントペースト/石材界面で発生する損傷を判別できる可能性がある。
- 2) セメントペーストの破壊を伴わない石材界面のせん断では、摩擦による帯電が生じ、それに伴う電圧波形はひずみの周期性と関連しなかった。

## 参考文献

- 1) P.K.Mehta ほか：コンクリート工学，技法堂出版，1998.
- 2) 福山智子ほか：セメント系材料の荷重に伴う発電現象に対する遷移帯の影響，セメント・コンクリート論文集，76(1)，pp.229-237，2022.