CFRP 貼付補強コンクリートのインテリジェント化のための センサ・アクチュエータに関する研究[†]

座古 勝^{*} 高野 直樹^{*} 藤岡 英典^{**}

On Sensor and Actuator for Intelligent Structure of Concrete Reinforced by CFRP

by

Masaru ZAKO^{*}, Naoki TAKANO^{*} and Hidenori FUJIOKA^{**}

When CFRP lamina is applied for the reinforcement of concrete structures, the lamina has a possibility to delaminate from the surface of concrete. The delamination must be detected and be repaired as soon as possible for the reliability of structures. In pursuit of this, an intelligent structure was proposed in this paper. Both sensor and actuator are required to detect and to repair the delamination, respectively. As the intelligent structure, optical fiber was used to detect the delamination of CFRP as a sensor. Epoxy resin adhesive in a capsule was used to repair the delamination as an actuator.

In the first paper, characteristics of both sensor and actuator were investigated. The brightness of transmitted light in the optical fiber was decreased at bended point caused by delamination of CFRP. On the other hand, the cap-suled epoxy resin has been spreaded widely into delaminated interface. As a result, it was recognized that the proposed sensor and actuator can be used to detect and repair the delamination of CFRP.

Key words : Intelligent structure, Optical fiber sensor, Actuator, CFRP, Epoxy

1 緒 言

コンクリート構造物は、設計・仕様材料および施工が十分であれば耐久性に優れていて半永久的に使用できるとされており、現に半世紀以上を経た構造物でも異常なく使用に耐えているものも多い。その反面、建設後各種の自然力および人為的作用力を受けて損傷が発生する場合もしばしばある。設計・施工・外的などの要因により種々の損傷が顕在化すると、構造物としての安全性・耐久性・機能性が損なわれる。このような構造物でも損傷が軽微であれば補強して使用することも可能である。また、設計基準の変更により現存するコンクリート構造物を補強することもある。

近年、海洋環境などの塩害が問題となるような地域のコンクリート構造物、並びに耐震性向上を必要とする構造物の補強材として FRP の需要が増加している。FRP は鋼材に比べて高比強度、軽量、柔軟性、耐腐食性など種々の特徴を有するため、コンクリート構造物の補強材として適当な材料の一つである。¹⁾

FRP 貼付補強コンクリートにおける代表的な損傷形態に FRP のはく離がある。1995 年 10 月、山陽新幹線六甲トンネル内において兵庫県南部地震により被害を受けた部分の補強 FRP シートのはく離により新幹線が一時不通となった例が報告されている。はく離が発生すると補強効果が低下し、構造物の信頼性に重要な影響を及ぼすの

で、はく離の早期発見・早期対応することが重要である。構造物中のき裂やその他の損傷の発生・進展を監視する方法としては、AE 法やひずみゲージによるモニタリングなどがあるが、大型構造物を随時監視するためにはセンサ数、費用など問題が多い。このため構造物の保守は目視による観察に頼っているのが現状である。しかし、目視確認するのは困難かつ多大な労力を必要とする場所も少なくない。そこで、重要な構造物では損傷の発生・程度を常時監視し、損傷が発見された場合にはそれに対処すること、すなわち構造物のインテリジェント化が考えられる。

インテリジェント化の目標は、構造物に感知機能および知能を持たせること、すなわち情報を感知、収集(センサ)し、その現象に対応し操作(コントロール)する機能(アクチュエータ)を構造物自身に付与することである。²⁾ 本研究では、Fig. 1 に示すような CFRP 貼付補強コンクリートに対し光ファイバを用いることによりはく離をモニタリングし、予め埋設されたアクチュエータにより自動的にはく離を補修するインテリジェント構造物を試作し、その機能確認の実験を行うものである。第一報では構造物のインテリジェント化においてヘルスマニタリングを担う光ファイバ、およびはく離を補修するアクチュエータの特性を調査した結果について記述する。

[†] 原稿受理 平成 10 年 1 月 27 日 Received Jan. 27, 1998

^{*} 正 会 員 大阪大学大学院工学研究科生産科学専攻 〒565-0871 吹田市山田丘, Dept. of Manufacturing Science, Osaka Univ., Yamada-oka, Suita, 565-0871

^{**} 大阪大学大学院 〒565-0871 吹田市山田丘, Graduate Student, Osaka Univ., Yamada-oka, Suita, 565-0871

Fig. 1. Scheme of an intelligent structure of concrete reinforced by CFRP.

2 センサ部

2・1 光ファイバセンサ

本研究ではモニタリングセンサとして光ファイバを用いた。その理由は、構造物への貼付け、埋込みが容易であり、信号伝送経路として用いることができることによる。³⁾ 本研究ではマルチモード GI (分布屈折率型) ファイバを使用した。光ファイバの一端から He-Ne レーザを入射し、他端からの出射光をフォトダイオードで計測する。このとき、光ファイバに変形が生じれば透過光量が減少する。本研究に用いた光ファイバ (フジクラ製 GI) の曲率に対する透過光量を測定した結果を Fig. 2 に示す。透過光量はファイバの巻数によらず、曲率にのみ変化していることがわかる。この結果より、はく離検出の場合は半径が小さい領域の方がセンサとして有効であることがわかる。従って光ファイバを CFRP 貼付面に埋込む場合、はく離が生じる際に光ファイバに局所的な変形が生じるように設定するのが好ましい。これを利用すれば、透過光量が減少し CFRP のはく離を検出できる。⁴⁾

Fig. 2. Change of output with respect to curvature of fiber.

2・2 CFRP 貼付構造物への光ファイバセンサの適用

本研究では、後述するインテリジェント構造物を考慮して、Fig. 3 に示すようなモデルでセンサ部の動作特性を検証した。CFRP のはく離の検出性能を調査するため、ゴム材 (200mm × 30mm × 30mm) の長手方向に CFRP を貼り付け、その上に垂直方向に光ファイバを貼り付けて三点曲げ試験を行った。ゴムを用いたのは、大変形が可能であり CFRP との界面に大きなせん断力を発生させることができるからである。このときはく離が生じると基材であるゴム片と CFRP の間に段差が生じ、光ファイバに曲げ変形が生じることによりファイバの光伝送能力が低下し、結果としてはく離が検知できる。しかし、三点曲げ試験を行う際にゴム片にはポアソン効果によって垂直方向のひずみも発生するため、光ファイバに長手方向の引張ひずみが生じるときの光伝送能力の影響も考慮する必要がある。そこで、この様な状況において光ファイバに負荷される曲げ変形および引張変形が透過光量に及ぼす影響を調査した。まず、ゴム材表面の長手方向に光ファイバを貼付けた供試体を作成し、Fig. 4 の様に三点曲げ試験を行った。この実験結果の負荷点変位に伴うセンサ出力変化を Fig. 4 (a) に示す。この図から、光ファイバの長手方向のひずみ変化に対しほとんど透過光量に影響がないことがわかる。また、光ファイバに段差を伴う曲げ変形を与え、その際の透過光量を測定した結果を Fig. 4 (b) に示す。この様に、光ファイバは長手方向のひずみに対しては伝送能力が低下せず、垂直方向の曲げ変形には敏感に応答することがわかり、本研究の目的であるはく離検出などに対し有効に作用するものと考えられる。次いで、Fig. 3 に示す実験を実施した。負荷点変位に対するフォトダイオード出力変化の結果を Fig. 5 に示す。はく離発生と同時に透過光量は急激に減少し、はく離検出センサとして有効であることがわかる。なお、はく離後センサ出力が上昇しているのは、光ファイバが母材からはく離することによりファイバの変形が回復することによる。

なお、構造物中の損傷発生位置は光ファイバを用いた OTDR (Optical Time Domain Reflectometry) 法によってフレネル反射光までの距離を測定することにより特定できることが著者らにより報告済み⁵⁾である。

Fig. 3. Test specimen for detection of the delamination (Unit: mm).

Fig. 4. relation between output and displacement.

Fig. 5. Output by 3-point bending on rubber model.

3 アクチュエータ部

本節では CFRP はく離補修用アクチュエータについて記述する。本研究におけるアクチュエータでは、一液熱硬化性接着剤を熱応答性カプセルに封入し埋設済みの電熱線を熱源として補修を行う。その使用材料と材料特性、システム構成および各部の動作確認結果について記述する。

3・1 接着剤

本研究では強度上から、接着補修はエポキシ樹脂で行う。また、エポキシ樹脂は金属や無機物質との接着性、電気絶縁性、耐薬品性、耐候性が良好であるため、コンクリートの補修に適する。⁶⁾ アクチュエータとして使用するためにはインテリジェント化の制御部の要求に応じて硬化させる必要があること、エポキシ樹脂は一般に主剤と硬化剤を混ぜると硬化するものが多いが、構造物に埋込んでからエポキシ樹脂の主剤と硬化剤を物理的に混ぜ合わせることは不可能であるため、エポキシ樹脂の中でも一液熱硬化型のエポキシ系接着剤 (E39 : コニシ製) を使用した。

エポキシ接着剤は一般に温度が上昇すると粘度が低下する。この性質を利用すると昇温によりはく離部に生じた CFRP とモルタルの隙間に接着剤を浸入させることが可能となる。使用したエポキシ樹脂の粘度の温度依存性を次のような手法を用いて調査した。Fig. 6 に実験に用いた接着剤の粘度測定法の模式図を示す。設定温度にしたアルミニウム板上に接着剤を厚さ約 0.45mm で塗布し、その上からアルミニウム板を置いて、重り F により負荷した場合のアルミニウム板の一定移動距離に達する時間を測定し、平均移動速度を求めた。温度および荷重を種々変更して 5 回ずつ測定した。

Fig. 6. Scheme of measurement of viscosity.

このように測定した荷重 F 、断面積 A 、速度 v_0 、二枚の板の間隔 l を利用して式 (1) より粘度 η を求めることができる。ただし、本計算では接着剤をニュートン流体であると仮定している。

$$\frac{F}{A} = -\eta \frac{v_0}{l} \quad (1)$$

粘度と温度の関係式は多数提案されているが、本研究においては式 (2) を用いた。

$$\eta = C \exp \left[a + \frac{b}{T} \right] \quad (2)$$

ただし、 a 、 b 、 C は定数であり、 $a = -17.90$ 、 $b = 6416$

Fig. 7. Viscosity of repairing epoxy.

(K), $C = 1.0$ (Pa·s) である。式 (1)を用いて、実験結果より求められた粘度温度の関係、並びに式 (2)より求められる曲線を Fig. 7 に示す。この図より接着剤の温度が標準硬化温度である 393K (120℃) に達すると今回使用するエポキシ接着剤の粘度は低下し ($\eta = 0.2072$)、その後ほぼ一定となることがわかる。これにより接着剤がはく離により生じた隙間に浸入し、その後の温度保持により硬化して隙間を埋めることが可能となると考える。

3・2 接着剤封入用カプセル

接着剤は化学的に不安定な物質であり、空気や酸、アルカリなどによって劣化することがあるため長期間の保存には適さない。従って小型のカプセルで被覆し適当な時間に内容物が解放されることが望ましいと考える。本研究では接着剤を封入するためのカプセルの材料として加硫ゴムを選んだ。この材料を選んだ理由として、(1) 内部と外部の環境を遮断することができる、(2) 温度を上昇させると圧力上昇により内部の接着剤を放出する、(3) 接着剤と反応しない、(4) 安価である、などの事項が挙げられる。

この加硫ゴムの縦弾性係数は 0.339MPa、カプセルの半径は約 10.65mm、膜厚は約 0.014mm、カプセル内圧は 9.18kPa である。

3・3 電熱線

アクチュエータ作動および接着剤硬化のためにモルタルブロックを制御部の指令に応じて加熱する必要がある。この加熱のために本研究ではニクロム線を使用した。モルタル内に埋込むと弱アルカリ環境下に曝されることになるが、ニクロム線はこの環境下で長期間耐えることが可能である。

本研究に使用したモルタル供試体は、12.5Ω の電熱線を 4 本直列につないで合計 50Ω とし、これに 100V、2A の電流を流して 200W の熱を発生させた。電熱線は Fig. 8 に示す位置に埋込むこととした。

供試体に埋設するニクロム線の配置および発生熱量を決定するための要因として、400 × 100 × 100mm のモルタル供試体において接着剤埋込み部の温度を 393K (約 120℃) にしなければならないという条件がある。本研究において使用した電熱線の配置がこのような条件を満

Fig. 8. Size of specimen and location of NiCr wire (Unit: mm).

たすかを熱伝導理論式を用いて計算した。

熱伝導計算には点熱源を有する無限平板の熱伝導式を用いて近似的に計算した。瞬間点熱源を有する無限平板の熱伝導式を式 (3) に示す。ただし、式中においてコンクリートの熱伝導率を λ 、比熱を c 、密度を ρ 、熱拡散率を k 、電熱線の発生熱量を q 、経過時間を t 、 xy 座標上の位置を (x, y) としている。

$$T(x, y, t) = \frac{q}{c\rho} \cdot \frac{1}{4\pi kt} \cdot \exp\left[-\frac{x^2 + y^2}{4kt}\right]$$

$$\begin{aligned} \lambda &= 1.0 & \text{W/mK} \\ c &= 0.84 & \text{J/gK} \\ \rho &= 2.4 \times 10^6 & \text{g/m}^3 \\ q &= 202.5 & \text{J/ms} \end{aligned} \quad (3)$$

$$k = \lambda / c\rho$$

この式を時間積分した式 (4) が連続的に点熱源から熱が発生している場合の熱伝導式である。式 (4) よりモルタルブロックにおける熱の分布が計算できる。

$$T(x, y, t) = \frac{q}{c\rho} \cdot \frac{1}{4\pi k} \cdot \int_0^t \frac{1}{t} \exp\left[-\frac{x^2 + y^2}{4kt}\right] dt \quad (4)$$

上式を用い、Fig. 8 に示す位置に熱源が存在するときの熱伝導解析を行った。解析結果として 600 秒ごとの熱分布の変化を Fig. 9 に示す。ただし、室温を 293K (20℃) に設定している。

次に計算の妥当性を確認するために実際にモルタルブロックに電熱線を埋込んだ供試体を製作した。なお、この供試体には温度計測のために熱電対を埋込んだ。

供試体寸法は 400 × 100 × 100mm とし、Fig. 8 の点 A ~ D に示す様な位置に熱電対を埋込んで測定を行った。パーソナルコンピュータからスイッチを切り替える命令を送り、電圧を計測している熱電対を A ~ D に交換しながら各熱電対接点部の温度を計測した。温度の測定結果を Fig. 10 に示す。埋設したカプセルが通電開始後約 30 秒以内に破裂することから、電熱線近傍では短時間でカプセルの動作に必要な 393K (120℃) になるものと考えられる。接着剤の硬化に必要な時間を考慮して、加熱開始後 3 600 秒で加熱を中止し、その後は自然冷却した。あわせて点 A および点 B における温度変化を熱伝導解析結果とともに Fig. 10 に示したが、両者はよく一致していることがわかる。

Fig. 9. Heat distribution at cross section of the mortar block (Unit: K).

Fig. 10. Experimental result and calculational result of relation between temperature and time at the center of hole in mortar block.

3・4 考察

一液熱硬化性エポキシ樹脂の補修用接着剤としての可能性について調査した。まず、加熱により接着剤の粘度の低下特性を調査した。接着剤温度が上昇すると粘度は急激に低下し、333K (60℃) を超えるとはく離き裂内に浸入することが容易となる。接着剤は加熱開始まで、カ

プセルに封入することにより保護した。また、接着剤自身の保存性も重要な課題となる。加熱に関しては、熱伝導計算および実際の供試体での温度計測により電熱線の位置および発生熱量を設計できた。しかし、この設計は構造物の形状などを考慮して慎重に決定しなければならない。

4 結 言

CFRP 貼付補強コンクリートにおける CFRP はく離現象を自己補修するためのセンサ、アクチュエータの特性を調査した。光ファイバをセンサとして使用し、一液性熱硬化型のエポキシ樹脂をカプセル内に封入しアクチュエータとした。まず、光ファイバセンサの曲げ、引張に対する応答を調査した。次に、アクチュエータの材料特性を調査し、はく離補修の可能性を調査した。それぞれについて以下に得られた知見を示す。

(a) センサ

光ファイバの透過光をフォトダイオードを用いて計測することによりファイバの曲げによる光損失が計測できる。また、光ファイバにはく離を模擬した段差状の変形を与えることにより透過光量が敏感に減少するので、これを用いて CFRP のはく離が検出できる。

(b) アクチュエータ

接着剤に一液熱硬化性エポキシ樹脂を用いることにより主剤と硬化剤の混合を物理的に行うことなく動作させることができる。また、接着剤を加硫ゴム製のカプセルに封入して埋設することにより接着剤を周囲の環境から保護する機能および熱によって接着剤を放出する機能を備えることができる。

以上の知見より、CFRP 補強コンクリートのインテリジェント化におけるセンサ、アクチュエータの特性が把握できたと考えられる。なお、本研究は科研費 (番号 08875022) の補助を受け実施したものである。

参 考 文 献

- 1) 真嶋光保, 幸左賢二, 大野定俊, “繊維補強セメント/コンクリート複合材料”, p.172 (1994) 技報堂.
- 2) M. V. Gandhi and B. S. Thompson, “Smart Materials”, p.162 (1990) Encyclopedia Britannica Science and the Future Year Book.
- 3) 大越孝敬, “光ファイバセンサ”, p.5 (1986) オーム社.
- 4) 座古 勝, 高野直樹, 辻上哲也, 裏垣 博, 小館一浩, 40th FRP CON-EX'95 講演要旨集, B-9 (1995).
- 5) 座古 勝, 裏垣 博, 小館一浩, 材料, 44, 493 (1995).
- 6) C. Dry, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 4, 420 (1993).