論文　自己修復コンクリートの開発を目的とした発熱デバイスに関する検討

西脇　智哉[*1]・三浦　和晃[*2]・三橋　博三[*3]・奥原　芳樹[*4]

要旨：本報告では，筆者らの提案する自己修復コンクリートの，システムの根幹となる発熱デバイスについての検討を行う。その問題点と改善すべき点の整理をした上で，実際に改良を加えた発熱デバイスに関する実験と熱伝導解析を行い，コンクリートに発生するひび割れ幅と，そのひび割れ部分に発生する熱量についての定量的な関係を得た。

キーワード：自己修復機能，発熱デバイス，自己診断材料，抵抗上昇率，プリプレグ

1. はじめに

著者らはこれまで，コンクリート構造物の長寿命化を目的として，発熱デバイスを利用した自己修復コンクリートを提案し，その開発に取り組んできた。コンクリートのひび割れ発生箇所を選択的に加熱することのできる発熱デバイス（自己診断材料）と，補修剤を内包する熱可塑性の材料で構成されたパイプをコンクリート中に併せて埋設し，自己修復機能を発現させるものである。**図―１**に示す概念図のように，母材のコンクリートにひび割れが発生した場合，損傷箇所での発熱デバイスの局所的な抵抗上昇により，この部分が選択的に加熱されて埋設パイプが融解され，補修剤がひび割れ中に放出，これを充填することで自己修復が可能となる。

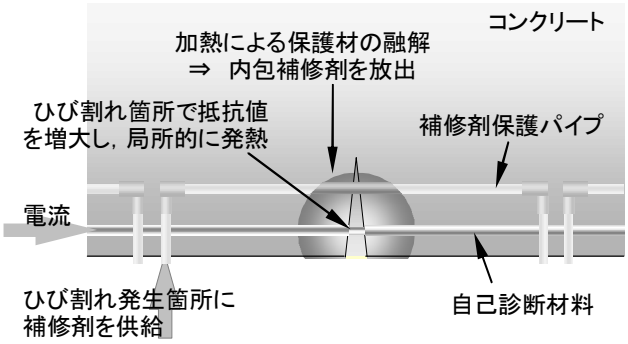
これまでの基礎的な研究により，自己修復機能付与のためのコンセプトは有効なものと確認できた[例えば 1)]。しかし，解決すべき検討課題は多く残されており，中でも特に大きな問題点の一つとして，選択的な発熱のための発熱デバイスの制御方法が挙げられる。これまで使用してきた発熱デバイスは，コンクリートに発生するひび割れの幅が一定となる場合であっても，その箇所にもたらされる抵抗の上昇率が一定とはならず，ひび割れ箇所での発熱量を制御することが困難であった。すなわち，補修が必要となるひび割れが発生した際にも，自己修復を行うために必要な発熱量を必ずしも得られない場合が考えられる。これは，コンクリートに発生するひび割れが，発熱デバイスに適切に伝達されていないことが原因と考えられる。そのため，これを改善して，ひび割れ幅と発熱の変化量との定量的な関係を把握することが必要となる。

これらのことから，本論文では，ひび割れの発熱デバイスへの伝達方法について検討し，熱伝導解析と実験によってひび割れ幅と抵抗値の定量的な関係を得ることを目的とする。

2. 自己修復コンクリートのための発熱デバイス

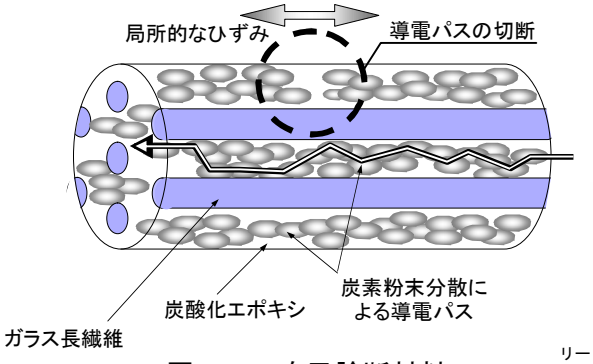
2.1 自己診断材料

ここで発熱デバイスとして使用する自己診断材料とは，**図―２**に示すように，ガラス長繊維を核として，導電体である炭素の微粒子を分散

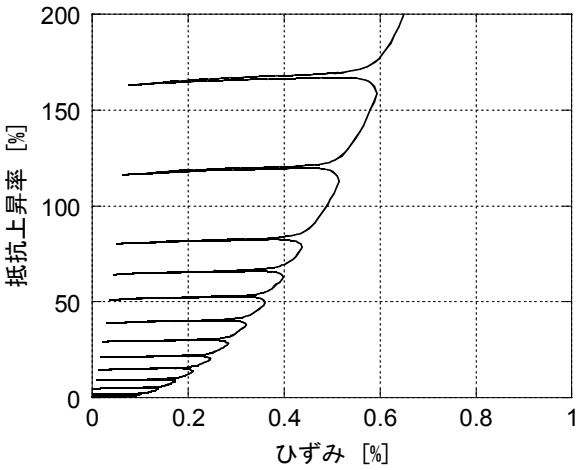


図－１　自己修復機能付与の手法

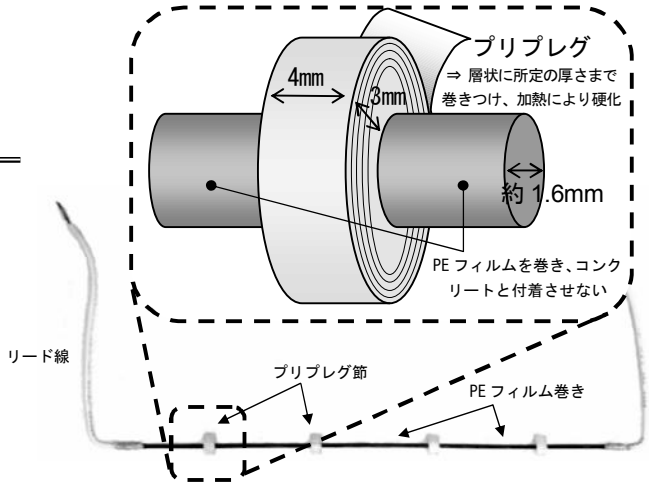
*1 山形大学　地域教育文化学部生活総合学科講師　博士（工学）　(正会員)
*2 東北大学大学院　工学研究科都市・建築学専攻博士前期課程　(会員外)
*3 東北大学大学院　工学研究科都市・建築学専攻教授　工博　(正会員)
*4 ファインセラミックスセンター　材料技術研究所　博士（工学）　(会員外)



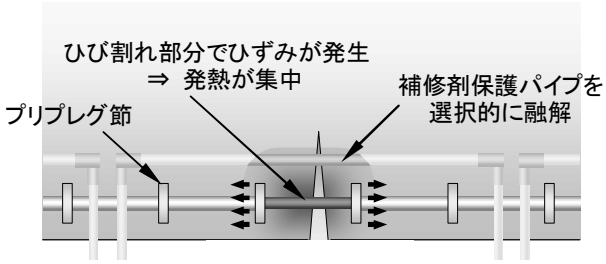
図－２　自己診断材料



図－３　ひずみと抵抗上昇率の関係 [2)]



図－４　プリプレグ節を取り付けた自己診断材料



図－５　節間の発熱

させた樹脂を含浸させて成形したものである [2)]。局所的なひずみなどの変形を受けた場合，その変形箇所で導電パスが部分的に切断され，局所的に抵抗値が増大する特徴がある。本来はこの抵抗変化を計測することで，構造物の最大ひずみを測定するためのセンサとして開発された。この自己診断材料にひずみが発生した状態で通電すると，ひずみ部分において抵抗が上昇しているために発熱が集中し，選択的な加熱を行うことができる。

図―３は，本研究で用いる自己診断材料の，ひずみと抵抗上昇率の関係を示したグラフである。この図のように，自己診断材料に発生するひずみと抵抗上昇率には強い相関が見られ，センサとしての機能を発揮することができる。しかし，コンクリート中に埋設された自己診断材料に発生するひずみは，コンクリートに発生するひび割れ幅が同じ場合であっても必ずしも同じとはならず，**図―３**の関係は，直接ひび割れ幅と抵抗上昇率の関係に書き換えることは困難である。この原因としては，コンクリートと自己診断材料のインターフェイスとなる，付着性状が必ずしも一定でなく，その定量化が困難であることが挙げられる。

2.2 自己診断材料へのひび割れ伝達

自己診断材料のコンクリートとの付着性状についての検討を行った例は見られない。また，自己診断材料自体が開発段階の材料であり，材質や形状についても，完全に決定されているものではないため，厳密な付着性状の検討を行うことは尚早であると考えられる。

そこで本研究では，自己診断材料とコンクリートの付着を切った上で，自己診断材料に異形鉄筋のような節を取り付けて，ひび割れによる変形を，機械的に伝達させることを検討する。このことを目的として，節を取り付けた自己診断材料を**図―４**に，これを用いての自己修復機能の概念図を**図―５**に示す。この図のように，発生したひび割れは，節と節の間のひずみとして自己診断材料に伝達されるために，節間距離

を適切に設定することで，ひび割れ幅と自己診断材料に生じるひずみの関係を定量的に把握することが可能となる。すなわち，ひび割れ幅に応じて抵抗上昇率や発熱量の増分を設定することが可能になるものと考えられる。

この節の取り付けには，プリプレグを用いた。これは，一方向ガラス繊維に熱硬化性のエポキシ樹脂を含浸させたシートで，常温で自由な形に積層・成形することが可能であり，加熱により硬化させることで簡易に成形品を作製することができる。ここでは**図—４**に示すように，幅4mmのプリプレグを,高さが3mmとなるまで自己診断材料に巻きつけた状態で加熱し硬化させた。自己診断材料は多孔体の材料であるため，高温下で粘度の低下したエポキシ樹脂は自己診断材料の内部にも含浸する。この状態での硬化により，自己診断材料とプリプレグによる節は強固に取り付けられるものと考えられる。

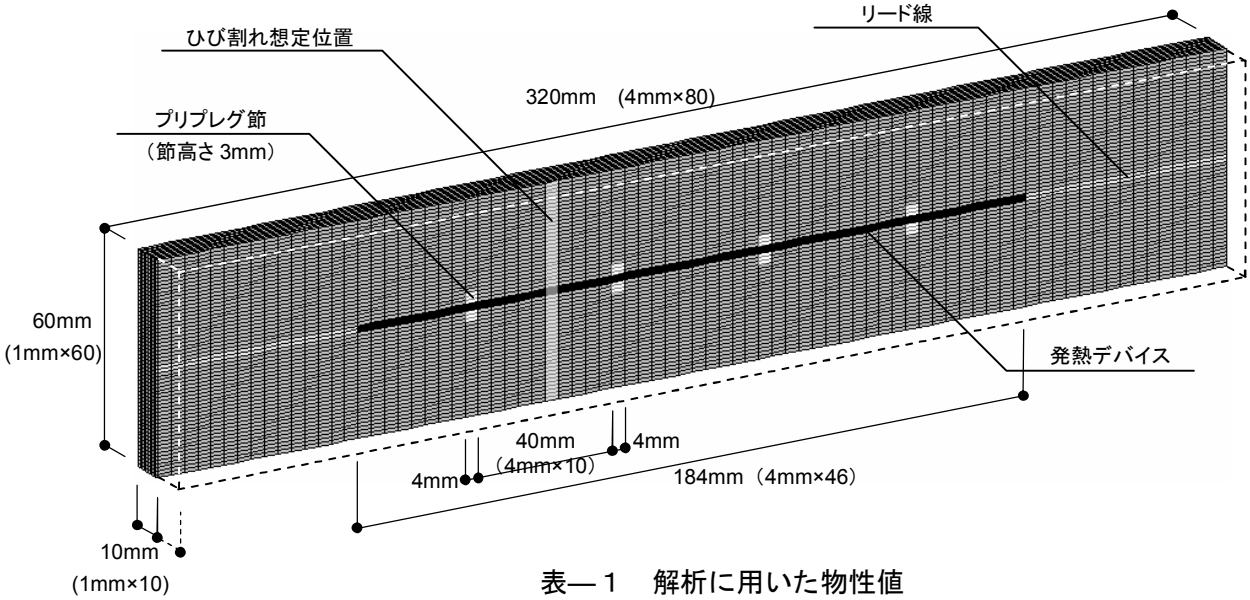
3. 解析による検討

実験に先立って熱伝導解析を行い，節間のひずみとして抵抗が上昇する場合であっても，近傍の補修剤保護パイプの選択的な融解が可能であることを確認する。

3.1 解析概要

解析には非線形有限要素解析プログラム(MSC. Marc)を用いた。解析モデルは，実験による確認を行うことを前提として，長さ320mm，幅60mm，厚さ20mm（対称条件より厚さ10mmについてのみモデル化）の薄片状として解析を行った。このモデルおよびモデル内部での各要素の配置状態を**図－６**に，使用した物性値を**表－１**に示す。

解析に使用した境界条件を**表－２**に示す。発熱量は，表中に発熱条件として示す電圧および抵抗値から計算される全体の発熱量を，発熱デバイス要素の体積で除して求めている。また，ひび割れにより抵抗が上昇した場合の発熱量は，



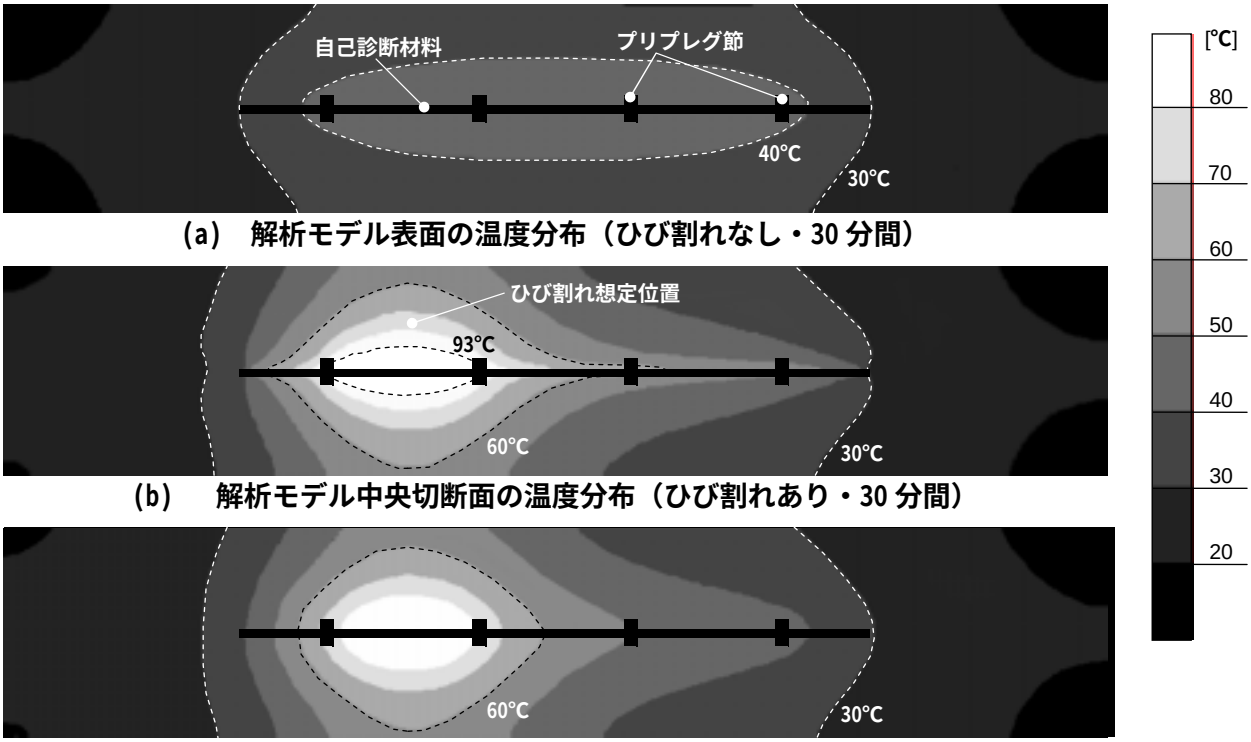
図－６　解析モデル

表—１　解析に用いた物性値

要素	熱伝導率 [W/mK]	比熱 [J/kgK]	密度 [kg/m^3]
モルタル	1.09	1153	2000
自己診断材料	1.2	750	2020
プリプレグ節	0.42	795	1700
リード線	398	380	8960

表－２　解析条件

発熱条件	発熱量(一般部)	発熱量(ひび割れ)	熱伝達(上面)	熱伝達(下面)	熱伝達(側面)
1:載荷試験前(健全) 398Ω, 67.8V	0.0157 W/mm^3	0.0157W/mm^3	14.0×10^{-6} W/mm^{2}K	8.90×10^{-6} W/mm^{2}K	12.1×10^{-6} W/mm^{2}K
2:載荷試験後(ひび割れ) 518Ω, 88.3V		0.0375W/mm^3			



(a)　解析モデル表面の温度分布（ひび割れなし・30 分間）

(b)　解析モデル中央切断面の温度分布（ひび割れあり・30 分間）

(c)　解析モデル中央切断面の温度分布（ひび割れあり・30 分間）

図－７　解析から得られた温度分布

ひび割れが含まれる節間の自己診断材料要素に対して与えている。初期条件として室温である18℃を全要素に対して与え，５分ごとの温度分布の変化について，通電開始から 30 分間に亘って解析を行った。

3.2 解析結果

図－７に解析によって得られた供試体表面の温度分布を示す。**図－７(a)**はひび割れの発生していない場合の，通電開始から 30 分後の温度分布である。このとき，自己診断材料自体の温度は約 61℃に留まり，補修剤保護パイプに，これまで検討してきた EVA フィルム [1]（融点 93℃）を用いる場合は，自己診断材料の極近傍に設置した場合でも融解することはないことが分かる。

図－７(b)および**(c)**は，ひび割れの発生により自己診断材料の抵抗値が 30.5%上昇（節間では 145.9%の上昇）した場合の，通電開始から 30 分後のモデル表面および自己診断材料を含むモデル中央切断面での温度分布である。これらの図からは，ひび割れを含んだ節間において発熱が集中していることが分かる。このときのひび割れ箇所における自己診断材料自体の温度は約 140.5℃にまで達しており，自己診断材料から約 8mm 離れた部分まで 93℃に到達しており，選択的に融解させることができるものと考えられる。発熱条件などを変更しながら解析を繰り返すことで，より適切な発熱デバイスの発熱量や，補修剤保護パイプとの位置関係などを設定することが可能になるものと期待される。

4. 実験による検討

ここでは，解析モデルと同様の供試体を作製し，通電による加熱と引張載荷試験を行う。載荷試験によるひび割れを，節間のひずみとして自己診断材料に伝達させることが可能であることと，この抵抗上昇によって選択的な発熱が解析と同様に生じることを確認する。

4.1 実験概要

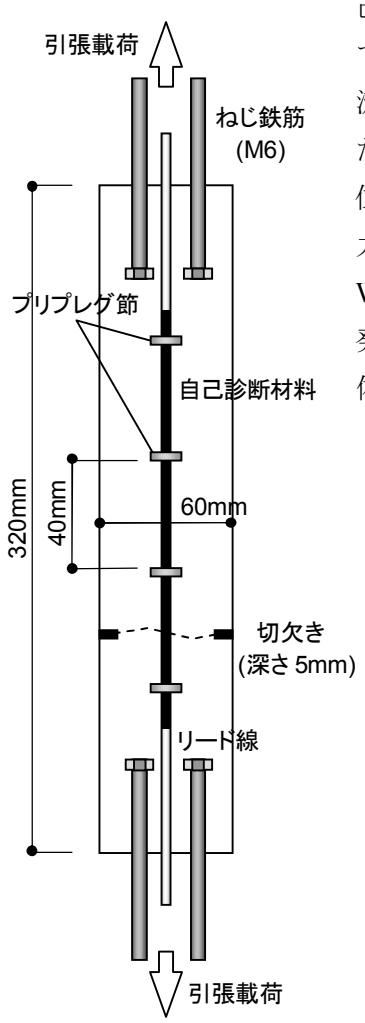
供試体の形状と載荷方法を**図－８**に示す。解析モデルに倣って幅 60mm，長さ 320mm，厚さ 20mm の直方体とし，深さ 5mm の切欠きを設けてひび割れの発生箇所を限定した。供試体には水セメント比を 45%，砂：セメントの比を 2:1 とした調合のモルタルを用いる。セメントに早

強ポルトランドセメント（密度 3140kg/m^3）を，細骨材は川砂（密度 2470kg/m^3）を用いた。

載荷に先立って，ひび割れが発生していない状態で通電を行い，サーモグラフィ観察により供試体表面の温度分布を得た。続いて載荷試験によって切欠き位置にひび割れを発生させる。載荷にはインストロン型万能試験機を用いて変位制御にて行った。供試体の両端に埋設されたねじ鉄筋（M6）を介して，直接引張によってひび割れを発生させ，ひび割れ幅と自己診断材料の抵抗値を計測しながら，所定の抵抗上昇率が得られるまで載荷を行った。その後，ひび割れが発生した状態で再度通電を行い，ひび割れ箇所を選択的に加熱可能であることを確認した。

4.2 健全な自己診断材料への通電加熱

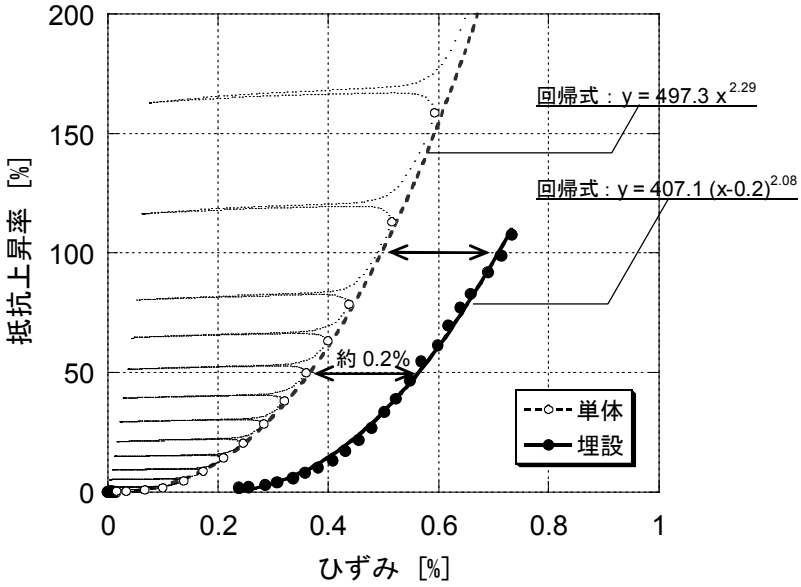
供試体にひび割れが発生していない状態での通電は，解析条件に沿って 398Ωの抵抗を持つ自己診断材料に対して 67.8V の交流電流を30分間印加した。このときの単位体積当たりの電力換算は 0.031 W/mm^3 であるが，発熱デバイスの総体積での発熱量が解析条件と一致する。通電開始から 30 分後の供試体表面の温度分布を**図—１０(a)**に示す。この図からは，ひび割れの発生しない状態では，自己診断材料は概ね一様に発熱し，**図—７(a)**の解析結果とは最高温度や温度の分布範囲など比較的よく一致している。このことから，解析は妥当なものであったと考えられる。



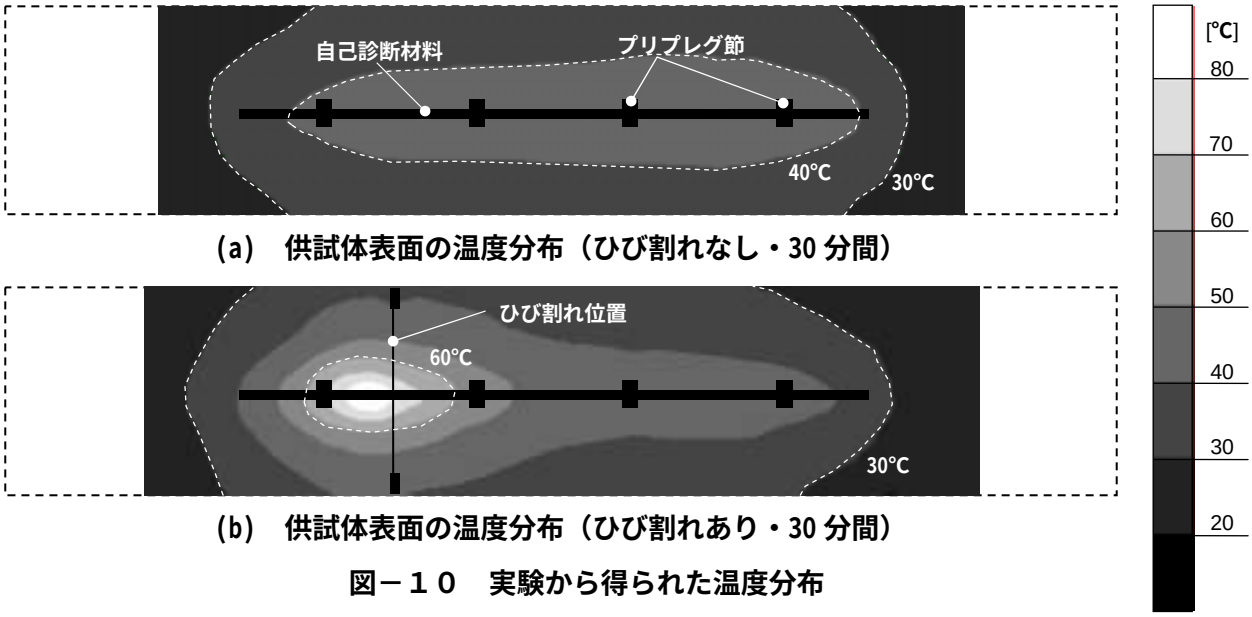
図－８　供試体の形状

4.3 ひび割れの発生と抵抗上昇

図—９は，引張載荷試験の際の自己診断材料に発生するひずみと抵抗上昇率の関係を示したグラフである。この抵抗上昇率にはひび割れの発生した節間内での値を，ひずみには切欠き部分で測定したひび割れ幅を節間の距離（40mm）で除して換算した値を用いている。また図中の破線は，**図—４**に示した自己診断材料に直接ひずみを発生させた場合のひずみと抵抗上昇率の関係を示す回帰曲線である。この図からは，モルタル中に埋設された自己診断材料は，換算によって得られたひずみが約 0.2%（計測ひび割れ幅で 0.08mm）程度に達するまで抵抗上昇が殆ど確認できないものの，その後はひび割れ幅の進展に伴って抵抗が上昇し，このときの傾きは自己診断材料に直接ひずみを与えた場合と概ね一致していることが分かる。このことは，供試体表面で計測されるひび割れ幅と，供試体中央に埋設された自己診断材料に発生しているひずみ



図－９　ひずみと抵抗値の関係



(a)　供試体表面の温度分布（ひび割れなし・30 分間）

(b)　供試体表面の温度分布（ひび割れあり・30 分間）

図－１０　実験から得られた温度分布

には若干の差が生じていると考えられるものの，それ以降のひび割れ幅の拡大については，取り付けられた節は破壊や剥離することなく，的確に自己診断材料へひずみとして伝達され，ひび割れ箇所での選択的な抵抗上昇を生じさせることが可能であったといえる。

4.4 ひび割れ後の自己診断材料への通電加熱

載荷によって生じたひび割れ幅は最大で約 0.21mm まで進展し，抵抗値は 517.9Ω（ひびわれを含む節間の約 145.9%）まで増大した。この供試体に対して 88.3V の交流電流を印加する。この印加電力は，自己診断材料の健全な部位で 0.031W/mm^3，ひび割れ部分で 0.075W/mm^3 程度の単位体積当たりの発熱量に相当すると考えられ，健全部とひび割れ部それぞれの総体積での発熱量が**表－２**に示した解析に用いた発熱条件と同様となるように設定した。通電開始から 30 分経過後の温度分布を**図―10(b)**に示す。ここで得られた温度分布は，解析より得られた**図－５(a)**と比較して，全体に温度が若干低くなっているものの。分布形状は近く，ひび割れの発生している節間に対して選択的な加熱が可能であることが確認できる。

5. まとめ

本研究では，自己修復コンクリートを検討する上で不可欠な要素となる発熱デバイスについて，ひび割れの伝達方法やひび割れ幅と抵抗上昇率の関係を検討した。自己診断材料にプリプレグによる節を取り付けることで，コンクリートに発生するひび割れは機械的に伝達され，ひび割れ幅による自己診断材料の抵抗上昇率の制御を行うことが可能になった。

今後は，ここで行った加熱と温度の適切な制御の他に，プレキャスト化などによる実構造物への適用方法や施工方法の改善など，実用化を念頭に置いた検討を行う必要がある。

謝辞

本研究は，平成 17 年度科学研究費補助金(萌芽研究，課題番号：17656172）の一部として実施された。また，発熱デバイスの開発には，(財)ファインセラミックスセンター・材料技術研究所の松原秀彰主幹研究員の貴重なご助言を戴いた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

1) 西脇智哉ほか：コンクリートに対する遮水性能の自己修復機能付与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.27，No.1，pp.1579-1584，2005.6
2) Okuhara, Y. and Matsubara, H.: Maximum/cumulative strain sensors based on fiber-reinforced composites including conductive particles, Intl. conf. on Composites/Nano Engineering (ICCE-12), 2005.8